

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
DEPARTAMENT DE CIÈNCIA I ENGINYERIA NAUTIQUES

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE VISIÓN NOCTURNA
EN LA NAVEGACION MARÍTIMA Y LA SEGURIDA EN LA
MAR

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor por la Universitat Politècnica de
Catalunya

José Fº González La Flor

Director de tesis

Víctor A. García Carcellé

29 de Enero del 2010

Resumen:

La visión del marino durante el día no garantiza totalmente la seguridad del buque, pero sin luz diurna, la seguridad es limitada. El uso de sistemas de visión nocturna puede incrementar considerablemente la seguridad en la mar.

Esta tesis estudia la eficacia y fiabilidad de las posibles aplicaciones de los sistemas de visión nocturna y la correcta interpretación y evaluación de las observaciones, de forma que permitan al marino efectuar de forma efectiva las maniobras para evitar accidentes durante la navegación.

Aquellos aspectos que se han tenido en consideración se resumen en la seguridad durante la navegación, las maniobras del buque, detección humana en la mar, la seguridad en los accidentes marítimos y la seguridad interior y exterior del buque.

Para el desarrollo de esta tesis, se ha hecho un estudio general de los sistemas de intensificación de luz residual y de infrarrojo así como los factores y parámetros que afectan a su rendimiento en el medio marítimo.

También, en un trabajo de campo, se ha estudiado la capacidad de reconocimiento e identificación de buques, la interpretación de imágenes de infrarrojo y la detección humana en la mar. Después, los resultados son contrastados con un estudio estadístico entre el personal utilizador de estos sistemas.

En general, los resultados confirman la capacidad de los sistemas de visión nocturna para incrementar la seguridad en la mar, excepto los sistemas de intensificación de luz residual que no son suficientemente efectivos.

Entre los sistemas de infrarrojos, las cámaras térmicas ofrecen una buena relación entre el rendimiento y el coste y para operaciones en que no se requieran grandes distancias de detección son una buena opción, para incrementar la seguridad en la navegación.

Desde el punto de vista del marino y en lo referente a la seguridad en la navegación y en las maniobras del buque, los sistemas de infrarrojo mejoran la correcta aplicación del Reglamento Internacional para la Prevención de Abordajes en la mar (RIPA) y la adecuada identificación de las señales marítimas, así como incrementan la probabilidad de encontrar y rescatar un hombre en la mar. También puede ser muy efectivo contra el robo y la piratería.

No obstante, estos sistemas no pueden considerarse el elemento principal de la navegación sino como accesorio del radar. Aunque el uso de las cámaras nocturnas es fácil, es importante tener en cuenta que sin un apropiado entrenamiento y una vigilancia efectiva, estos sistemas pueden perder efectividad.

Abstract:

The sight of sailors during the day can not totally guarantee the ship's security, and of course even less at night without daylight. The use of night vision systems can increase substantially the security at sea.

This thesis studies the efficiency and the accuracy of the possible applications of night vision systems and the correct interpretation and valuation of the observations so that the sailors can carry out the maneuvers correctly to avoid accidents during navigation.

The security aspects that have been taking into consideration are summarized in navigation security, ship maneuvers, human detection at sea, security in maritime accidents and inside and outside security of the ship.

For the development of this thesis, there was a general investigation of the light intensifier system and infrared system, as well as factors and parameters that affect their performance in the maritime surroundings.

In a field work there was investigated the ship's detection and identification capacity, the interpretation of the infrared images and the human detection at sea. Later, these results were compared with the results of a statistic study among users of these systems.

In general the results confirm the capacity of the night vision systems to improve the security at sea, except for the light pollution intensifier systems which isn't effective enough.

Among infrared systems, the thermal cameras offer a good relationship between the performance and the costs and for operations that don't need long distance identification they are a good option to increase the navigation security.

From the point of view of the sailors and related to navigation security and the ship maneuvers, infrared systems improve the correct application of the Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs) and an appropriate identification of the maritime signals and also increasing the probability to find and rescue a person at sea. It can also be very effective against robbery and piracy.

Nevertheless, these systems can't be considered the main system of navigation but as accessory of the radar. Although the use of night cameras is easy, it's important to take into considerations that without an appropriate training and an effective watch, these systems can loose effectivity.

El agradecimiento es la memoria del corazón.

E pluribus unum
In memoriam Dr. Joan Olivella

Tabla de contenido

Tabla de acrónimos.....	3
Capítulo 1. Introducción.....	5
1.1. MOTIVO Y OBJETIVOS DE LA TESIS.....	5
1.1.1. Exposición de motivos.....	5
1.1.2. Objetivos generales.....	5
1.1.3. Objetivos específicos.....	6
1.2. SEGURIDAD Y VISIBILIDAD EN LA OSCURIDAD.....	6
1.2.1. Visibilidad y naturaleza de la luz.....	6
1.2.2. Seguridad en la mar y visibilidad.....	7
1.3. SISTEMAS DE VISIÓN NOCTURNA.....	9
1.3.1. Intensificadores de luz residual.....	10
1.3.2. Cámaras de Infrarrojos.....	12
1.3.3. Diferencias entre las cámaras de IR e intensificadores de luz residual.....	16
1.4. APLICACIÓN DE LA VISIÓN NOCTURNA EN EL ÁMBITO MARÍTIMO.....	20
1.5. LEGISLACION y SISTEMAS DE VISIÓN NOCTURNA.....	26
Capítulo 2. Material y Método.....	29
2.1. SEGURIDAD Y SISTEMAS DE VISIÓN NOCTURNA.....	30
2.1.1. Intensificador de luz residual.....	30
2.1.2. Sistemas de Infrarrojos.....	98
2.2. ESTUDIO DE CAMPO.....	201
2.2.1. Seguridad en la navegación y la visión de Infrarrojos.....	210

2.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO	299
2.3.1. Introducción.....	299
2.3.2. Resultados descriptivos.....	301
2.3.3. Resultados según grado de experiencia o tipo de barco.....	309
2.3.4. Resumen estadístico.....	316
Capítulo 3. Resultados	321
3.1. SISTEMAS DE INTENSIFICACIÓN	321
3.1.1. Intensificadores de luz residual portátiles	321
3.1.2. Sistemas anticolidión para buques HSC.....	324
3.2. SISTEMAS DE IR.....	327
3.2.1. Consideraciones generales	327
3.2.2. Resultados de estudios de campo.....	333
3.2.3. Resultados estudio estadístico.....	339
Capítulo 4. Discusión.....	341
Capítulo 5. Conclusiones.....	345
Capítulo 6. Bibliografía.....	347

Tabla de acrónimos

CCD	Coupled Charge Device
CMOS	Coementary Metal Oxide Semiconductors
EBI	Equivalent Background Input
ESD	Extrinsic Silicon Detector
FC	Fotoconductor
FE	Field of View
FLIR	Forward Looking Infrared
FOV	Field of View
FPA	Focal Plane Array
FV	Fotovoltaico
H/C	Helicoptero
HSC	High Speed Craft
I ₂	Image Intensification
I ²	Image Intensification
IEC	International Electrotechnical Commission
IFOV	Instantaneous Field of View
IMO	International Maritime Organization
IR	Infrared
IRST	Infrared Search and Track
ISO	International Organization for Standardization
LCD	Liquid Crystal Display
LNG	Liquefied Natural Gases
LWIR	Long Wave Infrared
MCP	Microchannel Plate
MCT	Mercury Cadmium Telluride
MDT	Minimum Detectable Temperature
MFOV	Medium Field of View
MIR	Mid Infrared
MRTD	Minimum Resolvable Temperature Difference
MSC	Maritime Safety Committee
MTF	Modular Transfer Function
MW	Mid Wave Infrared
MWIR	Mid Wave Infrared
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NFOV	Narrow Field of View
NIR	Near Infrared
NUC	Non Uniformity Correction
NVEO	Navy Night Vision/Electro-Optics
NVESD	Night Vision & Electronics Sensor Directorate
OSV	Off Shore Vessel
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetector
RIPA	Reglamento Internac. para la Prevencion de Abordages
ROIC	Read-out Integrated Circuit

SCR	Signal to Clutter Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SWIR	Short Wave Infrared
TDI	Time Delay Integration
TEC	Thermoelectric Cooler
TRC	Temperature Coefficient of Resistance
TTP	Targeting Task Performance
USCG	United States Coast Guard
VN	Visión Nocturna
WFOV	WideField of View

Capítulo 1. Introducción

1.1. MOTIVO Y OBJETIVOS DE LA TESIS

1.1.1. Exposición de motivos

Estudiar aquellos caminos que conducen a incrementar la seguridad del hombre en la mar, es el imperativo que legitima la realización de esta tesis, ya que la vida es un valor supremo.

La visión del marino durante el día por sí misma no garantiza la seguridad del buque, pero sin ver, la seguridad es imposible. Así pues, la noche solo puede permitir una seguridad limitada.

Por tanto, si se disponen de medios para posibilitar la visión durante la noche, se puede incrementar considerablemente la seguridad en la mar.

Es evidente. No hay más ciego que el que no quiere ver. Debemos quitarnos las vendas de los ojos, para ver más allá de las posibilidades del ojo humano con la ayuda de las nuevas tecnologías.

Para evitar que estas nuevas tecnologías nos deslumbren con sus innovaciones, también tenemos la obligación de no caer en la tentación de creer que estas nuevas tecnologías, diseñadas un sus orígenes para otros cometidos, sean perfectas, por lo que debemos estudiarlas y conocerlas.

Si queremos ver más allá de nuestras limitadas posibilidades en la oscuridad de la noche, pero sin ser deslumbrados, tenemos la obligación de investigar sobre la posibilidad real de la aplicación en nuestro campo de trabajo.

1.1.2. Objetivos generales

Primero: Conocer estas nuevas tecnologías

Segundo: Identificar las posibles aplicaciones en el campo de la navegación y la seguridad Marítima

Tercero: Estudiar la eficacia y fiabilidad de las posibles aplicaciones

Cuarto: Proponer las características necesarias para mejorar la eficacia y fiabilidad de su aplicación

1.1.3. Objetivos específicos

Saber que tecnología permiten incrementar la seguridad marítima y determinar en que circunstancias resulte más eficaz.

Dar las pautas para una correcta interpretación y evaluación de los resultados de una observación al objeto de mejorar la seguridad marítima

1.2. SEGURIDAD Y VISIBILIDAD EN LA OSCURIDAD

1.2.1. Visibilidad y naturaleza de la luz

Visibilidad es la mayor o menor distancia a que según las condiciones atmosféricas, pueden percibirse por los ojos los objetos mediante la acción de la luz. Por lo tanto la visibilidad, está directamente relacionada con las condiciones atmosféricas y la cantidad de luz.

La luz, que llega a nuestros ojos y nos permite ver, es un pequeño conjunto de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda comprendidas aproximadamente de 0.36 a 0.8 μm .

La luz forma parte del espectro electromagnético que comprende tipos de ondas tan dispares como los rayos cósmicos, los rayos gamma, los ultravioletas, los infrarrojos y las ondas de radio o televisión entre otros (Fig.1.1).

Así mismo, la naturaleza de las diferentes condiciones atmosférica que pueden alterar, de una forma u otra en la visibilidad, es variada.

Dado que las condiciones atmosféricas resulta imposible modificarlas y en cuanto a la cantidad de luz, la producción artificial de la misma es muy limitada comparada con la superficie a iluminar, se llega a la conclusión elemental que la única forma de aumentar la visibilidad en la mar es mediante la ayuda de medios electrónicos u optoelectronicos, que permitan ver sin luz.

Descartando la aplicación del radar como elementos de visión, solo nos queda el recurso de la visión nocturna, en cualquiera de los dos sistemas actuales que la tecnología a puesto a disposición del marino y que son la intensificación de la luz residual y la visión térmica o de infrarrojos.

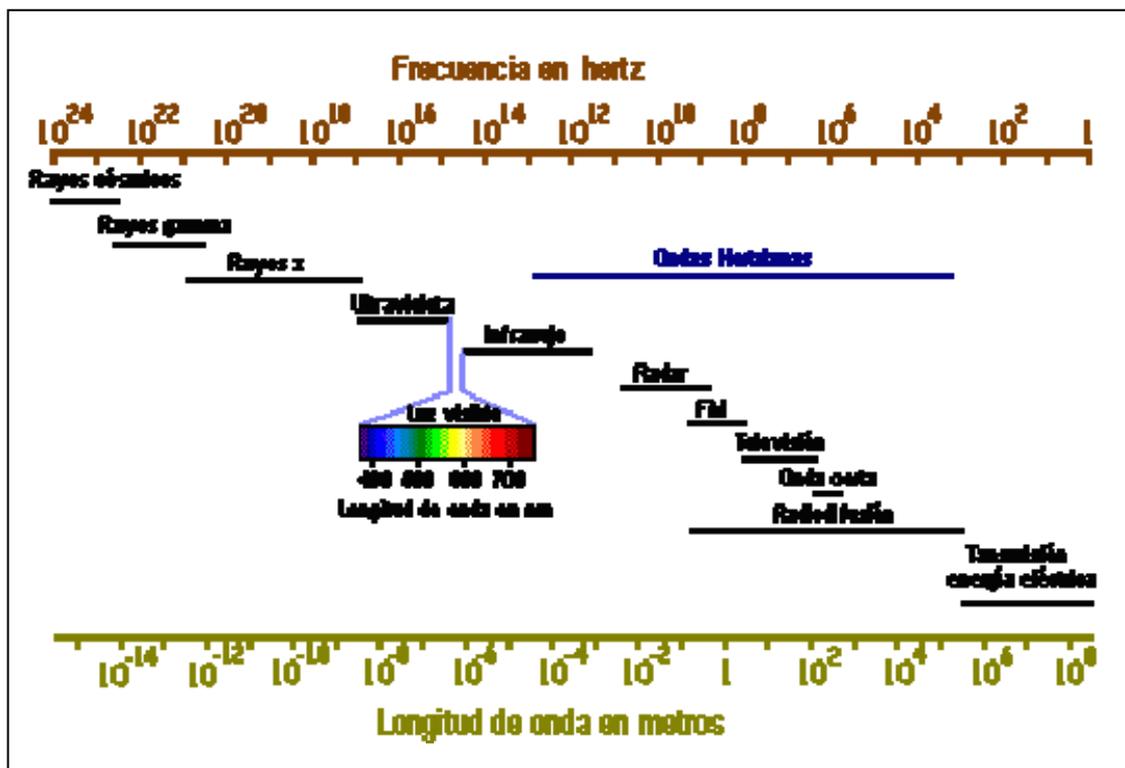


Fig.1.1

1.2.2. Seguridad en la mar y visibilidad

Seguridad se entiende como aquellas acciones que se tomen para el buen funcionamiento del buque o que conduzcan a evitar accidentes y riesgos durante la navegación.

Por tanto debemos identificar las actuaciones, acciones o procedimientos en los que se pueda incrementar la seguridad y que están condicionadas de una forma directa por la visibilidad. Estas actuaciones son:

♦ Seguridad en la navegación y en las maniobras del buque

- observancia en la aplicación del RIPA.
- evitar la colisión con elementos flotantes o animales marinos (p.e. ballenas)
- identificar correctamente las señales marítimas o elementos prominentes de la costa durante la noche.
- navegación con visibilidad reducida
- seguridad en las maniobras nocturnas
- recaladas nocturnas en puertos, fondeaderos o radas.

- embarque de prácticos
 - maniobra de toma de remolcadores
 - identificación de muelles y distancia a los mismos
 - seguridad del personal de tierra y a bordo durante las maniobras
 - seguridad en caso de falta de energía eléctrica
 - maniobras nocturnas del buque por personal en cubierta
- ◆ Seguridad de la vida humana en la mar
- búsqueda y recogida de hombre al agua o náufragos
- ◆ Seguridad en los accidentes marítimos
- remolques, salvamentos, naufragios y varadas
 - control de derrames de hidrocarburos o contaminación en zonas portuarias, o en mar abierto.
 - control marítimo y en zonas de separación de tráfico. torres de control y seguridad en el tráfico portuario
- ◆ Seguridad interior y exterior del buque
- incendio a bordo y detección de gases explosivos
 - control de daños
 - vigilancia de intrusión o robo
 - actos de piratería
 - control de daños

En todas estas situaciones, las acciones que pueden evitar o minimizar accidentes están limitadas cuando la visibilidad no es suficiente. Cuando la falta de visibilidad es consecuencia de la falta de luz y no de las condiciones atmosféricas, los equipos de visión nocturna pueden incrementar considerablemente la seguridad.

1.3. SISTEMAS DE VISIÓN NOCTURNA

Los equipos de visión nocturna son aquellos que permiten realizar múltiples tareas visuales, como por ejemplo distinguir objetos en la oscuridad de la noche.

Los sistemas que actualmente se comercializan fuera del ámbito militar y son susceptibles de su estudio en esta tesis son:

- Intensificadores de luz residual (I^2).
- Cámaras de Infrarrojos (IR).

Cada uno de estos sistemas, aunque comparten una misma finalidad, son completamente distintos en cuanto a su funcionamiento.

Así pues, los equipos de visión nocturna pueden dividirse en dos grandes grupos:

Los sistemas que utilizan la luz residual de la noche amplificándola mediante tubos intensificadores (I^2)

Los sistemas denominados de infrarrojos (IR), que a su vez se dividen en los que detectan la emisión infrarroja emitida por los objetos observados como consecuencia de su condición térmica (cámaras fotónicas) o los que miden las diferentes temperaturas de la imagen observada (cámaras térmicas)

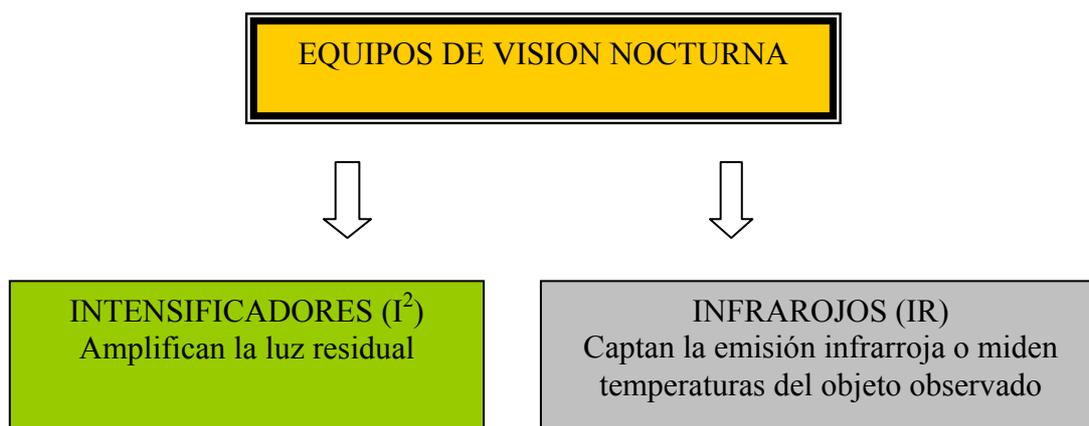


Fig.1.2

Aunque el láser no sea un equipo de visión nocturna, puede ser utilizado conjuntamente con las otras dos tecnologías para la iluminación o telemetría de los objetivos observados, además de otras aplicaciones puramente militares (guiado de misiles, iluminación de blancos...). También se están desarrollando sistemas que mejoran la detección utilizando láser pulsado.

A medida que se desarrolla la tecnología de estos equipos, existe una tendencia a unir en un mismo sistema de visión diferentes cámaras (infrarrojo, intensificación y visión diurna) dentro de un único equipo.

Una de la tendencia más vanguardista consiste en la tecnología conocida como “fusión de imagen”. Estos equipos unen ambas tecnologías consiguiendo mediante algoritmos una única imagen de la señal procedente de distintos detectores, aprovechando las ventajas de cada uno, así por ejemplo, la visión infrarroja se utilizaría principalmente para la detección y la intensificación para la identificación

1.3.1. Intensificadores de luz residual.

Durante la noche, existe una pequeña cantidad de luz o radiación procedente de distintas fuentes, que pueden ser naturales (luna, estrellas) o artificiales (por ejemplo la luz procedente de una ciudad). El valor de la iluminancia nos indica la cantidad de luz residual existente durante la noche (Fig.1.3)

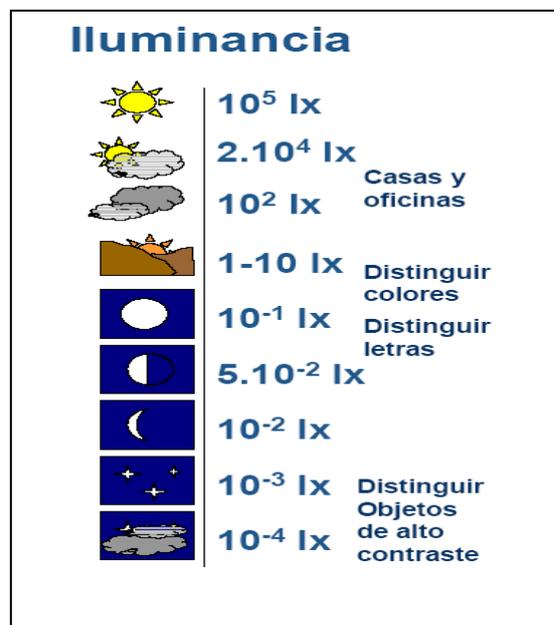


Fig.1.3

Los valores de la iluminancia durante la noche procedente de astros y/o estrellas oscila entre 10^{-1} lx a 10^{-4} lx, un función del número de octas de cielo cubierto.

La cantidad de luz la llamamos “Iluminancia” y es la magnitud que expresa el flujo luminoso que incide sobre la unidad de superficie y su unidad en el sistema Internacional es el Lux (lx).

Los equipos de visión nocturna mediante la amplificación de la luz residual trabajan en el rango de 10^{-6} lx a 10^{-1} lx. El rendimiento de estos equipos variará en función del valor de la iluminancia. A mayor iluminancia obtendremos mejores resultados.

1.3.1.1. Reseña histórica.

La tecnología de la visión nocturna, es relativamente muy reciente y tiene su origen en el uso exclusivamente militar. Por tanto su historia está basada en la aplicación en los sucesivos conflictos armados de este mundo, y adquirió especial relevancia durante la guerra del Golfo Pérsico en el año 1991.

Durante la Segunda Guerra Mundial, alemanes, americanos y británicos introdujeron miras infrarrojas en sus rifles, lo que permitió a los francotiradores operar durante la noche. Estos sistemas primitivos necesitaban producir una iluminación artificial, no visible al ojo humano, pues la luz residual de la noche no era suficiente.

El interés por estos equipos de visión nocturna decreció después de su uso experimental durante la segunda guerra mundial y su desarrollo se estancó durante los años 40, pero en 1950 y tras el éxito aplastante del ataque comunista chino sobre Corea, se demostró que la habilidad para luchar en la noche era esencial en la guerra moderna, extendiéndose nuevamente de esta forma un interés sobre esta tecnología.

En 1954 y de la mano de la industria privada surgió el primer proyecto de desarrollo de los rudimentarios visores nocturnos desarrollados por el ejército de los EEUU. Estos visores resultaban un tanto voluminosos y pesados y eminentemente eran para el uso desde un vehículo. Este tipo de tecnología dio pie al inicio de la “generación 0”.

En 1965 la entrada de los Estados Unidos en la guerra del Vietnam, supuso otro impulso para el desarrollo de la visión nocturna y sirvió para la evaluación de los ya existentes.

En los sesenta se produjo otro gran avance tecnológico en el desarrollo de la visión nocturna y fue la placa de micro canales (MCP) y de la mano de esta tecnología se llegó a la generación 2, la que presenta unas mayores prestaciones y un tamaño reducido.

Las empresas que fabrican los tubos intensificadores de luz residual están muy vinculadas a la industria electrónica del semi- conductor, ya que su fabricación implica trabajar en recintos limpios y en condiciones de vacío. El proceso de fabricación es muy complejo e implica unos 400 procesos físicos y 200 químicos.

Las últimas generaciones de tubos, han hecho que los equipos menos modernos pierdan demanda militar y esto ha estimulado a los fabricantes a buscar nuevas aplicaciones más comerciales, dando paso a la utilización a las agencias gubernamentales de vigilancia fiscal, policial, patrulla de fronteras etc. siendo éste un campo de actual desarrollo.

1.3.2. Cámaras de Infrarrojos

1.3.2.1. Concepto de la energía infrarroja

Se entiende por radiación electromagnética, las ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda altas). La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético.

Las unidades de medida de las longitudes de ondas en el Sistema métrico son el micrómetro (μm) y el nanómetro (nm)

1/1.000 de milímetro = 1 micrómetro (μm), antiguamente micrón

1/1.000 de micrómetro = 1 nanómetro (nm)

La parte del espectro electromagnético, que corresponde a la luz visible, según el International Lightning Vocabulary, se encuentra aproximadamente entre 0.36-0.4 y 0.76-0.820 μm y el ojo humano puede distinguir los colores porque discriminamos entre las diferentes longitudes de onda.

Por orden decreciente de frecuencias (o creciente de longitudes de onda), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, infrarrojos, microondas y ondas de radio. (Fig.1.1)

Por tanto, los Infrarrojos (IR), Rayos infrarrojos o luz infrarroja, es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas en la zona del espectro situada inmediatamente después de la zona roja de la radiación visible. La longitud de onda del IR comienza en 0.78 μm .

Tradicionalmente el infrarrojo se ha considerado que comienza más allá de los 0.7 micrómetros, que es cuando el ojo humano pierde su sensibilidad, sin embargo con la maduración de los sensores en cámaras de visión diurna así como los dispositivos de carga acoplada (CCD), ha supuesto un aumento del sector visible más allá de los 0.7 μm .

Por otro lado y aunque el IR termina en los 1000 micrómetros, las aplicaciones más comunes en la que trabajan los detectores de IR, está por debajo. Sin embargo, y debido a la atenuación atmosférica, para cada aplicación o requerimiento existen zonas del espectro más adecuadas y que se estudian en capítulos siguientes.

La radiación infrarroja tiene un comportamiento similar al de la luz visible, viaja a la misma velocidad y también puede absorberse, reflejarse, refractarse, transmitirse y emitirse. El comportamiento de esta radiación se estudia en la radiometría infrarroja.

La detección y observación mediante la utilización de la energía infrarroja permite la formación de una presentación visual del objeto en la total oscuridad. Durante el día la tierra y todo la materia se calienta por efecto de la luz solar. Este calor es liberado constantemente por todos los cuerpos, y es esa radiación de calor la que constituyen la radiación infrarroja.

Todos los objetos emiten radiación infrarroja en función de su temperatura. A mayor temperatura del objeto, mayor energía infrarroja emite. Esta energía puede detectarse mediante cámaras de infrarrojos. Estas cámaras no pueden ver la temperatura, pero sí pueden detectar su radiación térmica. Sin embargo mucha emisión IR del espectro no se puede usar por los sistemas de detección ya que la radiación es absorbida durante la transmisión atmosférica.

Por lo tanto, podemos definir la tecnología de la visión infrarroja, como la técnica que produce una imagen visible de un objeto, captando su emisión infrarroja debido a su condición térmica. Como veremos en capítulos posteriores el objetivo final de un sistema de visión nocturna es poder distinguir a un objeto determinado y el fondo de la imagen que lo envuelve.

La radiometría y la fotometría estudian el comportamiento de la radiación electromagnética y la relación y aplicación en las características de los sistemas de visión nocturna. En el campo de la visión infrarroja la característica de la absorción y la emisión energía infrarroja de un objetivo y del resto de la escena observada es uno de las condiciones más importantes. Los objetos tienden a adsorber la energía solar y la consecuente emisión en hasta su condición de equilibrio térmico. La distribución espectral y la magnitud de la radiación del objeto observado son principalmente funciones de temperatura y de su emisividad.

La ley de Kirchhoff establece que un cuerpo que es buen emisor de energía es también buen absorbedor de dicha energía. A igualdad de temperatura, la energía emitida depende también de la

naturaleza de la superficie; así, una superficie mate o negra tiene un poder emisor mayor que una superficie brillante.

Por ejemplo, la energía emitida por un filamento de carbón incandescente es mayor que la de un filamento de platino a la misma temperatura.

Así mismo, las principales leyes que rigen los principios del comportamiento de la radiación infrarroja están basados en la “radiación de un cuerpo negro” y que son la Ley de Plank, Ley del desplazamiento de Wien y la Ley de Stefan-Boltzman (76) (39).

Un cuerpo negro es un objeto teórico ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite luz y constituye un modelo ideal físico para el estudio de la emisión de radiación electromagnética. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro.

Todo cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas, siendo esta radiación, que se emite incluso en el vacío, tanto más intensa cuando más elevada es la temperatura del emisor. La energía radiante emitida por un cuerpo a temperatura ambiente es escasa y corresponde a mayores longitudes de onda que las de la luz visible.

La Ley de Plank relaciona la radiación emitida, la temperatura del objeto emisor y la longitud de onda de esa emisión y determina que a medida que aumenta la temperatura de un cuerpo existe mayor radiación y en un rango mayor del espectro.

Ley del desplazamiento de Wien relaciona la temperatura de la superficie de un cuerpo con la longitud de onda con la que irradia el máximo de energía. La ecuación de esta ley nos indica que cuando la temperatura de la superficie de un cuerpo aumenta, la longitud de onda que corresponde al máximo de radiación de un cuerpo disminuye. Esto es lo que se conoce como el desplazamiento del máximo de radiación en función de la temperatura

Ley de Stefan-Boltzman nos permite conocer la totalidad de energía emitida por un cuerpo negro y muestra que a medida que aumenta la temperatura de un cuerpo, más cantidad de energía libera y más proporción de esta dentro del campo visible. Tras pasado cierto umbral de temperatura, el cuerpo se vuelve incandescente.

Como resumen podemos decir que al aumentar la temperatura de un cuerpo, la radiación de energía es mayor y varía en un mayor rango del espectro. También a medida que continúa el aumento, la longitud de onda de esa radiación disminuye llegando al punto máximo de incandescencia entrando en la zona visible del espectro. Un ejemplo de este principio es el sol, que en su punto máximo de temperatura (5.727°C), emite el máximo de energía y en una longitud de onda en el centro del espectro visible y que es precisamente donde las células detectoras del ojo humano están adaptadas y sensibles a unas determinadas longitudes de onda.

1.3.2.2. Detectores de IR: Evolución y clasificación

La industria de carácter militar fue el inicio de la tecnología y comercialización de la visión nocturna de infrarrojos, pero el mercado está cambiando debido (además de a temas meramente militares y estratégicos), principalmente al desarrollo de detectores termales en los que no es necesario un sistema de enfriamiento imprescindible para el funcionamiento en algunas cámaras, lo que permite la fabricación de equipos con precios cada vez más asequibles.

Este abaratamiento está propiciando el aumento de cámaras de infrarrojos de uso dual, (militar y civil), sobre todo en los no enfriados, dado que son más baratos.

El crecimiento de este uso dual y la disminución de costes, están propiciando su utilización en vehículos en el transporte terrestre tanto comercial como particular, así como en la náutica deportiva.

Los sistemas enfriados, tiene un coste más alto pero mejor calidad y sensibilidad. También están mejorando y abaratando, aunque más lentamente que los no enfriados. Incluso la última tecnología en detectores enfriados, llamada QWIP, que en capítulos posteriores describimos, están bajando de precio y ya son asequibles comercialmente.

Existen dos métodos de detección óptica de IR:

- detectores fotónico o foto detectores
- detectores de energía o termales

Los fotodetectores son detectores ópticos que permiten la visión nocturna por la interacción directa de la radiación electromagnética de IR contra la estructura atómica de un material sensible.

Los detectores de fotones generan cargas eléctricas por la interacción o choque de los fotones sobre materiales que generan la liberación de electrones. Esta interacción de ondas electromagnéticas y materia y la liberación de electrones producen cambios en los parámetros del material detector que pueden ser medidos.

Los parámetros físicos que pueden cambiar en un fotodetector son la resistencia, la inductancia, el voltaje y la corriente de la emisión externa de electrones.

En función de estos cambios pueden ser

- fotoconductoras.....variación de resistencia
- fotovoltaicas..... variación de la capacidad
- fotoemisivos..... variación del voltaje

Estos detectores son más caros aunque la tendencia, debido a la simplificación y al aumento de la producción en la fabricación, está permitiendo alcanzar precios más comerciales. Estos detectores ofrecen mayores prestaciones y calidad de detección.

Los detectores de energía o termal responden a los cambios de temperatura generada por la incidencia del IR produciendo cambios en las propiedades de la materia del sensor. Este tipo de detectores son más baratos y se utilizan en aplicaciones más simples, aunque empiezan a ser económicamente rentables y técnicamente más eficaces. Hay que tener en cuenta que en el proceso de detección termal, la absorción de la radiación debe producir un cambio de temperatura de los elementos de detección por lo que la respuesta es más lenta que en los detectores fotónicos.

1.3.3. Diferencias entre las cámaras de IR e intensificadores de luz residual

Los principios y funcionamiento de la visión IR, son significativamente diferentes a los sistemas de visión nocturna que utilizan intensificadores de luz residual. Las principales diferencias son;

Intensificadores:

- ✓ necesitan luz residual
- ✓ baratos
- ✓ poco mantenimiento
- ✓ pueden ser “deslumbrados” por una fuente de luz intensa (focos de luz artificial)

Visión infrarroja:

- ✓ trabajan en absoluta oscuridad
- ✓ necesita contraste térmico
- ✓ necesitan ópticas especiales
- ✓ son más caros y algunas cámaras necesitan enfriadores
- ✓ necesitan más mantenimiento
- ✓ más voluminosos y algo pesados
- ✓ empleada tecnología similar a las de la visión de imágenes diurnas de último desarrollo
- ✓ no se puede ver a través del cristal común

En la imagen de la Fig.1.4 se muestran modelos de equinos portátiles de visión nocturna con intensificación de luz residual.



Monóculo Marino ITT. Tubo Gen 3



Binoculares marinos de gama alta, con tubo intensificador de Gen 3.
Control de ganancia ajustable.
Resistente al agua y flotante

Fig.1.4

En la imagen de la Fig.1.5 se muestran una cámara fija de IR



Sistema de visión termal, SEA LYNX, de fabricación Rusa, compuesto de una cámara rotatoria, montada sobre el puente o en el palo y panel de control con su monitor instalado en el puente

Fig.1.5

En la imagen de la Fig.1.6 se muestran dos cámaras portátiles de visión infrarroja para visión nocturna.



Binocular de IR de de la marca THOMSON



Raytheon NightSight Palm IR 250, cámara termal portátil de aplicación marítima

Fig.1.6

1.4. APLICACIÓN DE LA VISIÓN NOCTURNA EN EL ÁMBITO MARÍTIMO

En el Capítulo 1.2.2 identificamos aquellos procedimientos en los que el uso de la visión nocturna puede incrementar la seguridad de estas acciones. En este capítulo se justifica la utilización de los mismos.

◆ Seguridad en la navegación y en las maniobras del buque

La posibilidad que ofrecen los equipos de visión nocturna de detectar y reconocer buques en la mar durante la noche supone un gran avance en la seguridad de la navegación.

Estos sistemas, dado sus limitaciones actuales, quizás no puedan considerarse como un elemento principal de detección, ya que no pueden compararse con las cualidades del radar, pero considerándolo como complemento de este, permite incrementar considerablemente la seguridad de navegación.

El radar puede detectar a otro buque a mucha mayor distancia, y nos da información de su rumbo, velocidad, la distancia a la que pasará y también podemos interpretar los cambios de rumbo, pero solo vemos un punto en la pantalla.

Con un equipo de visión nocturna podemos ampliar considerablemente esa información, viendo directamente otros aspectos que pueden ser muy importantes a la hora de efectuar una maniobra, como puede ser el tipo de barco, porte y antigüedad, nivel de carga y las condiciones en que navega, cómo le puede estar afectando el estado de la mar y cualquier otra información que aporte elementos de juicios necesarios para poder efectuar una maniobra en situaciones comprometidas.

Las consideraciones anteriores son esenciales para los barcos de pasaje de alta velocidad ya que tienen menor tiempo de respuesta. En la actualidad se están utilizando las cámaras de visión nocturna VN como sistemas anticolidión en diferentes áreas del planeta. En estas zonas puede darse un alto grado de concentración de embarcaciones pequeñas o riesgo de colisión con elementos flotantes, boyas, troncos, palangres o artes de pesca, animales marinos (ballenas) o cualquier otro peligroso para la navegación.

Dentro de esta aplicación como sistema anticolidión se han efectuado estudios para algún tipo de tráfico específico, como puede ser el riesgo de choque con ballenas en zonas de mucha densidad, aportando soluciones efectivas (144).

El uso de sistemas de visión nocturna está reglamentado por la IMO en el International Code of Safety for High Speed Craft, como veremos más adelante.

Navegando en condiciones de baja visibilidad, los equipos de visión nocturna basados en la detección infrarroja o termal permiten mejorar la visión en condiciones de niebla o humo, aportando un mayor grado de seguridad en la navegación, ya que el índice de accidentes por abordaje en estas condiciones es considerablemente mayor.

Distintos artículos en publicaciones náuticas especializadas confirman el beneficio que supone la instalación de estos equipos en buques especializados, como son los buques de apoyo a plataformas (Off Shore vessel – OSV) (101)



Imagen obtenida con una cámara Vistar 223

Fig.1.7

La recalada en un puerto desconocido durante la noche implica siempre un riesgo, que se incrementa con la concentración del tráfico de barcos de todo porte y embarcaciones de recreo pequeñas que pueden ser fácilmente indetectables.

Con los sistemas de visión nocturna pueden reconocerse elementos que ayudan en la recalada y entrada en un puerto, como son boyas, espeques, espigones, malecones, atraques, edificios significativos, enfilaciones, marcaciones, etc. . También pueden reconocerse accidentes de la costa para acceder a fondeaderos y radas.(Fig. 1.7)

Igualmente debe tenerse en cuenta las posibilidades de la visión nocturna en maniobras nocturnas como el embarque de prácticos o las maniobras de remolcadores de puerto.

En las maniobras de atraque puede ser de gran utilidad ver con claridad elementos , como pueden ser la orientación y el estado de los muelles o amarraderos, estado y situación de defensas u obstáculo que pueda causar alguna avería en el costado del buque, así como una infinidad de circunstancias adversas que durante la noche pueden pasar desapercibidas.

La posibilidad de poder observar con claridad al personal durante una maniobra en cubierta, el atraque o remolque, ofrece una información adicional que incrementa la seguridad y puede ayudar a la tomar decisiones durante una maniobra.(Fig.1.8)



Fig.1.8

◆ Seguridad de la vida humana en la mar:

En cuanto a su aplicación de la seguridad de la vida humana en la mar los equipos de visión nocturna son una herramienta fundamental para salvaguardar la vida de náufragos. La posibilidad que nos ofrecen estos equipos de continuar la búsqueda y la posterior recogida de náufragos durante la noche, es de un valor incalculable. En las imágenes de la Fig.1.9 puede observarse la diferencias de una imagen de un naufrago en la noche y la obtenida con una cámara de IR.



Fig. 1.9

◆ Seguridad en los accidentes marítimos:

Otra importante aplicación es la posibilidad de efectuar salvamentos en la mar en cualquier condición de visibilidad, así como efectuar remolque, trasbordos de personal o la evacuación de heridos.

La posibilidad de valorar las condiciones en que se encuentra el buque siniestrado, y detectar derrame de combustible o pérdidas de la carga y evolución, dispersión o seguimiento de incendio en bodegas.

Detección y control de la contaminación por derrames de hidrocarburos o contaminación en zonas portuarias, o en mar abierto. El uso de sistemas de visión nocturna es fundamental en el control marítimo o en zonas de separación así como en torres de control y seguridad de tráfico portuario.

◆ Seguridad interior y exterior del buque:

Otra posible aplicación es en la emergencia de un buque por la noche en la que falte el suministro eléctrico, permitiendo controlar las posibles emergencias que puedan surgir en la oscuridad.

También importantes pueden ser el control y localización de focos de calor o incendios incipientes o la localización de personas a través del humo. (Fig. 1.10)

Los riesgos de intrusión, de robo o el control de polizones en puerto y la prevención de acciones piratas o secuestros navegando se pueden evitar o minimizar con el uso de cámaras de vigilancia de visión nocturna.

La evolución de estos sistemas es continua con lo que es de esperar nuevas aplicaciones más específicas, como puede ser la detección de gases inflamables para lo que se han hecho algún estudio (77).



Arriba, imagen de visión a través del humo en el interior de un buque. Abajo, la misma imagen utilizando un equipo de imagen térmica

Fig. 1.10

1.5. LEGISLACION Y SISTEMAS DE VISIÓN NOCTURNA

Las aplicaciones de los sistemas de visión nocturna es amplia y se está produciendo una disminución de precios aunque aun no se ha alcanzado un nivel alto de utilización. Una de las primeras aplicaciones para uso civil ha sido en buques de alta velocidad, para la que existe una legislación específica promovida por la IMO.

El Comité para la Seguridad Marítima por la resolución MSC.36 estableció la aplicación de código para buques de alta velocidad en 1994, obligatorio bajo el capítulo X del Convenio Internacional para la Seguridad Humana en la Mar (SOLAS).

En Julio del año 2000 por resolución MSC.97 entró en vigor el código internacional de seguridad actualizado para buques de alta velocidad (HSC 2000 Code)

La filosofía de este código es trabajar para la disminución de riesgos en el pasaje, el buque y su tripulación en buques HSC. En el capítulo 13 del código para HSC trata sobre los sistemas y equipos de navegación a bordo. En el apartado 13.10 establecen que cuando las condiciones operacionales justifiquen la provisión de equipos de visión nocturna, dichos equipos deberán ser instalados, aunque no indica que su uso sea obligatorio, por lo que es la administración de cada país la que determina cuando deberán instalarse estos sistemas y para que tipo de tráfico en particular.

En el apartado 13.17 establece que la aprobación de los sistemas y equipos corresponde a la Administración de cada país, pero los estándares de funcionamiento serán los mismos y no inferiores a los estándares establecidos por la Organización. Los requerimientos de rendimiento de los estándares establecidos por la IMO coinciden con los estándares europeos publicados por el Comité Internacional Electrotécnico (IEC) de la Organización Intencional para la Estandarización (ISO)

La resolución del Comité para la Seguridad Marítima MSC.94 adoptada el 22 de Mayo de 2000 establece los estándares de rendimiento para los equipos de visión nocturna para buques de alta velocidad (HSC), en el que reconoce que el uso de los equipos de visión nocturna a bordo de este tipo de buques mejorará la seguridad del buque cuando éste navegue de noche y que la información obtenida a partir del equipo constituye una ayuda complementaria al radar y consecuentemente a la navegación.

De acuerdo con esta directiva del rendimiento de los sistemas de visión nocturna, empresas de estandarización como ISO y IEC (ISO 9001-904) (EN 45001-45003) formaron un grupo para preparar las pruebas estándar que deben superar estos sistemas.

Nuestra legislación recoge y regula en el Real Decreto 809/1999 de 14 de Mayo los requisitos que deben reunir los equipos marinos destinados a ser embarcados en los buques, en aplicación de la directiva de la Comunidad Europea 96/98CE, modificada por la directiva 98/85CE publicada en el BOE num.128 de 20.05.1999 y concretamente para sistemas de visión nocturna en la Pág.22 bajo el epígrafe A.2/47 establece las normas de ensayo. Por lo anteriormente expuesto y después de efectuar consultas a la Dirección General de la Marina Mercante estos sistemas son obligatorios para los buques HSC de bandera española.

El uso de cámaras de visión nocturna como elementos del sistemas de ayuda a la navegación solo tiene efectividad si hay un observador permanentemente durante la noche y que tenga capacidad efectiva de actuación o capacidad de transmitir una situación de riesgo.

Así mismo el hecho de que no exista referencia a la cobertura de un puesto de observador se argumenta en que si se recogiera, implicaría el aumento del personal de la dotación del buque. Por tanto aunque exista un sistema de visión nocturna en el puente con un puesto exclusivo para un observador no hay ninguna legislación que obligue a su cobertura. Tampoco existe ninguna regulación en lo referente a entrenamiento, calificación específica, procedimientos a seguir, o regulación de mantenimiento.

En el anexo que acompaña la MSC 94 establece los objetivos y la aplicación de está resolución así como definiciones y requisitos funcionales detalladamente.

Cabe destacar de este anexo la definición de “equipo de visión nocturna “que establece a efectos de está legislación como cualquier técnica que sea capaz de detectar durante la noche la posición y aspecto de los objetos encima de la superficie del agua relativo a la propia embarcación.

Estos equipos deberían ser capaces de detectar objetos por encima del agua a cierta distancia desde la propia embarcación y la información proporcionada en tiempo real, al objeto de evitar una colisión y tener una navegación segura.

También cabe destacar el termino “blanco de pruebas” que como su nombre indica es un blanco que simule un peligro real de un objeto en la superficie que se pueda encontrar en la mar, como son pequeñas embarcaciones no iluminadas, troncos a la deriva, container, boyas, hielo, olas peligrosas o ballenas.

Este blanco de pruebas deberá ser un blanco metálico de color negro que en el agua debe tener al menos un 50% sumergido, de dimensiones 1.5 X 0.5 metros que se mantenga fuera del agua adrizado en la dirección de la detección. Las administraciones deberían utilizar otros blancos más pequeños para adecuarlos a las observaciones de condiciones locales.

Este blanco observado con un ángulo de visión 20 grados (10° a cada banda de la línea de crujía) debería detectarse a una distancia no inferior de 600 metros, con una probabilidad mínima de 90%, cuando el blanco ha sido inmerso en la mar al menos 24 horas con condiciones de luz de estrellas sin nubes y sin luna.

Para que un sistema de visión nocturna sea eficaz como sistema anticolidión hay que tener en cuenta el tiempo de respuesta que disponen los tripulantes. Si tómanos como ejemplo un HSC que navegue a una velocidad de 40 nudos, habitual en este tipo de barcos, el tiempo que tarde en recorrer la distancia de detección de 600 metros es de 29 segundos , teniendo en cuenta que le objetivo sea estático.

Teniendo en cuenta este tiempo, parece que es muy necesaria una observación continuada del sistema de VN para mantener su efectividad.

Capítulo 2. Material y método

En la primera parte de este capítulo se estudia de forma general el funcionamiento, características y resultados de los distintos sistemas de visión nocturna centrándonos posteriormente en el estudio de los distintos sistemas de visión nocturna que actualmente son susceptibles de utilizar en la navegación y la seguridad marítima.

En la segunda parte, el método empleado pretende obtener una valoración de los sistemas de visión nocturna basados en la correcta interpretación por expertos marinos de las imágenes obtenidas en trabajos de campo con distintos sistemas de visión nocturna.

Esto nos permitirá conocer la eficacia en la interpretación de las imágenes observadas y la fiabilidad en la detección, reconocimiento e identificación de las imágenes que proporcionan estos sistemas en el ámbito de esta tesis.

Para completar el estudio, los trabajos de campo se contrastan con un estudio estadístico formado por una población de usuarios avanzados en estos sistemas. La consulta se realiza a personal embarcado en distintos tipos de buques.

2.1. SEGURIDAD Y SISTEMAS DE VISIÓN NOCTURNA

Los equipos con los que se ha contado para hacer los diferentes trabajos de campo son:

- dos tubos intensificadores de luz residual.
- dos cámaras de infrarrojos fotónica
- una cámara de infrarrojos térmica

Debe tenerse en cuenta, que aunque estos equipos pueden ser adquiridos por cualquier particular o empresa privada, debe acreditarse que no serán utilizados para usos fuera de la ley. En algunos casos al adquirir o importar de EEUU equipos de última generación, pueden ser considerados como material militar siendo necesario seguir un complejo protocolo.

Hay que hacer constar que por las características de esta tecnología cuya finalidad es originalmente militar ha añadido algo de dificultad a la realización de esta tesis. Así mismo y por tratarse en algún caso de equipos que son, o pueden ser utilizados para misiones policiales o militares, se ha tenido que omitir datos que puedan tener carácter confidencial o aporten información susceptible de ser utilizada para realizar actividades delictivas o ilegales.

No obstante, muchos de estos equipos u otros con la misma tecnología, pueden estar instalados hoy en día en buques de la marina mercante, de pesca o deportiva. En algunos casos su uso puede ser obligatorio o muy recomendable como hemos visto en el capítulo 1.5.

2.1.1. Intensificador de luz residual

2.1.1.1. Clasificación

Los equipos que utilizan intensificadores de luz, coincidiendo con el desarrollo cronológico de su desarrollo, pueden clasificarse en: activos o pasivos

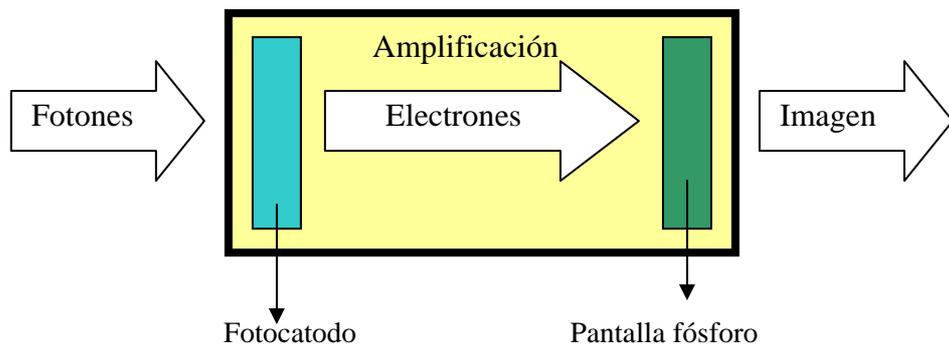
Activos;

Estos equipos, que fueron los primeros en ser utilizados, necesitan emitir iluminación externa, por medio de una fuente de emisión electromagnética de frecuencia cercana a la zona del infrarrojo, no visible al ojo humano, ya que estos equipos por si mismos no tienen la capacidad suficiente para amplificar la luz residual existente.

Pasivos;

Son aquellos sistemas que, debido a su mayor desarrollo tecnológico, no necesitan de una fuente de iluminación externa, pudiendo intensificar la luz residual existente durante la noche procedente de los objetos observados, sin necesitar de una fuente de iluminación externa.

Tanto en los equipos activos como en los pasivos, el proceso de intensificación es el mismo en ambos sistemas.

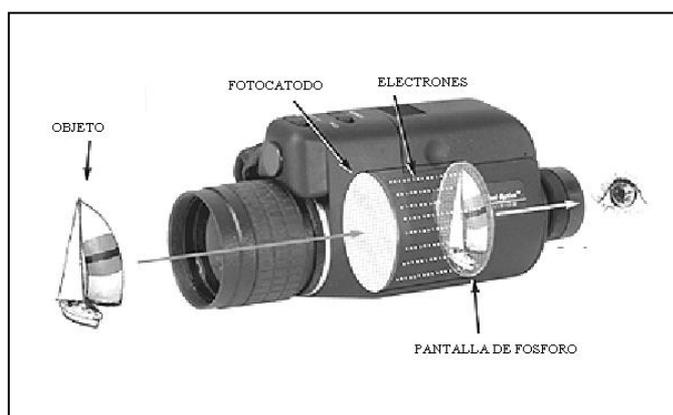


Esquema simplificado de un tubo intensificador de luz residual

Fig. 2.1

La energía lumínica en forma de fotones (Fig.2.1) llega hasta un elemento del equipo llamado fotocatódo y chocan contra el mismo, transformando energía lumínica en energía eléctrica. Esta energía eléctrica o electrón, se amplía e intensifica como se explica en capítulos siguientes.

La intensificación supone un aumento del número de electrones que se hace chocar contra una pantalla de fósforo para producir la imagen, resultando una imagen intensificada procedente del objeto observado.



Vista simplificada del interior de una cámara de visión nocturna de intensificación de luz residual

Fig.2.2

Los equipos intensificadores de luz residual, están catalogados en generaciones, que coinciden cronológicamente con la evolución de esta tecnología.

Generación 0;

Son los primeros equipos que se desarrollaron y la sensibilidad del fotocatódo es pequeña. Necesitan la producción de iluminación externa. Normalmente se empleaban fotocátodos de óxido de plata-cesio. Este tipo de equipos se clasifica dentro de los llamados "activos".

La fuente de iluminación externa se proporciona mediante un foco de una luz de longitud de onda cercana al infrarrojo (NIR), no visible al ojo humano, o "luz negra". Esta emisión de luz infrarroja se refleja en los objetos que queremos observar y devuelve la energía fotónica necesaria para su amplificación.

La generación 0 de intensificadores tiene el inconveniente que produce una mayor distorsión del objeto, así como una vida del tubo intensificador limitada. También, si se mira hacia la fuente de luz brillante se produce un efecto de deslumbramiento, imposibilitando la visión. El alcance está limitado por la zona cubierta por la fuente de iluminación externa.

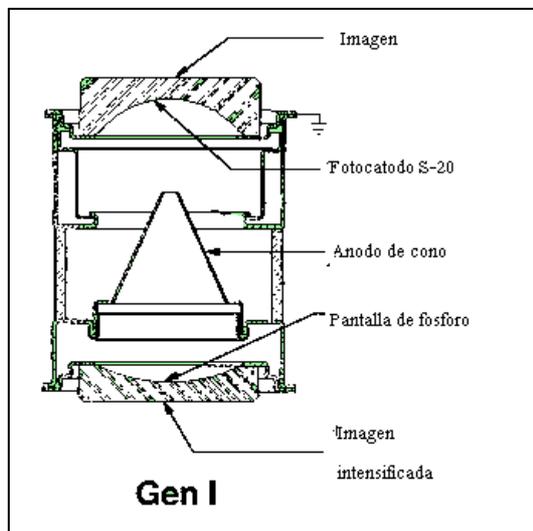
Generación 1;

Debido a la mayor sensibilidad del fotocátodo, los intensificadores de esta generación fueron los primeros realmente “pasivos”, ya que no necesitan de una fuente de iluminación externa.

Funcionan de la siguiente forma; La pequeña energía lumínica reflejada procedente del objeto observado en forma de fotones, llega a la lente del equipo, normalmente con un campo de visión amplio, similar a la usada en los prismáticos, que los concentra de forma que chocan sobre el fotocátodo. Este choque produce una liberación de electrones. (Fig.2.3)

A continuación estos electrones emitidos por el fotocátodo, entran en un campo magnético de alto voltaje. Como el electrón tiene una carga negativa y el campo magnético creado entre el cátodo y el ánodo tiene un gradiente positivo, se produce una atracción y aceleración hacia el fondo del tubo.

Un juego de anillos de metal especialmente diseñados se monta dentro del tubo, para crear un campo electroestático, que permiten el enfoque, además de girar la imagen 180°, conservando así la imagen de los fotones que entraron.



Tubo Intensificador de imagen de la marca ITT de Generación 1

Fig.2.3

Los electrones acelerados y con un incremento de energía entran en el ánodo que tiene forma de cono, chocando finalmente con una pantalla o visor de fósforo. Cuando el electrón golpea una

molécula de fósforo que recubre el visor, la energía contenida en el electrón se agrega a la molécula de fósforo, elevando el nivel de energía del fósforo, que se vuelve inestable. Entonces la molécula de fósforo, libera un fotón, para volver a su nivel estable, y es por este proceso como se transforma un electrón en un fotón, en un efecto contrario al del fotocatódo, produciendo una imagen monocromática de color verde, sobre- amplificada del objeto.

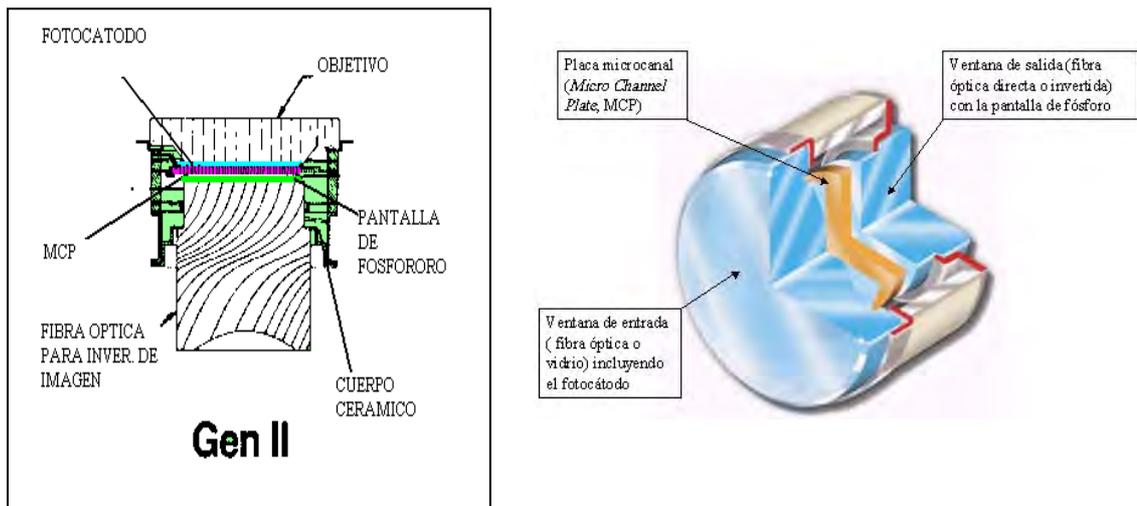
En esta generación se utilizan fotocátodos multialcalinos (antimonio, potasio, sodio, cesio) con una fotosensibilidad de 180 a 250 $\mu\text{A} / \text{lm}$ y una ganancia de hasta 25000.

La generación 1 se caracteriza por producir distorsión geométrica, representación pobre para niveles bajos de luz, deslumbramiento cuando se observa a una fuente de luz brillante (farolas, focos, proyectores de luz, etc.). Estos tubos tienen una vida operativa de entre 1500 a 2000 horas.

Generación 2;

Esta generación se caracteriza por proporcionar una mayor ganancia al tubo que se consigue con un fotocatódo todavía más sensible (con una fotosensibilidad de más de 240 micro amperios / lumen), la utilización de una placa de micro canales (MCP), y también la inversión de la imagen mediante fibra óptica.

El funcionamiento es igual al de la generación anterior, aunque en este caso el enfoque y el giro de la imagen es por proximidad, mediante el empleo de fibra óptica, situándose los elementos del tubo (MCP, fotocatódo y pantalla de fósforo) muy próximos, como puede apreciarse en la (Fig.2.4)



Tubo Intensificador de Imagen de ITT de GEN 2

Fia.2.4

La principal novedad y característica es la utilización de una placa de microcanales o MCP (Micro Channel Plate). Estas placas son unos discos de un cristal especial (generalmente de un silicato pesado) de un diámetro de 18 hasta 120 mm formadas por la unión de cientos de miles o millones de cortos y paralelos tubos de fibra óptica de unos 10 micrones de diámetro. Estos tubos están vacíos por dentro mediante la aplicación de un procedimiento químico y las paredes están cubiertas interiormente por un material químico que mejora la multiplicación de electrones. (Fig.2.5)

El MCP se sitúa inmediatamente después del fotocátodo, dentro del tubo intensificador. Los electrones emitidos por el fotocátodo, pasan dentro de los diminutos tubos del MCP. Cada electrón dentro del tubo choca con las paredes, y cada colisión causa un electrón adicional como mínimo, que se une al flujo del resto de electrones a través del tubo de la placa de micro canales. Las colisiones son múltiples y liberan un considerable número de electrones en una progresión geométrica, siendo común de ganancia de 10000 a 1000000. Para mejorar el choque de los electrones en su entrada, a los microtubos se les da una pequeña inclinación

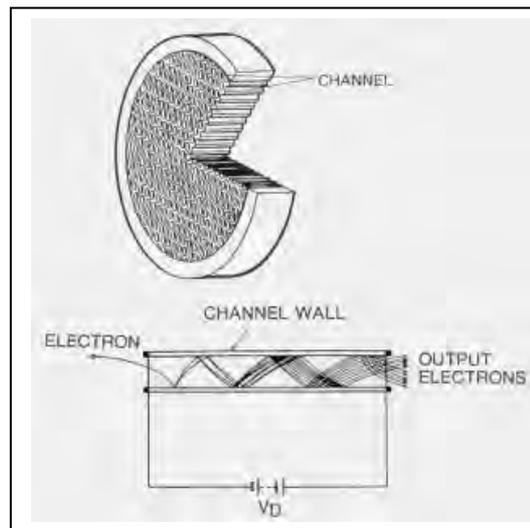


Fig.2.5

La generación 2 tiene mucha mayor resolución que las generaciones anteriores. Los tubos de la segunda generación tienen una expectativa de vida de entre 3000 a 5000 horas.

La generación 2 produce una buena realización en niveles bajos de luz y presenta poca distorsión. Esta generación supuso el avance más importante en los equipos de intensificación.

Para mejorar el rendimiento se están fabricando MCP con micro canales de menor diámetro. La empresa KM fabrica MCP (Fig.2.6) con poros de 5 micrones, consiguiendo un MCP con una mayor densidad de canales, produciendo por tanto una mayor amplificación.

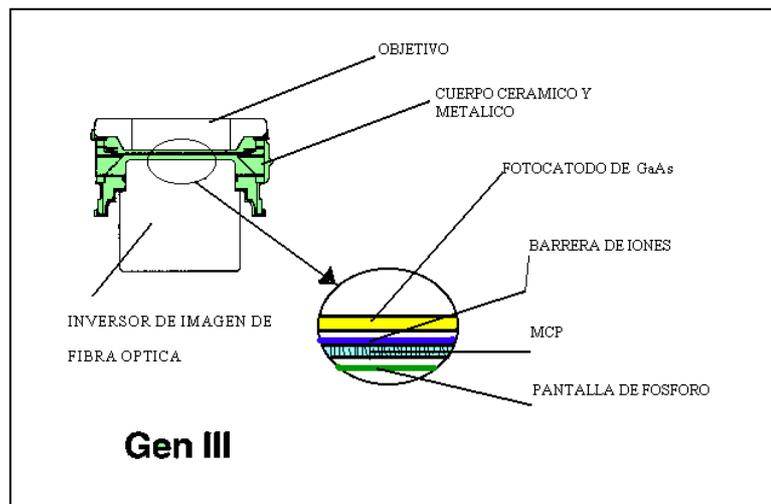


MCP fabricado por KM –ITT.
 Diámetro: 25 mm. Diámetro activo: 18 mm. Grosor: 0.254 mm.
 Diámetro del poro: 5 nm Angulo del canal: 12°

Fig.2.6

Generación 3;

En cuanto a su constitución, la generación 2 y la generación 3 son muy similares. La principal diferencia consiste en la utilización de arseniuro de galio (GaAs) en el recubrimiento del fotocatodo. Tiene una sensibilidad sobre los 1000 microamperios/ lumen y trabajan en la zona de 0.45 a 0.95 μm .



Tubo Intensificador de Imagen de ITT de GEN 3

Fig.2.7

Este fotocatodo es más sensible al espectro de la zona cercana del infrarrojo (NIR), más abundante por la noche ya que la energía está desplazada a esta zona, amplificando un mayor número de fotones.

Asimismo la placa de micro canales (MCP), se recubre de una película o barrera de iones que incrementa la vida del tubo alargándola de 7.000 a 10.000 horas, e incluso más. La barrera de iones previene los daños del recubrimiento del fotocatodo, protegiéndole de los electrones rebotados hacia atrás de la placa de micro canales (Fig.2.7).

En esta generación prácticamente no hay distorsión, pues dispone al igual que la generación anterior, de un sistema de fibra óptica, al final del ánodo, que gira la imagen y elimina la distorsión, obteniéndose unas imágenes casi perfectas.



Tubo intensificador de imagen. GEN 3 de 18 mm de diámetro. (ITT)

Fig.2.8

Generación 4;

Esta es la última y más desarrollada generación de tubos intensificadores. Esta generación únicamente está disponible en aplicaciones militares. Se caracteriza por la desaparición de la barrera de iones por lo que también se le denomina como tubos “filmless” o “unfilmed”.

Esta generación ha demostrado un sustancial incremento en el alcance y detección de blancos, así como en su resolución y, particularmente, en condiciones de luz de residual extremadamente bajas.

También están dotados de unos elementos de fibra óptica para girar la imagen resultante y evitar distorsiones. Esta generación, al igual que la anterior, trabaja en la zona del infrarrojo cercano.

Para evitar el deslumbramiento del sistema por las fuentes de luz intensas, como pueden ser las luces de los focos, disponen de un sistema automático de control, también llamado “gated” que automáticamente y de forma instantánea controla la intensificación entre las zonas con mucha oscuridad y las zonas en que existen puntos de luz intensa, evitando una saturación en la intensificación y así evita que se produzca momentáneamente una pérdida de imagen. Otra característica de las últimas tecnologías consiste en los tubos de 16 mm más pequeños y ligeros que los de 18 mm.

Como vemos la Gen.1 pasó a ser la Gen.2 con el cambio interno del ánodo de cono al MCP y de la Gen.2 a la Gen.3 con el cambio del cátodo trialcalino al cátodo de arseniuro de galio. El debate se centra ahora en saber si la eliminación del la barrera de iones o película del MCP y la adición de un sistema de suministro de energía “controlada” justifican la denominación finalmente de estos equipos como Gen.4 ya que las empresas constructoras de estos tubos emplean este termino sin que por parte de los representantes de la administración militar de los EEUU considere estos cambios realmente en una nueva generación.



Tubo intensificador de imagen GEN 4 de 18 mm.de ITT

Fig.2.9

2.1.1.2. Parámetros y características

En general, el rendimiento de los sistemas de visión nocturna, (Intensificadores e Infrarrojos) pueden tratarse en dos parámetros fundamentales, que son la sensibilidad y la resolución espacial.

La sensibilidad en la detección de la señal procedente de un objeto observado incluye además de la señal en si, de los niveles de la señal del “ruido”. Este ruido dificulta la capacidad de detección de los sistemas de visión.

El ruido tiene una amplia variedad de orígenes generados por el propio sistema de detección o por el ambiente en el que se efectúa la observación.

La sensibilidad es especialmente importante cuando se quieren observar objetivos que emiten poca señal pudiendo quedar anulada por la señal de ruido

Los parámetros de evaluación significativos que pueden determinar la capacidad amplificadora de los intensificadores de luz residual son:

- resolución
- fotosensibilidad o fotorespuesta
- relación señal / ruido (SNR)
- ganancia
- EBI (equivalent background input)

◆ Resolución:

En términos generales el concepto de resolución en el ámbito de la imagen nos describe la capacidad con la que podemos distinguir detalles en una imagen o la fidelidad con la que vemos la imagen creada por el sistema de imagen digital, de película u óptico.

La resolución puede estar influenciada por distintos efectos en los procesos de la detección, como puede ser la transmisión atmosférica, la óptica del sistema, la sensibilidad del detector, la electrónica que la complementa y el visor o monitor del sistema.

Para un equipo de visión nocturna mediante el empleo de intensificador de luz residual, la resolución nos indica la capacidad que tiene el sistema para distinguir entre los objetos próximos o distinguir pequeños detalles de un objetivo.

Las unidades físicas con la que se puede medir la resolución son la de líneas por milímetro, líneas por pulgada o “líneas pares”. Una “línea par” es un par de líneas negra y blanca juntas, así pues, una resolución de 10 líneas por milímetro significa 5 líneas negras alternadas con 5 líneas blancas o lo que es lo mismo 5 líneas par por mm y nos indica la habilidad de detectar dos líneas distintas separadas por una distancia igual al grosor de cada una. Las líneas pares son más usadas en la resolución de lentes fotográficas.

El valor de resolución puede referirse únicamente al tubo intensificador o al sistema en su conjunto. La resolución del tubo intensificador de imagen es medida en líneas pares por milímetro (lp/mm).

Para aumentar la distancia a la que se pretende observar un objeto se recurre a un sistema óptico de lentes de aumento. En este caso entramos en el campo de la resolución espacial que se trata en capítulos siguientes. La resolución espacial se mide en ciclos por mili radián (cy/mr)

La medida más representativa es la resolución del sistema, pues es lo que el observador realmente experimenta. Una resolución alta significa la habilidad de presentar una imagen nítida y se está evaluando indirectamente, entre otros, la calidad de las ópticas del equipo.

Si se comparan equipos distintos, con calidad óptica y filtros similares, la resolución del tubo es el factor determinante a tener en cuenta.

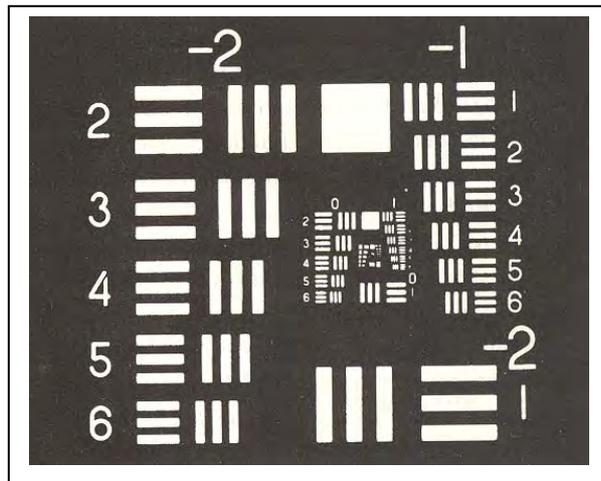
Por lo tanto, para un sistema cualquiera de visión nocturna, la resolución del tubo intensificador de imagen permanecerá constante, mientras la resolución del sistema puede variar si, por ejemplo, se cambia el objetivo, las lentes ópticas, o se agregan lentes reguladoras o amplificadoras.

La resolución se mide en diferentes condiciones de oscuridad, obteniéndose un punto de resolución óptima. Los mejores resultados normalmente se obtienen para condiciones de luz residual nocturna más altas, y los peores bajo las condiciones más oscuras.

A menudo, la resolución para un mismo sistema de visión nocturna, es diferente cuando se mide en el centro y en la periferia de la imagen. Muchos dispositivos producen una imagen nítida en el centro del área de la visión, y menos nítida cuanto más nos acerquemos hacia la periferia.

La falta de una imagen nítida en el centro del área de la visión, puede deberse a que se trate de un tubo de Gen 0, o a una mala calidad óptica del sistema. Esto es especialmente importante para dispositivos empleados para fotografía o video, donde la resolución y calidad de la imagen completa es importante.

Una forma para probar la resolución de un sistema óptico es mediante la utilización de un “blanco de pruebas” como en que se muestra en la Fig.2.10



Blanco de pruebas de resolución USAF 1951

Fig.2.10

Puesto que incluso un sistema idealmente perfecto está limitado por efectos de la difracción, la imagen de una carta de resolución será algo borrosa. Por lo tanto, según se vaya reduciendo el ancho de las barras en la carta, se alcanzará un límite donde no se distinguirá la estructura de líneas finas, siendo entonces éste el límite de resolución del sistema.

Una forma más compleja para determinar la capacidad de un sistema de visión es mediante la función de transferencia de la modulación y que veremos más adelante.

◆ Fotosensitividad o fotorespuesta:

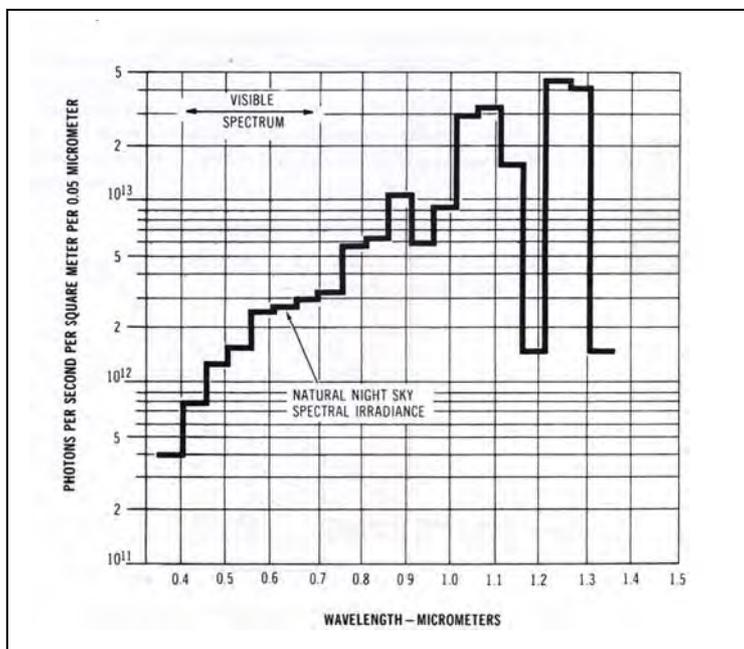
La sensibilidad del fotocatodo también llamada fotosensibilidad o fotorespuesta, es la habilidad del material del fotocatodo de producir una respuesta eléctrica cuando está sometido al choque de fotones.

La unidad de la fotosensibilidad es el microamperio de corriente por lumen de luz ($\mu\text{A/lm}$). El lumen es la unidad del Sistema Internacional de Medidas que mide el flujo luminoso o potencia luminosa percibida. A mayor sensibilidad de fotocatodo mejor es la capacidad del sistema para producir buenas imágenes bajo las condiciones más oscuras.

El flujo luminoso se diferencia del flujo radiante (la medida de la potencia luminosa total emitida) en que el primero se ajusta teniendo en cuenta la sensibilidad variable del ojo humano a las diferentes longitudes de onda de la luz.

El rendimiento de un fotocatodo está delimitado por la eficacia cuántica del material del que está compuesto. El concepto de la eficacia cuántica se desarrolla en el capítulo de los detectores de infrarrojos.

La eficacia cuántica de los fotocátodos más eficientes está sobre el 20% en el espectro visible, mientras que la eficacia cuántica de la adaptación del ojo en la oscuridad absoluta es solo el 1% lo que justifica “per se” la utilidad de los sistemas de intensificación.



Flujo fotónico en el espectro visible y el infrarrojo cercano

Fig.2.11

Teniendo en cuenta que en el espectro electromagnético por la noche hay más energía fotónica disponible en la región cercana al infrarrojo (NIR) que en la región visible como podemos ver en el gráfico de la Fig.2.11, si tenemos un dispositivo al que se le exija una fotosensibilidad alta, debería trabajarla en esta zona del espectro. Un sistema con una fotosensibilidad alta, en la región visible más alejada de la zona del infrarrojo, tendrá unos resultados peores que otro sistema con una fotosensibilidad global más baja pero que trabaje en la región del NIR.

En la región del infrarrojo cercano la eficacia cuántica de algunos fotocátodos puede ser significativamente menor que en la región visible del espectro, pero el menor rendimiento de la emisión es compensada por el gran número de fotones en la región del infrarrojo. (Fig. 2.12)

Para un equipo de visión nocturna pasivo con tubo intensificador, los valores más importantes son una mayor sensibilidad del fotocátodo en la zona próxima del infrarrojo, conjuntamente con la irradiación espectral del cielo nocturno y la reflectividad del objetivo.

Los cátodos utilizados en sistemas de imagen de las primeras generación utilizan fotocátodos multicalinos a base de sodio, potasio, antimonio y cesio (Na_2KSbCs). En la actualidad los tubos de tercera generación se construyen con fotocátodos de AsGa (Arseniuro de Galio) en combinación con otros materiales formando capas, como el óxido de cesio ($\text{GaAs:C}_2\text{O}$), que tiene una respuesta efectiva entre $0.6\text{-}0.9\ \mu\text{m}$ y una eficacia cuántica por encima del 20% en el NIR y una fotorespuesta por encima de $1000\ \mu\text{A/lm}$. (Fig. 2.12)

En la Fig. 2.12 se muestra la eficacia cuántica de distintos tipos de materiales del fotocátodo.

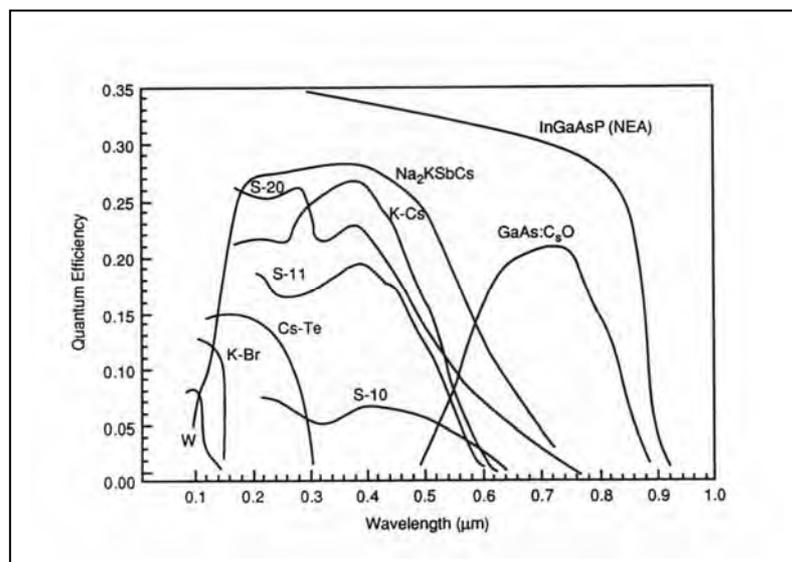


Fig.2.12

◆ relación señal / ruido (SNR)

El ruido es una señal perjudicial y no deseada, que acompaña a la señal de la imagen del objeto observado y que degrada la calidad de la imagen.

El ruido total generado en su sistema opto electrónico de intensificación de luz residual, se produce por la suma del ruido de origen fotónico y el ruido propio del sistema electrónico.

El ruido producido por los fotones es debido a la llegada de éstos de forma separada o desordenada y a la posterior fluctuación de la señal de salida del detector y a la correspondiente transmisión de electrones. También se puede generar ruido por la falta de uniformidad en el detector.

Pero en los sistemas de intensificación la fuente dominante de ruido es consecuencia del ruido electrónico. Este ruido es el resultado de la tendencia de un conductor, una lámpara o un transistor, cuando son recorridos por una corriente eléctrica alterna o continua. En el movimiento propio, los electrones sufren impulsos eléctricos perfectamente desordenados, cuya importancia crece con la temperatura.

Esto se traduce en una tensión variable que acompaña a la señal útil a través de los amplificadores y acaba manifestándose en forma de manchas en los monitores, visores o pantallas de TV. Este ruido es independiente a toda acción externa.

La relación señal / ruido (SNR) es la medida de la señal luminosa que alcanza el ojo dividida por el ruido percibido.

$$\text{SNR} = \text{Señal luminosa observada en el visor} / \text{Ruido del equipo}$$

Un mayor valor del SNR, significa una mejor habilidad del tubo para ver los objetos con un buen contraste, bajo condiciones de poca luz. Este probablemente es el factor más significativo que determina la habilidad de un equipo cuando oscurece.

La SNR está relacionada directamente con la sensibilidad del fotocátodo, la eficacia de la pantalla del fósforo en la reconversión de los electrones en la luz visible para formar la imagen en el visor, y el voltaje que trabaja el MCP.

Hay que tener en cuenta que el valor del SNR puede obtenerse mediante diferentes métodos, por lo tanto es interesante conocer cual fue el método empleado para la obtención de este valor en nuestro equipo.

♦ ganancia o factor de amplificación:

También se le llama ganancia de brillo o ganancia de luminancia. Es la medida que compara la luminosidad con la que se observa un objeto y la luminosidad que ofrece el equipo. Expresado de otra forma, sería el número de veces que el dispositivo de visión nocturna amplifica la luz de entrada.

La ganancia puede referirse a la ganancia del tubo o a la ganancia del sistema. La ganancia del tubo: se obtiene dividiendo la luz de salida del tubo en unidades fL, por la luz de entrada en el tubo en unidades fc y normalmente se expresa en decenas de millar.

$$\text{Ganancia del tubo} = \text{Luz de salida del tubo (fL)} / \text{Luz de entrada en el tubo (fc)}$$

fc (Footcandle) : unidad de iluminación igual a un lumen por pie cuadrado)

fl (footlambert) : unidad de brillo igual a un footcandle a la distancia de un pie)

La ganancia se expresa mediante un valor numérico pero sin unidades. Si se sube demasiado la ganancia del tubo, puede trabajar forzado, y será más “ruidoso” bajando la relación SNR.

La ganancia del sistema, es el resultado de dividir entre la luz de salida medida en fL, por la luz de entrada también en fL, y este valor es el que el usuario realmente aprecia. Normalmente la ganancia del sistema se expresa en miles.

Ganancia del sistema= Luz de salida del sistema (fL) / Luz de entrada en el sistema (fL)

La ganancia del sistema es más representativa para el usuario que la del tubo, ya que la ganancia del tubo está afectada por la calidad óptica de las lentes y filtros.

La ganancia es sólo una parte a tener en cuenta, y si un sistema no posee una buena fotosensibilidad y un alto SNR, un valor muy alto de ganancia simplemente hace más luminosa una imagen pobre.

Los valores de ganancia muy altos podrían significar que el tubo se trabaja muy forzado, y por lo tanto la vida del tubo será más corta.

También hay que tener en cuenta que nuestros ojos no perciben el aumento de la ganancia de una forma lineal, ya que si comparamos una ganancia de 40.000 no nos parecerá el doble de luminoso que un factor de amplificación de 20.000.

◆ EBI (Equivalent Background Input)

Es la relación entre la radiación residual de salida de la pantalla y la ganancia del tubo sin iluminación del fotocatódo, o sea, en ausencia total de iluminación. El EBI se expresa en lumen/centímetro cuadrado.

Expresado de una forma simple es la cantidad de luz que vemos en el visor, cuando se pone en funcionamiento un tubo intensificador en completa oscuridad. La temperatura afecta a la medición del EBI, por lo que cuando aumenta la temperatura, también aumenta el EBI.

Un menor valor del EBI, indica que el equipo es mejor. Así mismo el EBI determina el nivel más bajo de luz para el que el equipo puede detectar algo, por debajo de este nivel, los objetos están enmascarados por el EBI.

Además de los parámetros anteriormente mencionados, los equipos de intensificación de luz residual pueden someterse a otras mediciones para determinar sus características, como son entre otras:

MCR: (Mínimo Contraste Resoluble)

Medida subjetiva que trata de estimar por medio de la observación de miras, la resolución límite en un amplio rango de luminancias y contrastes. A partir de esta medida se pueden obtener una estimación de los alcances del sistema.

Función de transferencia de la modulación o MTF (Modulation Transfer Function)

Hasta hace poco, el método tradicional para determinar la calidad de un elemento o sistema óptico era calcular su límite de resolución. Se suponía que cuanto mayor fuera la resolución mejor sería el sistema.

La función de transferencia de modulación (MTF) es una forma de medida más elaborada y objetiva de la calidad de un sistema de imagen y combina los conceptos de la resolución y el contraste. En principio esta función fue utilizada en ingeniería eléctrica y la terminología básica fue posteriormente adoptada en el campo de la imagen.

La MTF es una expresión matemática de una señal transmitida a través de una lente o la respuesta de un sistema óptico a una señal de entrada sinusoidal de frecuencia variable y amplitud constante.

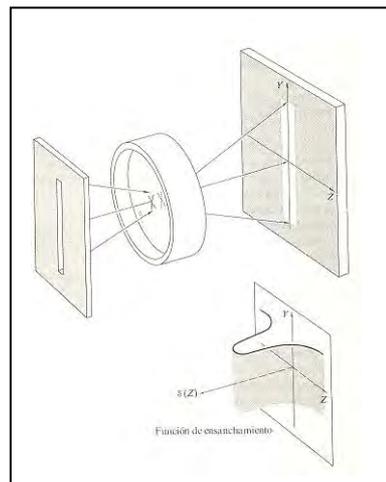


Fig.2.13

Para el cálculo de la MTF, se utiliza un modelo en forma de barras blancas y negras que progresivamente disminuyen en grosor y en el que cada barra (luminosa y oscura) constituyen un ciclo. Fig.2.13

La señal que produce este modelo de la imagen tiene dos propiedades: la frecuencia espacial y la amplitud. La frecuencia es el número de repeticiones de una señal lineal espacial. La amplitud se refiere a la diferencia entre el nivel mínimo y el máximo de una señal. En el campo de la imagen la frecuencia espacial es lo que conocemos por la resolución y la amplitud es el contraste.

A mayor número de líneas pares (blancas y negras) podamos meter en un espacio, mayor es la frecuencia espacial o resolución. El contraste es como la diferencia de luminosidad entre dos áreas conjuntas.

Lo que se mide con la MTF es cómo puede el sistema modificar la amplitud y la fase de cada onda plana mientras la transfiere del objeto a la imagen y se define como el cociente de modulación imagen con la modulación objeto en todas las frecuencias espaciales y normalmente se expresan en tantos por ciento.

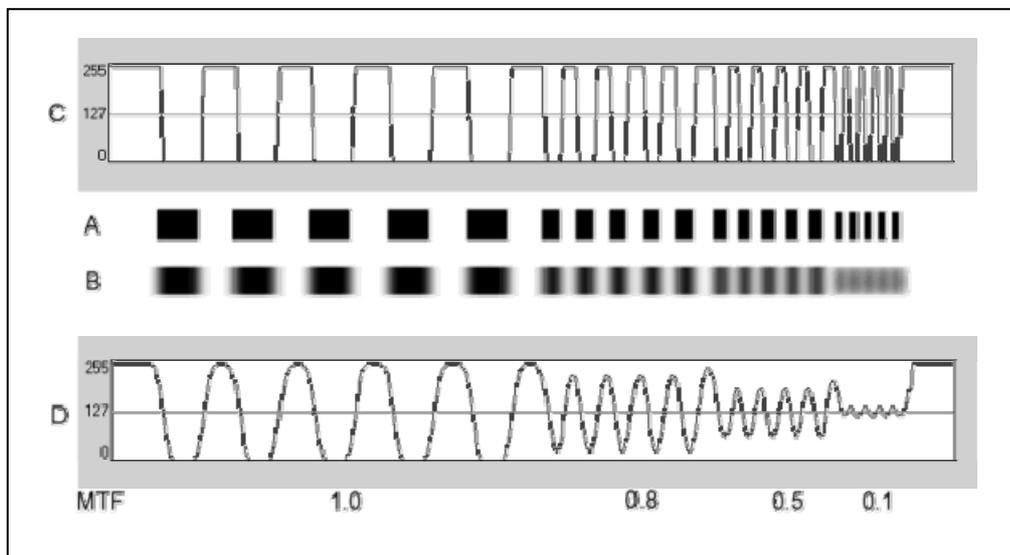


Fig.2.14

En la imagen A de la Fig.2.14 podemos ver un modelo de barras oscuras y brillantes en la que el grosor de cada barra y el espacio entre ellas disminuyen progresivamente. Este modelo está representado por el perfil de la imagen C (máxima y mínima intensidad o contraste de una imagen digital de 8 bits).

Si el modelo de la imagen A se hace pasar por el sistema óptico, el resultado se muestra en la imagen B, donde las barras se desdibujan, así como los espacios entre ellas, llegando un punto que prácticamente no se pueden distinguir.

En realidad, la MTF se ha convertido en un medio muy usado para especificar el rendimiento de toda clase de elementos y sistemas que van desde lentes, cintas magnéticas y películas hasta

telescopios, la atmósfera y el ojo, entre otros. Sobre todo, tiene la ventaja de que si se conocen las MTF de los componentes independientes individuales de un sistema, la MTF total es simplemente el producto de todas ellas.

En la Fig.2.15 se muestran la imagen resultante para distintos valores de MTF de un sistema óptico. Para equipos de visión nocturna el límite de la resolución está normalmente definido como la frecuencia espacial en la que la MTF es un 3%.

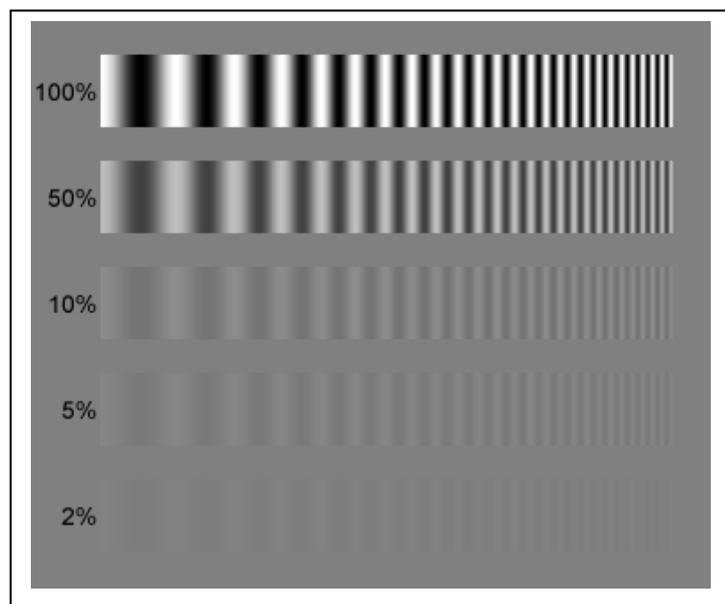


Fig.2.15

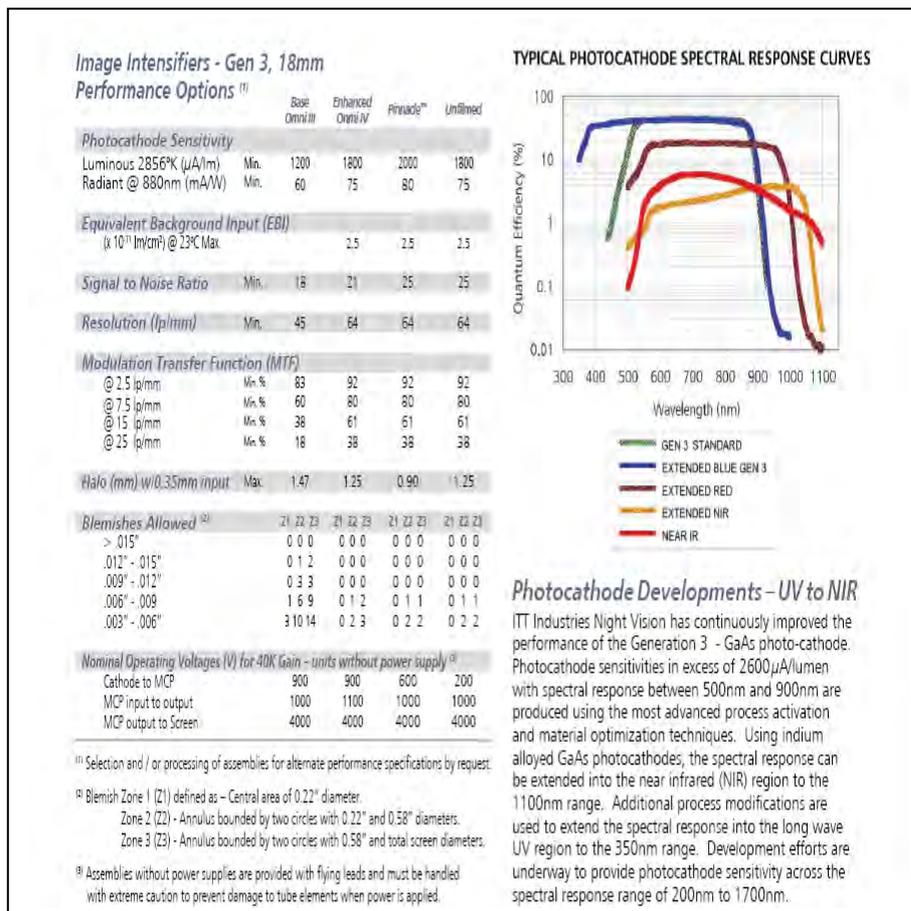
En las Fig.2.16 ,2.17 y 2.18 podemos ver varios catálogos con las especificaciones técnicas, características y parámetros de funcionamiento de tubos intensificadores de tercera generación.

Specifications

On-Axis Resolution (minimum) at optimum light level	
F6015P	1.3 cycles/milliradian
F6015C and F6015J	1.2 cycles/milliradian
System Magnification	1 X ±0.03
System Distortion	Less than 3%
Range Focus	25 cm to infinity
Diopter Focus	+2 to -6 diopters
Exit Pupil and Eye Relief	14 mm on-axis exit pupil at 25-mm eye relief
Field of View	40 ±2°
System Brightness Gain	Adjustable from 25 to more than 3,000
Operating Temperature	-51°C to +49°C
Storage Temperature	-51°C to +85°C
Weight of Monocular with eyecup, lens cap, neck cord (dual-battery version) and batteries	380 grams
Weight of Monocular with eyecup, lens cap, neck cord (single-battery version) and battery	355 grams

Monocular Night Vision Device, Gen 3, F6015 Series

Fig.2.16



**Image Intensifier, Generation 3 18-mm
MX-11769 (F9815 Series)**

Fig.2.17

MX-11769 (F9815 Series)

Performance Levels

Model Number	F9815B* MX-11769 Omni II Enhanced	F9815C MX-11769 Omni III Enhanced	F9815J MX-11769 Omni III Plus	F9815N MX-11769 Omni V / Ultra	F9815P MX-11769 Omni IV	F9815RG Gen 3 Pinnacle
Resolution, lp/mm, (Minimum)	45	51	64	64	64	64
Photocathode Sensitivity (Minimum) 2856 K, $\mu\text{A}/\text{lm}$ @ 830nm, mA/W	800 NA	1200 NA	1350 135	1500 150	1800 190	2000 230
Signal/Noise Ratio (Minimum)	14.5	18.0	19.0	19.2	21.0	25.0
EBI, $\times 10^{-11} \text{lm}/\text{cm}^2$ (Maximum)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Halo	1.25	1.47	1.47	1.25	1.25	0.90
Luminous Gain, fL/fc @ $2 \times 10^4 \text{fc}$ @ $2 \times 10^5 \text{fc}$	40000 – 70000** 10000 – 20000**	40000 – 70000** 10000 – 20000**	40000 – 70000** 10000 – 20000**	40000 – 70000** 10000 – 20000**	40000 – 70000** 10000 – 20000**	40000 – 70000** 10000 – 20000**
Output Brightness, fL @ 1 and 20 fc	2.0 – 4.0**	2.0 – 4.0**	2.0 – 4.0**	2.0 – 4.0**	2.0 – 4.0**	2.0 – 4.0**
Output Brightness Uniformity (Maximum) @ 2856 K @ 830 nm	3:1 4:1	3:1 4:1	3:1 4:1	3:1 3:1	3:1 3:1	3:1 3:1
MTF (Minimum) @ 2.5 lp/mm @ 7.5 lp/mm @ 15.0 lp/mm @ 25.0 lp/mm	83% 60% 38% 18%	90% 70% 45% 20%	92% 80% 61% 38%	92% 80% 61% 38%	92% 80% 61% 38%	92% 80% 61% 38%
Photocathode Diameter, mm (Minimum)	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
Reliability, Hrs. (Minimum)	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Phosphor	P-43	P-43	P-43	P-43	P-43	P-43
Maximum Spots Allowed in Each Zone	<u>Zone</u>	<u>Zone</u>	<u>Zone</u>	<u>Zone</u>	<u>Zone</u>	<u>Zone</u>
Spot Size (in.)	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3
>.015 – .020	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
>.012 – .015	0 1 1	0 1 1	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
>.009 – .012	0 1 2	0 1 2	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
>.006 – .009	1 2 3	1 2 3	0 1 2	0 1 2	0 1 1	0 1 1
.003 – .006	3 4 5	3 4 5	0 2 3	0 2 3	0 2 2	0 2 2

* As available.

** Or per customer request.

Fig.2.18

Otras características a tener en cuenta y que afectan a la habilidad de un dispositivo de visión nocturna de realizar su cometido son, el campo de visión (FOV- Field Of Vision) así como la capacidad de multiplicación óptica y la distorsión de la imagen que puede producir el sistema.

La distancia a la que se quiere observar y el área a observar determinarán la amplificación y el campo de visión (FOV), que debe proporcionar el equipo.

Si se quiere detectar objetos a larga distancia la cámara deberá tener una alta multiplicación óptica. En cambio si lo que se pretende es utilizar la cámara para vigilancia o aplicaciones de búsqueda, no será necesaria una alta amplificación pero si un campo de visión (FOV) más ancho, que implica un menor tiempo para examinar un área. Normalmente una lente con amplificación 1:1 y un 400 FOV proporcionan la actuación óptica.

Como se sabe, para la observación a larga distancia se necesitará mayor amplificación (distancia focal) lo que implica una disminución del FOV, así como la reducción de la cantidad de luz capturada, por consiguiente, para largas distancias se necesita un tubo con una actuación excelente con niveles bajos de luz y las lentes ópticas empleadas de buena calidad.

Otro factor involucrado en las características de un equipo a tener en cuenta, es la versatilidad o adaptación cuando se usa en situaciones que pueden requerir amplificaciones diferentes. El equipo debe permitir que puedan cambiarse fácilmente las lentes amplificadoras sin necesidad de abrir el sistema para instalar las ópticas. En algunos casos, esto puede ser ineludible, y debe considerarse la susceptibilidad de dañar los componentes interiores.

2.1.1.3. Factores a tener en cuenta en la intensificación de imágenes

En este capítulo hacemos referencia a los principales factores que afectan directamente a los sistemas de intensificación de imagen (I2), son:

- ✓ transmisión atmosférica
- ✓ reflectancia
- ✓ condición celeste de la noche
- ✓ contraste del objetivo
- ✓ clutter
- ✓ resolución
- ✓ equipo utilizado

◆ transmisión atmosférica

La transmisión de las ondas electromagnéticas se ven afectadas durante su trayecto desde el objetivo a la lente de entrada del sistema de visión por la transmisión atmosférica de estas ondas o transmitancia. La finalidad de este capítulo, no es pormenorizar el efecto que produce cada uno de los componentes de la atmósfera que influyen en la transmisión de las ondas electromagnéticas del espectro en el que trabajan los equipos de I2, pero si hacer referencia al efecto que produce un elemento muy habitual en la navegación marítima; las condiciones de navegación en baja visibilidad o la niebla.

Con la utilización de estos sistemas, se evidencia que la niebla y la calima producen una disminución considerable en la capacidad de detección de los equipos de intensificación.

Existen estudios detallados sobre el tema (134), aunque la capacidad de detección ante la presencia de niebla o calima dependerá principalmente de la densidad de la niebla, y la forma que afecta a la transmitancia y de la región del espectro en la que trabaje el equipo.

En todo caso y por lo inexorable que supone la posibilidad de controlar el fenómeno de la niebla o calima, la única forma que tenemos de contrarrestar este efecto, es la elección del equipo adecuado en función de la región del espectro en la que trabaje. Este efecto también afecta a las cámaras fotónicas de IR y se desarrolla con más amplitud en el capítulo correspondiente.

Normalmente en un barco no se tendrá la posibilidad de disponer de varios equipos, pero es interesante saber que los equipos o de GEN III tienen mayor grado de penetración a través de la niebla que los de GEN II, ya que la niebla tiene el menor transmitancia en la zona espectral de $0,450\mu\text{m}$ a $0,500\mu\text{m}$ (los tubos de GENIII trabajan en la zona espectral de $0,625\mu\text{m}$ a $0,900\mu\text{m}$ y los de GENII de $0,480\mu\text{m}$ a $0,850\mu\text{m}$)

◆ reflectancia

Para introducirnos en el comportamiento de los fotones debemos adentrarnos en el campo de la fotometría si nos referimos a las frecuencias del espectro visible o a la radiometría si tratamos las frecuencias del IR. Tanto en un campo como en otro, en el choque de los fotones sobre un cuerpo pueden producirse cuatro acciones, que son la absorción, reflexión, transmisión y la emisión. Las tres primeras son consecuencia de la incidencia de energía fotónica.

En el espectro visible, la luz externa procedente del sol o de las estrellas, astros o luna proporciona iluminación al objeto observado y debido a la reflexión de esa luz nos permite ver los objetos y sus colores. Para esta frecuencia espectral se produce una mínima absorción. Para el infrarrojo ocurre lo contrario ya que la señal procede de la mayor emisividad del objeto y una mínima reflexión.

Por tanto, la reflectancia de un objeto a la incidencia de la radiación fotónica es el efecto más importante y del que dependerá la capacidad para ver imágenes claras con un sistema de intensificación de imágenes.

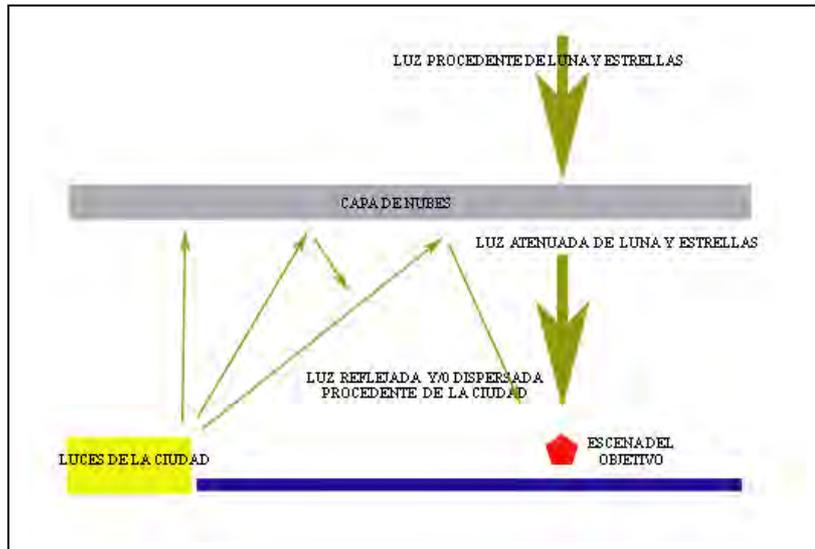
Así mismo, la reflectancia es una función de la longitud de onda o en este caso de la forma y color del objetivo.

◆ condiciones celestes de la noche y luz artificial

La iluminación o luz residual que se tiene en la escena cuando estamos observando, normalmente es la suma de la luz de celeste (luna, estrellas), resplandor atmosférico del cielo y luz artificial reflejada y/o dispersada procedente de una zona iluminada (zona urbana o portuaria).

Como ya se sabemos, es importante la condición celeste de la noche, en cuanto a la presencia de luna o no, así como su altura, la fase en la que se encuentre y la presencia o no de nubes y el tipo de las mismas. Una mayor cantidad de luz procedente del cielo mejora los resultados que se obtienen. La luz artificial se considera un factor secundario, pero en muchos casos hay que tenerlo en cuenta, ya que está relacionado directamente con la cantidad de luz residual.

En la Fig.2.19 sobre las condiciones de iluminación, puede verse que la luz artificial procedente de una gran ciudad reflejada en una capa de nubes se suma a la luz dispersada y a la luz atenuada por la capa de nubes procedente de luna y estrellas, lo que produce una iluminación adicional en la escena del objetivo. Este efecto puede afectar a zonas de distancias relativamente largas, llegando incluso a las 7 u 8 millas.



Condiciones de iluminación

Fig.2.19

Para el marino, este efecto puede verse frecuentemente, por ejemplo, arribando al puerto de Barcelona en días de buena visibilidad, este efecto puede comprobarse hasta a 10 millas de distancia de puerto. En la Fig.2.20 podemos observar un ejemplo del efecto que puede producir las luces artificiales sobre un manto nubloso cercano a un núcleo urbano.

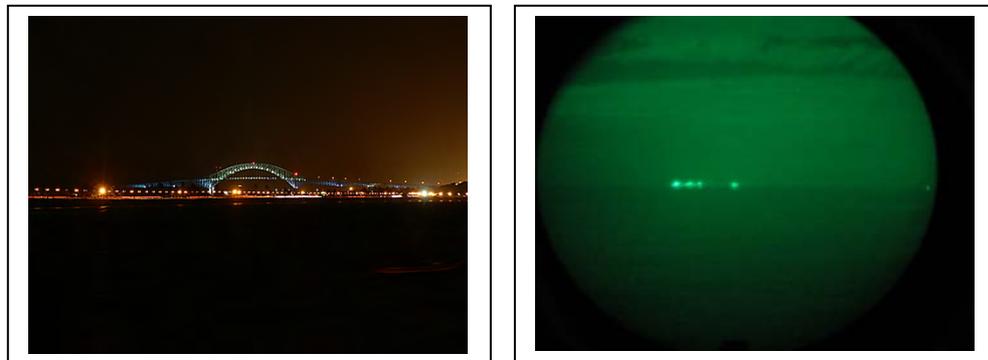


Fig. 2.20

◆ contraste

En términos simplificados, la sensibilidad de contraste se refiere a la habilidad del sistema visual para distinguir entre un objeto y el fondo. Por ejemplo, imagine un gato negro en un fondo de nieve blanca (alto contraste). Un gato blanco en un fondo de nieve blanca (bajo contraste).

El contraste de la imagen observada o el contraste de la escena se define como la diferencia en brillo entre el objeto observado y el fondo que le rodea, donde un objeto con contraste bajo (5%) es difícil de distinguir, mientras que un contraste alto (90%), es fácil de distinguir.

Técnicamente se podría definir como una cantidad compleja que depende de la suma de la radiación espectral del fondo y del objeto.

◆ clutter

Podríamos definir el clutter como los objetivos parásitos, o falsos contactos que pudieran tratarse de un objetivo, pero que en realidad no lo son y además puede confundir la presencia del objetivo buscado. Este efecto es comparable al que se produce en los radares de navegación marítima y que es conocido por los marinos.

Este efecto ha sido estudiado (113) principalmente para la detección termal, pero se establece que los mismos principios podrían aplicarse a las tareas de detección con cualquier equipo de visión desde la visión normal directa hasta con el empleo de intensificadores de visión nocturna en el NIR.

Este estudio concluye que las escenas de detección podrían categorizarse en términos de relación entre la señal y las falsas detecciones (signal-to-clutter – SCR) o también como la relación entre el contraste de objetivo y el contraste de objetivos falsos.

El SCR es calculado como la relación de contraste entre objetivo / fondo de la imagen y el contraste entre diferentes elementos del fondo entre sí. Por tanto, los alcances para una detección fiable se reducirán con el incremento del SCR, por lo que es conveniente tener un SCR bajo para mejorar la detección y la posibilidad de falsos objetivos.

Otro factor relacionado con el SCR a tener en cuenta es la complejidad de la imagen y esta complejidad puede clasificarse en “sin complejidad” “baja” “moderada” y “alta”. Por ejemplo, una imagen no tiene complejidad si es virtualmente uniforme en una escala comparable al tamaño del objetivo.

Las escenas sin complejidad requieren muy poca resolución para la detección del objetivo. Por otro lado las escenas con alta complejidad contienen muchos objetos, pudiendo confundir estos objetos que se encuentran en las cercanías del objetivo con el propio objetivo.

La complejidad de la escena es estrictamente una función del contenido espacial, no del contraste. El denominador de SCR, que es el contraste de los falsos objetivos de fondo, se relaciona con complejidad de imagen.

El SCR, nos proporciona información de la posibilidad de observar falsos objetivos y relaciona el contraste y la complejidad espacial de una imagen. Una menor complejidad de imagen de fondo entre los objetos del fondo, implica un mayor contraste entre el objetivo y el fondo y por lo tanto un mayor SCR

◆ resolución

La resolución, como se vio en el capítulo 2.1.1.2 (Pág.32) está directamente relacionado con la agudeza de la imagen que se observa en el visor del tubo. Es el dato que mejor puede predecir la capacidad de reconocimiento del sistema y nos indica la capacidad de distinguir pequeños detalles de la escena observada.

La resolución es un parámetro del sistema, por lo que es un valor constante y distinto para cada equipo.

◆ equipo utilizado

La relación entre la agudeza visual que ofrecen estos equipos y la habilidad para detectar o reconocer un objetivo es una relación compleja que varía de un individuo a otro y de un equipo a otro.

También, la agudeza visual está relacionada con las distancias de detección y la probabilidad de detección de personas o embarcaciones en el agua y que decrece con la disminución de la luz residual y el contraste del objetivo.

Es evidente que según la generación del equipo se obtendrán unos resultados u otros, aunque de forma general y exceptuando algunas cuestiones puntuales, los equipos que utilizan tubos de Gen III ofrecen mejores prestaciones y resultados en alcance de detección y probabilidad que los de GenII.

Otros factores no menos importantes que afectan a la intensificación de imagen y que deben de tenerse en cuenta cuando estas cámaras son utilizadas en un buque que navegue en condiciones meteorológicas adversas, son el movimiento propio del observador o el del objeto observado.

En estas circunstancias si se trata de un sistema fijo deberá tener un sistema giroestabilizado para ser plenamente operativo ya que de acuerdo con algunos estudios relacionados sobre este tema

(104), parece claro que es mucho más fácil detectar un objeto en movimiento por un observador fijo que no al contrario.

Cuando la cámara es portátil este efecto puede solucionarse con la pericia y la práctica del observador, y que en el caso de ser un marino con experiencia no debería implicar mayor problema del que significa la utilización de unos prismáticos. También debe tenerse en cuenta la considerable importancia que tiene el adiestramiento del observador para la utilización de estos equipos bajo cualquier circunstancia.

Si este principio lo aplicamos a la detección de naufragos, comprenderemos que además de otros muchos factores, las condiciones de la mar supondrán una mayor dificultad de detección.

2.1.1.4. Principales limitaciones de los intensificadores

Después de estudio de estos equipos y de su aplicación se debe tener en cuenta una serie de limitaciones.

- agudeza visual:

La agudeza visual se puede evaluar con la tabla de Snellen valorando la habilidad de identificar pequeñas letras negras de alto contraste sobre un fondo blanco.

Por ejemplo el valor 20/20 significa que un paciente puede leer un objetivo (cierta letra) a 20 pies. Igualmente, 20/40 significa que una persona debe estar a 20 pies para leer la misma letra que una persona con visión 20/20 puede leer estando a 40 pies.

Si 20/20 es considerado el 100% de eficiencia, para un valor del 20/40 se considera únicamente un valor del 85% de eficiencia.

Este valor de la medida de la agudeza visual que permiten estos equipos, mide el detalle más pequeño que podemos ver, pero no representa la cualidad de la visión en general.

La relación entre la agudeza visual y la capacidad de detectar o reconocer un objeto es una relación compleja que varía de una persona a otra y de un equipo a otro.

Par tanto para este estudio se asume una relación de tipo lineal entre la agudeza visual y la habilidad para reconocer un objetivo.

Teniendo en cuenta estudios realizados al respecto (15), la principal limitación es que rara vez se alcanza una valor de agudeza visual de 20/40 de la tabla Snellen, por los utilizadores de estos equipos, lo que supone una eficacia máxima del 80%

- campo de visión:

Estos equipos ofrecen como mucho un campo de visión de 40°, lo que impide una visión periférica y como referencia téngase en cuenta que los prismáticos de uso náutico son de 7 aumentos y 50° de campo visual. Además si se utilizan lentes de aumento el campo de visión se hace mucho más pequeño, produciendo un efecto parecido al de estar viendo a través de un tubo. Está es una limitación considerable para cierto tipo de tareas en la mar, como puede ser la búsqueda de personas en el agua.

- ruido visual.

Este es uno de los efectos que en mayor medida se han puesto de manifiesto en las distintas observaciones realizadas en los capítulos posteriores. El ruido visual puede aparecer en tres formas: destellos (sparkle), florecimiento (blooming) o (washing out) y halo.

Los destellos están causados por fotoelectrones que golpean de forma aleatoria en el fotocátodo, y el efecto es como de burbujas (sparkle) o como nieve cayendo frente a un coche cuando las luces están encendidas.

“Blooming” y “halo” están también relacionados con los efectos del ruido y ambos ocurren cuando se visionan luces brillantes a través de los tubos intensificadores. El blooming o florecimiento está causado por la dispersión de la luz intensificada alrededor del filo de la imagen, resultando una imagen borrosa. Halo es un anillo brillante alrededor de una imagen que puede causar que pase desapercibido una imagen de menor brillo.

En la imagen de la Fig.2.21 podemos observar la imagen de una embarcación de prácticos en el que se puede observar el efecto de “blooming” y al fondo el destello de la luz de una boya con el halo formado alrededor de la luz

Otra limitación según estudios al respecto (8), es la degradación de la percepción del fondo de la imagen. Se establece que la percepción del fondo de la imagen decrece progresivamente y sugiere que cuando los valores de la iluminación están sobre un 50% de la iluminación lunar, hay una disminución en la capacidad resolutive del sistema y el SNR del sistema degrada la capacidad de trabajo de los equipos.



Fig.2.21

2.1.1.5. Evaluación de estos sistemas

Además de los parámetros que ofrecen los fabricantes, una forma práctica de evaluar un sistema de visión nocturna es mediante su uso. En este caso los factores básicos a tener a evaluar son:

La ganancia: ¿Se puede ver el objeto en condiciones reales de oscurecimiento? En mayores condiciones de oscuridad, más duro es el trabajo para el sistema, para lograr dar una imagen clara.

El alcance: El alcance eficaz es una función equilibrada de la ganancia del sistema, resolución y amplificación de la imagen. Mientras que un objetivo con una lente potente proporciona más amplificación, también reducirá la cantidad de luz disponible capturada. La lente sólo puede proporcionar un alcance mayor si es de alta calidad óptica y se usa con un tubo intensificador de imagen con una ganancia alta, y la resolución excelente. El mejor alcance eficaz, normalmente se logra con ópticas de calidad con la amplificación mínima de 5 aumentos (X5) y un tubo intensificador con una resolución alta.

La ergonomía: El tamaño, peso y facilidad de uso, son consideraciones a tener en cuenta. Si se plantea utilizarlos como unos prismáticos, es más conveniente un equipo pequeño. Un dispositivo ligero será más cómodo para una observación prolongada. Los interruptores y mandos, lógicamente deben ser fáciles de usar. Si el sistema, está integrado en el puente, y funciona mediante un monitor, deberán tener en cuenta los principios de seguridad en la navegación y ergonomía adecuados para su ubicación en el puente.

La fiabilidad: Con un mantenimiento y uso apropiado, con el diseño de los modernos sistemas de visión nocturnos, este parámetro no es preocupante.

Sin embargo, si se adquiere un equipo usado o reacondicionado después de pasar el periodo normal de vida y si además lleva tiempo sin usarse, los compradores deben sopesar los riesgos asociados. No pueden restaurarse los intensificadores de la imagen viejos y creer que el resultado será como uno nuevo. Además es imposible de anticipar la vida de un tubo usado y cualquier tubo con el uso se degrada.

Así mismo, el abuso en exposiciones a la luz intensa puede comprometer la actuación de un tubo, así como disminuir el tiempo de vida del mismo.

Siempre se debe tener cuidado en cubrir la lente del objetivo y guardar el equipo apropiadamente cuando no se esté usando.

2.1.1.6 Equipos y sistemas de intensificación de imágenes

Este capítulo está dedicado a los distintos equipos que utilizan tubos de intensificación de luz en al ámbito marítimo, y en concreto a los tres siguientes:

- Tubos de amplificación utilizados en forma de monóculos o binóculo, para su utilización manual o ensamblado en una máscara o caso.
- Sistema utilizado principalmente en buques HSC como equipo anticolidión y de forma accesoria como elemento de observación y ayuda a la navegación.
- Cámara combinada con sistemas de IR.

Monóculos y binóculos de intensificación

En este capítulo se describe un modelo de visor monóculo/binóculo de tubos de 3ª generación. Además de conocer sus características, se efectúan diferentes observaciones, para conocer su rendimiento en la aplicación para la navegación y seguridad marítima.

Para el estudio de este tipo de equipos, efectuamos un trabajo de campo con dos visores de tubos de intensificación de luz residual de ITL Optronics LTD, que pertenece a la empresa Israelí International Technologies LTD fabricante de una amplia gama de equipos de visión nocturna.

Los visores fueron cedidos por la empresa Nightvision Lasers Española S.L. del grupo TCA (Technik Consulting Alvade S.L.) que es el distribuidor en España.

El visor es del modelo MINI N/SEAS, y el fabricante lo define como una “mini-mira nocturna de adquisición de un solo ojo” (Fig. 2.22) aunque para este estudio se dispuso de dos monóculos que mediante un mecanismo puede ensamblarse, formando una unidad de 2 visores o binóculo, de forma similar a un prismático. También está diseñado para ensamblarlo en un sistema de sujeción a la cabeza o en un casco con un sistema de colimado, lo que permite tener las manos libres.(71) (Fig. 2.24)

Esta empresa comercializa estos mismos tubos montados en un sistema de visión diurna/nocturna y que incluye un compás, telémetro láser y situación GPS con un aspecto exterior muy similar a unos prismáticos corrientes.



Fig. 2.22

Las principales características proporcionadas por el fabricante del visor son:

- Tubo intensificador de GEN III + (Auto-gated)
- Resolución del tubo: 64 Lp/mm. (según fuentes ajenas al constructor la resolución real está sobre las 50 Lp/mm)
- Resolución del sistema: 1.3 Lp/mRad
- Ganancia: > 3.000
- FOV: 40°
- Dimensiones: 115x65x40 mm.
- Peso: 330 gr.
- Alimentación: Batería de 1.5 V. (Alcalina o Litio)
- Operatividad: Batería Litio 60 horas. Batería Alcalina 30 Horas
- Óptica: El visor tiene una lente de un aumento, pero existe la posibilidad de acoplarse otra lente de tres aumentos (X3).

Para este trabajo además de disponerse de está lente X3, utilizamos otra X2, que se probaron conjuntamente obteniendo una considerable capacidad de amplificación. En la fotografía de la Fig.2.23 pueden verse estas lentes y su ajuste en el visor.



Fig. 2.23

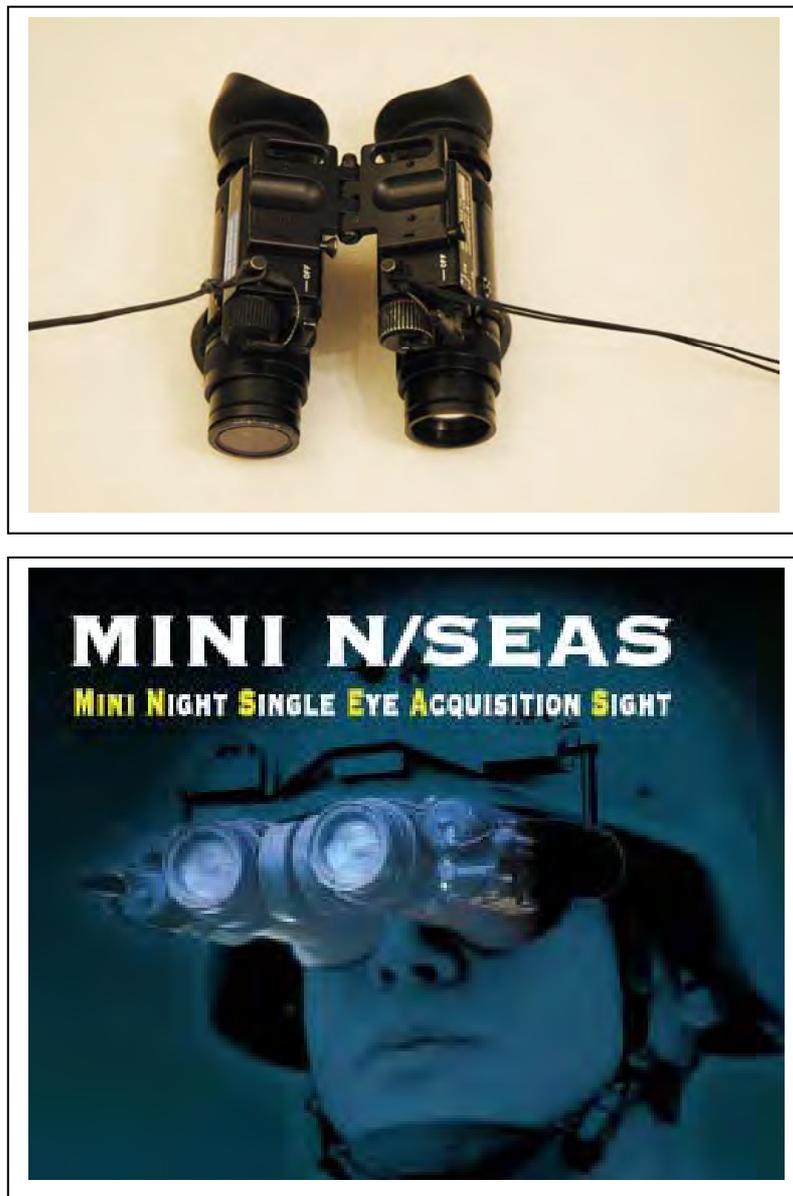


Fig. 2.24

El uso como monóculo o binóculo es cómodo excepto cuando se monta en una máscara o casco, que resultan algo incómodo e inadecuado para la aplicación que se estudia en esta tesis, excepto que se utilice en una embarcación pequeña en la que el tripulante deba tener las manos ocupadas en los mandos de la embarcación o en el timón.

El uso como monóculo permite una mejor adaptación de la visión en el paso de visión intensificada a la visión a la oscuridad de la noche en el puente de gobierno de un buque, por otro lado, el binóculo ofrece la profundidad de campo que no se consigue cuando se utiliza como monóculo.

La elección dependerá del usuario, ya que en unos pocos segundos se puede cambiar la configuración del sistema de visión monocular a binocular y viceversa.

No obstante, según un informe de Laboratorio de Investigación Aeromedica de la U.S. Army (148), en el que se examinaron las diferencias, en relación al contraste del objetivo observado, entre el uso de monóculo, bióculo (1 tubo con dos oculares) y binóculo, concluye que el uso de equipos de visión nocturna binocular es el mejor bajo todas las circunstancias en las que fue utilizado.

Para captar las imágenes obtenidas con las que se ilustra este capítulo, utilizamos una cámara réflex digital de alta resolución y de un sistema mecánico montado sobre un trípode que permitía, acoplar y enfocar a una cámara fotográfica o de video la imagen observada en el visor del monóculo del equipo intensificador.

Para tomar fotografías nocturnas con tubos intensificadores existe la posibilidad de acoplar el tubo intensificador entre la lente y el cuerpo de una cámara, como puede verse en la Fig. 2.25, aunque este procedimiento proporciona una imagen del sistemas completo, si no únicamente del tubo intensificador.



Fig. 2.25

Quizás el sistema utilizado para la obtención de estas imágenes, no resulte técnicamente el más adecuado para un evaluación de un sistema óptico, pero al no ser esta la finalidad de este trabajo y ser el único del que se disponía, se consideró que aunque la calidad de las fotografías obtenidas no fuesen excelentes sí que permiten mostrar las posibilidades y resultado de estos visores, en el ámbito de estudio de esta tesis.

Observaciones efectuadas

La finalidad de estas observaciones es la de fotointerpretación y la valoración de la información visual que puede aportar este sistema de intensificación.

Para estudiar el comportamiento de este sistema, realizamos diferentes pruebas, disminuyendo el rango de distancias en cada observación.

- observaciones a distancia superior a 2 millas
- observaciones a distancia inferior a 2 millas
- observaciones del entorno próximo (de 500 a 50 metros)
- observaciones de personas fuera del agua
- observaciones de personas dentro del agua

Observaciones a distancia superior a 2 millas

Comenzamos las observaciones a distancias largas, en las inmediaciones del puerto de Barcelona, y empleamos las ópticas de tres y cinco aumentos (X3 y X5)

En la primera observación se empleó la lente de 5 aumentos.

Las condiciones atmosféricas en las que se tomaron estas imágenes eran:

- ✓ Temperatura: 8°
- ✓ Humedad Relativa: 95%
- ✓ Cielo: 1 octa de estratocúmulos
- ✓ Fase lunar: Creciente
- ✓ Visibilidad: Buena.
- ✓ Estado de la mar: Marejadilla a marejada

No se dispone de los valores de la iluminancia en el punto donde se encontraba el objetivo, pero se asume que es la misma iluminancia que la de la situación del observador, y aplicando los valores de la tabla de la Fig.1.3 que este caso oscilan entre $5 \cdot 10^{-2}$ lux y 10^{-2} lux , valor de referencia al que debe sumarse el efecto que produce luces de la ciudad como se ve en la Fig. 2.19.

En estas condiciones tomamos las imágenes de la Fig. 2.26 del buque LNG “GIMI”. La fotografía fue tomada a una distancia de 3 millas utilizando lentes de 5 aumentos.

Como se puede apreciar, es una imagen monocromática verde, en la que se ven las luces de tope y la luz de costado muy intensas, así como las luces procedentes de la cubierta de Pp. También puede distinguirse parte del casco y las esferas de los depósitos del gas licuado.

En condiciones normales, observando con unos prismáticos sin utilizar la imagen intensificada, se aprecian las mismas luces pero mucho más tenues, pero no se puede distinguir la imagen de la forma de la cubierta.

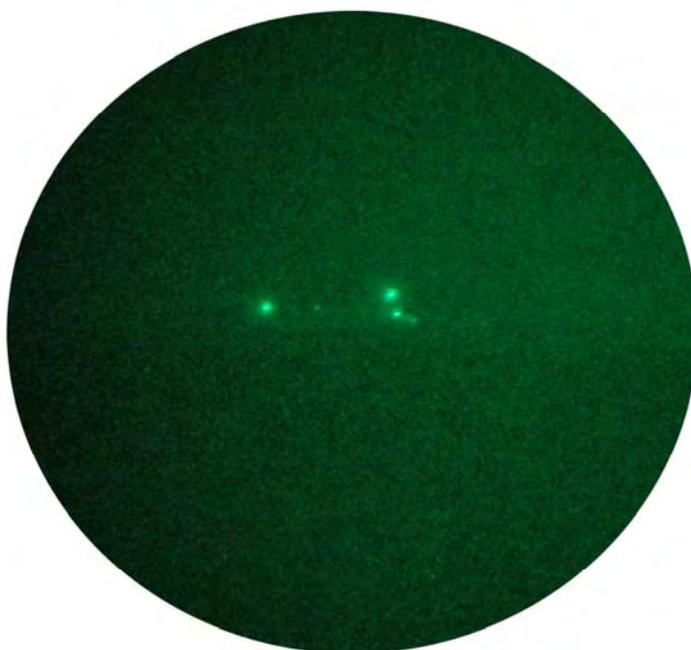


Fig. 2.26

Se efectuó una serie de observaciones en las mismas condiciones, y los resultados se comparan con la visión sin intensificación, comprobando que se produce un aumento en la distancia de detección de buques ya que las luces de tope son visibles a mayores distancias.

La Regla 22 del “Reglamento Internacional Para la prevención de Abordajes” (RIPA) sobre “visibilidad de luces”, establece que el alcance visual de las luces de tope para buques de eslora igual o superior a 50 metros será de 6 millas.

En las observaciones realizadas, con visión sin intensificar no era posible ver las luces de buques lejanos, sin embargo con el equipo de intensificación se observaban las luces de tope de los buques en algunos casos a distancias mayores de 6 millas. Esta cualidad resulta interesante, aunque intrascendente, ya que no aportando ninguna otra información relevante para el navegante.

La valoración de la capacidad de estos equipos para esta distancia de observación se mide en la cantidad de información útil que recibe el marino y en este caso no resulta una mejora relevante respecto a la utilización de unos prismáticos náuticos de calidad.

Continuando con el en mismo rango de distancias, se obtiene la imagen de la Fig. 2.27 que viene a continuación. Las condiciones atmosféricas en la observación son:

- ✓ Temperatura: 2°
- ✓ Humedad Relativa: 77%
- ✓ Cielo: 5 octas de estratocúmulos
- ✓ Fase lunar: Sin luna.
- ✓ Visibilidad: Buena.
- ✓ Estado de la mar: Marejadilla a marejada

Esta imagen está tomada sin lente de aumento. Se trata de un buque que está fondeado con las luces de cubierta encendidas.

Puede apreciarse claramente la forma de las nubes como consecuencia de la luz artificial procedente de la ciudad, así como un amplio campo de visión.



Fig. 2.27

Por lo que respecta a la imagen del buque, aparece el efecto del “ruido visual” en forma de halo y fluorescencia (blooming) los puntos de luz que impiden cualquier tipo reconocimiento de las formas de este buque.

Un ejemplo del efecto negativo producido por el ruido visual, puede apreciarse en la imagen de la Fig. 2.28, que es la imagen del buque anterior pero tomada con la lente de 5 aumentos, lo que parece indicar que con el empleo de lentes de aumento, también estos efectos negativos aumentan. El efecto que se aprecia en la fotografía impide el más mínimo reconocimiento o interpretación de la imagen.

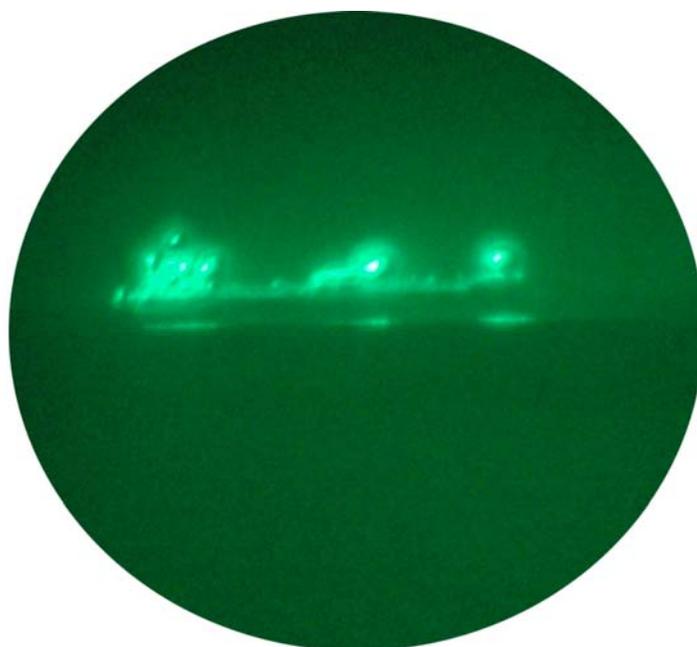


Fig. 2.28

Con las mismas características, en cuanto a distancia y condiciones de luz residual se realizaron otras 50 observaciones de diferentes buques. Del total de las observaciones, en un 10% aproximadamente se obtuvo resultado igual al obtenido en las observaciones de este capítulo y mostradas en las imágenes de anteriores y cuyo resultado se considera el mejor. El resto de observaciones (90%) el resultado fue peor.

Si tenemos en cuenta que el resultado obtenido está relacionado con la cantidad de información útil que recibe el marino, y atendiendo a los efectos negativos producidos, podemos determinar que:

Para las observaciones de buques dentro del rango medio de distancia mayores de dos millas no resulta muy efectivo ya que su utilización no aporta información que podamos considerar importante.

La utilización de lentes de aumento disminuyen considerablemente en campo de visión, con lo que se dificulta la búsqueda de contactos. También se aprecia una relación directa entre la utilización de lentes de aumento y el ruido visual.

Efecto perjudicial del halo y la florescencia para la interpretación de imágenes intensificadas.



Fig. 2.29

En la imagen superior Fig. 2.29 se observa otro buque, a la distancias de 2 millas utilizando una lente de amplificación de dos aumentos (X2).

Las condiciones atmosféricas en la observación son:

- ✓ Temperatura: 2°
- ✓ Humedad Relativa: 77%
- ✓ Cielo: Despejado
- ✓ Fase lunar: Llena
- ✓ Visibilidad: Buena.
- ✓ Estado de la mar: Marejadilla

El objetivo es un buque de porte pequeño en demanda de fondeadero en el puerto de Barcelona. Una de las características de esta imagen, es que fue tomada con luna llena por lo que puede apreciarse la imagen con mayor contraste y brillo, aunque la información que aporta respecto al buque es mínima.

Únicamente se aprecia las luces de navegación amplificadas y se distingue algo de la silueta del buque.

Como características, cabe mencionar la aparición de ruido visual en forma de halos alrededor de los focos de luz, así como una mayor amplitud de campo de visión (FOV) como consecuencia de utilizar una lente de menor aumento.

Observaciones a distancia inferior a 2 millas

Como continuación de la observación de la Fig. 2.26 para observaciones a distancias superiores a dos millas, se obtiene la imagen de la Fig.2.30 en la que se ve nuevamente el buque tanque LNG “GIMI” entrando por la bocana Sur del puerto de Barcelona. Las condiciones eran las mismas y en el momento de la observación no había luna.



Fig.2.30

La imagen fue tomada con la lente de 3 aumentos. Como podemos comprobar, se aprecia claramente los detalles del buque así como las boyas que delimitan el inicio de la canal de acceso, de las cuales dos de ellas se encuentran en la fase de apagadas y dos encendidas, las apagadas no son visibles sin el equipo de intensificación.

Las distancias desde el observador a las boyas es la siguiente:

- ✓ Distancia boya más próxima = 0.66 millas
- ✓ Distancia boya más lejana = 1.3 millas
- ✓ Distancia al buque = 1 milla.

Teniendo en cuenta que la distancia a la que se encuentra el buque es pequeña, y que existe un nivel alto de luz residual procedente de las luces del puerto se puede considerar que la calidad de la imagen intensificada es buena y aporta información que sería imposible distinguir sin el sistema intensificador, como por ejemplo, las boyas de la canal que se encuentran apagadas.

No obstante se sigue apreciando el efecto negativo del halo alrededor de los puntos de luz con mayor intensidad lumínica. Incluso en luces con poca intensidad lumínica, como se puede percibir por pequeño halo en las boyas que se encuentran en la fase de encendido.



Fig.2.31

Siguiendo la serie de fotografías que se toman a medida que el buque se aproxima al observador, y se obtiene la imagen de la Fig. 2.31 en la que podemos distinguir detalles del barco, pero el efecto del halo del foco de maniobra de proa, impide la visión clara en algunas zonas.



Fig.2.32

En la imagen de la Fig.2.32 obtenida de la zona de popa del mismo barco a una distancia de aproximadamente 500 metros podemos observar que, donde no hay focos de luz intensa, el efecto del halo no es tan grande y permite apreciar la capacidad amplificadora del equipo, así por ejemplo, podemos ver el humo saliendo de las chimeneas en la oscuridad de la noche.

Observaciones del entorno cercano:

Si el objeto de las observaciones lo acercamos al rango entre los 50 y los 500 metros, obtenemos unas prestaciones mucho mejores, como comprobamos en las fotografías de las Fig. 2.33 en la que se puede distinguir las marcas de la zona de empuje para remolcadores pintadas en el costado del casco, así como algunos detalles de la cubierta y estructura de la cubierta y los depósitos de gas. Estas marcas del costado no son visibles a esta distancia sin un sistema de intensificación de luz. Esta imagen fue tomada con la lente de X3.



Fig. 2.33

En esta imagen tomada unos 300 metros con la lente de 3 aumentos se aprecia claramente el efecto del halo, (Fig.2.34) al observar el destello de la luz intermitente del bote de prácticos y que impiden ver prácticamente la embarcación, aunque se puede distinguir con claridad la superficie de agua por donde navega.



Fig. 2.34



Fig.2.35

En la imagen superior (Fig.2.35) se tomo a la misma distancia pero sin lentes de aumento, siendo una constante la aparición del ruido visual en forma de halo.

Para hacernos una idea de como es una imagen en le medio terrestre (Fig.2.36), tomada a una distancia de unos 400 metros en una zona portuaria con poca iluminación. Está imagen fue tomada sin lente de aumentos.



Fig. 2.36

Observaciones de personas

Después de este estudio de la capacidad de estos equipos de intensificación de luz residual, nos queda un aspecto importante y es la detección de personas en el medio acuático. Para ello se realiza un ensayo utilizando el equipo habitual de las observaciones anteriores para obtener una primera apreciación de la capacidad de detección de un hombre en el agua.

Iniciamos el estudio de detección partiendo de una distancia de media milla, ya que más lejos y una vez conocidas las limitaciones de estos equipos, y según estudios sobre este tema detallados en capítulos anteriores se considera muy difícil la detección a distancias mayores. La posición del hombre en el agua era conocida, por lo que para la prueba no fue necesario efectuar una búsqueda.

Para el estudio se eligió una zona en que las condiciones meteorológicas y de mar no influenciaran negativamente en la prueba.

- ✓ Temperatura: 7°
- ✓ Humedad Relativa: 73%
- ✓ Cielo: 6 octas de estratos
- ✓ Fase lunar: Sin luna.
- ✓ Visibilidad: Buena
- ✓ Estado de la mar: Aguas abrigadas del puerto de Barcelona

En cuanto al valor de la iluminancia en el punto donde se encontraba el “naufrago” y a pesar de ser una noche sin luna, luz residual de la ciudad proporcionaba una iluminancia aproximada de entre $5 \cdot 10^{-2}$ lux y 10^{-2} lux. Se utiliza lentes de 3 aumentos.

Se inicia la aproximación hacia el naufrago desde una distancia de 0.5 millas, y a esta distancia no se pudo detectar al hombre en el agua, y procedimos a disminuyendo la distancia hasta que se pudiese detectar la presencia del naufrago con cierta claridad.

Al llegar a la distancia de 250 se observa un pequeño contacto, pero no se puede determinar con un grado de certeza aceptable de que pueda tratarse de un hombre en el agua

A la distancia de 200 metros del observador se aprecia la imagen de una persona en el agua a la que se le distingue la cabeza y los hombros, como muestra la fotografía de la imagen de las Fig. 2.37.

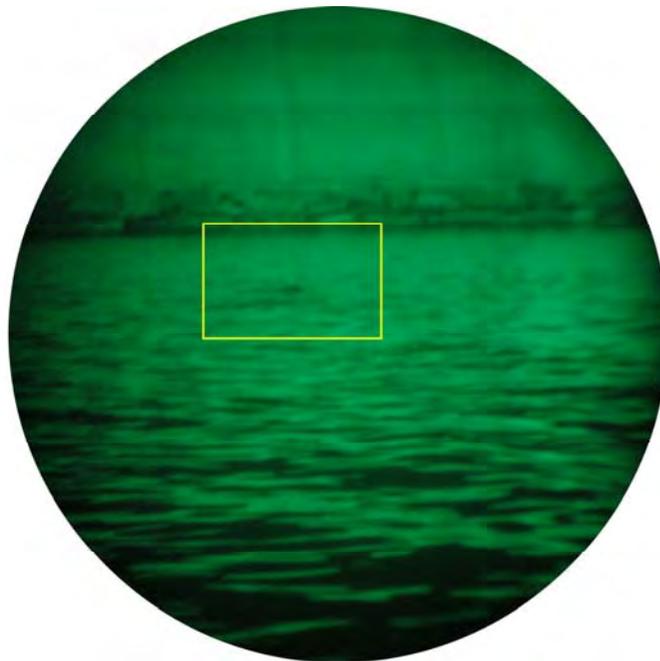


Fig. 2.37

Està persona lleva un traje de neopreno negro, que en cierta forma disminuye la capacidad de detección por la falta de contraste y reflectividad del objetivo.

Se continúa disminuyendo distancia hasta los 120 metros en la que obtenemos la fotografía de la Fig.2.38 en la que se aprecia con claridad la presencia de una persona en el agua y se le pueden distinguir las facciones de la cara



Fig. 2.38

Del resultado de estas observaciones se puede conocer de forma aproximada la capacidad de detección de personas en el agua a una distancia mínima que permita un rescate con cierta garantía y que se confirman por los estudios de la U.S. Coast Guard (Departamento de transporte de los EE.UU.), sobre los alcances de detección de los equipos de intensificación de luz residual en la búsqueda y rescate marítimo (107)(89)(108), para distintas condiciones de iluminancia, visibilidad y condiciones de mar.

Estos estudios también ponen de manifiesto que los equipos de segunda y tercera generación alcanzan un rendimiento marginal en la probabilidad de detección de personas en el agua, incluso cuando las distancias son pequeñas.

Así mismo, la plataforma del observador, que en nuestro caso, normalmente será un buque en movimiento, junto con el estrecho campo de visión con el que se observa con lentes de aumento el estudio, constituyen la causa de los problemas de mareo y desorientación.

Además, la efectividad de los equipos de visión nocturna se ven perjudicada por la presencia de agua salina pulverizada en el ambiente, caso normal cuando se navega en condiciones de mal tiempo. También las luces propias del buque del observador pueden producir una gran cantidad de interferencias a los equipos.

El estudio concluye determinando que la detección de personas en el agua, en pequeñas embarcaciones o en botes neumáticos mediante equipos de visión nocturna con intensificadores de luz residual no son efectivos con altura de olas mayores de un metro.

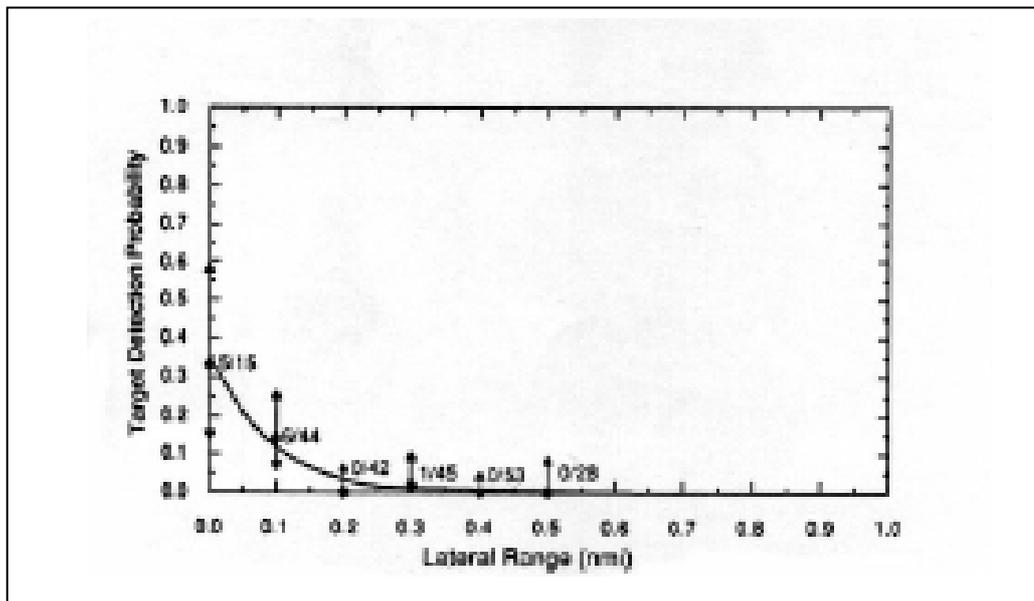


Fig. 2.39

Procedente de los estudios (108) para de detección de personas en el agua para diferentes condiciones altura de ola, visibilidad y condición de iluminación, en la Fig.2.37 se muestran las probabilidad de detección de personas en el agua desde una embarcación de eslora de 12.5 m.

Para una distancia lateral de 0,2 millas (372 m.) la probabilidad de detección es prácticamente nula (0.5%), disminuyendo progresivamente la probabilidad para distancias mayores. La probabilidad de detección más alta supera ligeramente el 3%, que a efectos de la aplicación en la búsqueda de naufragos puede considerarse francamente insuficiente.

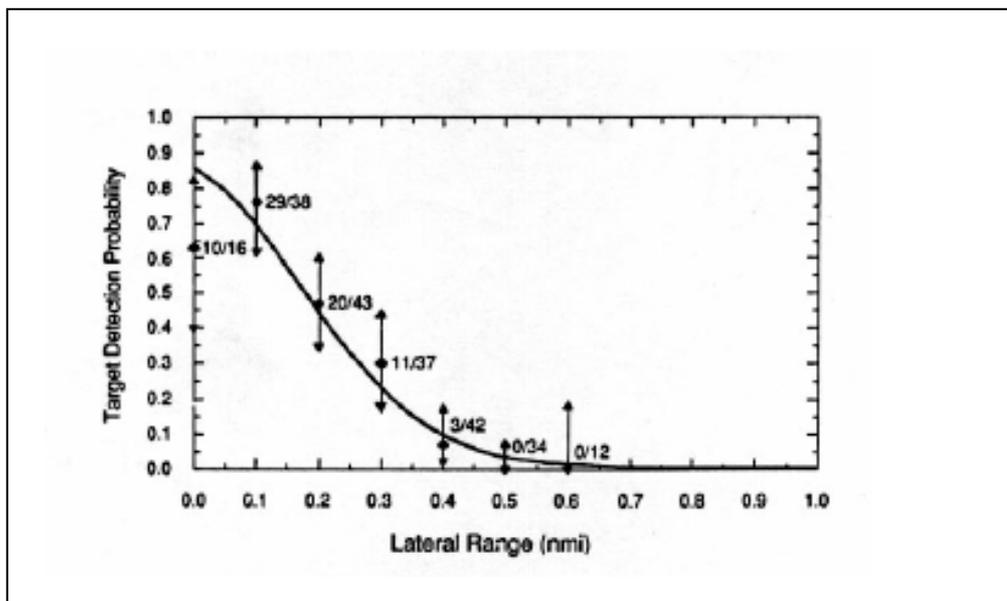


Fig. 2.40

En la Fig.2.40 se representa la probabilidad de detección obtenida en este mismo estudio de personas en el agua desde un helicóptero durante la noche y con una muy buena visibilidad (15 millas) en el que se puede observar que las probabilidades de detección son sensiblemente mayores que las obtenidas en observaciones desde una embarcación, aunque las distancias siguen siendo pequeñas si queremos obtener una probabilidad aceptable.

Según criterios de otros estudios más recientes (89) sobre la detección de personas en el agua en operaciones de búsqueda y rescate desde helicópteros de los EE.UU. con equipos de GENIII, concluyen nuevamente que los objetivos de personas en el agua son esencialmente invisibles.

En la Fig. 2.41 y Fig. 2.42 podemos ver representado las probabilidades de detección para una persona en el agua desde un helicóptero en condiciones de luna y sin luna, y en la que podemos confirmar la pequeñísima probabilidad de detección con luna y la virtual no probabilidad de detección sin luna.

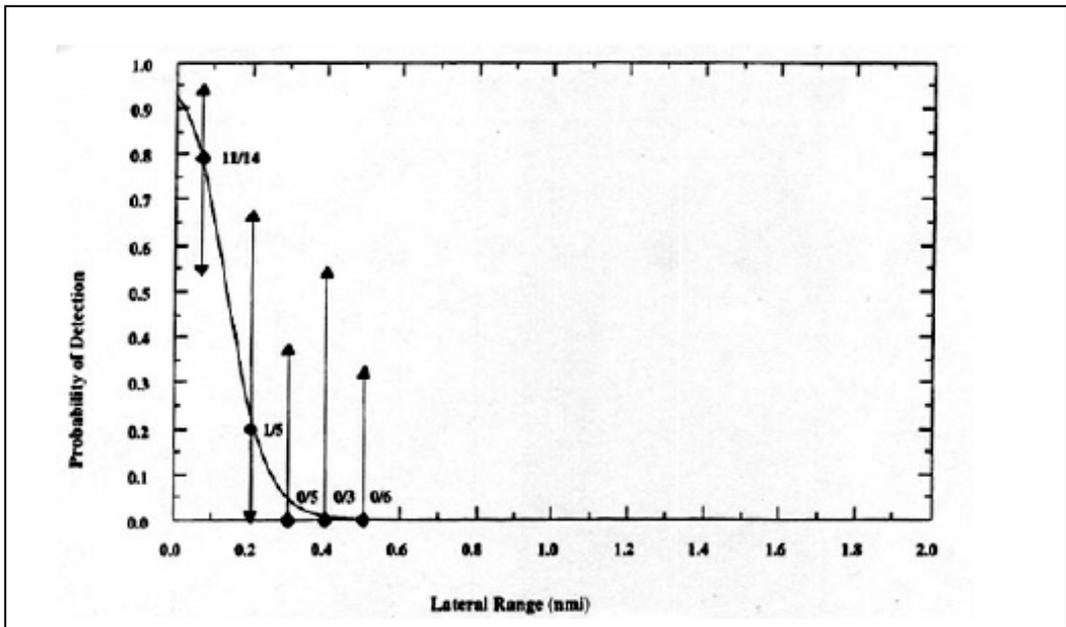


Fig. 2.41

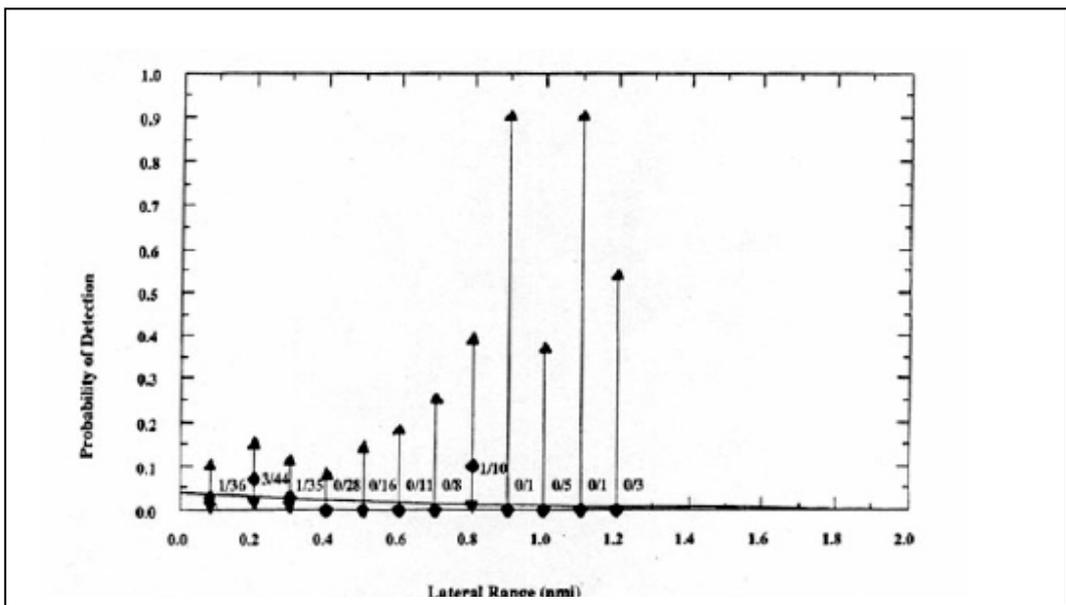


Fig. 2.42



Fig.2.43

Detección de pequeñas embarcaciones y balsas salvavidas

En la detección de personas en la mar a bordo de embarcación neumática o balsas salvavidas, la probabilidad de detección a distancias cortas es algo más alta, circunstancia normal al tratarse de una superficie detectable mayor, como podemos comprobar en la imagen de la fotografía de la

Fig. 2.43, en la cual podemos distinguir una embarcación neumática con una persona a bordo al costado de una boya de señalización a una distancia de 180 metros.

Esta imagen sin la ayuda de intensificador de luz residual no hubiera obtenido la efectividad que se puede ver en la fotografía, aunque en esta imagen existía una luz residual aproximada de 10^{-1} lux, procedente de la iluminación de la ciudad y muelles cercanos al lugar de la observación.

La U.S.Coast Guard y la Office of Naval Research Study, también han efectuado estudios sobre la probabilidad de detección de embarcaciones neumáticas en la mar de diferentes tipos y tamaños, para distintas condiciones de luz residual (108) de donde se obtiene el gráfico de la Fig.2.44, en la que vemos la probabilidad de detección de una embarcación neumática sin luces, para 4/6 personas para una condición de más de altura de ola de 3 a 5 pies durante la noche con lunas desde $\frac{1}{4}$ hasta luna llena, con un equipo de GENIII y en la Fig.2.45 el mismo cálculo para altura de ola de 5.6 a 7.2 pies.

En este gráfico puede apreciarse que una embarcación neumática tampoco es fácil de detectar a cualquier distancia y empieza a hacer especialmente difícil a distancias mayores de 0.5 millas. En noches oscuras con poca luz residual, se produce un efecto de granulado de la imagen que dificulta la detección y aun más la identificación. El estudio también pone de manifiesto la disminución de la visibilidad debido al agua de mar pulverizada en el ambiente.

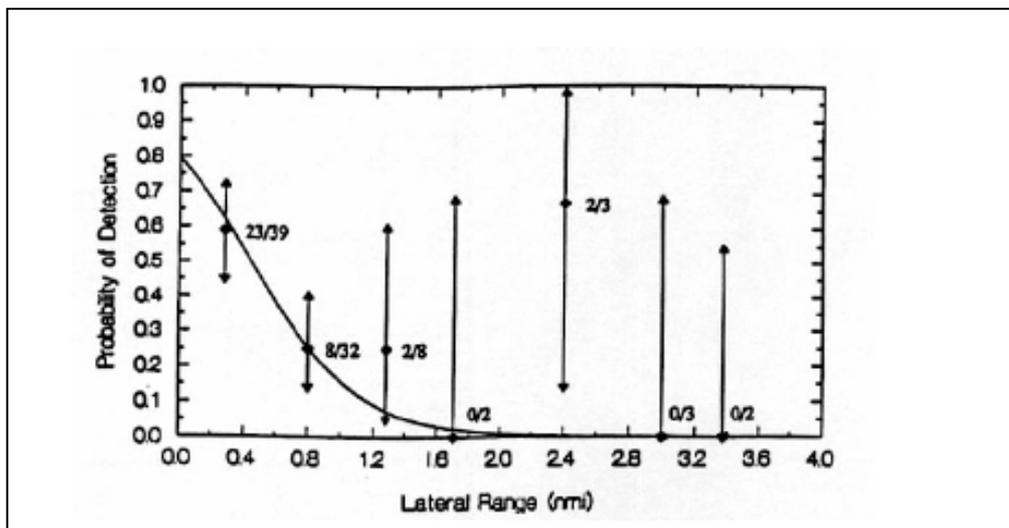


Fig.2.44

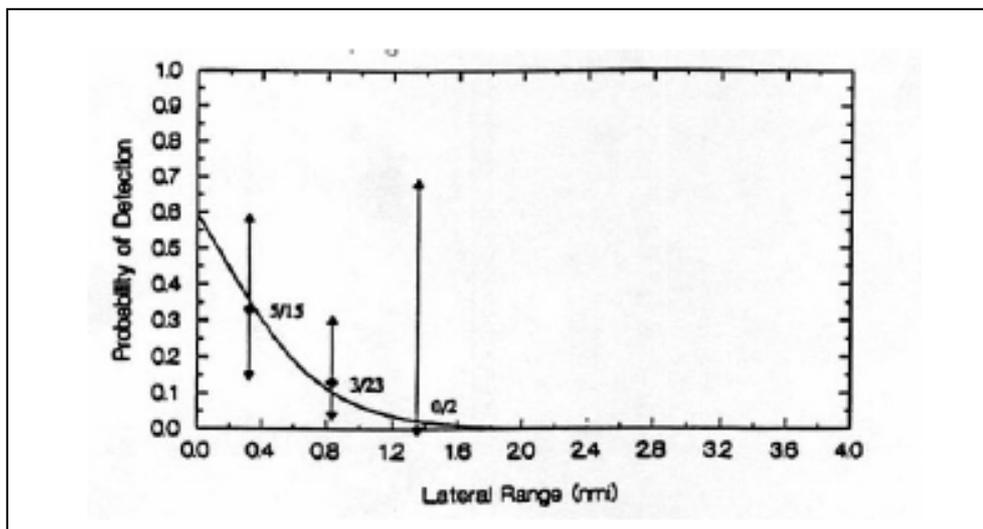


Fig.2.45

En el estudio “Evaluation of Night Vision Goggles for Maritime Search and Rescue” (107), sobre probabilidades de detección para equipos de GENII y GENIII, para personas en el agua y de embarcaciones salvavidas, de una embarcación de 4/6 personas de entre 18 a 21 pies, desde una embarcación pequeña (40 pies) para las tres condiciones distintas de mar y luz residual que se muestran a continuación

- ✓ Altura de ola de 1.3 a 2 pies . Visibilidad 15 mn. sin luna
- ✓ Altura de ola de 2 a 3.3 pies . Visibilidad de 10 a15 mn. sin luna
- ✓ Altura de ola de 2.3 a 3.3 pies . Visibilidad 6 a 15 mn. sin luna

Se obtuvo el gráfico de probabilidades de la Fig.2.46. donde podemos apreciar que la probabilidad de detección de una balsa salvavidas en las distancias de más de 0.2 millas es bastante escasa ($\approx 15\%$).

El estudio concluye que la detección de botes salvavidas con los equipos de visión nocturna de intensificación de luz residual no fue de más de 1/10 de las obtenidas con luz diurna.

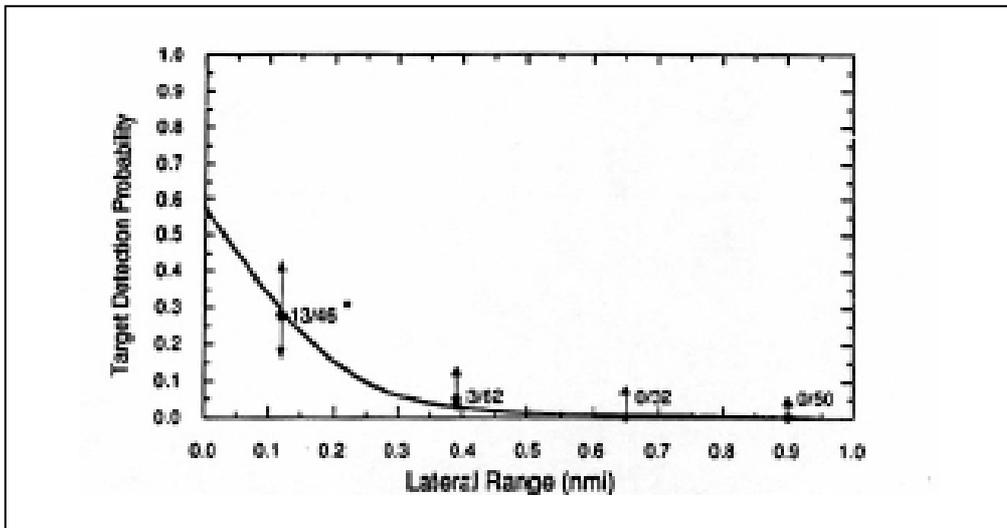


Fig.2.46

Otros estudios sobre detección desde helicóptero (89), de pequeñas embarcaciones o botes salvavidas para 6/10 personas y botes para 18/ 21 personas, en distintas condiciones de luz residual en equipos de GENII, nos proporciona el gráfico de la Fig.2.47 que se muestran la probabilidad de detección embarcación pequeña desde un H/C, con luna visible.

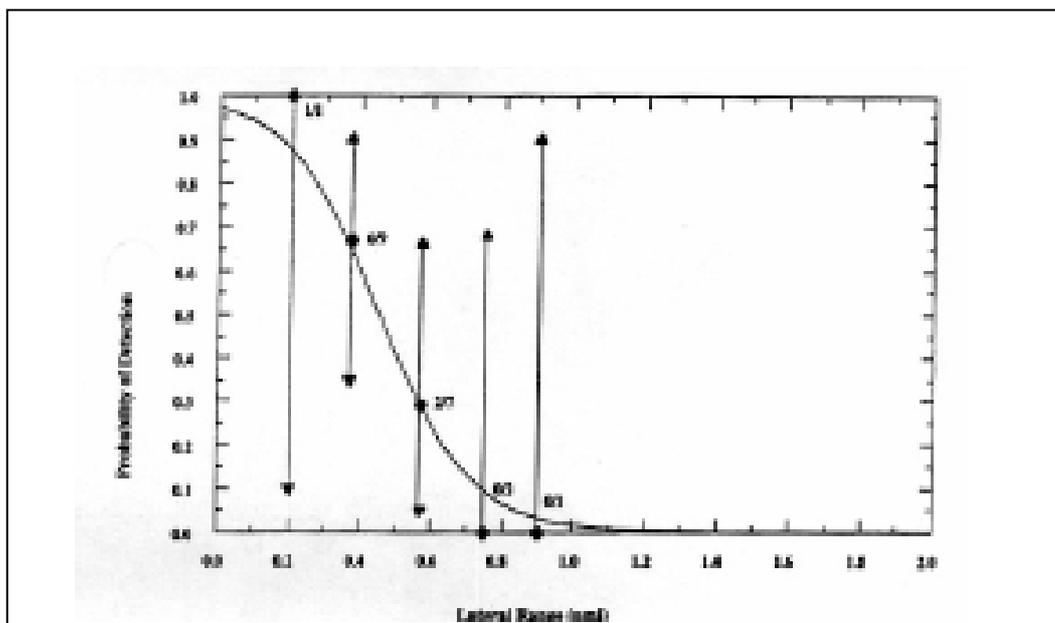


Fig.2.47

En el gráfico de la Fig.2.48 siguiente muestra la probabilidad de detección en las mismas condiciones anteriores, pero con ausencia de luna.

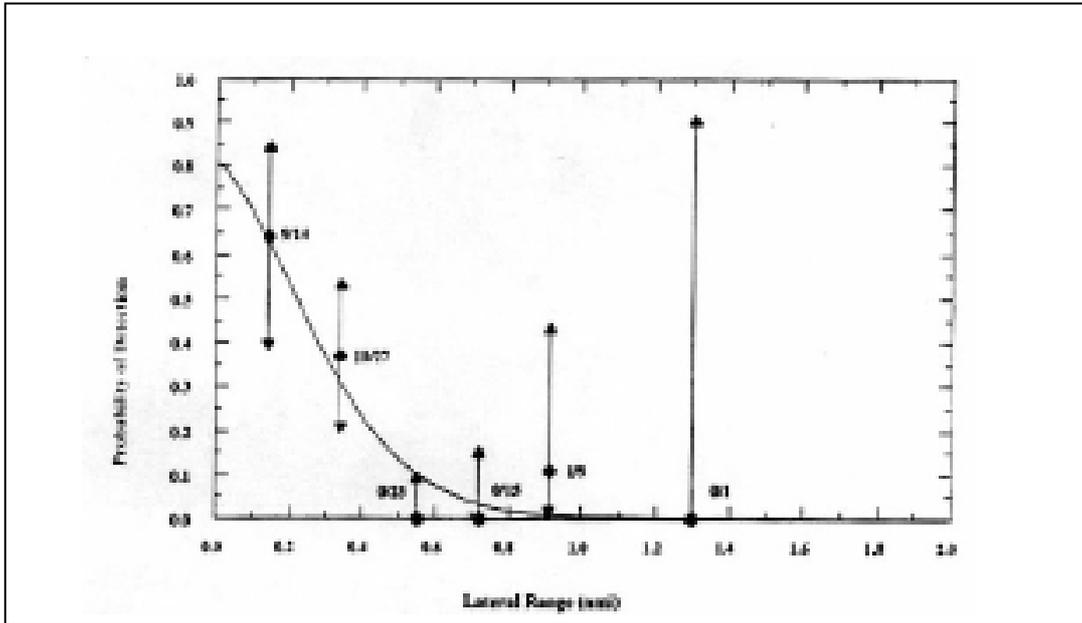


Fig. 2.48

De los dos gráficos anteriores, podemos comprobar que la distancia lateral de detección con luna, de una embarcación pequeña es de ≈ 0.75 millas. Y la misma embarcación sin luna solo será detectable a una distancia de ≈ 0.5 millas.

En los dos gráficos siguientes, podemos obtener las probabilidades de detección para un bote salvavidas para 6/10 personas, desde un H/C para una noche con luna (Fig. 2.49) y para una noche sin luna (Fig.2.50)

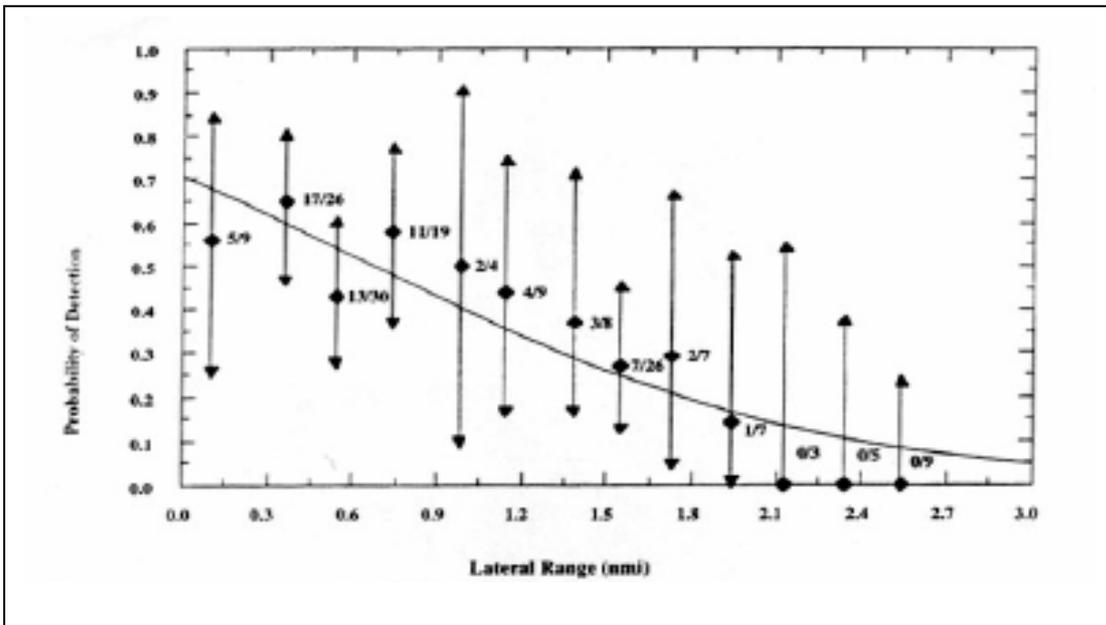


Fig.2.49

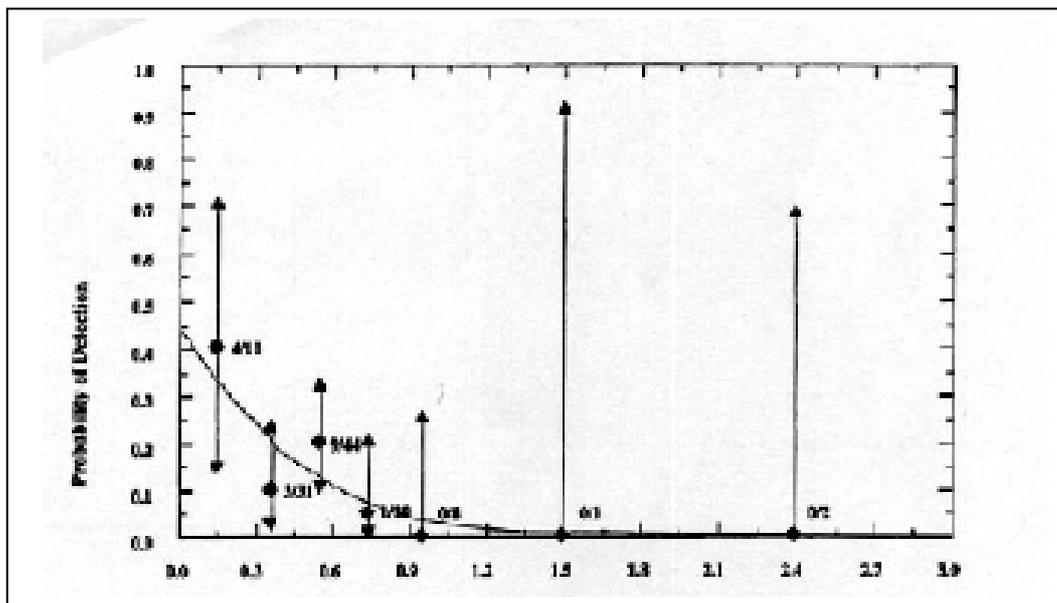


Fig.2.50

De las dos gráficas anteriores, se llega a la conclusión que un bote salvavidas es detectable sobre ≈ 2 millas de distancia en una noche con luna y sin luna la distancia se reduce como máximo a 1 milla.

En las imágenes siguientes se pueden observar imágenes de personas en el medio acuático a distancias cortas (50-100 metros) en las que se puede apreciar una buena definición de detalles permitiendo el reconocimiento y la identificación de personas. (Fig. 2.51)



Fig.2.51

Del conjunto de las observaciones efectuadas y teniendo en cuenta los factores a considerar en los sistemas de intensificación vistos en capítulos anteriores destacamos que los principales factores que han podido afectar a la intensificación de las imágenes obtenidas en este estudio son:

- condiciones del cielo o luz residual
- condición / transmisión atmosférica
- contraste del objeto observado

Condición celeste y luz residual

Respecto a las condiciones de cielo, se han tomado imágenes en casi todas las circunstancias, aunque se ha mantenido la constante del incremento de la luz residual producida por las luces artificiales procedentes del puerto y la ciudad. Este no ha sido un factor negativo, sino todo lo contrario.

Condición atmosférica

Las condiciones atmosféricas en las que se han efectuado las observaciones, se han mantenido en el rango de la normalidad en las que la visibilidad ha sido buena, con ausencia de niebla o calima.

Contrastes de la imagen y del objetivo

Esto se pone de manifiesto, en muchas de las imágenes obtenidas. Por ejemplo una imagen con muy poco contraste la obtenemos en la Fig.3.35 en la que se muestra a una persona en el agua.

Como ya vimos en capítulos anteriores, la agudeza visual o habilidad para la detección o percepción de un objeto, dependerá del observador y del equipo utilizado, pero si la relacionamos con la distancia y las probabilidades de detección, podemos decir que disminuye cuando decrece la luz residual y cuando disminuye el valor del contraste.

2.1.1.7. Sistema Anticolisión para HSC

Después de estudiar la utilización de monóculos o binóculos de intensificación de luz residual se estudia la utilización de un sistemas especialmente diseñado para su aplicación en buques HSC.

El origen del diseño y utilización de este sistema fue mejorar la seguridad de la navegación en las aguas de la bahía de Hong Kong, como sistema anticolisión debido al gran número de pequeñas embarcaciones que navegan en esa zona. Posteriormente este sistema se implantó para buques de alta velocidad que navegan por otras zonas.

Uno de los primeros fabricantes fue la empresa inglesa Vistar (135), y es interesante anotar que el mismo fabricante califica el sistema con la denominación de “Vistar Collision Avoidance”. Este sistema, muy difundido inicialmente en buques de alta velocidad debido al bajo coste, se instaló en

buques de nuestra flota como es el caso del “Turbocat”, que en su efímero tiempo de trabajo cubría la línea de Barcelona – Alcudia.

También estos sistemas de intensificación están instalados en otros buques HSC de última generación como es el caso del trimaran de alta velocidad “Benchijigua Expres” de la compañía Fred Olsen que opera en el tráfico insular del archipiélago Canario. Este buque está construido por Austral Ships, especializado en buques HSC y en los que instala de forma habitual estos sistemas anticolidión. En la imagen de la Fig.2.52 se puede ver la cámara instalada en la proa al objeto de aumentar la distancia de detección. La cámara es el modelo Night navigator 8540 comercializada por Current corporation y de fabricación actual



Fig.2.52

Lo más destacable es lo ergonómico del sistema, en que se crea un puesto exclusivo para el observador de la cámara de visión nocturna, detrás del puesto del piloto (Fig.2.55), que también puede manipular la cámara en caso de necesidad algo lógico si tenemos en cuenta la velocidad a la que navegan estos buques y la distancia de detección el tiempo de respuesta es mínimo.

Después de estudiar sus diseños de equipos anticolidión, el mismo fabricante apunta el efecto perjudicial que producen los intensificadores el halo y el “blooming”, como hemos visto en el capítulo anterior.

- Descripción y funcionamiento del sistema de visión nocturna IM223 (VISTAR);

Para profundizar en el conocimiento de los sistemas de intensificación se ha elegido este modelo ya que han sido instalados ampliamente como sistema anticolidión en la navegación nocturna.

En algunos casos, y como se vio en el capítulo 1.5. (Pág.15) ,cuando las condiciones de operatividad justifiquen el uso de estos equipos ,deberán tener las cualidades necesarias para cumplir las estipulaciones del Código Internacional de Seguridad para buques de alta velocidad (HSC Code) , del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en la Mar de 1974

El sistema está compuesto de tres elementos:

- tubo intensificador montado dentro de una carcasa para protegerlo del ambiente marino
- sistema de focos de iluminación de luz infrarroja invisible al ojo humano.
- unidad de monitorización y control dentro del puente de gobierno.

La unidad de intensificación, normalmente se instala lo más alto posible, y en la línea de crujía, encima de la cubierta del puente o en el palo principal (Fig.2.53 y 5.54), de forma que proporcione un buen ángulo de visión de los posibles contactos, además de reducir los efectos de los puntos de luz intensos que se encuentran por encima del horizonte. Tampoco debe tener ninguna zona en la que existan reflejos de las luces del propio barco, en el ángulo de trabajo (30ª a banda y banda) así como evitar que cualquier elemento que pudiera producir una reflexión de luz, y si fuese necesario se debería pintar esas zonas de negro mate para evitar reflexiones.

La unidad de monitorización y control, dependerá de los requerimientos de uso del buque o de los que impongan las sociedades de clasificación. Como veremos más adelante, en algunos casos es necesario un operador que exclusivamente se dedica a operar la cámara y avisar de peligros al responsable del gobierno de la nave.

Esta unidad de control de intensificación se instala dentro del puente, detrás de los pilotos y está compuesta por un monitor y los mandos para facilitar su utilización óptima (Fig.2.55). Además de

la unidad de control de intensificación, se puede instalar otro monitor para el timonel, que normalmente debe situarse entre los dos puestos de pilotaje, de forma que ambos tripulantes puedan observar el monitor y mantener clara la visual hacia proa.

La cámara se orienta y trima en la línea frontal y se ajustan las marcas de distancia que aparecen en el monitor y que se utilizan para conocer la distancia a la que se encuentran los contactos detectados y que más adelante se detallan.



Fig.2.53

Esta cámara tiene la opción de instalarla en una plataforma giro-estabilizada, aunque según criterio del fabricante, considera que esta opción no es especialmente necesaria teniendo en cuenta la inherente estabilidad de los buques de alta velocidad y el amplio campo de visión de la imagen intensificada. Quizás el fabricante cuestione la necesidad de la giro estabilización ya que su instalación encarece el conjunto del sistema.

El sistema de iluminación que proporciona la capacidad de detección está compuesto por faros alógenos de cuarzo de 150W o de 450W, que produce un campo de iluminación de 28° o de 40° de ancho y 7° de alto. Para hacer invisible el haz de iluminación al ojo humano, en estas lámparas se le instala un filtro de interferencia, que consiste de una película de cobertura a ambos lados del filtro que refleja hacia atrás la luz visible y transmite solo longitudes de onda de más de 715 μm ., zona cercana al IR y casi invisible para el piloto.

Estos focos se instalan lo más a proa posible, al objeto de iluminar mayor parte de agua que del casco, y además aumentar la distancia de detección. No obstante si algún foco iluminara parte del

caso es preferible pintarlo de negro mate. Así mismo es esencial que los focos estén debajo del campo de visión del intensificador, ya que si se pone por encima, la línea de visión de la cámara se hace a través del haz del iluminador y con lluvia o agua en suspensión hace en efecto de pantalla disminuyendo la efectividad del equipo.

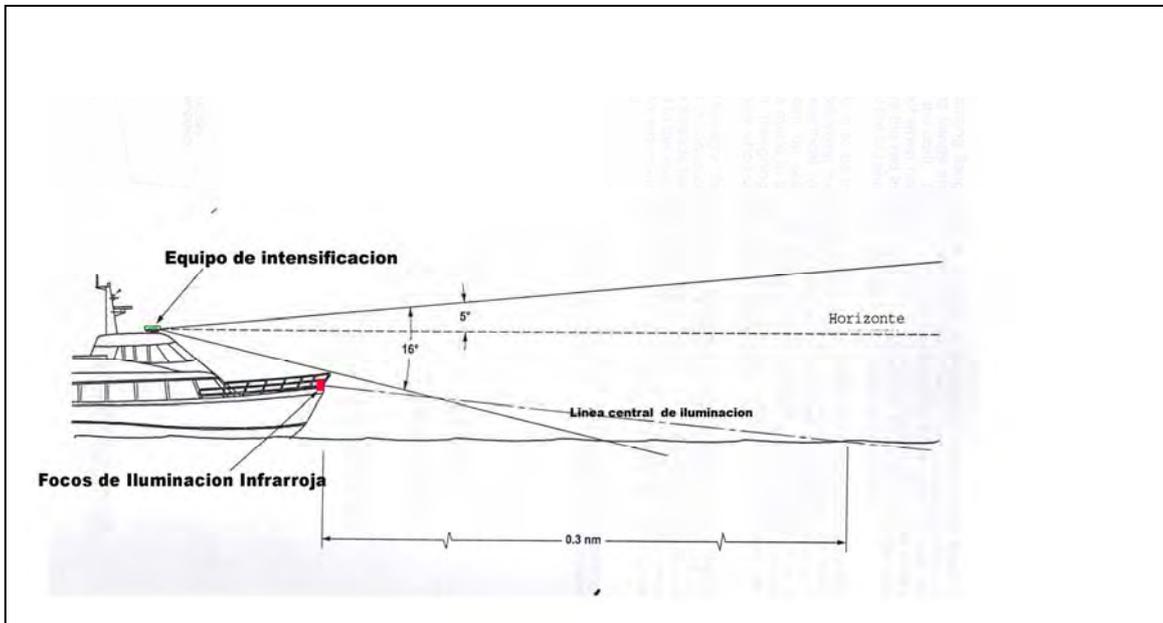


Fig.2.54

El ajuste vertical el haz tiene es importante y debe estar entre uno o dos grados por debajo del horizonte a la velocidad de navegación normal del barco. (Fig.2.54). Si la inclinación es más alta la iluminación se perderá por dispersión y si es muy baja no se obtendrá el alcance de detección deseado. La línea central de iluminación de los focos debe contactar en el agua a aproximadamente 0.3 millas (aprox. 550 metros)

Especificaciones del equipo y principales características técnicas;

La especificación de uso para este equipo indicada por el fabricante, es la de “sistema anticolidión para buques de alta velocidad” y como función secundaria la de simple equipo de búsqueda. Este sistema además también es recomendable para embarcaciones que naveguen más de 25 nudos. Es un equipo que puede trabajar en total oscuridad siempre que el objeto a detectar se encuentre dentro del haz iluminador de los focos.

La cámara de intensificación está estibada en una caja protegida de las inclemencias del ambiente marino y libre de humedad. Puede trabajar de 0° a 180° a banda y banda y con un ángulo de inclinación de $\pm 7^\circ$.

El tubo intensificador es de segunda generación con placa de micro canales (MCP) y fotocátodo S29 de 49 mm. de diámetro, con respuesta espectral 0,5 a 0,8 μm y un campo de visión de $22^\circ \times 16,5^\circ$, enfocado al infinito. Para imágenes, la mínima iluminación que requiere la cámara para obtener una imagen útil es de ser de 10^{-5} lux.

Resoluciones

10^{-5} lux.....1.8 miliradianes /línea par

10^{-4} lux.....1.6 miliradianes /línea par

10^{-3} lux.....1.4 miliradianes /línea par

La unidad de control del intensificador tiene las marcas de distancia máximas, dependiendo del sistema de focos de iluminación entre los 4 y 0.5 cables (740 y 92,5 metros). Fig.2.56

Focos Iluminadores: Para el modelo de máximo rendimiento IM545, tiene una salida en IR con alimentación a 24V equivalentes a 21.000 candelas

Haz: 28° o 45° (según modelo) horizontal, por 7° vertical

Filtro de corte: 0,715 μm

La caja de control de iluminación puede soportar hasta un total de 8 focos iluminadores.

● Operación del Vistar IM223

La configuración para el trabajo de sistema anticolidión para buques de alta velocidad es la que se muestra en la Fig.2.55 y consiste en la unidad o monitor de control de la cámara y un segundo monitor situado en el frontal del instrumental del puente, fuera de la línea de visión hacia al exterior para no quitar visibilidad al piloto o del capitán y preferentemente entre ambos puestos, de forma que cualquiera de ellos pueda observar la pantalla. Este monitor dispone de mandos para manipular los controles más usuales para mover fácilmente y con rapidez la orientación en marcación de la cámara.

De acuerdo con el Capítulo 5 del RIPA, los tripulantes deben mantener una vigilancia visual al exterior, pero además, con la utilización de la visión nocturna pueden alternarla con la información visual del monitor, que proporcionan una imagen clara hacia proa de la trayectoria que sigue el barco o senda de buque en la oscuridad de la noche.

La unidad de monitorización o unidad de control, tiene capacidad para manipular un mayor número de parámetros de la cámara y es el puesto destinado al operador el equipo de visión nocturna durante la navegación, vigilando de forma continuada la presencia de cualquier objeto que estuviese flotando en la zona cercana de la senda del buque.



Fig.2.55

Cuando se produce un contacto avisa inmediatamente al oficial que gobierna la nave, informándole del tipo de objeto, distancia y la marcación .La distancia aproximada la proporciona el monitor mediante unas marcas en la pantalla .En la imagen de la Fig.2.56 pueden apreciarse un conjunto de 3 rayas cortas paralelas al horizonte que sirven para determinar las distancias o alcance de los objetos detectados.

LINEA CENTRAL



HORIZONTE

2 Ò 4 CABLES

1 Ò 2 CABLES

0.5 Ò 1 CABLE

VISTA DEL MONITOR

Fig.2.56



Fig.2.57

El responsable del gobierno puede observar al instante en su monitor el objeto y proceder a la maniobra pertinente. Con entrenamiento es posible el gobierno de este objeto con la simple visión a través del monitor.

El uso de este sistema requiere una atención permanente de un operador del equipo de VN, así como que las maniobras sean rápidas, ya que teniendo en cuenta la velocidad de este tipo de buques y la distancia de detección, el tiempo para iniciar la maniobra es bastante corto.

La aplicación secundaria del sistema es como ayuda a la navegación (Fig.2.57). Para esta forma de operar se recomienda (135) que el oficial que gobierne el buque preste atención a la proa y otro miembro de la tripulación opere el equipo de visión nocturna, además de ser una medida recomendable que el buque navegue a la velocidad de seguridad de acuerdo con la Regla 6 del RIPA.

En la de la unidad de control, se pueden variar algunos parámetros, como son en nivel de brillo de la imagen para obtener la mejor visión del operador. También se puede producir un oscurecimiento de la parte alta del monitor para reducir el resplandor que producen las luces que normalmente se encuentran en el horizonte que no impide ver las luces de boyas o marcas para la navegación dentro de esa área oscurecida, aunque cuando se produce este oscurecimiento, automáticamente el brillo de la zona por debajo del horizonte aumenta.

En función de la potencia lumínica de los sistemas de iluminación, la lectura o interpretación de las marcas variará entre los 0.5/1/2 cables y 1/2/4 (rango entre 92,5 y 740 metros).

Interpretación de imágenes

Estos equipos, deben considerarse como un elemento complementario a otros equipos de navegación, como puede ser el radar, al que no pueden sustituir, pero si incrementar la información que recibe el responsable del gobierno de la nave.

El radar tiene la ventaja que efectúa una búsqueda de 360° y que se alcance de detección es muy superior además de medir la distancia de detección y su demora. En contra, la información que obtenemos con el radar además de depender de la reflectividad del objeto, no aporta información fidedigna de su tamaño, naturaleza, identificación y/o posibles intenciones.

Estos sistemas se pueden instalar enlazados con el radar de forma que automáticamente la cámara de visión nocturna se oriente en la misma demora en la que el radar detecta un objetivo, obteniendo más y mejor y con mayor rapidez información fidedigna del contacto observado.

La configuración y prestaciones de este sistema de VN, además cumple una función específica y que no cubre el radar y es la detección de contactos muy próximos al buque, y es especial cuando

por condiciones atmosféricas se está utilizando el radar con algún atenuador de mar o lluvia (anti-clutter) por lo que a distancias muy próximas es donde estos equipos para buques de alta velocidad tienen esta especial aplicación como sistema anticolidión.

También hay que tener en cuenta las situaciones que se suelen dar en la mar en función de las fuentes externas de iluminación. Así pues cuando un buque se acerca navegando hacia la costa o recalando en algún puerto procedente de la oscuridad de la mar, en la línea del horizonte aparecen innumerables puntos de luz procedentes de tierra y que pueden enmascarar la presencia de embarcaciones, sobre todo pequeñas. Este sistema también ayuda a que por este efecto pueda pasar desapercibida la presencia de alguna embarcación pequeña.

Relación entre iluminación y alcance;

La utilización de los focos de IR, permite un incremento considerable de la detección de objetos en la derrota del buque, ya que la luz que se reflejan en los contactos es mucho mayor. En la tabla 2.1 (Fig.2.56) se relaciona la distancia y la iluminación que proporcionan los distintos sistemas de iluminación que pueden instalarse y que depende del número y potencia de focos utilizados.

Atendiendo a los mencionados valores, podemos deducir que la distancia máxima eficaz de estos sistemas de VN oscilará entre los 600 y los 1000 metros, según el sistema de iluminación seleccionado.

Estos focos funcionan como si fuesen focos de iluminación de un coche que iluminan justo en la trayectoria, pero esta luz no es visible por el ojo humano y si por el equipo de intensificación.

DISTANCIAS	EQUIPO SELECCIONADO		
	3 focos de 150 wats	3 focos de 450 wats	8 focos de 450 wats
metros	mililux	mililux	mililux
90	1200	4000	8000
180	300	1000	2000
360	71	250	500
550	31	110	220
740	17	60	120
930	12	40	50

Tabla 2.1

2.1.2. Sistemas de Infrarrojos

2.1.2.1. Introducción y clasificación

En capítulos anteriores, vimos que las dos grandes clasificaciones de cámaras de IR, atendiendo al funcionamiento del detector, entre cámaras “fotónica” y “térmicas”.

Debido al desarrollo de las cámaras de IR y al aumento de posibilidades de las mismas, podemos clasificarlas en dos grandes grupos, las cámaras para “imágenes” de IR y las cámaras, que podríamos calificar de “medición” o “examen”.

Las cámaras de imagen son aquellas que su finalidad es la “visión nocturna” y dentro de esta aplicación, pueden existir un gran número de utilidades como vimos en capítulo 1.3. y que son la base de esta tesis.

Este tipo de sistemas se les conoce con cámaras de “visión infrarroja”, “imagen termal”, aunque este último término de imagen termal debería aplicarse únicamente a las cámaras de visión nocturna “térmicas” diferenciándolas de las cámaras fotónica o de visión infrarroja. También en términos de inglés norteamericano se las conoce como cámaras FLIR (Forward-Looking Infrared)

Las cámaras de medición o examen, son aquellas en las que se obtiene una imagen térmica del un objeto, pero su finalidad no es la de “ver en la oscuridad”, si no la de conocer las características térmicas anormales de un objeto, cuerpo o estructura, para determinar la posibilidad de averías y defectos o para su utilización en ensayos no destructivos.

Entre estas aplicaciones se encuentra:

- inspección de resistencia de materiales y estructuras
- inspección eléctrica de maquinarias e instalaciones
- mantenimientos preventivos de maquinaria e instalaciones
- detección de incendios forestales o en instalaciones
- aplicaciones en el campo de diagnósticos y pruebas médicas.
- ensayos no destructivos

2.1.2.2. Cámaras de IR fotónica

En este capítulo, nos adentramos en los diferentes sistemas de detección de IR de las cámaras fotónicas, para conocer los elementos que los componen y su funcionamiento básico, así como los parámetros de diseño y funcionamiento a tener en cuenta.

Aunque en este capítulo se estudia los elementos que componen las cámaras de IR para cualquier aplicación y que son comunes para todas las cámaras de IR, se presta especial interés en las cámaras fotónicas de imágenes y cuya finalidad es la “visión nocturna” y en especial aquellas que puedan ser de aplicación en el ámbito marítimo.

Descripción de las cámaras de IR fotónica

Estas cámaras son un sistema de hibridación de la óptica con la electrónica. Su funcionamiento se basa en que todo cuerpo, en función de su condición térmica emite una radiación infrarroja. Esta energía infrarroja emitida por la imagen observada es recogida por unas lentes y enfocada sobre un detector o una matriz de detectores. Esta energía al incidir sobre la parte sensible del detector transforman los fotones incidentes de esta emisión infrarroja, en electrones.

Estos electrones se transforman en impulsos eléctricos, que posteriormente son recogidos, amplificados y procesados por un circuito electrónico que permite que sean presentados en una pantalla creando una imagen compresible del objeto observado, en función de la información recogida.

Un visionado muy rápido de la escena, (sobre 30 veces por segundo) permite obtener una lectura de miles de puntos del campo de visión. Dependiendo del tipo de cámara pueden llegar a discriminar diferencias de temperatura de hasta 0,1°C.

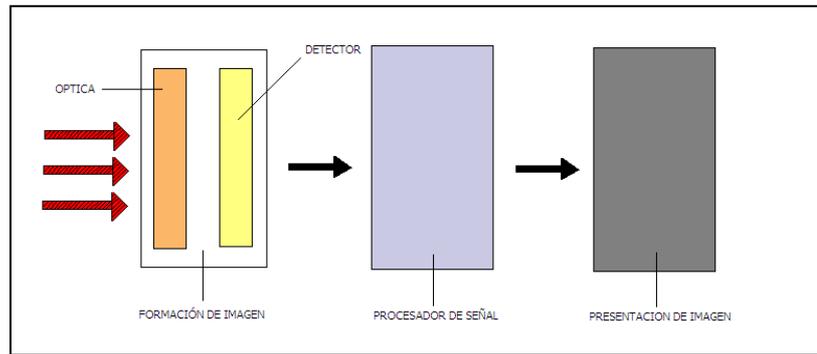


Fig.2.58

Los procesos fundamentales que requiere un equipo de visión nocturna de imágenes se pueden ver en el gráfico de la Fig.2.58 y resumirse en:

- detección de la emisión infrarroja
- formación de imagen
- procesamiento de señal
- presentación de la imagen

Para obtener imágenes de IR el elemento fundamental o alma del sistema es el “detector” o serie de detectores agrupados en una “matriz de detectores”, y que veremos con detalle en los capítulos siguientes.

Básicamente, para los procesos mencionados, una cámara de visión nocturna está compuesta por distintos elementos con una función específica, y cuyo objetivo final es representar una imagen visible y comprensible del objeto y del fondo de la imagen en condiciones de total oscuridad.

Siguiendo el proceso mencionado, iniciado cuando se enfoca la cámara sobre un objetivo, hasta que finalmente se visualiza el mismo en una pantalla, los distintos elementos son:

- sistema óptico (lentes) que permiten el enfoque de la imagen observada
- sistema de detección
- sistema de refrigeración si procede
- sistema de escaneado si procede
- sistemas electrónicos de lectura y amplificación
- monitor para representar la imagen observada

Sistemas ópticos

La energía IR es una radiación electromagnética, y por lo tanto está sujeta a las mismas leyes físicas de la refracción, reflexión y difracción que la luz visible. Así pues todos los conceptos y elementos que son aplicables en la luz visible, tienen su homólogo en los sistemas ópticos de las cámaras de IR.

No obstante, debido a las longitudes de onda de la radiación infrarroja en las que trabajan las cámaras de visión nocturna, muchos materiales que transmiten la luz visible, son opacos a las longitudes de onda del IR y esto hace que las lentes utilizadas deban ser de materiales especiales. Materiales transparente en el espectro visible como es el cristal, plexiglás o el cuarzo son opacos para el IR.

El Germanio es transparente para el IR (para λ entre 2-5 μm), sin embargo es opaco para el espectro visible y hay materiales visibles para ambas longitudes de onda como es el caso del selenide de zinc y al arsenide de galio. También para los elementos refractivos del sistema óptico de IR, se fabrican materiales especiales con un amplio grado de transmisión infrarroja como son las lentes de Ti1173 e IRTRAN. La elección de estos materiales está en función de su comportamiento para diferentes valores, como la longitud de onda, el índice de dispersión y refracción etc. El diseño de las lentes y la elección del material suele ser un proceso muy complicado.

Se debe tener en cuenta que el cristal que forman parte del puente de gobierno de un buque, transparente a luz visible, transforma los ventanales en verdaderos muros opacos a partir longitudes de onda de aproximadamente 2 μm .

En las cámaras de aplicación de imágenes de visión nocturna, los sistemas ópticos son más grandes que los utilizados en visión diurna para un mismo campo de visión debido al alto índice de refracción. En términos de diseño óptico, los sistemas para cámaras de IR/VN son normalmente más rápidos que los sistemas de visión diurna.

Entre los principales parámetros que define la óptica en el sistema de visión nocturna están las propiedades espectrales y espaciales del sensor, la resolución y el ángulo de visión FOV (Field Of View).

Como sabemos el FOV es el ángulo de visión que determina el espacio angular dentro del cual es sistema capta la energía IR y es una de las características importantes en el diseño de estas ópticas.

Además de las distintas lentes y como parte del sistema óptico, también en algún tipo de cámara es necesario un sistema de escaneado de la imagen observada y que es tratado en capítulos posteriores.

Detector

El proceso de detección es el más importante y repercute en las características del resto de los elementos del sistema. Podemos definir al detector como el elemento que nos proporciona una señal eléctrica que pueda ser medida de una forma eficaz, como consecuencia de la radiación IR incidente sobre él. El detector funciona como un transductor de radiación infrarroja

Dentro del conjunto del detector el elemento más importante es el “elemento sensible” que es una pieza de un material semiconductor, simple o compuesto y que es capaz de transformar los fotones incidentes sobre el, en energía eléctrica.

El material semiconductor que compone el detector, es un material sólido capaz de conducir la electricidad mejor que un aislante, pero peor que un metal. La conductividad eléctrica o capacidad de conducir la corriente eléctrica cuando se aplica una diferencia de potencial, es una de las propiedades físicas más importantes.

A temperaturas muy bajas, los semiconductores puros se comportan como aislantes. Sometidos a altas temperaturas, mezclados con impurezas o en presencia de luz, la conductividad de los semiconductores puede aumentar de forma espectacular y llegar a alcanzar niveles cercanos a los de los metales. Entre los semiconductores más comunes se encuentran elementos químicos simples o compuestos, como son el silicio, el germanio, el selenio, el arseniuro de galio, el seleniuro de cinc y el telururo de plomo.

Este incremento de la conductividad provocado por los cambios de temperatura, la luz o las impurezas se debe al aumento del número de electrones conductores que transportan la corriente eléctrica. En un semiconductor característico o puro como el silicio, los electrones de valencia (o electrones exteriores) de un átomo están emparejados y son compartidos por otros átomos para formar un enlace covalente que mantiene al cristal unido. Estos electrones de valencia no están libres para transportar corriente eléctrica. Para producir electrones de conducción, se utiliza la luz o la temperatura, que excita los electrones de valencia y provoca su liberación de los enlaces, de manera que pueden transmitir la corriente. Las deficiencias o huecos que quedan contribuyen al flujo de la electricidad (se dice que estos huecos transportan carga positiva). Éste es el origen físico del incremento de la conductividad eléctrica de los semiconductores a causa de la luz o la temperatura.

Otro método para obtener electrones para el transporte de electricidad consiste en añadir impurezas al semiconductor o doparlo. La diferencia del número de electrones de valencia entre el material dopante (tanto si acepta como si confiere electrones) y el material receptor hace que crezca el número de electrones de conducción negativos (tipo n) o positivos (tipo p).

El conjunto de detección está formado por una pequeña estructura física o recipiente al vacío donde el detector o matriz de detectores son cuidadosamente metidos en un encapsulado llamado “Dewar” que permite el aislamiento del ambiente y una “ventana” por la que penetran los fotones. Además del detector, también hay un circuito que permite la lectura de la señal y/o la amplificación de la misma.

Para obtener un buen rendimiento se requieren una disminución del ruido procedente de la radiación del fondo de la imagen. Para disminuir al mínimo posible este flujo de radiación no deseada, se limita su entrada en el sistema disminuyendo la apertura o ventana de sensor. Para conseguir este efecto, el encapsulado que contiene la matriz del detector se le instala una tapa o sombrero metálico con un agujero o rendija en la parte superior de la superficie del detector y en contacto con el “cold finger”. A este sistema se le llama escudo de enfriamiento “cold shielding” (Fig.2.59).

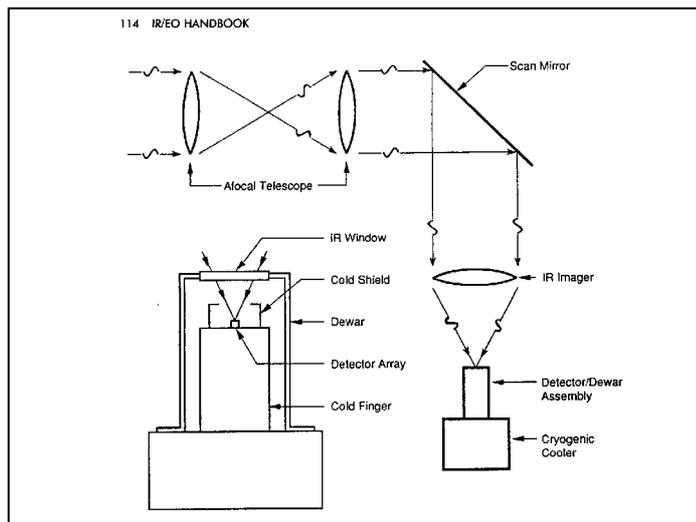


Fig. 2.59

En muchos textos, al igual que a lo largo de este capítulo, se emplea indistintamente el término “detector” y “sensor”, aunque existe una pequeña diferencia como hemos visto, pues el detector es únicamente un elemento del conjunto que forman el sensor.

Los detectores fotónico pueden clasificarse según su funcionamiento en:

- fotovoltaicos (FV)
- fotoconductivos (FC)
- fotoemisivos (FE)

Los detectores más usados en las cámaras de IR son los fotovoltaicos y fotoconductivos y utilizan la emisión fotoeléctrica interna mientras que en los detectores fotoemisivos utilizan la emisión externa, donde físicamente los electrones dejan el material detector moviéndose libres en el espacio.

Los detectores fotoemisivos tienen una eficacia cuántica más baja por lo que se emplea en sistemas de visión en matrices grandes. La respuesta espectral de estos detectores está limitada al espectro visible y al infrarrojo cercano (NIR o SWIR). Este tipo de detector también es utilizado en los fotocátodos de los intensificadores de luz residual.

Atendiendo a la física del estado sólido, y su aplicación a la detección de fotones, se pueden diferenciar en intrínsecos y extrínsecos. Un semiconductor intrínseco, es un semiconductor puro y a temperatura ambiente se comporta como un aislante porque solo tiene unos pocos electrones libres. Un semiconductor extrínseco es un semiconductor dopado, al que se le añaden átomos de impurezas para aumentar su conductividad.

Debido a que los detectores fotónicos no funcionan mediante la medición de los cambios de temperatura responden más rápido que los detectores termales, como veremos más adelante.

El límite teórico de trabajo de un detector de fotones de IR, está fijado por la fluctuación en la proporción de los fotones que llegan al detector procedente del fondo de la imagen, en relación con los fotones procedentes del objeto observado. A esta fluctuación se le llama “ruido fotón” y aparece como un voltaje aleatorio en la señal eléctrica de salida del detector. El ruido total generado por el detector es la suma del ruido fotón más el ruido generado por los circuitos electrónicos del detector. La proporción de este ruido total es la que fija el límite teórico de funcionamiento del sistema.

Para paliar este efecto algunos detectores deben contar con sistemas de enfriamiento. Los detectores que operan sin enfriar tienen respuesta a aquellos elementos con temperatura igual a la mayor que la temperatura ambiente. Los sistemas enfriados tienen respuesta igual a la temperatura que proporciona el sistema de enfriado.

Para cada uno de los sistemas de detección fotónica se utilizan diferentes materiales semiconductores. En la tabla 2.2 se muestra un resumen de los principales materiales semiconductores simple o compuesto que habitualmente se utilizan en los sistemas de detección y nos sirve de referencia a la hora de identificar una cámara de IR. Cada material sensor tiene una aplicación determinada en función de la longitud de onda en la que trabaje, o de la función para la que ha sido diseñado el sistema.

DETECTORES FOTONICOS	
FOTOVOLTAICOS (PV)	HgCdTe (MCT) Mercurio Cadmio Teluride Si (Silicio) Ge (Germanio) InSb (Antimoniuro de Indio) AsGa (Arseniuro de Galio) InAsSb
FOTOCONDUCTORES (PC)	INTRINSECOS HgCdTe (MCT) Mercurio Cadmio Teluride PbS (Sulfito de Plomo) PbSe (Selenide de Plomo) EXTRINSECOS Si (Silicio), dopado Ge (Germanio), dopado
FOTOEMISIVOS (PE)	PtSi

Tabla 2.2

Eficiencia cuántica:

Para determinar el nivel de funcionamiento de estos sensores, es necesario conocer un parámetro utilizado habitualmente y que nos proporciona el valor de su eficacia. A este parámetro se le conoce como “eficacia cuántica” (η). Este valor siempre es menor de uno y relaciona el número de fotones que chocan contra el área activa del sensor y el número de electrones generados. La “eficiencia cuántica” se expresa en % y para un detector ideal sería la del 100%.

$$\eta = \text{Fotones Incidentes} / \text{Electrones generados}$$

En la tabla 2.3 se muestran la eficiencia cuántica de algunos detectores.

TIPO DE DETECTOR	EFICACIA CUANTICA (η)
Fotoconductor (intrínseco)	~ 60 %
Fotoconductor (extrínseco)	~ 30 %
Fotovoltaico	~ 60 %
Fotoemisivo	~ 10 %

Tabla 2.3

La eficiencia cuántica de cada material, es una función de la longitud de onda. Para una radiación monocromática, a medida que se adentra en el espectro del IR, la energía del fotón disminuye y se llega a un punto en que no tiene suficiente energía para que el detector genere un electrón. Por lo tanto cada material detector tendrá un punto de corte de longitud de onda o “cutt of” (λ_c) y que define hasta que punto de la zona de espectro es capaz de trabajar un detector determinado.

Los detectores de IR son fundamentalmente contadores de fotones; es decir, cuentan los fotones de IR en períodos de tiempo muy cortos. Podemos definir la eficiencia cuántica como la capacidad con la que el material detector es capaz de reunir y absorber los fotones y convertidos en las cargas eléctricas. Una eficacia cuántica alta refleja que el proceso señalado anteriormente es más efectivo.

Aunque la eficiencia cuántica es sólo una medida del detector, es una manera de evaluar la sensibilidad global del sistema. Un detector de IR con la eficacia cuántica alta normalmente ofrece buena sensibilidad y rendimiento a las temperaturas bajas.

Detectores Fotovoltaicos (FV)

Los detectores fotovoltaicos producen un voltaje o corriente por la incidencia de radiación óptica o infrarroja. También son llamados fotodiodos, por ser es un diodo semiconductor sensible a la luz.

Los fotodiodos son los fotodetectores más comunes y los más fácilmente disponibles. La eficacia cuántica de este tipo de detectores como vimos en la tabla 2.3 es del 60%.

En la tabla 2.4 podemos ver la eficiencia cuántica (η) de algunos detectores fotovoltaicos y el punto de corte de longitud de onda (λ_c)

Tabla de detectores fotovoltaicos

Tipo de detector		Eficacia cuantica (%)	Frecuencias de detección (μm)	Temperatura de trabajo ($^{\circ}\text{K}$)
Indio Antimoniuro	In Sb	45	1 a 5,5	77
Mercurio Cadmio Teluro (MCT)	Hg Cd Te	65	3 a 5 / 8 a 12	77
Arseniuro de Galio	As Ga			
Galio Arsénico Fósforo	Ga As P	60	0,3 a 0,8	Ambiente
Silicio	Si	65	0,2 a 1,15	Ambiente
Germanio	Ge	64	0,68 a 1,18	Ambiente

Tabla 2.4

Detectores fotovoltaicos de silicio (Si)

Es el material semiconductor para detectores de uso más común. Su respuesta espectral cubre aproximadamente de 0,2 μm a los 1,15 μm , con una respuesta máxima aproximadamente en 0,9 μm y una eficacia cuántica del 65%.

Dada la característica del ancho de banda de trabajo, este sensor se utiliza en el espectro visible y en el infrarrojo cercano.

Detectores fotovoltaicos de Germanio (Ge):

Dentro de los materiales detectores, es el segundo más conocido y ha sido ampliamente estudiado en las décadas de los años 50 y 60. Los detectores fotovoltaicos de Germanio son usados desde la parte alta de la zona visible hasta el NIR, aproximadamente entre los 0,68 μm y los 1,18 μm . Pocos detectores trabajan en esta zona y el Germanio es el de menor costo. Este material detector tampoco se utiliza en aplicaciones de imagen de IR.

Detectores fotovoltaicos de Antimoniuro de Indio (InSb):

Es uno de los materiales más altamente desarrollados y muy usado en parte del NIR entre 1 y 5 μm . Es un material detector muy común en equipos para exámenes mecánicos en el pasado y tiene aplicaciones en sistemas de imagen de IR. Tiene un punto de corte de longitud de onda (λ_c) en 5.5 μm . Ofrece una sensibilidad muy alta, y la eficacia cuántica también es alta (80%-90%), sin embargo, a pesar de la eficacia cuántica es alta, los equipos resultan técnicamente más complejos.

No son muchos los fabricantes que usan InSb en los detectores de FPA para las aplicaciones de medida, pero si se utilizan en aplicaciones donde se requiere una mayor sensibilidad termal como pueden ser imágenes militares de gran alcance o de vigilancia, como veremos más adelante.

Detectores fotovoltaicos de Arseniuro de Galio (AsGa)

Este material es el origen de la fabricación de otros muchos detectores ópticos y que pueden ser fabricados combinándolo con otros elementos químicos, obteniendo unas características de detección distintas. Desafortunadamente el AsGa tiene serios problemas con el manejo durante la manufactura y el procesamiento.

El Arseniuro de Galio (AsGa), es un material sensible en la zona del infrarrojo cercano y puede detectar en la misma zona del espectro cubiertas por la combinación del Sílice y el Germanio. También es utilizado en los fotocátodos de los tubos intensificadores. El AsGa aventaja al sílice en la velocidad de respuesta, la eficiencia cuántica y la detectividad.

Los materiales típicos con los que puede combinar el AsGa son el Indio, el Fósforo y el Aluminio, obteniendo los siguientes materiales:

- Fósforo (P) ► GaAsP
- Aluminio (Al) ► GaAsAl
- Indio (In) ► InGaAs

En combinación con el fósforo, se obtiene el GaAsP, que tiene una respuesta espectral de 0,3 a 0,8 μm . En combinación con el Aluminio se obtiene el Aluminium Arsenide Galium (AlAsGa) que es utilizado en la tecnología QWIP (Quantum Well Infrared Photodetectors). Esta tecnología es la más reciente y se detallan más adelante.

En combinación con el Indio, se obtienen detectores fotovoltaicos de Indium Galium Arsenide (InGaAs). Este es un fotodiodo de gran velocidad y un detector de una amplia longitud de onda. Responde a la zona de 0,5 a 1,7 μm . Añadiendo una capa opaca en el sustrato se puede eliminar la parte más baja de la zona de trabajo obteniendo una respuesta entre los 0,9 y 1,7 μm .

Detectores fotovoltaicos de Mercurio Cadmio Teluride (HgCdTe)

El Mercurio Cadmio Teluride (MTC),(HgCdTe), es uno de los materiales detectores más comúnmente usados hoy en la zona de infrarrojo lejano (LWIR), aunque tiene el inconveniente de que no es fácil su producción en chips grandes.

Para su aplicación en imágenes se utilizan FPA híbridos con CCD trabajando en las zonas de 3-5 μm y 8-12 μm . Muchas cámaras han usado este detector y en la actualidad se utilizan sensores más pequeños integrados en las FPA, que proporciona una mayor uniformidad de imagen.

Detectores Fotoconductores (FC)

En este tipo de detectores ópticos, la radiación óptica absorbida causa un cambio en la conductancia o resistencia en el material del detector. Un detector fotoconductor es un trozo de material semiconductor con contactos óhmicos que forman un dispositivo de dos bornes eléctricos (Fig.2.60).

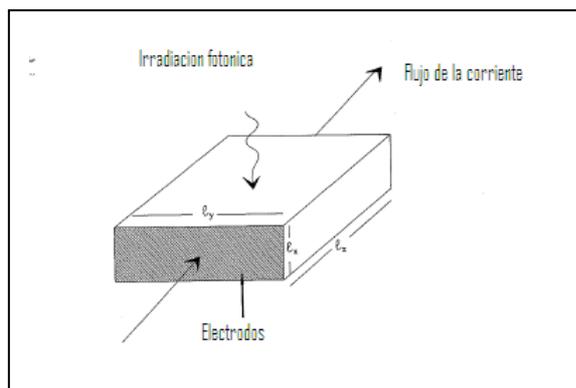


Fig.2.60

Atendiendo a la composición del material del detector, podemos diferenciarlos en detectores intrínsecos o extrínsecos. Los detectores intrínsecos son aquellos que están formados por semiconductores puros y pueden estar formados por elementos químicos simples o compuestos y para aumentar la conductividad de un semiconductor intrínseco, se suele dopar éste añadiéndole átomos de impurezas, con lo que se obtiene un semiconductor extrínseco.

Detectores Fotonicos Fotoconductores	Eficacia cuantica (η) en %	Longitud de onda de corte (λ_c) en μm
Intrinsecos		
PbS	50	3
PbSe	50	5
HgCdTe	60	25
Extrinsecos		
Ge:Hg	30	14
Ge:Cu	30	27
Ge:In	30	120
Si:As	40	24
Si:In	40	8
Si:Ga	40	19
Si:P	40	29

Tabla 2.5

Los materiales más usuales en los detectores fotoconductores (Tabla 2.5) son:

- **Intrínsecos**
 - HgCdTe (MCT) Mercurio Cadmio Teluride
 - PbS (Sulfuro de Plomo)
 - PbSe (Selenide de Plomo)
- **Extrínsecos**
 - Si (Silicio) dopado con Hg ,Cu y In
 - Ge (Germanio) dopado con In, Ga y P

Los detectores fotoconductivos intrínsecos tienen una eficacia cuántica sobre el 60%, mientras que los extrínsecos en más baja, sobre un 30%.

Otra diferencia entre los detectores intrínsecos y extrínsecos es la respuesta ante las diferentes longitudes de onda. Los detectores extrínsecos aumentan la respuesta cuando se adentra en el infrarrojo lejano, pero también requieren más enfriamiento para evitar la generación de calor debido a la conducción.

En ambos tipos la conductancia variará en función de la radiación incidente. Esta variación es inversamente proporcional al flujo de fotones. Estos cambios en la resistencia son preamplificados para facilitar su medición

Detectores intrínsecos:

HgCdTe

Es un material detector ya conocido como fotovoltaico y tiene el mismo origen como fotoconductor, pero como fotoconductor puede fabricarse para trabajar en diferentes regiones del espectro del IR, variando la relación en la mezcla de su composición de Cd/Hg (Cadmio y Mercurio) puede llegar a cubrir un ancho del espectro de 1 a 30 μm . y esto es importante pues hay pocos detectores que trabajen en frecuencias altas.

Otra característica de este detector fotoconductor intrínseco es que puede conseguir una sensibilidad límite a temperaturas de trabajo sustancialmente más altas comparadas con los detectores extrínsecos, lo que implica una menor necesidad de enfriamiento.

El HgCdTe es en este momento uno de los mejores detectores con resultados excelentes en la banda de espectro de 8 a 14 μm (banda atmosférica) donde puede ser considerado el mejor detector (Tabla 2.6)

Material	Typical τ	λ_c (μm)	Resistance R_d (Ω/square)	Time Constant τ (μs)	Nominal Temp (K) T
PbS	50	3	$1.8 (10^5)$	200	300
PbSe	50	5	$2.5 (10^5)$	1.5	300
HgCdTe	60	25	20-150	1.0	77

Características de los fotoconductores intrínsecos

Tabla 2.6

Sales de plomo:

Otro material que se comporta como un fotoconductor son los compuestos de sales de plomo como son el sulfuro de plomo o el seleniuro de plomo (PbS- PbSe-), que responden a la radiación infrarroja en la zona de los 3 μm .

Controlando algunos parámetros en su fabricación o dopaje, se obtienen diferentes características, como es la respuesta espectral, limitada por las frecuencias los puntos se corte de longitud de onda (λ_c) 3 a 7 μm . (Tabla 2.7)

	D^* cm Hz ^{1/2} W ⁻¹	R_d (Ω/sq)	θ_i (A_d dependent)	Time Constant (ms)	λ_c (μm)
PbS at 295 (ATO)	$>8 \times 10^{10}$	$<2 \times 10^6$	0.5-4 A/W	0.1-0.5	3
PbS at 195 (ITO)	$>4 \times 10^{11}$	$<10 \times 10^6$	1-10 A/W	2-4	4
PbS at 77 (LTO)	$>1 \times 10^{11}$	$<20 \times 10^6$	1-10 A/W	4-6	4.5
PbSe at 295	$>6 \times 10^9$	$0.5-10 \times 10^6$	$2-8 \times 10^3$ V/W	0.001-0.005	4.6
PbSe at 195	$>2 \times 10^{10}$	$1.5-30 \times 10^6$	$20-60 \times 10^3$ V/W	0.01-0.05	5.4
PbSe at 77	$>1.5 \times 10^{10}$	$1.0-60 \times 10^6$	$20-60 \times 10^3$ V/W	0.02-0.08	7.5

Parámetros típicos de detectores fotoconductores de sales de plomo

Tabla 2.7

Existen dos estructuras para detectores de sulfuros de plomo como fotoconductores y son usarlo como una película de policristales que muestra una mayor capacidad de trabajo y que es la más utilizada actualmente o en forma de un cristal simple cortado en capas.

El PbS (sulfuro de plomo) se encuentra de forma natural en el mineral de galena y es ampliamente utilizado por su versatilidad y su excelente trabajo, incluso cuando se trabaja a temperatura ambiente. Su rango espectral de trabajo es de 1 a 3μm y su temperatura de trabajo entre 77 y 300 K.

Detectores extrínsecos:

En estos sensores, también llamados ESD (Extrinsic Silicon Detectors) los dos materiales de substrato son el Silicio y el Germanio. Como semiconductores fotoconductores extrínsecos pueden ser dopados con otros materiales, como puede observarse en la tabla 2.8.

Estos detectores se adentran en la longitud de onda larga del IR, en la que las aplicaciones en cámaras de visión nocturna no se utilizan, aunque si son utilizados en matrices de detectores para aplicaciones de visión astronómica.

La eficiencia cuántica varía con la concentración del material dopante, así como con la longitud de onda y el grosor del sensor. El valor es del orden de 30– 40%, aunque tiene una respuesta pico del 50%.

Material	Typical η (%)	λ_c (μm)	Time Constant τ (μs)	Nominal Temperature (K) T
Ge:Hg	30	14	0.1	4
Ge:Cu	30	27	0.1	4
Ge:In	30	120	0.1	4
Si:As	40	24	—	4
Si:In	40	8	—	45
Si:Ga	40	19	—	18
Si:P	40	29	—	12

Tabla 2.8

Detectores fotoemisivos:

El silicido de platino (PtSi) opera en la región de corta longitud de onda (1-5 μm), tiene buena sensibilidad (tan bajo como 0.05°C), y una estabilidad excelente. También se usa porque se manufactura con las mismas técnicas que en la producción de semiconductores, por lo que es un detector con un rendimiento bastante alto y unos costos de producción razonables. El silicido de platino es preferentemente utilizable en las cámaras de medida.

Una desventaja es la eficacia cuántica baja (<1%) Sin embargo, con las modernas técnicas de CCD de construcción híbrida y de CMOS, han hecho al PtSi un material principal para el uso de IR en el mantenimiento preventivo e imágenes científicas ambientales. Para aplicaciones de imagen se utiliza en detectores fotovoltaicos de barrera de Schottky (Pag.139)

Detectores de pozos cuánticos o QWIP (Quantum Well Infrared Photodetectors)

Como consecuencia del desarrollo de nuevos procesos y técnicas en la fabricación de estructura de materiales se han creado de nuevos fotoconductores, como es el caso de los detectores de pozos cuánticos, utilizados en la detección IR en la banda de LWIR.

Un detector de pozos cuánticos está formado por capas de diferentes materiales semiconductores con diferentes anchos de banda. Una buena combinación de estos materiales es el aluminio-arsenide/galio-arsenide (AlGaAs/GaAs), en un sustrato de galio-arsenide (GaAs).

Ajustando el grosor de cada capa y la concentración de aluminio en las barreras que forman las finas capas de AlGaAs, es posible controlar la anchura y profundidad del pozo cuántico.

Controlando la anchura y altura del pozo cuántico y de la banda interior la transmisión de la energía se consigue la absorción de radiación en la región del infrarrojo para longitudes de onda de entre 3 y 20 μm .

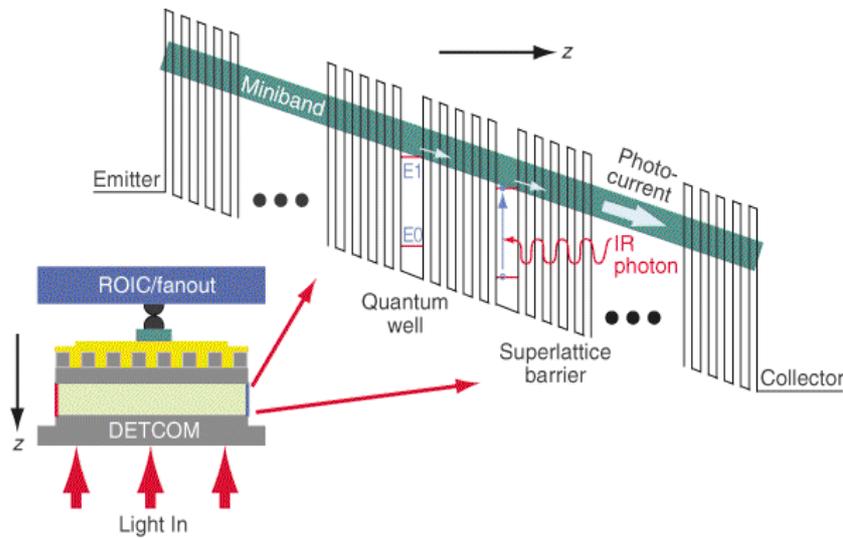


Fig.2.61

En el diseño de detectores de pozos cuánticos, la absorción de los fotones del IR excitan los electrones del nivel del fondo del pozo cuántico a un estado excitado mayor cercano o dentro de una banda contigua de transporte de energía. Este electrón puede libremente participar en la carga de transporte en la banda de conducción. Esto causa una foto-corriente que puede ser detectada. (Fig.2.61)

El problema con la tecnología QWIP ha sido su baja eficacia cuántica, pues para que un fotón sea absorbido con facilidad debe de viajar paralelo a las capas del pozo cuántico y al chip.

Para que este sistema sea utilizable en la práctica la incidencia de la luz no puede ser directa por lo que deben utilizarse dispositivos para cambiar al ángulo de incidencia mediante redes de difracción sobre la superficie a modo de rejilla o mediante el biselado de los bordes de la oblea.

Para resolver este problema, se graba una rejilla de difracción de dos dimensiones en cada píxel, de forma que los fotones que llegan perpendiculares son reflejados con un cierto ángulo dentro del píxel y de ésta forma obtener una velocidad vectorial paralela a las capas y así poder ser absorbidos. Para optimizar las propiedades de reflexión de la parilla, ésta se recubre de oro.



Fig.2.62

En la imagen de la Fig. 2.62 muestra una matriz de detectores QWIP de 320X240 píxeles montado sobre una base cerámica. El tamaño del chip es de 11X14 mm. Un una estructura típica de un detector de pozos cuánticos, tiene 50 pozos.

Las ventajas de los detectores QWIP de arseniuro de galio (AsGa) sobre otros detectores de IR, como es el MCT son:

- ✓ relativa facilidad en la fabricación y que se traduce en una reducción de costos de fabricación
- ✓ alto rendimiento
- ✓ posibilidad de seleccionar la respuesta espectral del detector entre los 3 μm y 18 μm .
- ✓ gran uniformidad de los píxeles
- ✓ bajo nivel de ruido operando a temperaturas bajas

El futuro en la fabricación de estos detectores, se encamina a conseguir un funcionamiento a temperatura ambiente y a una detección eficaz independientemente del ángulo de incidencia de la energía fotónica.

Tendencias de los detectores de IR;

Los detectores de IR pueden clasificarse en generaciones. En la primera generación se emplean matrices lineales de detectores con procesos de escaneado, pasando a las matrices de dos dimensiones con sistemas estáticos que forman la segunda generación.

La tercera generación de sistemas de IR se está desarrollando actualmente y se está consiguiendo mayor capacidad mediante matrices de más píxeles, mejor resolución termal y la posibilidad de que un detector puedan trabajar en distintas bandas simultáneamente, lo que se conoce con distintos nombres, como detectores multiespectrales, “two-color FPA” o “multicolor”. Estos sistemas podrán mejorar considerablemente el rendimiento de las cámaras de IR para sistemas de visión.

En esta generación de detectores empleados son los fotodiodos de HgCdTe y los fotoconductores de pozos cuánticos (QWIP), aunque recientemente están apareciendo nuevos detectores (InAs/GaInSb strain layer superlattices (SLS) y QDIP (Quantum dot IR photodetectors)

Parece cercano el desarrollo y comercialización de detectores multiespectrales, aunque el desafío en el desarrollo de estos sistemas no está exento de sistemas con complicada estructura y fabricación.

Con los detectores multicolores se obtendrán una mayor discriminación en la identificación de objetivos. Además con la aportación de una nueva dimensión en cuanto al contraste, los detectores multibanda pueden ofrecer procesos avanzados de color mediante algoritmos que en un futuro mejorará la sensibilidad y pueden permitir la reducción de errores, como por ejemplo la reducción del cluter.

Arquitectura de detectores y matrices

Los distintos formatos en los que se utilizan los detectores abarcan desde un único detector hasta grupos lineales o en dos dimensiones de cientos o miles de detectores. Cuando se emplean más de un detector, se agrupan formando una matriz, y se emplea el término “Focal Plane Array” (FPA).

El FPA está formado por una serie de detectores, como vimos anteriormente, agrupados en una matriz y situados en un mismo plano focal o plano del sistema óptico donde se enfoca la imagen y que dependiendo de su estructura estarán agrupados de una forma determinada.

En una matriz de detectores, no toda la superficie del detector es sensible a la energía de infrarrojo pues alrededor de las filas y columnas de los detectores individuales que constituyen la matriz, hay una región inactiva circundante a cada detector. Las áreas inactivas pueden servir como las sendas para la señal electrónica.

La proporción entre el material sensible al IR y la superficie inactiva de los bordes de las filas y columnas se llama factor de llenado. El detector ideal tendría un factor de llenado muy alto, con un porcentaje grande de su área dedicado a la recepción de fotones de IR y un área muy pequeña dedicada a la segregación del detector. Hoy en día los detectores de FPA de infrarrojos más buenos ofrecen factores de llenado alrededor del 90%.

Una cámara con un detector con factor de llenado alto proporcionará una mayor sensibilidad y mejor calidad de la imagen global, que una con factor de llenado bajo.

Atendiendo a la arquitectura del sistema de unión entre el sensor y el circuito de lectura, básicamente hay dos tipos y son la monolítica y la híbrida.

Monolítica

Los FPA monolíticos (Fig.2.63) tienen el material sensible al infrarrojo y las funciones de transmisión de las señales conjuntamente en el mismo sustrato o capa, conectándose mediante cableado a los circuitos de procesamiento de la señal.

Los FPA monolíticos se fabrican más fácilmente y son más baratos que los híbridos porque tienen menos costes industriales. En contra, los FPA monolíticos generalmente tienen un nivel más bajo de rendimiento que los híbridos, pues tienen el material detector y las sendas señaladas en los mismos niveles, resultando un factor de llenado más bajo (~55%).

Para algunos usuarios, es evidente la diferencia entre un equipo con FPA monolítica y otro con un FPA híbrido, manifestado en la pobreza de la calidad de la imagen. Esta diferencia es

particularmente notable cuando se observan temperaturas bajas o escenas con las diferencias de temperatura pequeñas.

Como veremos más adelante, los FPA monolíticos están directamente relacionados con los lectores de señal de salida o multiplexores llamados CCD.

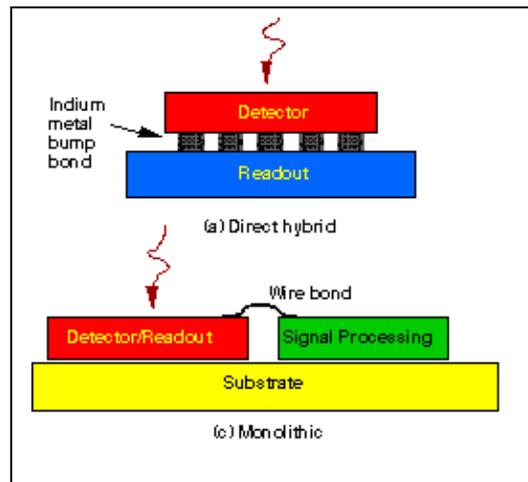


Fig.2.63

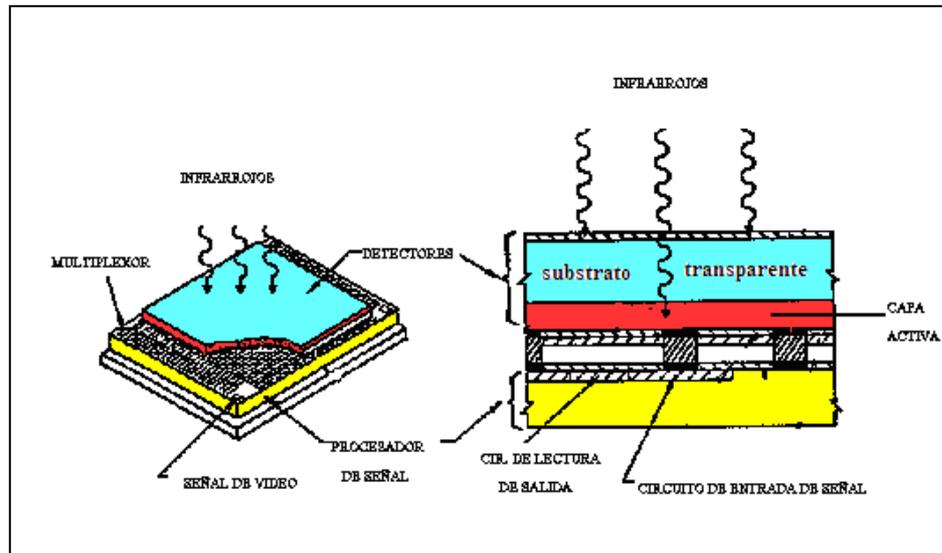
Híbridos

Un detector híbrido (Fig.2.63) tiene el material del detector sensible en una capa y el sistema de lectura- transmisión de la señal y el circuito de procesado en otra capa distinta pero unida eléctricamente mediante uniones de metal de indio (Indium Bump), lo que permite una conexión directa del detectores de la matriz con los circuitos de señal de lectura.

Este sistema permite la interconexión de un gran número de detectores directamente con su circuito de lectura y pre-amplificador emparejado en las mismas filas y columnas de la matriz de detectores.

Aunque este proceso de construcción requiere más pasos y puede ser más caro, se consigue un FPA con un factor de llenado significativamente más alto (~75%-90%).

Gracias a este alto factor de llenado, se obtiene el mayor beneficio, en forma de una muy buena sensibilidad termal. Algunas cámaras de FPA híbridas proporcionan la sensibilidad por debajo de 0.02°C.



Arquitectura de un FPA híbrido, en dibujo de perspectiva y corte transversal

Fig.2.64

La Fig. 2.64 muestra la incidencia de las ondas infrarrojas sobre el FPA atravesando un sustrato transparente, hasta la capa activa donde los fotodetectores transforman los fotones en electrones pasando al procesador de señal, que en este caso lo forma un dispositivo de carga acoplada (CCD - Charge Coupled Devices), produciendo finalmente una señal de salida, que una vez tratada y amplificada finalizando en una señal video de la imagen observada.

Los detectores más económicos suelen ser de iluminación frontal (front-side illuminated) como el de la Fig.2.64, pero la radiación al atravesar el aislante de dióxido de silicio, es en parte absorbida en las longitudes de onda más cortas y la eficiencia cuántica disminuye. Los detectores de iluminación trasera (back-side illuminated), poseen una eficiencia cuántica mucho más elevada ya que los electrodos se encuentran en la parte inferior de la oblea.

En la Fig.2.65 se puede ver un detector de Sensors Unlimited, Inc.'s SU128-1.7T1 para sistemas de examen, con un (FPA) híbrido con un fotodetector de InGaAs para trabajar entre $0.9 \mu\text{m}$ y $1.7 \mu\text{m}$ del espectro a temperatura ambiente no aplicable para la visión nocturna como podemos comprobar por las frecuencias de trabajo.



Fig.2.65

Sistemas electrónicos de lectura y amplificación

El sistema de lectura y amplificación, suele estar integrado en un mismo circuito, llamado ROIC (Read- out Integrated Circuit). Fig.2.66

El ROIC es un circuito integrado que combina y realiza las funciones electrónicas que se desarrollan en el “plano focal”, dentro de un único chip semiconductor. Su principal función es la conversión de la señal del detector y la posterior amplificación, uniendo la lectura de los distintos detectores de la matriz y generando la señal de salida dentro del tiempo de trabajo que necesita el multiplexor.

En electrónica, un multiplexor es un dispositivo que recibe múltiples entradas y las reúne para transmitir las juntas en una única salida. Por lo que el multiplexor es el dispositivo que organiza y estructura las señales de cada detector en una acción rápida y repetitiva.

Estos circuitos se construyen usando tecnología CCD o de dispositivo de carga acoplada (Coupled Charge Devices) o tecnología CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) permitiendo mejor resolución y mayor sensibilidad en los detectores actuales. Para las cámaras de IR con aplicaciones de visión nocturna se utilizan normalmente los circuitos CCD.

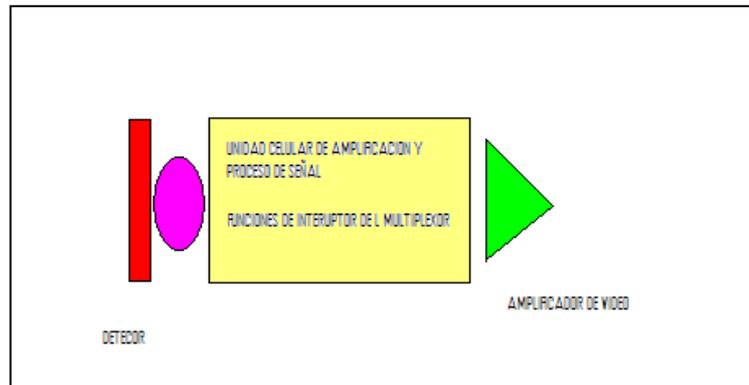


Fig.2.66

El CCD se inventó a finales de los 60 por investigadores de Bell Laboratories. Originalmente se concibió como un nuevo tipo de memoria de ordenador pero pronto se observó que tenía más potenciales aplicaciones como es el proceso de señales y sobretodo la captación de imagen, esto último debido a la sensibilidad a la luz que presenta el silicio. A través de los años 70 y como consecuencia del desarrollo de los sensores de visión diurna que emplean las cámaras de video grabación convencionales, se ha demostrando la utilidad de (CCD) para las cámaras de imagen de IR.

Para esta aplicación fue importante la aparición de las conexiones de Indio (Indium metal bump bond) lo que ha permitido mediante grupos de pequeñas uniones, que se pueda conectar un detector de IR y un CCD, permitiendo de esta forma la unión de matrices grandes de detectores de IR y sus circuitos de lectura de salida.

Simplificando el concepto, las actuales cámaras de imagen de IR, son como las cámaras de visión diurnas CCD en las que el elemento sensor o detector es sensible a una zona del espectro del IR, en la que se quiere trabajar.

En aplicaciones en cámaras de visión nocturna, el circuito CCD es una malla de electrodos de silicio colocados sobre la superficie de un chip. Al impactar los fotones sobre el detector se generan electrones que pueden guardarse temporalmente. Periódicamente se lee el contenido de cada píxel haciendo que los electrones se desplacen físicamente desde la posición donde se originaron (en la superficie del chip), hacia el amplificador de señal con lo que se genera una corriente eléctrica que será proporcional al número de fotones que llegaron al píxel. Para coordinar los periodos de almacenamiento (tiempo de exposición) y vaciado del píxel (lectura del píxel) debe existir una fuente eléctrica externa que marque el ritmo de almacenamiento-lectura: el reloj del sistema. La forma y amplitud de reloj son críticas en la operación de lectura del contenido de los píxeles.

La lectura en los CCD opera de forma que la lectura de electrones de cada detector individual, se transfiera a un detector próximo, arriba en la misma fila, y así de forma consecutiva hasta que alcanza el final de la columna llegando finalmente al circuito de salida. En la Fig.2.67 muestra un sistema de lectura de un multiplexor- CCD de un FPA de 32X32 detectores

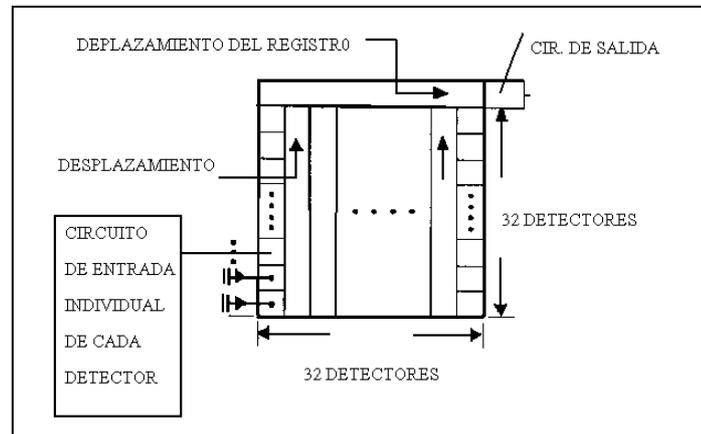


Fig.2.67

Un factor importante de la capacidad de trabajo de un CCD es la cantidad de carga eléctrica que puede retener cada píxel antes de llegar a la saturación. A dicho valor se le denomina “capacidad” y se mide en electrones. La capacidad típica de una cámara CCD se encuentra entre 45.000 a 1.000.000 electrones por píxel. Existe una relación entre el tamaño del píxel y su capacidad. Cuanto más grande es un píxel, por regla general, más capacidad tiene, y viceversa.

Cuando durante el tiempo de exposición se genera un número de electrones excesivo que rebasa la capacidad del píxel y se llega a la saturación, se produce el fenómeno denominado “blooming”: la carga eléctrica generada "rebosa" del píxel y contamina otros píxeles adyacentes. Posteriormente y durante el proceso de lectura, está carga eléctrica no puede vaciarse de una sola vez, y se distribuye mayoritariamente por los píxeles de la línea de imagen que se está leyendo. Algunas CCD poseen sistemas anti-blooming que permiten la evacuación de la carga excedente sin contaminar la imagen

Durante la lectura de los píxeles de una línea de imagen siempre existe una pequeña pérdida de carga por transferencia que se evalúa en el tanto por uno de electrones transferidos en cada trasvase de carga. A este factor se le denomina eficiencia de transferencia. En buenas cámaras CCD, la eficiencia de transferencia llega a 0.999998 (la eficiencia ideal es 1). También hay que tener en cuenta la presencia de píxeles defectuosos, que saturan muy rápidamente (píxeles caliente), o que son insensibles a la luz (píxeles negro o ciegos).

En el chip CCD también se generan cargas eléctricas debido a efectos térmicos, lo que conocemos como ruido. Al igual que ocurre con el detector, para minimizar este ruido en los detectores con CCD se recurre al enfriado.

Los sistemas de lectores CCD son muy usados en cámaras de visión nocturna o aplicaciones de imagen puesto que el efecto del “blomming” o de pérdidas de cargas no es relevante. No obstante para aplicaciones de cámaras de IR de medición o examen, deben compensarse estos errores.

Durante la década de los años 80, nuevos circuitos expandieron el uso de SCA (Sensor Chip Assembly) o chip conector entre el detector y el CCD, creando una amplia gama de aplicaciones, lo que ha permitido un alto nivel de SNR, mayores anchos de banda y mejor linealidad, ampliando y optimizando sus funciones básicas.

Por otra parte, los sistemas CMOS tienen el circuito de lectura fabricado sobre una serie de transistores de Sílice-metal-óxido de efecto campo que permiten el acceso directo a la señal procedente de cada detector. La señal de cada detector es leída columna por columna y línea por línea y la carga es dirigida individualmente al procesador con su valor exacto.

Los sistemas de lectura de CCD necesitan más energía que los CMOS, aunque éstos por su parte normalmente requieren sistemas de enfriamiento más potentes. Los sistemas CMOS son ideales para aplicaciones de baja potencia pues su consumo de energía es menor, como por ejemplo en cámaras portátiles que funcionen con batería obteniendo un tiempo de funcionamiento mayor, aunque por otro lado, en los circuitos CMOS la necesidad de disipación de energía de estos circuitos de lectura es crítica, por lo que deben ser enfriados con el detector.

Los detectores con sistemas CMOS generalmente proporcionan mejor exactitud para sistemas de medida como resultado de su capacidad de acceso directo al circuito de lectura, beneficiando a los usuarios que requieran esta especificación.

La arquitectura de los detectores está directamente relacionada con los circuitos de lectura como vimos anteriormente. La configuración general para la aplicación en IR son el híbrido directo e indirecto, no obstante, para aplicaciones de visión nocturna de IR la configuración más común suele ser la configuración monolítica (Fig.2.63).

Un ejemplo de sistema monolítico es el de las cámaras comerciales de video grabación, que tienen el circuito de lectura fabricado en el mismo sustrato de sílice, junto a cada uno de los elementos detectores. En este caso el área óptica del detector está reducida para acomodar el circuito de lectura de salida, lo que implica una disminución de la superficie de detección y por tanto un factor de llenado más bajo.

Dentro de este capítulo sobre los sistemas electrónicos de lectura y amplificación y antes del procesamiento de la señal, debe hacerse referencia a la necesidad de algunas cámaras a un sistema de “escaneado” de la imagen enfocada en la matriz de detección.

Los sistemas de visión nocturna están divididos en dos amplias categorías que son las cámaras que precisas de escaneo (Fig.2.68) mediante un sistema de espejos y las que no lo necesitan, denominadas “estáticas”.

Sistemas estáticos

Como indica su nombre el área del plano focal está completamente cubierta con detectores, por lo que no es necesario un escaneado de la imagen.

Los sistemas estáticos tienen un potencial alto de crear imagen con alta sensibilidad. Para obtener un resultado aceptable, es necesaria una matriz de 480X600 detectores. Asumiendo que cada célula tuviese de lado 2 milésimas de pulgada el tamaño de la matriz sería de 0.68X1.28 pulgadas o sea unos 24.3X32.5 milímetros.

En los sistemas estáticos se obtienen buenos resultados y en especial con la presencia de lluvia como así concluye estudios comparativos (91).

Sistemas escaneados

Según su forma de trabajo, pueden clasificarse en “seriales” o “paralelos”

Un sistema serial simple consiste en un detector o matriz lineal de varios detectores alineados horizontalmente y que escanean la imagen de forma rectilínea secuencial, en dos dimensiones, en una especie de zig-zag a través del plano focal, desde la parte alta derecha hasta la parte baja izquierda, como se puede ver en la Fig. 2.69. Esto se consigue mediante dos espejos rotando en un eje ortogonal uno de ellos para el rastreo horizontal y otro para el rastreo vertical.(Fig.2.68)

El movimiento de esos espejos o escáneres es muy rápido y debe estar sincronizado de forma precisa, para mantener un modelo de escaneado estable. Está técnica utilizada casi siempre que la matriz sea pequeña, de dos o más detectores y que se coloquen en matrices de formato lineal.

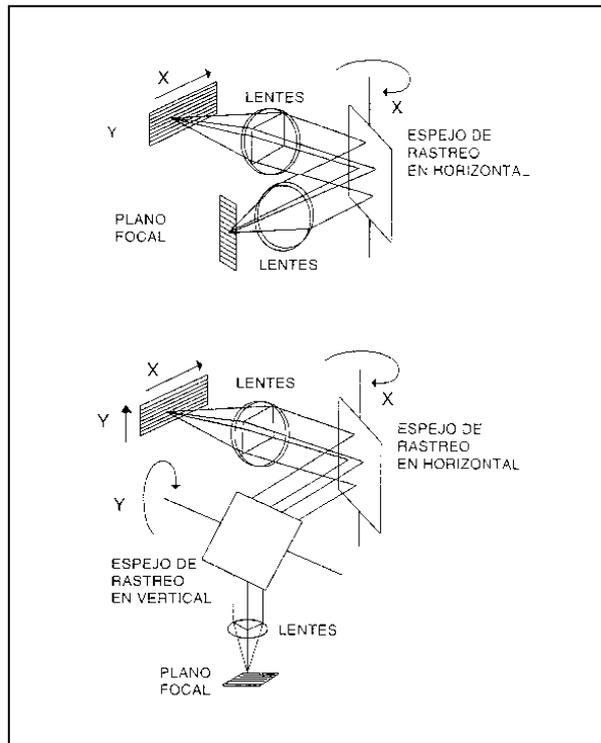


Fig.2.68

En un escaneado seríal, cuando se observa una imagen, la matriz de detectores debe de escanear de un lado al otro de campo de visión, línea por línea y cuando se lee una línea y se pasa a al siguiente existe un pequeño desfase en tiempo, que deberá compensarse, cosa que se consigue aplicando al escaneado de cada línea un tiempo de retraso de integración o TDI (time delay integration), a través del sistema de lectura de un sistema CCD.

En la tabla 2.9 siguiente se muestran los distintos formatos aplicables a las cámaras de VN

Sistema de escaneado	Formatos del detector		
Serial (dos ejes)	Detector único	Matriz lineal con TDI	
Paralelo (un eje)		Matriz lineal	Matriz 2D con TDI
Estático			Matriz 2D

Tabla 2.9

Cuando se emplean matrices de dos dimensiones en un sistema de escaneo de imagen, durante el escaneado de la imagen se efectúa la suma de señales de varios detectores, con lo que se consigue

una mejora de la señal con más número de detectores y además se produce una disminución de SNR (signal to noise ratio). Para este sistema hace falta un mínimo de 4 detectores para obtener una imagen razonable de la cámara sin demasiadas pretensiones



Fig.2.69

Se ha de tener en cuenta que, para evitar el parpadeo de la imagen y proporcionar un refresco adecuado de la imagen, las escenas suelen ser escaneadas ente 30 y 100 veces por segundo.

La sensibilidad de un sensor de la matriz está limitada por el tiempo que ese sensor está mirando a un punto específico de la imagen, pero si se debe efectuar una lectura rápida de toda la imagen el tiempo de que dispone el sensor tenderá a disminuir, y estos factores habrá que tenerlos en cuenta si se pretende obtener una imagen de alta resolución o de un campo de visión amplio.

La mejor ventaja de los sistemas seriales es su inherente uniformidad, y en contra, hay que tener en cuenta la complejidad del escaneo en dos dimensiones.

Un sistema paralelo consiste en una matriz lineal de detectores, alineados ortogonal a la dirección del escaneo y de suficiente longitud para cubrir enteramente el campo de visión en esta dimensión, como puede verse en la Fig.2.70

Este sistema solo requiere el escaneo en una única dimensión, que puede ser horizontal o vertical (Fig.2.68). La principal ventaja es que pueden ser usados numerosos detectores sin pérdidas serias de eficiencia y esto es importante para algunos requerimientos de cámaras. Otra ventaja es la disminución de la complejidad mecánica del escaneo



Fig.2.70

Tanto las matrices lineales como las de dos dimensiones (2D) pueden ser fabricadas con distintas arquitecturas y circuitos de lectura de señal de salida.

En las primeras matrices lineales se utilizaba normalmente iluminación frontal y la salida de la señal del detector se conectaba mediante cableado con el circuito de lectura con cada elemento de la matriz.

En las siguientes generaciones de matrices, tanto lineales como 2D, se utiliza normalmente la iluminación del detector por la parte posterior a través de un sustrato transparente en arquitectura "híbrida directa", la cual permite una conexión entre un gran número de píxeles, con los circuitos de lectura acoplados a lo largo de las filas y columnas del multiplexor.

Sistema de refrigeración

El ruido se traduce en una tensión variable que acompaña a la señal útil a través de los amplificadores que crece con la temperatura. Se manifiesta en forma indeseada con puntos o manchas (nieve) en los visores o monitores.

Internamente, el sistema CCD genera ruido a causa de la operación de sus componentes electrónicos. En algunos casos el CCD puede producir mayor cantidad de electrones durante su proceso interno que la fuente de fotones que ingresan en el dispositivo, provocando que la señal se pierda en el ruido que genera el aparato.

La eliminación de estas fuentes de ruido se logra enfriando los componentes. Unos pocos segundos de temperatura ambiente son suficientes para llenar los píxeles de ruido por lo que es imprescindible enfriar la CCD para obtener mejor calidad en las imágenes. Las cámaras llegan a enfriarse a temperaturas bajo 0°C permitiendo más sensibilidad en la captación de fotones. Para el enfriamiento puede utilizarse un sistema criogénico mediante nitrógeno líquido o empleando sistemas termoeléctrico.

Enfriar un CCD por medio de líquidos a muy baja temperatura es más eficaz que a través de un sistema eléctrico, pero es un sistema reservado para equipos con alta tecnología, debido al equipo necesario para almacenar y utilizar tales líquidos.

Cuando se trabaja en la banda larga (LWIR) los detectores fotónicos deben ser enfriados por debajo de los 100°K, aunque se considera la temperatura habitual de trabajo los 77°K (-196°C). Estas temperaturas solo pueden ser alcanzadas por un sistema mecánico pero de vida limitada o con nitrógeno líquido.

El nitrógeno líquido es un refrigerante criogénico de bajo costo se emplea utilizando el ciclo Stirling. Si se vierte como agua por licuación del aire se enfría un dispositivo electrónico hasta 77 K (-196 °C).

Muchos detectores de la banda media (MWIR), pueden operar a 200°K, y esta temperatura es alcanzable con un enfriador termoeléctrico (TEC- Thermoelectric Cooler). Los TEC pueden tener una vida infinita. El proceso más comúnmente usado es el de la refrigeración termoeléctrica, es conocido como células de Peltier.

Monitor de representación de imagen

El último eslabón de la cadena de un sistema de visión nocturna es el monitor o sistema de representación de imagen que se encarga de convertir la señal de salida del procesador en una distribución de señal bidimensional de luz visible correspondiente a la porción seleccionada de la escena de IR observada.

La opción obviamente seleccionada es una pantalla de tubo de rayos catódicos o actualmente una pantalla TFT, LCD o similares, ajustada a la resolución que proporciona el procesador. Además, se suele añadir un sistema de grabación digital de video que permita el registro de las imágenes observadas.

2.1.2.2.1. Cámaras de IR para visión nocturna

Evolución de los sistemas de visión nocturna para infrarrojo:

Conviene aclarar que para este tipo de cámara, también se emplea la denominación de cámaras “FLIR” que es un acrónimo de Forwar-looking infrared . Al principio de la evolución de este tipo de equipos, el término de receptor FLIR era indicativo de una cámara de detección de IR de uso militar. Hoy en día el nombre se alterna y se usa indiferentemente en la comunidad de este tipo de equipos como de uso civil o militar. Un sistema FLIR es en el IR, lo que una cámara de video en espectro visible.

Este nombre ha perdurado por su utilización en el ejército de los EEUU, y también porque actualmente es el nombre comercial que ha adquirido una empresa (Flir Systems Co.) que está liderando la comercialización y fabrica cámaras de imagen de infrarrojo, tanto fotónicas como térmicas.

La investigación sobre la detección infrarroja empezó antes de la segunda guerra mundial aunque se emplearon pocos recursos para esta tecnología ya que en aquella época estaba en pleno desarrollo del RADAR.

No fue hasta 1960 que el primer sensor FLIR fue desarrollado y presentado. El sistema FLIR en su inicio tubo un concepto modular, creándose un modulo común y el resto del sistema adaptarlo para cada aplicación específica.

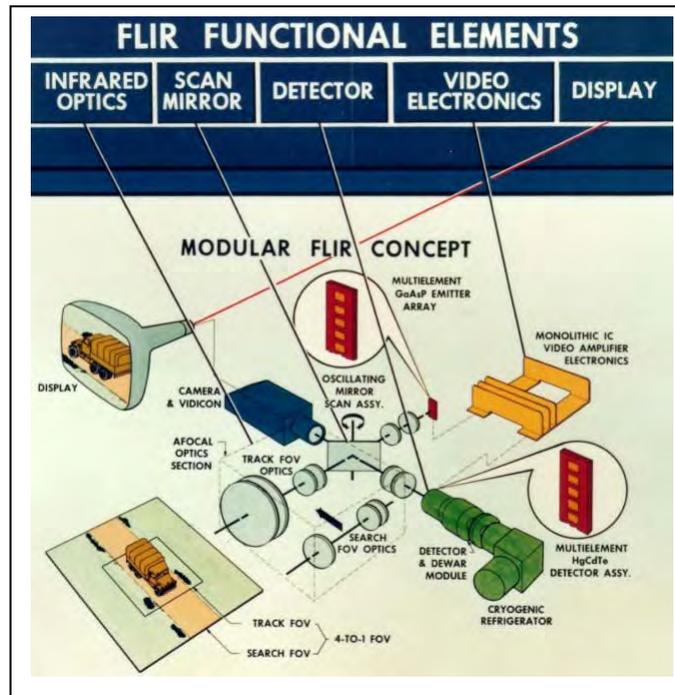
La tecnología siguió madurando en los años 70 y 80 generalizándose el uso del “modulo común” de la

Fig.2.71, que caracteriza a la primera generación de FLIR utilizándolo en distintas plataformas (tanques, helicópteros y sistemas portátiles).

Este sensor fue basado en una matriz lineal de detectores de HgCdTe de 60,120 o 180 elementos y en sistema de escaneado horizontal. Este matriz de detectores se caracterizaba por una eficacia cuántica baja, un alcance dinámico y sensibilidad bajos. La banda de trabajo de 8-12 μm y un SNR limitado. Fue un sistema ampliamente usado en la guerra de la “tormenta del desierto”.

Al final de los años 80 y principios de los 90 se inició el desarrollo de la segunda generación de FLIR basado típicamente en una matriz lineal de 4 elementos de 480 detectores, con un sistema de escaneado horizontal con TDI. Esta generación supuso una mejora en la resolución, la sensibilidad, alcance dinámico, uniformidad del detector y rendimiento alto.

Esta generación aunque ya desarrollada no ha sido hasta estos últimos años en los que se ha empezado su fabricación en serie y comercialización para uso no militar.



Esquema de una cámara de IR para VN (Texas Instruments)

Fig.2.71

La tercera generación todavía está en desarrollo y no está perfectamente definida.

Los sensores en principio están formados por grandes matrices (640X480 elementos), estáticas y que pueden operar en ambas bandas MWIR o LWIR. Suponen una mejora de alcance dinámico, uniformidad, sensibilidad y resolución. Todas estas generaciones necesitan el enfriamiento criogénico.

El futuro de los detectores se encamina a las matrices de multicolor, detectores que pueden trabajar en ambas bandas simultáneamente y el incremento de uso de detectores que no necesitan el enfriamiento como es el caso de los detectores termales, incluyendo una mejora en la resolución, nivel y tiempo de respuesta.

Proceso de detección de objetivos

El proceso de detección de los objetivos empieza por la radiación procedente de la escena, que es la suma de la radiación del objetivo más la radiación procedente del fondo de la imagen. La radiación producida por cada uno de ellos, es principalmente una función de la temperatura del objetivo más el flujo de fotones procedentes del calor del fondo de la imagen (Fig.2.72).

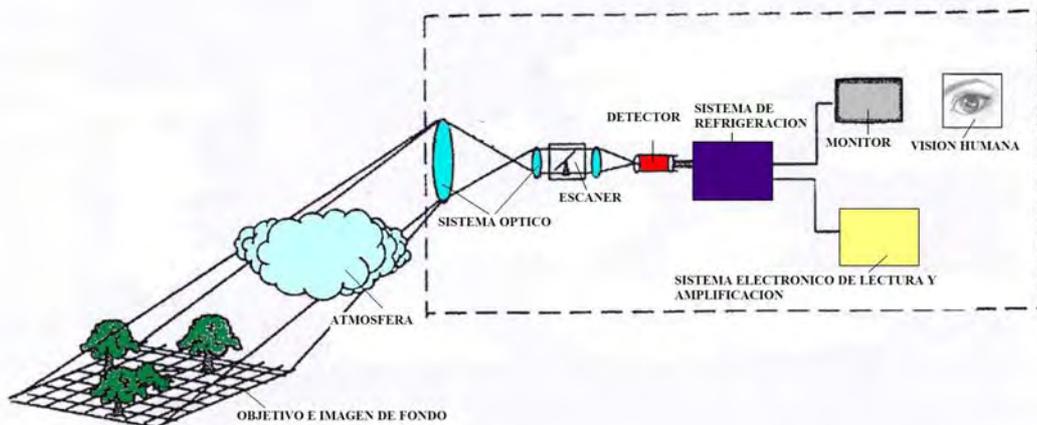


Fig.2.72

El conjunto de la suma de toda esta radiación se dirige hacia la óptica del detector, atravesando la atmósfera, donde esta radiación puede absorberse, difractarse o dispersarse. Así mismo pueden encontrarse con turbulencias que pueden causar distorsiones en la formación de la imagen.

A continuación, esta radiación entra en el sistema óptico, enfocando la imagen en la matriz de detectores (FPA), donde esta radiación se transforma en impulsos eléctricos. Previamente y según el número de detectores que formen la matriz del FPA, esta imagen debe ser escaneada. Como sabemos, para algunos sistemas es necesario un sistema de refrigeración del detector.

La señal eléctrica procedente del detector tiene que ser tratada y amplificada por un sistema electrónico para que finalmente pueda ser mostrada en un monitor al operador, momento en el que entran a formar parte del proceso de detección valores racionados con las cualidades del observador.

En proceso de adquisición del objetivo es complejo e influyen muchos factores y que se relacionan a continuación agrupados según un mismo factor, como puede observarse en la tabla 2.10.

Algunos de estos factores son comunes al proceso seguido con los sistemas de intensificación de luz residual y tratados en capítulos anteriores.

A) Factores relativos a la imagen observada y características de la escena
<p>Temperatura del objetivo y fuentes de calor</p> <p>Contraste térmico</p> <p>Emisividad</p> <p>Configuración del objetivo</p> <p>Clutter o densidad de objetos del entorno del objetivo</p> <p>Movimiento del objetivo principal</p> <p>Distancia del objetivo</p>
B) Factores ambientales
<p>Transmitancia</p> <p>Condiciones climáticas y atmosféricas</p>
C) Factores relativos a la plataforma sobre la que se instala la cámara
<p>Vibraciones</p> <p>Movimiento</p>
D) Factores relativos a la cámara
<p>Características del detector</p> <p>Características y parámetros del sistema</p> <p>Resolución</p> <p>Sensibilidad</p> <p>FOV</p> <p>Alcance dinámico</p>
F) Factores relativos al observador
<p>Agudeza visual</p> <p>Entrenamiento</p> <p>Motivación</p> <p>Experiencia</p> <p>Cansancio</p>

Tabla 2.10

A) Factores relativos a la imagen observada y características de la escena:

- Temperatura del objetivo y fuentes de calor

Como ya sabemos, todo cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas, siendo ésta radiación más intensa cuando más elevada es la temperatura del cuerpo emisor. La energía radiante emitida por un cuerpo frío es escasa y corresponde a longitudes de onda superiores a la de la luz visible.

Los cuerpos no emiten con igual intensidad en todas las frecuencias o longitudes de onda sino que sigue la ley de Planck (ver capítulo 1.3.2.1.), como puede verse en el gráfico de la Fig.2.73.

Al elevar la temperatura no sólo aumenta la energía emitida sino que lo hace a longitudes de onda más cortas. Un ejemplo de este desplazamiento es el cambio de color de un cuerpo cuando se calienta.

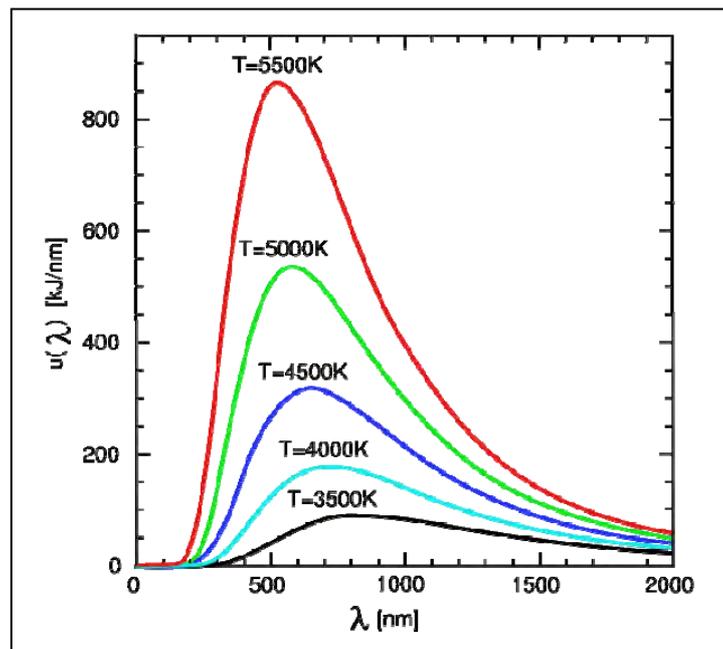


Fig.2.73

El rojo es el color de longitud de onda más larga del espectro de la luz visible, comprendida entre los 0.7 y 1 μm y en contra de lo que nos indica la experiencia cotidiana, es el color que corresponde a superficies más frías. El violeta es el color de la luz con una longitud de onda más corta y es emitido por las superficies más calientes.

Como ejemplo podemos ver que un trozo de hierro al rojo o un filamento de una lámpara de incandescencias, emite una radiación de una longitud de onda visible, produciendo luz.

En el gráfico de la Fig.2.74 relaciona la longitud de onda con la foto-emitancia y se aprecia que a mayor temperatura de un objeto, mayor es su emisión de energía radiante, en toda su longitud de onda, así como un desplazamiento hacia longitudes de ondas más cortas. Como ejemplo, entre otros, podemos observar que pico de la emisión de un objeto, como puede ser el oro a la temperatura de fusión está en un punto de longitud de onda de 3 μm .

Para los objetos que este a temperatura ambiente, sobre los 26-27°C (300°K) el pico de la radiación infrarroja ocurre en los 10 μm de la longitud de onda. Para la detección de un cuerpo humano está será la longitud de onda idónea, teniendo en cuenta que no existe mucha radiación para temperaturas sobre los 27°C.

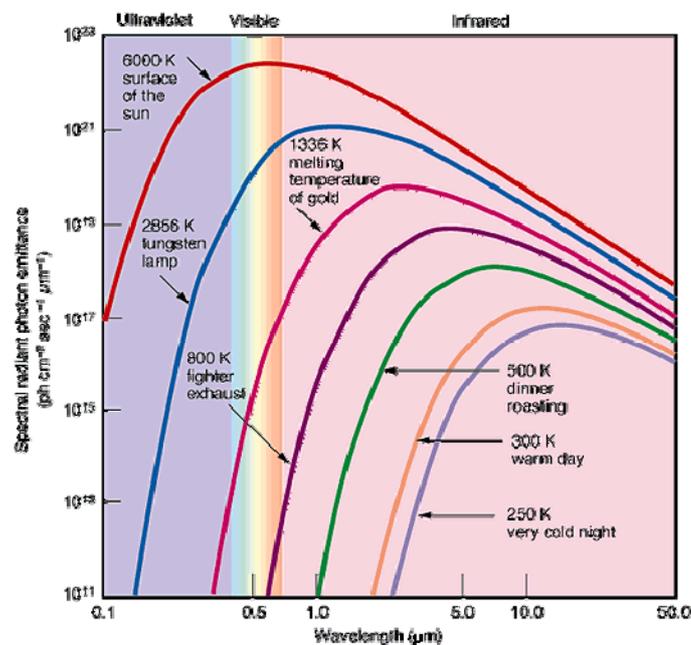


Fig.2.74

La emisión del IR procedente del objetivo o del fondo de la imagen, puede ser emitida por el objetivo o reflejada, procedente de otra fuente de calor cercana.

En la zona de NIR o MWIR ambos tipos de radiación pueden ser significativas pero en cambio para la zona del LWIR la radiación reflejada puede considerarse insignificante, siendo únicamente importante la emitida.

- Contraste térmico

Dentro de las características de la escena observada, un factor importante para la detección es el contraste térmico entre el objeto observado y el fondo de la imagen. Si este contraste es bajo, resulta más difícil la detección. A mayor diferencia de temperatura se obtiene un mayor contraste, factor necesario para tener obtener una buena imagen.

En los cálculos de predicción del rendimiento de los sistemas de visión nocturna de IR, la diferencia de temperatura entre el fondo de la imagen y el objetivo es un valor a tener en cuenta.

Cuando en las cámaras se utilizan lentes para la teledetección o detección a distancias largas, se debe tener en cuenta que cuando el ángulo sustentado del objetivo del sistema es menor de un grado, entonces el umbral del contraste de observador empieza a degradarse.

- Emisividad

La emisividad de un objeto se define a partir del concepto de cuerpo negro ya que la radiación emitida por un cuerpo negro es función únicamente de la temperatura. Un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la radiación infrarroja que recibe, por lo tanto no refleja ni transmite nada.

En teoría, un cuerpo negro sería también un emisor perfecto de radiación, y emitiría a cualquier temperatura la máxima cantidad de energía disponible.

En la realidad, la radiación IR de un objeto que llega a la cámara, no depende únicamente de la temperatura del objeto observado, sino también de la capacidad de emisión o emisividad del objeto.

La emisividad de un cuerpo es la relación de la suma de la energía radiada desde el cuerpo de interés, dividido por la suma de energía radiada por un cuerpo negro y siempre tendrá un valor menor de 1, que es la emisividad de un cuerpo negro.

$$\text{Emisividad} = \frac{\Sigma \text{energía del objetivo}}{\Sigma \text{energía del cuerpo negro}}$$

Normalmente, la emisividad variará en función del material y el tratamiento de su superficie, con unos valores que oscilan entre 0,1 y 0,95. Una superficie muy pulida como la de un espejo llega al 0.1 mientras que la misma superficie oxidada o pintada la emisividad es mucho mayor.

Para las superficies pintadas tratadas con pinturas con base de aceite como puede ser el casco de un buque, sin tener en cuenta el color en el espectro visible, tiene una emisividad sobre 0.9. Otro valor a tener en cuenta en la piel humana tiene una emisividad cercana al 1.

En la tabla 2.11 podemos ver la de emisividad de distintos materiales y con diferentes superficies y temperaturas.

MATERIALES	CARACTERISTICA	T °	EMISIVIDAD
ALUMINIO	Papel brillante	20	0.04
	Desgastado	20	0.83-0.94
COBRE	Pulido	100	0.05
	Muy oxidado	20	0.78
HIERRO	De Fundición. Oxidado	100	0.64
	Plancha herrumbrosa	20	0.69-0.96
NIQUEL	Niquelado brillante	20	0.05
ACERO INOX	Pulido	20	0.16
	Envejecido	60	0.85
ACERO	Pulido	100	0.07
	Oxidado	200	0.79
LADRILLO	Común	20	0.93
CARBON	Hollín	20	0.95
HORMIGON	Mojado	35	0.95
CRISTAL		35	0.97
ACEITE	Lubricante	17	0.87
	Película fina (0.13mm)	20	0.72
	Imprimación fina	20	0.82
PINTURA (al aceite)	Media de 16 colores	20	0.94
PAPEL	Blanco	20	0.07-0.09
YESO		20	0.86-0.90
GOMA	Negra	20	0.95
PIEL	Humana	32	0.98
SUELO	Mojado	20	0.92
	Encharcado	20	0.95
AGUA	Destilada	20	0.96
	Cristales de hielo	-10	0.98
	Nieve	-10	0.85
MADERA	Tabla de roble		0.90

Tabla 2.11

En las imágenes de la Fig.2.75 vemos un ejemplo muy gráfico en el que podemos comprobar como para una misma temperatura, dos materias pueden irradiar energía IR con intensidades diferentes, como es el caso de una taza metálica con un trozo de cinta aislante y que están a la misma temperatura, sin embargo la cinta aislante y el metal de la taza emiten energía infrarroja con intensidades muy diferentes y esto se debe a la diferente emisividad entre el metal y la cinta adhesiva.

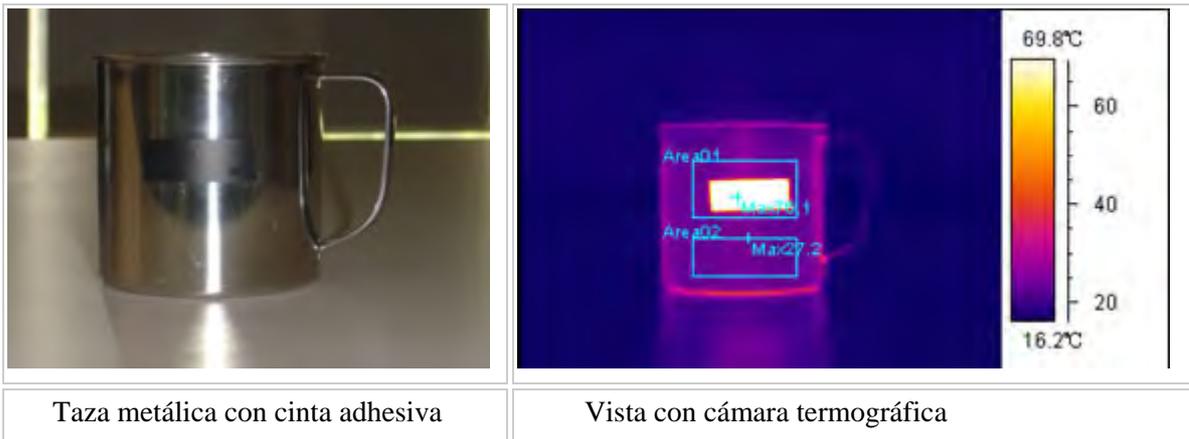


Fig.2.75

● Configuración del objetivo

Dentro de está capítulo se incluyen una serie de factores comunes referente a la forma y composición del objetivo y pueden ser:

- ✓ tamaño
- ✓ configuración superficial
- ✓ composición/densidad – inercia térmica
- ✓ revestimiento de la superficie

Obviamente a mayor tamaño se tendrá mayor probabilidad de detección y a mayor distancia. También a mayor superficie expuesta del objetivo, mejor será su radicación y por tanto mejor la imagen obtenida, pudiéndose además detectarse a mayor distancia. Como ejemplo, es la diferencia de detectar un buque visto por el costado o visto por la proa. En el primer caso la detección e identificación es mucho más fácil, como se comprobará en capítulos siguientes

La inercia térmica es la propiedad de un material para absorber y emitir calor. Una alta inercia térmica implica un comportamiento térmico más estable una vez alcanzado una temperatura determinada. Una baja inercia térmica implica fluctuaciones rápidas en la temperatura del material

En cuanto al revestimiento, las emisiones del IR térmico proceden de la zona más superficial de los objetos. Además como vimos en el capítulo anterior tiene una relación directa con la emisividad, por lo que hay que tener en cuenta su color y la presencia de pintura en cuanto su textura y a su composición, por ejemplo una superficie con pintura negra mate tiene un poder emisor mayor que una superficie brillante.

Como recopilación de los factores relativos a la imagen observada y enlazando los conceptos de la temperatura, emisividad y configuración superficial de un objeto y atendiendo al punto de vista de la física y el estudio de estas radiaciones en el marco de la termodinámica, la radiación IR responde a los siguientes principios:

Por encima del cero absoluto (0° Kelvin), toda materia refleja, absorbe y emite energía

Cuanto mayor es la temperatura, mayor intensidad de la radiación

Al aumentar la temperatura, el máximo de emisión se aleja hacia las altas frecuencias (bajas longitudes de onda)- Ley del desplazamiento de Wien-

La capacidad de un cuerpo para emitir o absorber energía térmica depende de su superficie, su temperatura, de la naturaleza del medio circundante y de la frecuencia de la radiación (Kirchhoff)

La radiación de un objeto está determinada de varias formas por la ley de la radiación de Plank. De esta ley se deduce la siguiente fórmula y que determina la capacidad de radiación o emisión de energía térmica de un cuerpo es:

$$R = e \cdot A \cdot K \cdot T^4$$

R= Flujo radiante

e – Emisividad o factor de emisión

A – Configuración superficial del objeto

k – Constante de Stefan-Boltzmann

T – Temperatura del objeto

Si de una imagen observada medimos los distintos puntos la radiación, obtenemos distintos valores en función de su temperatura y variación de emisividad. Esta diferencia o variación de cada punto es lo que permite la formación de imágenes de IR

- Clutter o densidad de objetos del entorno del objetivo

La presencia de muchos objetos desordenados en el campo de visión dificulta la detección y puede producir confusión en el operador al no poder distinguir el elemento a detectar.

Un campo de visión amplio es más propenso a contener demasiadas detecciones pequeñas (clutter) y el objetivo principal pasar desapercibido, por otro lado un campo muy pequeño impide cubrir zonas amplias. Este concepto también se trató en el capítulo .2.1.1.3. (Pág.46)

- Movimiento del objetivo principal

Este es un factor común a cualquier observación con sistemas tanto de visión diurna como nocturna. Resulta evidente que si el objetivo observado está en movimiento resulta más difícil su detección y seguimiento, pero si además su movimiento no es constante en la trayectoria resulta más difícil. En el medio marino y como consecuencia del movimiento de un barco por efecto de las olas éste es un problema habitual.

B) Factores ambientales:

- Transmitancia

Antes de entrar en el efecto que producen las distintas condiciones atmosféricas y ambientales que pueden darse en la mar, debemos tener en cuenta la transmitancia y su importantísima relación con la capacidad de detección de los sistemas de visión nocturna. La transmisión de la energía IR está afectada principalmente por la absorción y la dispersión.

La composición química de los distintos gases y las partículas en suspensión (aerosoles) que componen la atmósfera interfieren en la transmisión atmosférica de la energía IR emitida por los objetos observados hasta la cámara. Esta interferencia en el tránsito es en forma de atenuación, como consecuencia de la dispersión y absorción de las ondas electromagnéticas, creando zonas con distinto grado de bloqueo del flujo de fotones precedente del objeto observado, en su camino hacia la cámara.

La absorción se manifiesta por la reducción del flujo fotónico en determinadas longitudes de onda debido a la opacidad de algunos componentes atmosféricos que actúan como filtros dejando pasar solo algunas longitudes de onda.

El agua en suspensión y el dióxido de carbono de la atmósfera, entre otros, produce un fenómeno de absorción, siendo el primero el que mayor efecto tiene en el ámbito marítimo.

Existen algunas zonas del espectro del IR en las que el fenómeno de absorción es menor y se les denomina “ventanas atmosféricas” y que estudiaremos más adelante

La dispersión es consecuencia del fenómeno de la reflexión que se produce cuando el diámetro de las partículas en suspensión en la atmósfera es igual o mayor a la longitud de onda de las radiaciones. El choque de las ondas electromagnéticas con las partículas en suspensión produce un cambio en la dirección en el desplazamiento del flujo electromagnético aumentando la radiación difusa y como consecuencia una pérdida de contraste.

Esta dispersión es selectiva respecto a la longitud de onda en función del tamaño de las partículas en suspensión. Si las partículas son muy grandes como es el caso de las nubes, polvo en suspensión o rociones de mar, afecta por igual a todas las longitudes de onda dando lugar a una atenuación de la señal detectada por el sensor.

La transmitancia atmosférica entre el objetivo y el observador también se ve afectada por el número, distribución o concentración anormal de aerosoles atmosféricos en la trayectoria óptica, como puede ser humo, polvo, gases de escape, efluvios químicos, dióxido de carbono.

Para aquellas aplicaciones que requieran una uniformidad de fondo, como es el caso de las cámaras de visión nocturna existen varias bandas de longitudes de onda o “ventanas atmosféricas” con buen flujo de fotones para las diferentes bandas espectrales que se distribuyen como sigue: (Fig.2.76)

- SWIR (Short-wave IR), entre 1 y los 3 μm .
- MWIR (Mid- wave infrared) entre los 3 y 6 μm .
- LWIR (Long- wave infrared) de 6 a 14 micrómetros y tiene el máximo de emisión entre los 9 y los 12 μm .

Otras denominaciones habituales son:

- ✓ Near Infrarred (NIR): Frecuencias muy cercanas a la zona visible y con una longitud de onda entre los 0.78 y 1 μm
- ✓ Mid Infrarred: Frecuencias entre los 1.3 y 3 μm
- ✓ Termal Infrarred: Longitudes de onda entre los 3 y 30 μm

Dentro de las longitudes de onda corta, tenemos el NIR (Near-Infrared) o infrarrojo cercano y que se encuentra próximo a la zona del color rojo del espectro visible. Esta banda tiene una muy alta transmisión atmosférica próxima al 100% y se llega al pico de transmitancia atmosférica en la zona

del espectro visible correspondiente a la iluminación solar. Se obtiene el mejor rendimiento con los sistemas de intensificación de luz residuales en claridad y resolución, sin embargo, sin luz de luna o iluminación artificial dan una imagen pobre. En esta banda y para los objetos a temperaturas sobre los 27°C (300K) la radiación espectral es muy pobre.

La longitud de onda media, (MWIR), (MIR) o Mid-Infrared entre los 3 y 6 μm ofrece una transparencia atmosférica del 84%, sin embargo en condiciones de niebla esta banda suele bloquearse debido a la absorción espectral a consecuencia de vapor de agua por lo que es menos usado en aplicaciones de visión nocturna.

Esta banda se ve adversamente afectada por los pululantes atmosféricos como puede ser el polvo y otros gases, incrementando la absorción y la dispersión.

Longitud de onda larga (LWIR) de 8 a 14 micrómetros, y tiene el máximo de flujo fotónico entre los 9 y los 12 micrones.

Esta banda ofrece excelente visibilidad de la mayoría de los objetivos. Ofrece una transparencia atmosférica del 90% y presenta una estabilidad excelente, aunque para objetivos terrestres se ve muy afectado por el polvo y el humo. Esta banda ofrece excelente visibilidad para la utilización de la visión térmica en tierra.

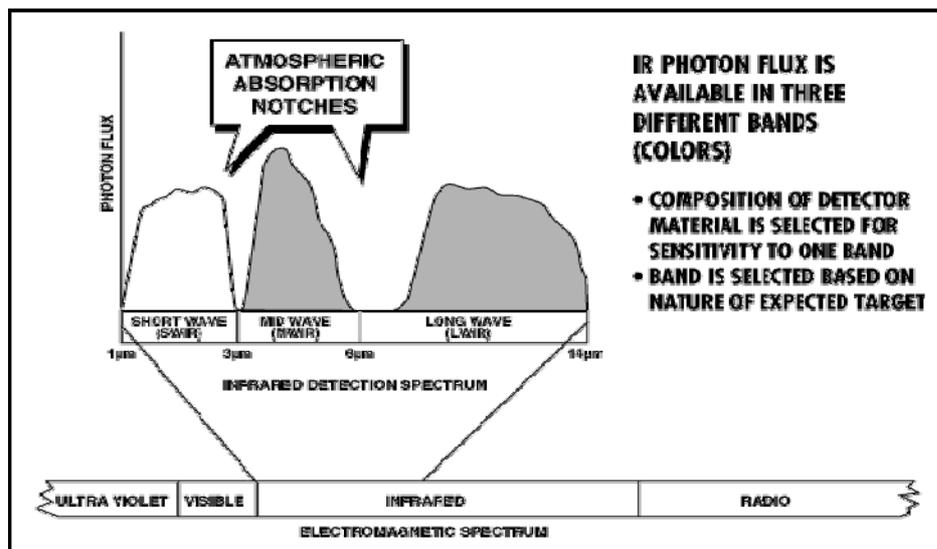


Fig.2.76

Si tenemos en cuenta que a temperatura ambiente, sobre los 26-27°C (300°K) la radiación espectral es máxima entre los 9 a 10 μm , se obtienen una de las “ventanas de transmisión atmosférica” más usuales en cámara de VN.

Una de las bandas más utilizada se encuentra entre 8 y 14 μm . aunque también es muy habitual operar entre los 3 y 5 μm . Las cámaras que trabajan en 8-14 μm se les denomina en algunos textos como LWIR FLIR y los de 3-5 μm MWIR FLIR

- Condiciones climáticas y atmosféricas

Las condiciones atmosféricas y ambientales que se dan en la mar, afectan doblemente a los sistemas de visión de IR. Por otro lado tenemos las condiciones que actúan de forma indirecta sobre la transmitancia atmosférica o la emisividad del objetivo y que vimos los factores relativos a la imagen observada y características de la escena y por otro lado las condiciones que actúan sobre el buque. En algunos casos las condiciones pueden afectar a ambas actuaciones conjuntamente.

Las condiciones atmosféricas que actúan en mayor o menor grado de forma directa en el buque y la cámara son:

- estado de la mar
- intensidad del viento
- nubosidad
- temperatura
- visibilidad

El estado de la mar e intensidad del viento actúa directamente sobre el buque y se caracteriza por la formación de olas de tamaño considerable, que producirán el movimiento de la plataforma de instalación de la cámara, así como vibraciones como consecuencia de los pantocazos.

También el viento intenso puede producir rociaciones de mar y agua en suspensión en la superficie marina afectando a la transmitancia atmosférica.

La nubosidad actúa de una forma indirecta y está relacionada con la radiación solar y por lo tanto con la temperatura que puedan alcanzar los objetos expuestos al sol y por consiguiente puede estar relacionado con la emisividad. A mayor radiación solar, los posibles de detección de objetivos aumentaran de temperatura.

La temperatura también puede tener relación con el contraste térmico, sobre todo en climas muy fríos con fuentes de calor relativamente pequeñas. Con temperaturas bajas los buques tienen mejor contraste

La visibilidad está directamente relacionada con la atenuación de la transmisión atmosférica. Las condiciones atmosféricas que pueden variar los valores de la transmitancia son la lluvia, nieve,

calima, humedad o agua en suspensión en la atmósfera. También existe una relación con la estación del año.

La lluvia debido al efecto de dispersión o reflexión limita mucho la capacidad de los equipos de VN, pero en el medio marítimo uno de los efectos que produce una importante disminución de la visibilidad tanto diurna como nocturna es la niebla. La niebla puede clasificarse en cuanto al origen de su formación y en cuanto a su intensidad pero lo que realmente influye en el concepto de la capacidad de detección es esta última.

La niebla, como sabemos, se produce cuando la humedad del ambiente está muy próxima al 100% y se satura. La intensidad de la niebla está relacionada con la densidad de las pequeñas gotitas de agua que la forman. A mayor densidad menos capacidad de visión y como vimos en el capítulo de la transmitancia atmosférica, la distancia de detección de una cámara de visión nocturna, dependerá de las condiciones atmosféricas y el tipo de aerosol específico presente en ese clima específico.

Existen estudios que relacionan el alcance de detección utilizando de equipos de VN con la visibilidad reducida a consecuencia de la niebla. Normalmente en estos estudios se tienen en cuenta las variables como son la densidad o el tipo de desarrollo de la niebla, la zona climática de la observación, o la estación del año. Por ejemplo en los meses de verano hay más humedad que en los meses de invierno por lo que en verano se tiene una mayor atenuación.

Estos estudios están realizados mediante metodologías distintas, como puede ser el empleo de algoritmos y modelos computerizados, la generación en laboratorio de niebla artificial o mediciones directas en el medio marino.

Algunos de los estudios que relacionan la visibilidad con niebla en la utilización de equipos de visión nocturna se basan en algoritmos y modelos computerizados como el MODTRAN (Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmission) o LOWTRAN (low-resolution transmittance propagation model), diseñados para modelar la atmósfera bajo distintas condiciones atmosféricas y ambientales y que permiten conocer la transmitancia y la radiación para distintas frecuencias del espectro.

Para los cálculos se utilizan distintos modelos climáticos (Standard Atmosphere Supplements – NASA 1966) diferenciados y estandarizados, con sus aerosoles específicos asociados como datos de entrada. Algunos de estos modelos climáticos son: Tropical, latitud media en verano, latitud media en invierno, subártico verano, subártico invierno, Standard USA etc.... y modelos de aerosoles: Rural, Marítimo, Urbano, Desértico, etc.

El que más nos interesa es el modelo marítimo que corresponde a las áreas continentales de latitudes medias bajo fuerte influencia de vientos procedentes del océano. Dentro de este modelo existen unos más específicos, como el denominado Navy Maritime.

En general y comparando los modelos climáticos, se obtienen mejores resultados en climas subárticos de invierno y los peores en climas tropicales y comparando los diferentes modelos de aerosoles, en donde se suelen obtener peores resultados en cuanto a transmisión atmosférica es en el modelo marítimo y que están relacionados con la cantidad de humedad.

También pueden afectar otros factores como pueden ser la geometría de la trayectoria de la óptica con respecto a la superficie del terreno y alrededores, aunque de menor efecto en el medio marino.

En estudios sobre la transmisión atmosférica a través de niebla de generación artificial (134), en el espectro visible y en las “ventanas atmosféricas” generalmente utilizadas en la visión nocturna, al objeto de extrapolar los efectos producidos en la niebla real, se deduce que la transmitancia se incrementaba a medida que se aumenta la longitud de onda para las zonas consideradas, como se puede apreciar en la gráfica de la Fig.2.77 en la que muestra la transmitancia para distintas longitudes de onda

En el mismo estudio pero con observaciones en la mar, fuera del laboratorio, la niebla se clasifica en diferentes densidades desde valores numéricos de 1.7 a 30 que corresponden con la distancia visible de 1 Km. a 50 metros respectivamente en el espectro visible y se comparan las zonas de 3 a 5 y 8 a 13 μm para la aplicación de imágenes de IR. El resultado en que tiene una ventaja razonable de transmitancia en la zona de 3 a 5 μm especialmente con densidades de niebla de 1.7 a 2.7 que corresponde a una distancia visible de 630 a 1000 metros. Por lo tanto este incremento de transmitancia se traduce en un incremento de posibilidad de detección.

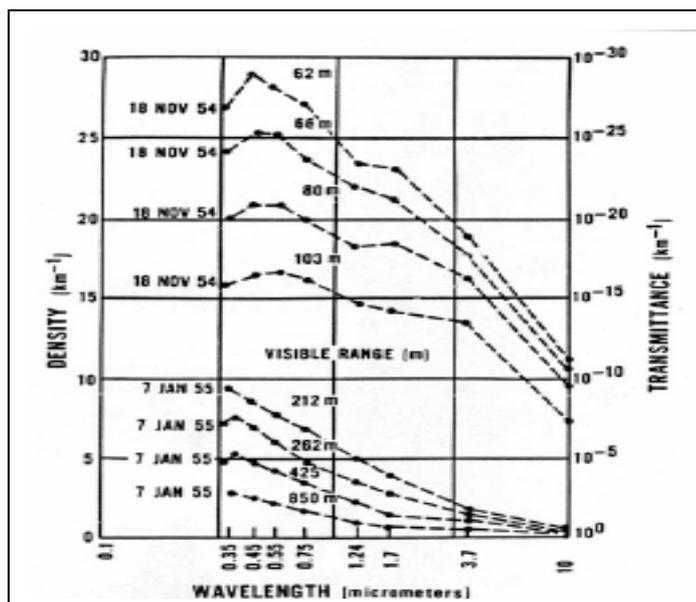


Tabla de transmitancia espectral para distintas densidades de niebla

Fig.2.77

Estudios (113) concluyen que para esta zona del espectro, existe una relación lineal entre la transmisión atmosférica y el vapor de agua perceptible en la atmósfera y aproximadamente es la misma que la distancia entre el sensor y el objetivo cuando ambos están en nivel del mar.

Por lo general, para condiciones atmosféricas adversas trabajando con un equipo de visión nocturna en la zona del 8 a 12 μm se vería como 1.5 veces más de donde debería localizarse algo sin utilizar un sistema de visión nocturna. Lo que es lo mismo, si un contacto está a 1.000 metros cuando lo vemos sin ayuda, lo veríamos a 1500 metros con un sistema de visión nocturna.

La Fig.2.78 muestra la transmisión atmosférica en la región de 8 a 12 μm en función de las distancias para tres condiciones de visibilidad distintas, de “Buena” (buena visibilidad, aerosoles rurales) “Regular” (visibilidad media, humedad relativa moderada y aerosoles urbanos) y “Mala” (poca visibilidad, alta humedad relativa y niebla).

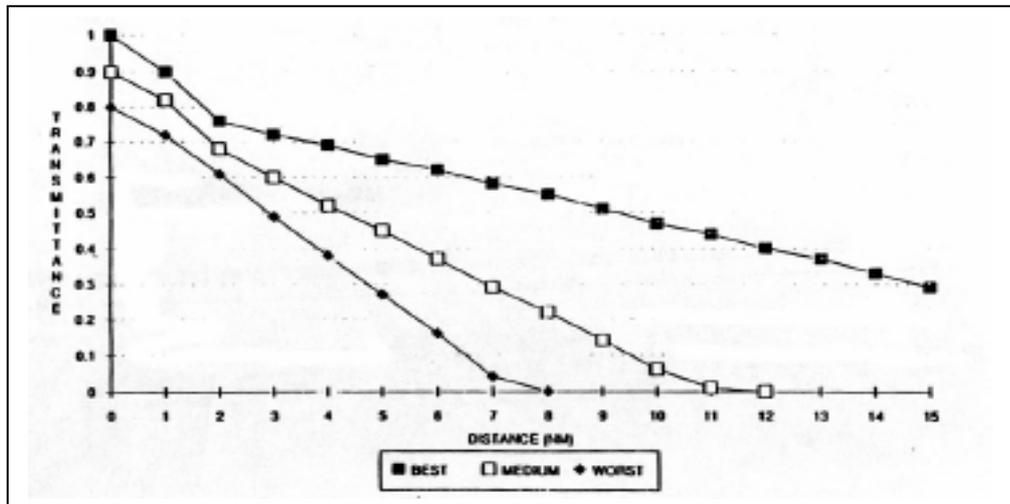


Fig.2.78

Otros estudios de campo sobre la capacidad de detección y reconocimiento de distintos objetivos tanto en tierra como en la mar (105) (131) y con distintas condiciones atmosféricas, en algunos de ellos (147) (48) (11) entre utilizando modelos computerizados (MODTRAN), para simular distintos escenarios, de cuyos resultados se concluye que;

Para condiciones de un clima de verano y para distancias entre el observador y el objetivo de hasta 1 km. la transmitancia se degrada de forma especial cayendo un 50% en el espectro visible, aunque presenta menos anomalías que en el IR, en el que incluso en la peor zona de longitud de onda del espectro (4.2 a 4.3 μm), llegando a ser cero , debido a la absorción.

Para está misma distancia y ante la presencia de niebla densa, prácticamente no existe transmitancia para la zona visible ni para el IR, sin embargo, para el LWIR muestra mayor transmitancia. Para el caso de niebla y lluvia, en la distancia de 0.5 a 1 Km. la transmitancia cae un 20% en todas las frecuencias y en la distancia de 1 Km no existe transmitancia para ninguna frecuencia.

En todas las condiciones en las que existe algo de transmitancia, en la zona del LWIR se obtienen mejores resultados. Por lo anteriormente expuesto, parece evidente que en el caso de nieblas la mejor zona es la de LWIR. Para lluvia, ninguna de las zonas del IR se obtiene resultado, siendo la zona visible la que presenta algo de transmitancia.

En un proyecto ADVISE (Advanced Visual System for Situation Awareness Enhancement) del DLR (Deutsches Zentrum fur Luft - German Aersospace Center) sobre el desarrollo del proyecto EVS (Enhanced Visión Systems) como sistema de ayuda visual para el pilotaje de aeronaves en

donde se contempla la utilización de equipos de visión de IR ,se desarrolló un modelo de cálculo para la investigación de la influencia de la niebla en el tráfico aéreo de aproximación, para conocer si la utilización de estos equipos mejora la visibilidad.

Para este trabajo se utilizó el MODTRAN v4.0 y como datos de cálculo se utilizaron las categorías estándar de calificación de niebla del ICAO (Internacional Civil Aviation Organization) y el simulador del sensor de IR modelo TTIM (TACOM Thermal Image Model) caracterizado para una cámara tipo Thermovision 570 operando en la banda del espectro de 8-12 μm , con un detector microbolométrico no refrigerado de Vanadium Oxide Sílice en una matriz de 320X240 elementos y resolución espacial de 0.623 mrad con una lente de $f=72$ mm y 1.3 mrad con lente $f=036$ mm. Angulo de visión 12x6 y 24X12°

También se tuvieron en cuenta las diferentes influencias en función de la estación del año, las características climáticas de las diferentes zonas terrestres, los diferentes tipos de aerosoles y los distintos parámetros de los posibles objetivos (tamaño, temperatura, emisividad).

La simulación está realizada en dos pasos. El primero teniendo en cuenta las limitaciones en la transmisión atmosférica correspondiente a un sensor ideal y en un segundo paso se incluye la influencia propia del sensor, los parámetros del objetivo y la distancia al mismo.

Los resultados obtenidos de este estudio son que para la niebla de Cat I (Alcance visual 1220 mts), pueden conseguir detección de 3 a 10 Km. para condiciones de NEDT= 0.15 K, con lo que se consigue una importante mejora en la detección para todo tipo de aerosoles, zonas y estaciones.

La detección atendiendo al tamaño del objetivo (entre 2-5 Km) solamente está limitada por las características del sistema en cuanto a su resolución o MTF. Como ya vimos, el tamaño del objeto y el alcance de detección dependen de la resolución espacial

En la Fig.2.79. la transmisión atmosférica para una niebla de categoría I para una latitud media en verano con predominio de aerosoles rurales que corresponde a una situación sobre tierra , con aire limpios posteriores al paso de un frente frío podemos observar que en la zona visible del espectro de 0.4-0.75 μm la transmitancia es bastante más baja que en las bandas de 3-5 y 8-12 μm con lo que se llega a la conclusión que para estas condiciones con la visión de IR se verá más lejos que con la visión simple sin ayuda , lo que se justifica la utilización de los equipos de IR.

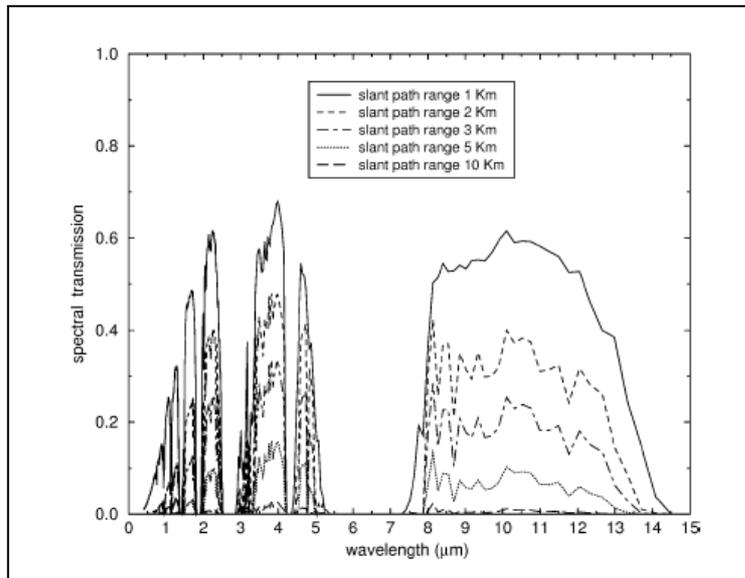


Fig.2.79

Para nieblas de categoría II (alcance visual de 610 m), solo se consigue una mejora general en la detección para la región de 8-12 aunque se observa un pico de transmisión más alto entre las frecuencias de 3 a 4 μm , obteniendo una mayor eficacia de los equipos de IR en las distancias máximas de detección de entre 1-2 Km. (Fig.2.80)

Únicamente en la banda de 8-12 μm se obtiene mejor alcance visual que con la visión sin ayuda

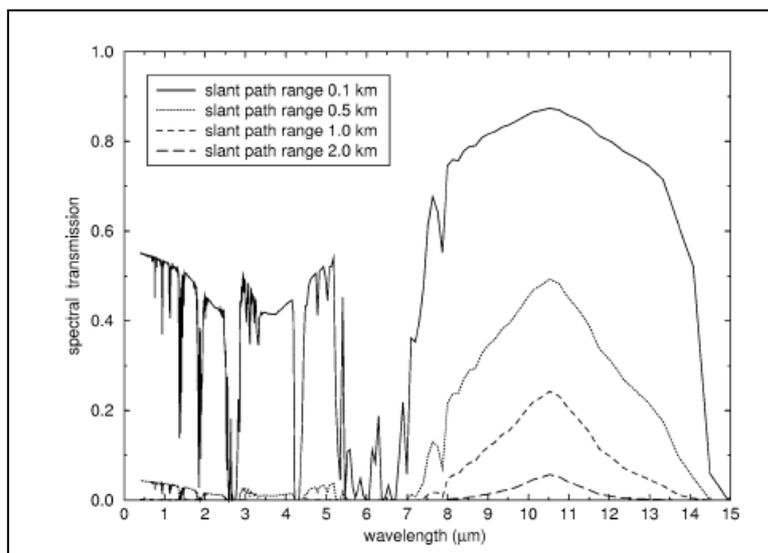


Fig.2.80

Para la categoría IIIa y IIIc con alcances de 305 y 92 metros, lo que significa una niebla densa no existe ninguna mejora en la utilización de cámaras de IR

Para niebla de Cat III con visibilidad menor de 300 metros no hay diferencia entre el alcance visual con visión termal en ambas ventanas atmosféricas y la visión sin ayuda (Fig.2.81)

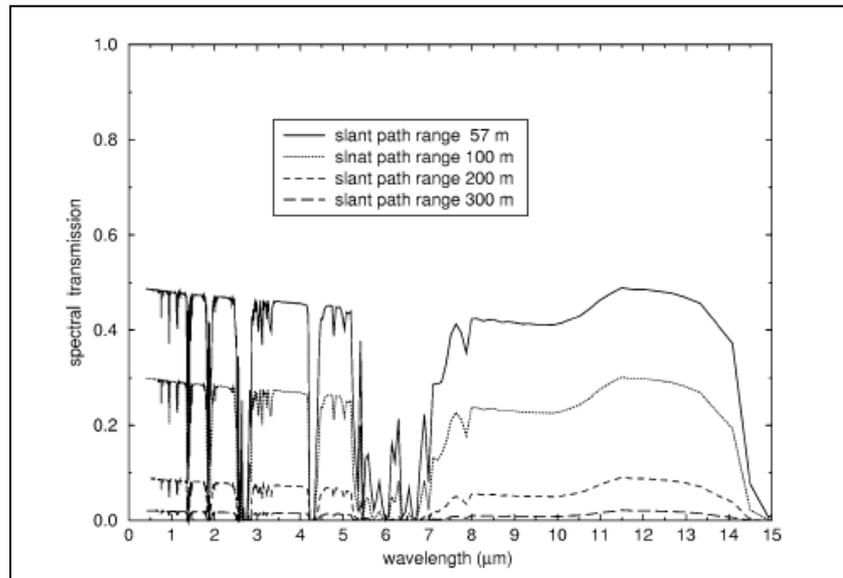


Fig.2.81

Las cámaras equipadas con sistemas de enfriamiento criogénico son más sensibles a las pequeñas diferencias de temperatura y como hemos visto la transmitancia es distinta en la banda de MWIR que en la LWIR., por lo que la elección entre el tipo de cámara respecto a su sensibilidad (con o sin enfriamiento) y la elección de la banda de trabajo de la cámara será un equilibrio en el que a priori no habrá un claro vencedor. No obstante el mejor resultado se obtendría con una cámara refrigerada.

Asumiendo cielos claros y buenas condiciones atmosféricas , se es capaz de ver más lejos con cámaras térmicas en invierno que en veranos, debido a que en verano hay más humedad en el ambiente

C) Factores relativos a la plataforma sobre la que se instala la cámara

Es obvio que el movimiento de la plataforma en la que se instala la cámara es un factor a tener en cuenta y deberá evitarse las vibraciones y efectos producidos por la mar. Los elementos a tener en cuenta son;

- vibraciones como consecuencia del motor, velocidad del buque y estado de la mar
- movimientos
 - ✓ Balance y cabezada.
 - ✓ Altura de la cámara
 - ✓ Sistemas de estabilización (giroestabilización).

La altura de la cámara permitirá tener una mayor distancia de observación pero también se amplía la velocidad angular de la cámara producido por el balance.

Para la utilización de una cámara de visión nocturna a bordo de un buque se considera necesaria la instalación de en una plataforma giroestabilizada. Si se trata de una embarcación de porte más pequeño o de mucha velocidad en la que el estado de la mar le afecta más, la estabilización de la cámara es imprescindible.

D) Factores relativos a la cámara

- Características y parámetros del conjunto sensor-detector

Dentro de los factores relativos a la cámara podemos diferenciar aquellos que dependen del detector y los del sistema al completo

El detector es el elemento que más importancia e influencia tiene en el conjunto de parámetros y características del sistema. Por tanto, cuando se pretende adquirir o utilizar uno de estos sistemas es importante conocer las características del detector.

Tipos de detectores

En capítulos anteriores, se ha estudiado de una forma general los sensores, detectores y circuitos de lectura de los distintos sistemas de IR. En este capítulo, se estudian los factores a tener en cuenta en las cámaras cuya finalidad es exclusivamente la visión nocturna con cámaras fotónicas de IR.

Como ya se ha visto en capítulos anteriores en la elección del sensor, deberán tenerse en cuenta las zonas del espectro en las que se pueda obtener un mejor rendimiento en función de la radiación, lo que conocemos como “ventanas atmosféricas”.

En la tabla 2.12 siguiente se relacionan los detectores, que se utilizan las cámaras de visión nocturna de IR

Fotovoltaicos	Fotoconductores
HgCdTe – PV	HgCdTe – PC
InSb	Pbs y PbSe
PtSi (Como fotodiodo de barrera se Schottky)	

Tabla 2.12

- Fotovoltaicos:

En general estos sistemas, dada su configuración y funcionamiento pueden albergar a matrices de muchos detectores dentro del encapsulado criogénico, además de tener espacio para las líneas de conducción y los preamplificadotes

HgCdTe – PV (MCT)

Este tipo de detector ha sido utilizado en matrices lineales de hasta 960 detectores, y la configuración suele ser en matrices de dos dimensiones (2D) con TDI y 2D estático en matrices de 32X32 hasta 480X640 con tamaños de píxeles de 20 μm a 1 mm en aplicaciones de imagen termal para búsqueda y adquisición de blancos en las regiones del espectro del MWIR y LWIR.

Para su aplicación en imágenes se utilizan FPA híbridos con CCD para trabajar en las zonas de 3-5 μm y 8-12 μm , aunque también se ha utilizado en matrices lineales con estructura monolítica de hasta 960 detectores.

Sin embargo todavía existen problemas, relacionados con una producción homogénea del material del detector (los detectores tienen el corte de longitudes de onda distintas), produciendo una respuesta no uniforme entre los distintos detectores que forman la matriz.

InSb

Con los recientes avances, los detectores fotovoltaicos de InSb son unos de los más sensitivos disponibles para el uso en la ventana de transmisión atmosférica de 3 y 5 μm , y más utilizados MWIR, para trabajar a temperatura de 80°K.

El InSb con arquitectura híbrida directa, es altamente uniforme y se estructuran en matrices estáticas, iluminada por la parte trasera, con formatos de entre 156X82 a 640X480.

En cambio, su construcción es más compleja pero se rentabiliza en aplicaciones donde se requiere una mayor sensibilidad termal extrema, por ejemplo en las imágenes militares de gran alcance o de vigilancia.

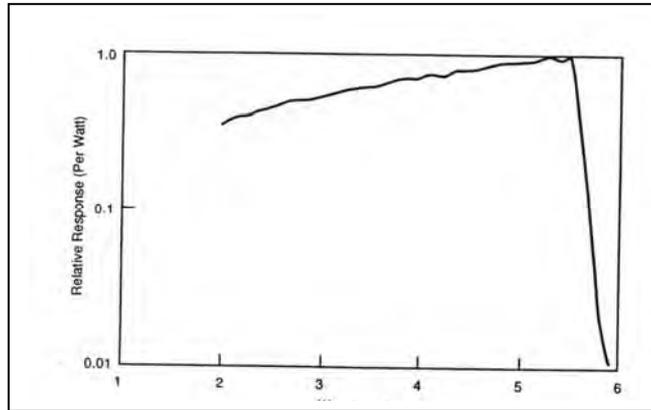


Fig. 2.82

En la Fig.2.82 se muestra la respuesta espectral del InSb a 80°K, para el detector con sin película antirreflectante con una eficacia cuántica de 65%.

PtSi

Para aplicaciones de imagen, se utiliza un sistema denominado fotodiodo de barrera de Schottky mediante un proceso fotoemisor interno del PtSi .

El detector fotodiodo de barrera Schottky, se forma en la superficie de contacto de la unión de entre un semiconductor y un metal. El semiconductor normalmente es sustrato de sílice y el metal suele ser el Platinium o el Paladium, formando los diodos de barrera de Schottky de PtSi o PdSi. El más importante es el Platinium (Pt) que produce una respuesta máxima aproximada hasta 5,6 μm. aunque la zona de trabajo de las matrices de detectores de PtSi es de 3μm a 5 μm.

El punto más alto de corte se produce mediante enfriamiento por debajo de 77°K y el punto más bajo de corte se obtiene a la temperatura de 200°K.

La iluminación de la unión es a través del sustrato de Sílice, que produce un filtro natural del paso de las longitudes de onda larga, produciendo un bloqueo de las ondas con una longitud de onda menor de 1 μm.

Varias características lo hacen interesante. Una de ellas es que los detectores son fabricados en un sustrato de sílice que es muy adecuado para la integración en FPA, lo que facilita el acoplamiento de la estructura del detector el circuito de lectura de salida como es el caso de la unión con un

CCD, resultando un FPA monolítico o híbrido fabricado en un sistema de único material, ofreciendo la posibilidad de una amplia variedad de formatos.

Los FPA monolíticos son más baratos de fabricar, tienen una menor proporción de fallos y son térmica y mecánicamente más duros que los híbridos aunque con los híbridos alcanzan un factor de llenado del 100% mientras que con la monolítico de 30-50%.

Además los FPA híbridos ofrecen un amplio formato de detectores disponibles, tanto en matrices lineales, rectangulares y cuadradas de hasta 1024X1024 elementos. Otra de las ventajas es que soluciona uno de los mayores problemas de otras matrices de detección, que es la no uniformidad de los detectores ya que la respuesta de los diodos de barrera Schottky no dependen críticamente del espesor de la capa de sílice.

Uno de los inconvenientes es su baja eficacia cuántica (típica de 0,1 a 1%), pero a pesar de esto, su uso es crucial en matrices en las que es necesaria la uniformidad. La combinación de la posibilidad de hacer grandes matrices de detección así como la excelente respuesta uniforme de las matrices de PtSi, hacen que sean una atractiva elección para aplicaciones donde exista un flujo de fotones de fondo de la imagen muy variable, como son los sistemas de imagen de IR.

El desarrollo de estos detectores se encamina hacia las combinaciones de sílice para poder trabajar en largas longitudes de onda, extendiendo la sensibilidad a la ventana de transmisión atmosférica de 8-12 μm . Resumiendo, la barrera Schottky, es ampliamente usada en aplicaciones de imagen termal.

- Fotoconductores:

Debido a las características de estos detectores, su configuración, el encapsulado del detector y su sistema de refrigeración, solo se fabrican en matrices de unos 200 detectores, aunque por otro lado, tienen la ventaja que son sistemas fáciles de fabricar. Son compatibles con los circuitos CMOS

HgCdTe – PC

Esta tecnología prácticamente es de matrices lineales, aunque se han construido algunas matrices de 2D de 10X10 detectores para aplicaciones especiales.

Estas matrices lineales pueden fabricarse para trabajar en ambas ventanas de transmisión atmosféricas. Para trabajar en la zona del LWIR necesita en mayor enfriamiento así por ejemplo, para alcanzar la longitud de onda de 12 μm necesita ser enfriado hasta los 80°K. Para aplicaciones en el MWIR puede operar en temperaturas más altas, entre 175 a 220° K mediante enfriamiento termoelectrico.

Hoy en día esta tecnología está centrada en matrices lineales de entre 30 y 180 elementos.

En los FPA lineales de HgCdTe, la señal de cada uno de los detectores se saca fuera del encapsulado del detector para su multiplexado y amplificado, al objeto de no incrementar la temperatura dentro del mismo.

PbS y PbSe

Los detectores de IR de PbS fueron prácticamente los primeros en utilizarse y desarrollarse durante la Segunda Guerra Mundial. Ambos son fotoconductores y pueden operar en el MWIR a temperaturas de entre 77 a 300°K y $\lambda_c=3-4 \mu\text{m}$. La gran impedancia de estos detectores, le permiten conectar con circuitos de lectura CMOS.

Normalmente para aplicaciones en visión nocturna, los FPA de estos materiales sensores, se configuran en matrices de 2D. Las matrices lineales o de 2D pueden ser fabricadas con distintas arquitecturas dependiendo del sistema de lectura y procesamiento de la señal de salida que proporciona el detector.

En la primera generación de detectores lineales normalmente se utilizaba la iluminación frontal del detector y cada detector estaba unido mediante un vínculo cableado al sistema de procesamiento de la señal de salida del detector. En la segunda generación de FPA, la iluminación del detector es por la parte trasera a través de un sustrato transparente.

En las últimas dos décadas los detectores para aplicación en la VN se han desarrollado intensamente con la segunda generación desde la invención de los Circuitos de Carga Acoplada (CCD).

Así mismo se ha demostrado la eficacia de matrices de 2D, tanto estáticas como escaneadas con detectores de alto desarrollo fotovoltaicos de HgCdTe, PtSi e InSb, así como en detectores fotoconductores extrínsecos de PbS y PbSe.

El esfuerzo de los fabricantes se encamina hacia el aumento de productividad e incremento del volumen de producción lo que implica una disminución del coste.

Características del detector

Conocidos los distintos tipos de detectores en los sistemas de visión nocturna, es interesante conocer aquellos factores que deberán tenerse en cuenta para su elección. Esta elección es importante pues condiciona el resto de elementos del sistema.

Las características del detector que mayor influencia tienen en el resto del sistema son:

- banda de trabajo
- sensibilidad
- resolución

Estas características están relacionadas, entre otras, con el tipo, tamaño y material del detector, con la longitud de onda y temperatura de trabajo

Banda de trabajo:

La banda de trabajo en la que se pretenda trabajar es el principal determinante del tipo de detector, aunque también se deberán tener en cuenta los demás elementos que componen el sistema. Para la selección de la banda de trabajo se tendrá en cuenta:

- tipo de tarea encomendada al sistema
- características del objetivo
- consideraciones ambientales y transmisión atmosférica
- características técnicas de la cámara

En el capítulo 1.2.2. se describen las tareas que son la base del estudio de esta tesis y que fundamentalmente se resumen en la capacidad de detección, reconocimiento e identificación de buques de forma que permitan una navegación segura durante la noche así como la utilización en salvamento marítimo en la búsqueda y de naufragos.

En capítulos anteriores referentes al proceso de detección de una cámara de IR, se estudió los factores relativos a la imagen observada (Pág.1.21) y se relacionan las características térmicas del objetivo observado y las longitudes de onda de trabajo.

Las cuestiones sobre las condiciones climáticas y atmosféricas se estudiaron en capítulos anteriores (Pág.129) y en el criterio de elección de la banda de trabajo, se tendrá en cuenta las especiales condiciones atmosféricas del medio marino y concretamente, en lo que se refiere a

condiciones de visibilidad (niebla, calima, lluvia, alto grado de humedad, agua en suspensión) y a la necesidad de detectar y reconocer un objetivo a larga distancia.

Algunas de las consideraciones ambientales están directamente influenciadas por la transmisión atmosférica y en capítulos anteriores se vieron las principales frecuencias o bandas de frecuencias así como las ventanas de transmisión atmosférica que posibilitan un mejor rendimiento de los sistemas de IR así como los conceptos básicos de radiometría a tener en cuenta en la transmitancia.

En cuanto a las características técnicas de la cámara, además del tipo del detector (material – refrigeración) se tendrá en cuenta la detectividad, el ángulo de visión (FOV) y tiempo de integración ya que los sistemas estáticos o escaneados están influenciados por el tiempo de integración. Los detectores estáticos son más utilizados en las longitudes de onda medias ya que tienen un mayor tiempo de integración que los sistemas escaneados, aunque para atmósferas limpias y sin agua en suspensión y a distancias cortas, pueden ofrecer mejor resultado las últimas generaciones de sistemas escaneados (microescaner) que los estáticos.

Una vez determinada la longitud de onda de trabajo, se seleccionara el tipo de detector más adecuado. En la tabla 2.13 relaciona las temperaturas de trabajo y los puntos de corte de las distintas longitudes de onda de algunos detectores.

Obsérvese que para cada temperatura de trabajo de la cámara, se deberá disponer de un determinado sistema de enfriamiento, y como veremos más adelante, a menor temperatura de trabajo, el sistema de enfriamiento es más sofisticado y costoso.

La temperatura de 27° (300K), es la que conocemos como cámaras que trabajan a temperatura ambiente (room temperatura)

TEMPERATURA DE TRABAJO EN °C				
Tipo de sensor	27°	-83°	-193°	-271°
Pbs	3.0	3.3	3.6	
Pbse	4.4	5.4	6.5	
InSb	7	6.1	5.5	5.0
PtSi			4.8	
PV HgCdTe	1-3	1-5	3-12	10-16
PC HgCdTe	1-11	3-11	5-25	12-25
Ex.Si				8-32
Ex.Ge				7-200

Tabla 2.13

Como muestra la tabla 2.13 a medida que se adentra al las longitudes de onda más larga para obtener un resultado aceptable se debe recurrir a un mayor enfriamiento.

Estudio comparativo entre la banda de 3-5 y 8-12 μ m:

Comparando las dos bandas habituales de trabajo (MWIR y LWIR) parece que no hay una ventaja evidente para todas las diferentes condiciones y en general se acepta que, las ventajas de una sobre la otra dependen principalmente del tipo de objetivo, de las condiciones ambientales y de las características técnicas de la cámara, aunque en la banda de MW es más irregular y presenta unos grandes picos en la absorción y transmisión en presencia del agua y/o dióxido de carbono.

Existen estudios comparativos entre las distintas bandas de trabajo, aunque como consecuencia de las múltiples y complejas variables que los sistemas de IR la forma práctica de conocer cual de ambas bandas es mejor, se traduce en las distancias dentro de las que obtenemos la detección, reconocimiento e identificación del objetivo para cámaras de iguales características.

Como se vio en capítulos anteriores, para el estudio comparativo entre ambas bandas se han empleado diferentes sistemas que abarcan desde la observación real en tierra o en la mar, la generación en laboratorio de diferentes condiciones atmosféricas y el empleo de modelos computerizados que simulan las diferentes situaciones de transmisión atmosférica (MODTRAN – LOWTRAN).

Un estudio comparativo (45) basado una versión modificada del modelo LOWTRAN 6, de ambas frecuencias 3-5 y 8-12 μ m para un ambiente marino tropical para detectores de tecnología corriente establece que la banda de 8-12 μ m es superior para todas las condiciones excepto para objetivos calientes y distancias largas, lo que proporcionaría ventajas a las banda MWIR para los casos detección y reconocimiento.

Otros estudios comparativos (91) sobre el rendimiento de cámaras de VN en ambas ventanas de transmisión atmosférica, con características distintas en cuanto al tipo de detector y el tipo de matriz (estática o escaneada) llega a la conclusión que para cámaras de IR de propósito general en cualquier tipo de condiciones, la banda de LW muestra ser mejor en términos de obtener una menor degradación de la calidad de imagen por la absorción atmosférica del agua y el dióxido de carbono. También se observa un buen rendimiento de los sistemas no escaneados en presencia de lluvia.

En otro estudio más reciente (33) se compara los alcances obtenidos en las frecuencias LW y MWIR para sistemas de matrices de detectores, mediante modelos MODTRAN para la transmisión atmosférica y el programa NVTherm para el cálculo de distancias. En este caso el objetivo está estandarizado, en observaciones en tierra y en que e varían las condiciones de temperatura y humedad relativa. En este estudio se deduce que las distancias de detección son más sensibles a la temperatura y la humedad relativa que las distancias de reconocimiento y que las distancias de identificación son las menos afectadas por las variaciones. También las distancias

(detección, reconocimiento e identificación) en la LW dependes más de estas variaciones atmosféricas que lo hace en las distancias en la MW.

Llegado a este punto y dado lo complejo del tema y las distintas apreciaciones de los múltiples estudios, parece que para ambientes marinos donde se tienen niveles altos de humedad en los que se tengan objetos más calientes en la banda de MWIR presentaría cierta ventaja sobre la LWIR en la que obtendríamos buenos resultados en caso de niebla moderada. De forma general los sistemas que trabajen mejor en ambientes más calidos son los MW y para ambientes fríos los LW.

Otra posibilidad, aunque más cara, es la utilización de cámaras duales, con capacidad de trabajar en ambas bandas, ya que disponen de dos detectores, como es el ejemplo de la cámara AGEMA 900 DUAL BAND, en la que se dispone de un detector de MW(InSb) y otro de LW (HgCdTe).

Estas cámaras de trabajo en distintas bandas de frecuencia son una de las tendencias de desarrollo de los sistemas de VN de IR.

Otro estudio (132) comparativo estimatorio sobre la información contenida entre la visión normal y la visión termal, dentro del balance termal terrestre, en términos de limitación de la información potencial obtenida, en el que se considera que es el principal parámetro de un sistema de conversión de imágenes, la visión termal en la zona del espectro de 8-14 μm no es inferior a la visión humana bajo iluminación diurna.

No hay que perder de vista el constante desarrollo de esos sistemas y la tendencia inminente a que puedan trabajar en varias bandas entrando en los denominados sistemas multispectrales, utilizando para cada necesidad una cámara o simplemente la discriminación de imágenes observándola con distintas bandas.

Sensibilidad:

La finalidad fundamental de un detector es la de transformar la señal óptica procedente de la imagen observada en corriente eléctrica. El termino “detector responsivity” o nivel de respuesta del detector sirve para describir la amplitud de la señal eléctrica obtenida en relación con el flujo incidente sobre el detector. Este parámetro es una medida típica de construcción del detector y se especifica en la documentación de calibración del mismo.

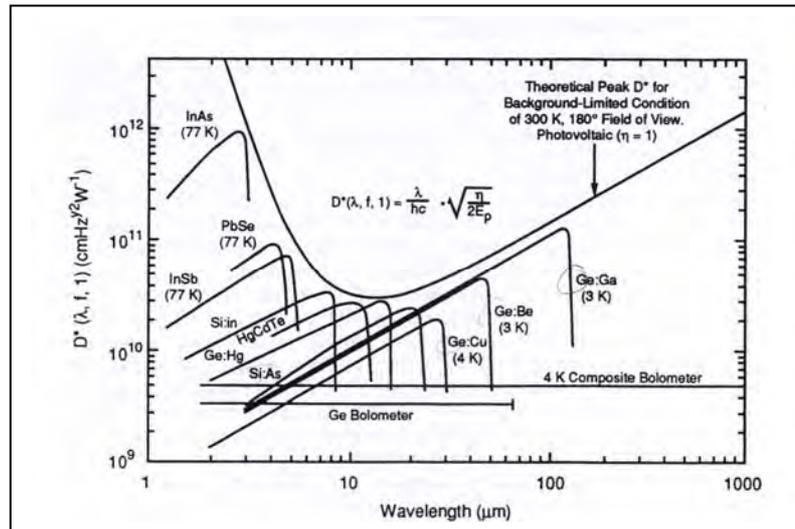
La sensibilidad del detector indica el nivel de la señal (voltios o amperios) producido por el flujo incidente sobre el detector. Una sensibilidad alta no asegura que pueda diferenciarse bien un objetivo pequeño. Para determinar si un objetivo pequeño será visto deberá tenerse en cuenta el valor de la relación entre la señal y el ruido o SNR (signal to noise ratio), para saber si podrá ser diferenciado del ruido.

El término de la sensibilidad se desarrolló para describir las características del SNR de un detector. La sensibilidad de un detector dependerá de tipo de material que lo compone, la longitud de onda en la que trabaja, el tamaño del detector, el ancho de banda y el recubrimiento que puede tener.

Un valor usado para caracterizar el rendimiento de un detector es la Detectividad Normalizada (D^*) y su unidad de medida es el Jones. Este es un valor de referencia, que indica la relación entre la señal y el ruido (SNR) y es uno de los mejores valores para caracterizar los detectores. A mayor valor de D^* mejor es el detector.

En la Fig.2.83 se muestran los valores teóricos de D^* de distintos detectores para una condición determinada de fondo de imagen y FOV.

El valor de la detectividad es un factor a tener en cuenta en la elección del detector. La detectividad varía en función de la longitud de onda en la que aunque la tendencia es que siempre se tiene una mayor detectividad para longitudes de onda más largas. En algunos casos con un factor de ventaja importante, como es el caso del InSb.



Valores típicos de D^* para distintos detectores

Fig.2.83

En general el límite de rendimiento de un detector fotónico está fijado por la fluctuación en la proporción o índice de llegada de fotones procedentes del fondo de la imagen observada o lo que conocemos como “ruido fotón” y aparece como un voltaje aleatorio o corriente en la señal de salida del detector.

Esta fluctuación puede depender de varios factores, como son la distribución de la radiación con respecto a la longitud de onda, la modulación de la frecuencia, la posición del elemento emisor de energía IR, la dirección o ángulo de llegada al detector de esta radiación. La detectividad determina el rendimiento teórico límite de un detector de fotones.

Resolución

Como vimos en el capítulo 2.1.1.2 sobre las características de los sistemas de intensificación de luz residual, es uno de los parámetros más importante y nos indica que un equipo con una buena resolución, se pueden obtener imágenes con mejor nivel de detalle o nos permite observar objetos mucho más pequeños.

La resolución de una imagen puede ser mensurada de varias formas, pero básicamente se cuantifica de manera que puedan ser resueltas visiblemente una par de líneas. Las unidades físicas con la que se puede medir la resolución son las líneas pares por pulgada. También la resolución de imágenes digitales pueden ser descritas de otras formas, como puede ser resolución en píxeles, espacial, espectral, temporal o radio métrica.

Pero para los sistemas de visión nocturna de detección remota, que implica el empleo de lentes para detectar a largas distancias se utiliza en concepto de “resolución espacial o geométrica “

Además de la banda de trabajo, la sensibilidad y la resolución que nos proporciona el detector, hay otros elementos a tener en cuenta, como son la uniformidad de detector o el estado de desarrollo y coste.

La uniformidad tiene importantes consecuencias en los sistemas de imagen de IR y puede traducirse en la obtención de imágenes de mala calidad (28).

La uniformidad es una característica de las matrices de detectores como consecuencia de que los todos detectores no tienen el mismo rendimiento. Normalmente se entiende por falta de uniformidad a la desviación estándar de la capacidad de respuesta del detector y se manifiesta en que ninguno de los detectores da exactamente el mismo voltaje de salida para una misma radiación IR. De no corregir este efecto no se podrían distinguir los elementos de la imagen.

La corrección se efectúa después de digitalizar la salida de cada detector de la matriz y se consigue mediante un algoritmo llamado NUC (Non Uniformity Correction) calculando un conjunto de coeficientes para todos los píxeles de la matriz, de forma tal de que cada píxel en la pantalla produzca un voltaje eléctrico idéntico al otro, para la misma intensidad de radiación de entrada, obteniendo una uniformidad idéntica sobre el total de la matriz.

Estos coeficientes son calculados durante la fase de calibración del sistema y otros derivados de posteriores análisis estadísticos de la escena real.

Esta corrección normalmente requiere más recursos del procesador de señal y un mayor gasto de energía eléctrica, además de disminuir algo el rango del sistema, ya que cada uno de esos coeficientes cambia de modo continuo debido a los cambios de temperatura de la escena, en la óptica, y en el mismo detector.

Algunos píxeles defectuosos, no pueden ser corregidos, por lo que son eliminados, reemplazando el mismo con uno de valor de la media de los píxeles cercanos, siempre que esta zona de píxeles sea pequeña. En caso contrario las zonas más grandes de elementos defectuosos es llamada "Cluster"

Para evitar el efecto de la falta de uniformidad en las matrices de los detectores los fabricantes estudian la forma de mantener la uniformidad mejorando los materiales y el proceso de fabricación de los detectores y en especial en algunos materiales como es el caso del HgCdTe, que tiene especial tendencia a la falta de uniformidad.

Estado de desarrollo y coste del detector; La experiencia del fabricante y el nivel de desarrollo de los diferentes sistemas que están el mercado son los que garantizan la fiabilidad del producto. Se ha de tener en cuenta la rápida evolución de esta tecnología, que da pie a nuevos sistemas y configuraciones que poco a poco van demostrando su fiabilidad y resultados.

Actualmente, se consideran detectores tecnológicamente maduros a los PV- HgCdTe , InSb y PtSi aunque todavía está evolucionando en aplicaciones de matrices grandes y píxeles más pequeños. También son detectores desarrollados durante los últimos 15 años, los detectores de PbSe, PbS y HgCdTe, en sus respuestas al bajo nivel de ruido, mejor uniformidad y gran capacidad de producción. En este momento, están surgiendo otras tecnologías, que están en vías de maduración como son el detector de pozos cuánticos o "quantum well", y los detectores superconductores.

En cuanto al coste de un detector, depende, entre otros, de varios factores, como puede ser nivel de detectividad (D^*), el sistema de enfriamiento requerido, su configuración, la perfección de la matriz formada.

Uno de los factores que más influencia directa tiene sobre el precio final de una cámara de IR, es la posibilidad de fabricar detectores en un número considerable ya que al aumentar la producción se rentabiliza la inversión y por tanto disminuye el coste final.

Características y parámetros de las cámaras de visión IR:

Para obtener un buen rendimiento en la realización de imágenes con las cámaras de visión nocturna en la detección y reconocimiento, autores reconocidos como J.M. Lloyd en su libro “ Thermal Imaging Systems” consideran que la resolución espacial y la sensibilidad termal son predominantes, teniendo en cuenta que la imagen obtenida empezará a degradarse a medida que empeoren las condiciones atmosféricas y el contraste térmico.

Para trabajar en frecuencias espaciales bajas, la sensibilidad termal es lo más importante, mientras que para altas, la resolución espacial es el efecto dominante.

La resolución espacial de las cámaras de VN está determinada por el tipo de FPA y las lentes ópticas asociadas al sistema.

Resolución espacial

La resolución espacial nos permite conocer la capacidad de una cámara de visión nocturna para ver objetivos a largas distancias en función del tamaño del mismo. La resolución espacial de un sistema completo de visión nocturna dependerá de las características de las lentes utilizadas y relaciona el mínimo tamaño que debe tener un objeto para poder ser visto por el sistema, con la distancia a la que se está observando. La resolución espacial de un sistema de visión nocturna es la respuesta del conjunto del sistema electrónico y la del sistema óptico.

En las especificaciones técnicas comerciales de fabricante de cámaras se tiende a utilizar la resolución de la imagen en lugar de la resolución espacial.

La resolución espacial está directamente relacionada con el IFOV (IFoV- Instantaneous Field of view) o campo de visión instantáneo y se define como la sección angular o área cubierta por un sensor remoto medida en miliradianes de arco observada en un momento determinado y depende del tamaño del detector y la distancia entre las lentes y el detector o distancia focal. (Fig. 2.84)

$$\text{Resolución espacial (miliradianes)} = \text{IFoV} = \frac{\text{Dimensión del detector (micras)}}{\text{Distancia focal (mm)}}$$

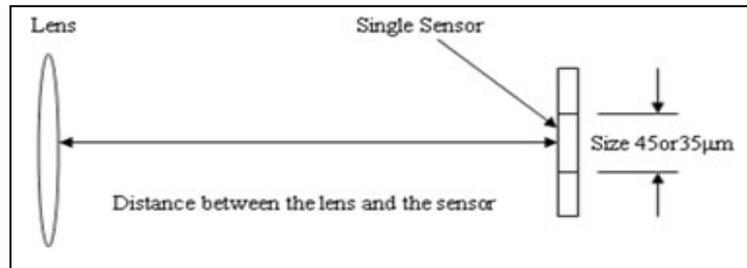


Fig.2.84

La dimensión del detector es el área de la superficie del detector o el tamaño de la matriz si es una FPA. Si se tiene en cuenta el número de detectores de la matriz, el factor de llenado y la sensibilidad del material detector, se podrá obtener un mejor nivel de señal y de esta forma alcanzar una mayor resolución espacial.

La distancia focal de la lente es función de la amplificación óptica que se quiere obtener. Al emplear lentes con distancias focales grandes, obtenemos también grandes distancias de detección, pero también campos de visión más estrechos. Debe de tenerse en cuenta que la escala de la amplitud total del campo de visión es inversa la escala de la distancia focal de las lentes. La distancia focal determina el campo de visión instantáneo (IFoV- Instantaneous Field of view), por lo que a mayores distancias focales tendremos IFoV más pequeños.

Los sistemas que trabajan a largas distancias, como por ejemplo, detectar objetos del tamaño de una persona a distancias de varios kilómetros, requieren de grandes distancias focales. Para cada aplicación debería emplearse un objetivo distinto y esto se consigue fácilmente mediante el uso de un sistema de zoom, con distintas distancias focales que permiten una rápida detección con amplio campo de visión y la posterior identificación con una mayor distancia focal del sistema de zoom.

El concepto de sensibilidad de un sistema de visión nocturna, se entiende como el mínimo valor que puede ser medido fiablemente y que es siempre relativo a una señal no deseada (es el caso del ruido) al que está asociada en proceso de medición. También puede entenderse la sensibilidad del sistema, a la capacidad del equipo para discriminar pequeñas diferencias de temperatura (normalmente en torno a los $0,02^{\circ}\text{C}$).

Una de las distintas formas prácticas de determinar la sensibilidad operativa de un sistema es mediante la NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) que define el punto en que no puede distinguirse entre el ruido y la de temperatura de los objetos observados y que veremos con más detalle en el capítulo siguiente.

Configuración y rendimiento de las cámaras de visión nocturna de IR:

En este capítulo, se estudia de forma más detallada la configuración y las diferentes consideraciones de las cámaras de IR para la visión nocturna, para las distintas aplicaciones que vimos en el primer capítulo.

En función del rendimiento que se quiera obtener, tendrán algunas características que las diferencian. Así pues, las cámaras diseñadas para sistemas de búsqueda (Infrared Search Systems) tienen una configuración distinta de una cámara con propósitos más generales (Thermal-imaging Systems).

Una cámara de visión nocturna para búsqueda y salvamento de naufragos deberá estar diseñada para localizar un objetivo que será pequeño comparado con el entorno de la búsqueda, además estará configurada para operar sobre pequeños puntos de calor y a largas distancias de detección, por lo que el diseño estará dirigido a obtener un máximo de probabilidades correctas de detección y un mínimo de proporción de pérdidas y contactos falsos. Esto, entre otras consideraciones, se puede conseguir intentando obtener un SNR máximo.

En cambio las cámaras térmicas de propósito general operan con objetivos más grandes y a distancias más cortas que los equipos de búsqueda. En este caso se intenta mejorar la resolución espacial, que está directamente relacionada con las diferencias de temperatura y emisividad entre el objetivo y el fondo de la imagen.

Son muchos los elementos a tener en consideración para la selección de una cámara. Entre otros, los más significativos son el detector y banda de trabajo, la óptica asociada a la cámara. Algunas de estas características se han visto en capítulos anteriores y otras se estudian en los capítulos siguientes, teniendo en cuenta que todas ellas están relacionadas y son interdependientes una de las otras.

En cuanto al (FOV) normalmente las condiciones más restrictivas para la detección o el reconocimiento se dan con un ángulo de visión estrecho, pero con FOV estrechos se obtienen los mejores resultados en condiciones operacionales restrictivas, pero en cambio el sistema es más susceptible al movimiento de la plataforma o a las vibraciones.

Consideraciones de la óptica:

Un parámetro común en los sistemas ópticos es el “f”. El “f” describe la habilidad de recolectar la luz por un sensor y normalmente se refiere a la “velocidad”. En términos de recolección de luz a menor “f” quiere decir que es más rápido. Resumiendo es mejor las lentes rápidas pero están limitadas por el tamaño de las lentes, el peso, coste y sofisticación.

Sistemas escaneados y estáticos:

La comparación entre ambos se hace en términos de consideración de sensibilidad y resolución. Los sistemas estáticos mejoran la sensibilidad por su mayor tiempo de integración. En general con los sistemas estáticos obtiene mejor rendimiento que los escaneados en la detección con objetivos tenues. Considerando la resolución y comparando los estáticos y los escaneados para un mismo ángulo sustentado del detector, los sistemas escaneados tienen una mayor resolución.

Características y parámetros de los sistemas de imagen de IR:

En la Pág.120 se detallaron aquellos factores que forman parte del proceso de detección de un sistema de visión de IR, detallándose a continuación cada uno de ellos.

En este apartado una vez conocidos los elementos que forman el sistema y sus características es necesario conocer una serie de mediciones y parámetros para evaluar los proyectos de diseño de una cámara o para caracterizar y medir su rendimiento.

El diseño de un sistema de visión de IR y el análisis de su funcionamiento forman un proceso interactivo en el que las mediciones del rendimiento son un excelente método para conocer la respuesta total del sistema sensor.

Hay que hacer constar que la calidad de la imagen es el criterio fundamental para conocer el rendimiento de una cámara de visión nocturna en general y en especial para cumplir con los criterios requeridos en la seguridad en la navegación marítima.

No obstante existen diferentes pruebas que se utilizan para evaluar la idoneidad de una cámara para una aplicación como es la que se estudia en esta tesis.

En las pruebas y mediciones de las cámaras térmicas, se generan imágenes de posibles objetivos o se emplean modelos estandarizados para la cámara a evaluar y que pueden ser tratados como una proyección del objetivo. Hay básicamente dos tipos de mediciones del sistema en las que se varía el tipo de objetivo o las distancias al mismo. En uno se utilizan distintos modelos de blancos y en otro se utilizan sistemas variables de medida de objetivos basados en proyectores, aunque últimamente también se están utilizando simuladores en computadores.

Este tipo de simuladores tienen la ventaja que también pueden ser utilizados para el entrenamiento.

El adecuado testeado de las cámaras térmicas es importante tanto para los fabricantes como para los usuarios. Las evaluaciones no deben basarse en evaluaciones subjetivas de la calidad de un escenario típico y deben hacerse de acuerdo con las recomendaciones de los estándares internacionales.

La caracterización de las imágenes térmicas está relativamente estandarizado y existe literatura el respecto por las que se puede establecer que las características que describen una cámara termal para visión nocturna pueden dividirse en seis grupos

- ✓ características sobre la calidad subjetiva de la imagen
- ✓ características de la respuesta
- ✓ características del ruido
- ✓ características de la resolución de la imagen
- ✓ características geométricas
- ✓ características espectrales
- ✓ características operacionales

Las características subjetivas nos proporcionan información sobre la habilidad del sistema termal para que un observador pueda detectar, reconocer o identificar diferentes objetivos en diferentes escenarios.

Es considerada la característica más importante para las cámaras de visión nocturna y valorada, desde el punto de vista del observador, la mejor capacidad de la cámara. El parámetro principal que define esta característica es la MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference) y que se detalla más adelante.

Las características de la respuesta del sistema nos dan información sobre como responde la cámara termal ante objetivos de diferentes tamaños y temperaturas.

Hay varias respuestas usadas para esta característica, aunque solo resaltaremos la “responsivity function” que se define como la respuesta del sistema a un objetivo grande de temperatura variable. Esta característica proporciona información sobre la ganancia, linealidad, rango dinámico y nivel de saturación de la cámara.

Las características del ruido nos proporcionan información sobre el nivel y clase de ruido que pueda limitar la capacidad de detección de objetivos con bajo contraste.

El ruido es un fenómeno que puede hacer disminuir significativamente la calidad de la imagen y limitar la habilidad del sistema para detectar objetivos de bajo contraste. Es una de las mediciones más importantes.

El ruido puede dividirse en dos grupos; el temporal y el espacial.

El ruido temporal se refiere a variaciones temporales de la señal generada por los píxeles del detector durante una observación de un objetivo uniforme.

El ruido espacial se refiere a la diferencias entre la señal generada por los distintos píxeles durante la observación de un objetivo uniforme que no cambia ente imagen e imagen. El ruido es un fenómeno de caracterización complejo y dificultoso.

Un parámetro único de aproximación al ruido en la parámetro llamado por algunos fabricantes como “thermal sensitivity”, “thermal resolution” o “temperature resolución” o NEDT (Noise Equivalent Differential Temperature). Este último es el parámetro que mejor proporciona información sobre el ruido del sistema, aunque el problema reside en las diferentes definiciones y técnicas de medición que se usan. Además se complica según se utilice para caracterizar el ruido de una cámara con sistema de escaneado o una cámara estática.

El NEDT puede ser tratado como una medición usual del fenómeno del ruido , pero solo si se conoce con precisión de como fue medido. Más adelante se detallan este parámetro

Las características relacionadas con la resolución de la imagen son aquellas que determinan la habilidad de percibir pequeños detalles en de imágenes en las que se tenga un buen contraste. Está definición produce confusión pues muchos parámetros también utilizan el termino habilidad del sistema, aunque es este caso la habilidad se entiende en términos de resolución.

Está característica está relacionada con:

- ✓ parámetros del FPA (num. de detectores, dimensión del píxel)
- ✓ MTF (Modular Transfer Function)
- ✓ parámetros basados en la respuesta de la imagen
- ✓ parámetros basados en la subjetividad del observador para resolver modelos

Se considera que la curva de valores para diferentes frecuencias espaciales del MTF es un buen criterio, aunque una curva es más complicada de interpretar que un parámetro con un valor numérico.

Características operacionales dan información sobre la posición o aspecto que proporciona el objetivo respecto al observador para un adecuado rendimiento de la cámara y las características espectrales informan sobre la respuesta de la cámara ante las diferentes longitudes de onda en las que puede trabajar una cámara y que se han tratado de otros capítulos.

Estos parámetros, además de determinar el rendimiento global del sistema de imagen para un escenario determinado y unas condiciones particulares, permiten conocer la respuesta de cada una de los elementos que lo componen y así poder describir la fidelidad de la transformación de la visión infrarroja en visual y una rápida evaluación del sistema en otras condiciones ambientales.

Como hemos visto, los parámetros más representativos son:

- ✓ MRTD (Minimum Resoluble Temperature Diference)
- ✓ NEDT (Noise Equivalent Differential Temperature)
- ✓ MTF (Modular Transfer Funtion)

MRTD (Minimum Resoluble Temperature Diference):

La diferencia de temperatura mínima resoluble por el sistema o MRTD puede definirse como la sensibilidad termal obtenida en la observación de la imagen en función de la frecuencia espacial. En la práctica es la diferencia en temperatura de un objetivo formado por cuatro barras negras, en el punto límite en el que sea resoluble por el sistema, para un detector en particular.

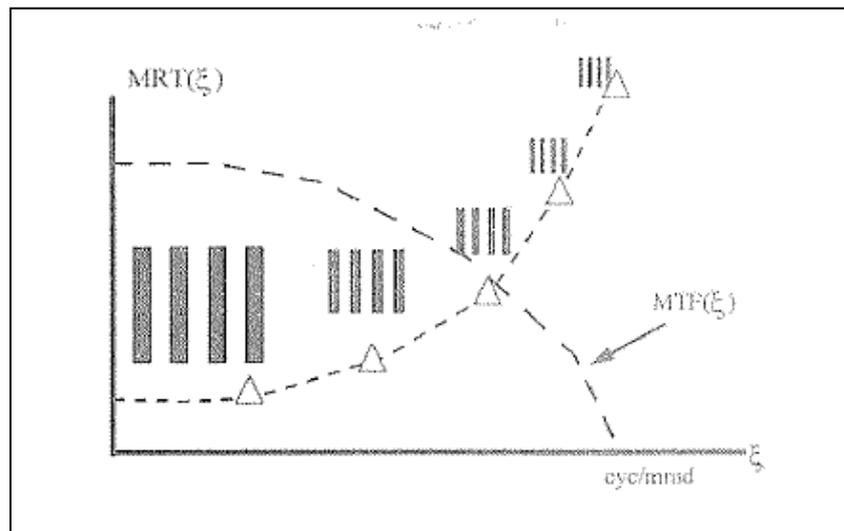


Fig.2.85

MRTD es uno de los parámetros fundamentales de medición y combina la sensibilidad termal y resolución espacial. Es una medida usual de criterio para diseño y como realización de imagen. Cuanto menor será el valor del MRTD mejor es el rendimiento del sistema y su unidad es la conductividad termal mediada en vatios por metro kelvin (W/mK o simplemente mK). En la Fig.2.85 podemos observar una curva representativa de la MRT. Para que una cámara esté adecuadamente caracterizada deberá especificar con exactitud los valores máximos de la función del MRTD para un conjunto de frecuencias espaciales.

La MRTD es una medición subjetiva ya que mide la habilidad de un observador para resolver un modelo de barras en un entorno de ruido. Por tanto también incluye las características particulares del monitor y del observador, pero a la vez hace difícil cuantificar las mediciones por las variables de la observación humana y el número de factores que lo envuelven

Podría pensarse en que sería posible evaluar una cámara de una forma directa y bajo otros criterios, basándose en los resultados obtenidos en un número determinado de observaciones, pero implica el riesgo de la variabilidad de las condiciones atmosféricas y del escenario de la observación.

Uno de las principales características en el rendimiento de los sistemas de IR es la probabilidad de discriminación visual en las tareas de reconocimiento e identificación para unas distancias determinadas por lo que el valor de la MRTD, junto con las condiciones atmosféricas define el alcance de un equipo de IR. y no debe olvidarse que las distancias de detección, reconocimiento e identificación de un objetivo son el principal interés para una cámara de visión nocturna para utilizarla en el incremento de la seguridad en la navegación.

La idea es que los criterios para la detección, reconocimiento e identificación pueden darse en términos de una frecuencia espacial de cuatro barras y existen estudios sobre el tema que demuestran que el nivel de discriminación de un sistema está relacionado en la capacidad de resolución con una carta de barras equivalente al objetivo observado. El desarrollo de la medición de la discriminación está basado en el criterio Johnson y que veremos más adelante.

También es posible calcular las distancias teóricas de detección, reconocimiento e identificación mediante simulación de distintas condiciones, pero como existen diferentes métodos para calcularlo implica cierta imprecisión de los resultados calculados. Una forma segura en el método propuesto en un procedimiento estándar NATO, concretamente el STANAG 4347 (Definition of nominal static range for thermal Imaging systems 1995) y que está basado en la valoración del MRTD de una cámara termal.

NEDT (Noise Equivalent Differential Temperature)

También conocido como NET (Noise Equivalent Temperature). La NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) es una útil expresión para determinar la sensibilidad de un sistema termal y es el valor de la diferencia de temperatura, referida a los 300° K, entre un objetivo grande (un rectángulo o cuadrado de como mínimo 10 veces el ángulo sustentado del detector) y el fondo de la imagen. Esta diferencia en temperatura se hace equivalente a un pico de señal de ruido de un punto particular en la cadena del proceso de la señal y que define el punto en que no puede distinguirse entre el ruido y la de temperatura de dos objetos

NEDT es una medida del valor de la amplitud del ruido en términos de diferencia de temperatura entre el objetivo y el fondo de la imagen. La medida del NEDT calibra la sensibilidad termal de los sistemas de imagen de IR y es un diagnostico muy útil para verificar el máximo rendimiento.

Unas de las ventajas es test relativamente fácil de efectuar. El NEDT está definido en términos de diferencias de temperatura y a menor valor, mejor rendimiento

El valor del NETD depende del área del detector, por lo que en las cámaras con detectores grandes se obtienen mejores resultados, o lo que es lo mismo pequeños valores de NETD.

El inconveniente está en que el valor de NETD como valor de referencia del nivel de realización del sistema es que si queremos una mayor sensibilidad termal de una imagen de IR, se obtiene con detectores grandes y la resolución espacial de la imagen es pobre para detectores grandes. Por tanto, mientras el NETD es un indicador operacional suficiente, no puede ser aplicado como un criterio de diseño, siendo más apropiado para ello el MRTD.

MTF (Modular Transfer Function)

La MTF ya se estudió el capítulo 2.1.1.2 relativo a intensificadores de luz residual y como vimos es una forma más elaborada de conocer la resolución de un sistema.

La MTF total de un sistema es el producto de las MTF de los distintos subsistemas que lo componen. Así el total MTF de un sistema para la visión nocturna de infrarrojos es el producto de MTF del detector, del los sistemas electrónicos de detección, lectura y amplificación, del monitor y finalmente es el resultado de la difracción, el diseño de las lentes y la integración del detector.

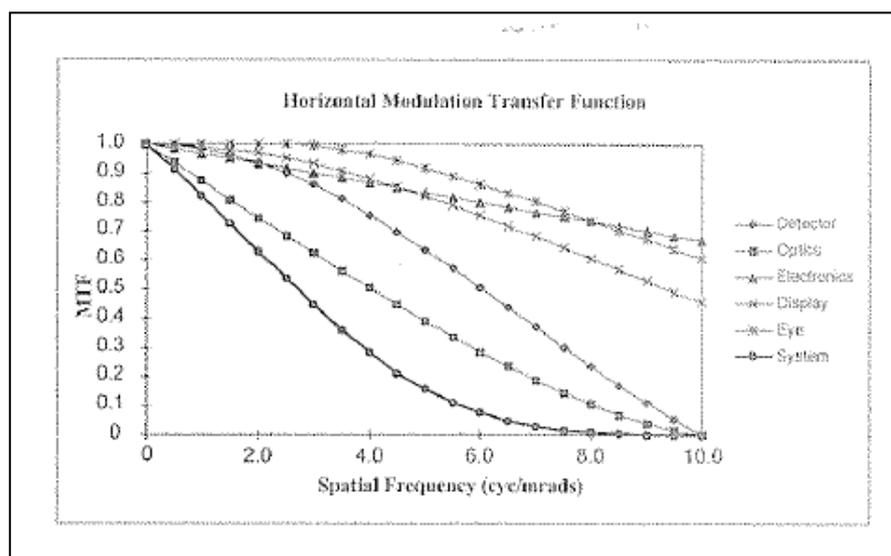


Fig.2.86

Como muestra la Fig. 2.86 el valor de la MTF total del sistema es el producto de multiplicar la MTF de los distintos subsistemas, para esa frecuencia espacial determinada. Comparando la MTF de entre un sistema para LWIR o MWIR se obtiene que un sistema MWIR tiene una respuesta mejor, debido a la dependencia de la longitud de onda en la difracción. Fig. 2.87

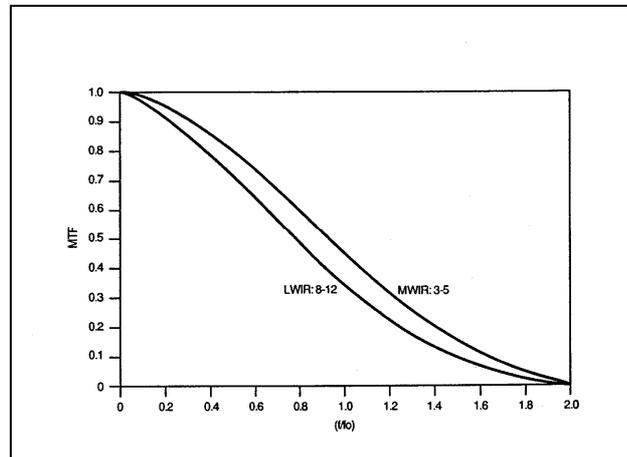


Fig.2.87

Cálculo estimatorio de las distancias de detección, reconocimiento e identificación:

Uno de los requerimientos de los usuarios de cámaras de VN, es conocer a que distancia podemos ver un objetivo con un determinado nivel de detalles. Dentro del amplio significado del verbo “ver” existen muchos criterios para cualificarlo. Para determinar y normalizar el significado de “ver” con un equipo de visión nocturna se emplea en denominado criterio Johnson (Johnson’s criteria).

Durante los años 1957-1958, John Jonson, científico del Laboratorio de visión nocturna de la armada de los EEUU, ahora denominado NVESD (Night Visión & Electronics Sensor Directorate,) desarrollo un método predictivo para la detección, orientación, reconocimiento e identificación de objetivos, trabajando con observadores voluntarios en la utilización de intensificadores de luz residual y midiendo la habilidad de los observadores para identificar modelos de objetivos a escala, bajo diferentes condiciones. Estos experimentos produjeron el primer umbral de datos empíricos porcentuales y que fueron expresados en términos de líneas pares (una línea par equivale a dos píxeles).

Usando el criterio Johnson han sido desarrollados muchos modelos predictivos usados en la tecnología de sensores, al objeto de predecir el funcionamiento de estos sistemas bajo distintas condiciones ambientales y operacionales.

Una vez definido la capacidad para detectar, reconocer e identificar ciertos objetos el planteamiento respondería a la preguntas de ¿ a que distancia podré reconocer con una probabilidad determinada o para una distancia específica de millas a un buque de un tonelaje concreto?

En función de la finalidad para la que ha sido diseñada la cámara, en unos casos será necesaria la detección de personas, sin importar la distancia de detección como por ejemplo una cámara de vigilancia y en otros casos lo que interesara la detección de un barco a distancias considerables.

En ambos caso, el parámetro clave es la “resolución espacial”, pero considerando el contraste termal el tamaño del objetivo, la transmisión atmosférica, el ruido relacionado con el proceso de foto detección y también el propio ruido producido por el sistema. Para todas estas especificaciones operacionales para un determinado objetivo se pueden tomar el valor de MRTD.

De acuerdo con este criterio (Johnson’s criteria) la resolución mínima para la detección, orientación, reconocimiento e identificación , con una probabilidad de discriminación de un observador del 50% para cada uno de los niveles especificados es :

Detección: El objetivo debe abarcar ente 1.5 y 3 píxeles

Orientación: Simétrica, asimétrica, horizontal o vertical de 2.4 a 3.6 píxeles

Reconocimiento: Cuando el tipo de objetivo puede discernirse, por ejemplo una persona de un coche de 7.6 a 9.6 píxeles

Identificación: Un objeto reconocido puede discernirse. Por ejemplo un hombre de una mujer o un modelo determinado de coche de 10 a 16 píxeles

Por otro lado, cada objetivo tiene una “dimensión crítica” de acuerdo con un análisis estadístico de observadores y datos de imágenes termales. Por ejemplo un hombre de 1.8 metros de alto y 0.5 metros de ancho, tendría una dimensión crítica de 0.75 m.

Como vimos en la pagina 148 , la resolución espacial está directamente relacionada con el IFOV y mediante él ,se puede determinar la distancia a la que un objetivo de una “dimensión crítica” y el ángulo sustendido determinado podrá ser detectado, reconocido o identificado en función del número de píxeles requerido para cada caso.

Así pues, considerando un hombre a una distancia de un kilómetro, el ángulo sustendido es la dimensión crítica dividida por la distancia (0.75m/1000m) que en este caso es de 750 microradianes de ángulo. Para una adecuada identificación de un hombre a esta distancia, necesitamos que el sistema proporcione 12 píxeles para un ángulo de 750 microradianes. Una lente de distancia focal de 500mm combinada con un sensor de cámara de 15 micras (píxeles) proporciona un IFOV de 30 microradianes.

El número de píxeles en el objeto observado es igual al ángulo sustentado del objetivo dividido por el ángulo del IFOV. Por tanto tendremos 750 microradianes dividido por 30 microradianes por píxel, o aproximadamente 25 píxeles en el objetivo excediendo el 12 píxeles requerido para la identificación

A mayor distancia focal de la lente, se transforma en el menor IFOV, que se traduce en más píxeles a través de un objetivo a una distancia fija. Al ser más pequeño el IFOV, se obtiene una mejor resolución de la imagen que estoy observando y cuanto más baja sea la resolución espacial a más distancia se podrá utilizar la cámara.

El menor IFOV o ángulo más pequeño que puede ser resuelto por el sistema, es el campo de visión angular de un único píxel suponiendo que se tenga el suficiente contraste termal.

Recientemente en trabajos en el NVDS están creciendo el uso de TTP (Targeting Task Performance) medida que ha estado demostrando más efectiva para representación de la realización de los sensores, reemplazando el criterio Johson.

En los capítulos anteriores hemos conocido aquellos factores que pueden determinar el rendimiento de una cámara de VN, de forma que se obtenga la mejor imagen y también hemos visto los parámetros que determinan la capacidad de trabajo de una cámara, tanto en su fase de diseño como en la utilización.

El nivel para medir la capacidad de realización del sistema se describe en términos de sensibilidad y resolución del detector. Por otro lado tenemos que el NETD describe la sensibilidad general del sistema y la MTF la resolución. La resolución del sistema y la sensibilidad son dependientes una de la otra. El parámetro que relaciona ambas es la MRTD y es la principal medida para conocer el rendimiento del sistema. Añadiendo los factores relativos al objetivo y la transmisión atmosférica es cuando también podemos obtener la probabilidad de detección.

Este trabajo es realmente un análisis operacional más que de diseño del sistema y es se obtiene mediante análisis específicos, extrapolaciones o combinaciones de ellos. Mediante el MRTD del sistema y valores relativos a la diferencia de temperatura del objetivo y de la transmisión atmosférica utilizando formulación permiten determinar el alcance de reconocimiento para un sistema dado.

F) Factores relativos al observador

El operador puede ser considerado también como un elemento del sistema. No todo el mundo responde igual bajo las mismas circunstancias. Incluso la misma persona puede tener respuestas diferentes en situaciones diferentes.

El factor humano introduce un elemento estadístico variable en el problema de la detección y la identificación.

Los factores que deberán tenerse en cuenta son el entrenamiento, motivación, experiencia, cansancio, agudeza visual, edad.

Es de resaltar la importancia que significa el entrenamiento en la utilización de estos sistemas

2.1.2.3. Cámaras Térmicas

Introducción

Aunque la termografía por radiación IR como herramienta para usos no militares comenzó a utilizarse en la década de los 60, el desarrollo de esta tecnología empezó a mediados de los años 80 por científicos en el Honeyweell Research Center bajo contrato clasificado y con finalidad militar para la fabricación de un nuevo tipo de sensores de IR.

Como se ha visto hasta ahora, todos los objetos emiten, en función directamente proporcional a de su temperatura una radiación infrarroja. Esta radiación es generada por la vibración y rotación propia de los átomos y moléculas que componen el material y a mayor temperatura, mayor radiación de energía. La cantidad de radiación y la longitud de onda dependen de la temperatura y la composición del objeto.

La confusión que surge a menudo es que la “radiación infrarroja” es confundida con una “radiación de calor”. Un “detector termal” responde térmicamente a la radiación infrarroja procedente de un cuerpo u objeto que emite esta radiación en función de su temperatura. (Fig.2.88)

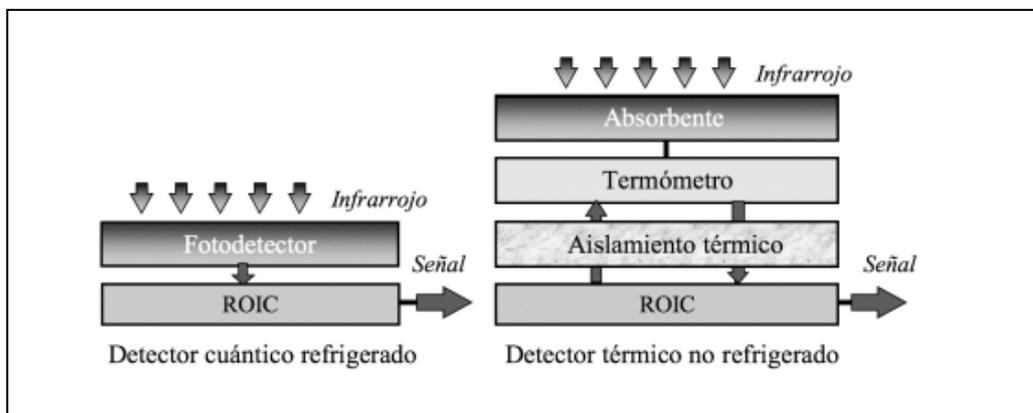


Fig. 2.88

Este proceso de detección termal tiene dos etapas;

- ▶ El detector térmico absorbe la radiación, lo que produce un cambio de temperatura del detector
- ▶ Este cambio de temperatura produce un cambio en los parámetros del elemento detector y que podemos medir. La medición del cambio de los parámetros se mide con instrumentos asociados al detector

Este proceso es largo por lo que los detectores térmicos tienen un tiempo de respuesta más alto que los detectores fotónicos.

Los detectores térmicos, tienen dos elementos o partes fundamentales y son; (Fig.2.88 y 2.89)

- sensor termómetro y transductor termal
- circuito de señal de salida (ROIC)

El sensor es el elemento sensible del detector que absorbe la radiación óptica y su rendimiento dependerá de sus propiedades de absorción. Esta absorción produce un cambio de temperatura, actuando como un termómetro y acto seguido, el transductor termal convierte estos cambios de temperatura en señales eléctricas y alimenta a instrumentos de lectura, registro y control de las magnitudes medidas. Finalmente el circuito de lectura envía la señal de un monito, transformando las diferencias de temperatura del objetivo en imágenes.

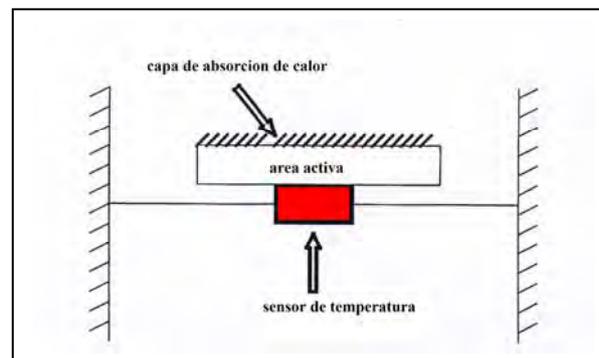


Fig. 2.89

La señal obtenida no depende de la naturaleza de los fotones y es generalmente independiente de la longitud de onda. La señal depende del nivel de radiación y no del contenido espectral.

Algunos de los detectores termales utilizados y los parámetros afectados por el aumento de temperatura son;

- termistor o bolómetros ► cambios en su resistencia del material
- piroeléctricos ► cambios en la polarización del material
- termopares ► cambios en su voltaje

La detección termal está basada en un fenómeno que se produce en la superficie externa del material sensor, lugar donde se determina la absorción. La respuesta espectral es función de la dependencia espectral de la superficie exterior del material detector o superficie de absorción, que determina la radiación será o no absorbida.

La absorción es igual que la emisividad y son función de la longitud de onda. A mayor emisividad de su superficie exterior, mayor eficacia termal del detector. En cambio los detectores fotónicos la radiación es captada y absorbida, produciendo cambios dentro del interior del material semiconductor.

Dado que las propiedades de la superficie, como es la emisividad, no cambian rápidamente con la longitud de onda, los detectores termales tienen típicamente una respuesta espectral muy ancha y responden desde la zona visible hasta la zona lejana del infrarrojo.

Los materiales más adecuados para este tipo de detectores serán aquellos que produzcan un mayor cambio de temperatura para una cantidad dada de energía radiante incidente determinada. Por tanto para ser un buen detector termal, la absorción debe ser máxima.

Valores como la “masa termal” y la “conductancia termal” están relacionados con los detectores termales y son los que determinan el tiempo de respuesta del detector. Los mejores detectores térmicos son aquellos que tienen una “masa termal” pequeña y que pueda producir amplios cambios de temperatura para una cantidad de poder radiante incidente.

Las limitaciones prácticas están determinadas por el tamaño de los chips. El detector de un chip pequeño produce grandes cambios de temperatura pero con un tiempo de respuesta largo. No obstante la detectividad es suficiente para conseguir valores de NETD inferiores a 0.1°C , gracias al elevado tiempo de integración disponible.

Comparando los detectores fotónicos y los térmicos, estos últimos responden más lentamente que los fotónicos, pero también tienen una respuesta de longitud de onda mucho más ancha en el espectro electromagnético.

Una ventaja importante de los detectores térmicos es que no necesitan enfriamiento criogénico ya que la radiación puede ser detectada sin que el mismo detector sea enfriado a una temperatura por debajo de la temperatura ambiente, como es el caso de los detectores fotónicos, por lo que resultan más baratos de fabricar, además de aumentar la autonomía y reducir peso.

En la tabla siguiente, se pueden comparar ambos tipos de detectores. (Tabla 2.14)

Propiedades	Detectores térmicos	Detectores fotónicos
Velocidad de respuesta	Baja	Altas
Respuesta espectral	Amplia	Limitada
Tempera de trabajo	Ambiente	Con refrigeración
Costo de fabricación	Bajo	Más alto

Tabla 2.14

Termistor, bolómetros y microbolómetros.

Un termistor es la denominación que recibe un detector termal. El bolómetro es un detector termal en los que la resistencia varía con la temperatura. Un detector bolometrico en lugar de contador de fotones, se calienta como resultado de la exposición a la energía de IR, lo que le produce un cambio de su resistencia eléctrica proporcional al cambio de temperatura.

Los bolómetros en función del material del sensor pueden clasificarse en metálicos, semiconductor y superconductor.

Todos ellos tienen un alto coeficiente de resistencia a la temperatura (TRC – Temperatura coefficient or resistance), de forma de que una pequeña cantidad de radiación absorbida producirá un cambio en la resistencia grande.

Con los bolómetros tradicionales el elemento resistivo no solo es usado para detectar la radiación, si no que su superficie también es usada para la absorción. El problema con está configuración es que para recolectar una mayor absorción el elemento sensible necesita tener una gran sección transversal lo que se traduce en un detector con una gran masa termal que hace que el detector sea más lento.

Los bolómetros de metal son usados en la zona de las microondas y los semiconductores y superconductores se utilizan como detectores ópticos

Dentro de los bolómetros los semiconductores son los más comunes y a su vez se pueden dividir clasificar en :

- termistor- bolómetro
- bolómetro Ge criogénico
- compariter bolómetro

Para un termistor-bolómetro, que trabaje a temperatura ambiente, la respuesta espectral es esencialmente plana, desde la zona visible del espectro hasta los 40 μ m. Por ejemplo, usando THALIUM-BROMIODIDE (KRS-5), se obtiene una respuesta más allá de 38 μ m

El bolómetro- criogénico es un bolómetro mejorado. Mediante el enfriamiento criogénico del bolómetro y su entorno a muy baja temperatura se puede obtener el máximo de sensibilidad del detector

El área activa de la observación es a menudo incrementada con el uso de lentes hemisféricas o hiper hemisféricas para asegurar que en el detector un incremento en la detección. Estas lentes son fabricadas con un material con un índice de refracción alto como puede ser el sílice o el germanio y se mejora su rendimiento imprimiéndoles una capa antirreflectante.

Los avances en la micromáquinas de sílice han conducido al surgimiento del campo de los microbolómetros. El microbolómetro consiste en una matriz de bolómetros fabricados directamente sobre una base de sílice de un circuito lectura de salida.

Esta tecnología ha demostrado una excelente capacidad de imagen en el IR. Los detectores de los microbolómetros usan la tecnología de los dispositivos de FPA para cámaras de IR.

El beneficio más prometedor de un detector del microbolómetro es su habilidad de operar a la temperatura ambiente, eliminándose el refrigerado criogénico, lo que produce una disminución de los costos e incrementando la rentabilidad.

Los microbolómetros, instalados en cámaras de visión operarán en la región de longitud de onda larga, haciendo útil su aplicación al aire libre y en aplicaciones a baja temperatura

Los detectores de microbolómetro son menos sensibles y producen imágenes de menor calidad, comparándolo con los sistemas fotónicos refrigerados, sin embargo, esta tecnología permite un coste de fabricación más bajo lo que se traduce en una disminución del precio de cámaras, y la consecuente comercialización en el mercado no militar.

Detectores piroeléctricos

Los detectores piroeléctricos son los detectores termales más comunes, y son los más sensibles trabajando en temperatura ambiente además de ser más baratos. Como todos los detectores térmicos su respuesta espectral es muy ancha y de aquí su interés para las aplicaciones en el IR.

Los detectores piroeléctricos fueron desarrollados en respuesta a la necesidad de detectores no refrigerados de radiación termal. Estos detectores mejoran el rendimiento del termistor-bolómetro a temperatura ambiente.

Los detectores piroeléctricos están contruidos de un solo cristal monolítico de un material ferroeléctrico. Su funcionamiento se basa en la propiedad de algunos materiales ferroeléctricos en los que sometidos a cambios de temperatura causan un cambio espontáneo de su polarización. La fluctuación en la exposición de la radiación procedente de la escena genera la correspondiente fluctuación en la polarización y por tanto una corriente alterna que puede ser monitorizada con una amplificación externa.

Está tecnología sirve para la fabricación de matrices lineales y de 2D que utiliza la propiedad piroeléctricos de los materiales cerámicos ferroeléctricos en la que se produce una integración directa de una fina película de un material ferroeléctrico sobre una adecuada micro estructura termal de un ROIC de sílice.

Los detectores piroeléctricos tienen las ventajas de un amplio espectro y alcance dinámico. Tiene una muy buena respuesta a las diferentes frecuencias típicas del detector termal.

LITHIUM TANTALITE es probablemente el material detector más común. También el TIGLYCERINE SULFATE, es el cristal más sensible con respuesta de los 1.0 a 30.0 μm y el (BST) Barium Strontium Titanite (Titanato de Bario Estroncio

Una desventaja inherente a estos detectores para los sistemas de visión nocturna es la baja sensibilidad por lo que ofrecen una imagen de poca calidad debido a la alta difusión termal.

En la tabla 2.15 se muestran los principales materiales que se utilizan en los detectores térmicos

Detectores Termicos	
Bolométricos	Poli -SiGe Poli_Si Si Amorfo Thalium-bromiodide (krs-5) Vanadium Oxide
Piroeléctricos/ Ferroeléctricos	Lithium Tantalite (LiTa) Lead Zirconium Titanite (PbZT) Barium Strontium Titanite (BST) Tiglycerine Sulfate

Tabla 2.15

Termopares.

Están formados por la unión de dos metales que crean un voltaje en su unión. Este voltaje es proporcional a la temperatura de la unión. Cuando la escena se enfoca en el termo acoplado, se produce una variación de la temperatura en función de la variación del flujo de IR. El cambio de flujo IR emitido por la escena observada puede detectado y monitorizado el voltaje generado por el termo acoplado.

Existen otros detectores térmicos, como la Celulas Golay y los detectores superconductores o detectores foto electromagnéticos, pero de los que no se entra en detalle ya que no son utilizados para la visión nocturna

Actualmente, se comercializan sistemas de visión con cámaras térmicas de prestaciones simples específicamente diseñadas para su aplicación en el ámbito marítimo y que destacan por su bajo coste. Entre las marcas comerciales que últimamente comercializan este tipo de cámaras, se encuentran las cámaras térmicas FLIR, que dispone de una amplia configuración. Fig.2.90



Fig.2.90

En este caso, el modelo de cámara puede ser estático u orientable en demora e inclinación. No está giroestabilizada, lo que supone un problema cuando se navega con un poco de mar, por lo que la

aplicación de esta cámara está pensada para navegación en aguas interiores o en zonas abrigadas. El rango de distancias de trabajo que según datos aportados por el fabricante son:

Para una persona fuera del agua (1.8X0.5 m)

- ✓ Detección: 310 m
- ✓ Reconocimiento: 80 m
- ✓ Identificación: 40 m

Para un objeto (2.3X2.3 m)

- ✓ Detección: 800 m
- ✓ Reconocimiento: 230 m
- ✓ Identificación: 110 m

Navigator™ Technical specifications	
IMAGING PERFORMANCE	
Detector type	Focal Plane Array (FPA), uncooled microbolometer
Spectral range	320 x 240 pixels
Field of view	7.5 to 13µm
Spatial resolution (IFOV)	36° (H) x 27° (V) with 19 mm lens
Thermal sensitivity	2 mrad
Image frequency*	100 mK at 25°C
Focus	7.5Hz (NTSC) or 8.3 Hz (PAL)*
Electronic zoom	Fixed
Image processing	2X Electronic Zoom (Pan/Tilt version only) Digital Detail Enhancement (DDE)
PAN - TILT (pan/tilt version only)	
Az Range	+/- 180°
El Range	+/- 45°
IMAGE PRESENTATION	
Video output	NTSC or PAL composite video
Connector types	BNC (1) provides video output BNC to RCA adapter included
POWER	
Requirements	1.2 V DC +30% / -10%
Consumption	Static: 3 W nominal, 30 W peak. Pan/Tilt: 5 W nominal, 45 W peak.
ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS	
Operating temperature range	-25°C to +55°C
Storage temperature range	-50°C to +80°C
Automatic Window defrost	Yes
Humidity	100% relative humidity salt spray
Sand/dust, icing	Mil-Std-810E
Encapsulation	IP66
Shock	IEC 60068-2-27 and Mil-Std-810
Vibration	Mil-Std-810E
PHYSICAL CHARACTERISTICS	
Static:	
Camera Weight	3.0 kg
Camera Size	18.8 cm tall x 10.2 cm wide x 18.5 cm deep
Shipping weight (camera + packaging)	5.0 kg
Shipping size (camera + packaging) (L x W x H)	36 cm x 41 cm x 21 cm
Parv/Tilt:	
Camera Weight	5.0 kg
Camera Size	24.1 cm tall x 10.2 cm wide x 18.5 cm deep
Shipping weight (camera + packaging)	6.4 kg
Shipping size (camera + packaging) (L x W x H)	36 cm x 41 cm x 21 cm
Standard Package	Thermal imager (Static or Parv/Tilt) with 7.6 m of cable and power switch - Remote control panel with integrated joystick (Parv/Tilt version only) - Operator manual

Fig.2.91

En la Fig.2.91 se muestran las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante.

Estos datos dependerán en función de las condiciones atmosféricas, la configuración de la cámara, la experiencia del operador y la calidad del monitor utilizado. Los alcances reseñados está calculados teniendo en cuenta que una probabilidad de conseguir el objetivo del 50%, para la distancia especificada, una diferencia térmica del objeto de 2°C y un factor de atenuación atmosférica de 0.85 Km.

El bajo coste de estos sistemas ha permitido su incipiente implantación en la náutica deportiva en la que el precio de un sistema de visión nocturna, es mínimo comparado con el coste del barco o con los riesgos a los que puede verse envuelto. También debe destacarse la facilidad de instalación.



Fig.2.92

Otro modelo con mayores prestaciones y de aplicación a buques de navegación de altura es la cámara de la Fig. 2.92 y 2.93 que dispone de plataforma giroestabilizada, 2 cámaras térmicas con diferentes ópticas fijas y una cámara de visión diurna.



Fig.2.93

Voyager™ Technical specifications

IMAGING PERFORMANCE

Thermal:

Detector type	Focal Plane Array (FPA), uncooled microbolometer 320 x 240 pixels
Spectral range	7.5 to 13µm
Number of fields of view	Two thermal imaging cameras with foveally merged video
Field of view camera 1	20° (H) x 15° (V) with 35 mm lens (NTSC) - 20° (H) x 16° (V) with 35 mm lens (PAL)
Field of view camera 2	5° (H) x 3.75° (V) with 140 mm lens (NTSC) - 5° (H) x 4.0° (V) with 140 mm lens (PAL)
Spatial resolution (IFOV)	1.1 mrad for 35 mm lens - 0.27mrad for 140 mm lens
Thermal sensitivity	65mK max
Image frequency*	7.5Hz (NTSC) or 8.3 Hz (PAL)*
Focus	Automatic or Manual
Electronic zoom	Foveal presentation 20° to 2° FOV
Image processing	Digital Detail Enhancement (DDE)

Visual:

Built-in digital video	Sony FCB EX-980S High Telephoto Zoom Color Block Camera (NTSC) Sony FCB EX-980SP High Telephoto Zoom Color Block Camera (PAL)
Effective pixels	Approx. 680,000 pixels (NTSC) - approx. 800,000 pixels (PAL)
Standard lens performance	f=3.5mm (wide) to 91.0 mm (tele), F1.6 to F3.8

PAN - TILT

Az Range	Continuous 360° panning, speed tied to zoom
El Range	+/-60°

STABILIZATION

Type	Gyroscopically stabilized
------	---------------------------

IMAGE PRESENTATION

Video output	NTSC thermal and visible or PAL thermal and visible
Connector types	Corrosion resistant BNC - BNC to RCA adapter included

POWER

Requirements	24 V DC
Consumption	<50 W nominal; 130 W peak; 270 W peak with heaters

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Operating temperature range	-32°C to +55°C
Storage temperature range	-50°C to +85°C
Automatic Window defrost	Yes
Humidity	100% relative humidity salt spray
Sand/dust, icing	Mil-Std-810E
Encapsulation	IP 66
Shock	Mil-Std-810E
Vibration	Mil-Std-810E

PHYSICAL CHARACTERISTICS

Camera Weight	20.4 kg
Camera Size	38.1 cm diameter x 58.4 cm height - swept volume
Shipping weight (camera + packaging) (L x W x H)	32 kg
Shipping size (camera + packaging) (L x W x H)	85 cm x 59 cm x 41 cm

Standard Package

Stabilized pan/tilt head with integrated thermal imagers and DLTV camera,
30 m cable, breakout box and mating connectors - Voyager Joystick Control
Unit custom developed for maritime environments and Voyager functions
Operator manual

Fig.2.94

En la Fig.2.94 se muestran las especificaciones técnicas de la cámara Voyager.

Estudio de campo:

Conocido el funcionamiento básico de las cámaras térmicas, se procedió a conocer el resultado en un trabajo de campo. Para ello se dispuso de una cámara termográfica binocular portátil modelo “RUBY” de la marca Panatec, proporcionada por los representantes de esta marca en España. Según el fabricante, esta cámara tiene distintas aplicaciones dentro de la visión nocturna en el ámbito marítimo como son la vigilancia costera y la búsqueda y rescate. Fig.2.95

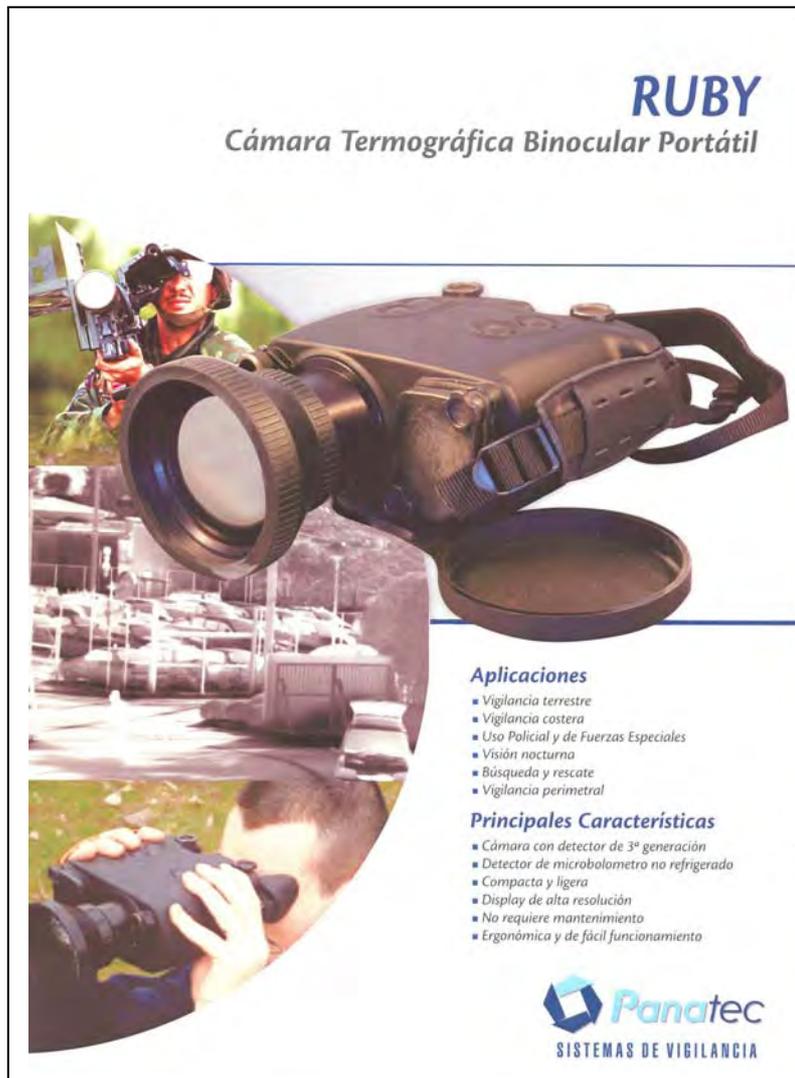


Fig.2.95

La cámara tiene un detector microbolométrico de silicio amorfo no refrigerado en un FPA de 380(H)X288(V) detectores. El rango espectral de trabajo es de 8-14 μ m y tiene una sensibilidad térmica de 0.065° C , con una lente de 25 mm.

Puede disponer de una serie de lentes entre los 25 y 100 mm y que pueden proporcionar una amplificación de hasta 3,5 aumentos, pudiendo alcanzar con el uso de un zoom los 7 aumentos. Con la lente de 100 mm se tiene una amplitud de campo visual de 7,7° X 5,8°. Fig.2.96. Funciona con baterías recargables de iones de litio o baterías AA estándar de Ni-Mh. Fig.2.96



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Prestaciones Técnicas

Tipo de detector	FPA 384(H) x 288 (V) microbolómetro de Si Amorfo no refrigerado
Tipo de refrigeración	No refrigerado con estabilización de temperatura
Rango espectral	8- 14 μ m
Sesibilidad Térmica	Menor de 65 mK (0,065 °C con la lente de 25 mm)

Display

Visor	Binocular desmontable y separable de la cámara
Aumentos	x 3,5 con lente de 100mm (x 7 usando zoom)
Salida de vídeo	CCIR (50 Hz) o RS170 (60Hz)
Procesamiento de la imagen	Auto-Manual ajuste del brillo, inversión de paleta de colores, retícula y zoom digital

Alimentación

Baterías	Pack recargable de Li-Ion o AA Standard Ni-Mh
Alimentación externa	7-14 V DC input
Tiempo de carga	5h con pack de Li-Ion
Ahorro de Energía	Modo Standby; bajo consumo

Características físicas

Distancia entre oculares	58 mm-72mm
Especificaciones medioambientales	IP 68, MIL-STD 810, STANAG 2895
Conexión trípode	3/8" ; 1/4"
Temperatura de trabajo	-32° C a +55° C
Peso	1,6kg con lente de 25mm y una batería
Dimensiones	255mm x 165mm x 80mm

Lentes	Campo de Visión
25mm	30,1° x 22,8°
60mm	12,8° x 9,7°
80mm	9,6° x 7,2°
100mm	7,7° x 5,8°

* Consultar disponibilidad de otras lentes.

Fig.2.96

En la imagen de la Fig.2.97 el fabricante proporciona datos sobre la capacidad de detección y reconocimientos de un hombre y un vehiculo y que sirvan de referencia para conocer la capacidad de la cámara. Estos cálculos se basan en el STANAG 4347. El STANAG es un sistema de estandarización militar de la OTAN. Concretamente el 4347 define el rendimiento de un sistema de imagen termal en relación con el alcance nominal estático.

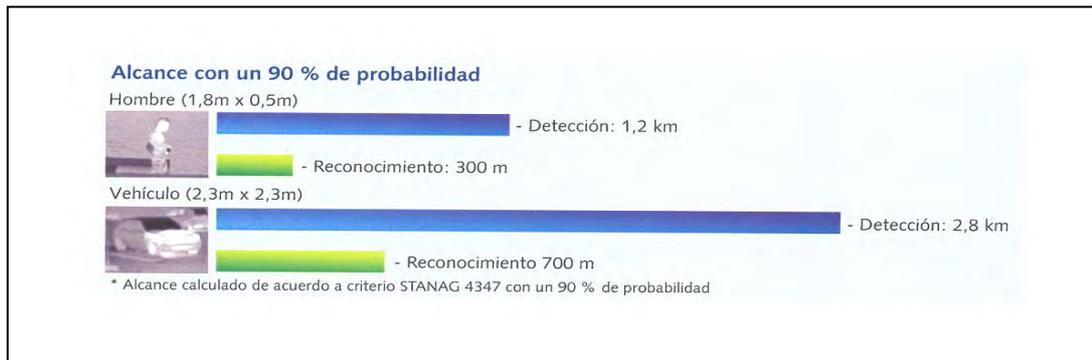


Fig.2.97

Para trabajar de una forma cómoda se montó sobre un trípode ya que resultaba algo pesado mantenerlo con los brazos. Así mismo se obtuvo una la señal de video mediante el sistema que incorpora la cámara y de las que se extraen las imágenes que forman parte de este capítulo.

Se hicieron tres series de observaciones,

- ✓ media distancia para objetivos a partir de 2 millas
- ✓ observaciones a distancias inferiores a las 2 millas
- ✓ detección de un cuerpo en el agua y sistemas de balizamiento.

En todas las imágenes se ha seleccionado la polaridad en la que las zonas oscuras se presentan más oscuras que las zonas frías.

En la observación a media distancia del buque Murillo se encontraba a una distancia de 2,5 millas accediendo por el canal de acceso a la bocana N. (Fig.2.98). Por la disposición de las chimeneas y la silueta se identificó al buque sin dificultad. Como puede observarse por la imagen se puede ver claramente es estado de la mar y las condiciones atmosféricas eran buenas.

En esta segunda imagen se encuentra casi llegando a la bocana norte y está a una distancia del observador de 1,9 millas. (Fig.2.99) En la imagen se observa el horizonte más oscuro que en la anterior, y que probablemente es debido a la falta de corrección por no uniformidad, aspecto que ocurrió con relativa frecuencia en las observaciones.



Fig.2.98



Fig.2.99

Para el rango a distancias cortas se observan las imágenes siguientes y que corresponden al mismo buque accediendo a la bocana norte, pero en este caso la posición del observador varía en cuanto a demora y distancia.

En la Fig.2.100 se observa al mismo buque Murillo, por su costado de Br. Utilizando el zoom obtenemos la imagen de la Fig.2.101 en la que se observa una mayor amplificación pero también una degradación de la imagen debido a la menor resolución espacial.

En ambas imágenes se puede reconocer e identificar perfectamente al buque, así como sus características y condiciones de navegación



Fig. 2.100

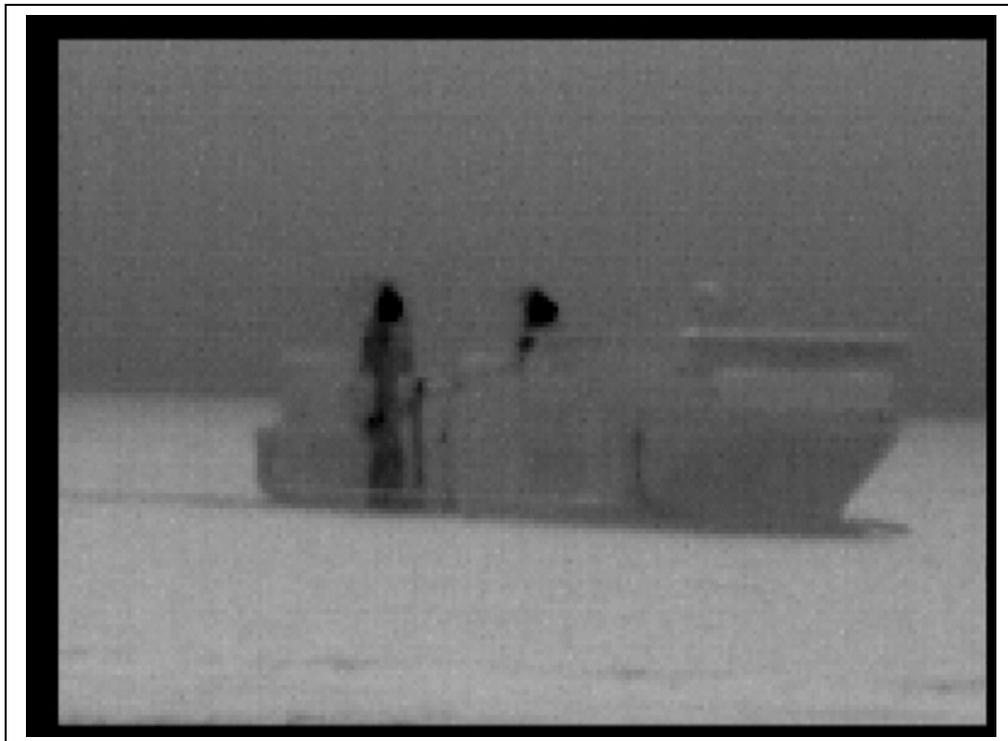


Fig. 2.101

En la relación de imágenes que siguen a continuación podemos observar la evolución del mismo barco a una distancia de 1.5 millas así como verificar la capacidad de este sistema para reconocer e identificar el buque con distintos aspectos y apreciar los cambios de rumbos efectuados. Fig.2.102 y 2.103.

En la primera imagen de la Fig.2.102 se aprecia en la imagen una serie de puntos negros en primer plano en la parte baja. Estos puntos corresponden a un grupo de gaviotas posadas en el agua y pone de manifiesto la capacidad de detección de seres en el agua.



Fig.2.102



Fig.2.103



Fig.2.104

A distancias más cortas (Fig.2.104) puede captarse muchos más detalles de las imágenes, incluido la presencia de personas en cubierta como puede apreciarse en la imagen de la Fig.2.105



Fig.2.105

En la imagen de la Fig.2.106 corresponde a otro ferry de características similares al anterior aunque puede apreciarse claramente las diferencias entre ambos.

A corta distancia se aprecia bien las diferencias de temperatura que permite apreciar de forma clara las características del buque y así pues puede distinguir la embarcación del practico al costado del buque y el acceso al garaje del practico.

Obsérvese la claridad con la que se distingue la marca lateral del acceso de entrada a puerto



Fig.2.106

En la Fig.2.102, se podía distinguir la presencia de gaviotas posadas en el agua, pero en el afán de conocer algo más sobre la posibilidad de detección de una persona en el agua se pudo observar la evoluciones de un interprete inesperado , pero no por ello menos gráfico.

En las imágenes siguientes podemos conocer la capacidad de este detector para localizar una persona en el agua, aunque en este caso el escenario es la rompiente de una playa y el objetivo es un perro de tamaño pequeño.

Como puede observarse en la imagen de la Fig.2.107, al objeto de mejorar la detección del objetivo se ha cambiado la polaridad de las imágenes, mostrándose los puntos de calor blanco y las zonas frías en oscuro. En la parte baja central de la imagen aparece un punto negro intenso que no corresponde a la imagen, pues se trata de un una pequeña rotura de la lente de la cámara.

La distancia entre el objetivo y el observador es de 700 metros y en el centró de la imagen puede apreciarse un punto esférico blanco que corresponde a la cabeza del perro dentro del agua, nadando hacia la orilla.

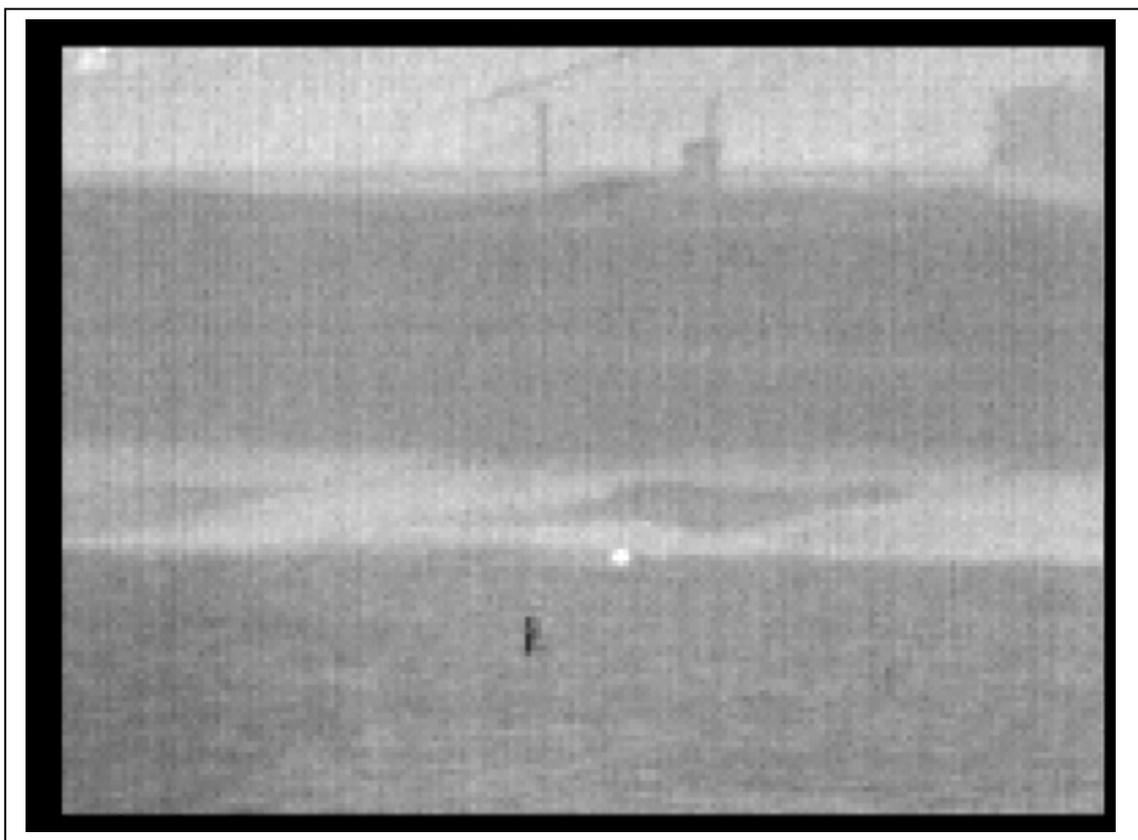


Fig.2.107

En la imagen de la Fig. 2.108 se aumenta la potencia de amplificación mediante el zoom y se puede observar al perro acercándose a la orilla de la playa para salir del agua.

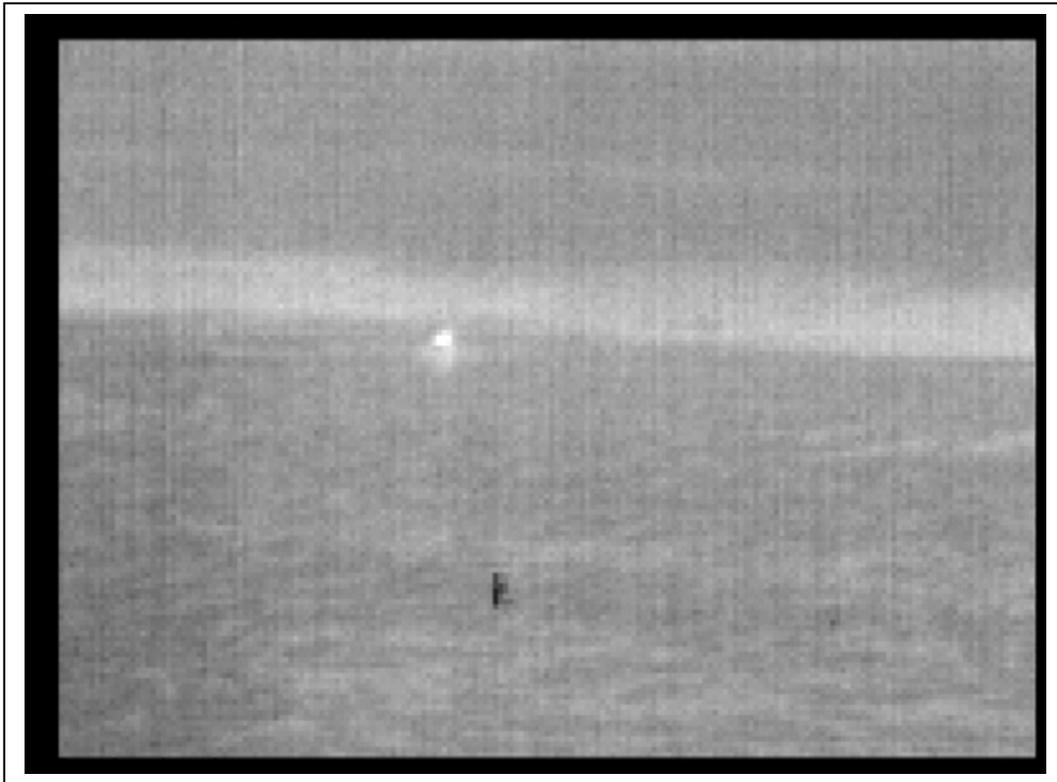


Fig. 2.108

En las imágenes siguientes, observamos al perro saliendo del agua para acercarse a una persona, donde se puede observar claramente la diferencia de tamaño.

También se aprecia perfectamente la pérdida de calor del cuerpo del animal en comparación de la cabeza, más caliente al haberse mantenido fuera del agua. Este fenómeno de contraste térmico entre el agua fría y al calor del animal es un factor que como veremos más adelante beneficia en la tarea de detección de naufragos

También es perceptible la capacidad de discriminación térmica que permite diferenciar la rompiente de la ola del resto de la superficie del mar, como de aprecia en las imágenes siguientes.
Fig.2.109

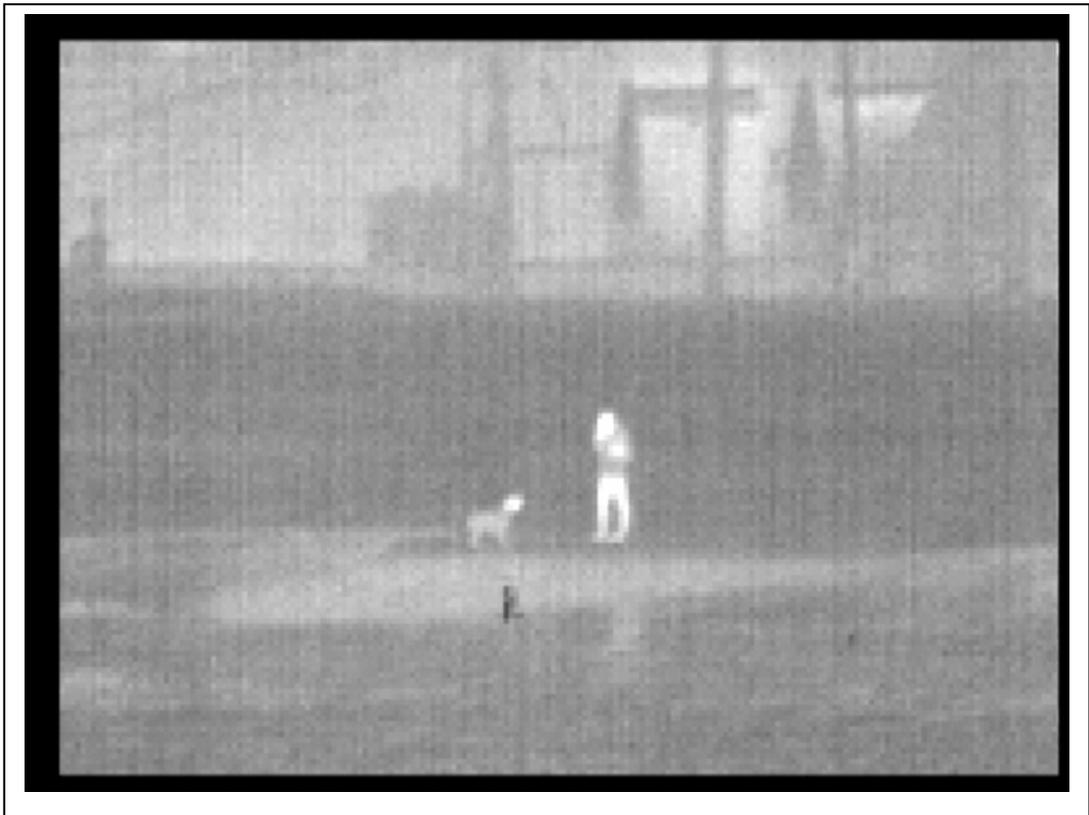


Fig.2.109

2.1.2.4. Comparación y selección del sistema

En los tres capítulos anteriores se ha echado un vistazo a distintos sistemas de visión nocturna que actualmente se comercializan para utilización en el ámbito marítimo.

Pensando en una aplicación amplia que abarque la navegación marítima de buques mercantes sin limitaciones de tonelaje en navegación oceánica, sin diferencias el tipo de transporte, buques dedicados al salvamento marítimo o buque de especiales características, como pueden ser los buques de alta velocidad, o todo tipo que requiera un máximo de prestaciones y al objeto de adentrarnos más en el objetivo de esta tesis, debemos seleccionar aquel sistema con el que se puedan obtener los mejores resultados.

Las prestaciones deseables atendiendo a la seguridad en la navegación, son una correcta interpretación de otros buques o marcas en tierra que permitan afrontar una maniobra sin riesgo. La distancia mínima para este requerimiento sería una distancia de reconocimiento no inferior a dos millas y con una calidad de imagen que permita interpretar correctamente la imagen observada.

Para ello debemos hacer una comparación de los sistemas estudiados hasta este punto, determinando que los sistemas de intensificación residual no tienen la capacidad para dar las prestaciones o requisitos requeridos en el punto anterior.

Los sistemas de cámaras térmicas, podrían encontrarse en el límite de la distancia de reconocimiento deseado, por lo que para continuar con este estudio y conocer hasta donde pueden obtenerse los mejores resultados se elige un sistema fotónico que a priori los pueden proporcionar, aunque a un precio bastante más elevado.

Por lo tanto, los sistemas con mejores prestaciones son las cámaras de infrarrojo fotofónicas aunque tienen un sistema más caro y con mayor mantenimiento. Al objeto de mejorar las prestaciones y cuando se trate de cámaras que no sean portátiles, debería considerarse siempre un sistema montado sobre una plataforma giroestabilizada.

En el caso en que lo que se pretenda es una detección de un hombre al agua, se puede determinar claramente que el sistema idóneo es una cámara de IR fotónica.

Atendiendo a estos criterios los sistemas que ofrecen unas prestaciones más avanzadas son los sistemas fotónicos, ante lo cual, para adentrarnos en este trabajo, se selecciona la utilización de una cámara de IR fotónica giroestabilizada.

Existen algunos sistemas que combinan dos o más elementos tanto de visión nocturna como diurna. Por ejemplo alguno de ellos combinan la visión de intensificación para distancias próximas en las

que se obtiene una buena resolución y calidad de imagen y cámaras IR fotónicas para la detección y reconocimiento. En algunos casos se complementa con una cámara de visión diurna de CCD y telémetros láser. Esta configuración no debe confundirse con la fusión mediante algoritmos de las señales de salida de los distintos sistemas y que se sintetizan en una imagen combinada. El futuro de la visión nocturna se encamina hacia estos sistemas y que proporcionarían imagen de calidad excepcional.

2.2. ESTUDIO DE CAMPO

Para este trabajo de campo, se dispuso de una cámara de infrarrojo instalada a bordo de la patrullera de altura “Río Ara” del Servicio Marítimo de la Guardia Civil, con base en el puerto de Barcelona. (Fig.2.110)

Esta cámara está instalada en el mástil de la embarcación a una altura de la línea de flotación de aproximadamente 5 metros y a 1 metro a popa del centro de la eslora.



Fig.2.110

Este sistema está fabricado por IAI (Israel Aircraft Industries Ltd.) y el modelo es POP200 (Plug-in Optronic Payload). Este sistema de origen y características de uso militar adaptado para uso policial e instalado y mantenido por ISDEFE (Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España, S.A.) empresa pública española creada en el año 1985 con objeto de proporcionar apoyo técnico de ingeniería y servicios de consultoría en tecnologías avanzadas, tanto en el sector de defensa como en el ámbito civil.

El sistema completo consiste en una torreta o contenedor instalado en el palo que proporciona la giro estabilización y la orientación así como unión mecánica entre la optoelectrónica y la plataforma que la transporta. Está torreta de aspecto ovalado alberga una parte móvil o “jaula” y que permite una fácil introducción, extracción y el movimiento vertical de las cámaras dentro de ella. Esta jaula puede llevar distintas cámaras o elementos en función de las necesidades operativas, pudiendo albergar una cámara de IR y otra de visión diurna y en algunos casos un telémetro y/o un señalador láser. En la cámara utilizada en el estudio, este elemento alberga una cámara de IR y una cámara de visión diurna. Fig.2.111

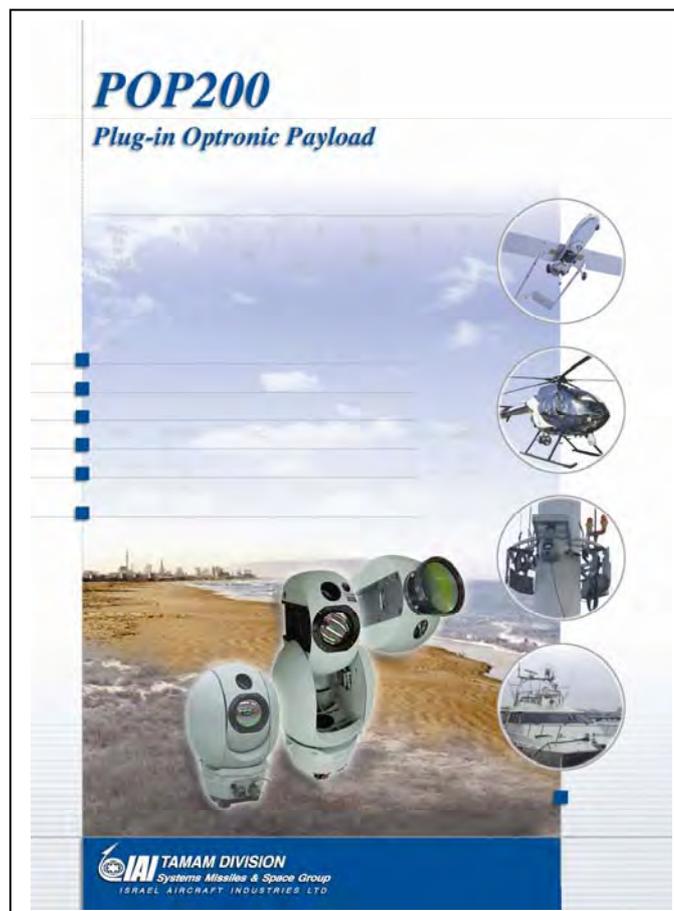


Fig.2.111

La otra parte del sistema lo componen un manipulador o mando de control de la cámara Fig.2.212, dos monitores instalados en el puente de gobierno de forma que permitan una fácil visualización de la proa del la embarcación así como del resto del sistemas de navegación del buque. También dispone de un sistema de grabación de imágenes en video.

La cámara funciona con un suministro de 28 voltios y tiene un consumo medio de 5A



Fig.2.112

Las características más importantes que proporciona el fabricante de esta cámara son:

- ✓ Rango espectral: 3-5 μm (MWIR)
- ✓ FPA de InSb (Antimoniuro de Indio) de 320 x 240 detectores
- ✓ NETD (promedio): 25 mK
- ✓ Sistema de enfriamiento: Ciclo cerrado, enfriador criogénico Sterling

Campos de Visión:

- ✓ FOV Amplio (22X16°) (HXV) FL: 25 mm
- ✓ FOV Medio (6.60X5.20°) FL: 80mm
- ✓ FOV Estrecho (1.72X1.29°) FL: 320 mm
- ✓ FOV Super estrecho (0.8X0.65°) FL:

El sistema puede estar enlazado con el radar con lo que la cámara se orienta automáticamente a una demora radar y con el GPS que proporciona en cada momento la situación, rumbo y velocidad de la embarcación.

Mediante la manipulación del mando de control (Fig.2.112).se controla el movimiento en demora y azimutal de ambas cámaras (IR y CCD) y de las distintas funciones con las que cuenta el sistema. También se accede al menú de configuración del sistema de IR, que son:

- ✓ proceso de iniciación de funcionamiento
- ✓ selección del sistema de visión (IR-CCD)
- ✓ selección y utilización del sistema de escaneado de la imagen
- ✓ selección y utilización del sistema de rastreo de objetivos de IR

- ✓ sistema de optimización de calidad de imagen
- ✓ corrección de uniformidad
- ✓ acceso al menú del sistema

Además del sistema de optimización de la imagen de IR y de la corrección de la falta de uniformidad que se desarrolla a continuación, cabe destacar las opciones que proporciona la cámara de escaneo de una zona determinada fijada por el usuario y que la cámara mantiene de forma permanente, tanto en orientación como en elevación. Una aplicación práctica, por ejemplo es mantener un escaneo de un sector hacia la proa del barco, visionando constantemente un sector de seguridad o una zona de costa fijando la demora. Es interesante la opción del sistema de rastreo que permite seguir de forma permanente e independientemente del rumbo del barco un objetivo predeterminado.

Otras opciones interesantes es el enlace entre el sistema de visión con el radar, con lo que se puede dirigir la pantalla en la demora de un contacto radar, haciendo visible el contacto radar. También puede enlazarse con el GPS, obteniendo una lectura continua de la situación del buque sobre la pantalla del sistema, además de proporcionar la demora verdadera en la que se encuentra el objetivo.

Uno de los controles importantes es la optimización de la calidad de imagen, que puede ser para la cámara de IR, como para la cámara de visión diurna. Para la cámara de IR, dispone de un pulsador que permite el enfoque óptimo del objetivo.

La cámara dispone de cuatro enfoques, como vimos en las características de la cámara. El sistema también permite el cambio de polaridad, de forma que las zonas de calor puedan verse en oscuro (negro) o en claro (blanco) las distintas fuentes de calor y que permiten o ayudan a interpretar la imagen observada

La cámara dispone de un sistema automático de ganancia, pero también cuenta con un control o ajuste fino de la ganancia para un ajuste perfecto.

Por último son importantes las tablas para corregir la falta de uniformidad. Con la corrección de la falta de uniformidad se consigue una mejor calidad de imagen, aunque no es necesario hacer esta corrección ya que la cámara está calibrada durante el proceso de fabricación, con unos valores óptimos en tres tablas pre-establecidas de corrección y que son cargados en cada proceso de encendido y apagado de la cámara.

Estás tablas son:

- ✓ tabla num. 1 WARM (para ambientes con temperaturas por encima de los 15°C)
- ✓ tabla num.2 COOL (ambientes entre 15 y 20 grados)
- ✓ tabla num.3 COLD (ambientes por debajo de los 15°C)

En el funcionamiento normal no es necesario el cambio continuo de tablas si no existe un cambio considerable de temperaturas en el exterior.

Si se desea puede hacerse una corrección de uniformidad utilizando el control automático de la corrección de no uniformidad sobre un punto de una forma rápida y sin perder tiempo, y una segunda corrección de falta de uniformidad a dos puntos y que resulta algo más compleja.

Durante la operación por parte del usuario, si considera que la imagen es mejorable, puede realizar una corrección sobre un punto, aunque está corrección es solo durante la sesión de trabajo y cuando la cámara se apaga, al iniciarse se restablecen las tablas pre-establecidas por el fabricante. Este procedimiento está explicado en el manual de la cámara.

No obstante se recomiendan las que el sistema tienen almacenadas tres tablas que fueron calculadas en el proceso de fabricación para ambiente caliente, fresco y frío, en cuanto a temperaturas de fondo, no del objeto observado.

Para este trabajo de campo, también se utiliza otra cámara , desarrollada por la empresa TECNOBIT y concretamente la cámara FLIR 640 y de la que existen instaladas en alguna de sus variantes en buques de la Armada Española así como en aviones F-18 del Ejército del Aire.(Fig.2.113)

Las características de la cámara son:

- ✓ Rango espectral: 3,6 a 4,9 μm (MWIR)
- ✓ FPA de InSb
- ✓ Resolución : 640X512 píxeles
- ✓ Sensibilidad del detector: 20 mK a 5 ms
- ✓ Temperatura detector : 77°K
- ✓ NETD : 0.04 mK
- ✓ Sistema de enfriamiento: Enfriador criogénico Sterling

Campos de Visión:

- ✓ FOV Amplio (WFOV) (24X32°) (HXV)
- ✓ FOV Medio (MFOV) (4,8X6°)
- ✓ FOV Estrecho (NFOV) (1.3X1.64°)

El sistema óptico está formado de entre 6 y 9 lentes esféricas en función del FOV, y de composición Ge,Si,ZnSe,ZnS,CaFl y el cambio entre las diferentes lentes es inferior a 1 seg.

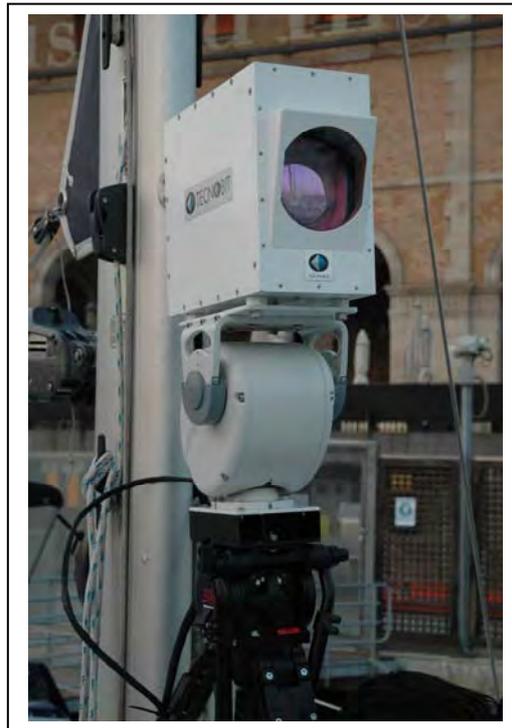


Fig.2.113

Según datos aportados por le fabricante la capacidad de detección y reconocimiento para un objetivo de dimensiones 3X6 metros:

- ✓ NFOV ; Detección 38 Km. Reconocimiento 13.5Km.
- ✓ MFOV ; 14 Km. y 4,7 Km.
- ✓ WFOV ; 3.5 y 1 Km.

Dispone se zoom electrónico de x2,x4,x8,x16

Esta cámara se instaló en la embarcación “Payara” del Departamento de Ciencias e Ingeniería Náutica de la UPC ubicado en la Facultad de Náutica de Barcelona y en un velero “Bavaria 42” (Fig.2.114) .

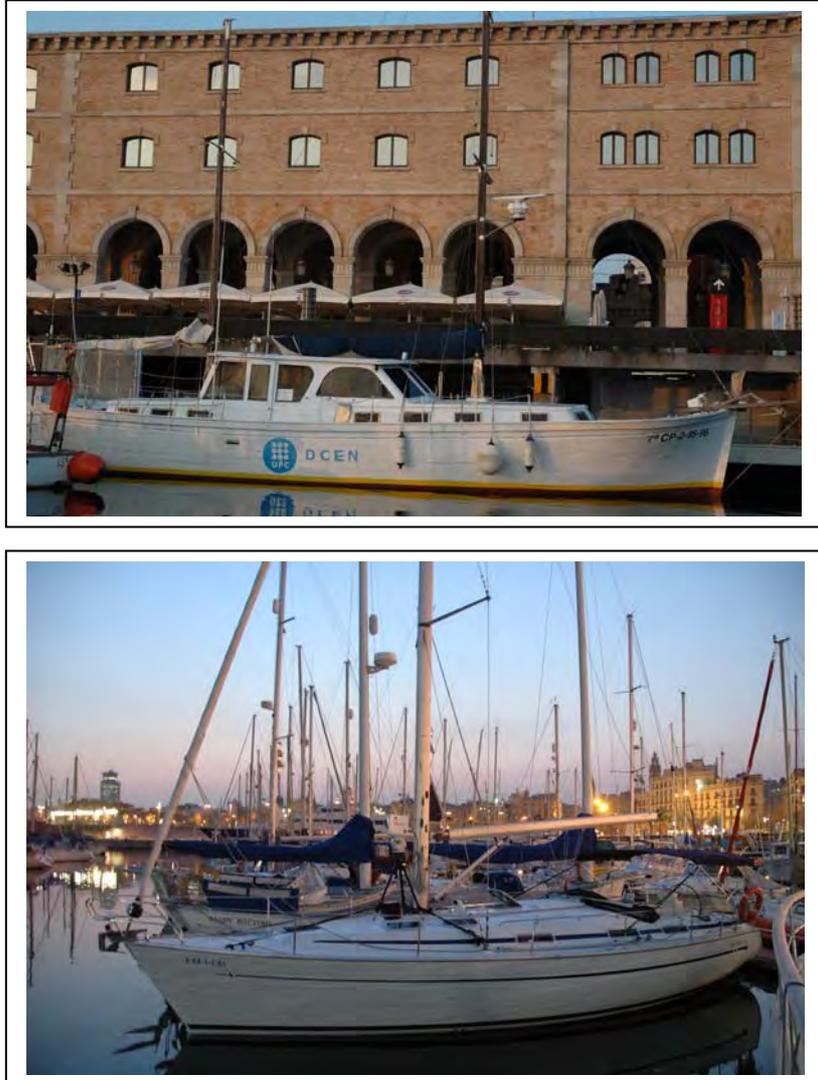


Fig.2.114

En la Fig.2.115 se puede observar el proceso de la instalación de la cámara en cubierta de la embarcación y el mando de control y la pantalla de la mesa de derrota de la embarcación. Como puede observarse la instalación fue muy simple, siendo necesario únicamente aportar un suministro eléctrico de 220V y un consumo de 60 W. Para el monitor se utilizó directamente una pantalla de plasma convencional.



Fig.2.115

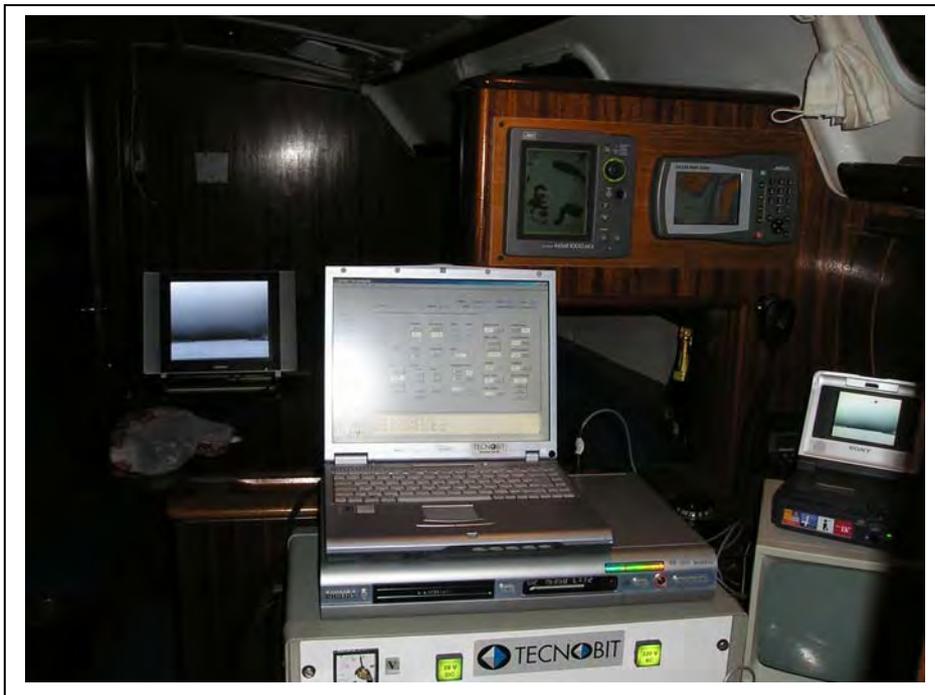


Fig.2.116

En las Fig.2.116 puede observarse el emplazamiento del sistema. Como puede observarse en las imágenes, se instala la cámara con un trípode un cubierta y está a su vez se trinco a son de mar. Durante las pruebas, las condiciones de mar eran de marejadilla a marejada. También hay que

destacar que el sistema no disponía de plataforma giroestabilizada, con lo que con el movimiento del barco en algunas ocasiones fue difícil obtener buenas imágenes y tuvo que suplirse la estabilización con el manipulación en elevación y demora que disponía el sistema de monitorización de la cámara.

Como puede comprobarse, para un equipo tan sofisticado no implica la instalación en una plataforma con muchas exigencias y una simple embarcación de recreo puede estar equipada con un sistema de VN. En este caso la unidad óptica únicamente pesa 6.5 Kg y la unidad de proceso acondicionada en la mesa de derrota 5 Kg.

Una parte importante de los desarrollos de I+D+i de TECNOBIT están orientados a investigación, diseño y desarrollo en su aplicación en el ámbito marítimo, habiendo realizado dentro de nuestros programas el diseño de cámaras de infrarrojo en las dos bandas de aplicación, 3 a 5 μm y 8 a 12 μm .

El conocimiento de los últimos avances en la tecnología y el desarrollo interno de aplicaciones es necesario para poder dar al mercado las soluciones profesionales que necesita. Se han desarrollado algoritmos de detección, seguimiento y clasificación de objetivos a partir de las imágenes obtenidas, algoritmos de aplicación a equipos FLIR y a sistemas complejos IRST (Infra-Red Search and Track).

Aplicaciones de Tráfico Aeroportuario como complemento al radar para aproximación, circulación en pista, uso en niebla y lluvia.

Operaciones de Rescate; búsqueda en mar y nieve.

Aplicaciones en Control Medioambiental como Vigilancia de Parques Naturales y Lucha Contra Incendios, Control de Riegos y de Explotación de Acuíferos, etc.

Aplicaciones de Control de Personas en situaciones de inmigración ilegal, tráfico de drogas, etc.

Aplicaciones Industriales como Termografía Industrial, Control de Emisión de Gases, Estudios de Fugas, etc.