

INFORME UIT-R M.2084*

Detección por satélite de los mensajes del sistema de identificación automática

(2006)

1 Introducción

Al comienzo de la década de los noventa, la Asociación Internacional de Señalización Marítima (IALA) inicialmente propuso que se creara un sistema universal a bordo de barcos que mejorara la seguridad marítima y la eficacia de la navegación, y que al mismo tiempo ayudara a proteger el medio ambiente marino. Posteriormente, la Organización Marítima Internacional (OMI), la UIT y la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) adoptaron un sistema de navegación conocido actualmente como Sistema de Identificación Automática (AIS) que ayudaría a cumplir esas metas. El objetivo principal del AIS consiste en facilitar el intercambio eficaz de información de navegación entre barcos y entre barcos y estaciones costeras para mejorar significativamente la seguridad de la navegación y fomentar un mejor control y supervisión de los eventos marítimos. En la Recomendación UIT-R M.1371 se describen detalladamente las características técnicas del actual AIS, que utiliza técnicas de acceso múltiple por división en el tiempo (AMDT) en la banda de ondas métricas del servicio móvil marítimo.

Tal como se describe en la Recomendación mencionada, el AIS se ha diseñado para intercambiar, de manera autónoma y automática, mensajes cortos entre barcos, estaciones costeras y ayudas a la navegación en un radio de 20 a 30 millas náuticas (MN) (unos 36 a 56 km) utilizando principalmente un tipo de AMDT autoorganizado. Los mensajes incluyen información relativa a la identificación del barco, su posición, rumbo y velocidad.

Por exigencia del Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS), es obligatoria la instalación y utilización del AIS en todos los barcos de 300 toneladas o más de registro bruto, que realizan travesías internacionales. En 2008, todos los barcos de 500 toneladas o más de registro bruto que realicen travesías nacionales también deben estar dotados con el AIS. Los dispositivos del AIS diseñados para cumplir con esta exigencia de incorporación obligatoria se denominan equipos Clase A. Se está diseñando una versión menos potente, llamada Clase B, que se utiliza de forma voluntaria. Desde su introducción, el AIS ha demostrado que cumple ampliamente las metas inicialmente planteadas por la IALA.

Recientemente, ha surgido la necesidad de poder detectar y seguir la trayectoria de barcos alejados de la costa a distancias superiores a las que pueden cubrir las comunicaciones terrenales normales en la banda de ondas métricas. Los requisitos de estas aplicaciones de largo alcance, tales como una mejor manipulación de carga peligrosa, mayor seguridad y neutralización de operaciones ilegales, sugieren que es necesario poder detectar barcos que se aproximan a distancias de 200 MN (370 km) o más de la costa.

En este Informe se presenta el sistema de detección por satélite de los AIS como un medio para lograr la detección de barcos a larga distancia. El informe aborda la viabilidad técnica, examina la capacidad del satélite en diversas condiciones y estudia los posibles métodos para mejorar dicha

* Este Informe debe señalarse a la atención de la Organización Marítima Internacional (OMI), de la Asociación Internacional de Señalización Marítima (IALA) y del Comité Internacional Radiomarítimo (CIRM).

capacidad del satélite. El resto del documento está organizado en los siete puntos siguientes: características operacionales y técnicas del AIS, panorámica de la detección del AIS por satélite, análisis del balance del enlace, análisis de la interferencia dentro del sistema (Clase A únicamente, Clase A y Clase B combinadas y distribución no uniforme de barcos), compatibilidad con sistemas móviles existentes, técnicas para mejorar el funcionamiento y la compartición y resumen.

2 Características operacionales y técnicas de los AIS a bordo de barcos

En los siguientes párrafos se presenta un resumen de las características básicas del AIS terrenal convencional que figuran en la Recomendación UIT-R M.1371, lo que permite describir y comprender mejor los principios de la detección de los AIS por satélite desde el punto de vista funcional.

El AIS funciona como un sistema de comunicaciones barco a barco y barco a tierra en el que los barcos dotados del AIS transmiten periódicamente mensajes de AMDT cortos y de longitud fija con informaciones tales como identificación, posición, rumbo, velocidad y otra información sobre el estado. Los receptores asociados del AIS a bordo de barcos y en estaciones costeras detectan esta información procedente de todos los barcos situados en las cercanías, proporcionando así una visión panorámica del entorno local, lo que sirve de complemento a los radares y a otras ayudas para la navegación.

La estructura de la señal AMDT se basa en una trama de un minuto dividida en 2 250 intervalos de tiempo en los que cada mensaje ocupa teóricamente un intervalo de tiempo. En el modo normal, estos mensajes de identificación se transmiten periódicamente de forma alternada por dos canales marítimos de ondas métricas designados para este fin. La posición del barco se obtiene a partir de un dispositivo electrónico de determinación de la situación que se encuentra a bordo. La temporización del AMDT se obtiene a partir del receptor GNSS integrado a la estación del AIS. La capacidad total del AIS, considerando los dos canales, es de 4 500 mensajes de un intervalo de tiempo por minuto.

El AIS se diseña empleando un tipo de mecanismo de acceso denominado AMDT autoorganizado. Mediante esta técnica, el sistema funciona sin utilizar el controlador AMDT central, común en los mecanismos de AMDT de asignación fija. Los barcos que forman parte del entorno local logran coordinarse y minimizar los conflictos en cuanto a la utilización de los intervalos de tiempo, detectando permanentemente las señales AIS del entorno local y «anunciando» el siguiente intervalo de transmisión que pretenden utilizar. También se emplean otras técnicas de acceso AMDT para ciertos tipos de mensaje.

En el Cuadro 1 se resumen los parámetros técnicos de la frecuencia radioeléctrica y de los datos del AIS. Tal como se describe en el Cuadro, la longitud básica del mensaje es de 256 bits, en los que los últimos 24 bits actúan como memoria intermedia que da cabida a los retardos de propagación y de los repetidores, a la fluctuación de fase de la temporización y a los bits adicionales debidos al relleno de bits. Normalmente, las últimas 20 posiciones de bit quedan vacías. Las características de antena y los parámetros asociados de línea de transmisión en los equipos del AIS instalados en los barcos no están definidos en la Recomendación básica de la UIT, pero se añaden aquí para definir de forma más completa las características del AIS. En la práctica, se acostumbra a utilizar dos tipos de antena, un dipolo de $1/2 \lambda$ y un monopolo de $5/8 \lambda$ con alimentación por el extremo, con ganancias que oscilan entre 2 y 4,5 dBi. Por cautela, en este estudio se supone que el dipolo de $1/2 \lambda$ tiene una máxima ganancia de aproximadamente 2 dBi con un simple diagrama de ganancia de elevación en coseno cuadrado. El tipo y la longitud de la línea de transmisión varían dependiendo de la instalación. En este documento, se supone una atenuación de 3 dB debida a los cables y otras pérdidas relacionadas con el transmisor del AIS del barco. En el Cuadro 2 se presenta la estructura de bits por defecto del paquete de datos.

CUADRO 1

Visión de conjunto de los parámetros técnicos del AIS a bordo del barco

Parámetros del AIS	Valores
Frecuencias	161,975 y 162,025 MHz
Anchura de banda del canal	25 kHz
Plataformas	Barcos Clase A, barcos Clase B, estaciones costeras, ayudas a la navegación
Potencia	12,5 W (Clase A); 2 W (Clase B)
Tipo de antena ⁽¹⁾	Dipolo de $1/2 \lambda$
Ganancia de antena ⁽¹⁾	2 dBi con diagrama de elevación vertical en coseno cuadrado; Mínima ganancia = -10 dBi
Pérdida debida a los cables ⁽¹⁾	3 dB (aproximadamente)
Sensibilidad del receptor	-107 dBm para una proporción de errores de paquete (PER) del 20% (mínimo) -109 dBm para una PER $\leq 20\%$ (típica)
Modulación	9 600 bits MDMG
Modo de acceso múltiple	AMDT (autoorganizado, aleatorio, fijo e incremental)
Longitud de trama AMDT	1 minuto; 2 250 intervalos de tiempo
Longitud del intervalo AMDT	26,7 ms; 256 bits (véase el Cuadro 2)
Tipos de mensaje	22 tipos
Longitud del mensaje	1 a 5 intervalos en los que 1 intervalo es el tipo predominante
Intervalo de mensajes periódicos	Intervalos de transmisión entre 2 segundos y 6 minutos (véase el Cuadro 3)
Relación de protección D/U requerida	10 dB para una PER = 20% ⁽²⁾

⁽¹⁾ Parámetros típicos no definidos en la Recomendación UIT-R M.1371.

⁽²⁾ Parámetro especificado en CEI 61993-2.

CUADRO 2

Estructura de bits por defecto del paquete de datos

Aumento de potencia	8 bits	
Secuencia de acondicionamiento	24 bits	Necesaria para la sincronización
Bandera de inicio	8 bits	
Datos	168 bits	Longitud por defecto
Código de redundancia cíclica	16 bits	Necesario para la detección de error
Bandera de finalización	8 bits	
Memoria intermedia	24 bits (normalmente, las últimas 20 posiciones de bit quedan vacías)	Necesaria para dar cabida al relleno de bit, a los retardos debidos a la propagación y a los repetidores y a la fluctuación de fase
Total	256 bits	

Para que los AIS puedan realizar todas sus funciones, la norma define 22 tipos de mensaje que se clasifican en cuatro categorías, a saber, dinámicos, estáticos y de travesía, de seguridad y administrativos y datos. Los mensajes dinámicos, que se transmiten periódicamente, conforman la mayor parte del tráfico cursado en el entorno AIS. Una variable fundamental es la tasa a la que las distintas plataformas transmiten estos mensajes periódicos. La norma define gamas de posibles intervalos para varios tipos de plataforma, dependiendo de las características dinámicas del barco, tales como la velocidad y el rumbo. En el Cuadro 3 se presenta un resumen de los intervalos de envío de información para las distintas plataformas.

Como se verá más adelante, el intervalo de información cumple una función importante en el funcionamiento de la detección por satélite de los AIS. El Cuadro 3 muestra que el intervalo de información de los barcos de Clase A oscila en una amplia gama que va desde cada 2 segundos hasta cada 3 minutos, dependiendo de las características dinámicas del barco. A fin de determinar un intervalo de transmisión medio a largo plazo, es necesario contar con una distribución estimativa de los barcos para las diversas circunstancias dinámicas de estado. En el Cuadro 4 se enumeran las categorías de estado con el respectivo intervalo de información y una estimación del porcentaje de los barcos que pertenecen a cada categoría en un momento dado. Con estos datos, se determinó un valor estimativo general para el intervalo de información.

CUADRO 3

Intervalos de información de mensajes AIS

Plataforma AIS	Intervalo de información
Información dinámica:	
Estación costera	Intervalo de 3 1/3 a 10 s (10 s nominales)
Barco Clase A	Intervalo de 2 s a 3 min (aproximadamente 7 s de promedio) (véase el Cuadro 4)
Barco Clase B	Intervalo de 5 s a 3 min (30 s nominales)
Aeronaves de búsqueda y salvamento	Intervalo de 10 s
Ayudas a la navegación	Intervalo de 3 min
Información estática y de travesía	Intervalo de 6 min
Mensajes de seguridad y administrativos	Según sea necesario
Mensajes de datos	Según sea necesario

CUADRO 4

Intervalos de información de equipos móviles a bordo de barcos Clase A

Condiciones dinámicas del barco	Intervalo nominal de información	Porcentaje del total
Barco anclado o amarrado y moviéndose a menos de 3 nudos	3 min	28
Barco anclado o amarrado y moviéndose a más de 3 nudos	10 s	
Barco en movimiento con velocidad de 0 a 14 nudos	10 s	30
Barco en movimiento con velocidad de 0 a 14 nudos y cambiando de rumbo	3 1/3 s	12
Barco en movimiento con velocidad de 14 a 23 nudos	6 s	30
Barco en movimiento con velocidad de 14 a 23 nudos y cambiando de rumbo	2 s	
Barco desplazándose a más de 23 nudos	2 s	
Barco desplazándose a más de 23 nudos y cambiando de rumbo	2 s	
Media para todos los barcos	Intervalo de aproximadamente 7 s	

3 Detección del AIS por satélite

Conceptualmente, para detectar los AIS por satélite se requerirían uno o más satélites en órbita terrestre baja (LEO) que reciban y decodifiquen los mensajes AIS y retransmitan la información decodificada mediante enlaces de conexión de satélite hacia estaciones terrenas convenientemente ubicadas. Los satélites LEO se encuentran a una altura típica comprendida entre 600 y 1 000 km. En la actualidad no está funcionando ningún sistema de detección AIS ni se han definido los parámetros operativos y técnicos de dichos sistemas. Por lo tanto, para cumplir con los objetivos aquí planteados es necesario suponer parámetros técnicamente factibles y razonables.

Un sistema inicial de demostración utilizará un solo satélite (LEO) en órbita polar a una altura de 950 km. Se prevé que los sistemas operativos posteriores utilicen una constelación relativamente pequeña de satélites LEO; en consecuencia, el seguimiento por satélite de la situación de un barco dado no será continuo. Para lograr una cobertura total empleando un número moderado de estaciones terrenas es necesario aplicar técnicas de almacenamiento y retransmisión a los datos AIS recibidos. No obstante, para detectar y supervisar barcos a distancias de hasta varios miles de millas náuticas de la costa, la gran huella de satélite proyectada sobre la Tierra permite la descarga de datos en tiempo real durante el periodo de visibilidad del satélite.

Hay varios factores técnicos que distinguen la detección del AIS por satélite de la detección habitual de AIS de barco a barco y de barco a costa, concretamente, la sensibilidad del receptor, el diagrama de ganancia de antena y los requisitos de fiabilidad. Los datos medidos por los receptores del AIS demuestran que los receptores corrientes suelen poseer una sensibilidad superior a la requerida para las especificaciones del AIS. Es posible mejorar aún más la sensibilidad de los receptores de satélite de los AIS mediante el uso de amplificadores de bajo nivel de ruido (LNA) y técnicas de detección optimizadas. Sin embargo, en contraposición a estas mejoras, es necesario contar con anchuras de banda del receptor óptimas que permitan asimilar efectos Doppler de hasta cerca de $\pm 3,5$ kHz. Teniendo en cuenta estos factores, se utilizan aquí una sensibilidad de base de -118 dBm para una proporción de errores de paquete (PER) del 1% y de -120 dBm para una PER del 20%.

El sistema de satélite inicial empleará una antena de satélite de haz amplio. Las antenas de haz ancho utilizadas en los satélites LEO normalmente se pueden clasificar en dos grupos. Un tipo comúnmente utilizado es aquel en el que la ganancia de cresta se apunta omnidireccionalmente hacia el horizonte y la ganancia menor apunta hacia el punto subsatelital. Con este tipo de antena, la variación de la ganancia de la antena al variar el ángulo respecto al eje compensa parcialmente los cambios de las pérdidas de propagación, lo que da como resultado un menor cambio en el nivel de la señal a medida que varían los ángulos respecto al eje. La otra categoría de antena pertenece a un tipo más convencional en el que la ganancia de cresta de la antena se apunta hacia el punto subsatelital. En este estudio se supone que el segundo tipo de antena posee una ganancia de cresta de 6 dBi y una anchura del haz a -3 dB de 100° . Para el diagrama de ganancia del lóbulo principal se utiliza el siguiente modelo empleado con frecuencia en los estudios del UIT-R:

$$G(\theta) = G_{MB} - 12(\theta/\theta_{3dB})^2$$

Siendo:

$G(\theta)$: ganancia de la antena del satélite (dBi) para un ángulo de θ (grados) respecto al eje

G_{MB} : ganancia del haz principal de la antena del satélite (dBi)

θ_{3dB} : anchura del haz a -3 dB de la antena del satélite (grados)

Los requisitos de funcionamiento de la detección de AIS por satélite también son significativamente diferentes a sus contrapartes terrenales. El objetivo del AIS convencional, al igual que la mayor parte de los sistemas de comunicaciones, consiste en recibir y decodificar satisfactoriamente la mayoría de los mensajes pertinentes transmitidos, con una fiabilidad entre moderada y alta. Para supervisar los barcos que utilizan la detección por satélite del AIS, no es necesario disponer de una alta fiabilidad de las comunicaciones. Para los barcos ubicados a unos pocos cientos de millas náuticas de la costa, puede ser suficiente actualizar la situación del barco cada hora y para los barcos más alejados de la costa, puede ser suficiente actualizarla cada cuatro o incluso cada doce horas. Como se mostrará más adelante, la interferencia interna del sistema puede causar la pérdida de un alto porcentaje de mensajes AIS recibidos de barcos. Por ejemplo, en un solo paso del satélite se puede perder hasta el 99% o más de los mensajes AIS de los barcos y aun así se puede satisfacer el objetivo de actualizar la situación de los barcos de forma regular. Para lograr la actualización de la situación del barco cada 12 horas, sólo es necesario decodificar satisfactoriamente uno de los más de 360 mensajes recibidos ($\sim 0,3\%$) de un barco dado en ese intervalo. Más adelante se explica esto en mayor detalle.

Las dos frecuencias que se han designado como canales dentro del servicio móvil marítimo para el funcionamiento del AIS terrenal no están atribuidas a título exclusivo, sino que estos canales y los canales adyacentes están atribuidos y se utilizan en varias regiones del mundo para otras aplicaciones de servicios móviles, incluidas las estaciones de correspondencia pública en ondas métricas (VPCS) de sistemas del servicio móvil marítimo y de radiocomunicaciones móviles terrestres. A diferencia de los AIS terrenales que coexisten con otros transmisores en la misma frecuencia mediante separación geográfica, el haz de la antena del satélite abarca una zona geográfica amplia y, por lo tanto, recibe simultáneamente las transmisiones procedentes de varios barcos con transmisores AIS, así como de sistemas móviles que funcionan en tierra. El AIS por satélite debe poder funcionar satisfactoriamente en el entorno de interferencias causadas por los servicios existentes. En el § 9 se examina el funcionamiento del AIS por satélite en presencia de servicios existentes.

En el Cuadro 5 se tiene en cuenta lo anterior para presentar un resumen de las características del AIS por satélite utilizadas para el presente estudio.

CUADRO 5

Características supuestas para el enlace por satélite del AIS

Parámetros del satélite del AIS	Valores
Satélite	
Constelación	1 a 6 satélites
Altitud (km)	950
Inclinación (grados)	82,5
Periodo (minutos)	104
Huella sobre la Tierra	3 281 km de radio (en el horizonte)
Antena	
Ganancia (G_{MB}) (dBi)	6
Anchura del haz (θ_{3dB}) (grados)	100
Diagrama	$G_{MB} - 12 (\theta/\theta_{3dB})^2$
Polarización	Casi circular
Pérdida por conversión de polarización circular a lineal (dB)	3
Receptor	
Factor de ruido a la entrada del LNA (dB)	3
E_b/N_0 necesaria para una BER = 10^{-5} (dB)	13, incluidas las pérdidas de realización
Pérdidas de cable/filtro antes del LNA (dB)	2,5
Sensibilidad en el LNA (dBm)	-118 para una proporción de errores de paquete (PER) del 1% -120 para una PER del 20%
Relación de protección (para señales cocanal que coinciden en el tiempo) (dB)	15 para una PER del 1% 10 para una PER del 20%
Intervalo de actualización deseado de la situación del barco	Un solo paso del satélite, 4 h y 12 h

4 Análisis del balance del enlace

Una de las principales mediciones básicas de la calidad de funcionamiento de los sistemas de comunicaciones por satélite es el balance del enlace. Para el caso en estudio, consiste en el cálculo de la potencia recibida por el satélite originada en un barco y su comparación con el nivel de sensibilidad del satélite. Si la potencia recibida supera el valor de la sensibilidad, es decir, arroja un margen positivo, se pueden lograr comunicaciones satisfactorias. Se calculó un balance del enlace para el trayecto barco a satélite AIS utilizando los parámetros ya definidos en este documento para los transmisores AIS de los barcos y los receptores AIS del satélite. En el Cuadro 6 se describe la geometría aplicable y los cálculos de potencia para la detección de mensajes AIS de barcos Clase A.

CUADRO 6

Balance del enlace barco a satélite a distancia máxima

Parámetros	Valores
Geometría	
Altitud del satélite (km)	950
Mínimo ángulo de elevación de transmisión (grados)	0
Ángulo de la antena de satélite respecto al eje (grados)	60,5
Máxima distancia oblicua (km)	3 606
Máxima distancia sobre la superficie (km)	3 281
Potencia	
Potencia de transmisión (dBm)	41,0
Ganancia de transmisión (dBi)	2,0
Pérdidas de transmisión debidas al cable y otras pérdidas (dB)	3,0
Pérdidas de propagación en el espacio libre a distancia máxima (dB)	147,8
Pérdidas por desadaptación de la polarización (dB)	3,0
Ganancia de la antena del satélite en el horizonte (dBi)	1,6
Pérdidas debidas a la línea/filtro de RF (dB)	2,5
Potencia recibida en el satélite (dBm)	-111,7
Sensibilidad del satélite para una PER del 20% (dBm)	-120,0
Margen neto (dB)	8,3

Una característica que se examinó con más detalle son las pérdidas de propagación para ángulos de emisión pequeños en las antenas de los barcos. En la mayoría de los sistemas de comunicaciones por satélite el sistema se suele diseñar para un cierto ángulo de elevación mínimo sobre el horizonte en el terminal terrestre, por ejemplo 3° ó 5°, a fin de tener en cuenta factores técnicos tales como el desvanecimiento y/o restricciones de índole reglamentario. En este estudio se determinó que esos factores no son aplicables a la propagación tierra a satélite en ondas métricas sobre la superficie del mar. Al aplicar un modelo de propagación radioeléctrica diseñado para predecir las pérdidas de propagación tierra a satélite, se obtuvo la curva que aparece en la Fig. 1 y que muestra el valor mediano de las pérdidas de propagación estimadas para un satélite a una altitud de 950 km.¹ La curva se elaboró basándose en unas condiciones medias meteorológicas marítimas y del estado del mar moderadas. La estructura lobular de los datos es causada por el fortalecimiento y desvanecimiento periódico de la señal debidos a la adición en fase y fuera de fase del trayecto reflejado en la superficie del agua. Como se aprecia en los datos, las condiciones nominales de propagación en el espacio libre se aplican limitadas a un par de dB a todo el trayecto hasta el horizonte óptico y las pérdidas de propagación aumentan rápidamente para distancias superiores.

En la Fig. 2 se amplían los resultados deducidos del Cuadro 5 y se describe el margen neto en función de la distancia desde el punto subsatelital sobre la Tierra hasta el horizonte. Para este cálculo, se utiliza la propagación en el espacio libre hacia el horizonte de la Tierra sin incluir la estructura de desvanecimiento en fase o fuera de fase antes mencionada. El nulo parcial ubicado directamente bajo el satélite es un resultado del nulo de la ganancia de antena de dipolo utilizada en el barco con AIS. Como los parámetros técnicos del balance del enlace de los barcos de Clase B son

¹ Véase <http://flattop.its.bldrdoc.gov/if77.html>.

fundamentalmente idénticos a los de la Clase A, salvo que la potencia es menor, también se muestra una curva paralela que representa la recepción Clase B en el satélite.

FIGURA 1
Pérdidas de propagación Tierra a satélite sobre la superficie del mar a 162 MHz
 (satélite a 950 km de altitud)

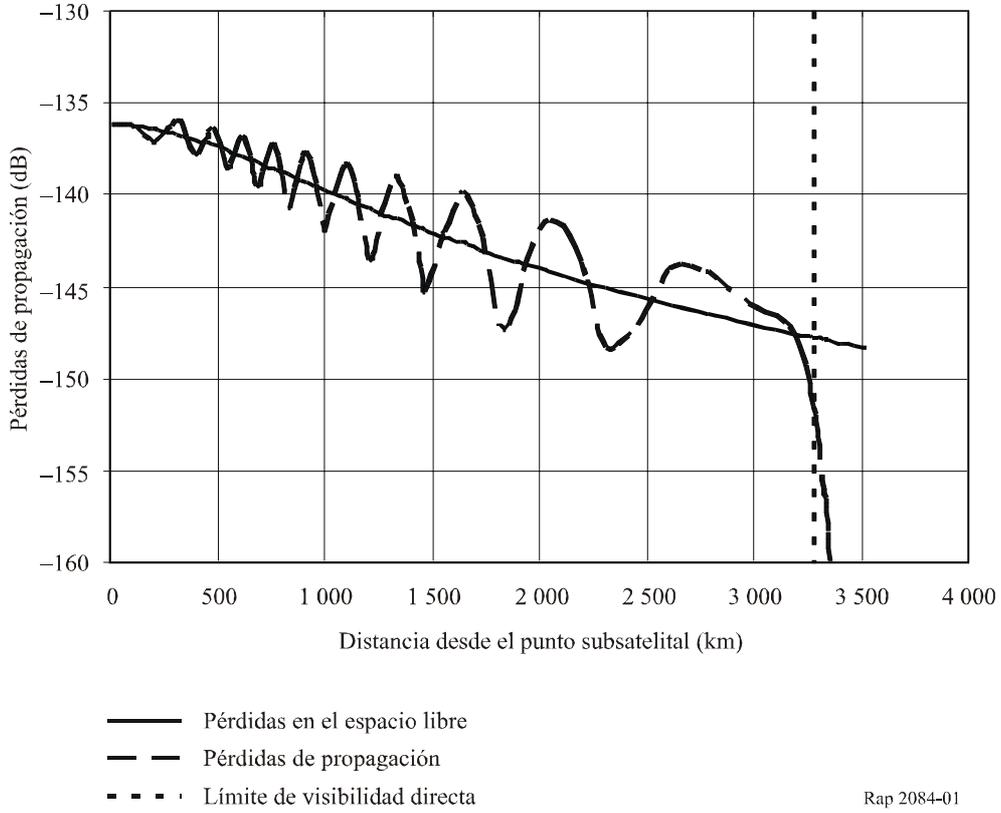
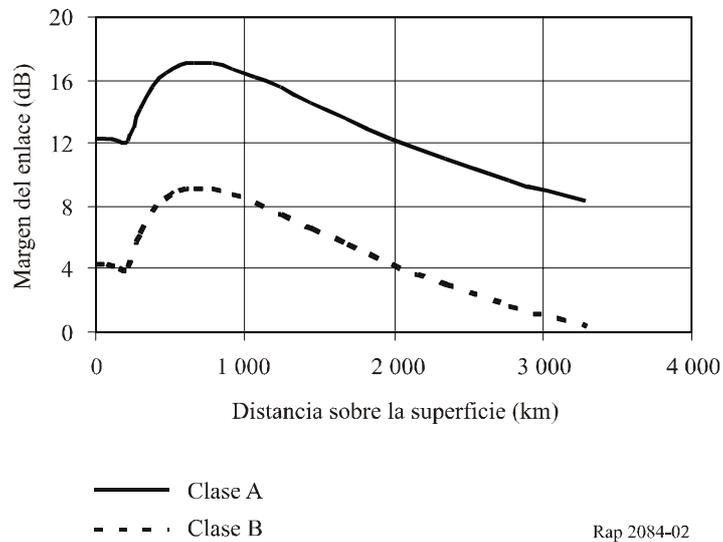


FIGURA 2
Margen del enlace barco a satélite en función de la distancia desde el punto subsatelital



A partir de estos resultados se puede llegar a la conclusión de que en la mayor parte de las situaciones de los barcos al interior de la huella del satélite existe un margen de enlace adecuado para que los barcos detecten y decodifiquen tanto las señales AIS de Clase A como de Clase B.

5 Análisis de la interferencia dentro del sistema (Clase A únicamente)

A pesar de que el balance del enlace muestra que existen márgenes de enlace adecuados para la detección de mensajes AIS de los barcos de Clase A situados en cualquier parte de la huella del satélite, la interferencia en el interior del sistema afecta significativamente la calidad de funcionamiento de detección del sistema. En lo que sigue, se describen tres métodos para cuantificar las limitaciones de la calidad de funcionamiento del sistema debidas a la interferencia dentro del mismo.

5.1 Método analítico

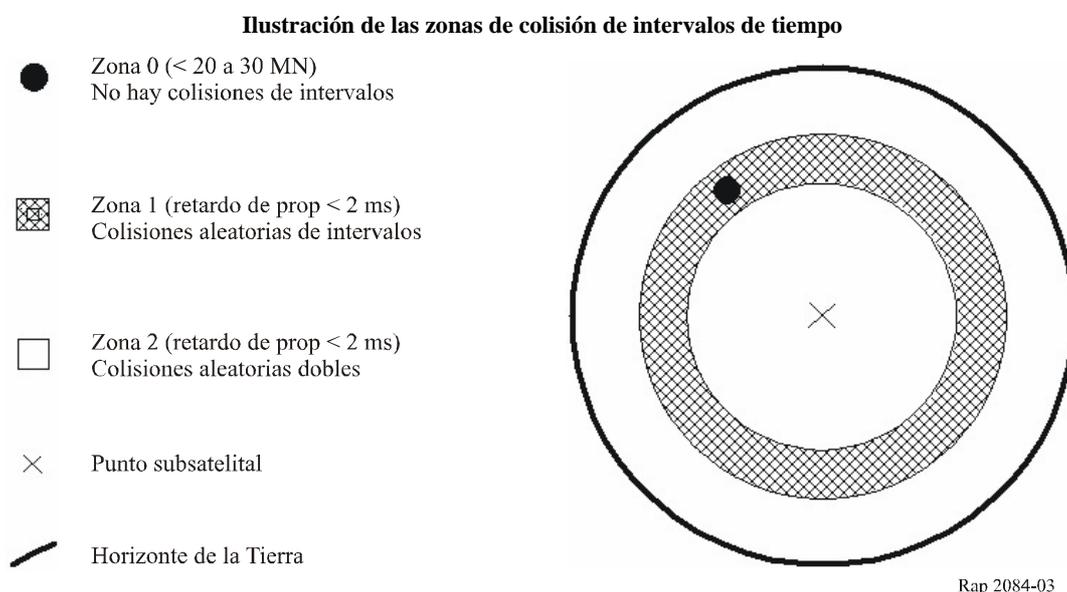
Como se indicó anteriormente, el AIS emplea un sistema de AMDT autoorganizado (AMDTA) que se encarga de coordinar la utilización de los intervalos de tiempo, y disminuye así al mínimo posible el número de conflictos debidos al uso simultáneo de intervalos de tiempo por los equipos de los barcos y los instalados en la costa en una zona geográfica dada. En la detección del AIS por satélite la situación es diferente. El haz de antena del satélite abarca muchas de esas zonas locales. Como por lo general no existe una coordinación entre las zonas locales, se producirán colisiones de los intervalos de tiempo entre muchas de las señales recibidas en el satélite. Cuando ocurre una colisión de intervalos de tiempo, podrían perderse los dos mensajes, dependiendo de sus respectivos niveles de potencia. A medida que aumenta la tasa a la que ocurren estas colisiones, disminuye la probabilidad de detección y decodificación satisfactorias de los mensajes de los AIS.

La colisión de intervalos de tiempo puede examinarse desde el punto de vista de un solo mensaje AIS deseado (D) y de uno o varios mensajes AIS no deseados (U). Cuando se produce una colisión de intervalos de tiempo, el mensaje se pierde si la relación de potencia D/U combinada es inferior a los 10 dB requeridos. Considerando inicialmente únicamente los barcos de Clase A, en la Fig. 2 se muestra que la relación entre la señal AIS máxima recibida y la señal AIS mínima recibida es de aproximadamente 9 dB. En consecuencia, para toda colisión de intervalos de tiempo, la D/U no alcanzará el valor requerido de 10 dB, lo que causará la pérdida de la mayoría de paquetes. Más adelante se describen algunas posibles técnicas de procesamiento en el receptor que ayudan a disminuir la pérdida de paquetes.

En ciertas condiciones, se perderán dos paquetes durante la colisión de intervalos. Esto se ilustra en la Fig. 3, en la que el círculo externo representa la huella sobre la superficie de la Tierra y el centro del círculo el punto ubicado directamente debajo del satélite. La zona oscura mucho más reducida representa la zona de coordinación del AIS local. Considérese que se recibe un mensaje de un barco ubicado en esa zona local. La arquitectura AMDTA hará que los mensajes AIS de otros barcos ubicados en la misma zona local estén coordinados en el tiempo y, en consecuencia, no se producirán colisiones de intervalos de tiempo, localmente ni en el receptor del satélite AIS. No obstante, los mensajes de barcos situados fuera de la zona local, en la zona sombreada más grande, no estarán coordinados y, por tanto, habrá colisiones aleatorias de intervalos de tiempo y se perderá un porcentaje de los mensajes deseados. Siempre que la diferencia entre los retardos de propagación desde las diversas ubicaciones de los barcos en la zona hasta el satélite sea menor de unos 2 ms, la sincronización de tiempo del GPS garantiza que los intervalos de tiempo se alinearán y, por consiguiente, sólo resultará afectado un intervalo de tiempo. El retardo de 2 ms corresponde a las 20 posiciones de bit vacías ubicadas al final de los mensajes AIS. En zonas situadas fuera de la zona sombreada, representadas por las áreas blancas encerradas, diferencias mayores entre los retardos de propagación hasta el satélite provocarán una superposición de los intervalos de tiempo con la consiguiente pérdida de dos intervalos.

Si se consideran únicamente los barcos de Clase A y se supone una situación ideal en que la distribución geográfica de los barcos es uniforme en el campo de visión del satélite, se puede utilizar una metodología analítica sencilla para calcular las estadísticas relacionadas con este tipo de interferencia dentro del sistema.

FIGURA 3



Considérese en primer lugar el caso trivial en el que el satélite recibe un solo mensaje originado procedente de un barco dado, y sólo hay otro barco en los alrededores. La probabilidad de que ocurra una colisión y la probabilidad de una detección satisfactoria vienen dadas por:

$$Q_{1,1} = k * D_C / 2$$

$$P_{1,1} = 1 - (k * D_C) / 2$$

$$P_{1,1} = 1 - (k * (\tau / \Delta T) / 2)$$

Siendo:

- $Q_{1,1}$: probabilidad de que se produzca una colisión de intervalos de tiempo (mensaje deseado de un barco; mensajes periódicos no deseados del otro barco)
- $P_{1,1}$: probabilidad de que haya al menos una detección satisfactoria sin colisión (un mensaje deseado; mensajes periódicos no deseados del otro barco)
- D_C : ciclo de trabajo de transmisión de los mensajes del barco no deseado
- k : 0, 1, ó 2 para los mensajes interferentes procedentes de barcos situados en las zonas 0, 1 ó 2
- ΔT : intervalo o intervalos medios de transmisión de mensajes
- τ : longitud del mensaje (0,0267 s).

El divisor 2 que aparece en la ecuación anterior tiene en cuenta el hecho de que los mensajes de barcos AIS se alternan entre las dos frecuencias AIS.

Si, por ejemplo, se utiliza un ΔT de 7 segundos y se tiene otro barco en la zona 2, se obtiene:

$$P_{1,1} = 99,6\%$$

Si este ejemplo se amplía al caso en el que el satélite recibe un solo mensaje de un barco dado y hay en total N barcos en los alrededores, la probabilidad de detectar satisfactoriamente la señal sin que haya colisiones de intervalos de tiempo viene dada por:

$$P_{1,N} = (P_{1,1})^{N-1}$$

En el caso general en que un barco dado transmite M mensajes durante un periodo de visibilidad del satélite, la probabilidad de detectar satisfactoriamente al menos uno de los mensajes transmitidos durante el periodo de visibilidad viene dada por:

$$P_{M,N} = 1 - [1 - (P_{1,1})^{N-1}]^M$$

siendo:

$$M: T_{vis} / \Delta T$$

T_{vis} : periodo de tiempo de visibilidad del satélite

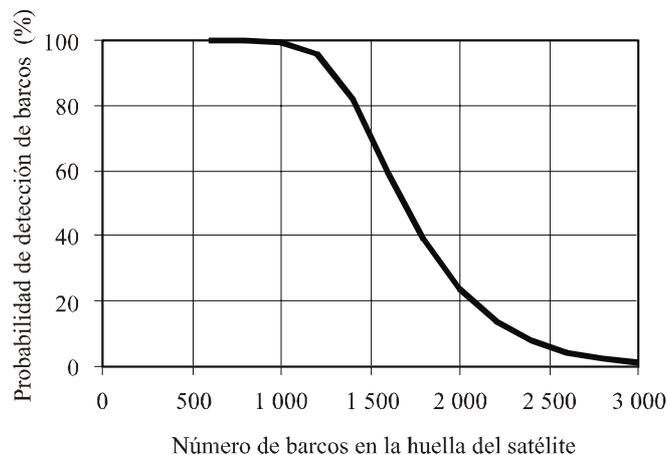
Si se supone que los barcos están distribuidos uniformemente en la huella de la antena del satélite, es evidente que habrá barcos en cada una de las zonas 0, 1 y 2. La ubicación relativa y el tamaño de las zonas varía con cada mensaje recibido. Dado el tamaño reducido de la zona 0, los mensajes no deseados originados en esta zona afectan poco el funcionamiento general del sistema de detección del satélite y se pueden ignorar. En consecuencia, el valor medio de k estaría entre 1 y 2. Para el caso de una distribución uniforme de barcos en la huella del satélite, se encontró que un valor medio de k cercano a 1,6 describe con precisión la interferencia dentro del sistema. Siguiendo con el ejemplo anterior, se obtienen los dos siguientes resultados para $k = 1,6$:

$$P_{1,1000} = 4,8\%$$

$$P_{100,1000} = 99,3\%$$

La metodología de análisis aquí descrita guarda coherencia con otros estudios realizados sobre este tema.² En la Fig. 4 se presenta una curva de ejemplo para el caso sencillo de un solo satélite y un solo paso de satélite.

FIGURA 4
Estadísticas de detección por satélite



Rap 2084-04

² Hoye, Gudrun K., y otros [sin fecha] Space-Based AIS for Global Maritime Traffic Monitoring, Kjeller, Noruega: Norwegian Defense Research Establishment (FFI).

Estos cálculos representan la probabilidad de detectar un barco determinado durante el periodo de visibilidad de un satélite específico. Un valor estadístico alternativo que posiblemente sea más útil es el porcentaje de barcos detectados. Como tiene sentido suponer que la probabilidad de detección es independiente de un barco a otro, el número medio de barcos detectados (S_{med}) viene dado por:

$$S_{med} = N \cdot P_{M,N}$$

Expresándolo como un porcentaje del total de detecciones de barcos, se obtiene una curva idéntica a la mostrada en la Fig. 4, en la que la ordenada se denominaría «porcentaje de barcos detectados».

Un tercer valor estadístico de interés es la probabilidad de que, durante el periodo de visibilidad dado, se detecten todos los barcos cubiertos por la huella de satélite. Este criterio más estricto se define de la siguiente forma:

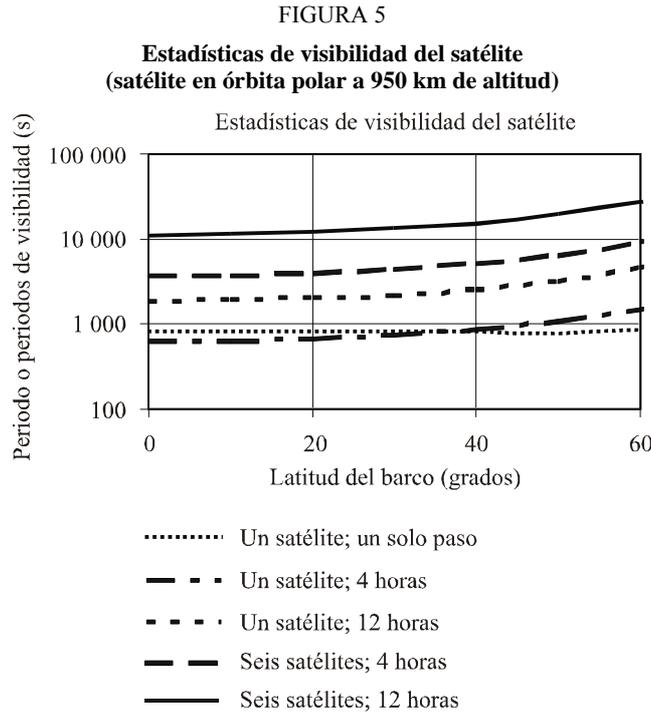
$$P_{Todos} = (P_{M,N})^N$$

Debido al valor extremadamente alto del exponente, el valor efectivo de esta curva es todo o nada. Es decir, con una probabilidad de detección individual muy cercana a 1,0 se detectará el 100% de los barcos, pero si la probabilidad de la detección individual cae por debajo de 1,0, la probabilidad de detectar el 100% de los barcos disminuye rápidamente a casi cero.

Considerando lo expuesto, parece evidente que muchos de los mensajes transmitidos pueden degradarse o perderse como consecuencia de colisiones de intervalos de tiempo y aun así se alcanzaría el objetivo de actualizar la ubicación de los barcos durante un periodo de visibilidad del satélite dado.

El último elemento que se debe definir es el periodo de visibilidad del satélite. Para la altitud representativa de 950 km aquí considerada, el periodo de visibilidad de un solo paso de satélite por el cielo es de aproximadamente 16,8 minutos. Sin embargo, estos pasos de satélite no ocurren exactamente por la vertical sino a un ángulo de elevación menor, que depende de la inclinación de la órbita del satélite y de la latitud del emplazamiento del barco. Empleando un modelo para el análisis de satélites disponible en el mercado se calcularon los periodos medios de visibilidad del satélite en función de la latitud del barco y del periodo de observación, como se indica en la Fig. 5³. Se indican valores para un solo paso por la vertical, así como valores medios para periodos de observación ampliados de, por ejemplo, 4 y 12 horas. También se considera la cobertura con múltiples satélites mediante una constelación de seis satélites, en la que éstos se encuentran convenientemente separados para evitar la superposición de sus huellas sobre la superficie de la Tierra.

³ En el presente Informe los términos «periodo de observación» y «periodo de actualización de la ubicación del barco» se utilizan indistintamente. Ambos se refieren a un periodo de tiempo en el que se desean actualizar al menos una vez la identificación y la ubicación de un barco dado. El término «periodo de visibilidad» se refiere al número total de segundos dentro del periodo de observación en el que existe un trayecto de visibilidad directa entre un barco determinado y el satélite.



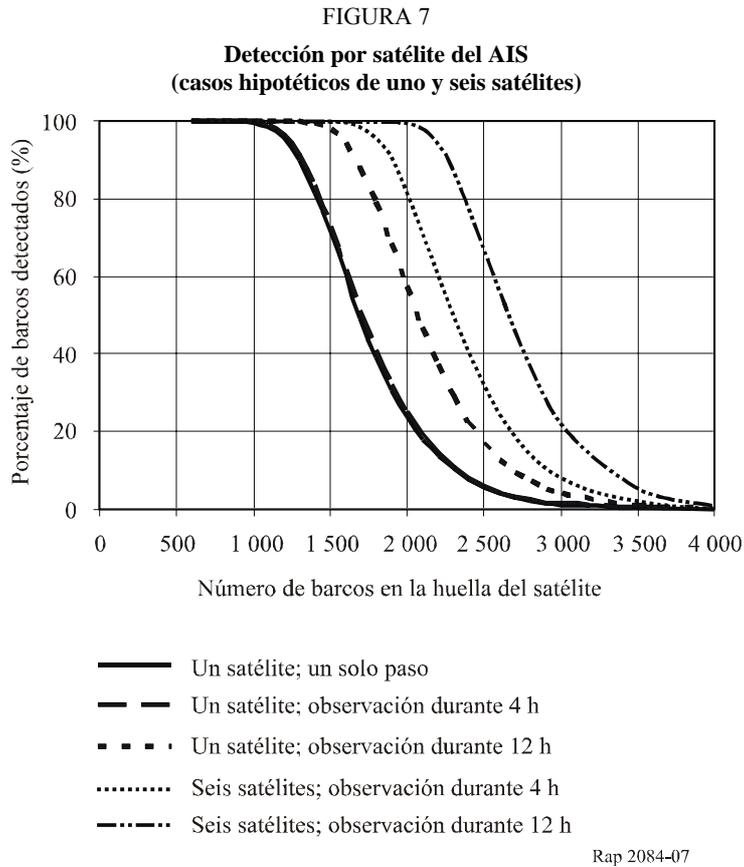
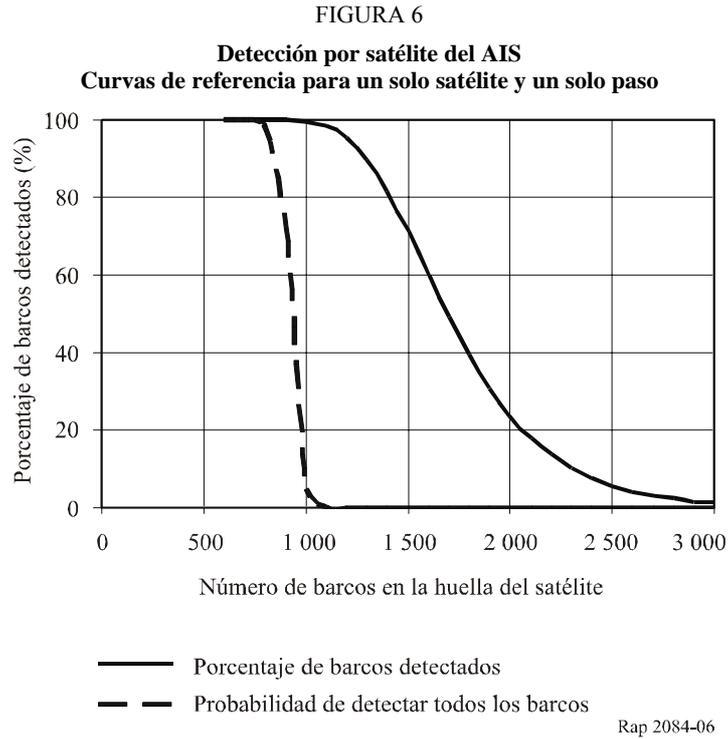
Para mayor sencillez, en los ejemplos mostrados se utiliza una latitud del barco de 40° N. En el Cuadro 7 figuran los valores concretos de visibilidad para un barco ubicado a 40° N.

CUADRO 7
Estadísticas de visibilidad del satélite
 (satélite en órbita polar; barco objetivo situado a 40° de latitud Norte)

Constelación de satélites	Un solo paso por la vertical	4 horas de observación	12 horas de observación
1 satélite	818 s	853 s ⁽¹⁾	2 560 s
6 satélites	818 s	5 118 s	15 360 s

⁽¹⁾ En el caso de la constelación de un solo satélite, el periodo de observación de 4 horas representa una media a largo plazo. Cabe señalar que puede haber periodos de hasta 9 horas sin visibilidad del satélite.

Pueden ahora combinarse la metodología analítica y las estadísticas de visibilidad del satélite para describir el porcentaje de barcos detectados y la probabilidad de detectar todos los barcos. En la Fig. 6 se muestran los resultados para un paso típico de satélite. En el resto de este Informe se utilizarán estas curvas como punto de referencia para la detección por satélite de barcos de Clase A del AIS. En la Fig. 7 se comparan los resultados para otros periodos de observación y una constelación de múltiples satélites, con la curva de referencia.



A los efectos del presente estudio, la capacidad del satélite se define para dos puntos, el punto en que se detecta el 80% de los barcos situados en la huella de la antena del satélite y el punto en que se detecta el 100% de los barcos. El Cuadro 8 presenta un resumen de la capacidad de satélite para los diversos casos descritos anteriormente.

CUADRO 8

**Capacidad de detección del satélite calculada utilizando el AIS
(satélite polar a 950 km de altitud; barco situado a 40° de latitud; 80% de detección)**

Constelación de satélites	Definición de capacidad	Un solo paso	Observación durante 4 horas	Observación durante 12 horas
1 satélite	80%	1 420 barcos	1 430 barcos ⁽¹⁾	1 790 barcos
6 satélites	80%	1 420 barcos	2 018 barcos	2 381 barcos
1 satélite	100% ⁽²⁾	738 barcos	753 barcos	797 barcos
6 satélites	100% ⁽²⁾	738 barcos	1 052 barcos	1 382 barcos

⁽¹⁾ En el caso de la constelación de un solo satélite, el periodo de observación de 4 horas representa una media a largo plazo. Cabe señalar que puede haber periodos de hasta 9 horas sin visibilidad del satélite.

⁽²⁾ Capacidad calculada al 99,9%.

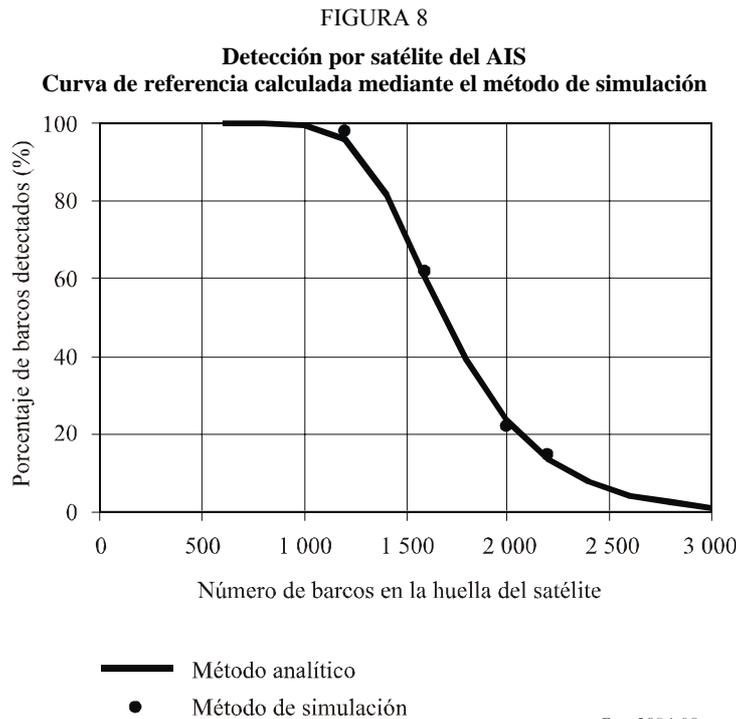
5.2 Método de simulación

Para determinar las limitaciones de la capacidad de detección del AIS por satélite se utiliza una estrategia alternativa que utiliza métodos de simulación de Monte Carlo. Se creó una base de datos en una hoja electrónica de Microsoft Excel[®], en la que cada registro incluía parámetros técnicos que representaban un barco situado dentro de la huella de satélite. Al utilizar valores aleatorios para los parámetros principales de transmisión de cada unidad del AIS y calculando reiterativamente el nivel de potencia combinada resultante recibida por el satélite en un intervalo de tiempo, se pueden obtener resultados aleatorios en el mismo formato que el del método analítico anterior. A continuación figuran las principales suposiciones del método de Monte Carlo formulado para el presente estudio:

- Los barcos están distribuidos uniformemente en una zona geográfica circular de 3 281 km de radio, cuyo centro se ubica en el punto subsatelital.
- Los barcos pueden transmitir aleatoriamente por el canal 1 o por el canal 2 del AIS, haciendo uso de uno de los 2 250 intervalos de tiempo.
- Cada barco de Clase A transmite empleando la potencia y el intervalo de tiempo medio antes indicados.

Además de la potencia combinada en el satélite, es necesario calcular también el retardo de propagación desde cada barco de la simulación, a fin de tener adecuadamente en cuenta el factor de colisión de los intervalos de tiempo. A fin de poder combinar apropiadamente la potencia de la interferencia recibida en determinado intervalo de tiempo de la señal deseada bajo condiciones de retardos de propagación variables, el intervalo de tiempo de la señal deseada se subdividió en subintervalos de tiempo. A efectos de este estudio, se observó que 10 subintervalos de tiempo daban la suficiente precisión, es decir que con un número mayor de subintervalos de tiempo los resultados no cambiaban significativamente. El primero y el último de los subintervalos de tiempo, con una longitud de 20 bits, representan los intervalos de tiempo que se superponen y corresponden a los 20 bits vacíos en la memoria intermedia. Cada uno de los otros ocho subintervalos de tiempo tiene una longitud de 27 bits, para un total de 256 bits. El mensaje se da por perdido si la potencia combinada en cualquiera de estos subintervalos de tiempo centrales da como resultado una D/U menor de 10 dB.

La Fig. 8 se elaboró empleando una hoja de cálculo de Microsoft Excel[®] para aplicar esta metodología. La curva muestra varios puntos calculados con el método de simulación, que indican una alta concordancia con los valores de referencia de la Fig. 5.



5.3 Método estocástico

En Tunaley⁴ se describe una tercera metodología para determinar las estadísticas de la detección de barcos de Clase A. En este método, se considera que la llegada de mensajes AIS procedentes de barcos al satélite es una variable aleatoria que presenta una distribución de Poisson. Las expresiones que se deducen al aplicar esta metodología tienen la misma forma general que el anterior método analítico, salvo que el término $P_{1,N}$ se sustituye por la siguiente expresión:

$$P_{1,N} \approx e^{(-\lambda \tau/2)}$$

siendo:

λ : $k \cdot (N - 1) / \Delta T$

k : factor que tiene en cuenta la doble colisión de intervalos descrita anteriormente en (1.6)

τ : longitud del mensaje AIS (26,7 ms)

N : número de barcos

ΔT : intervalo de transmisión de mensajes.

En el caso de transmisores de Clase A, funcionando en un entorno en que los barcos están distribuidos uniformemente, se puede determinar fácilmente que los resultados a los que se llega utilizando este método son fundamentalmente idénticos a los del método analítico ya mencionado en este punto. Esto se explica al observar la siguiente aproximación para la función exponencial:

$$e^{(-x)} \approx 1 - x \quad \text{para } x \ll 1$$

⁴ Dr. J.K.E. Tunaley [sin fecha] A stochastic model for space-borne AIS.

Sustituyendo adecuadamente la función exponencial por esta aproximación y reordenando los términos, se determina que, para ciclos de trabajo de transmisión bajos, los métodos analítico y estocástico dan como resultado ecuaciones idénticas.

Los resultados casi idénticos obtenidos con las tres metodologías de análisis diferentes validan estos resultados. A continuación, los resultados del análisis para diversos casos hipotéticos se comparan con los valores de la curva de referencia anteriormente obtenidos. Dada la equivalencia entre los tres métodos de análisis, cada caso se describe utilizando únicamente el método que le sea más conveniente.

6 Análisis de la interferencia dentro del sistema (Clases A y B combinadas)

Ahora se puede proceder a investigar la detección de barcos de Clase A en un entorno compuesto por barcos de Clase A y de Clase B. Para examinar este caso, conviene utilizar el método estocástico descrito. Debido a la baja potencia de los equipos de Clase B, no todas las colisiones de intervalos de tiempo provocan una pérdida del mensaje. Por ejemplo, en la Fig. 2 puede verse que un mensaje AIS de un solo barco de Clase B alejado del punto subsatelital y que colisione con un mensaje AIS de un barco de Clase A cercano al punto subsatelital daría como resultado una D/U de aproximadamente +17 dB. Este valor es mucho mayor que los 10 dB correspondientes al criterio de interferencia y, en consecuencia, este mensaje de Clase A se recibiría correctamente. Sin embargo, varias de las señales de este ejemplo podrían superponerse de tal forma que su suma podría hacer que la señal se pierda ocasionalmente. En consecuencia, no puede utilizarse el procedimiento analítico sencillo antes descrito, ya que éste supone que cada colisión provoca la pérdida del mensaje.

Es necesario hacer algunas modificaciones antes de poder utilizar la metodología estocástica. Concretamente, se sustituye el factor λ por la siguiente expresión:

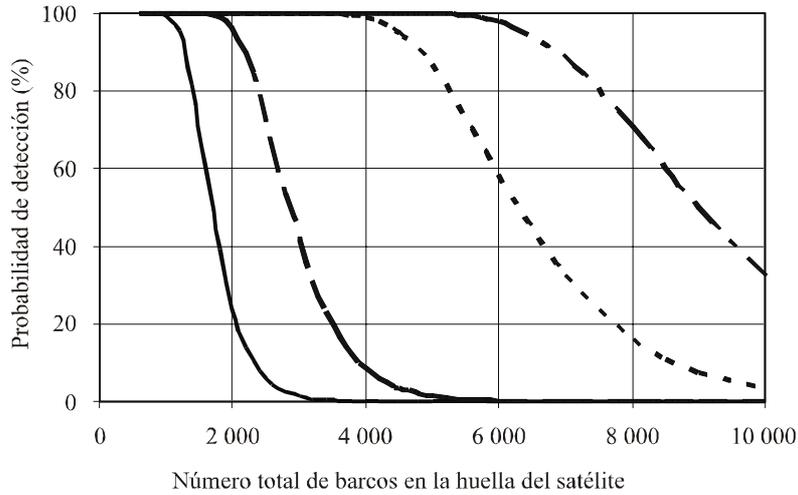
$$\lambda = k_A (N_A - 1) / \Delta T_A + k_B (N_B) / \Delta T_B$$

donde los subíndices se refieren a los parámetros correspondientes a las Clases A y B. La constante k_A tiene el mismo valor que la constante k en la ecuación previa. Sin embargo, la constante k_B inicialmente sólo puede estimarse de forma aproximada. Esta constante tiene en cuenta el hecho de que sólo una parte de las colisiones de intervalos de la Clase B provoca pérdida de mensajes, dependiendo de los niveles relativos de potencia en el receptor del satélite. Una técnica que permite determinar con mayor precisión la constante k_B consiste en emplear el modelo de simulación antes descrito para un solo punto de datos. Se utilizaron estos resultados para determinar un valor de 1,2 para k_B .

En las Figs. 9 a 11 se ilustra la probabilidad de detectar un mensaje AIS de Clase A en un entorno mixto de Clase A y Clase B, para diversas circunstancias.

FIGURA 9

Probabilidad de detección en un entorno mixto de Clase A y Clase B
(un satélite; un solo paso de satélite)*



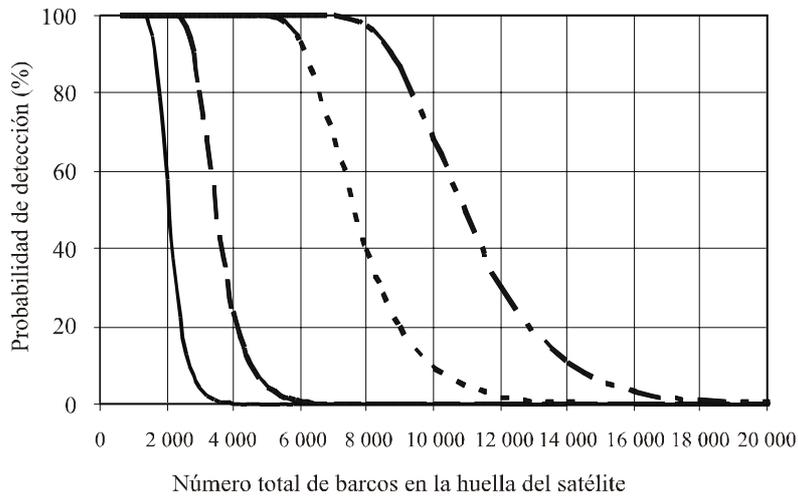
- 100% Clase A; 0% Clase B
- - 50% Clase A; 50% Clase B
- . - . 10% Clase A; 90% Clase B
- - - 0% Clase A; 100% Clase B

Rap 2084-09

* La curva «0% Clase A; 100% Clase B» corresponde al caso hipotético extremo en que el barco objetivo es un solo barco de Clase A y todos los demás barcos del entorno son de Clase B.

FIGURA 10

Probabilidad de detección en un entorno mixto de Clase A y Clase B
(un satélite; un periodo de observación de 12 horas)*



- 100% Clase A; 0% Clase B
- - 50% Clase A; 50% Clase B
- . - . 10% Clase A; 90% Clase B
- - - 0% Clase A; 100% Clase B

Rap 2084-10

* La curva «0% Clase A; 100% Clase B» corresponde al caso hipotético extremo en que el barco objetivo es un solo barco de Clase A y todos los demás barcos del entorno son de Clase B.

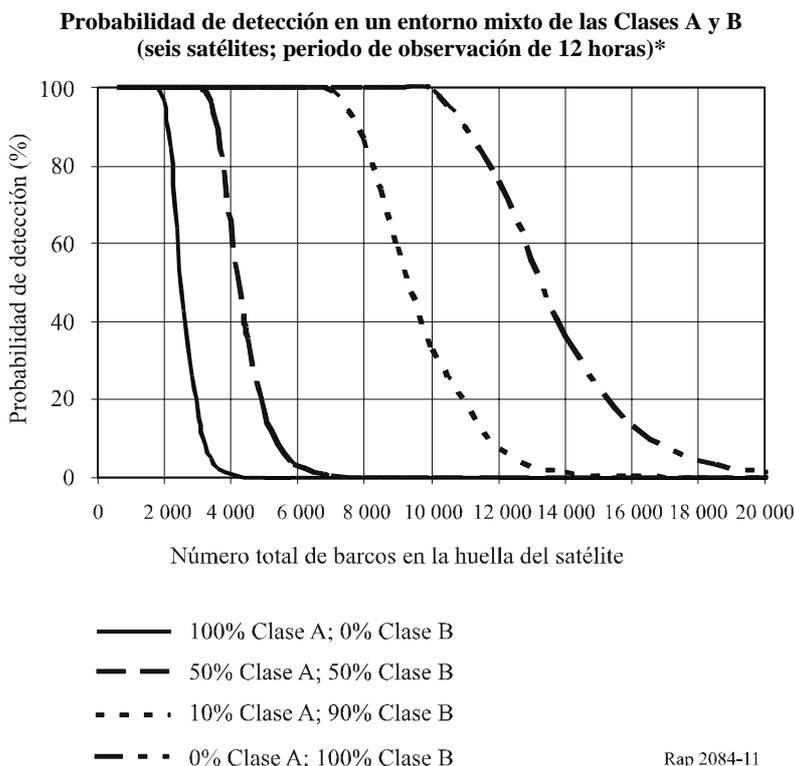
7 Análisis de la interferencia dentro del sistema (distribución no uniforme de barcos)

Los entornos de Clase A únicamente y de Clases A y B combinadas, tratados anteriormente, fueron elaborados suponiendo una distribución geográfica constante y uniforme de los barcos en el interior de la huella del satélite. Aunque esta hipótesis simplifica el cálculo de la probabilidad de detección, podría no representar adecuadamente el entorno real de los barcos. Para estudiar más detenidamente este tema, se desarrolló otra metodología modificada de simulación que tiene en cuenta distribuciones no uniformes de los barcos, que son más representativas de los entornos reales. Sin embargo, esto implica que utilizar ciertas variables adicionales, entre las que se incluyen:

- El número total de barcos equipados con AIS en el mundo.
- La situación geográfica del barco objetivo deseado (latitud y longitud).
- La distribución geográfica a nivel mundial de los barcos equipados con AIS.
- La traza del satélite sobre la Tierra.

No fue posible determinar para este estudio el número de barcos equipados con AIS funcionando en el mundo. Además de los barcos que se ajustan a los requisitos del convenio SOLAS en lo que respecta el tonelaje del barco, se está dotando un número cada vez mayor de buques de carga y de yates privados con equipos AIS de Clase A. Según estimaciones de diversas fuentes, este número oscila entre 50 000 y más de 80 000. A efectos de este estudio, el número de barcos dotados con equipos de Clase A se ha fijado en 70 000 para el año 2005.

FIGURA 11



* La curva «0% Clase A; 100% Clase B» corresponde al caso hipotético extremo en que el barco objetivo es un solo barco de Clase A y todos los demás barcos del entorno son de Clase B.

Evidentemente, la probabilidad de detección depende en gran medida de la ubicación del barco objetivo. Por ejemplo, un barco alejado de las rutas de navegación más utilizadas podrá detectarse fácilmente con una certidumbre cercana al 100%. No ocurre lo mismo en el caso de un barco ubicado en una zona con tráfico más intenso. En este estudio se utilizó un barco situado en

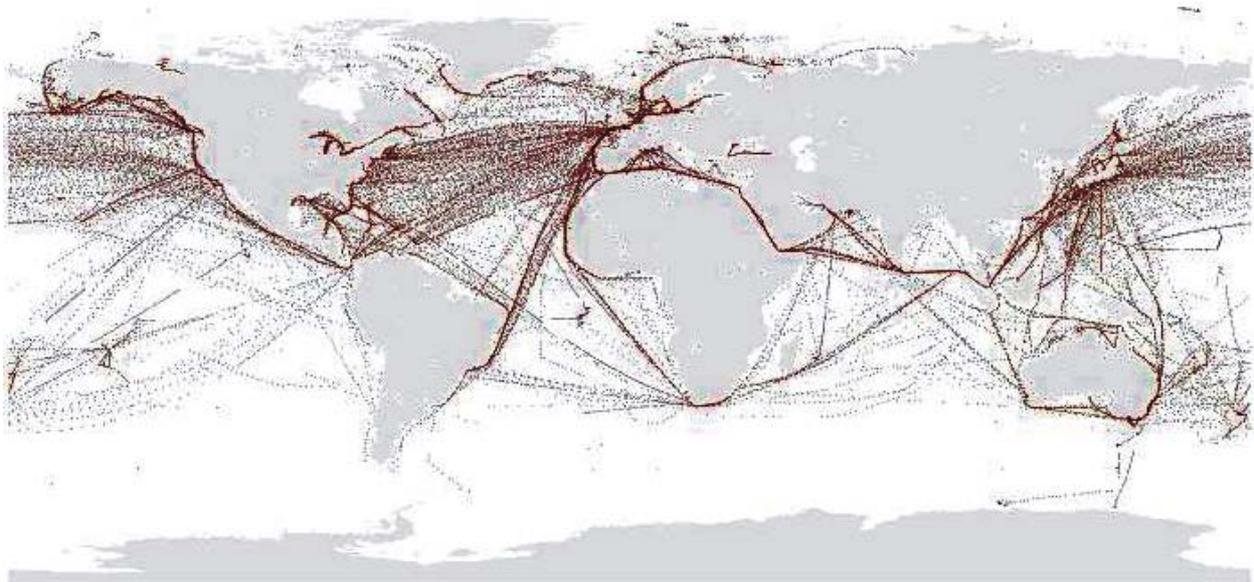
cuatro ubicaciones arbitrarias: a 1 000 km de la costa de la ciudad de Nueva York y a 1 000 km de la costa de Los Ángeles, en Estados Unidos de América; cerca del centro del Golfo de Méjico y en el Atlántico central.

Describir la distribución geográfica de los barcos es un reto más difícil. Se puede obtener una representación útil de las densidades de barcos a nivel mundial a partir de los informes meteorológicos voluntarios comunicados por los barcos en el mar. Se tuvo acceso a un conjunto de datos del mes de octubre de 2004 que contenía más de 80 000 informes de observación meteorológica de aproximadamente 800 barcos, en los que figuraban las correspondientes longitudes y latitudes. Esta distribución se muestra en la Fig. 12. Como puede observarse a partir de estos datos, la densidad de las ubicaciones es mucho mayor en las zonas costeras y en las principales vías de transporte marítimo, y relativamente menor en las amplias áreas oceánicas, como cabía esperar. Se supone que la distribución relativa de las ubicaciones de los barcos que figuran en estos datos representa razonablemente bien a los barcos de Clase A a nivel mundial. La distribución no representaría adecuadamente la de los barcos de Clase B ya que se supone que estos permanecen en las zonas costeras.

FIGURA 12

Ejemplo de distribución a escala mundial de los barcos de Clase A

Ubicaciones de los barcos deducidas de los informes de observación voluntarios
Octubre de 2004



Rap 2084-12

Con esta base de datos, se puede iniciar el estudio de la detección de barcos de Clase A empleando una distribución mundial de barcos más real.

Puede realizarse el análisis para distribuciones no uniformes de barcos utilizando estos datos y un proceso de simulación de Monte Carlo similar al descrito anteriormente, con las siguientes modificaciones adicionales:

- Se utiliza un subconjunto aleatorio de las ubicaciones de los barcos extraído de los datos de observación meteorológica, en vez de ubicaciones uniformemente distribuidas en la huella del satélite.
- La ubicación del satélite sigue, paso a paso, una órbita representativa que cruza por encima del barco objetivo, de conformidad con los parámetros supuestos de la órbita del satélite.

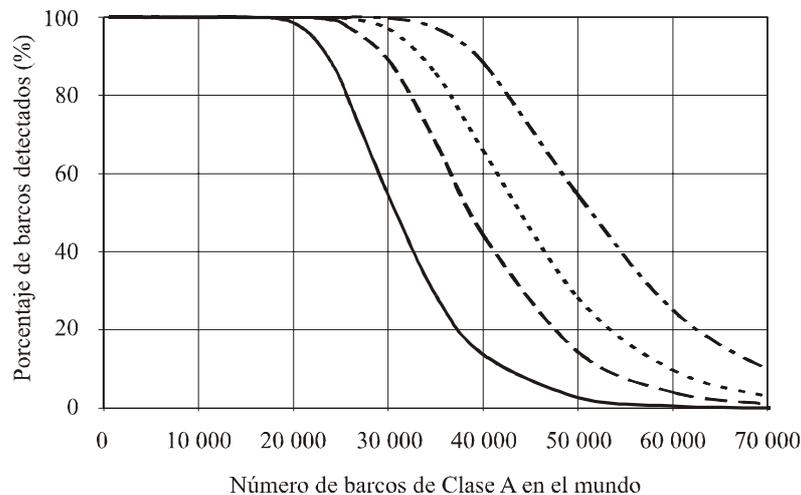
En las Figs. 13 a 16 se muestra la probabilidad de detección de un barco de Clase A en función del número de barcos dotados con equipos de Clase A en el mundo, para los cuatro puntos de prueba antes identificados. Obsérvese el cambio en la abscisa, que indica el número total de barcos en el mundo dotados con equipos de Clase A.

8 Posibles técnicas para mejorar la capacidad del satélite

Los resultados de los análisis aquí presentados demuestran la viabilidad técnica y las limitaciones de capacidad de la detección de AIS por satélite para la supervisión de barcos a larga distancia. El estudio aplica diversos casos hipotéticos de satélite y estimaciones de la densidad de barcos dotados con equipos AIS de Clase A a nivel mundial y sugiere que las densidades de barcos en ciertas regiones geográficas, especialmente en el Atlántico Norte, pueden rebasar la capacidad proyectada de los satélites para manejar los barcos. Se realizaron otros estudios con objeto de examinar diversos conceptos y técnicas que permitieran aumentar la capacidad AIS del satélite a fin de acomodarse a estas mayores densidades de barcos esperadas. Para examinar estas diversas técnicas, conviene, y suele ser suficiente, abordar el tema partiendo de la base de una distribución uniforme de barcos. Las posibles mejoras de capacidad utilizando una base de datos mundial de barcos serán, porcentualmente, similares a los resultados deducidos aquí para una distribución uniforme de barcos. Más adelante se describen cuatro técnicas posibles.

FIGURA 13

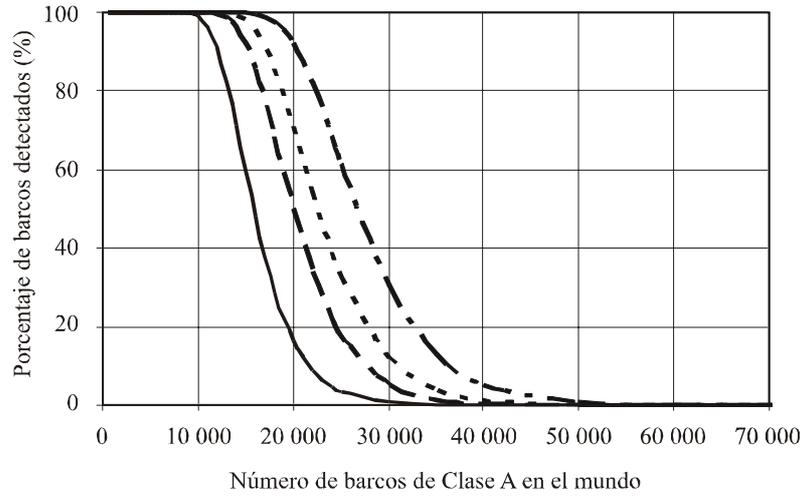
Estadísticas de detección utilizando datos de barcos en todo el mundo
(barco objetivo ubicado a 1 000 km de la costa de Los Ángeles CA, EE.UU.)



- Un satélite; un solo paso
- - - Un satélite; 12 horas de observación
- . . . Seis satélites; 4 horas de observación
- . - Seis satélites; 12 horas de observación

FIGURA 14

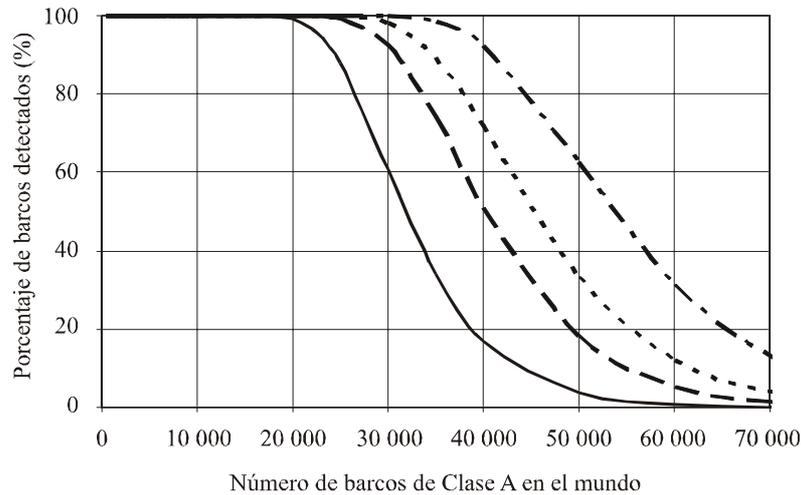
Estadísticas de detección utilizando datos de barcos en todo el mundo
(barco objetivo ubicado a 1 000 km de la costa de Nueva York, NY, EE.UU.)



- Un satélite; un solo paso
 - - - Un satélite; 12 horas de observación
 - . . . Seis satélites; 4 horas de observación
 - . - Seis satélites; 12 horas de observación
- Rap 2084-14

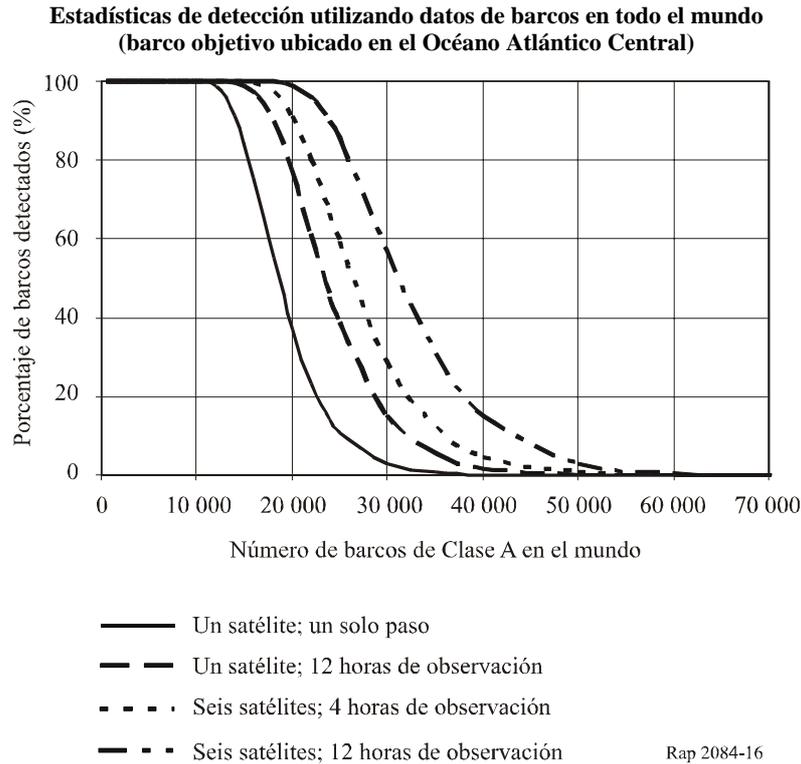
FIGURA 15

Estadísticas de detección utilizando datos de barcos en todo el mundo
(barco objetivo ubicado en el Golfo de Méjico)



- Un satélite; un solo paso
 - - - Un satélite; 12 horas de observación
 - . . . Seis satélites; 4 horas de observación
 - . - Seis satélites; 12 horas de observación
- Rap 2084-15

FIGURA 16



8.1 Antena de satélite

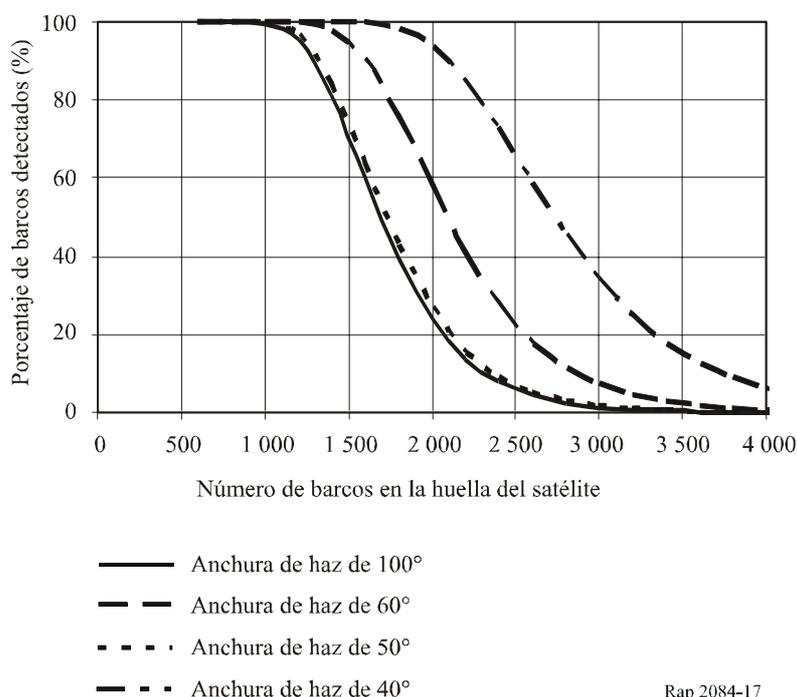
La antena de satélite AIS supuesta para el presente estudio es una antena de haz ancho (anchura de haz de 100°) con la ganancia de cresta apuntando hacia el punto subsatelital. Se examinó la utilización de una antena con una anchura de haz más pequeña a fin de determinar si ese tipo de antena podría aumentar de manera efectiva la capacidad del satélite. Al reducir la anchura de haz de la antena, disminuye el número de mensajes de barcos AIS que llegan al satélite al mismo tiempo. Esta disminución del número de mensajes AIS incrementa a su vez la probabilidad de detección, haciendo que aumente efectivamente la capacidad del satélite.

No obstante, hay dos factores que limitan el posible aumento de capacidad. En primer lugar, aunque se reduzca la anchura de haz a -3 dB, la ganancia de lóbulo lateral hacia el horizonte podría todavía ser suficiente para detectar mensajes AIS simultáneos de barcos en o cerca del horizonte. En segundo lugar, con una huella de satélite de menor tamaño, el satélite será visible desde un barco objetivo dado durante un periodo de tiempo más corto. A partir de las ecuaciones del § 5, puede deducirse que al disminuir el periodo de visibilidad del satélite tiende a disminuir la capacidad del satélite.

En la Fig. 17 se ilustran los efectos combinados de estos tres factores contrapuestos. Como puede verse, si la anchura de haz de la antena disminuye a 60° o menos, aumenta la capacidad del satélite. No obstante, este aumento de la capacidad puede implicar un gran coste, ya que una menor anchura de haz de la antena requiere de una antena de satélite más grande, lo que podría no ser compatible con el concepto de satélite LEO de pequeño tamaño.

FIGURA 17

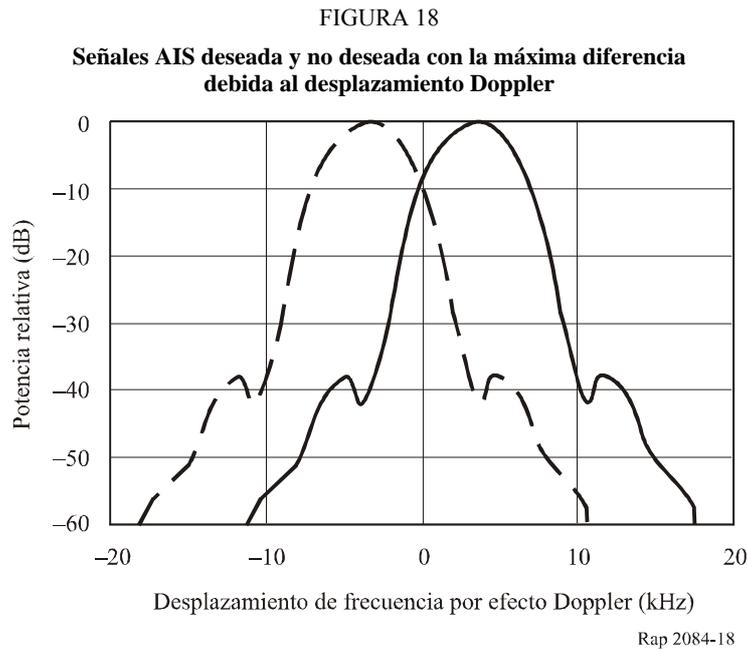
Estadísticas de detección para diversas anchuras de haz de antena de satélite
(un satélite; caso de un solo paso)



8.2 Seguimiento Doppler

Un método que se está aplicando en un satélite de demostración temprana consiste en utilizar seguimiento Doppler. Como el efecto Doppler produce desplazamientos de hasta $\pm 3,5$ kHz causados por el movimiento del satélite, la anchura de banda del receptor del satélite AIS debe ser inicialmente mayor que el valor óptimo para modulación MDMG. La mayor anchura de banda permite recibir la señal AIS deseada independientemente de las condiciones del desplazamiento Doppler, pero también permite recibir todas las señales AIS de barcos que compiten por el mismo canal, independientemente de dichas condiciones del desplazamiento Doppler.

Al combinar el seguimiento automático del desplazamiento Doppler de la señal AIS deseada con el correspondiente ajuste de frecuencia, se puede utilizar una anchura de banda menor en el receptor y, en consecuencia, lograr cierto grado de discriminación frente a las otras señales AIS de barcos que compiten por el canal y que tienen desplazamientos Doppler diferentes. Aunque no es necesario describir aquí los detalles de las técnicas de seguimiento Doppler, puede examinarse la ganancia resultante en la capacidad del satélite. La Fig. 18 muestra los espectros de emisión de radiofrecuencia típicos de dos señales MDMG de 9,6 kbit/s, una de las cuales representa una señal AIS deseada y la otra una señal que compite con ésta, pero con un desplazamiento Doppler diferente. En este ejemplo, la señal AIS deseada tiene un desplazamiento Doppler 3,5 kHz por debajo de la frecuencia central nominal y la señal no deseada tiene un desplazamiento Doppler 3,5 kHz por encima. En consecuencia, la diferencia entre las frecuencias centrales de las dos señales es de 7 kHz. Es esta diferencia entre desplazamientos Doppler la que permite una discriminación frente a otros mensajes AIS de barcos que compiten con éste.



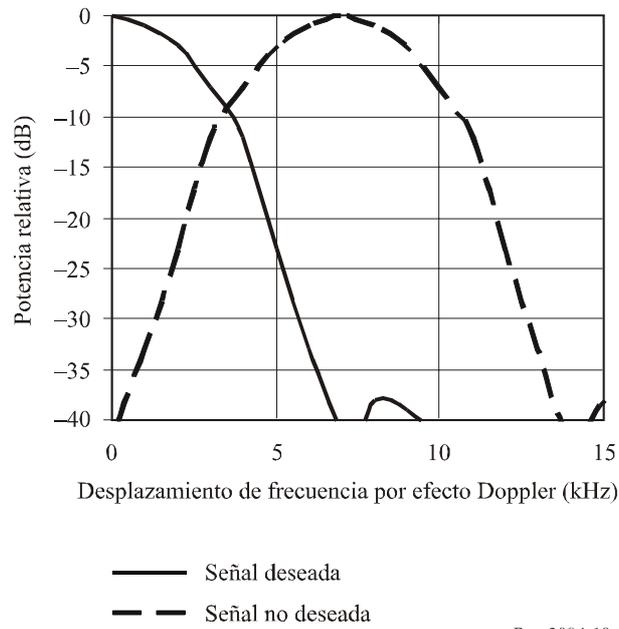
Se puede compensar el desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler de una señal dada realizando un seguimiento en tiempo real del efecto Doppler. En la Fig. 19 se muestra el mismo ejemplo anterior, en banda base, en el que se ha determinado y compensado el desplazamiento por efecto Doppler de la señal deseada, y la señal no deseada se ha separado en frecuencia el valor del desplazamiento Doppler, que en este ejemplo es 7 kHz.

Al pasar la señal anterior por un filtro paso bajo de banda estrecha, se puede reducir significativamente el nivel de la señal interferente. No obstante, el ejemplo anterior representa el caso más favorable, en el que se presenta la máxima diferencia en desplazamiento por efecto Doppler. Basándose en las distribuciones de los barcos, cabe esperar que la diferencia en desplazamiento por efecto Doppler se sitúe en cerca de 2,7 kHz. La Fig. 20 muestra la consiguiente discriminación Doppler en función de la diferencia en desplazamiento Doppler alcanzada en un sistema prototipo.

Para evaluar la efectividad de esta técnica, es necesario aplicar el método de análisis por simulación. El modelo de simulación antes descrito se amplía más para incluir un cálculo del desplazamiento por efecto Doppler para la señal AIS deseada y las señales AIS no deseadas y se reduce el correspondiente nivel de potencia en la cantidad mostrada en la Fig. 20 para un solo paso de satélite. Los resultados se presentan en la Fig. 21.

FIGURA 19

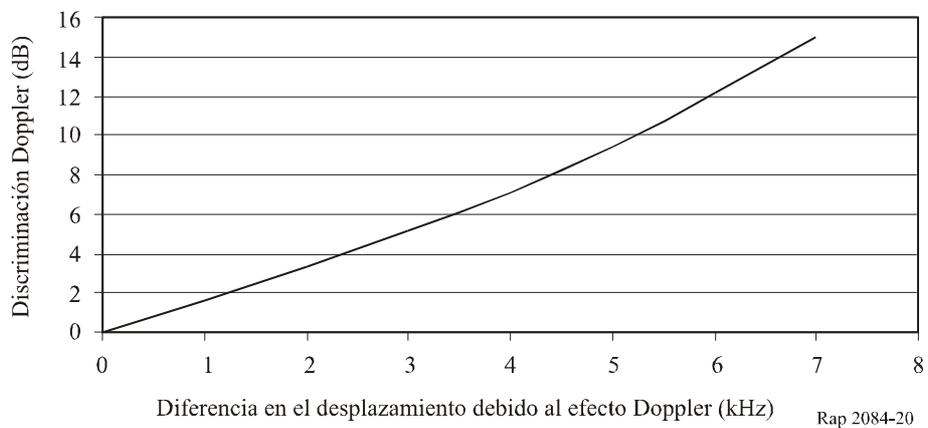
Señales AIS deseada y no deseada en banda base una vez compensado el efecto Doppler



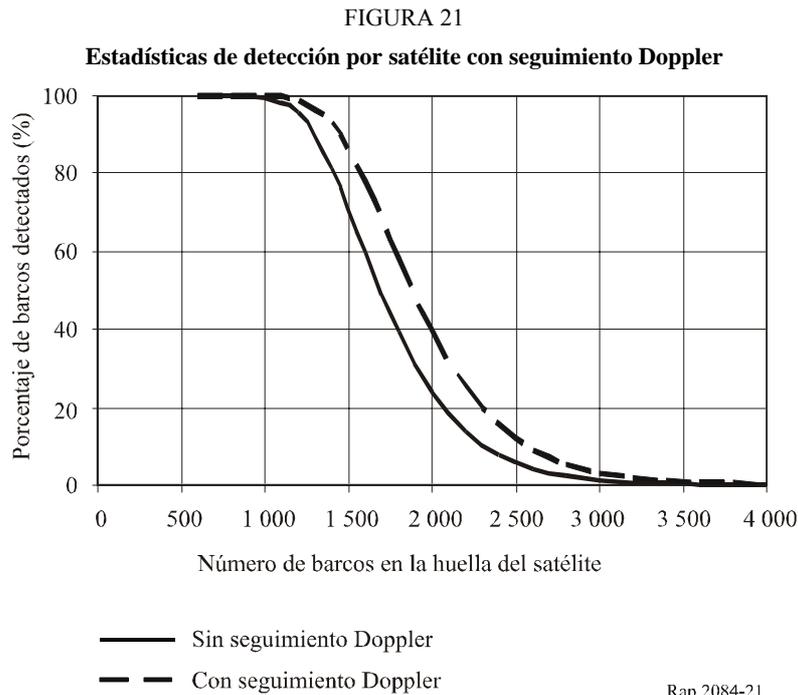
Rap 2084-19

FIGURA 20

Discriminación Doppler después del filtrado de banda angosta



Rap 2084-20

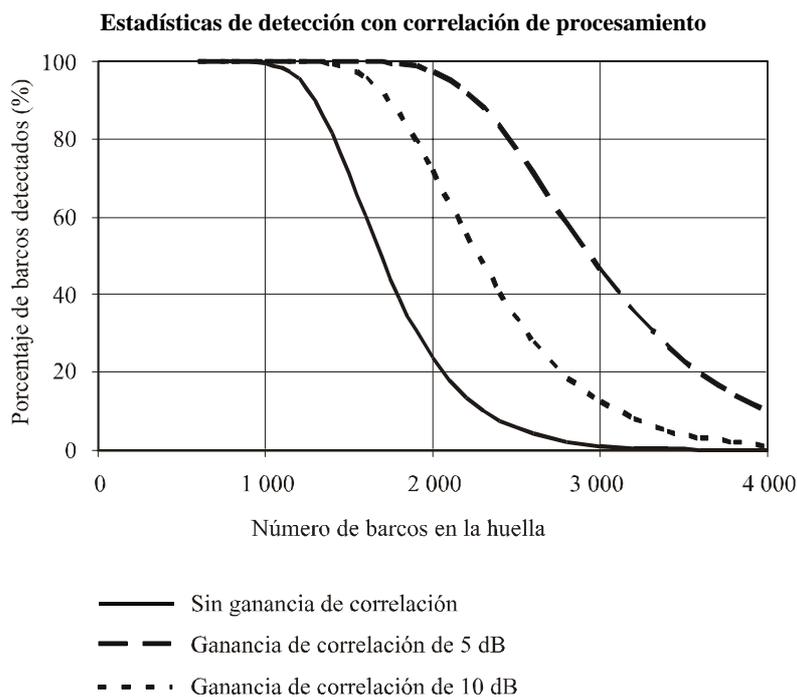


8.3 Procesamiento de correlación

Otra posible técnica que se puede usar para mejorar la capacidad del satélite consiste en modificar la arquitectura del propio satélite para incorporar procesamiento a bordo, o enviar continuamente a tierra los datos recibidos por los dos canales AIS para que sean procesados en una estación terrena. Este método aprovecha el hecho de que los mensajes AIS consecutivos transmitidos desde un barco determinado guardan un alto grado de correlación entre sí. Por ejemplo, durante el periodo de visibilidad de 13 minutos de un paso normal del satélite por la vertical, un barco determinado transmitirá cerca de 116 mensajes AIS. En este periodo, se repite idénticamente aproximadamente el 60% de los bits de estos mensajes de barcos AIS. En particular, el código de identificación ISMM del barco se repite con cada mensaje. Al correlacionar permanentemente las dos señales AIS recibidas con las copias digitalizadas de las señales recibidas en el periodo anterior de 13 minutos, se obtendría un cierto grado de ganancia de correlación. Teniendo en cuenta las velocidades de datos moderadamente bajas de las transmisiones AIS, es posible utilizar técnicas de correlación de alto volumen en paralelo que posibilitarían el procesamiento permanente en tiempo real de los datos recibidos.

Sería necesario realizar estudios adicionales para determinar el grado de ganancia de correlación posible empleando esta técnica, pero se puede estimar el efecto real sobre la capacidad de detección de AIS del satélite. Toda ganancia de correlación de la señal AIS deseada obtenida como resultado de la aplicación de esta técnica proporcionaría, dB a dB, discriminación frente a otros mensajes AIS no deseados. En consecuencia, se podrían lograr detecciones satisfactorias con relaciones D/U menores, que de otro modo no serían posibles, lo que reduce de manera efectiva el criterio de protección D/U del valor de referencia de 10 dB. Puede determinarse el efecto que produce la variación de los criterios de protección D/U en las probabilidades de detección, utilizando el modelo de simulación de detección de AIS ya descrito. En la Fig. 21a se comparan las estadísticas de detección suponiendo ganancias de correlación de 5 dB y 10 dB, respecto a la curva de referencia sin ganancia de correlación, para un solo paso de satélite.

FIGURA 21a

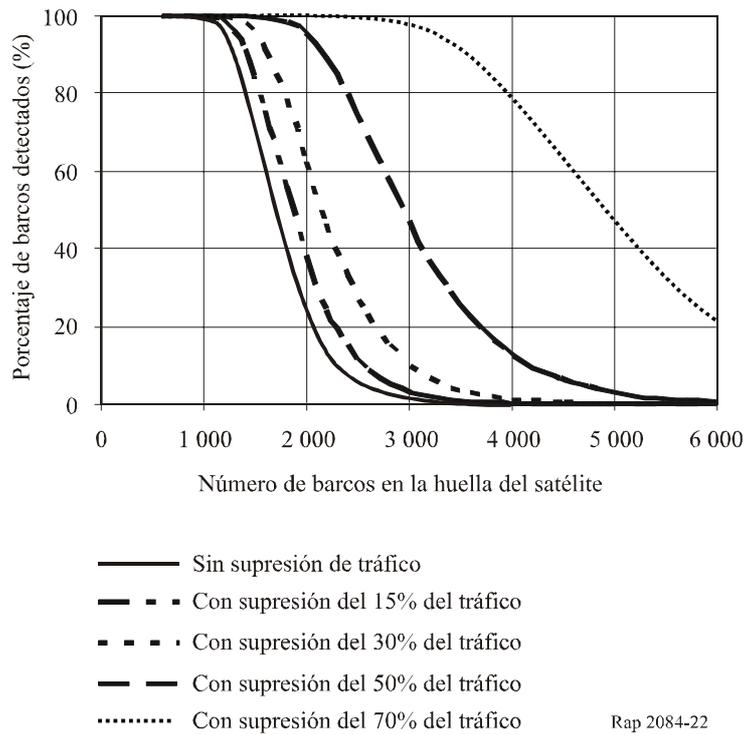


8.4 Supresión del tráfico originado en barcos costeros

La arquitectura AIS permite a las estaciones costeras AIS indicar a los barcos situados dentro de su zona de cobertura que conmuten automáticamente uno de sus canales AIS a una frecuencia alterna en la banda marítima de ondas métricas. La conmutación de frecuencia es transparente para el operador del barco y tiene un efecto mínimo sobre las funciones de comunicación AIS normales barco a barco y barco a costa. El uso rutinario de esta función en zonas costeras de tráfico intenso reduce la carga que el tráfico de barcos costeros produce sobre la detección de AIS por satélite. En consecuencia, mejoran las probabilidades de detección por satélite de mensajes AIS de barcos en el mar. Para probar este concepto se podrían modificar las estaciones costeras en la base de datos de distribución de barcos definida previamente en la Fig. 12, dejando en funcionamiento sólo el AIS 1, y realizar nuevamente el análisis de simulación. No obstante, la identificación y modificación de los barcos costeros en una base de datos de 80 000 registros sería una tarea muy ardua. Se observó que, debido al gran tamaño de la huella del satélite y a los efectos de aleatorización causados por el movimiento del satélite, se obtenía un resultado similar simplemente modificando la misma proporción de barcos de toda la base de datos y no solamente los barcos costeros. La Fig. 22 muestra las probabilidades de detección que resultan al utilizar la misma distribución no uniforme de barcos antes descrita, de la que se suprimen diversas cantidades de tráfico AIS 2, para un solo paso de satélite. La gama de valores incluye los casos en los que se indica únicamente a los barcos cercanos a zonas portuarias principales que conmuten el tráfico de AIS 2 a un canal alterno y se suprime el tráfico de todos los barcos costeros.

FIGURA 22

Estadísticas de detección por satélite suprimiendo el tráfico costero del AIS 2



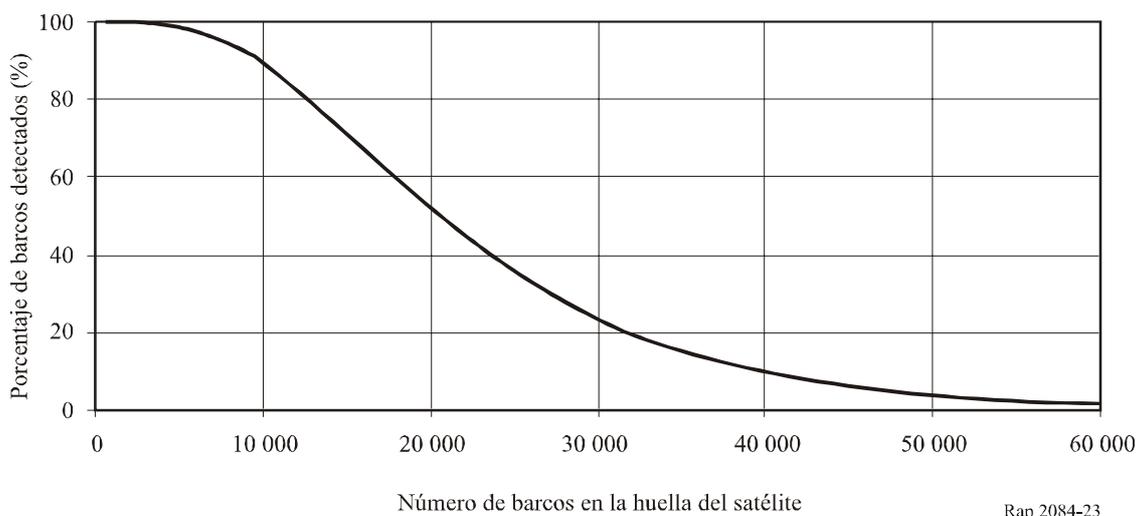
8.5 Estudios/soluciones a largo plazo

Para mejorar la detección por satélite a largo plazo, puede ser conveniente aplicar simultáneamente varias de las técnicas antes descritas.

Otro tema alternativo de estudio a largo plazo iniciado por la OMI es la posibilidad de utilizar un tercer canal AIS y una estructura de mensajes optimizada para la detección por satélite. Aún no se ha terminado de desarrollar el concepto en lo que respecta a la posible banda de frecuencias de funcionamiento y el canal concreto que utilizaría la tercera alternativa de frecuencia. Al examinar las posibles bandas o canales de frecuencia de funcionamiento, debe tomarse en cuenta el entorno de interferencia originada en los servicios ya existentes en dichas bandas para determinar la posibilidad de dar cabida a los AIS por satélite en una banda o canal dados. Independientemente de la banda de frecuencia de funcionamiento, la utilización de mensajes más cortos y periodos de transmisión más largos pueden incrementar notoriamente la capacidad de satélite. Por ejemplo, si se utiliza el método analítico antes descrito, un mensaje de 128 bits y un intervalo de 3 minutos pueden hacer aumentar la capacidad a más de 10 000 barcos en la huella del satélite, tal como se ilustra en la Fig. 23. Esta alternativa requiere que en los barcos se modifiquen las instalaciones ya realizadas y la instalación futura de equipos del AIS.

FIGURA 23

Satélite de ejemplo con un tercer canal AIS



Rap 2084-23

9 Compatibilidad con otros sistemas fijos y móviles ya existentes

Ninguna de las dos frecuencias designadas como canales dentro del servicio móvil marítimo para la función AIS terrenal están atribuidas a título exclusivo. Por el contrario, estos canales y los canales adyacentes se han atribuido y se utilizan en diversas regiones del mundo para otras aplicaciones del servicio móvil, incluidas las estaciones de correspondencia pública en la banda de ondas métricas (VPCS) del servicio móvil marítimo y los sistemas de radiocomunicaciones móviles terrestres (LMR). Se siguen instalando en número limitado VPCS en ciertas regiones geográficas a lo largo de zonas costeras. La mayoría de las administraciones ha decidido asignar estaciones LMR ubicadas a cierta distancia de las zonas costeras y de vías navegables para garantizar la compatibilidad mutua entre los servicios móvil marítimo y móvil terrestre. Sin embargo, como el haz de la antena del satélite abarca una zona geográfica grande, en el satélite se siguen recibiendo transmisiones de sistemas móviles que funcionan en el interior.

Los registros de asignación de frecuencias de que se dispone indican que la densidad actual de sistemas LMR que funcionan en estos canales AIS es menor que la de otros canales en 156-162 MHz y mucho menor que la densidad que suele existir en otras frecuencias en ondas métricas atribuidas al servicio móvil terrestre.

En los siguientes puntos se describe el funcionamiento de la detección de AIS por satélite cuando se tienen sistemas móviles cocanal y de canal adyacente. El estudio se centrará inicialmente en casos hipotéticos sencillos que utilizan una distribución uniforme de barcos, seguido por varios ejemplos en los que se emplea la distribución no uniforme de barcos más real antes descrita.

9.1 Sistemas móviles cocanal

El primer paso al investigar al funcionamiento de AIS por satélite con sistemas móviles consiste en designar los parámetros de los sistemas LMR y VPCS. En el Cuadro 10 se enumeran los parámetros técnicos representativos de los sistemas LMR y VPCS. Como puede verse en el cuadro, tanto los sistemas VPCS como los LMR pueden emplear una potencia radiada aparente (p.r.a.) hasta 14 dB mayor que la de los transmisores de AIS de los barcos que comparten estas frecuencias. Estas diferencias en p.r.a. no presentan problemas de compatibilidad entre los servicios terrenales siempre que la separación geográfica sea la adecuada. No obstante, la situación es diferente cuando se trata

de la detección de AIS por satélite. Como se describió anteriormente, la huella de un satélite LEO sobre la Tierra puede tener un radio de unos 3 281 km. Durante varios periodos de tiempo al día, los sistemas móviles cocanal dentro de este radio tendrán un trayecto de visibilidad directa con el satélite.

CUADRO 9

Parámetros técnicos característicos de VPCS y LMR

Parámetro	Estación base móvil terrestre (banda ancha)	Estación base móvil terrestre (banda estrecha)	Estación costera de correspondencia pública en ondas métricas
p.r.a de transmisión	37 a 56 dBm (suele ser 54 dBm)	37 a 56 dBm (suele ser 54 dBm)	50 dBm
Modulación	16F3E	11F3E	16F3E
Disposición de canal	25 kHz	12,5 kHz	25 kHz
Ganancia de antena	0 a 9 dBd (suele ser 6 dBd)	0 a 9 dBd (suele ser 6 dBd)	
Diagrama de antena	Omnidireccional	Omnidireccional	Omnidireccional

Como los sistemas móviles suelen funcionar con una p.r.a. más alta, la relación deseada/no deseada (D/U) de los sistemas móviles corrientes puede tomar valores negativos con tan sólo una estación VPCS o LMR cocanal situada en la huella del satélite. Un estudio preliminar indicó que, en un caso hipotético representativo, los valores de D/U durante estos periodos de visibilidad directa podrían oscilar entre -17 dB y $+5$ dB, con una media de -6 dB, valores que son todos inferiores al umbral nominal de D/U utilizado en la práctica para la detección de AIS.⁵ El valor medio de D/U de -6 dB calculado en el estudio es coherente con la potencia isotropa radiada equivalente (p.i.r.e.) 6 dB mayor utilizada en ese estudio para el transmisor del sistema móvil, comparada con un transmisor de barco AIS. En el Cuadro 10 se presentan algunos cálculos realizados en el estudio con dos pasos de satélite para un transmisor LMR tipo ubicado en la parte central de Estados Unidos de América y un barco dotado con un equipo de AIS navegando por el Océano Atlántico. Si estos transmisores del servicio móvil cocanal funcionaran en principio con un ciclo de trabajo del 100%, se llegaría inmediatamente a la clara conclusión de que la detección de AIS por satélite no es compatible con otras aplicaciones del servicio móvil cocanal.

⁵ En dicho estudio se utilizó la siguiente metodología simplificada: la p.i.r.e. móvil tenía un valor constante de 50 dBm en el hemisferio superior; la p.i.r.e. del AIS del barco tenía un valor constante de 44 dBm en el hemisferio superior; la antena del satélite tenía una ganancia constante en dirección de la Tierra; sin discriminación por polarización; se utilizó propagación en el espacio libre durante los periodos de visibilidad del satélite.

CUADRO 10

Ejemplos de cálculo de D/U para una estación terrena típica ubicada en la parte central de Estados Unidos de América, perteneciente a un satélite que se comunica con un barco navegando por el Océano Atlántico

Sistema cocanal hacia el satélite			Barco a satélite			
Acimut (grados)	Elevación (grados)	Alcance (km)	Acimut (grados)	Elevación (grados)	Alcance (km)	D/U (dB)
Paso 1						
9,1	24,8	1 838,9	316,7	1,5	3 470,7	-11,5
16,1	33,6	1 534,4	310,3	3,4	3 274,1	-12,6
28,7	44,6	1 285,6	303,1	5,0	3 115,5	-13,7
54,4	55,4	1 131,2	295,3	6,2	3 001,5	-14,5
95,4	57,0	1 112,1	286,9	6,9	2 937,7	-14,4
125,8	47,4	1 234,7	278,2	7,0	2 927,4	-13,5
140,9	35,9	1 463,6	269,7	6,5	2 971,0	-12,1
149,0	26,5	1 757,3	261,6	5,4	3 066,1	-10,8
153,8	19,1	2 087,8	254,1	3,9	3 207,5	-9,7
157,1	13,2	2 439,3	247,4	2,1	3 388,9	-8,9
159,4	8,3	2 803,1	241,4	0,1	3 603,5	-8,2
112,6	3,1	3 290,4	217,1	28,2	1 693,2	-0,2
117,9	0,5	3 556,0	208,7	21,1	1 982,8	-0,9
Paso 2						
93,9	0,5	3 568,8	184,1	65,3	1 038,1	4,7
87,0	1,5	3 464,2	63,6	89,3	956,9	5,2
79,8	2,1	3 401,9	7,3	64,9	1 043,2	4,3
72,4	2,3	3 384,5	6,7	45,9	1 262,7	2,6
65,0	2,0	3 413,0	6,6	32,7	1 559,6	0,8
57,8	1,4	3 486,3	6,7	23,3	1 897,0	-0,7
51,1	0,3	3 601,3	6,8	16,4	2 255,9	-1,9
52,6	1,5	3 477,2	3,9	18,4	2 142,9	-1,8
59,9	1,3	3 487,0	7,7	25,6	1 802,5	-0,3
67,0	0,9	3 536,0	13,9	35,0	1 493,1	1,5
73,8	0,1	3 622,7	25,7	47,3	1 239,7	3,3
144,3	4,7	3 122,4	230,7	5,0	3 098,7	-5,9
147,3	1,2	3 472,4	225,4	2,1	3 376,8	-5,8
38,5	1,1	3 514,7	358,1	8,2	2 841,9	-4,2
94,2	1,5	3 457,1	201,5	65,5	1 036,2	4,5
150,9	20,4	2 021,3	255,4	4,9	3 115,2	-9,8
154,7	14,3	2 366,4	248,4	3,1	3 288,7	-8,9
157,4	9,3	2 725,9	242,2	1,0	3 497,6	-8,2
102,9	13,2	2 445,7	261,2	30,3	1 627,0	-2,5
92,5	14,8	2 347,1	279,3	32,7	1 554,9	-2,4
81,3	15,3	2 315,9	298,2	31,7	1 584,9	-2,7
70,3	14,7	2 354,9	314,5	28,0	1 711,4	-3,2
59,9	13,1	2 460,7	326,9	22,9	1 914,9	-3,8
50,9	10,9	2 625,1	336,0	17,8	2 173,2	-4,4
43,2	8,2	2 837,4	342,7	13,1	2 468,1	-4,8

Afortunadamente, la mayoría de los sistemas de comunicaciones móviles funcionan con un ciclo de trabajo inferior al 100%. Basándose en mediciones del espectro de comunicaciones inalámbricas realizadas en Estados Unidos de América en algunas partes seleccionadas de la banda 138-174 MHz y en otras fuentes de datos, es posible clasificar globalmente los transmisores del servicio móvil como de ciclo de trabajo alto (30-100%), medio (10-30%) o bajo (<10%). En el Cuadro 11 figuran algunos ejemplos de cada una de estas categorías.

CUADRO 11

Ejemplos de ciclos de trabajo de transmisión de sistemas móviles

Ciclo de trabajo alto (30-100%)	Ciclo de trabajo medio (10-30%)	Ciclo de trabajo bajo (<10%)
Sistemas de radiobúsqueda	Repetidores comerciales/industriales de LMR de varios usuarios (es decir, repetidores comunitarios)	La mayoría de los sistemas LMR privados de un solo usuario
Canal de control de sistemas de concentración de enlaces	Sistemas de despacho de seguridad ciudadana	La mayoría de los sistemas de LMR administrativos oficiales
Sistemas de tipo radiodifusión (como los de radiodifusión de boletines meteorológicos)	Canales de comunicación de sistemas de concentración de enlaces	Algunos tipos de enlaces de control fijo de las LMR
Algunos sistemas de telemedida transportables (como los sensores sísmicos)	Canales de servicio del servicio móvil marítimo en ondas métricas	
Estaciones costeras de correspondencia pública en ondas métricas		
Algunos tipos de enlaces de control fijo de LMR		

El análisis del funcionamiento cocanal de los transmisores de las VPCS y las LMR con ciclos de transmisión menores al 100% puede realizarse de la misma forma en que se efectuó el análisis del funcionamiento dentro del sistema, antes descrito. Al igual que el análisis dentro del sistema, los parámetros técnicos fundamentales que han de considerarse son la p.i.r.e. del transmisor, el diagrama de ganancia de elevación de antena y el ciclo de trabajo del transmisor. El análisis del efecto del funcionamiento cocanal de los transmisores de las VPCS/LMR puede realizarse simplemente añadiendo los transmisores adicionales al modelo de simulación antes descrito y empleando los parámetros adecuados para la p.i.r.e., la antena y el ciclo de trabajo. En este estudio, se utilizó un sistema móvil con una p.i.r.e. de 50 dBm, polarización vertical y un diagrama de elevación de antena en coseno cuadrado. Se emplearon los parámetros del AIS descritos en el Cuadro 5. El único cambio necesario fue tener en cuenta que la mayor parte de los sistemas móviles funcionan en una sola frecuencia y no alternan de frecuencia como lo hacen los transmisores de AIS.

En las Figs. 24 a 27 se presentan los resultados para diversas circunstancias del caso hipotético de referencia que usa un solo satélite y un solo paso. La Fig. 24 muestra el porcentaje de barcos detectados si hubiese 1 000 barcos de Clase A en la huella de satélite y se utilizaran los dos canales AIS junto con sistemas móviles cocanal funcionando a diversos ciclos de trabajo. La Fig. 25 es igual, salvo que se utiliza únicamente un canal, el AIS 1 o el AIS 2, junto con sistemas móviles cocanal. La Fig. 26 presenta un tercer ejemplo en el que los ciclos de trabajo de los sistemas móviles cocanal están distribuidos de forma desigual en el AIS 1 y el AIS 2. En el ejemplo de la Fig. 27, el satélite funciona a plena capacidad con 1 415 barcos en el haz principal (es decir, se detecta el 80% de los barcos) y los sistemas móviles cocanal están compartiendo uno solo de los canales AIS. La Fig. 28 es similar a la Fig. 27, salvo que es para el caso hipotético de seis satélites y un periodo de observación de 12 horas. En el Cuadro 12 se resumen los criterios utilizados para elaborar las Figs. 24 a 28.

CUADRO 12

Resumen de los criterios utilizados para elaborar las Figs. 24 a 28

Figura	Nº de satélites	Periodo de observación	Nº de barcos en la huella	Ciclo de trabajo de los sistemas móviles en el AIS 1	Ciclo de trabajo de los sistemas móviles en el AIS 2
24	1	Un solo paso	1 000	Varía ⁽¹⁾	Varía
25	1	Un solo paso	1 000	Varía	Sin sistemas móviles
26	1	Un solo paso	1 000	Varía	Todos al 10%
27	1	Un solo paso	1 415 ⁽²⁾	Varía	Sin sistemas móviles
28	6	12 horas	2 381 ⁽²⁾	Varía	Sin sistemas móviles

⁽¹⁾ Varía: Todos los sistemas móviles cocanal en la huella de satélite operan con el ciclo de trabajo indicado en la figura correspondiente.

⁽²⁾ El satélite funciona a plena capacidad (definida como la detección del 80% de los barcos) para el caso hipotético dado.

FIGURA 24

Estadísticas de funcionamiento de la detección por satélite con sistemas móviles cocanal (igual funcionamiento cocanal en cada canal AIS)

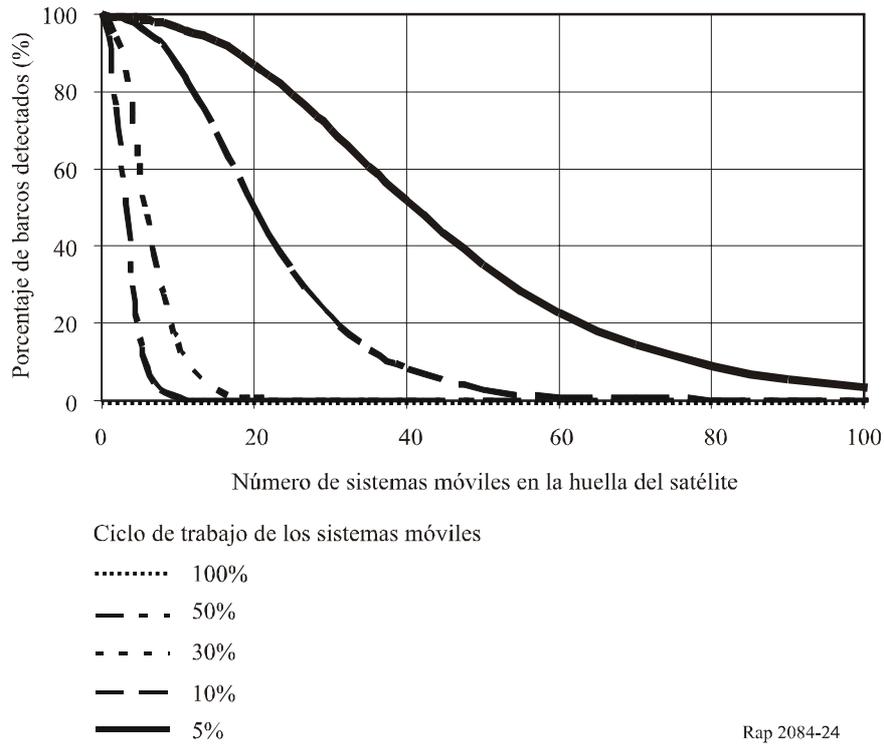


FIGURA 25

Estadísticas de la detección por satélite en presencia de sistemas móviles cocanal (funcionamiento cocanal en uno solo de los canales AIS)

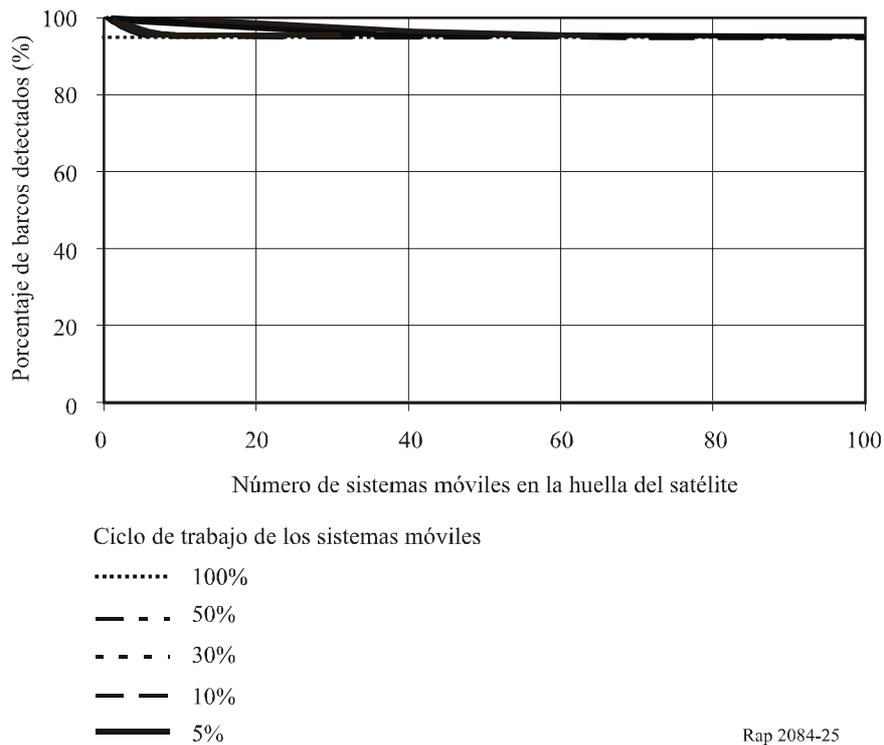


FIGURA 26

Funcionamiento de la detección por satélite en presencia de sistemas móviles cocanal (ciclo de trabajo al 10% en uno solo de los canales)

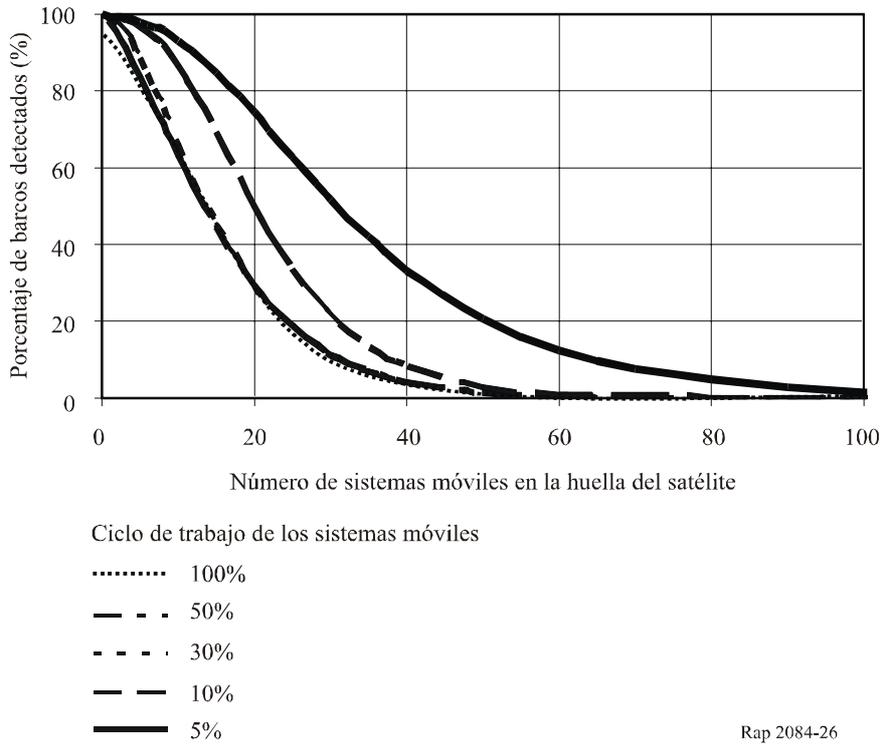


FIGURA 27

Funcionamiento de la detección por satélite en presencia de sistemas móviles cocanal (el satélite funciona a plena capacidad (detección del 80%); funcionamiento cocanal en un canal AIS)

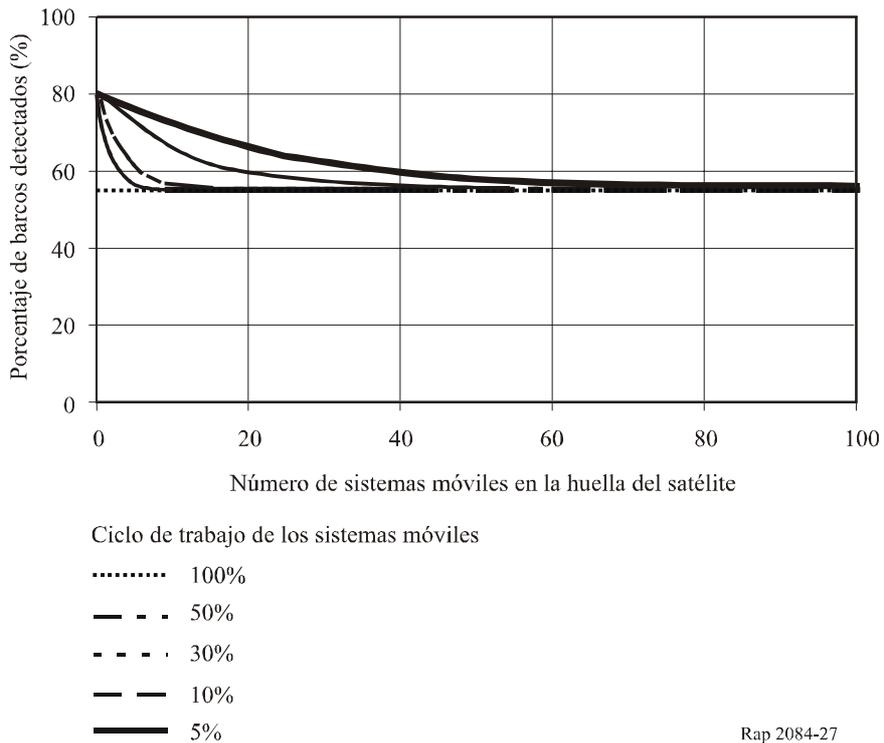
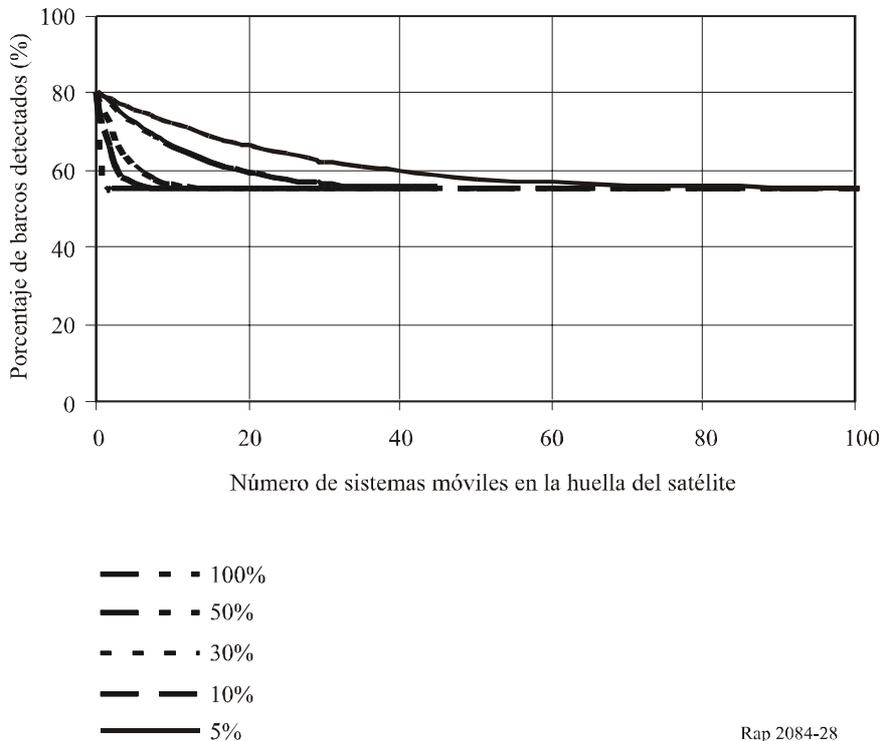


FIGURA 28

**Funcionamiento de la detección por satélite en presencia de sistemas móviles cocanal
(el satélite funciona a plena capacidad (detección del 80%);
funcionamiento cocanal en un solo canal AIS;
caso hipotético de seis satélites)**



Los ejemplos de las anteriores figuras ilustran el funcionamiento de la detección por satélite bajo diversas hipótesis. Dada la naturaleza multidimensional de estas curvas, no es práctico abordar todos los casos posibles. En algunas administraciones, las circunstancias de la compartición son diferentes para las dos frecuencias empleadas por los AIS. Para dichas situaciones, las Figs. 27 y 28 ilustran el caso extremo en que el AIS comparte uno solo de los canales AIS y el otro lo utiliza a título exclusivo. En los casos hipotéticos de un solo satélite y de seis satélites, estas dos figuras indican que un número limitado de sistemas móviles cocanal de bajo ciclo de trabajo funcionando en la huella de satélite tiene un efecto muy pequeño sobre el funcionamiento de la detección de AIS por satélite. Para un número mayor de sistemas móviles cocanal en la huella de satélite, todavía es posible detectar los AIS por satélite, pero con un porcentaje menor de barcos detectados.

9.2 Compatibilidad con sistemas móviles en canal adyacente

Al igual que sucede con los sistemas de comunicaciones móviles, la compartición con sistemas de canal adyacente es también un factor que se debe considerar. Es sabido que las operaciones por satélite deben tener en cuenta la existencia de sistemas de canal adyacente que funcionan de conformidad con requisitos existentes de emisiones fuera de banda.

En el presente estudio es necesario abordar dos casos hipotéticos:

Caso 1: la compatibilidad, teniendo en consideración los transmisores AIS y los receptores de sistemas móviles de canal adyacente, y

Caso 2: la compatibilidad, teniendo en consideración los transmisores de sistemas móviles de canal adyacente y el receptor de satélite.

El primer caso no corresponde, desde luego, a una situación nueva y existe independientemente de la detección de AIS por satélite. Esto se examinó y se documentó en un informe detallado de medición y análisis divulgado públicamente en Estados Unidos de América.⁶ En el estudio se consideró el caso más desfavorable de una señal AIS (intervalo de transmisión de 2 segundos) y receptores de sistemas móviles que funcionan tanto en el modo vocal con frecuencia modulada analógica (FM) como en el modo de datos digitales. El estudio llegó a la conclusión de que en el modo vocal FM la degradación de la calidad de funcionamiento era mínima y no resultaba afectado el funcionamiento normal del sistema móvil si existía una separación de frecuencias de 25 kHz y las antenas estaban distanciadas al menos 3 metros. El estudio también llegó a la conclusión de que para garantizar un funcionamiento compatible en el modo de datos digitales, era necesario utilizar corrección de errores en recepción en el receptor móvil. Estos resultados son válidos para cualquier par de canales adyacentes de la banda marítima móvil de 156-162,025 MHz.

El segundo caso es exclusivo de la detección de AIS por satélite. Al igual que sucede en el funcionamiento cocanal, existirán otros sistemas móviles funcionando en canales adyacentes a los utilizados por el AIS. Los tres canales adyacentes a AIS 1 y AIS 2 son 161,950 MHz, 162,000 MHz y 162,050 MHz. Al abordarse las consideraciones sobre canales adyacentes, se introducen otras dimensiones adicionales en el estudio; a saber, la distribución de sistemas móviles en los cinco canales y el grado de rechazo de canal adyacente posible en el receptor del satélite. El principal objetivo de este examen de canal adyacente consiste en aislar los efectos específicos que el funcionamiento de sistemas móviles en canales adyacentes causa sobre la detección de AIS por satélite.

Rechazo de canal adyacente: Para satisfacer las especificaciones pertinentes de la CEI, es necesario que el rechazo de canal adyacente de los receptores AIS convencionales a bordo de barcos sea de al menos 70 dB. No obstante, los receptores de satélites AIS deben optimizarse para lograr una máxima sensibilidad y podrían no alcanzar este nivel de funcionamiento de canal adyacente. A efectos de este estudio, se consideran valores de rechazo de canal adyacente de 30 dB, 40 dB y 50 dB.

Distribución de los sistemas móviles: Como las distintas administraciones pueden usar los cinco canales en cuestión de diversas formas en lo que respecta a los sistemas móviles, el número de estos sistemas que funcionan en cada uno de los canales puede variar ampliamente dependiendo de la región geográfica. Sin embargo, el presente estudio no examina la diversidad en utilización de los sistemas móviles en los tres canales adyacentes. En este estudio, se supone que el número de sistemas móviles funcionando en los canales adyacentes a los AIS y que se encuentran en el interior de la huella de satélite es igual en los tres canales.

Distribución geográfica de los barcos dotados con equipos AIS: Dada la naturaleza multidimensional de los temas abordados, los casos que se tratan más adelante consideran sólo una densidad única de barcos, concretamente 1 000 barcos de Clase A dotados con AIS, distribuidos uniformemente en el interior de la huella de satélite.

Resultados: El efecto que los sistemas móviles en canales adyacentes ejercen sobre la calidad de funcionamiento de la detección de AIS por satélite se examinó haciendo uso del modelo de simulación ya descrito. La metodología de análisis empleada consistió en reducir, dB a dB, la

⁶ Roberts, Melvin S., y otros [febrero de 2004] EMC Analysis of Universal Automatic Identification and Public Correspondence Systems in the VHF Maritime Band. Joint Spectrum Center, Annapolis, Maryland, Estados Unidos de América.

potencia de transmisión de los sistemas móviles de canal adyacente en una cantidad igual al rechazo de canal adyacente indicado en el receptor del satélite. El Cuadro 13 presenta los resultados del análisis indicando el porcentaje de barcos detectados en función de diversos parámetros. En el cuadro, el máximo número de transmisores móviles estudiados en cada canal adyacente es de 240 y el máximo ciclo de trabajo de transmisión empleado es el 30%.

CUADRO 13

Resultados del estudio de canal adyacente*

Nº de barcos	Nº de sistemas móviles en AIS 1 y 2	Nº de sistemas móviles en canales adyacentes ⁽¹⁾	Ciclo de trabajo de los sistemas móviles	Rechazo de canal adyacente	Porcentaje de barcos detectados
1 000	0	0	–	–	100%
1 000	0	40	5%	30 dB	100%
1 000	0	80	5%	30 dB	97%
1 000	0	160	5%	30 dB	70%
1 000	0	240	5 %	30 dB	15%
1 000	0	20	10%	30 dB	100%
1 000	0	40	10%	30 dB	90%
1 000	0	80	10%	30 dB	60%
1 000	0	160	10%	30 dB	0%
1 000	0	Por determinarse	30%	30 dB	Por determinarse
1 000	0	Por determinarse	30%	30 dB	Por determinarse
1 000	0	240	5%	40 dB	100%
1 000	0	240	10%	40 dB	100%
1 000	0	160	30%	40 dB	100%
1 000	0	240	30%	40 dB	80%
1 000	0	240	30%	50 dB	100%

* En todos los casos examinados se supuso una distribución geográfica uniforme de barcos dotados de AIS y de sistemas móviles situados en el interior de la huella de la antena del satélite.

⁽¹⁾ Número de sistemas móviles en cada uno de los tres canales adyacentes a AIS 1 y AIS 2.

Como era de esperarse, los resultados de los análisis indican que la calidad de funcionamiento de la detección de AIS por satélite en presencia de sistemas móviles de canal adyacente depende en gran medida del rechazo de canal adyacente disponible en el receptor del satélite y del ciclo de trabajo de transmisión de los sistemas móviles. El análisis muestra que con apenas 30 dB de rechazo de canal adyacente, la calidad de la detección de AIS por satélite puede verse degradada en presencia de tan sólo un número moderado de sistemas móviles de canal adyacente. Con 40 dB de rechazo de canal adyacente, la detección de AIS por satélite es más resistente ante la presencia de sistemas móviles de canal adyacente. Con 50 dB de rechazo de canal adyacente, no se detectó ninguna disminución de la calidad de funcionamiento en la gama de parámetros estudiada.

10 Resumen

El presente Informe introduce el concepto de detección de mensajes AIS por satélite para el sistema AIS terrenal empleado en la actualidad y demuestra, partiendo de una serie de hipótesis, la viabilidad técnica y la capacidad de los receptores de los satélites del AIS para funcionar en un entorno compuesto por un gran número de barcos dotados de equipos AIS. Se incluyeron cinco casos hipotéticos en los que se definía el número de satélites dotados de equipos AIS (uno o seis satélites) y el periodo de tiempo permitido para actualizar la ubicación de los barcos (de un solo paso de satélite a 12 horas). En estos casos hipotéticos, la capacidad de satélite (definida para la detección del 80% de los barcos) osciló entre 1 415 y 2 380 barcos. Los análisis realizados utilizando una distribución representativa mundial de barcos dotados con AIS muestran que se espera que las densidades de barcos en muchas regiones del mundo sean superiores a estos límites de capacidad de AIS calculados.

Se investigaron cuatro posibles técnicas para aumentar la capacidad de satélite, cada una de las cuales mejora la capacidad en hasta el 175%.

El estudio abordó el funcionamiento cocanal entre los dos canales designados para AIS y otros sistemas de comunicaciones móviles. Debido a la gran cobertura de la huella de la antena de satélite, los sistemas móviles que funcionan a varios miles de kilómetros de vías navegables pueden afectar a la calidad de funcionamiento de la detección de AIS por satélite. Los resultados indican que la detección de AIS por satélite puede coexistir con un número limitado de sistemas móviles cocanal de ciclo de trabajo reducido. Los resultados también muestran que la detección de AIS por satélite es mucho más resistente cuando se comparte sólo uno de los canales del AIS con sistemas móviles.
