

# Aplicación de la tecnología WiMAX a entornos marinos

José Carlos Reyes Guerrero<sup>1</sup>, Miguel Bruno Mejías<sup>2</sup>, Abdellatif Medouri<sup>3</sup>, Rida El Messari<sup>3</sup> and Luis Antonio Mariscal Rico<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias Náuticas, Puerto Real (Cádiz), España, {josecarlos.reyes, luis.mariscal}@uca.es

<sup>2</sup> Departamento de Física Aplicada, Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Puerto Real (Cádiz), España, miguel.bruno@uca.es

<sup>3</sup> Département de Statistique et Informatique, Université Abdelmalek Essaâdi, Faculté Polydisciplinaire, Route de Martil, Tétouan, Maroc, {amedouri, rida\_mes}@uae.ma

**Abstract.** Wireless communications above the sea surface are affected by phenomena like shadowing and multipath. The system of buoys used in some scientific marine researches has to send and receive information by means of wireless communications, e.g. for water monitoring purposes. They usually use mobile telecommunication networks, when the system is inside coverage, or satellite links, with low speed data transmission. The VHF (Very High Frequency) systems have appeared as an alternative to the previous ones, but they present some problems that limit its performance. A research project between the universities of Cadiz and Abdelmalek Essaâdi tries to advance in the development of new technological applications to improve the marine communications. Particularly, the 5.8 GHz band (WiMAX unlicensed band in Spain) is used and a propagation channel measurement campaign in maritime environments was carried out to study a link between a buoy and a ship. It applies to conditions not well-covered by similar studies. This work is helpful to deploy WiMAX systems offshore.

*Keywords:* propagation channel measurements, WiMAX, maritime environment, water monitoring.

## 1. Introducción.

Recientemente, múltiples estudios han identificado la existencia de una demanda creciente de servicios de telecomunicaciones en escenarios marítimos, en aplicaciones de muy diversa índole. Algunas de las aplicaciones que están adquiriendo un gran interés por parte de la comunidad científica son las relacionadas con la monitorización de múltiples parámetros físicos de las aguas marinas. Aunque la gama de parámetros de interés científico puede llegar a ser muy amplia, el sistema de monitorización de dichos parámetros suele ser bastante similar de unos casos a otros. Dichos sistemas están constituidos básicamente por un conjunto de boyas provistas de los sensores adecuados –para medir localmente los parámetros de interés– y por un subsistema de radiocomunicación que se encarga de transmitir los datos obtenidos a una estación central de control o centro de procesamiento de datos. Esta estación de control puede estar en tierra o a bordo de un buque. Este último caso está adquiriendo especial relevancia, por ejemplo en aplicaciones donde la monitorización de los valores medidos de

contaminación de las aguas marinas debe realizarse en tiempo real y desde estaciones de control instaladas a bordo de buques hidrográficos.

Las tecnologías inalámbricas utilizadas actualmente en aplicaciones marinas conllevan una serie de dificultades e inconvenientes para la transmisión de datos. Este hecho está propiciando la búsqueda de nuevas soluciones tecnológicas que mejoren el rendimiento de los radioenlaces que discurren, total o parcialmente, sobre plataformas marinas o fluviales. Las tecnologías utilizadas hasta el momento son, por una parte, las propias de los sistemas de comunicaciones móviles terrestres y de los sistemas de comunicaciones por satélite –propiedad de compañías y consorcios de telecomunicaciones– y, por otra, las empleadas en los enlaces propietarios –propiedad de los usuarios– terrestres en VHF (Very High Frequency) [1]. Los inconvenientes más relevantes del uso de redes públicas gestionadas por operadoras de telecomunicaciones, además de la dependencia operativa de las mismas, son la reducida capacidad de transmisión de datos de que se dispone –como en el caso de sistemas GSM/GPRS y enlaces de satélite–, y el coste del servicio. En el caso del sistema móvil terrestre, además, existe una limitación de la cobertura de utilización del servicio a tan sólo unas pocas millas de la costa. Los sistemas propietarios basados en VHF no sólo presentan la limitación de un ancho de banda de transmisión muy reducido, sino que requieren sistemas radiantes con tamaños, pesos y perfiles excesivos; por consiguiente, pueden llegar a complicar la operación de los sistemas marinos dotados con esta tecnología.

La tecnología WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), basada en la familia de estándares IEEE 802.16 [2], [3], puede ser una buena opción debido –principalmente– a su alta tasa de transmisión de datos (hasta decenas de Mbps) y a su relativo largo alcance (hasta varias decenas de Km). Dentro de las bandas de frecuencias propuestas en el estándar IEEE 802.16, resulta de particular interés la banda de 5.8 GHz, por tratarse de frecuencias reservadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (uso común) en España.

Para diseñar y planificar nuevos sistemas de radiocomunicaciones es preciso investigar previamente el comportamiento de las ondas de radio cuando se propagan por el canal físico de transmisión. La obtención de un modelo de comportamiento para la propagación de señales radio permite posteriormente la predicción de los valores de los parámetros más relevantes de un enlace: cobertura, ancho de banda de transmisión, etc. La elección del esquema final del sistema de radiocomunicación se hace con la mirada puesta en la optimización de dichos parámetros. Hasta la fecha se han realizado numerosos estudios, tanto teóricos como experimentales, en áreas geográficas terrestres densamente pobladas y bajo diferentes condiciones de propagación. Algunos ejemplos son [4] y [5]. Sin embargo, hay muy pocos estudios realizados en escenarios marítimos cercanos a la costa o en alta mar, donde –en teoría– el entorno de propagación puede imponer severos condicionantes a la transmisión de señales radio. Dichos escenarios se caracterizan por un alto grado de variabilidad de sus condiciones de propagación, atendiendo a la dinámica de las aguas y de los objetos inmersos en ellas. Como consecuencia de ello, pueden esperarse elevadas atenuaciones medias del nivel de señal y profundos desvanecimientos de dicho nivel distribuidos a lo largo del canal radioeléctrico.

Se hacen necesarios, pues, estudios teóricos y ensayos experimentales de propagación que permitan determinar modelos fiables para el radiocanal marino, de modo que ayuden a predecir el alcance de cobertura de los sistemas y a identificar mejoras en el rendimiento de los radioenlaces, por ejemplo, mediante la aplicación de técnicas de diversidad y/o de sistemas de antenas inteligentes. En [6], [7] y [8] se han llevado a cabo estudios similares. Sin embargo, ninguno de ellos estudia el canal de

propagación presente en un enlace entre una boya y una embarcación. En cambio todos ellos se centran en el enlace entre una estación base ubicada en costa y una embarcación.

Este artículo explica los resultados obtenidos tras una serie de ensayos preliminares de propagación realizados en la Bahía de Cádiz y compara los valores medidos de la pérdida básica de propagación con los esperados por el modelo teórico utilizado. Estas medidas son de especial interés para determinar el balance de potencias requerido para conseguir el alcance deseado entre una boya y su estación de control a bordo de un buque. Además, este estudio es útil para desplegar sistemas basados en la tecnología WiMAX en escenarios marítimos, así como para obtener especificaciones de diseño de subsistemas de comunicaciones en esta tecnología.

Las universidades de Cádiz (España) y Abdelmalek Essaâdi (Marruecos) participan en un proyecto financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) en el área de tecnología electrónica y de las comunicaciones. El proyecto, cuyo plazo de ejecución concluye en el año 2012, pretende avanzar en el desarrollo de nuevos subsistemas de comunicaciones –basados en tecnologías inalámbricas– que mejoren las prestaciones ofrecidas por los existentes en la actualidad. El objetivo de dicho proyecto es realizar y validar experimentalmente un subsistema de comunicaciones inalámbricas prototipo, que permita la conexión en tiempo real y de modo fiable entre la estación de control y seguimiento (instalada en la costa o en un buque) de un sistema de boyas marinas y los sistemas de recogida de datos (posición, salinidad, corrientes, etc.) instalados en el interior de dichas boyas.

## **2. Descripción del entorno de propagación bajo estudio y del sistema de medida propuesto.**

### *2.1. Entorno de propagación y ubicaciones de las medidas.*

El escenario de propagación elegido es el entorno de la bahía de Cádiz. Dicho entorno se consideró idóneo para la realización de los ensayos por su variada topografía, característica que permite considerar una gran diversidad de situaciones en las que la propagación de una señal radio puede ser medida. A lo largo de la costa se ubican varios clubes náuticos deportivos y un gran puerto comercial de transporte de pasajeros y mercancías, que generan un continuo tráfico de embarcaciones –de diferentes tamaños y formas– siguiendo rutas aparentemente aleatorias. Eligiendo adecuadamente la ubicación del sistema de medida, es posible tener en cuenta, además, la influencia en la propagación de segmentos de tierra densamente poblados y con instalaciones y edificios de tamaño considerable.

Las medidas se realizaron en un día soleado. La temperatura se mantuvo entre 9 y 10°C, la humedad relativa alcanzó el 95%, el estado de la mar fue de marejadilla (lo que causó un continuo balanceo de la boya), y la presión atmosférica se situó en los 759 mm. Además, se registraron rachas de viento de fuerza 5 y 6. Las condiciones meteorológicas descritas influyeron en la dinámica de la boya, haciendo que las medidas se llevasen a cabo en condiciones relativamente adversas, desde el punto de vista de las comunicaciones.

Para la realización de las medidas se contó con dos buques de investigación y con una boya marina. La transmisión se realizó desde la boya fondeada en una ubicación fija, y la recepción se llevó a cabo desde un buque hidrográfico que navegaba siguiendo una ruta previamente seleccionada. La ubicación de la boya y la ruta seguida por el buque durante los ensayos de propagación se muestran en la Figura 1. En dicha figura también se observa una vista aérea del entorno general en el que se desarrollaron los ensayos.



Fig. 1 Escenario de propagación bajo estudio: vista aérea de la ciudad de Cádiz y su entorno (izquierda), y posición fija de la boya y ruta llevada a cabo por el buque (en rojo) durante las medidas (derecha).

## 2.2. Sistema de medida.

El método de medida empleado consistió en la transmisión y recepción de una portadora continua (sin modular) de frecuencia 5.8 GHz y potencia radiada 1 W. El transmisor se ubicó en una de las embarcaciones disponibles, mientras que la antena transmisora fue instalada en la boya –que quedó fondeada a varios metros de distancia de dicha embarcación– y alimentada a través de un cable coaxial desde el transmisor. La posición de la boya se estableció mediante GPS (*Global Positioning System*). Las alturas de las antenas, sobre el nivel medio del mar, de la boya y del buque fueron de 2 y 13 metros, respectivamente.

El transmisor se basó en un generador de señal de microondas a cuya salida se conectó un amplificador de ganancia 30 dB, también de microondas. La señal de salida de dicho amplificador –una onda sinusoidal de 5.8 GHz con un nivel de 30 dBm– se acopló a la antena a través de 15 m de cable coaxial de bajas pérdidas protegido por una manguera convenientemente sellada para evitar mojaduras. La antena transmisora utilizada fue de tipo lineal, con polarización vertical, diagrama de radiación omnidireccional en el plano horizontal y ancho de haz de 7° en el plano vertical. La ganancia de dicha antena fue de 9 dBi.

El receptor, basado en un analizador vectorial de señal de microondas, se ubicó en la segunda embarcación. La antena receptora –idéntica a la transmisora– se instaló próxima al receptor y se conectó con éste a través de 20 m de cable coaxial de bajas pérdidas. Se utilizó un ordenador para controlar el proceso y registrar los datos obtenidos de las medidas realizadas. Dicho ordenador se conectó al analizador vectorial de señal y al GPS de la embarcación, que suministra información de posición y tiempo cada segundo. De este modo, los datos relativos a los niveles de señal recibidos se sincronizaron cada segundo con las posiciones GPS, permitiendo con ello el cálculo de distancia y potencia media de señal (promediada a intervalos de un segundo) para cada posición relativa entre transmisor y receptor.

## 3. Resultados.

El modelo básico propuesto para simular la propagación en entornos marítimos es el denominado de “dos rayos” [9], [10]. Este modelo supone que la propagación de la señal radio se produce siguiendo dos trayectorias o rayos: uno directo, siguiendo el eje imaginario que une los centros de radiación de las antenas transmisora y receptora, y otro reflejado en la superficie del mar. La pérdida básica de propagación que predice este modelo se describe en la ecuación (1). Según este modelo, es posible

calcular el nivel de atenuación de la señal transmitida en una ubicación determinada conociendo los siguientes datos: distancia entre el transmisor y receptor ( $d$ ), longitud de onda de transmisión ( $\lambda$ ), diferencia de fase debida a la diferencia de los recorridos de los rayos directo y reflejado ( $\Delta$ ) –que a su vez depende de las alturas de las antenas transmisora y receptora respecto del nivel del mar– y módulo y fase del coeficiente de reflexión en el mar,  $|R|$  y  $\beta$  respectivamente. El coeficiente de reflexión depende asimismo de la polarización de onda, del ángulo de incidencia del rayo reflejado en la superficie del mar y de las características eléctricas del agua (conductividad y permitividad relativa).

$$l = \frac{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2}{1 + |R|^2 + 2|R|\cos(\Delta + \beta)} \quad (1)$$

Para validar el modelo teórico propuesto se han realizado las medidas de propagación descritas en el Apartado 2. En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos, tanto de las simulaciones (en las que se han particularizado los datos según la configuración del sistema experimental), como de las medidas realizadas. En dicha figura se representa la pérdida básica de propagación,  $l$ , en decibelios (dB) en función del logaritmo de la distancia entre transmisor y receptor. En cuanto a las simulaciones teóricas, se han representado la ecuación (1) –para el caso de polarización vertical y horizontal– y el modelo de propagación en espacio libre.

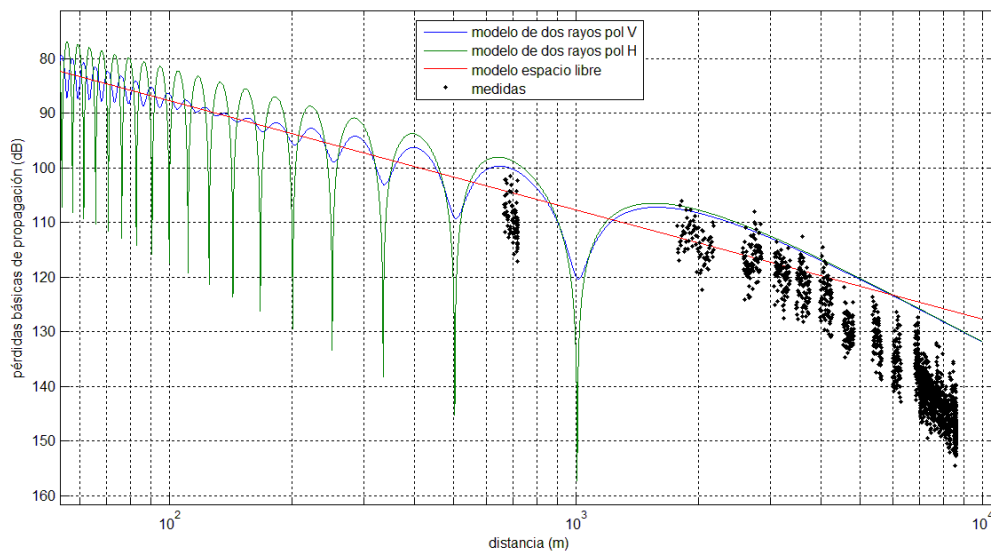


Fig. 4 Medidas experimentales junto con las simulaciones teóricas: pérdida básica de propagación en función de la distancia TX-RX.  $f=5.8$  GHz,  $h_{tx}=2$  m,  $h_{rx}=13$  m (rango: 50-10000 m)

En el caso de las medidas experimentales, se calcula la pérdida básica de propagación a partir de las medidas de potencia de la señal recibida. Se ha utilizado la expresión dada por la ecuación (2), donde  $p_t$  representa la potencia de la señal transmitida,  $g_t$  y  $g_r$  las ganancias de la antena transmisora y receptora, respectivamente,  $l_c$  las pérdidas adicionales en cables y conectores, tanto del sistema transmisor como del receptor,  $p_r$  la potencia media local medida, y  $l$  la pérdida básica de propagación propiamente dicha. Esta pérdida viene afectada por la variabilidad de la posición de los centros de radiación de ambas antenas debido al movimiento aleatorio de las plataformas que las sustentan.

$$l = \frac{p_t g_t g_r}{l_c p_r} \quad (2)$$



A la luz de los resultados experimentales, podemos concluir que las medidas realizadas se adaptan bastante bien al modelo teórico simulado. No obstante, se debe considerar que el modelo teórico no tiene en cuenta la diversidad de condicionantes que impone un escenario real de propagación, y que, por lo tanto, dicho modelo tendrá ciertas limitaciones. El modelo teórico no contempla la presencia de obstáculos, salvo el que representa la propia superficie marina. Así, la presencia de olas, buques, boyas, línea costera, etc., provoca, en general, un entorno multitrayecto –con más de dos trayectos– para la señal transmitida que puede llegar a originar desvanecimientos severos. Asimismo, estos obstáculos pueden causar obstrucciones totales o parciales de la línea de visión directa. La propia dinámica natural del oleaje hace que las alturas relativas de las antenas no sean constantes y la reflexión no se produzca sobre una superficie lisa, dando lugar a una dispersión aleatoria de la señal incidente en puntos de la superficie del mar. Además, debido a la misma causa, el apuntamiento de las antenas no será el óptimo en todo momento. Algunos aspectos destacables de la comparación entre los resultados teóricos y los experimentales son:

- En el modelo teórico, la recta de regresión de la pérdida básica de propagación tiene una pendiente de 20 dB por década para ambas polarizaciones –al igual que predice el modelo de espacio libre– hasta una distancia que viene dada aproximadamente por la ecuación (2) [10]. Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de transmisión, y  $h_t$  y  $h_r$  son las alturas de las antenas transmisora y receptora, respectivamente. Para las condiciones de la medida, esta distancia es aproximadamente de 6 Km. Los resultados de las medidas realizadas verifican este comportamiento, obteniéndose una pendiente de 24 dB por década.

$$d = 12 \frac{h_t h_r}{\lambda} \quad (2)$$

- A partir de esta distancia, el modelo teórico indica que la pendiente de la recta de regresión de la pérdida básica de propagación toma el valor de 40 dB por década para ambas polarizaciones, y las pérdidas introducidas por el canal son superiores a las existentes en espacio libre. Las medidas realizadas a partir de 6 Km de distancia entre transmisor y receptor confirman los resultados teóricos. En este tramo de medidas, el trayecto recorrido por la onda se vio bloqueado en su mayor parte por los objetos que aparecieron a medida que la costa fue interponiéndose entre transmisor y receptor: edificios, línea de costa, grandes estructuras de conducción de electricidad, viables, etc. Esta fuerte atenuación por obstrucción explica la divergencia observada entre la tendencia esperada para la pérdida básica de propagación teórica (40 dB) y la calculada a partir de los datos obtenidos (87 dB).
- A distancias cortas el efecto del mal apuntamiento entre antenas es apreciable. Este hecho se observa al comparar los resultados de la simulación y los datos obtenidos en las medidas en el rango de distancias en torno a 700 metros.
- A 4700 metros, aproximadamente, se aprecia una atenuación adicional, presumiblemente debida a la obstrucción parcial de la línea de visión directa por parte de una embarcación en movimiento o de un obstáculo de gran tamaño.
- Dado que las medidas han sido promediadas en intervalos temporales de un segundo, el desvanecimiento temporal rápido ha sido parcialmente eliminado. Por lo tanto la variabilidad de las potencias medias locales calculadas y representadas son debidas a lo que en la literatura específica en este campo se conoce como *shadowing*. Este fenómeno describe el efecto que tiene sobre la propagación la presencia de obstáculos cuyo tamaño es grande respecto a la longitud de onda.

#### 4. Conclusiones.

En este trabajo se presenta un estudio experimental llevado a cabo por investigadores del Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Cádiz con el objeto de investigar nuevas

aplicaciones de las tecnologías de radio en entornos marítimos. La caracterización del canal de propagación es necesaria para entender el comportamiento de las ondas de radio en estos entornos tan particulares. Dicha caracterización del radiocanal permitirá evaluar el rendimiento de sistemas WiMAX en comunicaciones marinas. Por lo tanto, a partir de los resultados de dicha evaluación será posible proponer aquellas técnicas de transmisión y recepción que mejoren el rendimiento de estos sistemas operando en escenarios marítimos. Podemos destacar que debido a la existencia de picos de atenuación en determinadas ubicaciones, se requiere especial cuidado en la fase de despliegue de los nodos de red (boyas) y de las estaciones de base (en el caso de ser instaladas en tierra) para asegurar la conexión entre los terminales de dicha red. En el caso de estaciones base a bordo de buques, hay que tener en cuenta las posibles pérdidas temporales de conexión con boyas ubicadas a determinadas distancias desde el buque. Adicionalmente, hay que tener presente que a partir de una determinada distancia la tasa de atenuación crece bruscamente, lo que limita enormemente la cobertura de estos sistemas. No obstante se requieren estudios y ensayos experimentales complementarios para precisar el comportamiento del canal de propagación, en concreto, aquellos que provocan entornos multitrayecto severos.

### **Agradecimientos.**

Este trabajo de investigación ha sido financiado por la AECID (Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo). Los autores quieren agradecer al IHM (Instituto Hidrográfico de la Marina) y a la empresa Agilent Technologies y todo el personal involucrado, la ayuda prestada en la realización de las pruebas de campo.

### **Referencias.**

- [1] F. Bekkadal, Kun Yang. "Novel Maritime Communications Technologies", Microwave Symposium, MMS 2010, 25-27 Aug. 2010, (pp. 338-341).
- [2] IEEE standard 802.16d-2004.
- [3] IEEE standard 802.16e-2005.
- [4] V. Erceg, et al., "Channel Models for Fixed Wireless Applications", IEEE 802.16a-03/01.
- [5] V. Erceg, et al., "An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 17, No 7, July 1999, (pp. 1205-1211).
- [6] J. Joe, S.K. Harza, S.H. Toh, M.W. Tan, J. Shankar, V.D. Hoang, M. Fujise. "Path Loss Measurements in Sea port for WiMAX", Wireless Communications and Networking Conference, IEEE WCNC, 11-15 March 2007, (pp. 1871-1876).
- [7] Rosario G. Garroppo, Stefano Giordano, Davide Iacono, Alessandro Cignoni, Matteo Falzarano. "WiMAX Testbed For Interconnection Of Mobile Navy Units In Operational Scenarios", Military Communications Conference, IEEE MILCOM, 16-19 Nov. 2008, (pp. 1-7).
- [8] Le Roux Y.M., Menard J., Toquin C., Jolivet J.P., Nicolas F., "Experimental measurements of propagation characteristics for maritime radio links", 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), 20-22 Oct. 2009, (pp. 364-369).
- [9] T.S. Rappaport, Wireless Communications Principles and Practice, Second Edition. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River (2002).
- [10] J.M. Hernando Rábanos, Transmisión por radio, Sexta edición. Editorial Universitaria Ramón Areces, Madrid (2008).