

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.2146-0
(08/2022)

**Dispersión biestática en
la superficie del mar**

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2023

© UIT 2023

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.2146-0

Dispersión biestática en la superficie del mar

(Cuestión UIT-R 208-6/3)

(2022)

Cometido

En la presente Recomendación se especifica un método que permite predecir el coeficiente de dispersión biestática y el coeficiente de reflexión coherente en la superficie del mar. Este modelo puede aplicarse tanto a cualquier ángulo de elevación, salvo incidencia rasante, como a frecuencias de hasta 100 GHz, y a velocidades de viento comprendidas entre 0,5 m/s y 25 m/s.

Palabras clave

Coeficiente de dispersión biestática, dispersión coherente, dispersión difusa, velocidad del viento, pendientes cuadráticas medias a barlovento y con viento cruzado, onda de gravedad, onda capilar, rugosidad a gran escala, rugosidad a pequeña escala

Acrónimos/Abreviaturas

CEMPM Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio

ERA5 Reanálisis de 5ª generación del CEMPM (*ECMWF reanalysis version 5*)

Recomendaciones y Manuales del UIT-R conexos

Recomendación UIT-R P.372

Recomendación UIT-R P.452

Recomendación UIT-R P.527

Recomendación UIT-R P.528

Recomendación UIT-R P.676

Recomendación UIT-R P.680

Recomendación UIT-R P.1144

Recomendación UIT-R P.2148

NOTA – En todos los casos, debe utilizarse la última revisión/edición de la Recomendación en vigor.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que, para planificar adecuadamente los sistemas de observación de la superficie de la Tierra y los sistemas espaciales con visión descendente, se necesitan modelos apropiados que permitan predecir el coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar;
- b) que el coeficiente de dispersión biestática puede incluir uno o dos de los siguientes componentes: coeficiente de dispersión biestática coherente y coeficiente de dispersión biestática difusa (no coherente);
- c) que la dispersión biestática difusa puede deberse a la rugosidad a gran escala causada por ondas de gravedad largas y a la rugosidad a pequeña escala causada por ondas capilares cortas;

d) que tanto las ondas de gravedad largas como las ondas capilares cortas son impulsadas por el viento;

e) que se ha desarrollado un modelo que permite predecir los coeficientes de dispersión biestática en la superficie del mar necesarios para evaluar varios parámetros de propagación, incluidos la profundidad de desvanecimiento, el ruido atmosférico debido a las emisiones procedentes de la superficie del mar y la potencia de interferencia causada por la dispersión desde la superficie del mar,

recomienda

que se utilice el método descrito en el Anexo para predecir el coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar.

Anexo

ÍNDICE

	<i>Página</i>
1	Introducción..... 4
2	Paso 0: Parámetros de entrada 6
	2.1 Parámetros de entrada relativos a la propagación..... 7
	2.2 Parámetros de entrada relativos a la superficie del mar..... 7
3	Paso 1: Determinar la permitividad relativa compleja del agua del mar 9
4	Paso 2: Determinar los parámetros de rugosidad de la superficie del mar 9
	4.1 Densidad del espectro de altura a pequeña escala de la superficie del mar (onda capilar) y variabilidad de la altura del mar 9
	4.2 Densidad de probabilidad a gran escala de las pendientes superficiales (onda de gravedad)..... 10
5	Paso 3: Determinar el coeficiente de dispersión biestática coherente 11
6	Paso 4: Determinar la dispersión biestática difusa debida a la rugosidad a gran escala 11
7	Paso 5: Determinar la dispersión biestática difusa debida a la rugosidad a pequeña escala 12
8	Sumar los componentes del coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar 16
	8.1 Coeficientes de retrodispersión en la superficie del mar 16
	8.2 Coeficientes de dispersión biestática de la superficie del mar en la dirección de avance 18

Página

Adjunto A al Anexo – Cálculo de los coeficientes de dispersión entre ondas con polarización circular y con polarización lineal.....	22
A.1 Potencia incidente con polarización circular a potencia dispersa lineal.....	22
A.2 Potencia incidente lineal a potencia dispersa con polarización circular.....	23
Adjunto B al Anexo – Cálculo de los coeficientes de dispersión entre ondas con polarización circular.....	24
Adjunto C al Anexo – Aproximaciones simples.....	25
Adjunto D al Anexo – Modelo de espectros de altura de la superficie del mar.....	26
Adjunto E al Anexo – Potencia de interferencia de una señal reflejada desde la superficie del mar hacia un receptor	27
E.1 Introducción	27
E.2 Potencia coherente recibida	27
E.3 Potencia difusa recibida.....	28

1 Introducción

En la presente Recomendación se especifica un método que permite predecir el coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar en función de la salinidad, la temperatura, la velocidad del viento, la dirección relativa del viento y la edad inversa de las olas. Si no se dispone de datos locales para estos parámetros, deben utilizarse los valores por defecto que figuran en el Cuadro 1. Este método de predicción puede aplicarse a cualquier ángulo de elevación, salvo incidencia rasante, a cualquier frecuencia hasta 100 GHz y a velocidades del viento de entre 0,5 m/s y 25 m/s.

El coeficiente de dispersión biestática comprende dos componentes: 1) un componente difuso (no coherente), esto es la fracción de la potencia incidente que se dispersa desde la dirección de incidencia hacia una dirección de recepción arbitraria; y 2) un componente coherente, esto es la fracción de la potencia incidente que se vuelve a dispersar hacia la dirección de incidencia (es decir, especular).

El método de predicción descrito en los § 1 a 8 supone que las polarizaciones de la fuente y del receptor son lineales. Si las polarizaciones de la fuente y/o del receptor son circulares, cabe la posibilidad de calcular los coeficientes de dispersión biestática adecuados a partir de los coeficientes de dispersión biestática lineal utilizando los métodos detallados en los Adjuntos A, B o C del presente Anexo.

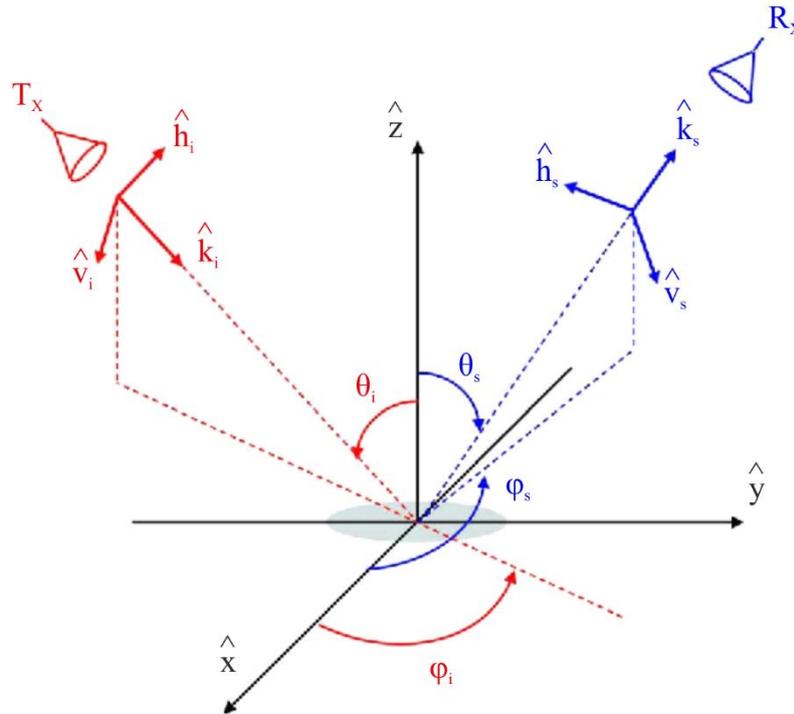
Estos métodos de predicción pueden utilizarse para predecir la potencia de interferencia reflejada por la superficie del mar entre una fuente (por ejemplo, un transmisor de enlace descendente) y un receptor que recibe interferencia perjudicial (por ejemplo, el receptor de un satélite de observación de la Tierra) utilizando el método descrito en el Adjunto E.

La superficie del mar suele ser una superficie aleatoriamente rugosa a causa del viento. El coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ es la fracción de potencia que se dispersa en una dirección \hat{k}_s con polarización \hat{p}_s a causa de la onda incidente que ilumina la superficie en la dirección \hat{k}_i con polarización \hat{q}_i (véase la Fig. 1). La fracción de potencia se mide por unidad de ángulo sólido y por unidad de área. Dada la complejidad inherente a la rugosidad de la superficie, se supone que el coeficiente de dispersión biestática está formado por dos componentes: un componente coherente $\gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ y un componente difuso (no coherente) $\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$. Estos dos componentes se suman para obtener lo siguiente:

$$\gamma_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \quad (1)$$

El componente coherente sólo se manifiesta a lo largo de la dirección especular de la superficie ($\theta_s = \theta_i$, $\varphi_s = \varphi_i$).

FIGURA 1
Configuración geométrica de la dispersión biestática desde la superficie del mar



P.2146-01

La Fig. 1 ilustra la geometría considerada en el modelo de dispersión. El plano xy representa la superficie horizontal del mar y el eje z positivo la dirección cenital. El eje x positivo es la dirección de barlovento¹ y el eje y positivo es la dirección del viento cruzado, donde el ángulo cenital de incidencia, θ_i , y el ángulo cenital de dispersión, θ_s , se miden desde el eje z positivo. El ángulo de reloj de incidencia, φ_i , y el ángulo de reloj de dispersión, φ_s , se miden en el plano xy en la dirección contraria a las agujas del reloj con respecto a la dirección de barlovento.

La superficie del mar se trata como una superficie cuya rugosidad se manifiesta en dos escalas, esto es una rugosidad a gran escala y una rugosidad a pequeña escala, que se superponen a una rugosidad a larga escala. La rugosidad a larga escala está asociada a las ondas de gravedad largas y la rugosidad a pequeña escala a las ondas capilares cortas. Por consiguiente, el componente difuso (no coherente) del coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ es fruto de la suma de ambos componentes, según se indica en la ecuación (2):

$$\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \quad (2)$$

El primer término de la ecuación (2) se atribuye a la rugosidad a larga escala de la superficie del mar y el segundo a la rugosidad a pequeña escala.

El modelo necesario para predecir los componentes coherente y difuso (no coherente) del coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar puede construirse partiendo del diagrama de flujo representado en la Fig. 2.

¹ La dirección de barlovento es la dirección opuesta a la que se dirige el viento.

FIGURA 2

Diagrama de flujo del modelo de predicción de la dispersión biestática en la superficie del mar**Paso 0**Determinar los parámetros de entrada (sección 2)**Paso 1**Determinar la permitividad relativa compleja (sección 3)**Paso 2**Determinar los parámetros de rugosidad de la superficie (sección 4)**Paso 3**Determinar el coeficiente de dispersión biestática coherente (sección 5)**Paso 4**Determinar el componente difuso del coeficiente de dispersión biestática debido a la rugosidad a gran escala (sección 6)**Paso 5**Determinar el componente difuso del coeficiente de dispersión biestática debido a la rugosidad a pequeña escala (sección 7)**Paso 6**Sumar los componentes del coeficiente de dispersión biestática (sección 8)

P.2146-02

El modelo de coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar descrito *infra* puede utilizarse para ondas incidentes con polarización lineal y para ondas dispersas con polarización lineal. Las transformaciones de una base de polarización lineal a otras combinaciones de polarizaciones incidentes y dispersas pueden consultarse en los Adjuntos A y B:

- en el Adjunto A se abordan las ondas incidentes con polarización circular y las ondas dispersas con polarización lineal y viceversa;
- en el Adjunto B se abordan las ondas incidentes con polarización circular y las ondas dispersas con polarización circular;
- en el Adjunto C se abordan aproximaciones simples para los coeficientes de dispersión biestáticos de los Adjuntos A y B.

Además:

- el Adjunto D contiene un modelo de espectros de altura en la superficie del mar;
- el Adjunto E contiene una metodología para determinar la potencia de interferencia de una señal reflejada/dispersada desde la superficie del mar hacia un receptor.

2 Paso 0: Parámetros de entrada

A fin de predecir los valores de los componentes coherente y difuso (no coherente) del coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar, se requieren dos tipos de parámetros de entrada:

- parámetros de entrada relativos a la propagación, y
- parámetros de entrada relativos a la superficie del mar.

2.1 Parámetros de entrada relativos a la propagación

Los parámetros de entrada relativos a la propagación son los siguientes:

- el ángulo de elevación ϵ_i y el ángulo de acimut φ_i de la onda incidente que ilumina la superficie del mar, los cuales determinan la dirección de propagación incidente \hat{k}_i ;
- el vector de polarización \hat{q}_i de la onda que ilumina la superficie del mar;
- el ángulo de elevación ϵ_s y el ángulo de acimut φ_s de la dirección de dispersión \hat{k}_s a lo largo de los cuales se calcula el coeficiente de dispersión biestática;
- los vectores de polarización \hat{p}_s del campo disperso;
- la frecuencia f a la que se calcula el coeficiente de dispersión biestática, la cual se expresa en GHz y determina el número de ondas de radiofrecuencias k ($k = 2\pi f / 0,299792458$ rad/m).

Dado que en este Anexo sólo se consideran las polarizaciones lineales, $\hat{q}_i = \hat{v}_i$ o \hat{h}_i y $\hat{p}_s = \hat{v}_s$ o \hat{h}_s , siendo v la polarización vertical (paralela) y h la polarización horizontal (perpendicular). A lo largo de esta Recomendación, los ángulos de elevación $\epsilon_{i,s}$ se sustituyen por los correspondientes ángulos cenitales $\theta_{i,s}$.

$$\theta_{i,s} = \frac{\pi}{2} - \epsilon_{i,s} \tag{3}$$

2.2 Parámetros de entrada relativos a la superficie del mar

Los parámetros de entrada relativos a la superficie del mar necesarios para predecir la dispersión biestática en la superficie del mar se indican en el Cuadro 1, que incluye los valores por defecto que pueden utilizarse si no se conocen los parámetros locales.

CUADRO 1

Parámetros de entrada relativos a la superficie del mar

Parámetro	Descripción	Valor por defecto
Salinidad de la superficie del mar	Necesaria para calcular la permitividad relativa compleja de la superficie del mar.	35 ppt ²
Temperatura de la superficie del mar	Necesaria para calcular la permitividad relativa compleja de la superficie del mar.	0, 15, 30 °C
Velocidad del viento U_{10} (m/s)	Velocidad del viento a una altura de 10 m sobre la superficie del mar.	Véase el texto siguiente
Edad inversa de las olas Ω	El mar se considera plenamente desarrollado cuando Ω se aproxima a 0,85, maduro cuando Ω se aproxima a 1, y joven cuando $\Omega > 2$.	0,85
Número de onda de la altura de la rugosidad de corte κ_d	El número de onda de altura que divide el espectro de altura de la superficie del mar en espectro de ondas de gravedad largas y espectro de ondas capilares cortas.	0,5k siendo k el número de onda (1/m)

² La unidad ppt equivale a partes por mil.

Sistemas de coordenadas y velocidad del viento

De estar disponibles, deben utilizarse los valores locales de los parámetros del Cuadro 1. La velocidad del viento a 10 m sobre la superficie del mar depende de la situación geográfica y de la estación del año, y varía con el tiempo. De estar disponibles, deben utilizarse los datos locales de velocidad del viento en la superficie del mar (magnitud, dirección y correlación espacial y temporal) aplicables a la localización geográfica de interés. Si no se requiere una correlación espacial o temporal, pueden utilizarse los mapas mundiales que figuran en la Recomendación UIT-R P.2148.

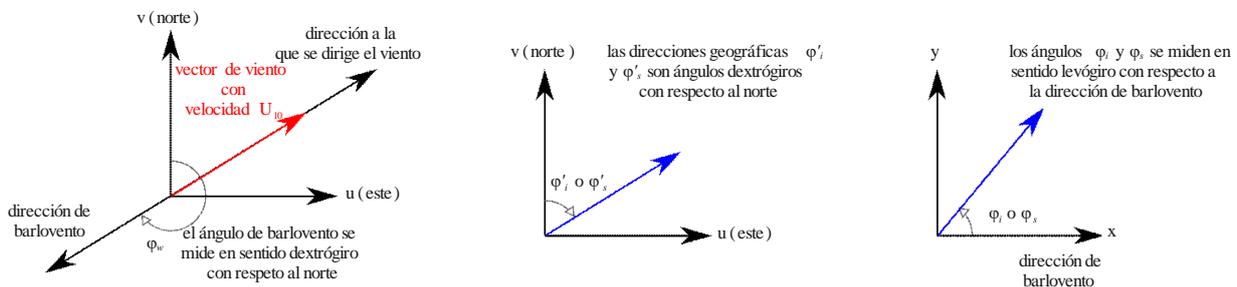
Si no se dispone de datos locales sobre la velocidad del viento en la superficie del mar, cabe la posibilidad de derivar el vector temporal del viento a escala local con ayuda de múltiples fuentes de datos mundiales; por ejemplo, los componentes oriental y septentrional de la velocidad del viento por hora a una altura de 10 m sobre la superficie de la Tierra desde 1979 pueden consultarse en el registro de datos climáticos Copernicus del CEPMPM.

Algunos conjuntos de datos (por ejemplo, los datos ERA5 del CEPMPM) facilitan el componente v , en dirección al norte (viento que se dirige hacia el norte), de la velocidad del viento, y el componente u , en dirección al este (viento que se dirige hacia el este), de la velocidad del viento. Para un valor dado de u y v , la magnitud de la velocidad del viento a una altura de 10 m sobre la superficie de la Tierra, U_{10} , es $\sqrt{u^2 + v^2}$. Tal y como se ilustra en la Fig. 3, la dirección de barlovento es la dirección opuesta a la que se dirige el viento y el ángulo dextrógiro que abarca desde el norte hasta la dirección de barlovento, φ_w , es $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$ ³. Por consiguiente, en la Fig. 3, el eje x positivo, que corresponde a la dirección de barlovento, es un ángulo dextrógiro de $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$ respecto al norte, o, dicho de otro modo, el norte es un ángulo levógiro de $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$ respecto a la dirección de barlovento.

Si φ'_i y φ'_s son los ángulos dextrógiros de incidencia y dispersión con respecto al norte, esto es φ_i y φ_s , los correspondientes ángulos dextrógiros de incidencia y dispersión mostrados en la Fig. 3 son: $\varphi_i = \varphi_w - \varphi'_i$ y $\varphi_s = \varphi_w - \varphi'_s$.

FIGURA 3

Sistemas de coordenadas y velocidad del viento



P.2146-03

En el marco de este método, los siguientes parámetros intermedios se calculan a partir de los parámetros de entrada anteriores:

- permitividad relativa compleja de la superficie del mar ϵ_r ;
- función de densidad espectral de la altura de la superficie del mar $W_s(\kappa, \psi)$;
- variabilidad de la altura de la superficie del mar σ^2 ; y

³ La función $\text{atan2}(y, x)$ se define como el ángulo que se forma entre el eje x positivo y el vector del origen al punto (x, y) .

- pendientes cuadráticas medias de la superficie del mar a barlovento y con viento cruzado m_u^2 y m_c^2 .

3 Paso 1: Determinar la permitividad relativa compleja del agua del mar

En la presente Recomendación se utiliza el modelo de permitividad relativa compleja que describen las ecuaciones (14) a (27) de la Recomendación UIT-R P.527-6, a fin de calcular la permitividad relativa compleja del agua del mar. Este modelo formula la permitividad relativa compleja del agua de mar ϵ_r en términos de salinidad de la superficie del mar, temperatura de la superficie del mar y radiofrecuencia (RF). Los valores por defecto de salinidad y temperatura de la superficie del mar se indican en el Cuadro 1.

4 Paso 2: Determinar los parámetros de rugosidad de la superficie del mar

La rugosidad de la superficie del mar viene descrita por:

- la densidad espectral de altura de la superficie a pequeña escala, que se necesita para calcular el componente difuso del coeficiente de dispersión biestática fruto de la rugosidad a pequeña escala (§ 6);
- la altura cuadrática media total de la superficie del mar, que se necesita para calcular la reflectividad coherente (§ 5);
- la densidad de probabilidad a gran escala de las pendientes de la superficie, que se necesita para calcular el componente difuso del coeficiente de dispersión biestática fruto de la rugosidad a gran escala (§ 7).

4.1 Densidad del espectro de altura a pequeña escala de la superficie del mar (onda capilar) y variabilidad de la altura del mar

Este espectro a pequeña escala se relaciona con el espectro direccional de la superficie del mar, $W(\kappa, \psi)$, como sigue:

$$W_s(\kappa, \psi) = \begin{cases} 0 & \text{si } \kappa < \kappa_d \\ W(\kappa, \psi) & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4)$$

siendo κ_d el número de onda de altura de corte a dos escalas y (κ, ψ) las coordenadas polares de los números de onda espaciales a barlovento y con viento cruzado asociadas a las coordenadas rectangulares de las pendientes superficiales. La expresión explícita de $W(\kappa, \psi)$ figura en el Adjunto D.

La altura cuadrática media total de la superficie del mar, σ , que se necesita para calcular la reflectividad coherente, se relaciona con la velocidad del viento, U_{10} , como sigue:

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0 + \sigma_1 U_{10} + \sigma_2 U_{10}^2 + \sigma_3 U_{10}^3 + \sigma_4 U_{10}^4 + \sigma_5 U_{10}^5 & \text{si } U_{10} \geq 1 \text{ m/s} \\ 0,001515 U_{10} & \text{si } U_{10} < 1 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

Con el valor σ^2 (varianza de la altura de la superficie) expresado en metros cuadrados y U_{10} (velocidad del viento a una altura de 10 m sobre la superficie del mar) en m/s, y:

$$\sigma_0 = -0,002913931483264$$

$$\sigma_1 = 0,006483314256661$$

$$\sigma_2 = -0,002390537892927$$

$$\sigma_3 = 0,000309146709141$$

$$\sigma_4 = 0,000026373965831$$

$$\sigma_5 = 0,000000350137099$$

4.2 Densidad de probabilidad a gran escala de las pendientes superficiales (onda de gravedad)

La densidad de probabilidad a gran escala de las pendientes superficiales se representa mediante una distribución gaussiana bivalente de media cero:

$$P(S_u, S_c) = \frac{1}{2\pi m_u m_c} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{S_u^2}{m_u^2} + \frac{S_c^2}{m_c^2}\right)\right\} \quad (6)$$

siendo S_u y S_c las pendientes a barlovento y con viento cruzado en las fracciones de superficie donde se calculan los coeficientes locales de dispersión biestática, y m_u^2 y m_c^2 las pendientes cuadráticas medias a barlovento y con viento cruzado.

$$m_u^2 = \sum_{t=0}^7 a_t U_{10}^t \quad (7)$$

$$m_c^2 = \sum_{t=0}^7 b_t U_{10}^t \quad (8)$$

Los coeficientes de regresión a_t ($t = 0, \dots, 7$) y b_t ($t = 0, \dots, 7$) en las ecuaciones (7) y (8) dependen de la frecuencia f en GHz como sigue:

$$a_t = d_{t,0} + d_{t,1} \log_e f + d_{t,2} (\log_e f)^2 + d_{t,3} (\log_e f)^3 + d_{t,4} (\log_e f)^4 \quad t = 0, \dots, 7 \quad (9)$$

$$b_t = z_{t,0} + z_{t,1} \log_e f + z_{t,2} (\log_e f)^2 + z_{t,3} (\log_e f)^3 + z_{t,4} (\log_e f)^4 \quad t = 0, \dots, 7 \quad (10)$$

Los coeficientes $d_{t,m}$ y $z_{t,m}$ se facilitan en los Cuadros 2 y 3, respectivamente. Las ecuaciones (7) y (8) son válidas para valores de U_{10} comprendidos entre 0,5 m/s y 25 m/s y frecuencias comprendidas entre 1 y 100 GHz.

CUADRO 2

Valores de los coeficientes de regresión $d_{t,m}$ de la ecuación (9)

a_t	$d_{t,0}$	$d_{t,1}$	$d_{t,2}$	$d_{t,3}$	$d_{t,4}$
a_0	-0,001 316 803 829	-0,000 766 377 24	0,000 178 465 995	0,000 163 583 254	-2,722 372 719 5e-05
a_1	0,003 381 740 504	0,003 262 226 696	0,001 055 843 558	-0,000 556 018 050	5,638 297 081 0e-05
a_2	-8,387 091 908e-06	-0,000 788 099 04	-0,000 849 564 4	0,000 321 034 03	-2,969 409 304 3e-05
a_3	-7,172 344 345 1e-05	9,130 847 487e-05	0,000 180 310 43	-6,039 065 778e-05	5,252 298 53e-06
a_4	9,781 960 983 7e-06	-5,515 385 070e-06	-1,831 052 853e-05	5,756 933 90e-06	-4,820 426 74e-07
a_5	-5,824 151 735 3e-07	1,831 590 630e-07	9,693 536 66e-07	-2,928 018 73e-07	2,384 386 09e-08
a_6	1,662 701 734 3e-08	-3,121 665 19e-09	-2,590 444 81e-08	7,608 802 794e-09	-6,063 116 61e-10
a_7	-1,853 308 18e-10	2,084 451 182e-11	2,762 769 59e-10	-7,94818760e-11	6,223 677 47e-12

CUADRO 3

Valores de los coeficientes de regresión $z_{t,m}$ de la ecuación (10)

b_t	$z_{t,0}$	$z_{t,1}$	$z_{t,2}$	$z_{t,3}$	$z_{t,4}$
b_0	-0,000 388 356 64	-0,000 566 882 739	-0,000 187 663 9	0,000 195 168 030 1	-2,564 879 98e-05
b_1	0,000 711 554 432 3	0,001 274 333 859	0,001 582 455 599	-0,000 564 251 194	5,158 545 58e-05
b_2	0,000 467 115 768	7,665 602 489e-05	-0,000 999 944 82	0,000 304 430 724	-2,608 628 437e-05
b_3	-0,000 113 274 18	-7,062 890 94e-05	0,000 204 604 176	-5,704 760 441e-05	4,619 116 82e-06
b_4	1,144 869 515e-05	9,917 914 997 6e-06	-2,031 787 86e-05	5,376 554 489e-06	-4,184 881 982e-07
b_5	-5,954 866 288 2e-07	-6,127 030 44e-07	1,063 995 76e-06	-2,717 537 12e-07	2,052 809 6e-08
b_6	1,566 749 978 4e-08	1,794 015 885e-08	-2,826 461 77e-08	7,033 322 599e-09	-5,186 932 2e-10
b_7	-1,651 144 028 4e-10	-2,032 492 61e-10	3,003 151 95e-10	-7,323 652 942e-11	5,294 665 17e-12

5 Paso 3: Determinar el coeficiente de dispersión biestática coherente

El componente coherente del coeficiente de dispersión biestática se asemeja al componente polarizado (vv, o hh) y sólo existe en la dirección de reflexión especular:

$$\gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \begin{cases} 4\pi|r_{pp}(\theta_i)|^2 \exp\{-(2k\sigma\cos\theta_i)^2\} & \text{si } \theta_s = \theta_i, \varphi_s = \varphi_i, \text{ y } p = q \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (11)$$

En la fórmula anterior, $r_{pp}(\theta_i)$ es el coeficiente de reflexión de Fresnel para la polarización p ($p = v, h$):

$$r_{hh}(\theta_i) = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (12)$$

$$r_{vv}(\theta_i) = \frac{\epsilon_r \cos\theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\epsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (13)$$

6 Paso 4: Determinar la dispersión biestática difusa debida a la rugosidad a gran escala

A fin de obtener el coeficiente de dispersión biestática debido a la rugosidad a gran escala (onda de gravedad), cabe utilizar los ángulos de incidencia (θ_i, φ_i) y de dispersión (θ_s, φ_s) proporcionados en el § 2.1 para calcular las siguientes cantidades:

$$q_x = \sin \theta_s \cos \varphi_s - \sin \theta_i \cos \varphi_i \quad (14)$$

$$q_y = \sin \theta_s \sin \varphi_s - \sin \theta_i \sin \varphi_i \quad (15)$$

$$q_z = \cos \theta_s + \cos \theta_i \quad (16)$$

$$q^2 = q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 \quad (17)$$

$$(\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i) = -\sin \theta_s \cos \theta_i \cos(\varphi_s - \varphi_i) - \sin \theta_i \cos \theta_s \quad (18)$$

$$(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i) = \sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_i) \quad (19)$$

$$(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s) = \sin \theta_i \cos \theta_s \cos(\varphi_s - \varphi_i) + \sin \theta_s \cos \theta_i \quad (20)$$

$$(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s) = -\sin \theta_i \sin(\varphi_s - \varphi_i) \quad (21)$$

$$D_0^2 = (\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)^2 + (\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)^2 \quad (22)$$

Introdúzcanse las ecuaciones (16) y (17) en la ecuación (23) para obtener el ángulo incidente local θ'_i en el punto de la superficie que contribuye al coeficiente de dispersión biestática:

$$\cos \theta'_i = q |q_z| / (2q_z) \quad (23)$$

Introdúzcase la ecuación (23) en las ecuaciones (12) y (13) utilizando el valor adecuado de permitividad relativa compleja para obtener la reflexión local de Fresnel r'_{hh} y r'_{vv} . A continuación, introdúzcanse los coeficientes locales de Fresnel r'_{hh} y r'_{vv} , junto con los productos vectoriales escalares de las ecuaciones (18) a (21) en las ecuaciones (24) a (27) para obtener los factores de polarización $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$:

Si $D_0^2 \neq 0$:

$$U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{(\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (24)$$

$$U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{-(\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (25)$$

$$U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{-(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (26)$$

$$U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (27)$$

Si $D_0^2 = 0$:

$$U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = r'_{hh} \quad (28)$$

$$U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 0 \quad (29)$$

$$U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 0 \quad (30)$$

$$U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = r'_{vv} \quad (31)$$

Introdúzcanse las ecuaciones (14) a (17) y (24) a (27) en la ecuación (32) para obtener el componente difuso del coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar $\gamma_{pq}^{\ell}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debido a las ondas de gravedad largas:

$$\gamma_{pq}^{\ell}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2m_u m_c} \left| \frac{q}{q_z} \right|^4 |U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)|^2 \exp \left\{ \frac{-1}{2q_z^2} \left(\left\{ \frac{q_x}{m_u} \right\}^2 + \left\{ \frac{q_y}{m_c} \right\}^2 \right) \right\} \quad (32)$$

siendo m_u y m_c las pendientes superficiales cuadráticas medias a barlovento y con viento cruzado dadas en las ecuaciones (7) y (8) en función de la velocidad del viento U_{10} y de la frecuencia f .

7 Paso 5: Determinar la dispersión biestática difusa debida a la rugosidad a pequeña escala

El primer paso del método utilizado para obtener la dispersión biestática difusa debida a la rugosidad a pequeña escala consiste en establecer los valores máximos y mínimos de S_u y S_c .

$$S_{u,máx} = 6 m_u$$

$$S_{u,mín} = -\text{mín}(6 m_u, \cot \theta_i)$$

$$S_{c,máx} = 6 m_c$$

$$S_{c,mín} = -6 m_c$$

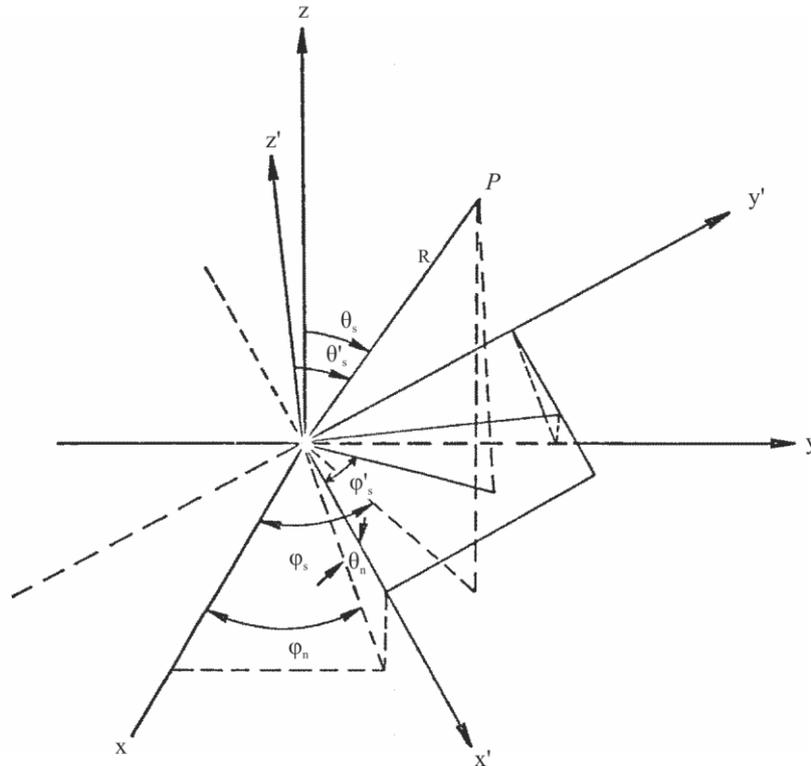
El área de pendiente subtendida por los valores máximos y mínimos anteriores se divide en 64×64 puntos utilizando nodos de cuadratura gaussiana. En un nodo arbitrario (t, m) las pendientes pueden expresarse como sigue:

$$S_{u,t} = \frac{1}{2} \{ (S_{u,máx} - S_{u,mín}) \chi(t) + (S_{u,máx} + S_{u,mín}) \} \quad (33)$$

$$S_{c,m} = \frac{1}{2} \{ (S_{c,m\acute{a}x} - S_{c,m\acute{i}n}) \zeta(m) + (S_{c,m\acute{a}x} + S_{c,m\acute{i}n}) \} \quad (34)$$

En las ecuaciones (33) y (34), $\chi(t)$ y $\zeta(m)$ son los nodos de cuadratura gaussiana ($t, m = 1, \dots, 64$), que se corresponden con los X_i de la sección 3 del Anexo a la Recomendación UIT-R P.1144-11, es decir, $\chi(t), \zeta(m) \rightarrow X_i$. También $S_{u,t} \rightarrow X'_i$ y $S_{c,m} \rightarrow Z'_i$.

FIGURA 4
Ángulos de dispersión local (θ'_s, φ'_s) y ángulos de inclinación de la normal a la superficie (ángulo cenital θ_n y ángulo acimutal φ_n)



P.2146-04

En el nodo gaussiano anterior, llévase a cabo los siguientes procedimientos:

- Obténganse el ángulo cenital θ_n y el ángulo acimutal φ_n que definen la inclinación de la normal superficial a gran escala de la superficie del mar \hat{n} (véase la Fig. 4) mediante la introducción de las ecuaciones (32) y (33) en las ecuaciones (35) a (37):

$$\varphi_n = \tan^{-1} \{ S_{c,m} / S_{u,t} \} \quad (35)$$

$$\cos \theta_n = \frac{1}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (36)$$

$$\sen \theta_n = \cos \theta_n \{ S_{u,t} \cos \varphi_n + S_{c,m} \sen \varphi_n \} \quad (37)$$

- Obténganse la dispersión local y ángulos incidentes θ'_s , y φ'_s , y θ'_i , y φ'_i en este punto de nodo:

$$\varphi'_s = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sen \theta_s \sen(\varphi_s - \varphi_n)}{\sen \theta_s \cos \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) + \cos \theta_s \sen \theta_n} \right\} \quad (38)$$

$$\cos \theta'_s = \frac{\{- \sen \theta_s (S_{u,t} \cos \varphi_s + S_{c,m} \sen \varphi_s) + \cos \theta_s\}}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (39)$$

$$\sen \theta'_s = \{ \sen \theta_s \cos \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) + \cos \theta_s \sen \theta_n \} \cos \varphi'_s + \{ \sen \theta_s \sen(\varphi_s - \varphi_n) \} \sen \varphi'_s \quad (40)$$

y

$$\varphi'_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{sen } \theta_i \text{ sen}(\varphi_i - \varphi_n)}{\text{sen } \theta_i \cos \theta_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) - \cos \theta_i \text{ sen } \theta_n} \right\} \quad (41)$$

$$\cos \theta'_i = \frac{\{\text{sen } \theta_i (S_{u,t} \cos \varphi_i + S_{c,m} \text{ sen } \varphi_i) + \cos \theta_i\}}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (42)$$

$$\text{sen } \theta'_i = \{\text{sen } \theta_i \cos \theta_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) - \cos \theta_i \text{ sen } \theta_n\} \cos \varphi'_i + \{\text{sen } \theta_i \text{ sen}(\varphi_i - \varphi_n)\} \text{ sen } \varphi'_i \quad (43)$$

– Al obtener los ángulos locales de incidencia y dispersión, pueden obtenerse los componentes de la polarización horizontal de incidencia y de la polarización horizontal de dispersión:

$$h_{xi} = \text{sen } \theta_i \text{ sen } \varphi_i - \cos \theta_i S_{c,m} \quad (44)$$

$$h_{yi} = \cos \theta_i S_{u,t} - \text{sen } \theta_i \cos \varphi_i \quad (45)$$

$$h_{zi} = \text{sen } \theta_i (S_{u,t} \text{ sen } \varphi_i - S_{c,m} \cos \varphi_i) \quad (46)$$

$$D_i = \sqrt{h_{xi}^2 + h_{yi}^2 + h_{zi}^2} \quad (47)$$

y

$$h_{xs} = \text{sen } \theta_s \text{ sen } \varphi_s + \cos \theta_s S_{c,m} \quad (48)$$

$$h_{ys} = -\{\cos \theta_s S_{u,t} + \text{sen } \theta_s \cos \varphi_s\} \quad (49)$$

$$h_{zs} = \text{sen } \theta_s (S_{u,t} \text{ sen } \varphi_s - S_{c,m} \cos \varphi_s) \quad (50)$$

$$D_s = \sqrt{h_{xs}^2 + h_{ys}^2 + h_{zs}^2} \quad (51)$$

– Obténganse los siguientes productos vectoriales escalares en la dirección de incidencia:

$$(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) = \cos \theta_n \{-\cos \theta_i (S_{u,t} \cos \varphi_i + S_{c,m} \text{ sen } \varphi_i) + \text{sen } \theta_i\} / D_i \quad (52)$$

$$(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) = \cos \theta_n \{-S_{u,t} \text{ sen } \varphi_i + S_{c,m} \cos \varphi_i\} / D_i \quad (53)$$

$$(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) = \frac{-1}{D_i} \{\cos \theta_i (h_{xi} \cos \varphi_i + h_{yi} \text{ sen } \varphi_i) + h_{zi} \text{ sen } \theta_i\} \quad (54)$$

$$(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) = \frac{1}{D_i} \{h_{yi} \cos \varphi_i - h_{xi} \text{ sen } \varphi_i\} \quad (55)$$

Y los siguientes productos vectoriales escalares en la dirección de dispersión:

$$(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s) = \cos \theta_n \{\cos \theta_s (S_{u,t} \cos \varphi_s + S_{c,m} \text{ sen } \varphi_s) + \text{sen } \theta_s\} / D_s \quad (56)$$

$$(\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s) = \frac{1}{D_s} \{\cos \theta_s (h_{xs} \cos \varphi_s + h_{ys} \text{ sen } \varphi_s) - h_{zs} \text{ sen } \theta_s\} \quad (57)$$

$$(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s) = \cos \theta_n \{-S_{u,t} \text{ sen } \varphi_s + S_{c,m} \cos \varphi_s\} / D_s \quad (58)$$

$$(\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s) = \frac{1}{D_s} \{h_{ys} \cos \varphi_s - h_{xs} \text{ sen } \varphi_s\} \quad (59)$$

– Obténganse los factores de polarización en el marco local g'_{pq} mediante la introducción de las ecuaciones (38) y (41), junto con el valor adecuado de permitividad relativa compleja, en las ecuaciones (60) a (63):

$$g'_{hh} = \frac{(\varepsilon_r - 1)}{\left(\cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_s} \right) \left(\cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_i} \right)} \cos(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (60)$$

$$g'_{vh} = \frac{-(\epsilon_r - 1) \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_s}}{\left(\epsilon_r \cos \theta'_s + \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_s} \right) \left(\cos \theta'_i + \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_i} \right)} \text{sen}(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (61)$$

$$g'_{hv} = \frac{(\epsilon_r - 1) \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_i}}{\left(\cos \theta'_s + \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_s} \right) \left(\epsilon_r \cos \theta'_i + \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_i} \right)} \text{sen}(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (62)$$

$$g'_{vv} = \frac{(\epsilon_r - 1) \left(\epsilon_r \text{sen} \theta'_i \text{sen} \theta'_s - \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_s} \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_i} \cos(\varphi'_s - \varphi'_i) \right)}{\left(\epsilon_r \cos \theta'_s + \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_s} \right) \left(\epsilon_r \cos \theta'_i + \sqrt{\epsilon_r - \text{sen}^2 \theta'_i} \right)} \quad (63)$$

– Obténganse los factores de polarización G_{pq} introduciendo las ecuaciones (60) a (63) y las ecuaciones (52) a (59) en las ecuaciones (64) a (67):

$$G_{vv} = \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) + \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) \quad (64)$$

$$G_{vh} = \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) + \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) \quad (65)$$

$$G_{hv} = \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) + \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) \quad (66)$$

$$G_{hh} = \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) + \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) \quad (67)$$

La función \mathcal{U} permite al nodo gaussiano (t, m) ver las direcciones de incidencia y dispersión al mismo tiempo:

$$\mathcal{U}(S_{u,t}, \theta_i) = \begin{cases} \text{máx}((1 + S_{u,t} \tan \theta_i), 0) & \text{si } 0 \leq \theta'_i \leq \frac{\pi}{2} \text{ y } 0 \leq \theta'_s \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (68)$$

Repítanse todos los pasos anteriores hasta cubrir todos los nodos de la pendiente.

Para obtener el coeficiente de dispersión biestática difusa de la superficie del mar debido a las ondas cortas, utilícense las fórmulas anteriores para calcular (69) y (70) en todos los nodos:

$$P(S_{u,t}, S_{c,m}) = \frac{1}{2\pi m_u m_c} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{S_{u,t}^2}{m_u^2} + \frac{S_{c,m}^2}{m_c^2} \right) \right\} \quad (69)$$

$$\gamma_{pq}^{cap}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 16\pi(k^2 \cos \theta'_s \cos \theta'_i)^2 |G_{pq}|^2 W_s(\kappa, \varphi_i) \quad (70)$$

La ecuación (69) se obtiene a partir de la ecuación (6). Además, en la ecuación (70), $W_s(\kappa, \varphi_i)$ es la función de densidad espectral de onda corta dada en el Adjunto D, calculada en $\psi = \varphi_i$, y el número de onda de altura κ viene dado por:

$$\kappa = k \sqrt{\text{sen}^2 \theta'_s + \text{sen}^2 \theta'_i - 2 \text{sen} \theta'_s \text{sen} \theta'_i \cos(\varphi'_s - \varphi'_i)} \quad (71)$$

A continuación, introdúzcanse las ecuaciones (68) a (71) en la ecuación (72) para obtener el coeficiente de dispersión biestática difusa de la superficie del mar debido a la rugosidad a pequeña escala (onda capilar corta):

$$\gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = C \sum_{m=1}^{64} \sum_{t=1}^{64} \gamma_{pq}^{cap}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \mathcal{U}(S_{u,t}, \theta_i) P(S_{u,t}, S_{c,m}) w_{u,t} w_{c,m} \quad (72)$$

En la ecuación (72), $w_{u,t}$ y $w_{c,m}$ son las ponderaciones de cuadratura gaussiana que se indican en la sección 3 del Anexo a la Recomendación UIT-R P.1144-11. El factor C es una constante dada por:

$$C = \frac{1}{4} \{ (S_{u,máx} - S_{u,mín}) (S_{c,máx} - S_{c,mín}) \} \quad (73)$$

8 Sumar los componentes del coeficiente de dispersión biestática en la superficie del mar

El componente coherente (11) y los componentes difusos (32) y (72) de los coeficientes de dispersión biestática en la superficie del mar se suman y explotan para explorar sus características en las direcciones de retrodispersión y avance (especular).

$$\gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \quad (74)$$

8.1 Coeficientes de retrodispersión en la superficie del mar

Los coeficientes de retrodispersión en la superficie del mar revisten un interés particular para las comunidades de teledetección activa. Estos carecen de un componente coherente y pueden calcularse a partir de la suma de las ecuaciones (32) y (72) estableciendo $\hat{k}_s = -\hat{k}_i$ (es decir, $\theta_s = \theta_i$, y $\varphi_s = \pi + \varphi_i$). Las Figs. 5 a 8 ilustran la relación de dependencia que existe entre los coeficientes de retrodispersión en la superficie del mar y el ángulo de incidencia, la polarización, la velocidad del viento y su dirección.

FIGURA 5

Coeficientes de retrodispersión con viento cruzado en función del ángulo de incidencia con diferentes valores de velocidad del viento (frecuencia = 13,6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 30 °C, salinidad = 35 ppt)

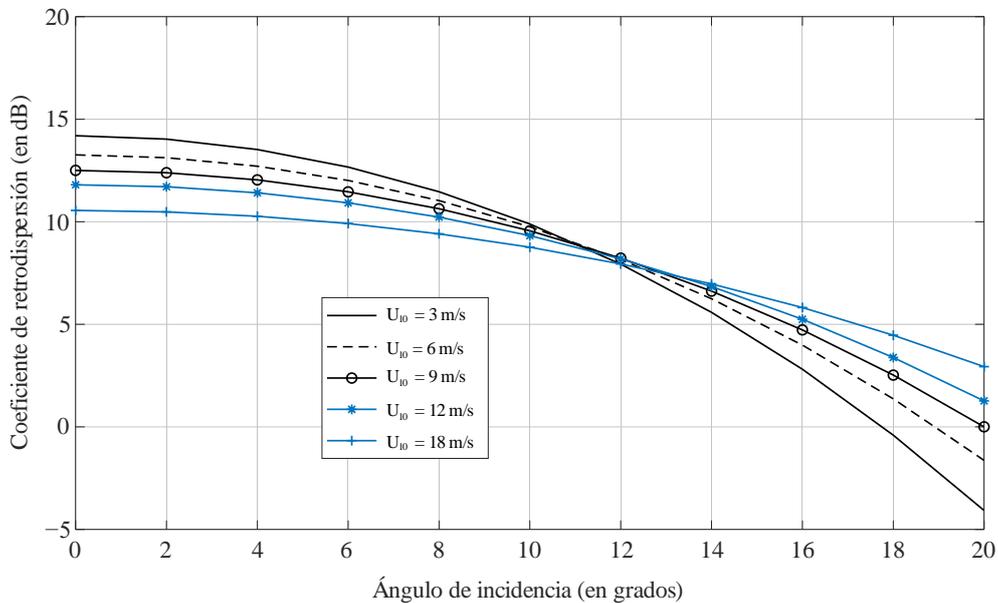
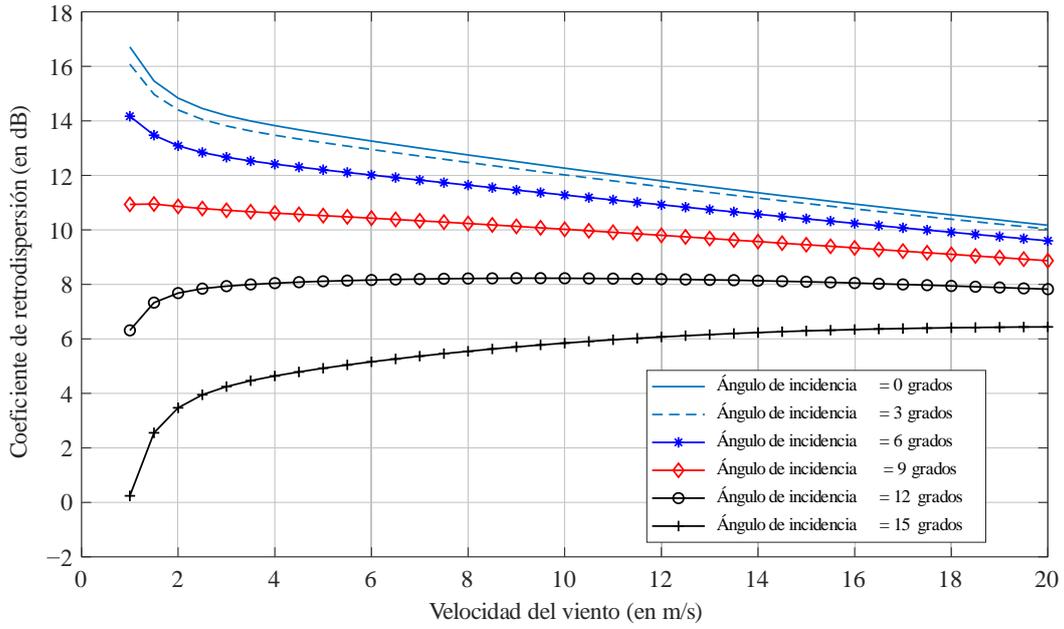


FIGURA 6

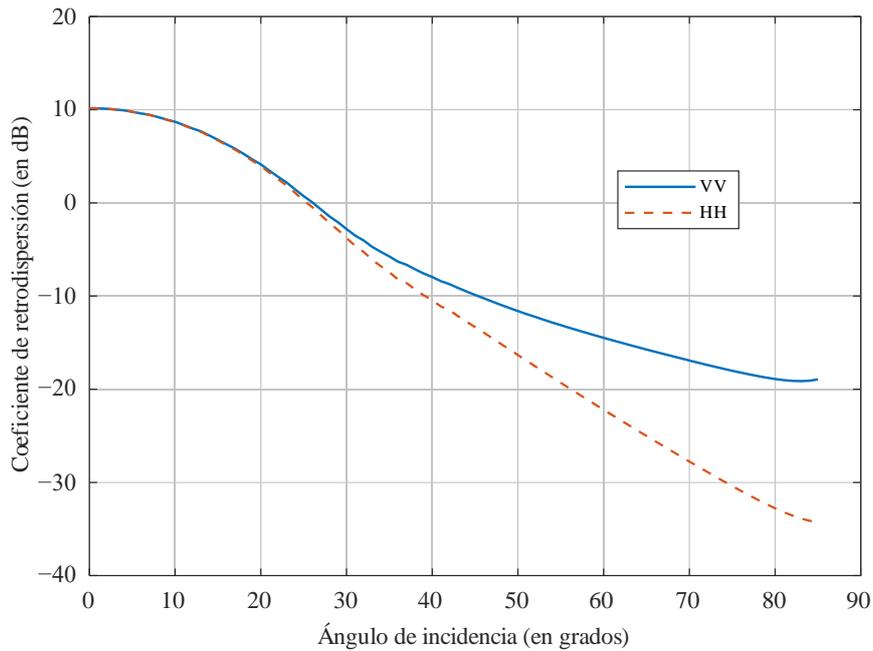
Coefficientes de retrodispersión en función de la velocidad del viento con diferentes ángulos de incidencia
(frecuencia = 13,6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 30 °C, salinidad = 35 ppt)



P.2146-06

FIGURA 7

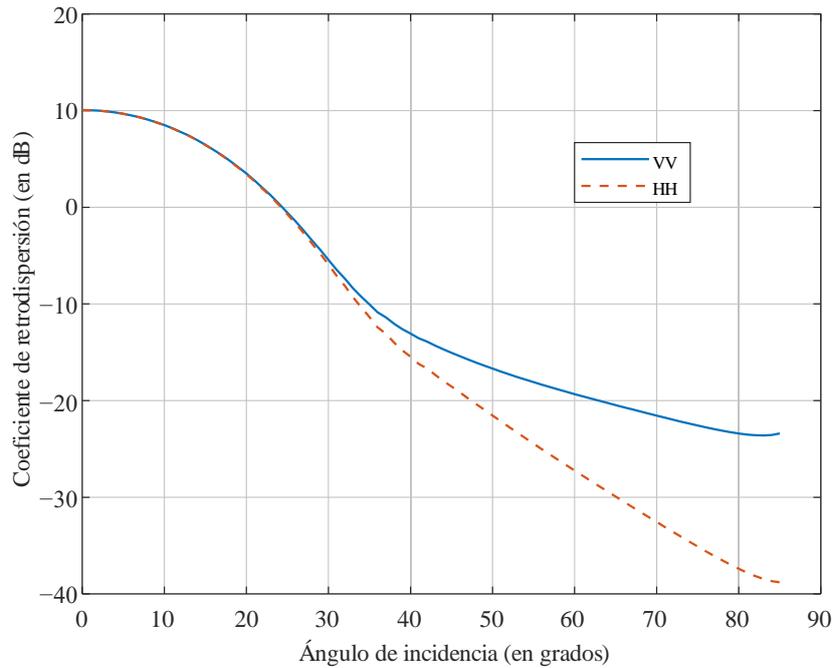
Coefficientes de retrodispersión a barlovento en función del ángulo de incidencia
(frecuencia = 18,6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 30 °C, $U_{10} = 18$ m/s, salinidad = 35 ppt)



P.2146-07

FIGURA 8

Coefficientes de retrodispersión con viento cruzado en función del ángulo de incidencia (frecuencia = 18,6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 30 °C, $U_{10} = 18$ m/s, salinidad = 35 ppt)



P.2146-08

8.2 Coeficientes de dispersión biestática de la superficie del mar en la dirección de avance

Los coeficientes de dispersión biestática de la superficie del mar en la dirección de avance pueden utilizarse para evaluar la potencia de la interferencia recibida por una antena receptora. Estos coeficientes de dispersión biestática también pueden utilizarse para calcular la profundidad de desvanecimiento debida a las reflexiones de la superficie del mar, a que se alude en la Recomendación UIT-R P.680-3. Dicho cálculo puede efectuarse sumando el componente coherente (11) y los componentes difusos. El componente coherente sólo se manifiesta en la dirección de reflexión especular ($\theta_s = \theta_i$, y $\varphi_s = \varphi_i$). Los componentes difusos se definen en las ecuaciones (32) y (72) estableciendo $\theta_s = \theta_i \wedge \varphi_s = \varphi_i$.

Las Figs. 9 a 14 ilustran ejemplos de coeficientes de dispersión biestática en la dirección de avance. Las Figs. 9 y 10 ilustran el ángulo de dispersión (ángulo de observación de recepción) y varían el ángulo de incidencia (dirección de las señales interferentes). La Fig. 9 se calcula a 1,227 6 GHz (frecuencia GPS L2), y la Fig. 10 se calcula a 18,6 GHz. En cada figura, los coeficientes de dispersión biestática se calculan con dos velocidades de viento diferentes: $U_{10} = 2$ m/s, y $U_{10} = 25$ m/s.

Las Figs. 11 a 14 fijan el ángulo de incidencia (ángulo de interferencia) y varían el ángulo de dispersión. Las Figs. 11 y 13 se calculan a una frecuencia de 1,227 6 GHz, y las Figs. 12 y 14 a 18,6 GHz. Las Figs. 11 y 12 se calculan a una temperatura de la superficie del mar de 30 °C. Las Figs. 13 y 14 se calculan a una temperatura de la superficie del mar de 5 °C. Además, en las Figs. 11 a 14, los coeficientes de dispersión biestática se calculan con dos velocidades de viento distintas, a saber: $U_{10} = 2$ m/s, y $U_{10} = 25$ m/s.

Debido a la reciprocidad, los procesos de fijación de los ángulos de incidencia y de dispersión arrojan resultados similares. En consecuencia, el valor fijo del ángulo de dispersión que aparece en las Figs. 8 y 9 difiere del valor fijo del ángulo de incidencia de las Figs. 11 a 14.

Al comparar la Fig. 11 con la Fig. 13 y la Fig. 12 con la Fig. 14 se observa que, una vez superado el umbral de congelación, la temperatura no influye de manera significativa en el coeficiente de dispersión biestática.

FIGURA 9
Coefficientes de dispersión biestática en la dirección de avance en función del ángulo de incidencia con diferentes valores de velocidad del viento ($\theta_s = 30^\circ$, frecuencia = 1,227 6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 30 °C, salinidad = 35 ppt)

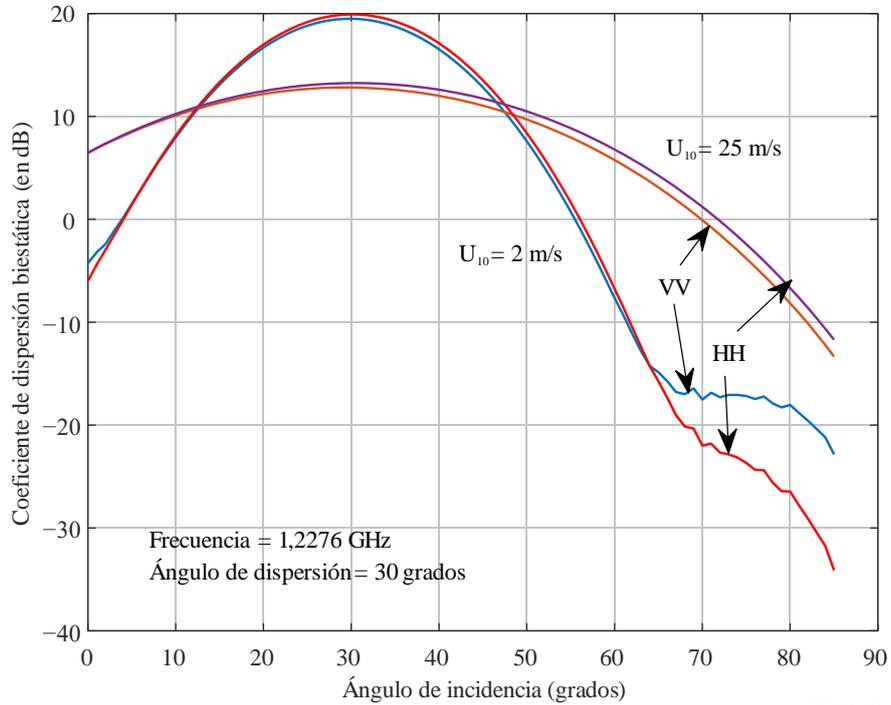
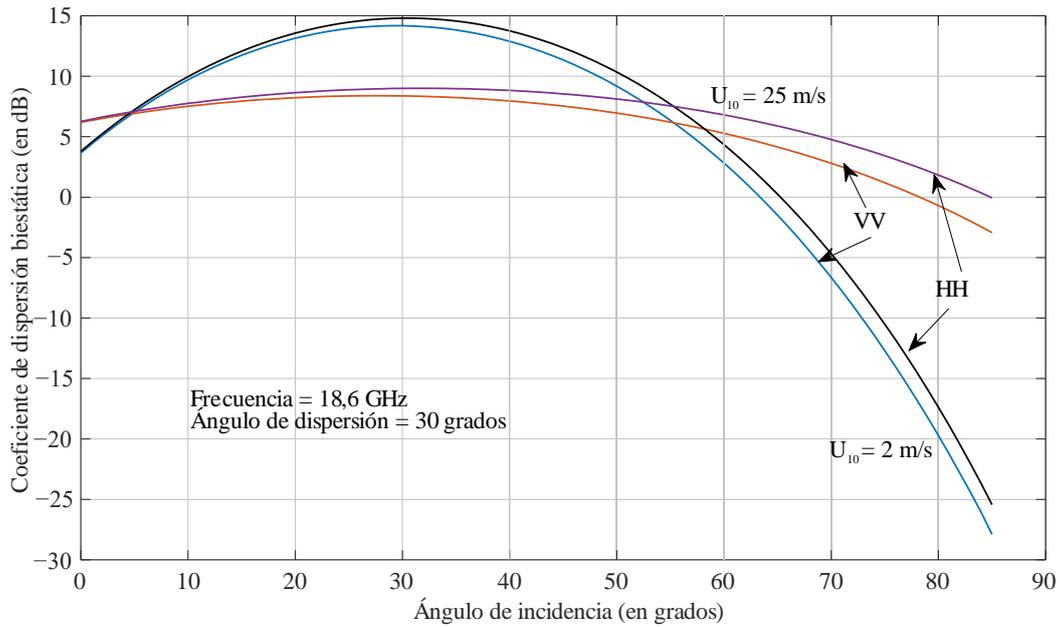


FIGURA 10

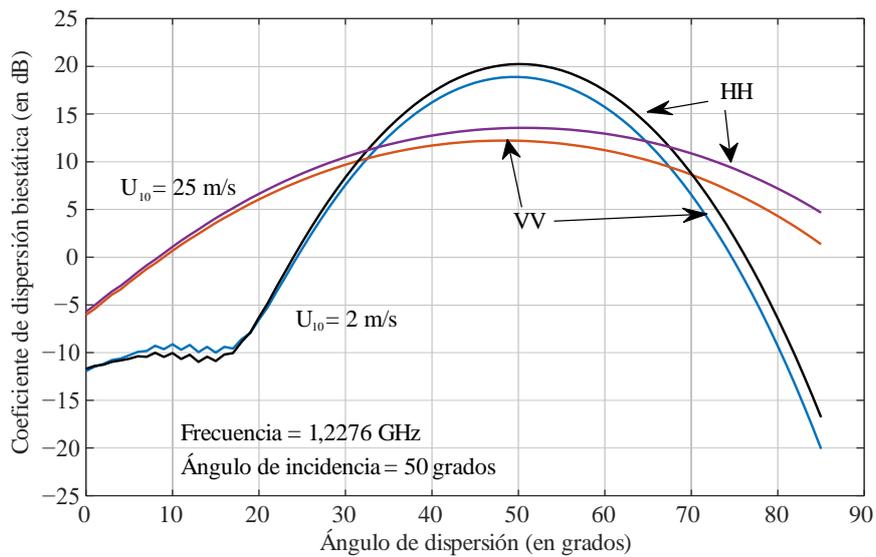
Coefficientes de dispersión biestática en la dirección de avance en función del ángulo de incidencia con diferentes valores de velocidad del viento ($\theta_s = 30^\circ$, frecuencia = 18,6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 30 °C, salinidad = 35 ppt)



P.2146-10

FIGURA 11

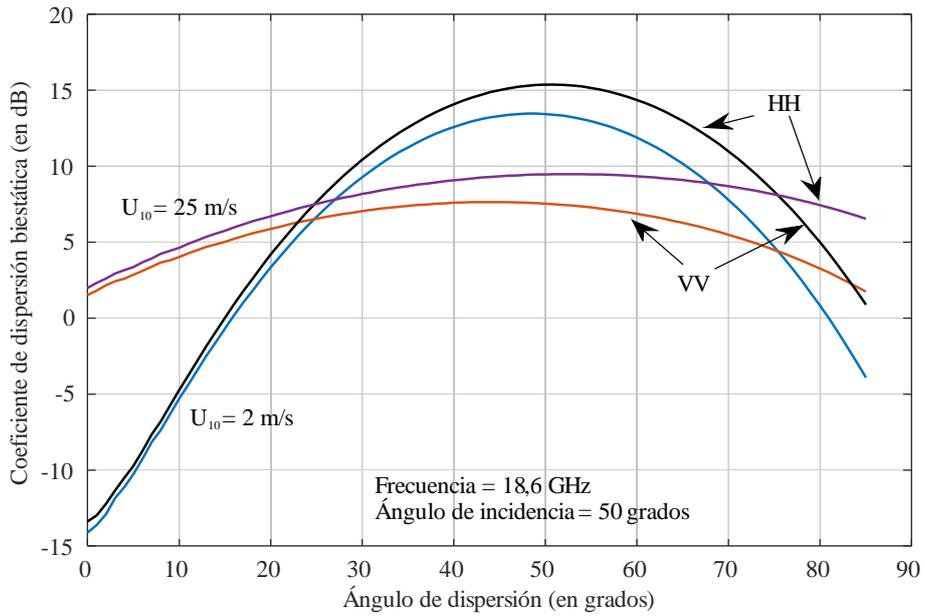
Coefficientes de dispersión biestática en la dirección de avance en función del ángulo de dispersión con diferentes valores de velocidad del viento ($\theta_i = 50^\circ$, frecuencia = 1,227 6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 30 °C, salinidad = 35 ppt)



P.2146-11

FIGURA 12

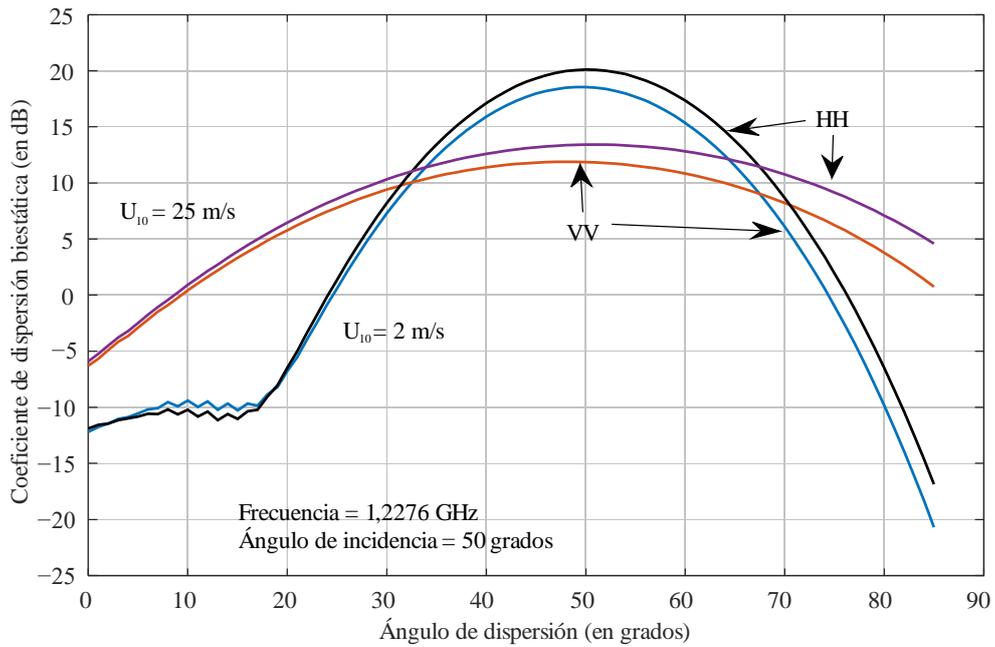
Coefficientes de dispersión biestática en la dirección de avance en función del ángulo de dispersión con diferentes valores de velocidad del viento ($\theta_i = 50^\circ$, frecuencia = 18,6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 30 °C, salinidad = 35 ppt)



P.2146-12

FIGURA 13

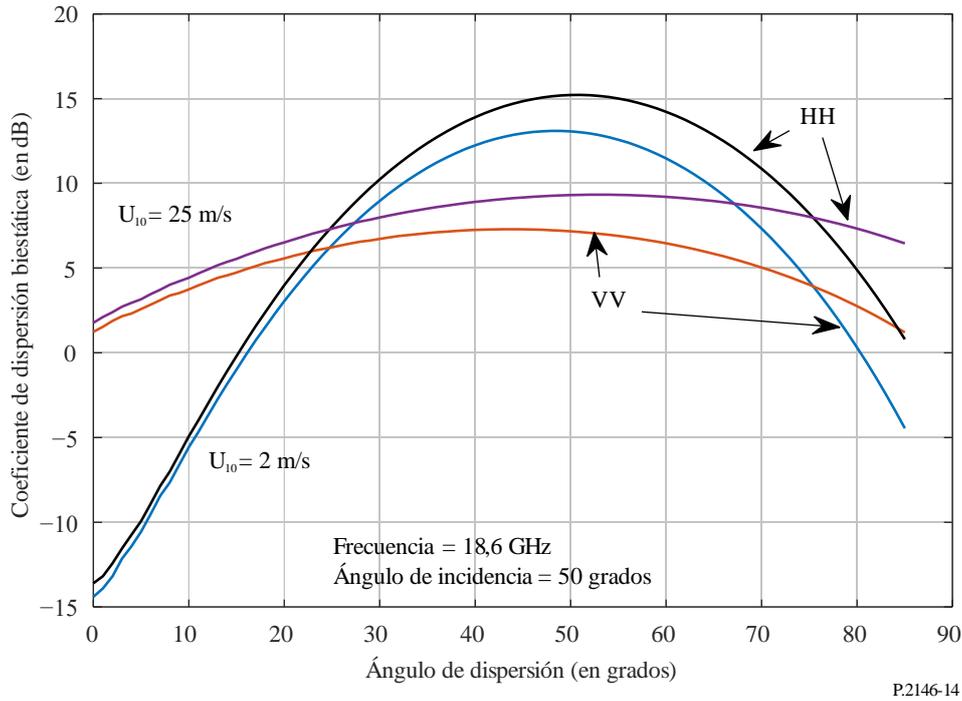
Coefficientes de dispersión biestática en la dirección de avance en función del ángulo de dispersión con diferentes valores de velocidad del viento ($\theta_i = 50^\circ$, frecuencia = 1,227 6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 5 °C, salinidad = 35 ppt)



P.2146-13

FIGURA 14

Coefficientes de dispersión biestática en la dirección de avance en función del ángulo de dispersión con diferentes valores de velocidad del viento ($\theta_i = 50^\circ$, frecuencia = 18,6 GHz, $\Omega = 0,84$, temperatura = 5 °C, salinidad = 35 ppt)



Adjunto A al Anexo

Cálculo de los coeficientes de dispersión entre ondas con polarización circular y con polarización lineal

En el presente Adjunto se detallan los cálculos necesarios para determinar los coeficientes de dispersión biestática entre a) una onda incidente con polarización circular y una onda dispersa con polarización lineal (es decir, γ_{qc} , siendo c o bien la polarización circular derecha, R , o bien la polarización circular izquierda, L , y q o bien la polarización vertical, v , o bien la polarización horizontal, h) y b) una onda incidente con polarización lineal y una onda dispersa con polarización circular (es decir, γ_{cq} , siendo q o bien la polarización vertical, v , o bien la polarización horizontal, h , y c o bien la polarización circular derecha, R , o bien la polarización circular izquierda, L).

A.1 Potencia incidente con polarización circular a potencia dispersa lineal

En este caso, los componentes coherentes del coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{pc}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debidos a la superficie del mar pueden obtenerse a partir de la ecuación (11) mediante la sustitución de $r_{pp}(\theta_i)$ por $r_{pc}(\theta_i)$ con:

$$r_{vR}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.1})$$

$$r_{hR}(\theta_i) = \frac{-j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.2})$$

$$r_{vL}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.3})$$

$$r_{hL}(\theta_i) = \frac{j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.4})$$

$$y j = \sqrt{-1}.$$

El coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{pc}^{\ell}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debido a las ondas de gravedad largas puede obtenerse a partir de la ecuación (32) mediante la sustitución de los factores de polarización $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ por los factores de polarización $U_{pc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ con:

$$U_{vR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.5})$$

$$U_{hR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.6})$$

$$U_{vL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.7})$$

$$U_{hL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.8})$$

El coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{pc}^{sh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debido a las ondas capilares cortas puede obtenerse a partir de la ecuación (72) mediante la sustitución de los factores de polarización $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ de la ecuación (70) por los factores de polarización $G_{pc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ con:

$$G_{vR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.9})$$

$$G_{hR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.10})$$

$$G_{vL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.11})$$

$$G_{hL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.12})$$

A.2 Potencia incidente lineal a potencia dispersa con polarización circular

En este caso, los componentes coherentes del coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{cq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debidos a la superficie del mar pueden obtenerse a partir de la ecuación (11) mediante la sustitución de $r_{pp}(\theta_i)$ por $r_{cq}(\theta_i)$ con:

$$r_{Rv}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.13})$$

$$r_{Lv}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.14})$$

$$r_{Rh}(\theta_i) = \frac{j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.15})$$

$$r_{Lh}(\theta_i) = \frac{-j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.16})$$

El coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{cq}^{\ell}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debido a las ondas de gravedad largas puede obtenerse a partir de la ecuación (32) mediante la sustitución de $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ por $U_{cq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ con:

$$U_{Rv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.17})$$

$$U_{Lv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.18})$$

$$U_{Rh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.19})$$

$$U_{Lh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.20})$$

El coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{cq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debido a las ondas capilares cortas puede obtenerse a partir de la ecuación (72) mediante la sustitución de $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ en la ecuación (70) por $G_{cq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ con:

$$G_{Rv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.21})$$

$$G_{Lv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.22})$$

$$G_{Rh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.23})$$

$$G_{Lh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.24})$$

Adjunto B al Anexo

Cálculo de los coeficientes de dispersión entre ondas con polarización circular

En el presente Adjunto se detallan los cálculos necesarios para determinar los coeficientes de dispersión biestática entre una onda incidente con polarización circular y una onda dispersa con polarización circular (es decir, γ_{PQ} , siendo P o bien la polarización circular derecha, R , o bien la polarización circular izquierda, L , y Q o bien la polarización circular derecha, R , o bien la polarización circular izquierda, L).

Los componentes coherentes del coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{cc}^e(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debidos a la superficie del mar pueden obtenerse a partir de la ecuación (11) mediante la sustitución de $r_{pp}(\theta_i)$ por $r_{PQ}(\theta_i)$ con:

$$r_{RR}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) + r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.1})$$

$$r_{RL}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) - r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.2})$$

$$r_{LR}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) - r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.3})$$

$$r_{LL}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) + r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.4})$$

El coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{PQ}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debido a las ondas de gravedad largas puede obtenerse a partir de la ecuación (32) mediante la sustitución de $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ por $U_{cc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ con:

$$U_{RR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j (U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i))\} \quad (\text{b.5})$$

$$U_{RL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j (U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i))\} \quad (\text{b.6})$$

$$U_{LR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left(U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (b.7)$$

$$U_{LL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left(U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (b.8)$$

El coeficiente de dispersión biestática $\gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ debido a las ondas capilares cortas puede obtenerse a partir de la ecuación (72) mediante la sustitución de $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ en la ecuación (70) por $G_{cc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ con:

$$G_{RR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j \left(G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (b.9)$$

$$G_{RL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j \left(G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (b.10)$$

$$G_{LR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left(G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (b.11)$$

$$G_{LL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left(G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (b.12)$$

Adjunto C al Anexo

Aproximaciones simples

Para ángulos de incidencia θ_i y ángulos de dispersión θ_s de menos de 60 grados, y para ángulos acimutales de dispersión φ_s de ± 5 grados con respecto al plano de dispersión hacia delante ($\varphi_s = \varphi_i = 0^\circ$), los términos relativos a la polarización cruzada que figuran en las ecuaciones (a.5) a (a.24) podrían obviarse, dando así lugar a las simplificaciones que se indican a continuación. De este modo, se obtiene un porcentaje de error inferior al 5%. En el plano de dispersión hacia delante ($\varphi_s = \varphi_i = 0^\circ$), para los ángulos de incidencia y dispersión anteriores, el porcentaje de error es insignificante.

Potencia incidente con polarización circular derecha y potencia dispersa vertical	$\gamma_{vR} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Potencia incidente con polarización circular derecha y potencia dispersa horizontal	$\gamma_{hR} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Potencia incidente con polarización circular izquierda y potencia dispersa vertical	$\gamma_{vL} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Potencia incidente con polarización circular izquierda y potencia dispersa horizontal	$\gamma_{hL} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Potencia incidente vertical y potencia dispersa con polarización circular derecha	$\gamma_{Rv} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Potencia incidente horizontal y potencia dispersa con polarización circular derecha	$\gamma_{Rh} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Potencia incidente vertical y potencia dispersa con polarización circular izquierda	$\gamma_{Lv} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Potencia incidente horizontal y potencia dispersa con polarización circular izquierda	$\gamma_{Lh} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$

Adjunto D al Anexo

Modelo de espectros de altura de la superficie del mar

El espectro de altura de la superficie del mar se divide en dos espectros, a saber un espectro a gran escala (gravedad) y un espectro a pequeña escala (capilaridad), que se denominan $W_l(\kappa, \psi)$ y $W_s(\kappa, \psi)$, respectivamente. El espectro a gran escala se indica a título de referencia, pero no se necesita directamente. El espectro a pequeña escala se relaciona con el espectro direccional de la superficie del mar, $W(\kappa, \psi)$, como sigue:

$$W_s(\kappa, \psi) = \begin{cases} 0 & \text{si } \kappa < \kappa_d \\ W(\kappa, \psi) & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (\text{d.1})$$

siendo κ_d el número de onda de altura de corte a dos escalas y (κ, ψ) las coordenadas polares de los números de onda de altura a barlovento y con viento cruzado asociadas a las coordenadas rectangulares de las pendientes superficiales (S_u, S_c). El espectro direccional $W(\kappa, \psi)$ se representa como sigue:

$$W(\kappa, \psi) = \kappa^{-1} S(\kappa) \varphi(\kappa, \psi) \quad (\text{d.2})$$

siendo $S(\kappa)$ la función de espectro isótropo (omnidireccional) y $\varphi(\kappa, \psi)$ la función de dispersión angular. El espectro isótropo, $S(\kappa)$, se calcula como sigue:

$$S(\kappa) = \left(\frac{B_l + B_h}{\kappa^3} \right) G^\gamma \exp \left\{ -1,25 \left(\frac{\kappa_p}{\kappa} \right)^2 \right\} \quad (\text{d.3})$$

B_l es el espectro de onda para las ondas de gravedad largas:

$$B_l = 0,003 \Omega^{0,5} \frac{U_{10}}{\Omega C(\kappa)} \exp \left\{ \frac{-\Omega}{\sqrt{10}} (\sqrt{\kappa/\kappa_p} - 1) \right\} \quad (\text{d.4})$$

$$G = \begin{cases} 1,7 & \text{si } \Omega < 1 \\ 1,7 + 6,0 \log_e(\Omega) & \text{si } 1 \leq \Omega < 5 \\ 2,7 \Omega^{0,57} & \text{si } \Omega \geq 5 \end{cases} \quad (\text{d.5})$$

$$\gamma = \exp \left\{ -(\sqrt{\kappa/\kappa_p} - 1)^2 / 2 \xi^2 \right\} \quad (\text{d.6})$$

$$\xi = \begin{cases} 0,08(1 + 4\Omega^{-3}) & \text{si } \Omega < 5 \\ 0,16 & \text{si } \Omega \geq 5 \end{cases} \quad (\text{d.7})$$

$$C(\kappa) = \sqrt{g \{1 + (\kappa/\kappa_m)^2\}} / \kappa \quad (\text{d.8})$$

$$\kappa_p = g \left\{ \frac{\Omega}{U_{10}} \right\}^2, \quad g = 9,81, \quad \kappa_m = 364,52 \quad (\text{d.9})$$

B_h es el espectro de onda para las ondas capilares cortas:

$$B_h = 0,5 \alpha_m \left(\frac{0,232}{C(\kappa)} \right) \exp \left\{ -0,25 \left(\frac{\kappa}{\kappa_m} - 1 \right)^2 \right\} \quad (\text{d.10})$$

$$\alpha_m = 0,014(u/0,232) \quad (\text{d.11})$$

$$u = U_{10} \sqrt{0,001(0,81 + 0,065 U_{10})} \quad (\text{d.12})$$

y Ω es la edad inversa de las olas. El mar se considera:

- plenamente desarrollado cuando los valores de Ω se aproximan a 0,84;
- maduro cuando los valores de Ω se aproximan a 1; y

– joven cuando los valores de Ω son > 2 .

U_{10} es la velocidad del viento (generalmente, entre 3 m/s y 33 m/s) a una altura de 10 m sobre la superficie del mar y u es la velocidad de fricción (es decir, la velocidad del viento en la superficie del mar). En la ecuación (d.3), γ representa la tensión superficial del agua y, en la ecuación (d.5), g representa la aceleración del agua debida a la gravedad en m/s^2 .

En la ecuación (d.2), la función de dispersión angular $\varphi(\kappa, \psi)$ permite calcular la dependencia acimutal del espectro direccional $W(\kappa, \psi)$ dado por:

$$\varphi(\kappa, \psi) = \frac{1}{2\pi} \{1 + \Delta(\kappa)\cos(2\psi)\} \quad (d.13)$$

siendo ψ la dirección de barlovento y $\Delta(\kappa)$ la amplitud de dependencia angular:

$$\Delta(\kappa) = \tanh \left\{ \frac{\log_e(2)}{4} + 4 \left(\frac{\Omega C(\kappa)}{U_{10}} \right)^{2,5} + \frac{0,13u}{0,232} \left(\frac{0,232}{C(\kappa)} \right)^{2,5} \right\} \quad (d.14)$$

Obsérvese que, en la ecuación (d.4), el valor de $C(\kappa)$ es ∞ cuando el valor de κ es cero. No obstante, cuando el valor de κ es cero, el valor de $S(\kappa)$ también es cero. En consecuencia, cuando $\kappa = 0$, cabe establecer $S(\kappa) = 0$ sin necesidad de realizar cálculos adicionales.

Adjunto E al Anexo

Potencia de interferencia de una señal reflejada desde la superficie del mar hacia un receptor

E.1 Introducción

La potencia difusa biestática P_{rp} procedente de la superficie del mar que recibe una antena receptora con polarización lineal p es fruto de la suma de dos componentes: un componente coherente P_{cp} y un componente difuso (incoherente) P_{dp} .

$$P_{rp} = P_{cp} + P_{dp} \quad (e.1)$$

En los apartados siguientes se calcula la potencia recibida en: a) el caso general y b) aproximaciones para el caso específico de un transmisor en órbita terrestre geostacionaria (GEO) y un receptor en órbita terrestre baja (LEO).

E.2 Potencia coherente recibida

Si las polarizaciones lineales de transmisión (incidente) y recepción (dispersa), p , son idénticas, la potencia coherente recibida, P_{cp} (W), es:

$$P_{cp} = \frac{P_{tp} G_{tp} L_{tp}}{4\pi(R_t + R_r)^2} \frac{\lambda^2 G_{rp} L_{rp} L_d}{4\pi} \gamma_{pp}^c \quad (W) \quad (e.2)$$

siendo:

P_{tp} : potencia transmitida con polarización p (W)

G_{tp} : ganancia de la antena transmisora en la dirección del punto de reflexión en la superficie de la Tierra (lineal)

- R_t : distancia entre el transmisor y el punto de reflexión especular en la superficie de la Tierra (en m)
- R_r : distancia entre el punto de reflexión especular en la superficie de la Tierra y la antena receptora (en m)
- G_{rp} : ganancia de la antena receptora en la dirección del punto de reflexión especular en la superficie de la Tierra (lineal)
- L_{tp} : pérdida atmosférica (véase, por ejemplo, la atenuación gaseosa) a lo largo del trayecto que discurre desde la fuente de interferencia hasta el punto de reflexión especular. La atenuación gaseosa, A_{gas} (dB), puede calcularse utilizando la información contenida en el Anexo 1 o el Anexo 2 a la Recomendación UIT-R P.676-12, en cuyo caso $L_{tp} = 10^{-A_{gas}/10}$
- L_{rp} : pérdida atmosférica (véase, por ejemplo, la atenuación gaseosa) a lo largo del trayecto que discurre desde el punto de reflexión especular hasta la antena receptora. La atenuación gaseosa, A_{gas} (dB), puede calcularse utilizando la información contenida en el Anexo 1 o el Anexo 2 a la Recomendación UIT-R P.676-12, en cuyo caso $L_{rp} = 10^{-A_{gas}/10}$
- λ : longitud de onda (en m)
- L_d : pérdida de divergencia debida a la curvatura de la Tierra, dada por:

$$L_d = \frac{1}{\left[\left(1 + \frac{2R_e}{a \cos \theta} \right) \left(1 + \frac{2R_e \cos \theta}{a} \right) \right]} \quad (e.3)$$

siendo:

- a : radio medio de la Tierra (6 371 000 m)
- R_e : alcance efectivo $R_e = \frac{R_t R_r}{R_t + R_r}$ (en m)
- θ : ángulo cenital de incidencia.

E.2.1 Transmisor en órbita GEO y receptor en órbita LEO: componente coherente

Para el componente especular reflejado, $R_t + R_r$ es el alcance total y $4\pi(R_t + R_r)^2$ es la pérdida por dispersión. $P_{tp} G_{tp}$ es la potencia isotópica radiada equivalente (p.i.r.e.). Para un transmisor en órbita GEO y un receptor en órbita terrestre baja (LEO), la aproximación que considera $R_t + R_r \cong R_t$ introduce un error de unos pocos puntos porcentuales en el término coherente. En este caso, la ecuación (e.2) se convierte en:

$$P_{cp} = \frac{P_{tp} G_{tp} L_{tp}}{(4\pi R_t)^2} \lambda^2 G_{rp} L_{rp} L_d \gamma_{pp}^c \quad (W) \quad (e.4)$$

γ_{pp}^c es el coeficiente de dispersión biestática coherente dado por la ecuación (11) para las ondas incidentes con polarización lineal y las ondas dispersas con polarización lineal. Las correspondientes transformaciones en términos de polarización que prevén los Adjuntos A, B y C pueden utilizarse para otros pares de polarización incidente y dispersa.

E.3 Potencia difusa recibida

La potencia difusa recibida, P_{dp} (W), puede calcularse utilizando la ecuación del radar biestático convencional (por ejemplo, la ecuación (73) de la Recomendación UIT-R P.452-16). La potencia difusa dispersa que recibe una antena con polarización p debida y polarización de transmisión q es:

$$P_{dp} = P_{tq} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iint \frac{G_{rp}(\hat{k}_i) G_{tq}(\hat{k}_s)}{r_t^2 r_r^2} L_{tq}(\hat{k}_i) \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \cos \theta_s L_{rp}(\hat{k}_s) dA \quad (W) \quad (e.5)$$

siendo:

- P_{tq} : potencia de transmisión con polarización q (W)
- \hat{k}_i : dirección de incidencia en la zona diferencial de dispersión
- \hat{k}_s : dirección de dispersión en la zona diferencial de dispersión
- $G_{rp}(\hat{k}_i)$: ganancia de la antena transmisora en la dirección de incidencia \hat{k}_i (lineal)
- $G_{tq}(\hat{k}_s)$: ganancia de la antena receptora en la dirección de recepción \hat{k}_s (lineal)
- dA : zona diferencial de dispersión dentro de la superficie (en m^2)
- r_t : distancia entre el transmisor y la zona diferencial de dispersión en la superficie de la Tierra (en m)
- r_r : distancia entre la zona diferencial de dispersión en la superficie de la Tierra y el receptor (en m).

E.3.1 Transmisor en órbita GEO y receptor en órbita LEO: componente difuso

En la siguiente aproximación se asume que la ganancia de la antena transmisora es constante en toda la huella de la antena receptora (hipótesis razonable para un transmisor GEO con una antena de ganancia moderada y un receptor LEO con una antena de ganancia elevada) y que las distancias desde la antena transmisora hasta la superficie de la Tierra y desde la superficie de la Tierra hasta la antena receptora no varían significativamente en el conjunto de la huella de la antena receptora. En este caso, la ecuación (e.5) puede aproximarse como sigue:

$$P_{dp} \cong \frac{P_{tq} G_{tq} \lambda^2 L_{tq}(\hat{k}_i) L_{rp}(\hat{k}_s)}{(4\pi R_t)^2} \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_{s0}, \hat{k}_{i0}) \quad (e.6)$$

siendo:

- \hat{k}_{i0} : dirección de incidencia en la zona diferencial de dispersión a lo largo del haz principal de la antena transmisora
- \hat{k}_{s0} : dirección de dispersión en la zona diferencial de dispersión a lo largo del haz principal de la antena receptora
- R_t : distancia entre el transmisor y el centro de la huella, en la superficie de la Tierra, iluminada por la antena transmisora (en m).

Las transformaciones en términos de polarización que prevén los Adjuntos A, B y C pueden utilizarse a fin de calcular $\gamma_{pq}^{dif}(\vec{r}_{t0}, \vec{r}_{r0})$ para polarizaciones de incidencia y dispersión distintas de la lineal-lineal y circular-circular.