

Juan José Murillo Fuentes

PROBLEMAS DE RADIOCOMUNICACIÓN



UNIVERSIDAD DE SEVILLA
Editorial Universidad de Sevilla

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

ÍNDICE

Juan José Murillo Fuentes

PROBLEMAS DE RADIOCOMUNICACIÓN



Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla 2017

Serie: Ingeniería
Colección: Monografías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Número: 2

COMITÉ EDITORIAL:

José Beltrán Fortes
(Director de la Editorial Universidad de Sevilla)
Araceli López Serena
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
Ana Ilundáin Larrañeta
Emilio José Luque Azcona
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque Sánchez
José Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

Edición digital de la primera edición impresa en 2013

Motivo de cubierta: Antenas de Radioenlaces del Servicio Fijo
por Juan José Murillo Fuentes.

© EDITORIAL UNIVERSIDAD DE SEVILLA 2017
C/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: eus4@us.es
Web: <<http://www.editorial.us.es>>

© JUAN JOSÉ MURILLO FUENTES 2017

ISBNe: 978-84-472-2054-0

DOI: <http://dx.doi.org/10.12795/9788447220540>

Realización interactiva: Emiliano Molina

Agradecimientos

En la escritura de un texto como este intervienen diversos elementos, que además determinan la calidad del mismo. Estos elementos son en gran medida externos al propio autor, y por los que el autor está inmensamente agradecido.

Así, por el conjunto de conocimientos necesarios para abordar esta tarea, adquiridos en todas las etapas de mi formación, estoy en deuda con mis profesores y con los centros donde estudié.

Por las consultas resueltas, discusiones e ideas compartidas en torno a esta temática estoy agradecido a mis compañeros, los profesores M^a José Madero, Carlos Crespo, Luis J. Reina, Auxiliadora Sarmiento e Iván Durán. Además, las profesoras Madero y Sarmiento participaron activamente en este texto con correcciones a algunos de los problemas contenidos. Finalmente, agradezco sinceramente al prof. Miguel Pérez, de la Universidad Politécnica de Madrid, sus enseñanzas y discusiones sobre OFDMA y CDMA, que dieron lugar a varios problemas aquí incluidos.

El formato de este libro fue generado con la plantilla L^AT_EX, que el profesor Payán Somet viene desarrollando y perfeccionando durante los últimos años. Le agradezco enormemente, además de su generosidad por compartir su trabajo, su paciencia a la hora de contestar mis dudas sobre el mismo. También, le estoy agradecido por revisar este texto.

Finalmente, agradezco a mis alumnos el interés que han mostrado por estos temas, y su apoyo para abordar esta tarea. En particular, doy gracias a los alumnos Ignacio Pertíñez y María Vicente por sus correcciones a algunos de estos problemas.

Sevilla, 2013

Prefacio

El diseño de sistemas de radiocomunicación implica conocer de forma profunda cada una de las partes o canales del sistema de comunicación así como el funcionamiento del sistema completo en determinadas aplicaciones como radioenlaces del servicio fijo, comunicaciones móviles y comunicaciones por satélite. En este texto el lector encontrará problemas que versan -entre otros aspectos- sobre el análisis de antenas, aspectos de ruido e intermodulación en receptores y transmisores de radiocomunicaciones, cálculo de pérdidas de propagación, diseño de radioenlaces del servicio fijo, de sistemas de comunicaciones móviles privados y públicos, y de sistemas de comunicaciones por satélite. En estos problemas se ha tratado tanto de proponer ejemplos pedagógicos como situaciones reales, donde los niveles y unidades de las magnitudes involucradas se correspondan con la práctica.

El libro se ha organizado por capítulos según los temas tratados. Al comienzo de cada capítulo encontrará, además de una breve introducción a la teoría utilizada, una descripción de los problemas incluidos, de forma que el lector pueda hacer una selección de los mismos según su interés. Al comienzo del libro se incluye también la notación. Ésta es algo compleja, por ser muy amplia y por reutilizarse en alguna ocasión según el contexto. Finalmente, puede encontrar en el Apéndice un resumen sobre la definiciones de decibelios y un glosario con acrónimos utilizados.

Debido a la gran cantidad de datos que se manejan en los problemas, y a que no pocas veces se han modificado estos datos en sucesivas versiones, de seguro aparecerán erratas. Pido disculpas de antemano por ellas y, en la medida de lo posible, intentaré detallarlas en mi página web conforme vayan apareciendo.

El presente texto es una recopilación de los problemas propuestos por el autor, junto con sus soluciones, en la fase de evaluación de la asignatura Radiación y Radiocomunicación de 4º de Ingeniería de Telecomunicación en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

Sevilla, 2013

Notación

| Matemática | |
|-------------------------------------|--|
| \vec{U} | Vector U |
| U | Amplitud del vector U |
| U^* | Conjugado de U |
| $\langle U \rangle$ | Promedio de U |
| $\text{Re}[U]$ | Parte real de U |
| $\text{Im}[U]$ | Parte imaginaria de U |
| $ U $ | Módulo de U, $ U = \sqrt{\text{Re}[U]^2 + \text{Im}[U]^2}$ |
| \hat{u} | Vector de norma unidad |
| $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ | Vectores de ejes cartesianos |
| U_x, U_y, U_z | Componentes cartesianas de \vec{U} |
| $\hat{i}, \hat{\phi}, \hat{\theta}$ | Vectores de ejes polares |
| U_r, U_ϕ, U_θ | Componentes polares de \vec{U} |
| x° | Grados, x grados |
| $\stackrel{\text{def}}{=}$ | Igual por definición |
| $\ \mathbf{x}\ $ | Norma-2 del vector x |
| Δ | Incremento |
| Común | |
| <i>u.n.</i> | Unidades naturales |
| <i>f</i> | Frecuencia |
| <i>λ</i> | Longitud de onda ó latitud de la estación terrena, según contexto |
| <i>d</i> | Directividad de la antena, en u.n., ó distancia, según contexto |
| <i>B</i> | Ancho de banda, por defecto paso de banda |
| <i>α</i> | Factor de caída, <i>roll-off</i> , de un pulso raíz de coseno alzado |
| <i>P</i> | Potencia, en decibelios |
| <i>p</i> | Potencia, en u.n. |
| <i>h_t, h_r</i> | Alturas de antenas transmisora y receptora, respectivamente, en metros |

| | |
|-------------|---|
| g | Ganancia directiva máxima de antena ó ganancia de un bloque o cuadripolo, en u.n., según contexto |
| G_t, G_r | Máxima ganancia directiva de la antena transmisora y receptora, respectivamente, en dB ó dBi |
| L | Pérdida de potencia de un medio, bloque ó cuadripolo |
| P_{et} | Potencia entregada al circuito de acoplo que conecta equipo transmisor y antena |
| L_{tt} | Pérdidas del circuito de acoplo que conecta equipo transmisor y antena |
| P'_t | Potencia entregada a la antena, $P'_t = P_{et} - L_{tt}$ |
| $PIRE$ | Potencia isotrópica radiada aparente, $PIRE = P_{et} - L_{tt} + G_t$ |
| P'_r | Potencia recibida en conector de la antena receptora |
| L_{tr} | Pérdidas del circuito de acoplo entre antena receptora y equipo receptor |
| P_{dr} | Potencia recibida a la entrada del equipo receptor, $P_{dr} = P'_r - L_{tr}$ |
| C | Potencia de portadora en decibelios |
| T_h ó S | Potencia mínima necesaria en recepción o sensibilidad, en decibelios |
| T_{hx} | Potencia mínima necesaria en recepción o sensibilidad, en decibelios, para una BER de 10^{-x} |
| N | Potencia de ruido en dB |
| N_i, N_o | Potencia de ruido en dB a la entrada o salida, respectivamente |
| n | Potencia de ruido en u.n. |
| e_b | Energía de bit, en u.n. |
| n_0 | Densidad espectral de potencia de ruido (blanco), en u.n.; $n = Bn_0$ |
| w | Relación señal a ruido normalizada, en u.n.; $w = e_b/n_0$ |
| W | Relación señal a ruido normalizada, en dB |
| SNR | Relación señal a ruido, en dB |
| C/N | Relación potencia de portadora recibida a potencia de ruido, en dB |
| C/I | Relación potencia de portadora recibida a potencia de interferencia, en dB |
| L_b | Pérdidas básicas de propagación, en dB |
| l_b | Pérdidas básicas de propagación, en u.n. |
| L_{bf} | Pérdidas básicas de propagación en espacio libre, en dB |
| R_b | Régimen binario, en bps (bits por segundo), kbps (kilo-bps) ó Mbps (Mega-bps) |
| R_s | Régimen de símbolos |
| T_b | Tiempo de bit |
| T_s | Tiempo de símbolo ó temperatura de ruido del sistema, según contexto |
| M | Número de niveles de la modulación, $T_s = T_b \log_2 M$, ó margen, en dB, según contexto |
| A_o | Tráfico ofertado por el sistema en una celda |
| A_d | Tráfico demandado por los usuarios de una celda |
| L_{ll} | Intentos de llamada en la peor hora (hora cargada) |
| H_{ll} | Duración media de la llamada |
| N_c | Canales (de usuario) disponibles para cursar tráfico |
| M_c | Número de móviles en una celda |

η Impedancia característica del medio ó eficiencia de una antena parabólica ó factor de actividad de multitrayecto, según contexto

Sistemas Radiantes

U_o Valor de U en vacío
 \vec{A} Potencial vector generado por una antena
 \vec{A}_d Potencial vector generado por un elemento diferencial
 \vec{N} Vector de radiación
 \vec{E} Vector campo eléctrico
 E_o Campo eléctrico (amplitud del) en espacio libre
 $\langle \vec{S} \rangle$ Vector de Poynting promedio
 \vec{S} Vector superficie
 $I(z)$ Intensidad de corriente en el punto z
 $\vec{J}(z)$ Flujo de corriente en el punto z
 $V(z)$ Tensión en el punto z
 V Tensión o volumen, según contexto
 μ Permeabilidad magnética del medio
 $u(\theta, \varphi)$ Intensidad de radiación, en u.n.
 $g(\theta, \varphi)$ Ganancia directiva de antena, en u.n.
 D Directividad de la antena en decibelios ó diámetro de una antena parabólica, según contexto
 R_a Resistencia de radiación
 k Número de onda angular, $k = 2\pi/\lambda$

Ruido y Distorsión

SIR Relación entre potencia de señal y potencia de intermodulación, en dB
 $SINR$ Relación entre potencia de señal y la suma de potencia de ruido más potencia de intermodulación, en dB
 T_a Temperatura equivalente de ruido para la antena, en grados Kelvin (K)
 T_r Temperatura equivalente de ruido para el receptor, desde antena hasta el demodulador, no incluidos, en grados Kelvin
 T_s Temperatura equivalente de ruido para el sistema, formado por antena más receptor, en grados Kelvin, $T_s = T_a + T_r$, ó tiempo de símbolo, según contexto
 T_0 Temperatura ambiente, 290 K
 f_a Figura o factor equivalente de ruido para la antena en u.n.; $f_a = T_a/T_0$
 f_r Figura o factor equivalente de ruido para el receptor, desde salida de antena hasta la entrada al demodulador, no incluidos, en u.n.; $f_r = T_r/T_0 + 1$
 f_s Figura o factor equivalente de ruido para el sistema, formado por antena más receptor, en u.n.; $f_s = f_a + f_r - 1$
 F_a Figura o factor equivalente de ruido para la antena, en dB
 F_r Figura o factor equivalente de ruido para el receptor, desde salida de antena hasta la entrada al demodulador, no incluidos, en dB

| | |
|--------|---|
| F_s | Figura o factor equivalente de ruido para el sistema, formado por antena más receptor, en dB |
| IP_3 | Punto de intercepto de tercer orden a la salida, en dB; podrá denotarse también por IP_3^o |
| ip_3 | Punto de intercepto de tercer orden a la salida, en u.n.; podrá denotarse también por ip_3^o |
| I_3 | Potencia de intermodulación de tercer orden a la salida, en dB; podrá denotarse también por I_3^o |
| i_3 | Potencia de intermodulación de tercer orden a la salida, en u.n.; podrá denotarse también por i_3^o |

Servicio Fijo (terrenal)

| | |
|----------|---|
| U | Indisponibilidad (interrupciones largas) total |
| U_p | Indisponibilidad por propagación (lluvia) |
| U_E | Indisponibilidad por avería de equipos |
| P_{TT} | Pérdida de fidelidad (interrupciones cortas) total |
| P_{TP} | Pérdida de fidelidad por desvanecimiento plano |
| P_{TS} | Pérdida de fidelidad por desvanecimiento selectivo |
| $MTBF$ | Tiempo medio entre fallos |
| $MTTR$ | Tiempo medio en reparar |
| M_e | Margen neto |
| M_x | Margen bruto (diferencia entre potencia recibida y necesaria) para una BER de 10^{-x} |
| k_r | Signatura normalizada |
| P_0 | Factor de aparición de desvanecimiento multitrayecto |
| A_p | Atenuación excedida en el p % del tiempo debido a lluvia |
| τ_m | Retardo promedio del segundo rayo respecto al primero en un modelo de canal de dos rayos |
| b | Módulo del segundo rayo en un modelo de canal de dos rayos, normalmente con el módulo del primer rayo normalizado a módulo unidad |

Comunicaciones por Satélite

| | |
|----------|--|
| G/T | Relación ganancia de antena receptora G_r a temperatura de ruido del sistema T_s o también factor de calidad; $G/T = G_r - 10 \log(T_s)$ |
| r | Radio de la Tierra |
| D_s | Distancia entre satélite geoestacionario y el centro de la tierra ($D_s = r + h = 42200$ km), según contexto |
| ρ_0 | Longitud de la estación terrena, positiva hacia el este |
| ρ_1 | Longitud del satélite (geoestacionario), positiva hacia el este |
| ρ | Diferencia entre la longitud de la estación terrena y la longitud del satélite; $\rho = \rho_0 - \rho_1$ |
| T_{tr} | Tiempo de trama |

Sistemas Celulares

| | |
|--------------------------|---|
| p_c | Probabilidad de congestión o grado de servicio (<i>GOS</i>), generalmente en % |
| J | Patrón de reutilización o número de celdas por agrupación (racimo) |
| Q | Índice de reutilización o número total de agrupaciones |
| S_c | Superficie de celda |
| R_c | Radio de celda |
| D_c | Distancia de reutilización |
| S_t | Superficie total cubierta |
| R_p | Relación de protección frente a interferencias (<i>C/I</i> mínima permitida) |
| n, k | Exponente y constante de pérdidas, $l_b = kd^n$ |
| ρ_m | Usuarios móviles por unidad de superficie (densidad de usuarios móviles) |
| ρ_a | Tráfico demandado por unidad de superficie (densidad de tráfico) |
| M_c | Número de móviles en una celda |
| Δf | Ancho de banda de un canal (canalización) |
| $\Delta_r E$ | Corrección (incremento necesario) de campo por ruido y multitrayecto |
| $\Delta_e E, \Delta_e C$ | Corrección (incremento necesario) de campo o potencia, respectivamente, por tanto por ciento de emplazamientos y/o del tiempo |
| C_c | Número de canales disponibles en un sistema celular |

Nota: cuando sea posible, y no de lugar a confusión, se utilizará minúscula para unidades naturales y mayúsculas para decibelios.

Índice

| | |
|---|-----------|
| <i>Prefacio</i> | V |
| <i>Notación</i> | VII |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Potencia radiada por una antena | 3 |
| 1.1.1 Ganancia directiva y ganancia de potencia | 3 |
| 1.1.2 PIRE | 4 |
| 1.2 Friis en espacio libre | 4 |
| 1.2.1 Campo en un punto, en espacio libre | 4 |
| 1.2.2 Potencia recibida en función del campo recibido | 5 |
| 1.2.3 Fórmula de Friis en espacio libre | 5 |
| 1.3 Friis en cualquier medio | 6 |
| 1.3.1 Campo en un punto en cualquier medio | 6 |
| 1.3.2 Fórmula de Friis en otro medio cualquiera | 6 |
| 2 Sistemas radiantes | 9 |
| 2.1 Introducción | 9 |
| P.2.1 Dipolo ideal | 10 |
| P.2.2 Antena lineal larga adaptada | 13 |
| P.2.3 Dipolos en cruz | 17 |
| P.2.4 Antena colineal | 19 |
| P.2.5 Dipolo con reflector | 23 |
| P.2.6 Antena WiFi | 26 |
| P.2.7 Antena y propagación en AM | 30 |
| 3 Ruido e Intermodulación | 35 |
| 3.1 Introducción | 35 |
| 3.2 Ruido y sensibilidad | 36 |
| 3.2.1 Temperatura y figura de ruido | 36 |
| 3.2.2 Sensibilidad | 37 |



| | | |
|----------|---|------------|
| 3.3 | No linealidad | 37 |
| P. 3.1 | Ruido e intermodulación en receptor superheterodino | 38 |
| P. 3.2 | Ruido y rendimiento de antena | 40 |
| P. 3.3 | Sistema Digital | 42 |
| P. 3.4 | DAB | 45 |
| P. 3.5 | Ruido y filtrado en FI | 49 |
| P. 3.6 | Intermodulación en un walkie-talkie | 51 |
| P. 3.7 | SNR y SINR en receptor FM | 53 |
| P. 3.8 | Ruido en señal recibida desde un transmisor | 56 |
| P. 3.9 | Ruido e intermodulación en receptor con conmutador | 59 |
| P. 3.10 | Cobertura y ruido | 62 |
| P. 3.11 | Transceptor a 433 MHz | 65 |
| 4 | Servicio fijo terrenal | 69 |
| 4.1 | Introducción | 69 |
| 4.1.1 | Equipos | 70 |
| 4.1.2 | Lluvia | 70 |
| 4.1.3 | Desvanecimiento multitrayecto | 70 |
| P. 4.1 | Transmisión en un radioenlace del servicio fijo | 71 |
| P. 4.2 | Calidad en un Radioenlace del Servicio Fijo | 73 |
| P. 4.3 | Interrupciones en un radioenlace a 8 GHz | 77 |
| P. 4.4 | Radioenlace con difracción | 79 |
| P. 4.5 | Interrupciones en un radioenlace a 13 GHz | 83 |
| P. 4.6 | Radioenlace del servicio fijo a 13 GHz | 86 |
| P. 4.7 | Radioenlace a 60 GHz | 89 |
| P. 4.8 | Repetidor activo no regenerativo | 92 |
| 5 | Comunicaciones por satélite | 97 |
| 5.1 | Apuntamiento de antena a un satélite geostacionario | 97 |
| 5.2 | Balance de enlaces | 98 |
| 5.3 | Acceso múltiple | 98 |
| P. 5.1 | Balance de enlace descendente en un satélite de Astra | 98 |
| P. 5.2 | Viabilidad del sistema Thuraya | 101 |
| P. 5.3 | Balance de enlace completo en satélites transparentes | 104 |
| P. 5.4 | Satélite GEO y TDMA | 107 |
| P. 5.5 | Satélite GEO como repetidor de canales vocales | 109 |
| 6 | Sistemas Celulares | 113 |
| 6.1 | Introducción | 113 |
| 6.2 | Cálculos de cobertura y dimensionamiento | 114 |
| 6.2.1 | C/N | 114 |
| 6.2.2 | C/I | 114 |
| 6.2.3 | Probabilidad de congestión | 115 |
| P. 6.1 | Pérdidas y dimensionamiento en un sistema celular GSM 900 | 116 |

| | | |
|-------------------------------------|---|------------|
| P. 6.2 | Planificación sistema celular DCS-1800 | 119 |
| P. 6.3 | Sistema celular GSM con sectorización, una mejor aproximación | 122 |
| P. 6.4 | Planificación GSM | 125 |
| P. 6.5 | Sistema celular GSM con patrón de reutilización 3 | 129 |
| P. 6.6 | Sistema GSM-R | 134 |
| P. 6.7 | Sistema GSM-R sectorizado | 136 |
| P. 6.8 | Cobertura GSM con capas, celdas omnidireccionales | 138 |
| P. 6.9 | Cobertura GSM con capas | 141 |
| P. 6.10 | Planificación Radio | 144 |
| P. 6.11 | Sistema PAMR TETRA | 147 |
| P. 6.12 | Cobertura WiFi | 151 |
| P. 6.13 | Dimensionamiento de tráfico de voz y datos | 153 |
| P. 6.14 | Sistema OFDMA | 155 |
| P. 6.15 | CDMA en UMTS | 157 |
| Apéndice A El concepto de dB | | 161 |
| A.1 | Cambio de unidades | 162 |
| A.2 | Unidades de potencia y campo | 163 |
| <i>Bibliografía</i> | | 165 |
| <i>Glosario</i> | | 167 |