



CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESVANECIMIENTO A CORTO PLAZO EN CANALES VEHICULARES

Marc Martínez Arlandis

Tutor: Lorenzo Rubio Arjona

Cotutor: Juan Reig Pascual

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación
Curso 2016-17

Valencia, 5 de julio de 2017

Agradecimientos

Desde esta página quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado, escuchado y dirigido para que este proyecto sea una realidad.

Especialmente quiero dar gracias al Director de mi Trabajo Fin de Grado, D. Lorenzo Rubio Arjona, que confió en mi para desarrollar la idea, y al codirector D. Juan Reig Pascual, por su esfuerzo para hacer posible la realización de este proyecto. También a mi familia y amigos que siempre me han apoyado, y a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia por permitir formarme en ella para desarrollar en el futuro mi profesión.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres el esfuerzo realizado y la confianza e ilusión aportada. A ellos se lo debo todo.

Resumen

En este Trabajo Final de Grado se realiza la caracterización experimental del desvanecimiento a corto plazo en canales vehiculares, concretamente en aquellas comunicaciones llevadas a cabo entre dos vehículos (*vehicle-to-vehicle*, V2V).

En primer lugar, se describe el origen y la finalidad de las comunicaciones V2V, así como la necesidad de estudiar el escenario donde se produce la comunicación de forma que permita establecer una conexión segura y de alta fiabilidad. A continuación, se desarrollan los fundamentos relacionados con las comunicaciones V2V, como la asignación de frecuencias en Europa y Estados Unidos y las potencias utilizadas por los vehículos en cada banda espectral.

Después, se realiza el análisis e interpretación de los datos recogidos por el equipo de medidas en un escenario concreto y se establece una clasificación de las trazas, y en consecuencia del recorrido, para permitir un estudio más exhaustivo de los desvanecimientos a corto plazo en función de las características del entorno.

Finalmente, a partir de los parámetros obtenidos de las distribuciones que modelan los desvanecimientos a corto plazo (κ - μ , Rice y Folded normal) para cada tramo en que se ha dividido el recorrido se extraen las conclusiones correspondientes.

Resum

En aquest Treball Final de Grau es realitza la caracterització experimental del esvaniment a curt termini en canals vehicular, concretament en aquelles comunicacions dutes a terme entre dos vehicles (*vehicle-to-vehicle*, V2V).

En primer lloc, es descriu l'origen i la finalitat de les comunicacions V2V, així com la necessitat d'estudiar l'escenari on es produeix la comunicació de forma que permeti establir una connexió segura i d'alta fiabilitat. A continuació, es desenvolupen els fonaments relacionats amb les comunicacions V2V, com l'assignació de freqüències en Europa i Estats Units i les potències utilitzades pels vehicles en cada banda espectral.

Després, es realitza l'anàlisi i interpretació de les dades recollides per l'equip de mesures en un escenari concret y s'estableix una classificació de les traces, i en conseqüència del recorregut, per a permetre un estudi més exhaustiu dels esvaniments a curt termini en funció de les característiques de l'entorn.

Finalment, a partir dels paràmetres obtinguts de les distribucions que modelen els esvaniments a curt termini (κ - μ , Rice y Folded normal) per a cada tram en que s'ha dividit el recorregut se extrauen les conclusions correspondents.

Abstract

The Final Project Degree is based on the experimental characterization of short-term fading in vehicular channels, specifically in the communications carried out between two vehicles (*vehicle-to-vehicle*, V2V).

First of all, it describes the origin and purpose of V2V communications, as well as the need of studying the scenario where communication takes place in a way that allows a secure and high reliability connection. Then, the fundamentals related to V2V communications are developed, such as the assignment of frequencies in Europe and the United States and the powers used by the vehicles in each spectral band.

Afterwards, the analysis and interpretation of the data collected by the measurement system is carried out in a specific scenario and a classification of the traces, and consequently of the trajectory, is established to allow a more exhaustive study of the short-term fading in function of the characteristics of the environment.

Finally, from the parameters obtained of the distributions that model the short-term fading (κ - μ , Rice y Folded normal) for each section in which the path has been divided the corresponding conclusions are drawn.

Índice general

1. Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organización de la memoria	2
2. Metodología	4
2.1. Realización del proyecto	4
2.2. Distribución de tareas	4
2.3. Diagrama temporal	5
3. Introducción a las comunicaciones V2V	6
3.1. Introducción	6
3.2. Asignación de frecuencias	7
3.2.1. Asignación en EEUU	8
3.2.2. Asignación en Europa	9
4. Caracterización del canal radio vehicular	12
4.1. Efectos de la propagación	12
4.1.1. Propagación en espacio libre	13
4.1.2. Reflexión	13
4.1.3. Difracción	14
4.1.4. Dispersión	14

4.1.5. Penetración a través del material	15
4.2. Consideraciones para el modelado del canal vehicular	15
4.2.1. Objetos	16
4.2.2. Escenarios	17
4.3. Caracterización de canales V2V de banda estrecha	18
4.3.1. Path Loss	18
4.3.2. Shadowing	20
4.3.3. Small-Scale Fading	20
5. Equipo de medida y datos obtenidos	25
5.1. Equipo de medidas	25
5.2. Datos obtenidos y primeros análisis	26
5.2.1. Escenario de medidas	27
5.2.2. Distancias y velocidades	28
6. Análisis de resultados	31
6.1. Elaboración del script en Matlab	31
6.2. Interpretación de los resultados	34
7. Conclusiones y futuras direcciones	37
7.1. Conclusiones	37
7.2. Futuras direcciones	38
Anexos	39
A. Anexo	40
Bibliografía	45

Lista de Figuras

3.1. Modelo de comunicación V2V [25].	7
3.2. Modelo de comunicación V2I [26].	8
3.3. Asignación de frecuencias en Estados Unidos [22].	9
3.4. Asignación de frecuencias en Europa [8].	9
4.1. Efectos de la propagación [31]	15
4.2. Entorno de comunicación V2V típico [21]	16
4.3. Reflexiones (verde) y difracción (magenta) de rebote único. Edificios (rojo) y vehículos (azul) para un conjunto de vehículos de transmisión y recepción seleccionados al azar. [21]	17
4.4. Geometría del modelo de propagación a dos rayos [23]	19
4.5. Efectos de la propagación en un canal de banda estrecha [29]	21
4.6. Ejemplos de PDF para la distribución κ - μ	23
4.7. PDF de la distribución Rice para distintos valores de κ	23
4.8. PDF de la distribución Folded normal para distintos valores de κ	24
5.1. Sonda de canal a 5,9 GHz [27]	26
5.2. Vehículos tx y rx con el equipamiento a bordo [27]	26
5.3. Carretera V-21 [28]	27
5.4. Recorrido realizado por los vehículos. Extraída de Google Maps	28
5.5. División de los distintos tramos. Extraída de Google Maps	30
6.1. Trazas	31

6.2. Ejemplo trazas	32
6.3. Ejemplo trazas	32
6.4. Ejemplo de filtrado	33
6.5. Ejemplo fast-fading	33
6.6. PDF y CDF en el tramo 1	34
6.7. PDF y CDF en el tramo 2	35
6.8. PDF y CDF en el tramo 3	35
6.9. PDF y CDF en el tramo 4	35
6.10. PDF y CDF en el tramo 5	36

Lista de Tablas

2.1. Distribución temporal de las tareas	5
3.1. Potencia asignada a los canales en la banda de 5,9 GHz [23]	10
3.2. Especificaciones físicas del enlace [24]	11
5.1. Valores de velocidad y distancia	29
6.1. Valores medios de los parámetros de las distribuciones	34

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

El diseño de los sistemas de comunicación vehiculares ha provocado, en los últimos años, la atención de la comunidad científica y los fabricantes de vehículos debido al gran potencial de dichos sistemas para mejorar la seguridad en las carreteras, facilitar el flujo vehicular y reducir el número de accidentes de tráfico [1], [2].

Los sistemas de transporte inteligente (ITS, Intelligent Transportation Systems) requieren que las comunicaciones V2V sean fiables y seguras. Para ello, se requiere de un conocimiento exhaustivo de los parámetros que determinan las características del canal de propagación. Asimismo, los canales vehiculares difieren de los canales móviles y, por tanto, los métodos y modelos empleados para el canal móvil no pueden ser extrapolados a la comunicación entre vehículos.

Por esta razón, se requiere de nuevas campañas de medidas que faciliten la caracterización de los fenómenos que intervienen en una comunicación V2V y, de esta forma, permitan extraer modelos de canal que se ajusten al entorno vehicular.

Es importante que, a la hora de analizar e interpretar los resultados obtenidos de las mediciones, se lleve a cabo una caracterización del entorno en que se han realizado dichas medidas, ya que el escenario de propagación tiene un tremendo impacto en las características del canal radio móvil.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es la caracterización experimental de los desvanecimientos a corto plazo en canales vehiculares, concretamente en un entorno de comunicaciones entre vehículos (*vehicle-to-vehicle*, V2V). Para conseguir el objetivo principal del trabajo propuesto, se plantean una serie de objetivos secundarios que se enumeran a continuación:

1. Estudio teórico de los fundamentos de las comunicaciones V2V, así como los fenómenos más importantes que caracterizan la comunicación entre vehículos para comprender el efecto que estos producen sobre un entorno vehicular.
2. Realizar una clasificación de las trazas obtenidas en función de las características de la señal y, por tanto, del entorno en el que se encuentran los dos vehículos. Esta clasificación permite elaborar un estudio más profundo, ya que se adapta a las características de tráfico y escenario cambiantes a lo largo del recorrido.
3. Proponer modelos de canal que permitan describir el comportamiento de los desvanecimientos a corto plazo que se producen durante la comunicación entre los vehículos. Los modelos de propagación utilizados en la realización de este trabajo son: distribución κ - μ , Rice y Folded normal.
4. Interpretar los resultados obtenidos para cada uno de los modelos mencionados anteriormente y realizar una comparación de dichos resultados con la clasificación del escenario de propagación, en función de sus características, para extraer las conclusiones correspondientes.

1.3. Organización de la memoria

La memoria se estructura en 7 capítulos y estos, a su vez, se dividen en secciones y subsecciones.

En el Capítulo 2 se describe la metodología empleada para el desarrollo del proyecto. También se realiza un cronograma temporal para detallar qué tareas se han realizado durante qué periodos de tiempo.

En el Capítulo 3 se desarrolla la base que fundamenta las comunicaciones V2V. En concreto, se describe el origen y la finalidad de las mismas y se detalla el rango espectral destinado a las comunicaciones entre vehículos, tanto en EEUU como en Europa.

El Capítulo 4 está dividido en tres secciones. En la primera sección se describen los distintos fenómenos que se manifiestan en las comunicaciones inalámbricas (propagación en espacio libre, reflexión, difracción, dispersión y penetración en el material). En la siguiente sección se mencionan aquellas consideraciones relacionadas con el escenario y los objetos que intervienen en la comunicación y hay que tener en cuenta para el modelado del canal vehicular. En la última sección se realiza la caracterización del canal vehicular, profundizando en el efecto de desvanecimiento a corto plazo (*small-scale fading* o *fast fading*) y proponiendo una serie de distribuciones que modelan las variaciones rápidas de la señal.

El Capítulo 5 se divide en dos partes. En la primera parte se describe el equipo que se ha utilizado para la obtención de las medidas. En la segunda parte se realiza una enumeración de las medidas obtenidas, así como una interpretación de las mismas. Además, también se realiza una clasificación del recorrido en seis tramos en función de los parámetros de velocidades y distancia de los vehículos y las características de la señal recibida en la antena receptora.

El Capítulo 6 consta de dos secciones. En la primera sección se describe, de forma general, los pasos seguidos para la obtención de los resultados deseados. En la siguiente sección se lleva a cabo el análisis e interpretación de dichos resultados, realizando una comparación de los mismos con la clasificación de los escenarios de comunicación descrita en el Capítulo 5.

En el Capítulo 7 se desarrollan las conclusiones, así como las direcciones futuras de las comunicaciones entre vehículos.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Realización del proyecto

Para llevar a cabo la caracterización de los desvanecimientos a corto plazo en canales vehiculares se ha provisto de una serie de medidas realizadas por una sonda de canal a 5,9 GHz entre dos vehículos transmisor y receptor.

El primer paso ha sido adquirir los conocimientos necesarios relacionados con las comunicaciones inalámbricas, y más concretamente con la comunicación V2V. El siguiente paso ha sido la interpretación de las medidas obtenidas durante de la comunicación entre dichos vehículos. A continuación, se ha elaborado un programa utilizando Matlab para poder realizar un análisis de las medidas y extraer las estimaciones y resultados oportunos. Una vez obtenidos todos los resultados necesarios y habiendo hecho una clasificaciones del entorno en el que han viajado los vehículos, se procede a realizar una comparación de dichos resultados con la clasificación previa de forma que permita la caracterización del canal vehicular en términos de desvanecimientos a pequeña escala.

2.2. Distribución de tareas

Para la realización de este proyecto, se han seguido una serie de tareas, las cuales se enumeran a continuación:

- a) Búsqueda bibliográfica.
- b) Estudio de conceptos teóricos y fundamentos de comunicaciones V2V.
- c) Interpretación de los datos recogidos por el equipo de medidas.
- d) Elaboración del programa en Matlab para el análisis de los datos y obtención de los resultados.

- e) Interpretación de los resultados obtenidos.
- f) Análisis de los resultados que permitan la caracterización de los desvanecimientos a corto plazo.
- g) Conclusiones y líneas futuras del proyecto.
- h) Desarrollo de la memoria utilizando la herramienta LaTeX.
- i) Realización y preparación de la presentación del trabajo final de grado.

2.3. Diagrama temporal

En la Tabla 2.1 se muestra el diagrama temporal llevado a cabo durante la realización de este proyecto. La tabla divide las tareas a-i según el período de realización de la misma. Los tiempos de realización están divididos en meses y estos, a su vez, en semanas.

TAREAS	MARZO 2017				ABRIL 2017				MAYO 2017				JUNIO 2017				JULIO 2017			
a	X	X	X	X	X															
b	X	X	X	X	X	X	X													
c						X	X													
d						X	X	X	X	X			X	X	X					
e											X	X								
f													X	X	X					
g															X	X				
h									X	X	X	X	X	X	X	X	X			
i																	X	X		

Tabla 2.1: Distribución temporal de las tareas

Capítulo 3

Introducción a las comunicaciones V2V

3.1. Introducción

Los accidentes de tráfico se han convertido en un importante problema social y de salud, debido al gran número de muertes y lesiones que producen. Sin embargo, el número total de muertos y lesionados en la Unión Europea, Estados Unidos y Japón se ha reducido constantemente durante la última década. Dicha reducción está atribuida, principalmente, a la implantación de un conjunto de medidas para la seguridad vial, como el uso del cinturón de seguridad, la mayor protección de los vehículos contra impactos y el endurecimiento de las leyes de tráfico. Aún así, el número de accidentes se ha mantenido uniforme debido al incremento de la cantidad de vehículos [3].

Además de los sistemas pasivos de seguridad del vehículo, como los airbags, el sistema de frenado antibloqueo (ABS) y el control de estabilidad electrónico (ESP), se han introducido nuevos sistemas de seguridad activa para mejorar la seguridad vehicular. Para ello, la última década ha sido testigo del compromiso de la industria de la gestión del tráfico con la integración de la tecnología (tecnologías inalámbricas, computación, sensores avanzados) en la infraestructura vehicular más amplia. Toda esta innovación ha originado lo que se conoce como sistema de transporte inteligente (ITS).

A día de hoy, se han introducido diferentes aplicaciones ITS en los sistemas de carretera. Por ejemplo, señales de mensajes variables (VMS), situados en puntos estratégicos para informar a los conductores sobre el tráfico y las situaciones de peligro, sistemas automatizados de peaje para autopistas y aparcamientos e información de tráfico en tiempo real transmitida en la banda de radio FM.

Además de esto, las aplicaciones ITS a bordo de los vehículos han mejorado los mecanismos de asistencia y protección para los conductores. Actualmente, dichos vehículos incorporan sistemas de computación sofisticada, con multitud de sensores interconectados.

Sin embargo, los sensores de corto alcance empleados en los sistemas de emergencia como advertencia de colisión delantera o trasera y asistencia de mantenimiento de carril son insuficientes, especialmente cuando los sensores necesitan ampliar su horizonte de comunicación en casos de emergencia, debido a la limitación de su rango operativo [4].

Por tanto, existen aplicaciones de seguridad para situaciones de emergencia a distancia, tales como esquinas ciegas y cruces de tráfico, donde se requieren sistemas de comunicaciones vehiculares de gran alcance. Los sistemas de comunicaciones inalámbricas que pueden operar con estas restricciones se conocen como sistemas cooperativos en carretera. Dichos sistemas se basan en el intercambio de mensajes de seguridad para ampliar el horizonte de distancia y proporcionar mayor información en tiempo real a los conductores. Los sistemas cooperativos involucran dos tipos de comunicación:

- V2I: Vehículo a infraestructura.
- V2V: Vehículo a vehículo.

En la Figura 3.1 y la Figura 3.2 se muestran los dos tipos de comunicación en una red vehicular.

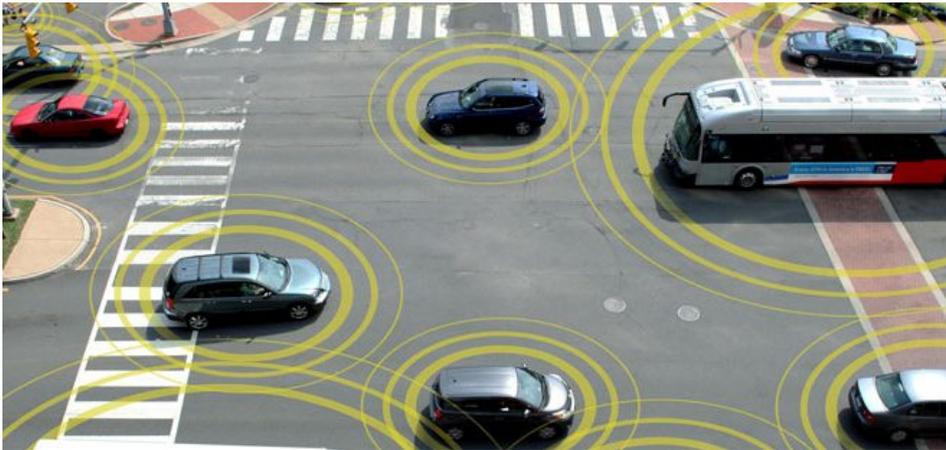


Figura 3.1: Modelo de comunicación V2V [25].

Este trabajo se centra, únicamente, en los sistemas en los que intervienen dos vehículos (V2V).

3.2. Asignación de frecuencias

Uno de los fundamentos de la arquitectura de los sistemas ITS cooperativos es el rango del espectro en el que se producen las comunicaciones V2V.

Tanto en Estados Unidos como en Europa, las organizaciones gubernamentales de la gestión del canal radio han sido las encargadas de asignar las bandas específicas en comunicaciones ITS.

En esta sección, se presentan detalles de estas asignaciones, incluyendo rangos de frecuencia,

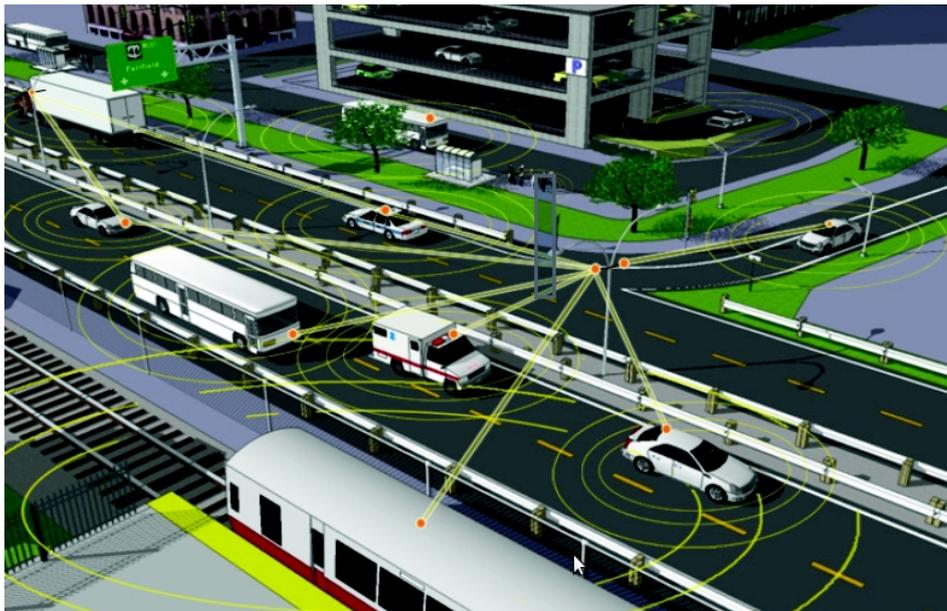


Figura 3.2: Modelo de comunicación V2I [26].

canalización, límites de potencia y usos prescritos. Afortunadamente, muchos de estos detalles son los mismos o similares entre Estados Unidos y Europa, ya que la armonización de la asignación espectral facilita plataformas de hardware comunes para el despliegue en ambas regiones.

3.2.1. Asignación en EEUU

En EEUU, la FCC es la organización responsable de la regulación del espectro.

En 1999, asignó 75 MHz en el rango 5,850-5,925 GHz para ITS, y especialmente para servicio DSRC. En 2003, basándose en las aportaciones de la comunidad ITS y del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT), la FCC emitió una serie de normas de concesión de licencias y servicios para el uso del espectro [5]. Estas reglas incluyen una división del espectro en siete canales no superpuestos de 10 MHz y una banda no utilizada de 5 MHz en su extremo inferior. Como se muestra en la Figura 3.3, los canales de 10 MHz están numerados usando números pares desde 172 hasta 184. También está permitido operar con los canales 175 y 181, con un rango de 20 MHz, cada uno de los cuales se superpone con dos canales de 10 MHz.

Cada canal viene determinado por las limitaciones de potencia máxima conducida y potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE). En algunos casos, puede haber distintos límites para dispositivos públicos y privados. Mientras que estos límites de potencia típicamente permiten una PIRE de 33 dBm, o superior, la mayoría de aplicaciones usarán, normalmente, una potencia de transmisión en el rango de 10-20 dBm. Estas potencias inferiores se eligen para evitar interferencias excesivas a distancias mayores.

Cada canal se clasifica, además, como canal de control (CCH) o canal de servicio (SCH). El canal 178, en medio de los siete canales de 10 MHz, es el CCH, mientras que los otros seis canales son SCH, al igual que los dos canales superpuestos de 20 MHz.

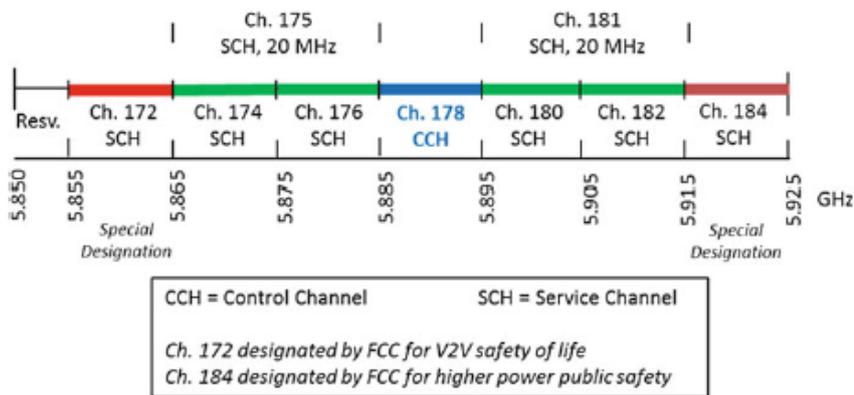


Figura 3.3: Asignación de frecuencias en Estados Unidos [22].

Las reglas establecidas en 2003 también exigen que los equipos se ajusten a los protocolos de capa física (PHY) y de subcapa de control de acceso al medio (MAC) definidos en la norma ASTM E2213-03. Aunque este estándar fue reemplazado en 2010 por la enmienda [6] de IEEE 802.11p-2010 Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) al popular estándar IEEE 802.11.

3.2.2. Asignación en Europa

En Europa, el ECC es responsable de la regulación del espectro, y la Comisión Europea (CE) es la encargada de hacer cumplir que los espectros asignados estén disponibles en todos los estados de la UE.

En 2008, el ECC [7] asignó 30 MHz de espectro en el rango de 5,875-5,905 GHz (comúnmente llamado ITS-G5A) para comunicaciones relacionadas con la seguridad, así como un espectro adicional de 20 MHz en el rango 5,905- 5,925 GHz (ITS-G5D) para futuras extensiones ITS. También en 2008, ECC [8] asignó 20 MHz de espectro en el rango de 5,855-5,875 GHz (ITS-G5B) disponible para comunicaciones ITS no relacionadas con la seguridad.

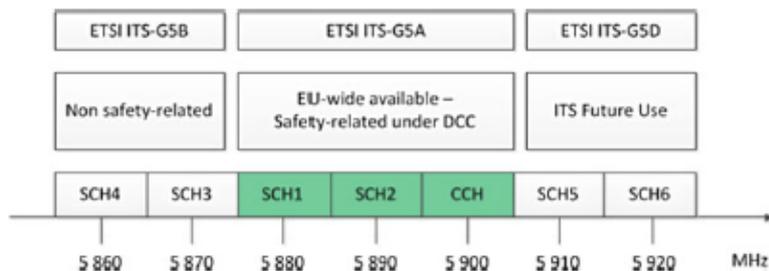


Figura 3.4: Asignación de frecuencias en Europa [8].

La Figura 3.4 ilustra el plan de asignación de frecuencias ECC y sus diferentes clases. La asignación ECC se compone, también, de seis canales SCH y un canal CCH. Sin embargo, sus disponibilidades en toda la UE, así como su uso, difieren ligeramente de la asignación FCC.

Como se especifica en la Figura 3.4, la banda de frecuencias ITS-G5A contiene los canales CCH, SCH1 y SCH2, que se limitan a las comunicaciones relacionadas con la seguridad vial de los ITS. SCH3 y SCH4 están contenidos en la banda de frecuencias ITS-G5B y están destinados a comunicaciones ITS no relacionadas con la seguridad. Por último, SCH5 y SCH6 forman parte de la banda de frecuencias ITS-G5D y están reservados para futuras extensiones ITS. Actualmente, la banda ITS-G5A es el único rango de espectro utilizable a escala europea [9]. Las demás bandas ITS (ITS-G5B, ITS-G5D) se han asignado pero no han sido puestas a disposición. Dependiendo de los estados de la UE, estas bandas pueden o no estar disponibles y utilizables.

Cada canal ITS en las bandas ITS-G5A, ITS-G5B y ITS-G5D tiene restricciones de potencia espectral, lo que a su vez restringe las aplicaciones ITS que pueden ser operadas en ellas. Dichas limitaciones de potencia se muestran en la Tabla 3.1, donde OBU hace referencia a los transmisores radio a bordo de los vehículos y RSU está referido a los equipos de carretera para el caso de comunicaciones V2I.

Canal	Frec. Central (MHz)	Ancho de banda (MHz)	PIRE RSU máx. Pub/Priv	PIRE OBU máx. Pub/Priv
172	5860	10	33/33	33/33
174	5870	10	33/33	33/33
175	5875	20	23/33	23/33
176	5880	10	33/33	33/33
178	5890	10	44,8/33	44,8/33
180	5900	10	23/23	23/23
181	5905	20	23/23	23/23
182	5910	10	23/23	23/23
184	5920	10	40/33	40/33

Tabla 3.1: Potencia asignada a los canales en la banda de 5,9 GHz [23]

Cada canal de 10 ó 20 MHz emplea la modulación OFDM usando 52 subportadoras, 4 de ellas como subportadoras piloto y las 48 restantes para la transmisión de datos. El protocolo de control de acceso al medio utilizado es CSMA/CA. Por tanto, el canal es compartido entre todas las transmisiones que se realizan de forma simultánea. La eficiencia de transmisión, debido al protocolo MAC, depende del número de nodos que se encuentran transmitiendo, el modo de transmisión y el tamaño del paquete. Por ejemplo, utilizando una velocidad de datos de 6 Mbps y 100 nodos transmitiendo simultáneamente, la eficiencia varía entre 0,4 a 0,5 con un tamaño de paquete de 256 y 1024 bytes, respectivamente, que corresponden a una velocidad de datos compartida entre 2,4 Mbps y 3 Mbps, respectivamente.

Otras características del enlace radio se resumen en la Tabla 3.2.

Ancho de banda	10 MHz	20 MHz
Rango enlace (m)	1000	
Tasa error LOS (%)	10	
Tasa error NLOS (%)	No definido	
Modulaciones	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM	
Tasa (Mbps)	3, 4,5, 6, 9, 12, 18, 24, 27	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
Sensibilidad receptor (dBm)	-85(3 Mbps), -84(4,5 Mbps), -82(6Mbps), -80(9 Mbps), -77(12 Mbps), -73(18 Mbps), -69(24 Mbps), -68(27 Mbps)	-82(6 Mbps), -81(9 Mbps), -79(12 Mbps), -77(18Mbps), -74(24 Mbps), -70(36 Mbps), -66(48 Mbps), -65(54 Mbps)
Nº antenas receptor	1 (Por defecto)	
Vel. máx. vehículo	200 km/h	
Tamaño paquete (bytes)	64, 1000	
Latencia máxima	Desde 20 ms hasta 1 s	
Duración símbolo OFDM (μs)	8	4

Tabla 3.2: Especificaciones físicas del enlace [24]

Capítulo 4

Caracterización del canal radio vehicular

En cualquier comunicación inalámbrica hay numerosos objetos interactuando entre el transmisor y el receptor que condicionan la propagación de la señal, como edificios, árboles, vehículos, etc. A causa de ello, en la antena receptora se reciben múltiples contribuciones o réplicas de la señal transmitida. Dichas contribuciones, sufren, a lo largo del recorrido, diferentes fenómenos de reflexión, difracción o dispersión, entre otros. Por tanto, las contribuciones recibidas en la antenas tendrán distintas atenuaciones y retardos temporales. En estas condiciones, el entorno de propagación va a limitar la calidad de cualquier sistema de comunicación inalámbrico, obligando a implementar diferentes técnicas de transmisión para mitigar los efectos provocados por el canal de comunicación.

Teniendo esto en cuenta, en este capítulo se describen los mecanismos básicos de propagación que intervienen en la comunicación inalámbrica. A continuación, se exponen una serie de consideraciones específicas para el modelado de canales vehiculares, incluyendo diversos entornos en los que tiene lugar la comunicación y los objetos que afectan al modelado. Finalmente, se enumeran los distintos modelos de canal en función de la causa principal de atenuación producida.

4.1. Efectos de la propagación

En la medida que una onda electromagnética se desplaza o se propaga a través de un medio, se producen varios mecanismos que afectan a la intensidad y el campo eléctrico de la señal transmitida. Dichos mecanismos perjudican, en gran medida, al campo eléctrico de la onda electromagnética observado en la antena receptora. En general, se atribuyen a la propagación en el espacio libre, la reflexión, difracción, dispersión y penetración en el material [10].

4.1.1. Propagación en espacio libre

La propagación en espacio libre describe el mecanismo de propagación de una onda electromagnética en el escenario en el que transmisor y receptor están separados una distancia d y con línea de visión (LOS). En un entorno de espacio libre, la potencia recibida por la antena receptora viene dada por la ecuación de Friis:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}, \quad (4.1)$$

donde P_t es la potencia transmitida, G_t y G_r son las ganancias de la antena transmisora y receptora, respectivamente, λ es la longitud de onda de la señal en metros, d es la distancia de separación en metros, y L representa en el factor de pérdida del sistema.

4.1.2. Reflexión

Además de la atenuación causada por la distancia de propagación, la onda transmitida también puede verse afectada por objetos que interfieran en el camino entre transmisor y receptor. La reflexión describe un fenómeno que tiene lugar cuando la onda de radio incide sobre un medio que tiene propiedades eléctricas diferentes y tiene grandes dimensiones en comparación con la longitud de onda de la propia onda. Por tanto, la onda electromagnética puede reflejarse en la superficie del suelo, edificios, otros vehículos, etc. Mientras parte de la energía que transporta la onda se refleja, otra parte penetra en el segundo medio, originando una variación en la onda resultante.

La cantidad de energía reflejada y transmitida dependen de los coeficientes de reflexión R que pueden ser calculados teniendo en cuenta las propiedades materiales de los dos medios que actúan. Los parámetros a considerar en el fenómeno de reflexión son: permitividad (ϵ_r), permeabilidad (μ), ángulo de incidencia (θ_i) y frecuencia de la señal (f).

En un escenario de propagación en el que el primer medio es el espacio libre y ambos medios tienen la misma permeabilidad ($\mu_1 = \mu_2$), los coeficientes de reflexión para la polarización vertical (R_{\parallel}) y horizontal (R_{\perp}) pueden calcularse de la siguiente manera, respectivamente [10]:

$$R_{\parallel} = \frac{-\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_i}}{\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_i}}, \quad (4.2)$$

y

$$R_{\perp} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_i}}. \quad (4.3)$$

Hay que tener en cuenta que en sistemas vehiculares con antenas a baja altura y, por tanto, un ángulo de incidencia pequeño, ambos coeficientes de reflexión, R_{\parallel} y R_{\perp} , se pueden aproximar a 1 independientemente de ϵ_r , para superficies perfectamente lisas.

En otras palabras, podemos suponer que la superficie actúa como un reflector perfecto. A medida que la onda transmitida incide sobre ella, se produce una variación en la fase de la onda entre 0° y 180° resultando en una interferencia constructiva o destructiva, pero la amplitud se mantiene constante. Este fenómeno se conoce como modelo de reflexión a dos rayos y se desarrolla en la Sección 4.3. Aunque en la práctica, diversas mediciones en V2V han demostrado que, mientras que la comunicación V2V en condiciones de LOS presenta un comportamiento que puede ser modelado por el modelo de dos rayos, la magnitud del rayo reflejado en el suelo es considerablemente inferior a la predicha por el modelo teórico [10].

4.1.3. Difracción

Mientras que la reflexión describe cómo se comporta una onda cuando choca contra un objeto, la difracción describe el fenómeno en el cual el camino de propagación de la señal entre transmisor y receptor es obstruido por objetos. En esta situación, la onda se difracta y se propaga alrededor de dichos objetos. El mecanismo de difracción se puede explicar a partir del principio de Huygens-Fresnel, que indica que en la propagación de una onda se considera cada punto del frente de onda como fuente puntual para una onda esférica secundaria [10]. La magnitud del campo eléctrico de la onda difractada es, por tanto, la suma vectorial de las componentes de campo eléctrico de estas ondas secundarias y en algunos casos es suficientemente fuerte para producir una señal útil.

En general, las pérdidas por difracción se pueden calcular como la diferencia de potencia recibida entre el camino directo y el camino difractado. Estas diferencias se describen por el concepto conocido como zona de Fresnel. Como regla general, sólo los rayos de difracción causados por obstáculos en la primera zona de Fresnel contribuyen al campo eléctrico de la onda recibida en la antena receptora [10].

4.1.4. Dispersión

La dispersión describe el fenómeno en el que la onda transmitida encuentra un objeto que tiene una superficie rugosa o dimensiones pequeñas en comparación con la longitud de onda de la señal propagada. Por ejemplo, las superficies de objetos como la vegetación, pueden hacer que la energía reflejada se disperse en todas direcciones y llegue al receptor desde diversos caminos.

Generalmente, la rugosidad de una superficie se mide con relación a una altura crítica, h_c , definida por el criterio de Rayleigh [11]. Una superficie es considerada lisa si su perturbación mínima a máxima es menor que h_c , de lo contrario se considera rugosa. La altura crítica se expresa en términos de la longitud de onda de la señal (λ) y el ángulo de incidencia (θ_i):

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i}. \quad (4.4)$$

Para una superficie rugosa, la intensidad del campo eléctrico de las ondas dispersadas se puede calcular de forma manera similar a la de una onda reflejada pero con un coeficiente de

reflexión modificado [12]

$$R_r = \rho_s R, \quad (4.5)$$

con

$$\rho_s = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] I_0 \left[8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (4.6)$$

donde σ_h es la desviación estándar de la altura de la superficie y I_0 es la función de Bessel de primera especie y orden cero.

4.1.5. Penetración a través del material

Además de la propagación en espacio libre, la reflexión, difracción y dispersión, la intensidad del campo eléctrico en la antena receptora también se atribuye a las ondas que han penetrado en diversos materiales a lo largo de su recorrido (por ejemplo, paredes, edificios, vegetación, etc.). No existe una fórmula matemática para calcular las pérdidas debidas a este fenómeno, sino que se utilizan modelos derivados de resultados empíricos, los cuales pueden variar mucho dependiendo del tipo de ambiente, longitud de onda, geometría y propiedades del material penetrado.

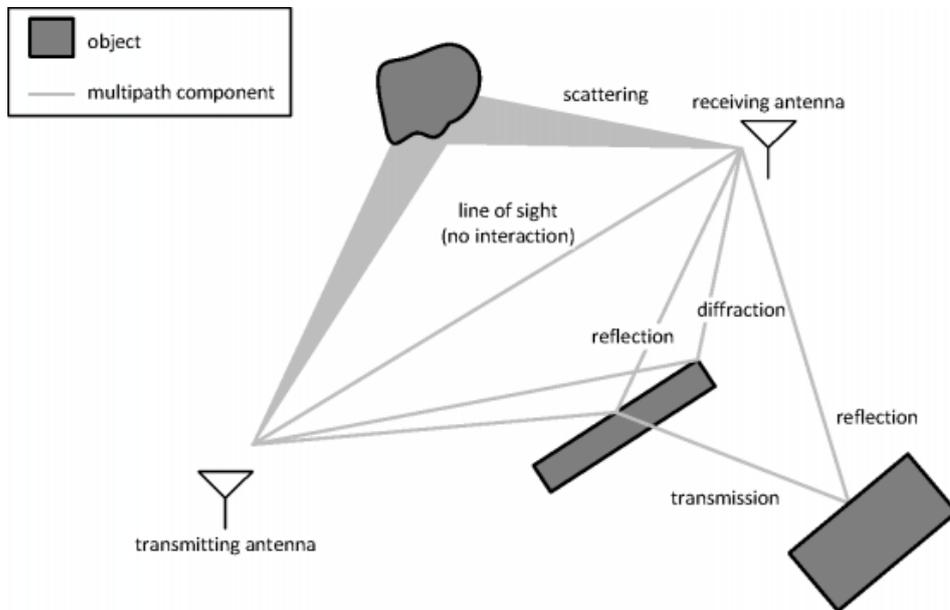


Figura 4.1: Efectos de la propagación [31]

4.2. Consideraciones para el modelado del canal vehicular

El término modelización del canal, también denominado caracterización del canal, se utiliza para describir los modelos y mediciones de canal realizados para comprender cómo el canal

de propagación altera y distorsiona la señal transmitida que se propaga a través de ella en un determinado entorno.

El interés por el modelado de canales vehiculares está motivado, principalmente, por el concepto ITS y la aparición de nuevas aplicaciones relacionadas con la seguridad en la conducción, lo que hace que el conocimiento del canal V2V sea de suma importancia para el diseño y evaluación de los sistemas de comunicación vehiculares.

Aunque una serie de modelos de canales móviles existentes se han utilizado ampliamente en sistemas celulares, estos no son adecuados para los sistemas de vehículos debido a las características únicas de los canales vehiculares. Por ejemplo, la diferencia en la altura relativa de las antenas de transmisor y receptor podría provocar una diferencia significativa en el comportamiento de propagación de la señal, la alta movilidad de los vehículos hace que aumente la probabilidad de obstrucción del enlace y que los canales exhiban mayor variabilidad temporal. Además, la frecuencia de operación y la distancia de comunicación asumida en las comunicaciones V2V también difieren de las de los sistemas celulares, ya que los sistemas de comunicaciones entre vehículos operan principalmente a 5,9 GHz y a una distancia corta (10-500 m) mientras que los sistemas celulares operan a 700-2.600 MHz y a larga distancia (hasta decenas de kilómetros) [13].

Debido a las diferencias mencionadas anteriormente, en esta sección se tratan aquellos aspectos que deben considerarse para el modelado de canales V2V.

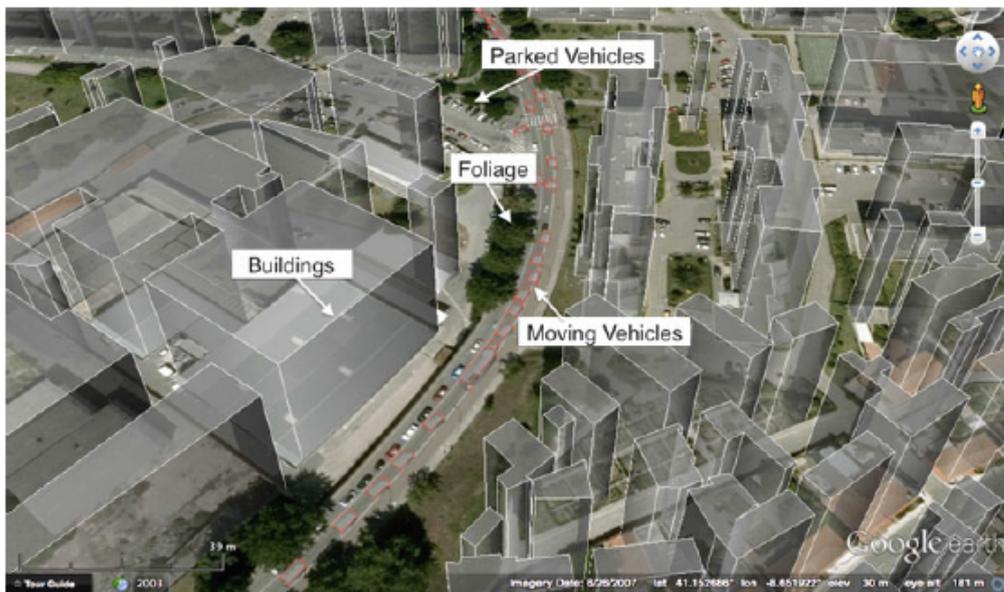


Figura 4.2: Entorno de comunicación V2V típico [21]

4.2.1. Objetos

Como se representa en la Figura 4.2, el entorno de propagación vehicular consiste en una serie de objetos de diferentes tipos y características. Estos objetos se pueden clasificar en dos grupos: (1) objetos estáticos tales como edificios, árboles, señales de tráfico, vehículos estacio-



Figura 4.3: Reflexiones (verde) y difracción (magenta) de rebote único. Edificios (rojo) y vehículos (azul) para un conjunto de vehículos de transmisión y recepción seleccionados al azar. [21]

nados, etc. y (2) objetos móviles tales como vehículos en movimiento o viandantes. Mientras que ambos tipos de objetos provocan una atenuación de la señal, el nivel del impacto varía dependiendo del entorno. Por ejemplo, los objetos móviles son más importantes a considerar para modelar canales vehiculares en el entorno de autopistas. Por otro lado, en el entorno urbano con topología bidimensional, es probable que los vehículos que se comunican se encuentren en diferentes calles. En este caso, junto con los objetos móviles, la caracterización de los objetos estáticos es importante para el modelado de canales V2V, ya que ambos tipos de objetos son fuentes de *shadowing*, reflexiones y difracciones [14].

4.2.2. Escenarios

El escenario en el que se produce la comunicación juega un papel fundamental ya que este tiene un tremendo impacto en las características de los canales de radio móviles. Por tanto, los modelos de canales vehiculares están clasificados, basándose en los distintos entornos y características del tráfico, en las siguientes categorías:

- *Espacios abiertos y entornos de carretera*: caracterizado por el movimiento unidireccional y la alta velocidad de los vehículos. Pueden contener vegetación, señales y algunas casas, que se localizan, generalmente, lejos de la carretera.
- *Entornos suburbanos*: mezcla de edificios de poca altura y espacios abiertos tales como campos o zonas de estacionamiento. Dichos elementos se sitúan, generalmente, a mayor distancia de la carretera en comparación con un entorno urbano. La densidad de vehículos es media o baja y la cantidad de peatones o ciclistas suele ser escasa.
- *Entorno urbano*: describe un escenario con altas densidades de tráfico y peatones. A diferen-

cia de los espacios abiertos y entornos suburbanos, los modelos de canales para estos escenarios deben considerar la posibilidad de que los vehículos comunicados puedan estar en diferentes calles o tener distintas direcciones. Además, los edificios se sitúan cerca de la calzada, dificultando más si cabe la comunicación.

4.3. Caracterización de canales V2V de banda estrecha

Si bien resulta imposible estimar con precisión la atenuación de la señal causada por todos los efectos mencionados en la Sección 4.1, se han introducido varios modelos que pueden predecir razonablemente la intensidad de la señal recibida en la antena receptora en un canal de banda estrecha.

Se considera canal de banda estrecha cuando el comportamiento del canal es uniforme en el ancho de banda de interés. Así pues, la caracterización del canal radio de banda estrecha se centra en el análisis de la potencia media recibida y las estadísticas de los desvanecimientos a pequeña escala.

A continuación se describen los parámetros para la caracterización de canales vehiculares de banda estrecha.

4.3.1. Path Loss

La pérdida por espacio libre (PL) es una medida de atenuación producida en la señal electromagnética cuando viaja desde el transmisor al receptor. Se expresa, generalmente, en escala de dB:

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r}, \quad (4.7)$$

donde P_t y P_r son las potencias en transmisión y recepción, respectivamente.

Mientras que la fórmula de Friis en espacio libre dada en la Ec. 4.1 proporciona una estimación de la atenuación cuando la señal se propaga en el espacio libre, diversas mediciones y estudios teóricos han demostrado que en los canales de radio móviles, la potencia media recibida no siempre sigue dicha fórmula. En su lugar, la potencia recibida disminuye con el logaritmo de la distancia de separación.

Es decir, la atenuación media para una distancia de separación d , $\overline{PL}(d)$ en dB, puede expresarse como:

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) + 10\gamma \log(d/d_0), \quad (4.8)$$

donde $\overline{PL}(d_0)$ son las pérdidas en espacio libre a la distancia de referencia d_0 y γ representa el exponente de pérdidas. Dicho valor, tiene en cuenta las características del entorno de propa-

gación. En la práctica, se utilizan técnicas de regresión lineal basadas en datos empíricos para encontrar los valores más adecuados del exponente de pérdidas.

Sin embargo, existen entornos en los que un modelo lineal de doble pendiente es capaz de ajustar los datos medidos con mayor precisión. Un modelo de doble pendiente se caracteriza por un exponente de pérdidas γ_1 y una desviación estándar σ_1 por encima de una distancia de referencia hasta un punto de ruptura o distancia crítica y por un exponente de pérdidas γ_2 y una desviación estándar σ_2 para distancias mayores a la distancia crítica. Usando este modelo, conocido como modelo de doble pendiente (*dual-slope*), las pérdidas en espacio libre se pueden estimar como

$$\overline{PL}(d) = \begin{cases} \overline{PL}(d_0) + 10\gamma_1 \log(d/d_0) & \text{si } d_0 \leq d \leq d_c \\ \overline{PL}(d_0) + 10\gamma_1 \log(d/d_0) + 10\gamma_2 \log(d_c/d_0) & \text{si } d > d_c \end{cases} \quad (4.9)$$

donde la distancia crítica d_c se calcula como $d_c = \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda_c}$. Los parámetros h_T y h_R son las alturas de las antenas del transmisor y receptor, respectivamente, y λ_c es la longitud de onda asociada a la frecuencia de operación. Sin embargo, Xia et al. propuso una distancia crítica diferente $d_c = 4h_T h_R / \lambda_c$, que es más precisa para enlaces V2V [15]. Pero en la práctica, la distancia crítica está relacionada con las características del entorno de propagación y, por tanto, existen notables diferencias entre entornos urbanos, áreas rurales o autopistas.

Otro modelo para calcular las pérdidas de propagación entre transmisor y receptor es el modelo a dos rayos. De acuerdo con su definición, el rayo directo y el rayo reflejado en el suelo se pueden tener en cuenta a la hora de estimar las pérdidas de propagación cuando hay visión directa entre el transmisor y el receptor y no existen vehículos entre ellos. La geometría del modelo de propagación a dos rayos se muestra en la Figura 4.4

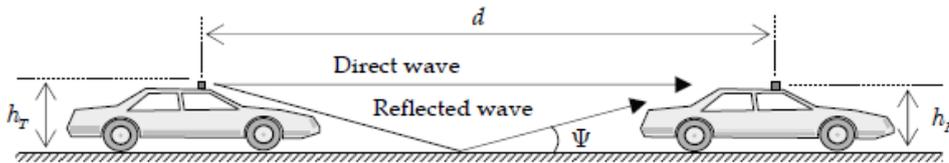


Figura 4.4: Geometría del modelo de propagación a dos rayos [23]

La superposición del rayo directo y el reflejado en la antena receptora resulta en una ganancia de campo eléctrico representada por el término $|E_T/E_D|$, donde E_T y E_D son el campo eléctrico total y del camino directo recibidos en la antena, respectivamente. El término $|E_T/E_D|$ puede ser calculado como:

$$|E_T/E_D| = \left| 1 + \rho_{\perp, \parallel}(\Psi) \frac{d}{d + \Delta d} \exp(-jk\Delta d) \sqrt{\frac{G_T(\theta_r, \varphi_r) G_R(\theta_r, \varphi_r)}{G_T(\theta_d, \varphi_d) G_R(\theta_d, \varphi_d)}} \right|, \quad (4.10)$$

donde $\rho_{\perp, \parallel}(\Psi)$ es el coeficiente de reflexión de Fresnel del suelo para polarización horizontal (\perp) o vertical (\parallel) asociado al ángulo de elevación Ψ , $k = \frac{2\pi}{\lambda_c}$ es el número de onda y Δd es la diferencia de caminos entre el rayo directo y el reflejado.

Debido a que el rayo directo puede verse afectado por el entorno que lo rodea, Kunisch y Pamp [16] propusieron calcular el promedio de las pérdidas en espacio libre como:

$$\overline{PL}_{T_{wo-ray}}(d) = PL_0 + 10\gamma \log d - 10 \log |E_T/E_D|^2, \quad (4.11)$$

donde PL_0 es una constante que se obtiene mediante técnicas de regresión lineal usando datos empíricos.

Los resultados de diversas mediciones [16] muestran que el modelo de propagación a dos rayos puede ser usado en autopista y entornos rurales, donde existe visión directa entre los vehículos y un número de objetos cercanos muy reducido.

4.3.2. Shadowing

El modelo de pérdidas en espacio libre es una de las partes importantes en un modelo de propagación. No obstante, no es suficiente por si solo para medir la intensidad de la señal en la antena receptora, ya que no tiene en cuenta las variaciones de la señal asociadas a sistemas móviles.

El efecto *shadowing* se produce cuando un móvil se sitúa detrás de un objeto y experimenta una reducción en la potencia de señal recibida.

El modelo que se utiliza comúnmente para predecir la atenuación de señal causada por el *shadowing* es el modelo de *shadowing* log-normal. Este modelo se basa en las mediciones empíricas que indican que las pérdidas en un lugar determinado son aleatorias y siguen una distribución log-normal [17]. Las pérdidas totales de la Ec. 4.8 se pueden reescribir como:

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (4.12)$$

donde X_σ es una variable aleatoria de media cero que sigue una distribución Gaussiana y desviación típica σ , que está relacionada con la diversidad del entorno. Al igual que el exponente de pérdidas γ , el valor de σ se obtiene a partir de datos empíricos.

En redes vehiculares, donde tanto el transmisor como el receptor pueden ser móviles, el *shadowing* es más acusado y dinámico en comparación con cualquier otra red. Por esta razón, se han realizado esfuerzos para calcular el *shadowing* de una manera determinista, utilizando diversa información sobre los objetos en las proximidades del transmisor y receptor [18].

4.3.3. Small-Scale Fading

Por otra parte, la señal recibida en la antena receptora que consiste, generalmente, en múltiples ondas que son copias de la misma onda transmitida pero llegan al receptor en momentos diferentes y pueden tener amplitudes y fases diferentes, crean efectos de desvanecimiento a pequeña escala que provocan la fluctuación rápida de la señal recibida durante un corto período

de tiempo o distancia.

El desvanecimiento en las redes vehiculares es más pronunciado cuando no hay visión directa (LOS) entre transmisor y receptor. Sin embargo, incluso en un escenario donde existe visión directa, dicho fenómeno también puede ocurrir debido a reflexiones en el suelo y/o edificios.

Por tanto, los desvanecimientos que sufre la señal varían dependiendo de la existencia de una trayectoria directa (LOS), la composición del entorno en concreto, la velocidad de las estaciones móviles y los objetos circundantes.

En la Figura 4.5 se describen de forma gráfica los efectos que caracterizan una señal a lo largo de su recorrido transmitiéndose en un canal de banda estrecha.



Figura 4.5: Efectos de la propagación en un canal de banda estrecha [29]

Distribuciones

Hoy en día, un gran número de distribuciones son capaces de describir las características de la señal en un canal radio móvil. Por ejemplo, las variaciones de la señal a largo plazo están caracterizadas por la distribución lognormal, mientras que las variaciones a corto plazo están descritas mediante otras distribuciones, como Rayleigh, Rice (Nakagami- n), Nakagami- m , Hoyt (Nakagami- q) o Weibull.

En este trabajo se han considerado las distribuciones κ - μ , Rice y Folded normal. A continuación se realiza una breve descripción de las características más importantes de cada una, así como las fórmulas utilizadas para obtener la función de distribución de probabilidad y la función de distribución acumulada. Posteriormente, en el Capítulo. 6, se desarrollan los resultados a partir de los datos recogidos.

Distribución κ - μ

La distribución κ - μ se utiliza, generalmente, para representar la variación a pequeña escala de la señal en condiciones de línea de visión. Este modelo considera una señal compuesta por un conjunto de ondas multitrayecto, que se propagan en un entorno homogéneo. Dentro de un mismo grupo, las fases de las ondas dispersas son aleatorias y tienen tiempos de retardo similares, mientras que las diferencias de tiempos entre agrupaciones diferentes son relativamente grandes. Además, dentro de cada grupo, se encuentra una componente dominante que presenta una potencia arbitraria.

Si r es la envolvente de la distribución de desvanecimientos a pequeña escala y se calcula como:

$$r = \alpha \sqrt{\sum_{i=1}^{\mu} (x_i + a_i)^2 + (y_i + b_i)^2}, \quad (4.13)$$

donde x_i e y_i son procesos Gaussianos independientes, con $E(x_i) = E(y_i) = 0$ y $E(x_i^2) = E(y_i^2) = \sigma^2$, a_i y b_i son la media de la componente i en fase y cuadratura, μ es el numero de componentes multicamino y α es el parámetro que controla la linealidad, se puede calcular la PDF y CDF de r de la distribución κ - μ , respectivamente, como:

$$p_r(r) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa) r_m} \left(\frac{r}{r_m}\right)^{\mu} \exp\left(-\mu(1+\kappa)\left(\frac{r}{r_m}\right)^2\right) I_{\mu-1}\left(2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\left(\frac{r}{r_m}\right)\right), r \geq 0 \quad (4.14)$$

donde

$$\mu = \frac{E^2(R^2)}{V(R^2)} \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2} \quad (4.15)$$

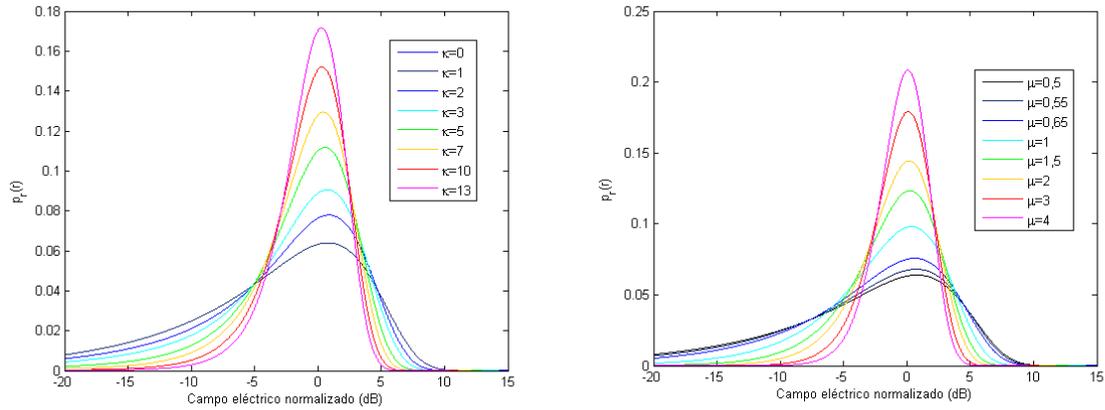
y $I_\nu(\cdot)$ es la función de Bessel de primera especie y orden ν .

$$P_r(r) = 1 - Q_\mu\left(\sqrt{2\mu\kappa}, \sqrt{2\mu(1+\kappa)}\left(\frac{r}{r_m}\right)\right), r \geq 0 \quad (4.16)$$

donde Q_ν es la función de Marcum generalizada [19].

La Figura 4.6(a) y Figura 4.6(b) muestran distintas formas de la función de densidad de probabilidad de la distribución κ - μ en función de distintos valores de κ y de μ , respectivamente. En la Figura 4.6(a), el caso en el que $\kappa = 0$ y $\mu = 0,5$ coincide con la distribución Nakagami- m para $m = 0,5$. En la Figura 4.6(b), el caso en el que $\kappa = 1$ y $\mu = 1$ coincide con la distribución Rice.

Así pues, la distribución κ - μ es una distribución de desvanecimiento general que incluye otras distribuciones, como Rice, Nakagami- m y Folded normal. Por lo tanto, estas distribuciones pueden obtenerse a partir de la distribución κ - μ .



(a) PDF de la distribución κ - μ para μ fija ($\mu=0.5$) (b) PDF de la distribución κ - μ para κ fija ($\kappa=1$)

Figura 4.6: Ejemplos de PDF para la distribución κ - μ

Distribución Rice

La distribución Rice describe una señal de desvanecimiento con una única agrupación de ondas multitrayecto en la que una componente especular predomina sobre las demás. Se puede obtener a la PDF y CDF de r partir de la distribución κ - μ sustituyendo $\mu = 1$ en la Ec. 4.14 y Ec. 4.16, respectivamente:

$$p_r(r) = \frac{2(1 + \kappa)}{\exp(\kappa)r_m^2} r \exp\left(- (1 + \kappa)\left(\frac{r}{r_m}\right)^2\right) I_0\left(2\sqrt{\kappa(1 + \kappa)}\left(\frac{r}{r_m}\right)\right), r \geq 0 \quad (4.17)$$

y

$$P_r(r) = 1 - Q_0\left(\sqrt{2\kappa}, \sqrt{2(1 + \kappa)}\left(\frac{r}{r_m}\right)\right), r \geq 0 \quad (4.18)$$

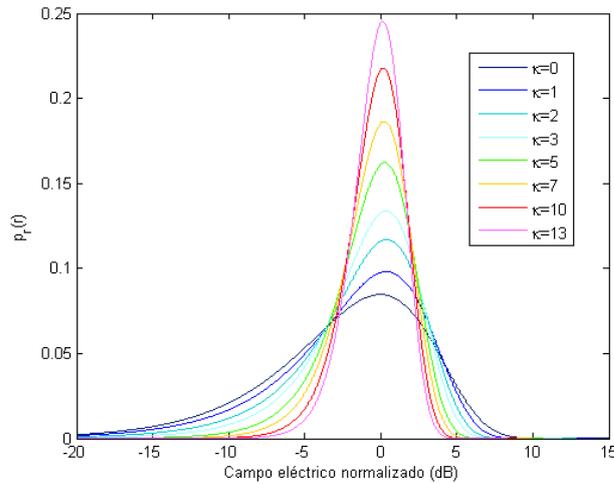


Figura 4.7: PDF de la distribución Rice para distintos valores de κ

En la Figura 4.7 se observa que, al aumentar el valor de κ , la PDF se estrecha y por tanto disminuye la varianza de la distribución. Valores de κ elevados corresponden físicamente a entornos con una profundidad de desvanecimientos menores.

Distribución Folded normal

La distribución Folded normal es un caso especial de la distribución Gaussiana que se obtiene cuando el signo de la variable es siempre positivo [20]. Se puede obtener la PDF y CDF de r de la distribución Folded normal sustituyendo $\mu = \frac{1}{2}$ en la Ec. 4.14 y Ec. 4.16, respectivamente:

$$p_r(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sqrt{1+\kappa}}{r_m} \exp\left(-\frac{\kappa}{2} - \frac{(1+\kappa)}{2} \left(\frac{r}{r_m}\right)^2\right) \cosh\left(\sqrt{\kappa(1+\kappa)} \left(\frac{r}{r_m}\right)\right), r \geq 0 \quad (4.19)$$

y

$$P_r(r) = \Phi\left(\frac{r-m}{s}\right) + \Phi\left(\frac{r+m}{s}\right) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{r-m}{\sqrt{2}s^2}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{r+m}{\sqrt{2}s^2}\right) \right), r \geq 0 \quad (4.20)$$

donde

$$m = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} r_m, \quad s = \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} r_m, \quad (4.21)$$

y siendo $\Phi(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ la CDF de la distribución normal estándar y $\operatorname{erf}(u) = \int_{-\infty}^u \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-t^2) dt$ la función error.

Al igual que sucede con el parámetro κ de la distribución Rice, si el valor de κ aumenta la PDF se estrecha y representa escenarios con variaciones rápidas de la señal menos acusadas.

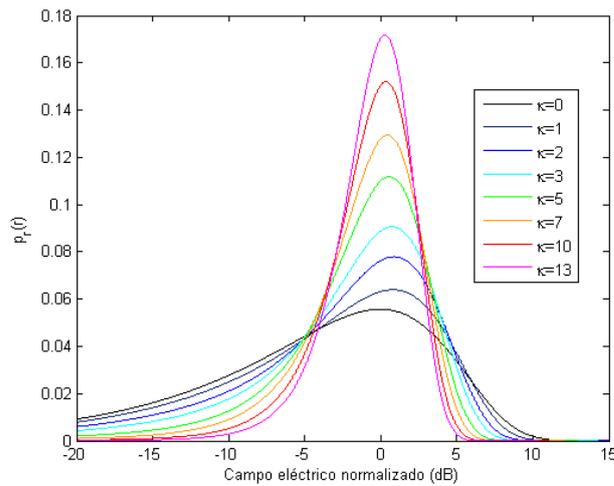


Figura 4.8: PDF de la distribución Folded normal para distintos valores de κ

Capítulo 5

Equipo de medida y datos obtenidos

En este capítulo se presenta el equipo de trabajo para la realización de las medidas, así como sus parámetros más importantes. A continuación, se describen los datos recogidos por el equipo. Y finalmente, realizando un análisis de los mismos, se determina el entorno en el que viajan ambos vehículos y se divide el recorrido en tramos según las características de velocidad, distancia entre vehículos y señal recibida en la antena receptora.

Cabe mencionar que el diseño e implementación del equipo de medidas no ha sido parte de este trabajo y la información se ha extraído de [27].

5.1. Equipo de medidas

El equipo empleado para la realización de las medidas utiliza una sonda de canal a 5,9 GHz (banda DSCR). Una sonda de canal consiste en la transmisión de un tono a una única frecuencia de portadora y un sistema Rx de banda estrecha para medir la potencia de la señal recibida.

La sonda de canal implementada para la caracterización del canal en banda estrecha se muestra en la Figura 5.1. Esta sonda de canal está formada por el generador de señal HP83623A en el vehículo Tx, transmitiendo una portadora sin modular a 5,9 GHz, y un analizador de redes vectorial (ARV) ZVA24 en el vehículo Rx.

Las antenas utilizadas en los vehículos Tx y Rx son monopolos magnéticos en $\lambda/4$ con una ganancia en el plano horizontal de aproximadamente -2,56 dB. Dichas antenas están montadas sobre el techo de los vehículos a una altura aproximada de 1,41 y 1,45 m del suelo para el Tx y Rx, respectivamente.

En transmisión se utiliza un amplificador de potencia, permitiendo transmitir una PIRE de 23,8 dBm. En recepción se emplean dos amplificadores en serie con una ganancia total de 68,12 dB.

Además, los vehículos están equipados con receptores GPS para disponer de información sobre el instante de adquisición de medidas, velocidades relativas y distancia de separación entre

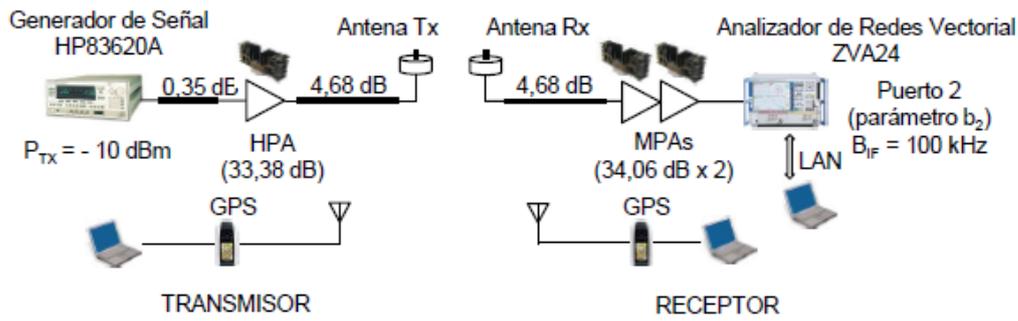


Figura 5.1: Sonda de canal a 5,9 GHz [27]

transmisor y receptor.

En la Figura 5.2 se muestra el equipamiento de a bordo.



Figura 5.2: Vehículos tx y rx con el equipamiento a bordo [27]

5.2. Datos obtenidos y primeros análisis

Los datos recogidos por el equipo de medidas se almacenan en una matriz llamada *Matriz59v6*. La duración total de las medidas es de 602,78 s, siendo el tiempo medio entre muestras de 1,013 ms. La distancia total recorrida por los vehículos es de 10762,76 m y la distancia media entre muestras es de 0,018 m. *Matriz59v6* contiene la siguiente información:

- Tiempo (119x5000): representa el instante temporal en el que se toma cada medida. En μs .
- Distancia (119x5000): representa la distancia entre los dos vehículos. En s .
- Potencia (119x5000): representa la potencia recibida en la antena del vehículo Rx. En dBm .
- Recorridorx (119x19): recoge la posición del receptor en cada traza. Tipo *char*.
- Recorridotx (119x19): recoge la posición del transmisor en cada traza. Tipo *char*.
- Velocidadrx (119x5000): representa la velocidad del receptor en cada instante. En m/s .

· Velocidadtx (119x5000): representa la velocidad del transmisor en cada instante. En m/s .

Una vez llevada a cabo la interpretación de los datos se procede al análisis de los mismos.

De aquí en adelante, se consideran los datos de velocidad, distancia y potencia como matrices de 1190x500. De esta forma se pueden estimar los parámetros de velocidad y distancia en cada una de las 1190 trazas como la media de las velocidades y la distancia de las 500 muestras que componen cada traza. Esto es posible gracias a que las muestras están tomadas con una diferencia media de tiempos de 1,013 ms y por tanto la diferencia de velocidades y distancias entre la muestra 1 y 500 es prácticamente nula.

5.2.1. Escenario de medidas

Antes que nada, se debe situar el escenario de trabajo. Para ello, a partir de las coordenadas recogidas por el transmisor y receptor, y exportándolas a Google Maps, se consigue trazar la ruta que ambos recorren en el momento de la toma de medidas.

Este recorrido se sitúa en un tramo de la autovía V-21. Dicha autovía inicia su recorrido en el enlace con la A-7, AP-7 y la V-23, en el municipio de Puzol, y finaliza en la ciudad de Valencia, más concretamente en la Avenida de Cataluña. Tiene una longitud total del 19,9 km.

La V-21 es un itinerario muy concurrido, sobre todo por el transporte de mercancías que se dirige hacia el Puerto y que procede de la provincia de Castellón. Consta de tres carriles para cada sentido en el tramo Puzol-Alboraya y dos carriles para el tramo Alboraya-Valencia. La velocidad en esta vía está limitada a 100 y 120 km/h.



Figura 5.3: Carretera V-21 [28]

En la Figura 5.4 se puede ver el recorrido realizado por los dos vehículos durante la toma de las medidas.

Analizando el recorrido en Google Maps, se observa que el entorno que rodea la carretera es, mayormente, campo destinado al cultivo de frutas y hortalizas. Estos cultivos se caracterizan por su baja altura, por lo que, previsiblemente, no afectarán de forma sustancial a la comunicación entre los vehículos transmisor y receptor. También existe la presencia de poblados y casas aisladas, pero estos se encuentran, en su mayoría, alejados de la vía. En la parte final del recorrido, los vehículos abandonan la autovía V-21 desviándose hacia el municipio de Puzol, adentrándose

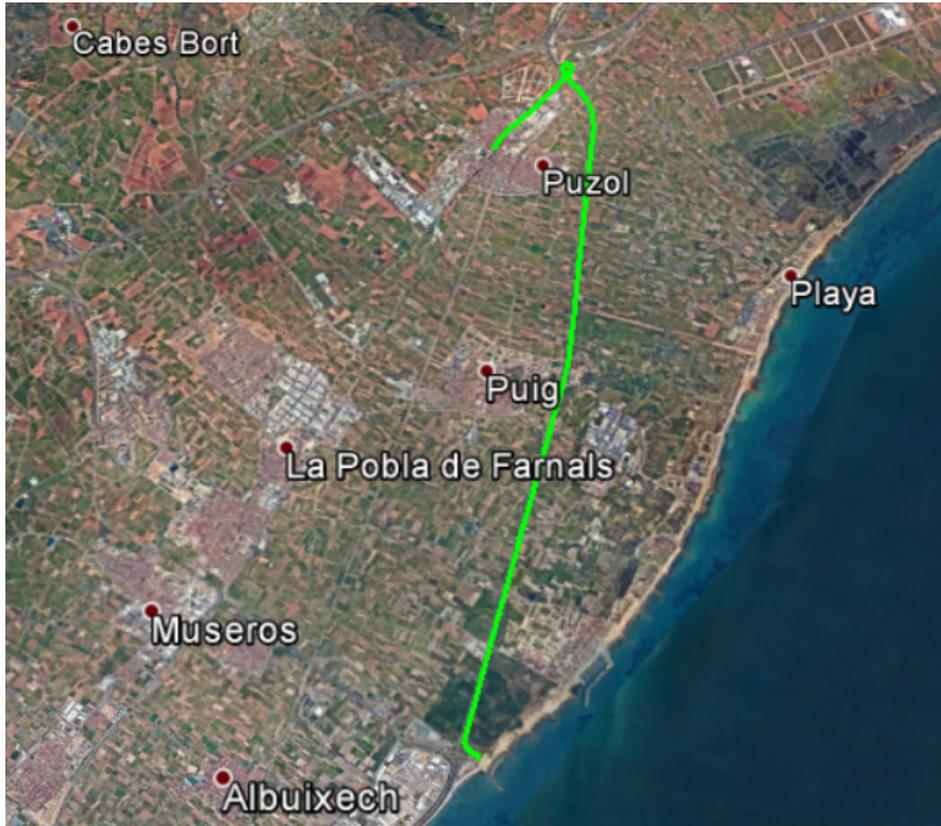


Figura 5.4: Recorrido realizado por los vehículos. Extraída de Google Maps

en un entorno urbano con mayor densidad de tráfico, viandantes y con edificios a ambos lados de la calzada.

5.2.2. Distancias y velocidades

El siguiente paso es analizar los datos relacionados con la distancia y velocidad de forma que nos permita caracterizar la comunicación entre los dos vehículos. La Tabla 5.1 muestra algunos parámetros de distancia y velocidad de los vehículos durante el recorrido.

Se trata de unos valores generales que no deben ser tenidos en cuenta para el análisis y comparación de los resultados. Por ello, a partir de los valores de velocidad y distancia en cada traza, se divide el trayecto recorrido en seis tramos.

Primer tramo

En la primera parte del recorrido, antes de la incorporación a la autovía V-21, los vehículos se encuentran a una distancia media de 10 m y las velocidades oscilan entre los 10 y los 60 km/h. Este hecho sucede durante las primeras 60 trazas, momento en el que disponen de incorporarse a la vía V-21. La señal apenas sufre variaciones a pequeña escala, ya que los vehículos se encuentran muy próximos entre ellos y no existen obstáculos en la propagación de la señal.

Vehículo	Transmisor	Receptor
Vel. media (km/h)	64,66	64,68
Vel. máx. (km/h)	112,52	134,81
Distancia media (m)	121,202	
Distancia máx. (m)	440,52	

Tabla 5.1: Valores de velocidad y distancia

Segundo tramo

Una vez se incorporan a la autovía, la distancia aumenta alcanzando los 440 m y las velocidades de los vehículos también aumentan, oscilando entre los 100 y 120 km/h. Con toda probabilidad, existirán otros vehículos entre medio del transmisor y receptor, dificultando la comunicación. Este tramo, que comprende una distancia de 3 km, se caracteriza por una mayor variabilidad de la señal.

Tercer tramo

En este tramo, los vehículos circulan a una distancia media de 100 m y la variación rápida de la señal no es muy acusada ya que, previsiblemente, existe poca obstrucción entre los dos vehículos. Este tramo comprende una distancia de 3 km, aproximadamente.

Cuarto tramo

Este tramo resulta difícil de caracterizar ya que el parámetro de distancia entre vehículos oscila constantemente entre los valores de 100 y 320 m. Por tanto, en ciertas partes este tramo se asemeja a las características descritas en el tramo 3 y en otras se asocia al tramo 2.

Quinto tramo

En este momento, los vehículos abandonan la autovía V-21 y se dirigen al municipio de Puzol. La velocidad de ambos vehículos se reduce, oscilando entre 30 y 50 km/h, y la distancia entre vehículos se sitúa entre los 30 y 70 m. La calzada pasa a ser de un único carril, por tanto la cantidad de vehículos situados entre emisor y receptor podría ser mayor. Además, una vez han entrado en el poblado, existe la presencia de edificios situados a ambos lados de la calzada. La potencia recibida durante este tramo, en general, se ve acusada por las variaciones rápidas. La

longitud total de este tramo es 1,5 km.

Sexto tramo

En este último tramo, los vehículos circulan a muy baja velocidad (10 km/h, aproximadamente) y la distancia entre los mismos no supera los 8 m. Por tanto, estamos en un escenario similar al del primer tramo en el que la señal que se propaga no sufre variaciones rápidas.

En la Figura 5.5 se observa la división del recorrido en los seis tramos mencionados anteriormente.

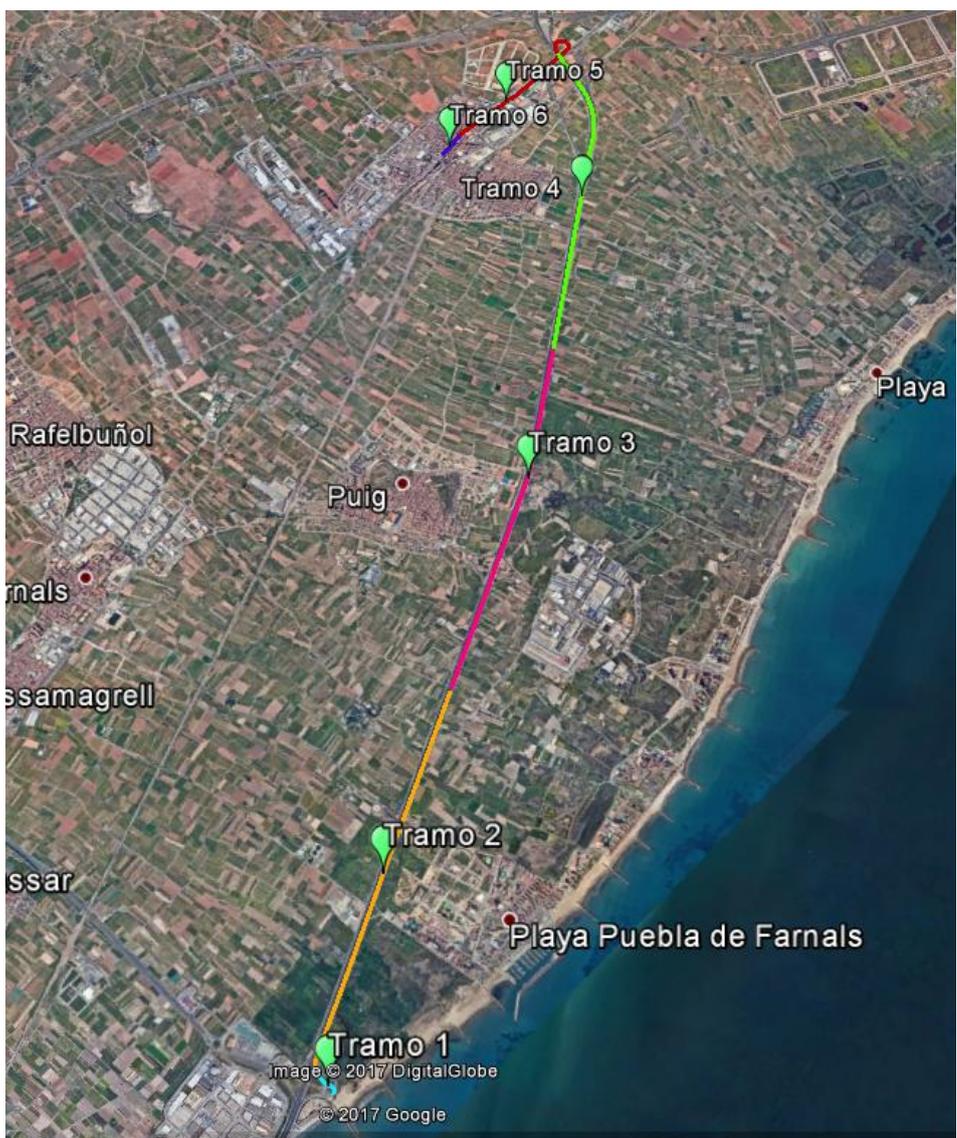


Figura 5.5: División de los distintos tramos. Extraída de Google Maps

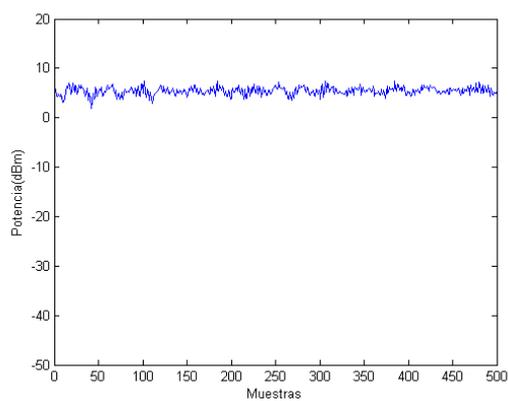
Capítulo 6

Análisis de resultados

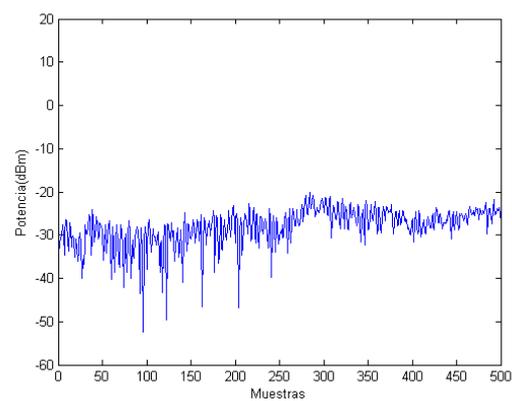
Una vez caracterizado el entorno y clasificadas las diferentes situaciones en las que se encuentran los vehículos durante su recorrido, en este capítulo se procede al desarrollo de los resultados obtenidos, así como el análisis e interpretación de los mismos.

6.1. Elaboración del script en Matlab

En primer lugar, como se ha mencionado en la sección 5.2, se divide la medida de potencia recibida en 1190 trazas de 500 muestras cada una. En la Figura 6.1, Figura 6.2 y Figura 6.3 se pueden ver algunos ejemplos de trazas correspondientes a cada uno de los seis tramos en los que se ha fraccionado el recorrido.



(a) Trazo tramo 1



(b) Trazo tramo 2

Figura 6.1: Trazas

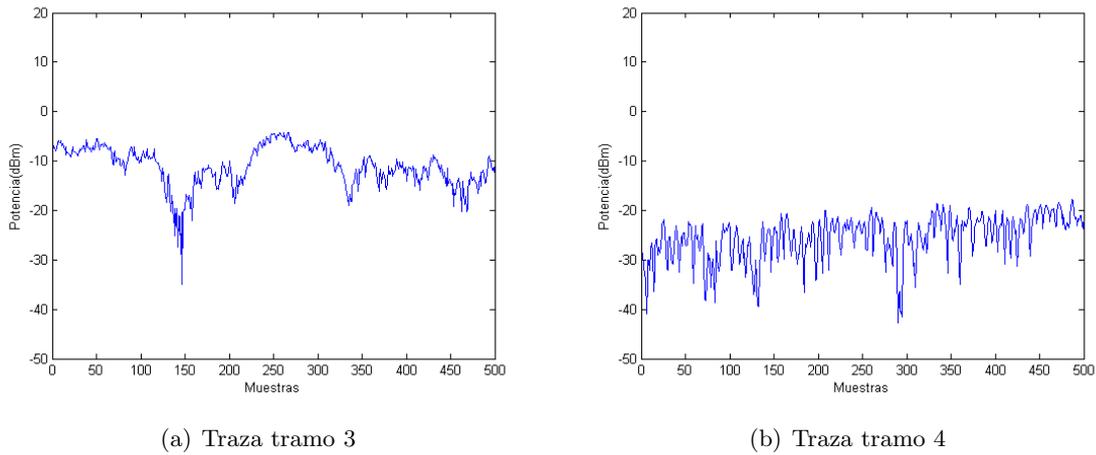


Figura 6.2: Ejemplo trazas

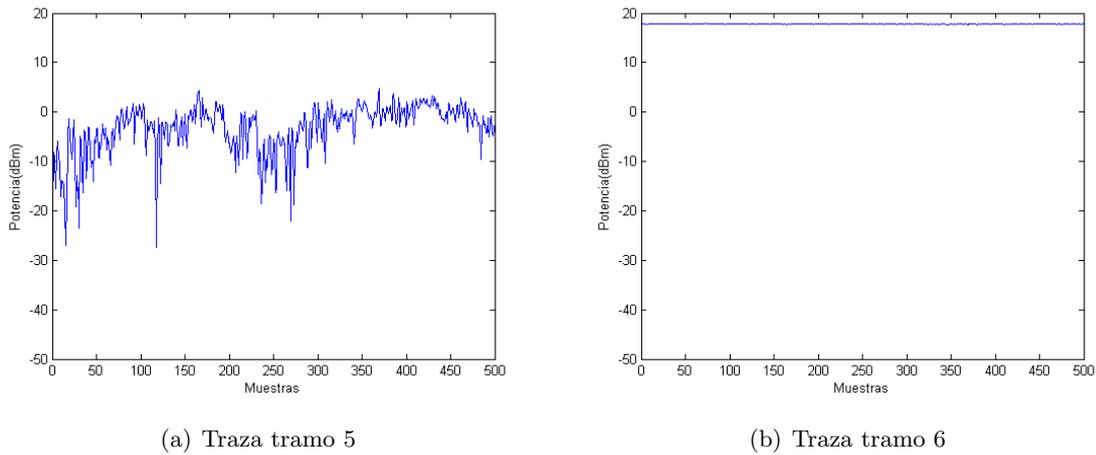


Figura 6.3: Ejemplo trazas

El siguiente paso es filtrar cada traza para eliminar las variaciones lentas de la señal, quedando únicamente el *fastfading*. Para ello, se ha empleado un filtro FIR de tamaño de ventana 40, implementado mediante la función *filter* de Matlab. Se ha tomado este tamaño de ventana ya que se ajusta mejor a las características de la señal. Inicialmente, se había adoptado un filtro con un tamaño de ventana menor al considerar que se adaptaba mejor a la forma de la señal, pero finalmente este se ha modificado ya que alteraba la profundidad de los distintos desvanecimientos de la señal.

En la Figura 6.4 se muestran algunos ejemplos de la señal y la propia señal filtrada con el filtro diseñado:

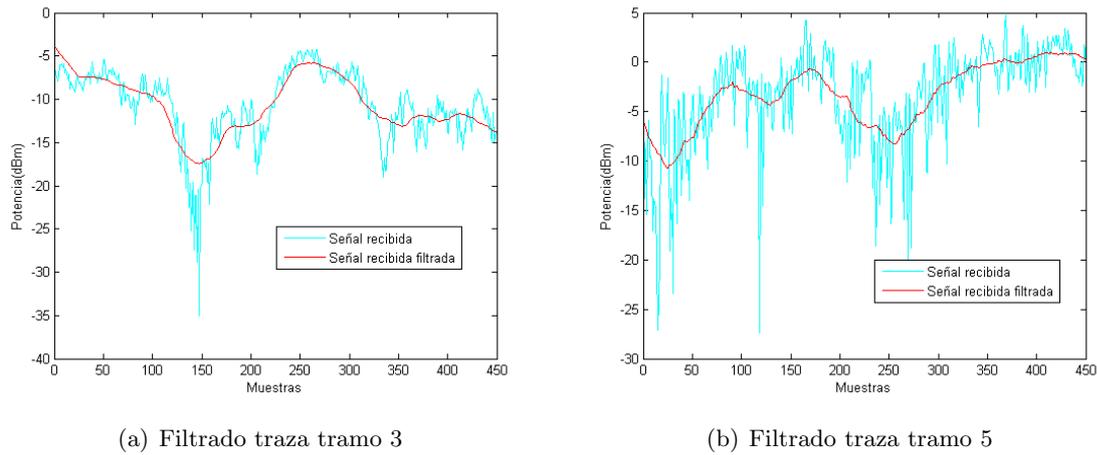


Figura 6.4: Ejemplo de filtrado

Una vez filtrada la señal, se resta la señal recibida con la propia señal filtrada de forma que se obtiene el *fastfading* de cada una de las trazas. En la Figura 6.5 se muestra un ejemplo para dos trazas que pertenecen al tramo 3 y 5, respectivamente:

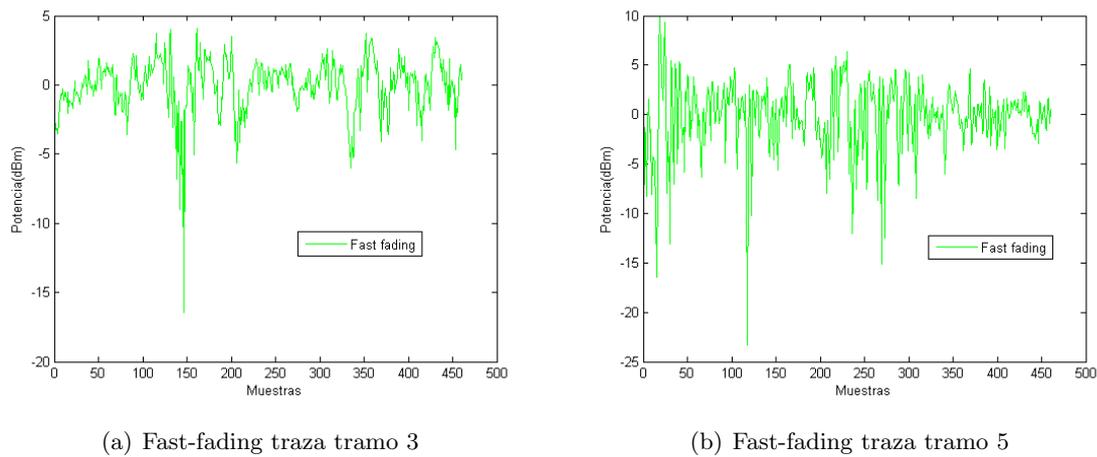


Figura 6.5: Ejemplo fast-fading

Mencionar que, cuando se ha obtenido el *fastfading* de cada una de las 1190 trazas, se ha realizado una clasificación de las trazas en función de la profundidad de los desvanecimientos de cada una de ellas. Para ello, se han establecido una serie de límites y se han enumerado los cortes de la señal sobre cada uno de los límites (ver código de realización en [INSERTAR ANEXO]). Esto se hace para permitir una clasificación más exhaustiva de las trazas y en cierto modo ha ayudado a realizar la división del recorrido en los seis tramos mencionados en la Sección 5.2.

A continuación, se realizan las estimaciones del parámetro κ para las distribuciones Rice y Folded normal y de κ y μ para la distribución κ - μ para cada una de las trazas. Los estimadores de Rice, Folded normal y κ - μ empleados se muestran en [INSERTAR REFERENCIA ANEXO MATLAB]. Una vez obtenidos todos ellos, se exportan a Excel ordenados por el número de traza para trabajar mejor con ellos.

6.2. Interpretación de los resultados

La siguiente tabla muestra los valores medios obtenidos de cada estimación para cada uno de los tramos del recorrido.

	Parámetro	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
Rice	κ	56,19	6,74	19,43	17,93	6,88	1341,27
Folded	κ	110,55	15,23	39,81	36,89	15,48	1239,88
κ - μ	κ	3,85	7,00	2,71	4,39	13,35	2,49
	μ	18,13	2,48	7,39	6,92	2,36	1007,82

Tabla 6.1: Valores medios de los parámetros de las distribuciones

Se observa que, en relación a clasificación del trayecto descrita en la Sección 5.2, se obtienen valores elevados de κ en instantes del recorrido en el que los coches están a una distancia próxima y no existe obstrucción entre los vehículos (ej. tramo 1, tramo 6). Por otra parte, en zonas donde la distancia es mayor y existe mayor número de obstáculos que perjudican la comunicación, los parámetros de κ obtenidos son inferiores. Esto es debido a que las condiciones físicas del entorno afectan a la señal propagada y esta sufre variaciones rápidas provocadas por la recepción de múltiples contribuciones de diferentes características (ej. tramo 2, tramo 5). Finalmente, los parámetros de los tramos 3 y 4 determinan un entorno cambiante con cierta presencia de LOS pero también con obstrucciones en el recorrido de la señal. Debido a esta constante variabilidad del entorno, se obtienen unos valores de κ intermedios. Respecto a la distribución κ - μ , los valores de μ obtenidos van en consonancia con la κ de Rice, mientras que los valores de κ varían de forma inversa en función de las características del entorno. Es decir, en un tramo con presencia de visión directa y poca distancia entre vehículos se obtiene un valor de κ pequeño, mientras que para escenarios fuertemente acusados por los desvanecimientos se obtienen valores de κ elevados.

Una vez obtenidos los valores de κ y μ para cada traza en sus respectivas distribuciones, se dibuja la PDF y CDF de una traza ejemplo cada tramo empleando las fórmulas descritas en la Sección 4.3.3.

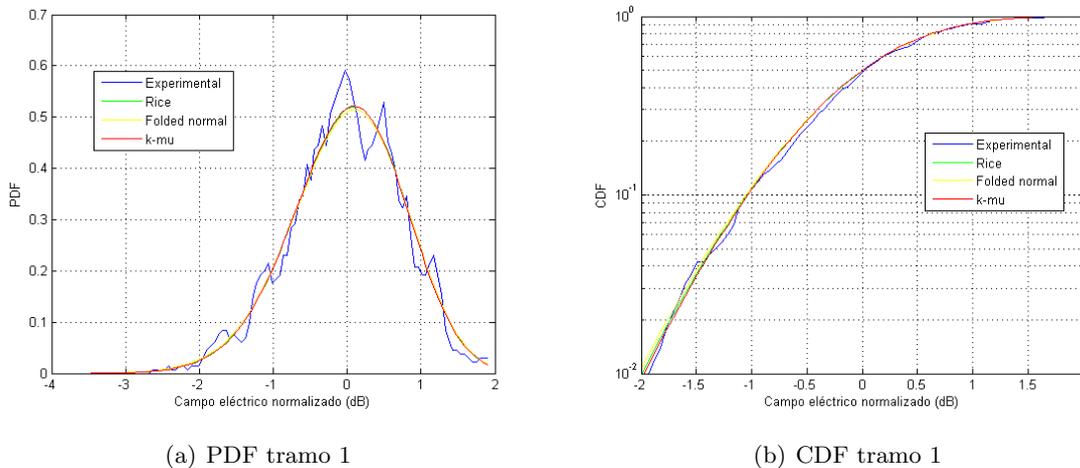
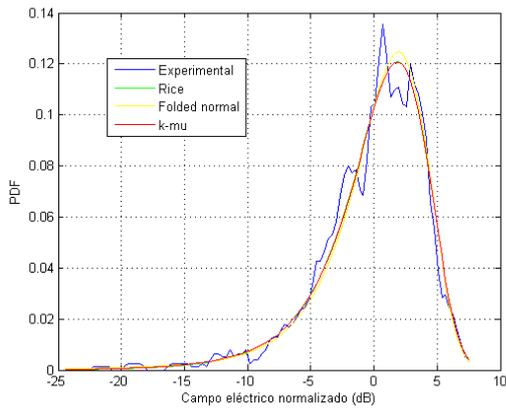
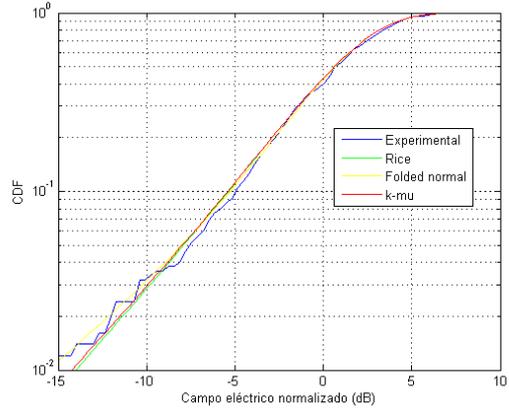


Figura 6.6: PDF y CDF en el tramo 1

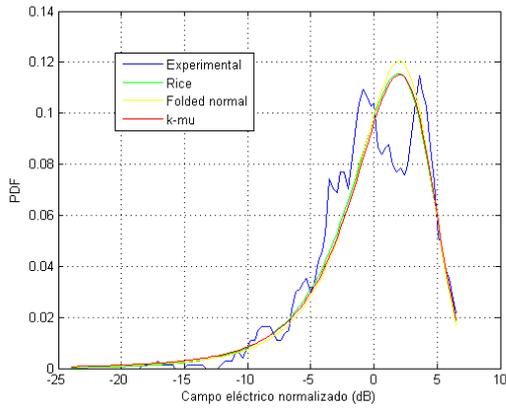


(a) PDF tramo 2

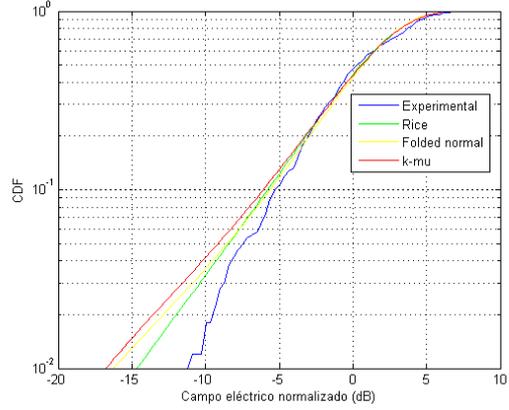


(b) CDF tramo 2

Figura 6.7: PDF y CDF en el tramo 2

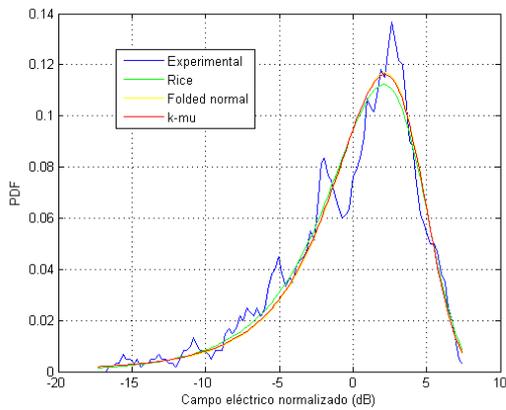


(a) PDF tramo 3

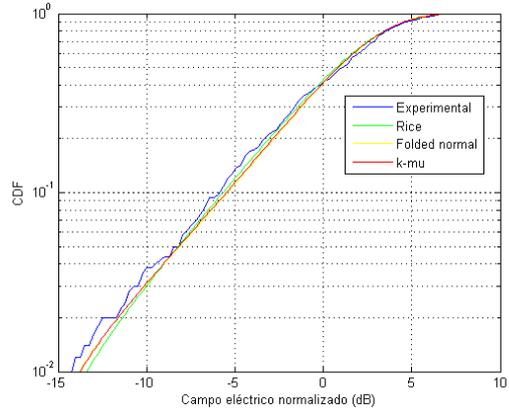


(b) CDF tramo 3

Figura 6.8: PDF y CDF en el tramo 3



(a) PDF tramo 4



(b) CDF tramo 4

Figura 6.9: PDF y CDF en el tramo 4

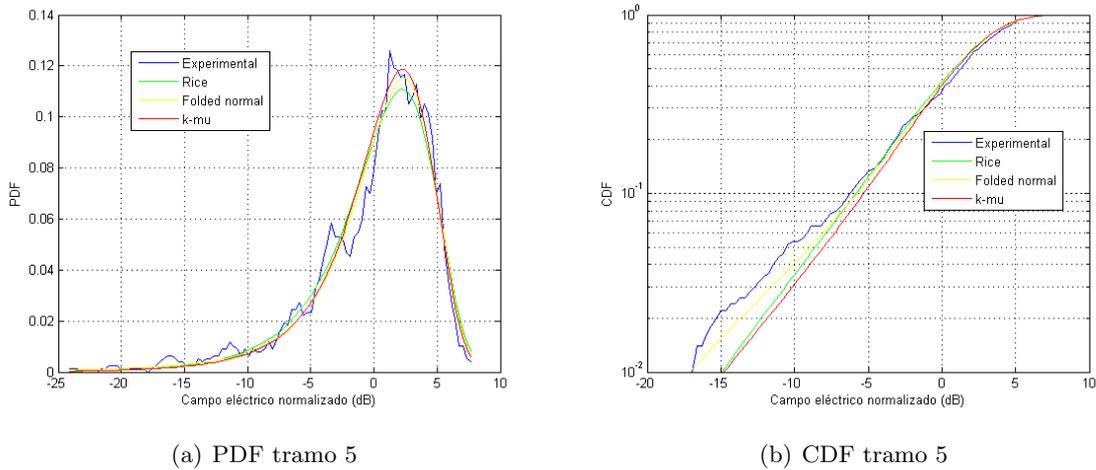


Figura 6.10: PDF y CDF en el tramo 5

A partir de la PDF y CDF obtenida para una traza perteneciente a cada tramo en que se ha dividido el recorrido, se observa que las tres distribuciones, en general, se aproximan fielmente a la señal experimental obtenida en las mediciones.

En la Figura 6.6(a) se muestra una PDF más estrecha y picuda que en el resto de tramos. Esto es debido a que en este tramo el parámetro κ de las distribuciones Rice y Folded y el parámetro μ de la distribución κ - μ , es más elevado por las características del entorno en el momento de las medidas. En cambio, para el resto de figuras se obtiene una PDF más ancha que corresponde físicamente a entornos con una profundidad de desvanecimientos mayor.

Otra característica a destacar es la existencia de una PDF con dos picos como se aprecia en la Figura 6.8(a). Esto es debido al efecto residual del shadowing. Es por ello que resulta difícil de aproximar, siendo la distribución Rice la que más se ajusta a las medidas experimentales.

Capítulo 7

Conclusiones y futuras direcciones

7.1. Conclusiones

Durante la realización de este proyecto se ha elaborado un procedimiento para extraer las trazas de la potencia recibida en la antena receptora en un entorno de comunicaciones V2V (*vehicle-to-vehicle*). Se ha tomado un tamaño de traza de 500 muestras ya que, por las características del escenario de propagación y los parámetros de velocidad y distancia de los vehículos, resulta ser óptima a la hora de calcular los parámetros de las distribuciones y se ha filtrado cada una de las trazas para obtener el *small-scale fading*.

A continuación, se ha clasificado el registro de medidas en 6 diferentes escenarios teniendo en cuenta las características relacionadas con la velocidad, la distancia y el entorno.

Una vez realizada la división del recorrido en tramos, se han estimado los parámetros de las distribuciones κ - μ , Rice y Folded. Estas se tratan de distribuciones para moldear situaciones de LOS.

A partir de los resultados obtenidos, se observan, excepto en dos escenarios, valores muy elevados del parámetro κ debido a la reducida variabilidad de la señal. Esto se puede explicar por la presencia de una componente muy dominante sobre el resto de contribuciones. En los dos escenarios con valores de κ menores se detecta una distancia entre vehículos considerablemente grandes que impide la visión directa entre ellos y origina en variaciones rápidas de la señal debido a la recepción de múltiples componentes con distintas características de atenuación y tiempos de llegada.

En conclusión, una vez realizado el análisis de los valores obtenidos se comprueba que, en conjunto, se trata de parámetros muy elevados y esto es debido al entorno en el que se han realizado las medidas. Un escenario de autopista permite, casi en todo momento, condiciones de LOS con el vehículo receptor. No sería así en el caso de haber llevado a cabo el estudio de los desvanecimientos en un entorno urbano con alta densidad de tráfico y edificios que dificulten la comunicación.

7.2. Futuras direcciones

Durante la realización de este proyecto se ha llevado a cabo un estudio de los desvanecimientos a corto plazo en un entorno concreto. Pero, como se menciona en la introducción de esta memoria, las comunicaciones V2V necesitan de una comunicación de alta fiabilidad y segura, ya que un único fallo en el sistema podría provocar numerosos accidentes.

Aunque se han realizado grandes avances en el modelado de canales V2V, hay todavía cuestiones por resolver antes de su implementación. Se deben llevar a cabo estudios empíricos adicionales para mejorar la precisión de los modelos de canales, considerando las posibles combinaciones de condiciones de propagación reales.

Es por ello, que resulta de vital importancia continuar explorando las características de propagación en diferentes entornos y situaciones de tráfico. A continuación se presentan los casos particulares que requieren un mayor estudio y su posterior análisis de los resultados.

Vías de doble sentido donde la comunicación no solo se establece con el vehículo que circula inmediatamente detrás o delante si no también con aquellos vehículos que se aproximan utilizando una dirección opuesta a la del propio vehículo.

Las **intersecciones** son otro aspecto importante a estudiar, teniendo en cuenta las distintas situaciones que se pueden producir. Por ejemplo: 1) ambos vehículos se acercan hasta que coinciden en la intersección, 2) ambos terminales se van distanciando, cada uno en su sentido correspondiente, tras su paso por un cruce y 3) situaciones en las que un vehículo se aleja y el otro se aproxima al cruce.

La **propagación en túneles** también debe ser objeto de estudio ya que presenta unas características del entorno diferentes a la propagación en escenarios urbanos o rurales.

Por otra parte, se deben considerar otras bandas de frecuencia, ya que la parte baja de banda UHF también se puede asignar a las comunicaciones V2V. En Japón, una banda de 10 MHz de 715 MHz a 725 MHz ya ha sido asignada para aplicaciones ITS [30]. Resulta interesante explorar las características de propagación a esa frecuencia, porque existen diferencias significantes con la banda de 5,9 GHz.

Finalmente, también deben ser tenidas en cuenta otras distribuciones para modelar el canal de propagación en condiciones de NLOS, como por ejemplo Nakagami- m y Weibull o las distribuciones α - κ - μ , α - η - κ - μ y κ - μ shadowed.

Anexos

Anexo A

Anexo

Programa principal

```
1  %El programa calcula la potencia recibida cada 500. Se realiza un
   filtrado
2  %para eliminar la parte de shadowing, de forma que nos quedamos con
   el
3  %fast faddig. Posteriormente, se hace una clasificacion de la señal
4  %resultante según la amplitud de los desvanecimientos. Finalmente,
   se
5  %realizan las estimacion de Rice, folded y k-mu.
6
7
8  % Calculos iniciales
9  [xsize ,ysize] = size(pote);
10
11 pot_dB = reshape(pote',500,1190);
12 pot_dB = pot_dB';
13 pot_lineal = 10.^((pot_dB-30)/20);
14
15 pote = reshape(pote',1,xsize*ysize);
16 ysize = length(pote);
17
18 %Tamaño de ventana del filtro
19 f = 40;
20
21 %% Programa
22
23 % Parametros de iniciacion
24 l = 0;
25 tamano = 0;
```

```
26 inicio = 1;
27 fin = ysize;
28 n = 0;
29
30 while(l==0)
31
32     % Recorrer todo el vector de 595000 (1190 repeticiones)
33     tamano = tamano+500;
34
35     % Rellenar los vectores de clasificacion , recorriendolos
36     n = n+1;
37
38     % Detectar final del vector
39     if tamano==ysize
40         l = 1;
41         fin = ysize;
42     end
43
44     pot=pote(inicio:tamano);
45
46
47     % Filtrar la señal
48     pot_filtrada=filter(ones(1,f)/f,1,pot);
49
50     pot_filt_desp(1:500-f)=pot_filtrada(f/2+1:500-f/2);
51     pot_desp(1:500-f)=pot(1:500-f);
52
53     % Dibujar la señal recibida y la propia señal filtrada
54     plot(1:500-f,pot_desp,'c',1:500-f,pot_filt_desp,'r')
55
56     % Anular las variaciones lentas de la señal
57     fast_fadding=pot_desp-pot_filt_desp;
58
59     % Representar las variaciones rapidas de la señal
60     figure
61     plot(fast_fadding)
62
63     % Establecer los limites para realizar una clasificacion
64     r1=find(-2>fast_fadding);
65     r2=find(-4>fast_fadding);
66     r3=find(-8>fast_fadding);
67     r4=find(-16>fast_fadding);
68
69
```

```
70     % Enumerar cuantas veces se supera ese limite
71     s1=length(r1);
72     s2=length(r2);
73     s3=length(r3);
74     s4=length(r4);
75
76     % Eliminar las repeticiones
77     s3=s3-s4;
78     s2=s2-s3-s4;
79     s1=s1-s2-s3-s4;
80
81     % Obtener el numero de cortes
82     s1=ceil(s1/2);
83     s2=ceil(s2/2);
84     s3=ceil(s3/2);
85     s4=ceil(s4/2);
86
87     % Rellenar los vectores de clasificacion
88     v1(n)=s1;
89     v2(n)=s2;
90     v3(n)=s3;
91     v4(n)=s4;
92
93
94     % Pasar la potencia a lineal
95     v_lineal = 10.^((pot-30)/20);
96
97     % Estimacion de Rice
98     k_r = estimacion_Rice(v_lineal);
99     k_Rice(n) = k_r;
100
101     % Estimacion folded
102     k_f = estimacion_folded_mle(v_lineal);
103     k_folded(n) = k_f;
104
105     % Estimacion k-mu
106     [k_m,mu_m] = estimacion_k_mu_moment(v_lineal);
107     k_moment(n) = k_m;
108     mu_moment(n) = mu_m;
109
110     pause
111     inicio = inicio+500;
112
113
```

```
114 end
115
116 %% Exportar a Excel
117
118 cortes = [v1; v2; v3; v4];
119
120 xlswrite('Tabla.xlsx', cortes, 'Hoja1', 'H2');
121
122 xlswrite('Parametros.xlsx', k_Rice, 'Hoja1', 'B2');
123
124 xlswrite('Parametros.xlsx', k_folded, 'Hoja1', 'D2');
125
126 xlswrite('Parametros.xlsx', k_moment, 'Hoja1', 'F2');
127
128 xlswrite('Parametros.xlsx', mu_moment, 'Hoja1', 'G2');
```

Cálculo del recorrido

```
1 % Generar rutas y exportar a Google Earth
2
3 % Recorrido tx
4 recorridotx = str2num(recorridotx);
5 rec_lon_tx = recorridotx(:,1);
6 rec_lat_tx = recorridotx(:,2);
7 rec_lon_tx = rec_lon_tx';
8 rec_lat_tx = rec_lat_tx';
9
10 kmlwrite('recorridotx', rec_lat_tx, rec_lon_tx);
11
12 % Recorrido rx
13 recorridorx = str2num(recorridorx);
14 rec_lon_rx = recorridorx(:,1);
15 rec_lat_rx = recorridorx(:,2);
16 rec_lon_rx = rec_lon_rx';
17 rec_lat_rx = rec_lat_rx';
18
19 kmlwrite('recorridorx', rec_lat_rx, rec_lon_rx);
```

Cálculo de velocidades

```
1 % Obtencion de las velocidades relativas de los vehículos.
2
3 % Velocidad de tx
```

```
4 velocidadtx = reshape(velocidadtx',500,1190);
5 velocidadtx = velocidadtx';
6
7 for i=1:1190
8
9     velocidad_media_tx = mean(velocidadtx(i,:));
10    velocidad_media_tx = 3.6.*velocidad_media_tx;
11    v_tx(i) = velocidad_media_tx;
12
13 end
14
15 xlswrite('Tabla.xlsx', v_tx, 'Hoja1', 'D2');
16
17 % Velocidad de rx
18 velocidadrx = reshape(velocidadrx',500,1190);
19 velocidadrx = velocidadrx';
20
21
22 for i=1:1190
23
24     velocidad_media_rx = mean(velocidadrx(i,:));
25     velocidad_media_rx = 3.6.*velocidad_media_rx;
26     v_rx(i) = velocidad_media_rx;
27
28 end
29
30 xlswrite('Tabla.xlsx', v_rx, 'Hoja1', 'F2');
```

Cálculo de la distancia

```
1 % Distancias entre los vehiculos
2 distancia = reshape(distancia',500,1190);
3 distancia = distancia';
4
5 for i=1:1190
6
7     distancia_media = mean(distancia(i,:));
8     d(i) = distancia_media;
9
10 end
11
12 % Exportar vector distancia media a excel
13 xlswrite('Tabla.xlsx', d, 'Hoja1', 'B2');
```

Bibliografía

- [1] H. Suzuki, B. Gallagher, and H. Akatsuka, communications for vehicle safety: Radio link performance and wireless connectivity methods, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 1, no. 4, pp. 4-16, 2006.
- [2] D. Jiang and L. Delgrossi, 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments, in *Proc. IEEE Vehic. Technol. Conf., VTC Spring, 2008*, pp. 2036-2040.
- [3] Vlacic, L. Parent, M. Harashima, F. (2001). *Intelligent Vehicle Technologies. Theory and Applications*, pp. 87-188, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [4] Peden, M. Scurfield, R. Sleet, D. Mohan, D. Hyder, A. A. Jarawan, E. Mathers, C. (2004). *World Report on Road Traffic Injury Prevention*, pp. 31-66, World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- [5] US Federal Communications Commission (2003) DSRC Licensing and Service Rules. Technical Report. FCC-03-324A1, FCC
- [6] IEEE Standard (2010) IEEE Wireless LAN MAC and PHY Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments. Technical Report. IEEE 802.11p-2010
- [7] ECC/DEC/(08)01 Electronic Communications Committee (ECC) (2008) ECC Decision (08)/01 on the harmonized use of the 5875-5925 MHz frequency band for Intelligent Transport Systems (ITS). Decision ECC/DEC/(08)01, ECC
- [8] Electronic Communications Committee (ECC) (2008) ECC Recommendation (08)01: use of band 5855-5875 MHz for Intelligent Transport Systems (ITS). Recommendation ECC/REC/(08)01, ECC
- [9] EC European Communication (EU) (2008) EU Decision of 5 August 2008 on the harmonized use of radio spectrum in the 5875-5905 MHz frequency band for safety-related applications of Intelligent Transport Systems (ITS). Decition 2008/671/EC, EC
- [10] Rappaport TS (1996) *Wireless communications: principles and practice*. Prentice Hall, Upper Saddle River
- [11] Rayleigh L (1879) XXXI. Investigations in optics, with special reference to the spectroscope. Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci 8(49):261-274

- [12] Ament WS (1953) Toward a theory of reflection by a rough surface. Proc IRE 41(1):142-146
- [13] Molisch A, Tufvesson F, Karedal J, Mecklenbrauker C (2009) A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels. IEEE Wireless Commun 16(6):12-22
- [14] Karedal J, Czink N, Paier A, Tufvesson F, Molisch A (2011) Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications. IEEE Trans Veh Technol 60(1):323-328
- [15] Xia, H. H. Bertoni, H. L. Maciel, L. R. Lindsay-Stewart, A. Rowe, R. (1993). Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 41, No. 10, pp. 1439-1447.
- [16] Kunisch, J. Pamp, J. (2008). Wideband car-to-car radio channel measurements and model at 5.9 GHz. IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, Calgary, BC, Sep. 2008.
- [17] Cox D, Arnold H, Porter P (1987) Universal digital portable communications: a system perspective. IEEE J Sel Areas Commun 5(5):764-773.
- [18] Boban M, Vinhoza TTV, Ferreira M, Barros J, Tonguz OK (2011) Impact of vehicles as obstacles in vehicular ad hoc networks. IEEE J Sel Areas Commun 29(1):15-28.
- [19] J. I. Marcum, "A Statistical Theory of Target Detection by Pulsed Radar," Project RAND, Douglas Aircraft Company, Inc., RA-15061, December 1, 1947.
- [20] Leone, F.C.; Nelson, L.S.; Nottingham, R.B. The folded normal distribution. Technometrics 1961, 3, 543-550.
- [21] Boban M, Barros J, Tonguz O (2014) Geometry-based vehicle-to-vehicle channel modeling for large-scale simulation. IEEE Trans Veh Technol 63(9):4146-4164.
- [22] Campolo C, Molinaro A, Scopigno R (2015) Vehicular ad hoc Networks. Standards, solutions and research. 7(22):196-198.
- [23] Rubio L, Reig J, Fernández H. Propagation Aspects in Vehicular Networks. Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Pedagógica y Tecnológica of Colombia
- [24] ASTM E2213-03. (2003). Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems ? 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, American Society for Testing Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, USA.
- [25] TecnoCarreteras. <https://www.tecnocarreteras.es/2014/04/03/reflexionando-sobre-los-sistemas-de-comunicacion-entre-vehiculos-v2v-y-con-la-infraestructura-v2i/>.
- [26] Redes vehiculares: La comunicación total del automóvil. <http://blogs.salleurl.edu/networking-and-internet-technologies/redes-vehiculares-la-comunicacion-total-del-automovil/>.
- [27] Fernández H (2014) Tesis Doctoral. Caracterización experimental de las pérdidas de propagación en comunicaciones vehicular a 700 MHz y 5,9 GHz.

- [28] www.elconfidencial.com/motor/2014-07-13/un-verano-peligroso-en-las-carreteras/.
- [29] www.cnx.org/resources/ce4743c49c297ba4c7607857a7c8d65783477c37/Image1.jpg.
- [30] Sai, S.; Niwa, E.; Mase, K.; Nishibori, M.; Inoue J.; Obuchi, M.; Harada, T.; Ito, H.; Mizutani, K. Kizu, M. (2009). Field evaluation of UHF radio propagation for an ITS safety system in an urban environment.
- [31] <https://www.researchgate.net/profile/OkechukwuUgweje/publication/228041875/figure/fig2/AS:341614498205699@1458458651900/Figure-5-Illustration-of-reflection-diffraction-scattering-and-absorption.png>