

Clasificación del artículo:
REVISIÓN

OFDM: "UNA BREVE PERSPECTIVA"

OFDM: "A BRIEF PERSPECTIVE"

Oscar Fabian Corredor Camargo[1]
Luis Fernando Pedraza Martinez[2]
César augusto Hernandez Suarez[3]

Resumen

En este artículo se presenta una breve introducción al esquema de modulación OFDM y algunas de las principales razones por las cuales se originó; además de una descripción matemática aplicada y simulada en el paquete de software Matlab® para una secuencia de datos binarios y finalmente las áreas de desarrollo más representativas donde se puede usar OFDM.

Palabras clave

Portadora, OFDM, Interferencia Intersímbolo (ISI), Modulación.

Summary

In this article a brief introduction to the scheme of modulation OFDM and some of the main reasons appears for which it was originated; in addition to a mathematical description applied and simulated in the software package Matlab® for a sequence of binary data and finally the more representative areas of development where OFDM can be used.

Key words

Carrier, OFDM, Inter-symbol Interference (ISI), Modulation.

1 Ingeniero Electrónico Universidad Distrital de Bogotá, Colombia. Actualmente desarrolla su tesis de maestría en modelos de tráfico multimedia en la Web. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y de la Universidad Cooperativa de Colombia. ofcca@hotmail.com

2 Ingeniero Electrónico Universidad Distrital de Bogota, Colombia. Msc. En Teleinformática de la Universidad Distrital, su área de investigación está en modelos de control de tráfico vehicular. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y de la Universidad Cooperativa de Colombia.pedrazaluis2001@yahoo.es

3 Ingeniero Electrónico. Universidad Distrital, de Bogotá, Colombia. Docente Investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Lctsubasa@gmail.com

Introducción

El principal problema con la recepción de señales de radio es el desvanecimiento de las mismas (Fading) causado por la propagación multitrayectoria, sumado a otros problemas como la ISI, la obstaculización, interferencias, etc.; haciendo que la calidad del enlace varíe. Otras dificultades adicionales son el ancho de banda (AB) limitado que se dispone, el bajo consumo de potencia, la administración de la red y la operación multicelular.

Como resultado de la propagación multitrayectoria, hay muchas señales reflejadas que llegan al receptor a diferentes tiempos. Estos

retrasos son el resultado de reflexiones por las características del terreno tales como árboles, montañas u objetos (personas, vehículos o edificios) produciendo ecos, los cuales causan la ISI, siendo mas acentuadas por la existencia de un receptor móvil ya que las longitudes y atenuaciones relativas de las posibles trayectorias de recepción cambiarán en el tiempo (Dušan, 1998).

Considérese una señal de banda estrecha, la cual variará en calidad dependiendo de como los picos y los canales de su respuesta en frecuencia se muevan alrededor de ella, implicando también una variación sensible en la respuesta de fase. Pero si la señal es de mayor AB, algunas partes de la misma pueden sufrir de interferencia constructiva y realzarse en nivel, mientras que otras pueden sufrir de interferencia destructiva y ser atenuadas a veces hasta el punto de la extinción. En general, las componentes de frecuencia que están más cercanas, sufrirán variaciones en las componentes de señal que se correlacionan fuertemente. De esta manera surgen las técnicas de espectro expandido o ensanchado las cuales son más robustas en contra del desvanecimiento y la interferencia, pero que requieren ciertas demandas sobre las tecnologías de comunicación existentes, además de tener dificultad con el efecto de la zona cercana-lejana y un gran consumo de potencia.

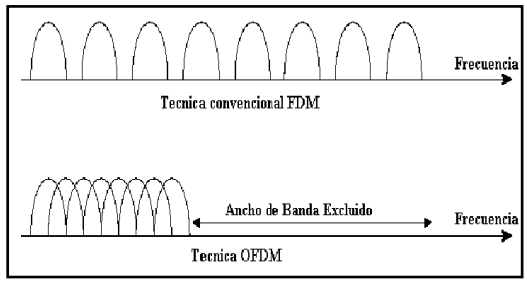
1. ¿Que es OFDM?

Para solucionar en gran parte las anteriores dificultades nació OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) el cual es un esquema de modulación de banda ancha capaz de hacerle frente a los problemas de la recepción multitrayectoria, transmitiendo muchas señales digitales de banda angosta en paralelo y traslapadas dentro de una banda amplia (Dusan, 1998). Este aumento del número de canales de transmisión paralelos reduce la tasa de datos que cada portadora individual debe transportar y alarga el período de símbolo. Como resultado, el tiempo de retardo de las ondas reflejadas es comprimido dentro de un tiempo de símbolo.

Este concepto surgió gracias a la múltiplexación por división de frecuencia (FDM) publicada a mediados de los sesenta (Chang, 1966, p. 1775) y (Salzberg, 1967, p. 805). La idea era utilizar secuencias de datos paralelos y subcanales traslapados para evitar el uso de ecualizadores de alta velocidad y combatir el ruido impulsivo y la distorsión multitrayectoria, así como para utilizar eficientemente el AB disponible. En los años 80, OFDM fue usado en módems de alta velocidad (desarrollados para redes telefónicas) comunicaciones móviles digitales y grabación de alta densidad con Codificación Trellis. En los años 90, OFDM fue explotado en comunicaciones de datos de banda ancha sobre canales móviles de radio FM, líneas de suscriptor digital de alta tasa de bit (HDSL, 1.6 Mb/s), asimétricas (ADSL, 1.536 Mb/s) y de muy alta velocidad (VHDSL, 100 Mb/s) además de difusión digital de audio (DAB) y de TV (HDTV).

En OFDM, cada portadora es ortogonal al resto de portadoras, siendo la versión óptima de los esquemas de transmisión multiportadora ya conocidos. La diferencia más importante entre FDM y OFDM es que el primero asigna cada canal a un usuario mientras que el segundo asigna todos los canales a un usuario. Para una gran cantidad de subcanales, los arreglos de generadores sinusoidales y demoduladores coherentes requeridos en un sistema para-

Figura 1. Comparación del ancho de banda usado en FDM y en OFDM (Dušan, 1998)



lelo pueden llegar a ser desmesuradamente costosos y complejos. Para esto, el receptor necesita precisar la fase de las portadoras demoduladas y los tiempos de muestreo para mantener así, una interferencia entre subcanales aceptable.

(Weinstein and Ebert, 1971, p.628) Aplicaron la Transformada de Fourier Discreta (DFT) a los sistemas de transmisión de datos paralelos como parte del proceso de modulación y demodulación. De esta forma, para eliminar los bancos de osciladores de las subportadoras y de los demoduladores coherentes requeridos por FDM, una implementación completamente digital puede ser construida alrededor de un hardware de propósito especial que pueda realizar la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Los avances recientes en tecnología VLSI permiten la fabricación de chips de alta velocidad que pueden realizar FFT de gran tamaño a un precio razonable.

En un sistema de transmisión de datos serial convencional, los símbolos son transmitidos secuencialmente con el espectro de frecuencia de cada símbolo ocupando el total del AB disponible, mientras que en un sistema paralelo varios símbolos se transmiten en el mismo tiempo, lo que ofrece posibilidades para aliviar muchos de los problemas encontrados en los sistemas seriales. En OFDM, el dato es dividido entre un número grande de portadoras estrechamente espaciadas (El AB total es cubierto con una sola fuente de datos). Esto hace alusión a la "Multiplexación por División de Frecuencia" pero no es una técnica de acceso múltiple, puesto que no hay un medio común a ser compartido. En lugar de transmitir serialmente, el dato es transferido de forma paralela. Solamente una cantidad pequeña de los datos es montada sobre cada portadora, reduciendo la tasa de bit de la portadora (no la tasa de bit total) y la influencia de la interferencia ínter-símbolo significativamente.

En principio, muchos esquemas de modulación podrían ser utilizados para modular los datos a una baja tasa de bit sobre cada portadora, pero aunque algunas de las portadoras son degradadas por el desvanecimiento multitrayectoria, la mayoría de las mismas deben todavía ser recibidas adecuadamente. OFDM puede efectivamente seleccionar al azar ráfagas de errores causadas por el desvanecimiento de Rayleigh, el cual viene de la interpolación debida a la paralelización. Así pues, en lugar de varios símbolos adyacentes siendo completamente destruidos, muchos símbolos son solamente distorsionados levemente.

Debido a la división total del AB del canal en muchas sub-bandas estrechas, la respuesta de frecuencia sobre cada sub-banda individual es relativamente plana. Puesto que cada sub-canal cubre solamente una fracción pequeña del AB original, la ecualización es potencialmente más simple que en un sistema de datos serial. Un algoritmo simple de ecualización puede reducir al mínimo la distorsión cuadrada media en cada sub-canal y la implementación de co-

dificación diferencial puede evitar la ecualización en conjunto (Weinstein and Ebert, 1971, p.628). Esto permite la reconstrucción exacta de la mayoría de ellas, incluso sin las técnicas de corrección de errores hacia adelante (FEC). Además, usando un intervalo de guarda, la sensibilidad del sistema a los retardos expandidos puede ser reducida (Cimini, 1985, p.665). Hay tres esquemas que se pueden utilizar para separar en subbandas (Dušan, 1998).

1. Usar filtros para separar totalmente las sub-bandas. Este método fue tomado de la tecnología convencional FDM. La limitación de la implementación de filtros fuerza al AB de cada sub-banda a ser igual a (1+ά)Fm, donde ά es el factor de Roll-Off y Fm es el ancho de banda de Nyquist.

2. Usar QAM escalonado para aumentar la eficiencia de la banda usada. De esta manera los espectros individuales de las portadoras moduladas todavía utilizan un AB excesivo, pero los traslapan a la frecuencia de -3dB alcanzando la separabilidad u ortogonalidad escalonando los datos (desplazando los datos a la mitad de un símbolo). La ventaja es que la composición del espectro es plana. Los requerimientos para el diseño del filtro son menos críticos que para el primer esquema.

3. Usar Transformada de Fourier Discreta (DFT) para modular y demodular datos paralelos. Los espectros individuales ahora son funciones Sinc ($\frac{sen\pi x}{\pi x}$) y no están limitados en banda. FDM es logrado, no por el filtrado pasa banda, sino por el procesamiento banda base. Usando este método, tanto el transmisor como el receptor pueden ser implementados usando las técnicas eficientes de FFT que reducen el número de operaciones de N2 en DFT, a N* Log (N).

Como conclusión, OFDM es simplemente una forma de modulación multiportadora donde su espaciamiento entre portadoras es seleccionado cuidadosamente de modo que cada sub-portadora es ortogonal a las otras subportadoras, siendo separadas en el receptor con técnicas de correlación reduciendo drásticamente la ISI entre canales.

2. Modelo matemático de OFDM

En el arreglo de portadoras descrito, algunas de estas alcanzan a sobrelaparse en parte con sus adyacentes. Sin embargo, el receptor puede recuperar sin problema la información en cada una de ellas ya que no existe interferencia entre las portadoras adyacentes debido a que estas son ortogonales entre si (ortogonalidad significa que las portadoras son linealmente independientes y están equiespaciadas un valor que es múltiplo de $1/\tau$, donde τ es la duración del periodo de un símbolo). Matemáticamente, es posible suponer que se tiene un conjunto de señales ψ, donde ψ_p indica la p-esima señal del conjunto, entonces las señales ψ_p y ψ_q son ortogonales si:

$$\int_a^b \psi_p(t)\psi_q^*(t)dt = \frac{K, _si_p = q}{0, _si_p \neq q} \quad (1)$$

Matemáticamente cada portadora puede ser descrita como una onda compleja de la siguiente forma:

$$S_c(t) = A_c(t)e^{j[w_c t + \phi_c t]} \quad (2)$$

La señal real es la parte real de $S_c(t)$. La fase $\phi_c(t)$ y la amplitud $A_c(t)$ de la respectiva portadora puede variar de símbolo a símbolo y los valores de los parámetros son

constantes sobre el periodo τ de la duración del símbolo. Debido a que OFDM consiste en N portadoras complejas que componen la señal $S_c(t)$, esta se puede representar como sigue:

$$\int_a^b \psi_p(t)\psi_q^*(t)dt = \frac{K, _si_p = q}{0, _si_p \neq q} \quad (3)$$

Donde,

$$\omega_n = \omega_0 + n\Delta\omega \quad (4)$$

Esto es por supuesto una señal contínua. Si se deseara considerar las formas de onda de cada componente de la señal sobre el periodo de un solo símbolo, entonces las variables $\phi_n(t)$ y $A_n(t)$ tomarían valores de acuerdo a la frecuencia de la portadora en particular, por lo que pueden ser descritas como sigue:

$$\phi_n(t) = \phi_c \quad (5)$$

$$A_n(t) = A_n \quad (6)$$

Si la señal es muestreada usando una frecuencia de muestreo de 1/T, entonces la señal resultante es representada por (7),

$$S_c(t) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} A_n(t)e^{jt(w_n+\phi_n)} \quad (7)$$

En este punto, se ha restringido el tiempo sobre el cual se analiza la señal a N muestras. Es conveniente muestrear de acuerdo al periodo de un símbolo de los datos, obteniendo la siguiente relación:

$$\tau = NT \quad (8)$$

Ahora si se simplifica la ecuación (7), y haciendo ω_0=0 sin perder la generalidad, se llega a (9)

$$S_s(kT) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j\phi_n} e^{jn\Delta wkT} \quad (9)$$

Ahora la ecuación (9), puede ser comparada con la forma general de la transformada inversa discreta de fourier:

$$S_s(kT) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j[(w_0+n\Delta w)kT+\phi_n]} (10)$$

En la ecuación (9), la función , no es mas que la definición de la señal muestreada en el dominio de la frecuencia, y S(kT) es la representación en el dominio del tiempo. Por lo tanto, las ecuaciones (9) y (10) son equivalentes si:

$$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{1}{NT} = \frac{1}{\tau} \quad (11)$$

Esta es la misma condición que se requiere para la existencia de ortogonalidad.

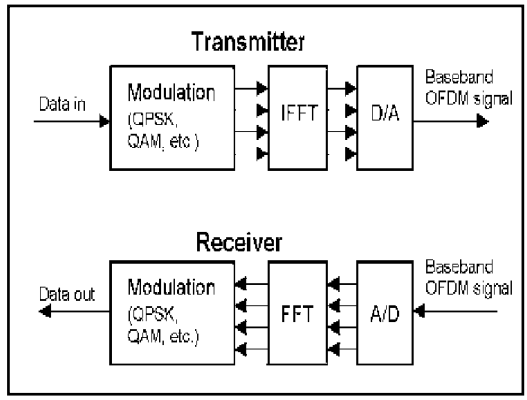
3. Aplicación matemática de OFDM

Como complemento de la anterior demostración matemática para OFDM se realiza el siguiente ejercicio donde se transmitirá la siguiente señal digital:

S(n) = {0,0,0,1,1,0,1,1}

Para la cual se supondrá una rata de bit de 1Mbps, siendo el tiempo de bit T=1/1Mbps = 1µseg. De acuerdo a lo analizado previamente se utilizara el siguiente modelo de comunicación para un sistema OFDM:

Figura 2. Sistema de Comunicación OFDM



La modulación que se aplicara será QPSK (4-PSK), por lo que después del primer bloque se tendrán 4 señales de la forma:

$$S_c(t) = A_c(t)e^{j\phi_c t} \qquad (12)$$

Donde la señal S(n) se transforma en la siguiente señal:

$$S_c(t) = -3e^{j\frac{\pi}{4}t} - 1e^{j\frac{3\pi}{4}t} + 1e^{j\frac{5\pi}{4}t} + 3e^{j\frac{7\pi}{4}t} \quad (13)$$

Luego de esto, la señal pasa por un conversor serial a paralelo con N=4, por lo cual Sc se convierte en 4 señales, donde cada una de ellas tiene un tiempo de símbolo de 2*1µseg = 2µseg. Como la señal se modulo en QPSK la rata a la salida del modulador se reduce a la mitad y luego de pasar por el conversor serie/paralelo la rata de bits se divide por 4, por lo que se tienen 4 señales a una rata de bits de 125kbps cada una, lo cual redunda en una ISI mucho menor. Luego de pasar por el modulador y el conversor serial a paralelo, la señal es muestreada a una frecuencia de muestreo de 1/2µseg = 500Khz. De aquí, cada una de estas señales va a una entrada del IFFT de 16-IFFT, donde a cada una de ellas se le aplicara la transformada inversa de fourier, obteniéndose las siguientes señales:

$$S(kT) = \frac{1}{4}\sum_{n=0}^{3} G\left(\frac{n}{2\mu}\right)e^{j2\pi nk/4} \qquad (14a)$$

$$S(kT) = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} -3e^{j\frac{\pi}{4}} - 1e^{j\frac{3\pi}{4}}e^{j\pi k/2} \\ +1e^{j\frac{5\pi}{4}}e^{j\pi k} + 3e^{j\frac{7\pi}{4}}e^{j\pi 3k/2} \end{bmatrix} \qquad (14b)$$

Ahora el resultado de la IFFT de la señal discreta se pasa por un conversor paralelo/serie, para luego pasar la señal por un conversor digital/análogo (DAC). A la señal de salida del DAC, se le introduce una banda de guarda para luego ser transmitida por el canal. En el receptor se realiza el proceso inverso recuperándose la señal original.

A continuación se presenta la simulación del anterior ejemplo en la herramienta de software Matlab®. En la figura 3, se dibuja la secuencia binaria a transmitir

S(n) = {0,0,0,1,1,0,1,1}

Figura 3. Secuencia binaria a transmitir

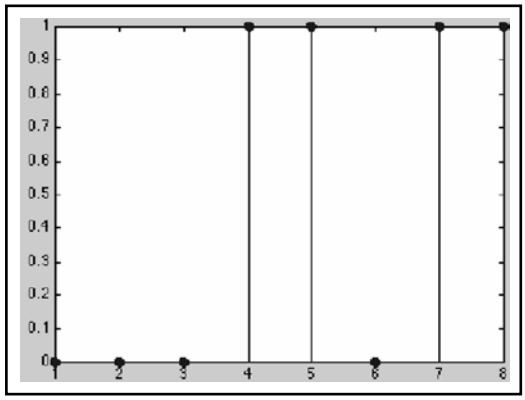
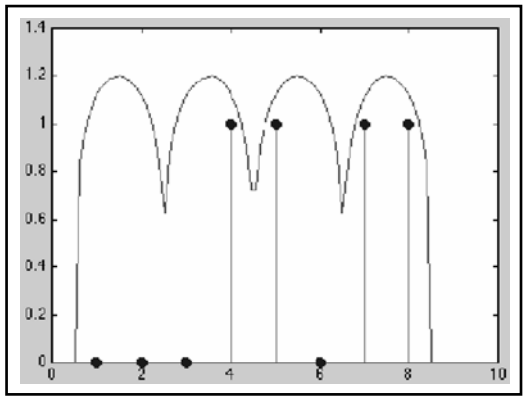


Figura 4. Grupos de dos datos binarios bajo una curvatura



En la figura 4, se observan grupos de dos datos binarios, bajo una curvatura que será colocada sobre una frecuencia. En la figura 5, se realiza la IFFT, lo cual ha generado una señal OFDM, correspondiente a los datos binarios.

Ahora la señal es pasada a través de un medio guiado ó inalámbrico y una vez recibida

Figura 5. IFFT de la secuencia binaria

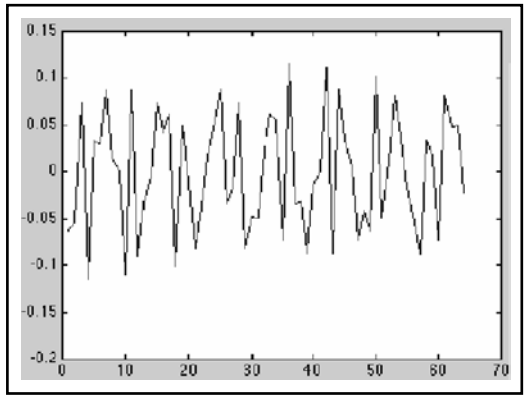
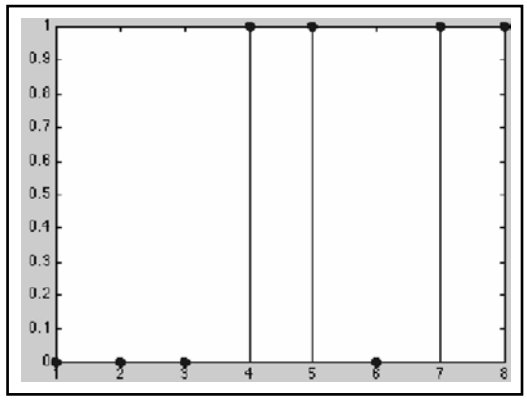


Figura 6. FFT de la señal OFDM recibida del medio de transmisión



se realiza el proceso inverso para recuperar los datos binarios originales. Esto se observa en la Figura 6, donde se realiza la FFT de la señal recibida y se recuperan los datos originales.

4. Futuras perspectivas de OFDM

A continuación se describen algunas de las tecnologías donde OFDM es utilizado:

4.1. ADSL

MCM (Modulación Multi-Portadora) es una técnica que distribuye el espectro en frecuencia en múltiples subportadoras, cada una de las cuales es ortogonal a las otras subportadoras. Todas ellas utilizan QAM, esquema que permite una transmisión y recepción más fácil de cada subportadora. El ejemplo más popular de MCM es DMT (multitono discreto) que se utiliza en ADSL.

La principal limitación de MCM es su rata promedio pico (PAR). En sistemas tales como ADSL, donde el plan del espectro consiste en una sola banda de frecuencia asignada a cada dirección de la comunicación, la diferencia PAR entre un sistema de DMT y de SCM (Modulación de una portadora) esta alrededor de los 6 dB.

MCM, como ningún otro tipo de modulación, puede no ser la opción más óptima para todos los ambientes. Sin embargo, en escenarios donde existe dispersión significativa de tiempo, distorsiones dependientes de la frecuencia y requisitos diversos de asignación del espectro de frecuencia, MCM puede ser la opción de modulación deseada. Aunque en muchos usos de comunicación, por ejemplo, en líneas de vista basada en los satélites o en los módems de cable, donde el canal no presenta una dispersión significativa y donde la interferencia es esencialmente plana en el dominio de la frecuencia, el uso de la modulación MCM no proporcionan ninguna ventaja. Así, en tales usos, un sistema basado en SCM resolverá adecuadamente los requisitos menos rigurosos de funcionamiento.

Como se dijo anteriormente, las señales OFDM pueden sufrir de un alto PAR, tendiendo hacia una distribución gaussiana para una gran cantidad de subportadoras, razón por la cual existe gran cantidad de investigaciones acerca de la transmisión orientada al procesamiento de señales y

Tabla 1. Esquemas de modulación

Modulation Schemes	Bit Error Rate	
	Single Carrier	Multi Carrier
BPSK	0	0
QPSK	0.2065	0.0293
8PSK	0.4813	0.030105
16PSK	0.5096	0.25922
8QAM	0.4778	0.01593
16QAM	0.4865	0.088954
32QAM	0.4975	0.26279
64 QAM	0.5156	0.37938

Tabla 2. Numero de Múltiples trayectorias

Number of Multipaths	Bit Error Rate	
	Single Carrier	Multi Carrier
1	0.1694	0
2	0.1865	0
3	0.2013	0
4	0.2169	0.000156
5	0.25594	0.000983
6	0.36545	0.001209

Tabla 3. Período de símbolos

Symbol Period	Bit Error Rate	
	Single Carrier	Multi Carrier
1	0.39703	0.028594
2	0.37797	0.025781
4	0.32922	0.020313
8	0.23594	0.019625
16	0.1796	0.008653

métodos de codificación para atenuar los problemas asociados al truncamiento debido a estos altos valores nominales, como se puede notar en (Krongold, 2003, p.258) y (Breiling, Muller-Weinfurtner y Huber, 2000). A continuación se presenta una comparación entre el uso de una sola portadora y multiportadora en OFDM:

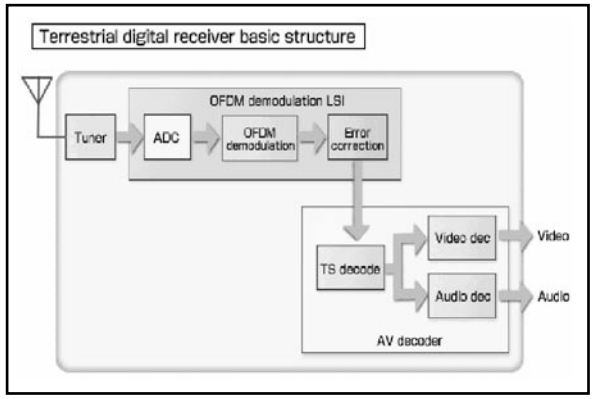
4.2. Difusión de televisión digital

La Difusión de televisión digital, utilizando OFDM es un estándar flexible que se utiliza en países como Australia y presenta características como:

- Codificación variable del error.
- Prefijo cíclico variable.
- Constelación variable.
- Modulación QAM, 16QAM, 64QAM.

Los receptores digitales terrestres se componen de tres bloques: el sintonizador, el demodulador OFDM y el decodificador AV (Audio y Video). La señal OFDM modulada es seleccionada en la sección del sintonizador, pasa por un bloque ADC, por el Demodulador OFDM y luego por el bloque Corrector de Errores, entrando al decodificador de audio y video (AV) en el cual la señal se separa en una señal audio y una señal video, como se observa en la figura 7.

Figura 7. Estructura básica del receptor digital terrestre



OFDM también esta siendo utilizada como técnica de modulación para transmisión de video de alta definición a través de medios guiados, por ejemplo en [8] se observa que el ruido térmico es esparcido en todo el espectro, por lo que la degradación que sufre un símbolo en particular es reducida. Este hecho muestra que OFDM es muy robusta frente al ruido térmico.

4.3. LAN Inalámbricas

Las redes de área local inalámbricas (WLAN`s) son usadas para comunicaciones locales inalámbricas de alta velocidad, las cuales requieren ratas de

transmisión altas sobre canales de radio móviles. OFDM ha recibido recientemente atención considerable en las redes inalámbricas. Por ejemplo, el comité IEEE 802.11 y el instituto de estándares de telecomunicaciones europeas (ETSI) RES-10 comité para HIPERLAN, consideran la modulación multiportadora (MCM) (Prieto y Rodríguez, 2005). La red Inalámbrica demostrada en ATM (WAND) (Aldis, Althoff y Van Nee, 1996, p.196), es uno de los proyectos en HIPERLAN, que aplica la técnica OFDM. Actualmente en WLAN se ha utilizado:

- 64 puntos FFT, usando 52 subportadoras.
- Diferentes modos: codificación del error, prefijo cíclico.
- Realimentación para determinar el modo de transmisión.

Finalmente en (Gonzalez, Rodríguez y Mendoza, 2005) se presenta un sistema OFDM óptico para comunicaciones ante la presencia de múltiples usuarios, que hace uso de las técnicas de detección lineal utilizadas por los sistemas SDMA (acceso múltiple por división de espacio), aplicadas a un esquema OFDM.

Conclusiones

- Como se ha planteado, OFDM evita el uso de bandas de guarda entre canales lo cual aumenta la eficiencia del espectro; pero esta ganancia no es tan benéfica, ya que se exige que haya un tiempo de guarda entre símbolos consecutivos enviados en cada canal, lo cual implica que se deba transmitir a menores velocidades. Esto es aplicable en comunicaciones móviles donde se necesita una buena eficiencia espectral tolerando velocidades relativamente bajas, del orden de los Kbps, como es el caso de la telefonía celular.
- La modulación Multiportadora en un futuro será ideal para comunicaciones sobre canales dispersivos en los cuales la pérdida de inserción del canal y el ruido inyectado son dependientes de la frecuencia.
- Los medios guiados y no guiados presentan dispersión y dependencia de la frecuencia, haciendo que DMT y OFDM sean en la mayoría de los casos, las modulaciones ideales para tales ambientes.

Referencias bibliográficas

[1] Aldis, J. P, Althoff, M. P y Van Nee (Nov. 1996), R, "Physical layer architecture and performance in theWAND user trial system," in Proc. ACTS Mobile Summit'96, Granada, Spain, pp. 196-203.

[2] Breiling, M, Muller-Weinfurtner, S. Huber, H y J. B (Sep. 2000). "Peak-power reduction in ofdm without explicit side information". 5th International OFDM-Workshop 2000, Hamburg, Germany.

[3] Chang, R.W (Dic. 1966), "Synthesis of Band-Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission", Bell Syst. Tech. J., vol.45, pp. 1775-1796.

[4] Cimini, L.J, Jr. (Jul. 1985), "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", IEEE Trans. Commun.,vol. COM-33, pp. 665-675.

[5] Dušan Matiae (Oct. 1998). OFDM as a possible modulation technique for multimedia applications in the range of mm waves. Introduction to OFDM, II edition TUD-TVS

[6] Falsafi, A, Pahlavan, K y Yang, G (Abr. 1996), "Transmission technique for radio LAN's—a comparative performance evaluation using ray tracing," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 14, pp. 477-491.

[7] González, O, Rodríguez, S y Mendoza, B (2005). "OFDM Sobre Canales Ópticos No Guiados En Entornos Con Múltiples Usuarios" Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas.

[8] Krongold, B. S y Jones, D. L (Sep, 2003), "Par reduction in ofdm via active constellation extension". IEEE Transactions on broadcasting, pages 258–268.

[9] Prieto, M. A y Rodríguez, R. M (Jul, 2005), "Transmisión de Video Digital a través de Cable Coaxial empleando OFDM". Revista IEEE América Latina Volume: 3

[10] Salzberg, B.R (Dic. 1967), "Performance of an efficient parallel data transmission system", IEEE Trans.Commun. Technol., vol. COM-15, pp. 805-813.

[11] Weinstein, S.B y Ebert, P.M (Oct. 1971), "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform", IEEE Trans. Commun. Technol., vol. COM-19, pp. 628-634.

[12] A. L. Toledo and X. Wang, (Mar. 2006). "TCP Performance over Wireless MIMO Channels with ARQ and Packet Combining," IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 5.

[13] A. L. Toledo and X. Wang, (Apr. 2006). "A Cross-Layer TCP ModellingFramework for MIMO Wireless Systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 5.

[14] M. Ghaderi, A. Sridharan, H. Zang, D. Towsley, and R. Cruz, (Sep. 2006). "TCPaware resource allocation in CDMA networks," in Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking, , pp. 215-226.

[15] Y. Zhang, M. Uchida, M. Tsuru, and Y. Oie, (Feb. 2007). "Can scheduling with error rate consideration support TCP performance comparable to packet combining HARQ in evolved UTRA and UTRAN networks?" in Proceedings of the Fourth European Conference on Universal Multiservice Networks.

[16] Z. Kang, K. Yao, and F. Lorenzelli, (Oct. 2003). "Nakagami-m fading modeling in the frequency domain for ofdm system analysis," IEEE Commun. Lett., vol. 7, pp. 484-486.

[17] M. S. Alouini and A. J. Goldsmith,(May 2000). "Adaptive modulation over nakagami fading channels," Kluwer J. Wireless Commun., vol. 13, 119-143.

[18] L. Tassiulas and A. Ephremides,(Dec. 1992). "Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 37, pp. 1936-1948.

[19] lpsolve. [Online]. Available: http://sourceforge.net/projects/lpsolve

[20] Omnet++. [Online]. Available: http://www.omnetpp.org/

[21] Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems,

IEEE Std. 802.16e, 2005. [Online]. Available:

http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16e-2005.pdf

[22] M. Matsumoto and T. Nishimura, "Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator." ACM Trans. Model. Comput. Simul.

Bibliografía e infografía de interés

Armstrong.J.(2001).New OFDM Peak-to-Average Power reduction Scheme. La Trobe University. Australia.

García. A, Caamaño. F, Cano.A, Morgado.E, Ramos.J.(Sept. 2005). Patrones Eficientes de Pilotos en sistemas OFDM para canales inalámbricos selectivos en tiempo y frecuencia. Universidad Rey Juan Carlos.

Goth,G. (August 2004). Wireless MAN Standard Signals Next-Gen Opportunities.

IEEE DISTRIBUTED SYSTEMS ONLINE 1541-4922 Published by the IEEE Computer 477Society; Vol. 5, No. 8

Lawrey, Eric. (Oct. 1997). The suitability of OFDM as a modulation technique for wireless telecommunications, with a CDMA comparison. Thesis in James Cook University.

Prashanth. L, A. K. Gopinath. (August 2007). OFDM-MAC algorithms and their impact on TCP performance in next generation mobile networks. Computer Science and Automation

Indian Institute of Science, India.

Raos, Cacho, A. del; Pérez-Álvarez, I.; Zazo, S.; Mendieta-Otero, E.; Santana-Sosa, H.; Páez Borrallo,J.M.(2003). Advanced OFDM-CDMA HF modem with self-interference cancellation MILCOM . IEEE Military Communications Conference,

Rey, F.; Lamarca, M.; Vázquez, G. (2005). Robust power allocation algorithms for MIMO OFDM systems with imperfect CSI. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 53, núm.3, p. 1070-1085.

WANG et al. (2008). Exact Distribution of the Amplitude of Adaptively Selected OFDM Signal Samples. IEICE Trans Commun.; E91-B: 355-358

http://www.mobilecomms-technology.com/projects/t-mobile/

http://www.wni.com.mx/documentos/DS_MM_Family.pdf

http://searchmobilecomputing.techtarget.com/news/article/0,289142,sid40_gci939433,00.html

http://whitepapers.silicon.com/0,39024759,60100667p,00.htm:

http://archive.csa.iisc.ernet.in/TR/2007/9/

http://www.ee.iitb.ac.in/uma/~ncc2002/proc/NCC-2002/pdf/n042.pdf

http://www.eurecom.fr/~debbah/papier/ofdmtutorial.pdf

http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2001/ofdmabsh/OFDM_Final_Report.pdf

http://www.skydsp.com/publications/4thyrthesis/code.html http://www.es.lth.se/home/peter/IntelectCD03/IntelectCD03.html