

ANEXO A Fundamentos MIMO

El principio básico de esta técnica está en emplear las multitrayectorias que se producen en un canal de radio típico, para aumentar su capacidad [1]. En esta técnica, se transmiten distintas señales por cada antena del transmisor, lo que constituye una multiplexación espacial. En el receptor, cada antena recibe una combinación lineal de las señales transmitidas, debido a que las señales toman caminos diferentes. Lo que se obtiene en cada una de las entradas del receptor, son las combinaciones lineales de las señales transmitidas. Si se puede conocer la forma en que se combinan estas señales, es decir como se comporta el canal de radio, entonces teóricamente es posible, mediante un procesamiento adecuado, separar el contenido de las señales recibidas en sus componentes originales, tal como fueron transmitidas por cada antena del transmisor. Desde el punto de vista matemático, el sistema de señales con multiplexación espacial, recibida por el receptor puede describirse como se muestra en la ecuación matricial 1.

$$Y = HX + N \quad (1)$$

El primer término de la ecuación corresponde a las señales útiles que llegan al receptor; las que contienen la información. El segundo término corresponde a una componente de ruido y/o multitrayectorias no útiles que se agregan a la entrada del receptor. Si se toma como ejemplo un sistema MIMO de dos canales, tal como se muestra en la figura 1, se obtiene, a la entrada del receptor el sistema de ecuaciones 2 y 3.

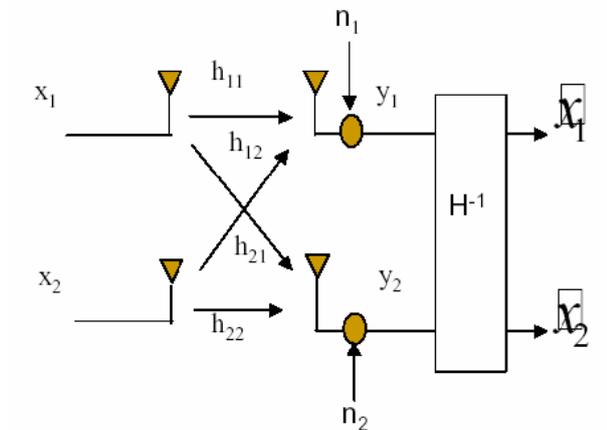


Figura 1. Sistema MIMO de dos antenas.

$$y_1 = h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + n_1 \quad (2)$$

$$y_2 = h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + n_2 \quad (3)$$

Donde 2 y 3 corresponden a las señales en las dos antenas receptoras en la entrada del receptor, las cuales poseen a su vez tres componentes fundamentales: la primera corresponde al término de la señal útil del propio espacio de multiplexación i , afectada por la función de transferencia h_{ii} , el segundo término corresponde al término de señal útil correspondiente al espacio de multiplexación vecino j , afectada por la función de transferencia h_{ij} y un tercer término que corresponde a una componente de ruido y/o

multitrayectorias no útiles del propio canal i . Las multitrayectorias son las señales reflejadas en diversos objetos en el canal de radio y que llegan al receptor con diversas amplitudes y retardos en el tiempo con respecto a la señal que se recibe de forma directa o sea mediante la llamada línea de vista (LOS). Generalmente ese fenómeno ha sido considerado muy perjudicial en las señales de radio, ya que actúan como señales interferentes que reducen la habilidad del receptor para recuperar la información útil al incrementarse notablemente la interferencia intersímbolo y cocanal.

La tecnología MIMO por el contrario puede proporcionar muchos beneficios, todos ellos derivados de su habilidad de procesar las señales recibidas por múltiples trayectorias en el canal de radio y separar en el receptor las señales multiplexadas en el espacio por el arreglo de antenas del transmisor. A su vez esta tecnología proporciona ganancia de diversidad, lo que contribuye a la recuperación de la información contenida en las señales recibidas al mejorar el nivel de SNR y la BER. La tecnología MIMO al crear una división espacial multiplexada en varios flujos de datos independiente permite incrementar la transferencia de información dentro de un mismo canal de radio sin necesidad de aumentar su ancho de banda. Esta tecnología puede incrementar notablemente el flujo de información útil transmitida por el sistema. Obsérvese la figura 2.

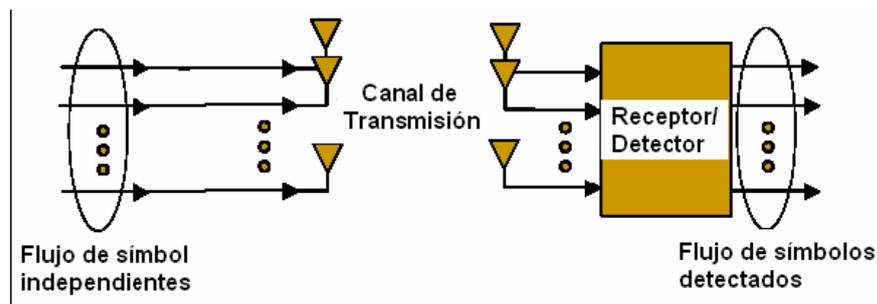


Figura 2. Multiplexado por división espacial

Se requieren de arreglos de antenas simétricos en el transmisor y en el receptor para mejorar la transferencia de datos, ya que si en una cabeza se cuenta por ejemplo con un arreglo de cuatro antenas y en el otro con tres, el mejoramiento total en la velocidad de transmisión es de 3 flujos, la antena extra no agrega un flujo de transferencia adicional (Aunque si puede usarse para mejorar la calidad de la señal).

La tecnología MIMO puede incrementar notablemente el rendimiento del sistema al incrementar la cantidad del flujo de datos espaciales resueltos. Esta tecnología al precisar de una cadena de radiofrecuencia (RF) individual y un convertidor análogo digital (ADC) para cada antena, aumenta la complejidad del sistema, lo que se traduce como es lógico en mayores gastos de implementación.

Correlación espacial de sistemas MIMO

La gran capacidad de transmisión de información ofrecida por los sistemas MIMO solo es posible si no existe correlación espacial alguna entre las antenas de los espacios paralelos. Sin embargo debido principalmente al tamaño reducido del arreglo de antenas especialmente en los móviles, siempre existirá algún grado de correlación, lo que disminuye la obtención de capacidades cercanas a la ideal. El diseño de sistemas con baja correlación, requiere un análisis completo de los parámetros que posibilitan un reforzamiento de las características de correlación de los canales.

Matemáticamente el coeficiente de correlación espacial de dos antenas se puede expresar como:

$$\rho_e = \frac{\left[\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} E_1^*(\theta, \phi) E_2(\theta, \phi) P(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \right]^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} E_1^*(\theta, \phi) E_1(\theta, \phi) P(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} E_2^*(\theta, \phi) E_2(\theta, \phi) P(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (4)$$

Donde $E_i(\theta, \phi)$ es el patrón del campo eléctrico de la antena i cuando las demás antenas están adaptadas, $P(\theta, \phi)$ es la distribución de AoA (Angle of Arrival). Este parámetro AoA está fuertemente relacionado con la correlación espacial y constituye en realidad la estadística de cómo las ondas electromagnéticas alcanzan las diferentes direcciones de llegada respecto a las antenas, de aquí que en función de las diferentes distribuciones AoA se obtendrán diferentes valores de correlación. Para modelar la distribución de las ondas entrantes en las antenas receptoras se usan varios modelos en la literatura, la elección de una distribución AoA determinada depende del medio. Entre los modelos más populares están la distribución uniforme, la Gaussiana truncada y la Laplaciana truncada. Estos modelos se usan sobre todo para elementos de antenas separados horizontalmente y con ellos se obtiene la baja correlación deseada. Las mismas distribuciones para antenas separadas verticalmente resultarán en una alta correlación entre los canales.

La influencia en la correlación del acoplamiento mutuo y la distancia entre las antenas están incorporadas en la ecuación anterior a través de los patrones de radiación de las antenas.

Capacidad del canal MIMO

La capacidad del canal está definida como la cantidad de datos que pueden ser transmitidos en un enlace fiable. Para un sistema de transmisión con una antena transmisora y una receptora, la capacidad del canal está dada por la ley de Shannon, ecuación 5:

$$C = B * \log_2(1 + SNR) \quad (5)$$

Cuando esta ecuación se aplica a sistemas MIMO con N antenas transmisoras y M receptoras, tal como se muestra en la figura 3, donde la capacidad del canal resultante es la suma de las capacidades de los canales paralelos independientes, según se muestra en las ecuaciones 6 y 7.

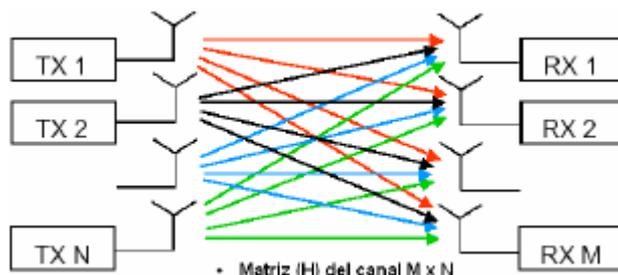


Figura 3. Sistema MIMO con N antenas transmisoras y M receptoras

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_M + \frac{\rho}{N} HH^H \right) \right] \text{bps/Hz} \quad (6)$$

$$= \sum_{i=1}^m \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i \right) \text{bps/Hz} \quad (7)$$

Donde H es la matriz del canal M x N, IM es la matriz de identidad M x M, ρ es la relación señal a ruido SNR de cualquiera de las antenas receptoras. Los parámetros desde λ1, λ2, hasta λm son los distintos valores del parámetro H (M ≤ N) y H H denota la matriz transpuesta conjugada. Como puede verse la capacidad del canal MIMO será la suma de la capacidad clásica de Shannon, ecuación 5, de todos los canales paralelos SISO (Single Input, Single Output) modificadas por las ganancias individuales, dando como resultado la ecuación 7.

ANEXO B

Tabla de solicitantes para el uso del espectro radioeléctrico en la banda de 3.5 GHz para servicio departamental en Colombia [2]

Área de servicio	Puesto	Solicitante	Número de Solicitudes
Amazonas	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	1
	2º	---	
Antioquia	1º	AVANTEL S.A.	9
	2º	Cablecentro S.A.	
Arauca	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	1
	2º	---	
Atlántico	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	11
	2º	Servisatelite S.A.	
Bolívar	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	8
	2º	Cablecentro S.A.	
Boyacá	1º	Cablecentro S.A.	4
	2º	Cable Unión de Occidente S.A.	
Caldas	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	7
	2º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	
Caquetá	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	1
	2º	---	
Casanare	1º	AVANTEL S.A.	3
	2º	Empresa de Telecomunicaciones de la Orinoquía S.A. E.S.P. TELEORINOQUIA	
Cauca	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	5
	2º	EMCALI E.I.C.E. E.S.P.	
Cesar	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	5
	2º	Comunicaciones Satelitales de Colombia S.A.	
Chocó	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	1
	2º	---	
Córdoba	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	7
	2º	Comunicaciones Satelitales de Colombia S.A.	
Cundinamarca	1º	AVANTEL S.A.	8

	2º	Cable Unión de Occidente S.A.	
Guanía	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	1
	2º	---	
La Guajira	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	4
	2º	Comunicaciones Satelitales de Colombia S.A.	
Guaviare	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	1
	2º	---	
Huila	1º	AVANTEL S.A.	5
	2º	Cable Unión de Occidente S.A.	
Magdalena	1º	AVANTEL S.A.	8
	2º	Cable Unión de Occidente S.A.	
Meta	1º	AVANTEL S.A.	6
	2º	Cable Unión de Occidente S.A.	
Nariño	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	2
	2º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	
Norte de Santander	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	7
	2º	SE Wireless Colombia S.A.	
Putumayo	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	1
	2º	---	
Quindío	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	7
	2º	Comunicaciones Satelitales de Colombia S.A.	
Risaralda	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	7
	2º	Cablecentro S.A.	
San Andrés	1º	Comunicaciones Satelitales de Colombia S.A.	5
	2º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	
Santander	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	9
	2º	Comunicaciones Satelitales de Colombia S.A.	
Sucre	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	6
	2º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	
Tolima	1º	AVANTEL S.A.	7

	2º	Cablecentro S.A.	
Valle	1º	Cable Unión de Occidente S.A.	11
	2º	EMCALI E.I.C.E. E.S.P.	
Vaupés	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	1
	2º	---	
Vichada	1º	Comunicación Celular S.A. COMCEL S.A.	2
	2º	---	

ANEXO C Equipos WiMAX

Beneficios técnicos de *WayMAX@vantage* [3]:

Cobertura de las celdas: *WayMAX@vantage* soporta transmisiones subcanalizadas con el fin de balancear el sistema de ganancias en los enlaces de subida y bajada debido a las diferentes potencias de salida tanto en la estación base como en los suscriptores, para, de esta manera, dar un incremento en la capacidad de los enlaces de subida para las estaciones suscriptoras ubicadas en el límite de la cobertura de la celda. También cuenta con técnicas avanzadas de diversidad integradas en su unidad de radio frecuencia la cual combina eficientemente las señales recibidas desde diferentes antenas aumentando aún más la capacidad para los enlaces de subida.

Velocidades de datos muy altas todo el tiempo: *WayMAX@vantage* soporta modulaciones BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM, proporciona modulación adaptativa por localización y sistema de codificación. Asegura el enlace más fuerte con la velocidad de datos más alta luego de la selección óptima del mejor modo físico en el enlace de bajada. Mientras que en el enlace de subida, asigna óptimamente la modulación, sistemas de codificación, potencia de transmisión y subcanales a las estaciones suscriptoras.

Fácil integración dentro de las redes existentes: *WayMAX@vantage* ha sido desarrollada para ser parte integral de una red basada en IP. Permite al proveedor implementar servicios como por ejemplo: VLANs, VPNs, FTP, video y audio *streaming*, VoIP y otras aplicaciones basadas en IP.

Calidad de Servicio garantizada: Los parámetros QoS como Velocidad de Datos Máxima (PDR – Peak Data Rate), Velocidad de Datos Garantizada (GDR – Guaranteed Data Rate) y prioridad de los usuarios dependiendo del servicio, pueden ser configurados en los servicios o en las características de los suscriptores y por separado en los enlaces de subida y de bajada.

Soporte Multiservicio: El avanzado y altamente eficiente mecanismo de programación y algoritmos visitas en cola de *WayMAX@vantage*, hace cumplir los parámetros de QoS asignados a los flujos de servicio, dando tráfico a cada cola con diferente retraso y buffer preferencial.

Grado de Servicio: *WayMAX@vantage* proporciona un adecuado Grado de Servicio al asignar a cada perfil de usuario un diferente nivel de “Prioridad de Usuario”. Pueden ser asignados hasta cuatro niveles de Prioridad de Usuario. Al servicio de más alta prioridad de le da un retardo más bajo y un buffer preferencial más alto.

Servicios Seguros: *WayMAX@vantage* cuenta con una sub-capa de privacidad que realiza la autenticación, el intercambio de contraseñas y el cifrado de los paquetes de acuerdo al estándar IEEE802.16. Método de Acceso Universal (UAM), Protocolo Punto a Punto (PPP), Protocolo de Autenticación Extensible (EAP) y Administración de Contraseñas Personales (PKM) compatibles con IEEE también son soportados.

Cabe anotar que la Estación Base *WayMAX@vantage* que cuenta con una interfaz aérea basada en el estándar IEEE 802.16d OFDM, permite la actualización constante y parcial de sus utilidades o *firmware*, por tanto lo tanto, al ser un dispositivo escalable, permite un cambio tan contundente como la implementación y soporte del estándar

IEEE 802.16e-2005 donde se introduce el soporte para movilidad. De esta manera, para que una empresa que preste servicios de banda ancha a través de WiMAX en su versión fija, que tenga implementada *WayMAX@vantage* en su solución, debe necesariamente, adquirir la actualización para dar soporte a 802.16e-2005 OFDMA, desarrollar nuevas estrategias y procedimientos para el soporte de dicho estándar.

Características principales de *WayMAX@vantage* :

- Interfaz aérea: IEEE 802.16-2004 OFDM 256FFT, actualizable al estándar IEEE 802.16e OFDMA.
- Calidad de Servicio: *Best Effort*, selección en *Non-Real-Time/Real Time*, asignación continua.
Velocidad de datos máxima, velocidad de datos garantizada y prioridad de los usuarios son configurables para cada servicio separadamente en *Uplink* y *Downlink*.
- Radio Frecuencia: trabaja en las bandas de 3.5 GHz y 2.5 GHz. Soporta los dos tipos de duplexación, tanto FDD como TDD. Modulación en subportadora adaptable entre BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM.
Tamaño del canal en RF es de 14 MHz configurable vía software.
Potencia de salida al conector de la antena *WayMAX@vantage* máxima de 35 dBm.
Sensitividad en el receptor -85/92 dBm trabajando en la banda de 3.5 MHz
- Interfaz de red óptica y eléctrica.

Características de los dispositivos Gigaset SE461 y Gigaset SE471:

Estas unidades son la solución WiMAX de Siemens, que ofrece a los usuarios domésticos el acceso a Internet de última milla a un precio razonable.

Estos dispositivos utilizan la tecnología OFDM sin línea de vista compatible con el estándar 802.16 ideal para usuarios residenciales. Permiten una conexión rápida a banda ancha, telefonía a través de IP, *streaming* de voz y video.

Características:

- Funcionan en banda de frecuencia que va desde los 3.4 GHz hasta los 3.6 GHz
- Acceso inalámbrico a Internet de máximo 15 Mbps
- Compatible con todos los sistemas operativos comunes
- Soporta protocolos tales como: TCP/IP, SMTP y HTTP, entre otros
- Fácil instalación y orientación de la antena
- Servidor DHCP y funciones de selección de rutas

Gigaset SE461:

- Dimensiones: aproximadamente 178x162x53 mm
- Temperatura de funcionamiento: +5 °C a +40°C
- Interfaz de red eléctrica: una conexión LAN Ethernet 10/100BaseT
- Frecuencia de operación: 3.4 - 3.6 GHz
- Potencia de salida: 27 dBm
- Consumo eléctrico en estado activo: 25 W
- Ancho de banda: opcional entre 1.75/3.5/7.0 MHz
- Tipo de transferencia: HFDD y TDD
- Antenas: en interiores con ganancia de 7 dBi y en exteriores con antena compatible siemens18 de dBi.
- Polarización de antena: vertical

Gigaset SE471:

- Dimensiones: aproximadamente 239x124x35.5 mm
- Temperatura de funcionamiento: +5 °C a +40°C
- Interfaz de red eléctrica: una conexión LAN Ethernet 10/100BaseT
- Frecuencia de operación: 3.4 - 3.6 GHz
- Potencia de salida: 24 dBm
- Consumo eléctrico en estado activo: 10 W
- Ancho de banda: opcional entre 1.75/3.5/7.0 MHz
- Tipo de transferencia: HFDD y TDD
- Antenas: en interiores con ganancia de 7 dBi y en exteriores con antena compatible siemens18 de dBi.
- Polarización de antena: vertical

Antena MIMO WiMAX:

Para el diseño de la red en Neiva, se requiere una antena que opere dentro de la banda de 3.5 GHz, que tenga una proyección de 90° y que tenga parámetros favorables en comparación con otras antenas de otros fabricantes.

La antena seleccionada fue la “3.3 to 3.8 GHz 65° & 90° Beamwidth Sector Antenna” del fabricante PCTEL y posee las siguientes características técnicas:

- Polarización: inclinación dual lineal +/- 45°
- Impedancia nominal: 50ohms
- VSWR: <1.5
- Relación adelante atrás: >25dB
- Aislamiento puerto a puerto: 30dB
- Parte superior del lóbulo de supresión: 30 grados por encima del horizonte
- Material radomo: Plástico resistente Gray UV
- Conector: Hembra tipo N

Especificaciones eléctricas:

- Modelo: SP3338-17xp65
- Rango de frecuencias: 3500-3800 MHz

- Ganancia Nominal: 17.0 dBi
- Azimuth: 65° +/- 5°
- Elevación: 7°

Especificaciones mecánicas:

- Modelo: SP3338-17xp65
- Rango de temperatura: -40°C a 65°C en almacenamiento y operación
- Dimensiones: 711x171x90 mm
- Peso: 3.1 kg
- Resistencia al viento 200 km/h

ANEXO D

Modelo de propagación COST 231 - Walfisch-Ikegami [4]

Introducción

Es un modelo para sistemas celulares PCS (Personal Communications Service) de corto alcance, que corresponde al rango de frecuencias entre 800 MHz y 2000 MHz. Resulta muy útil en ambientes urbanos densos.

El modelo de propagación COST 231 Walfisch Ikegami surge de la combinación del modelo de Walfisch Bertoni, del modelo de Ikegami y de las contribuciones de los miembros del COST 231 Subgroup on Propagation Models. Considera la difracción descendente hasta el nivel de las calles y algunos factores empíricos de corrección para incorporar acuerdos, con referencia a mediciones. Consiste en la suma de las pérdidas por espacio libre, junto con las pérdidas del modelo de Ikegami y de un modelo extendido de Walfisch-Bertoni.

Parámetros

Los parámetros adicionales del ambiente urbano que incorpora el modelo son:

Altura de los edificios (H_{roof}).

Ancho de las vías (W).

Separación entre los edificios (b).

Sentido de las vías respecto a la dirección de propagación de la señal (desde la estación base al teléfono celular).

Los anteriores parámetros se pueden evidenciar en la figura 4.

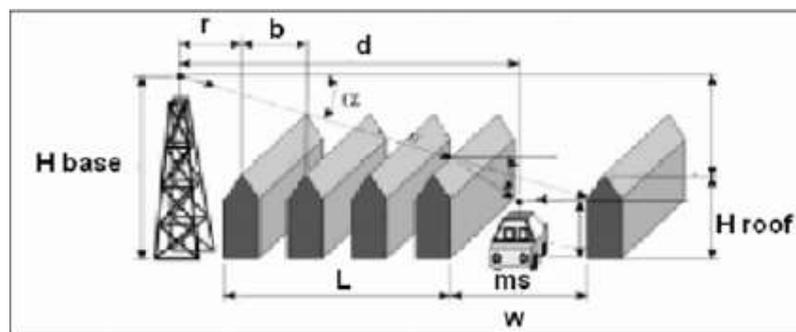


Figura 4. Parámetros adicionales para el modelo de propagación

Además, el modelo asume lo siguiente:

Altura de la antena transmisora (H_{base}). Entre 4 y 50 metros.

Altura de la antena receptora. Entre 1 y 3 metros.

Frecuencia de la portadora. Entre 800 MHz y 2000 MHz (como ya se había indicado anteriormente).

Distancia horizontal entre la antena transmisora y la antena receptora. Entre 0.02 km y 5 km.

Pérdidas cuando existe LOS

El modelo establece una sencilla fórmula para las pérdidas por propagación cuando existe línea de vista (Line of Sight - LOS, por sus siglas en inglés) entre transmisor y receptor.

$$L_b(dB) = 42.6 + 26 \log d + 20 \log f \quad (8)$$

d = Distancia horizontal entre transmisor y receptor. El modelo asume que esta distancia es mayor o igual a 20 metros, y que está expresada en kilómetros.
 f = Frecuencia de la portadora expresada en MHz.

Obsérvese como ecuación es distinta a la empleada en el modelo de Friss.

Pérdidas cuando no existe LOS

Cuando no existe línea de vista (NLOS, por sus siglas en inglés) entre transmisor y receptor, el total de pérdidas está dado por:

$$L_b = L_0 + \begin{cases} L_{rts} + L_{msd} & \text{si } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ 0 & \text{si } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

L_0 = Pérdidas por espacio libre. También se conoce esta variable como L_{free} . Estas pérdidas están expresadas como:

$$L_0(dB) = 32.4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (10)$$

Siendo d la distancia entre transmisor y receptor (expresada en kilómetros), y f la frecuencia de la portadora (dada en MHz).

L_{rts} = Pérdidas debidas a una única difracción final hacia el nivel de la calle, ocasionada por el techo del último edificio y un proceso de dispersión ocurrido a esta altura. Este término se basa en el modelo de Ikegami, teniendo en cuenta el ancho y la orientación de las vías. Sin embargo, el COST 231 empleó una función diferente a la de Ikegami, para la orientación de las vías, tal como se mostrará a continuación. R_{ts} significa Roof to Street, aunque se le hace mención como Roof Top to Street. Estas pérdidas se describen mediante la siguiente ecuación.

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log W + 20 \log(H_{roof} - H_{móvil}) + 10 \log f + L_{ori} \quad (11)$$

Siendo W la distancia entre las caras de los edificios que están a los lados de la calle donde se encuentra el receptor; normalmente W $b/2$, siendo b la separación entre los edificios. La frecuencia de la portadora f está expresada en MHz. H_{mobile} corresponde a la altura del receptor. El término L_{ori} considera la orientación de las calles a un ángulo, tal como se muestra a continuación:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\phi & 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35) & \text{si } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\phi - 55) & 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (12)$$

En la figura 5 se muestra en detalle en qué consiste este ángulo.

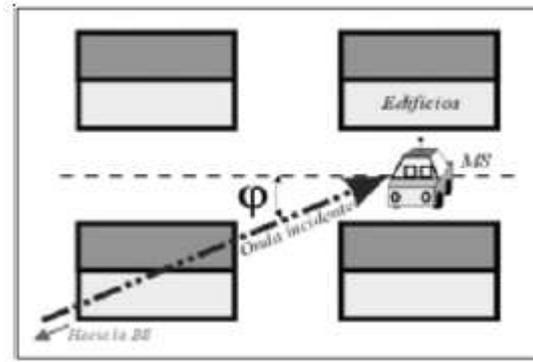


Figura 5. Parámetro de orientación

L_{msd} = Pérdidas por difracción de múltiples esquinas de los techos de los edificios. Estos techos son modelados como superficies absorbentes de la misma altura de los edificios. Este término se basa en las pérdidas del modelo de Walfisch Bertoni, aunque incluye algunas mejoras y correcciones realizadas por el COST empleando una función empírica (basada en mediciones) y que considera los casos en que el transmisor se encuentra por debajo de los techos de los edificios]. L_{msd} significa Multiple Screen Diffraction. Este término se formula como en 13:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (13)$$

En la fórmula 13, d se expresa en kilómetros, f en MHz y b en metros. Por otro lado, L_{bsh} corresponde a:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + (H_{base} - H_{roof})) & \text{si } H_{base} > H_{roof} \\ 0 & \text{si } H_{base} \leq H_{roof} \end{cases} \quad (14)$$

El primer caso se aplica cuando la antena base (transmisor) se encuentra a una altura superior a la de los edificios.

Continuando con la ecuación (13), se tiene el término k_a , el cual representa el incremento de las pérdidas debido a una altura menor del transmisor, en referencia a los edificios adyacentes. Equivale a:

$$k_a = \begin{cases} 54 & H_{base} > H_{roof} \\ 54 - 0.8(H_{base} - H_{roof}) & \text{si } H_{base} \leq H_{roof} \text{ y } d \geq 0.5 \text{ km} \\ 54 - 0.8(H_{base} - H_{roof}) \frac{d}{0.5} & H_{base} \leq H_{roof} \text{ y } d < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (15)$$

Para los términos k_d y k_f , se tienen las siguientes expresiones:

$$k_d = \begin{cases} 18 \\ 18 - 15 \left(\frac{h_{base} - h_{roof}}{h_{roof}} \right) \text{ si } \begin{cases} H_{base} > H_{roof} \\ H_{base} \leq H_{roof} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \end{cases} \quad (17)$$

$$\quad (18)$$

Los términos k_d y k_f representan términos de corrección relativos a las pérdidas por difracción por múltiples esquinas en los techos de los edificios contra la distancia y la frecuencia, respectivamente.

En el caso del término k_f , la ecuación 17 aplica para ciudades medianas y entornos suburbanos con densidad mediana de árboles. Mientras que la ecuación 18 aplica para centros urbanos o metropolitanos.

Si no se conocen las características de los edificios y las calles, pueden utilizarse las siguientes aproximaciones.

$$\text{Para techos planos: } H_{roof} = (3\text{metros}) * n_{floors} \quad (19)$$

$$\text{Para techos puntiagudos: } H_{roof} = (3\text{metros}) * n_{floors} + (3\text{metros}) \quad (20)$$

$$b = 20...50\text{metros}$$

$$w = \frac{b}{2}$$

$$\phi = 90^\circ$$

Una mejora que se puede realizar al modelo, para que se tome en cuenta las pérdidas por múltiples edificios difractores, es reemplazar L_{msd} por $L_n(t)$, del modelo de múltiples esquinas uniformes propuesto por S.R. Saunders. Esto permitiría también que el modelo tenga mayor validez cuando $H_{base} < H_{roof}$.

Téngase en cuenta que en radio bases con antenas muy bajas, otros mecanismos de propagación estarían presentes, así como la difracción alrededor de los bordes verticales de los edificios y las múltiples reflexiones provenientes de las paredes de los mismos, siendo significativas a la hora de predecir las pérdidas totales.

El modelo aplicado en el desarrollo del algoritmo para entornos semi-urbanos utilizó todas las ecuaciones antes mencionadas para la estimación de pérdidas, considerándose además la modificación propuesta en L_{rts} para las pérdidas debidas a la difracción final, proveniente del techo del último edificio, y la reflexión de la pared del edificio siguiente, resumida en L_{rts} . De esta forma la constante en la ecuación de L_{rts} pasaría de ser -16.9 a ser -8.2. Con lo anterior, se obtiene:

$$L_{rts} = -8.2 - 10\log W + 20\log(H_{roof} - H_{móvil}) + 10\log f + L_{ori} \quad (21)$$

ANEXO E

Cálculo del símbolo, velocidad del canal y del enlace

La cantidad de datos que pueden ser transportados dependen intrínsecamente del ancho de banda del canal. De las 256 subportadoras tan solo 200 son usadas para el transporte de información, de las cuales 192 son intrínsecamente datos y 8 son pilotos. De las 56 restantes 28 son subportadoras de guarda inferiores, 27 son subportadoras de guarda superiores y una es de referencia. En algunos despliegues, es posible reducir la cantidad de subportadoras de guarda con el fin de darle más recursos al sistema.

Los factores de tiempo de guarda entre subportadoras para WiMAX fijo pueden ser cuatro: 1/4, 1/8, 1/16, ó 1/32; usualmente en Colombia, se usa 1/8.

Para determinar la frecuencia de subcanal WiMAX fijo se usa la fórmula:

$$\text{Espaciado[MHz]} = \frac{\text{Frecuencia de operación}}{\text{Número de subportadoras}} * \text{sobremuestreo} \quad (22)$$

Dividiendo a la ecuación 22 entre el espaciado se obtiene el símbolo en microsegundos.

$$\text{Tiempo del símbolo [uS]} = 1/\text{Espaciado} \quad (23)$$

De esta forma se obtiene el tiempo del símbolo. Al multiplicar este dato por el valor factor del tiempo de guarda nos da el tiempo de guarda:

$$\text{Tiempo de guarda [uS]} = \text{Tiempo de símbolo} * \text{factor de tiempo de guarda.} \quad (24)$$

Al sumar el tiempo de símbolo con el tiempo de guarda nos da el tiempo total del símbolo OFDM que usa el sistema.

$$\text{Tiempo de símbolo OFDM [uS]} = \text{Tiempo de Símbolo} + \text{Tiempo de guarda.} \quad (25)$$

La determinación de la velocidad de datos neta en la red fija, es decir, la máxima alcanzable por el sistema, depende de la modulación, codificación y ancho de banda. Para WiMAX fijo, la modulación es adaptativa, los parámetros de modulación en equipos desplegados son QPSK, 16 QAM y 64 QAM para el canal DL y QPSK y 16 QAM para el canal UL. Analizando los factores dependientes se tiene que:

Con respecto a la modulación: Los bits por subportadora son:

$$B = \log_2(M) \quad (26)$$

Donde B son los bits por la modulación de la subportadora y M es el nivel de modulación.

Para calcular la cantidad de bits de información del símbolo OFDM se usa:

$$\text{Bits de información} = \text{Número de Subportadoras de información} * B. \quad (27)$$

Siendo B, los bits en cada subportadora.

Con respecto a la codificación:

FEC usa códigos convolucionales y RS para la corrección de errores. Los factores propios son: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6.

Con respecto al ancho de banda:

Volviendo a la ecuación 22, la fórmula es directamente dependiente del ancho de banda, si se aumenta, se reduce el tiempo de símbolo y por ende transportará más símbolos en un segundo y viceversa.

La unión de los anteriores parámetros brinda el valor neto de velocidad y la velocidad de datos del canal.

$$\text{Valor neto de velocidad} = (\text{Símbolos OFDM por seg}) * (\text{Bits en cada símbolo}) \quad (28)$$

$$\text{Velocidad de datos del canal} = \text{Valor neto de velocidad} * \text{Factor FEC}. \quad (29)$$

El valor de velocidad de datos del canal es un valor teórico y requiere pequeños ajustes, tales como el consumo de los sobreencabezamiento, pero brinda una aproximación más o menos exacta del posible rendimiento del canal.

Por especificaciones, los símbolos OFDM PHY de WiMAX son transportados en tramas TDMA, estas tramas pueden ser de 2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5 o 20 ms. Entre más pequeña la trama menor es la latencia para aplicaciones de alto desempeño. Típicamente el valor más común de implementación es 5. Es necesario determinar la relación DL a UL de los enlaces, estos pueden ser 1:1, 3:1, etc. De esta forma se distribuye la velocidad de datos del canal de acuerdo a esta relación. La distancia juega un papel primordial en el desempeño del enlace debido a que la modulación es adaptativa; la escogencia de la modulación depende proporcionalmente de la relación señal a ruido existente.

Cálculo del enlace. Las pérdidas del trayecto son dadas por:

$$\text{Pérdidas de espacio libre ó FSL: } \frac{C}{(4\pi DF)^2} \quad (30)$$

Donde F es la frecuencia de operación, C la velocidad de la luz y D la distancia.

En términos generales esto puede ser representado por:

$$\text{FSL} = 92.45 + 20 \log f + 20 \log D \quad (31)$$

Donde F es la frecuencia en GHz y D la distancia en Kilómetros.

La potencia de recepción puede ser obtenida de:

$$\text{Pr} = (\text{Pt} * \text{Gt} * \text{Gr}) * \text{FSL} \quad (32)$$

Donde P_r es la frecuencia recibida, P_t la frecuencia transmitida, G_t la ganancia de la antena que transmite y G_r es la ganancia en la antena en el receptor. En dB la fórmula sería:

$$P_r(\text{dBm})=P_t(\text{dBm})+10\log G_t+10\log G_r-FSL(\text{dB}) \quad (33)$$

Se concluye por consiguiente que WiMAX es altamente dependiente de la distancia y de la frecuencia, entre más alta sea la frecuencia o más grande la distancia, menor será la potencia en el receptor.

ANEXO F

Antenas inteligentes y SDMA

Un arreglo de antenas es un conjunto de elementos de antena que se encuentran distribuidos en lugares determinados con respecto a un único punto de referencia fijo [5]. El patrón de radiación del arreglo es una sumatoria de patrones individuales, su orientación y sus posiciones relativas, y finalmente los cambios que se les haga a la amplitud y a la fase de la onda incidente. Si cada uno de los elementos del arreglo es una fuente puntual isotrópica, entonces el patrón de radiación del arreglo dependerá únicamente de la geometría del arreglo y de los cambios de amplitud y fase de la onda incidente y en ese caso el patrón de radiación es conocido como factor del arreglo. Cuando el factor del arreglo es adaptable, independientemente de la geometría del mismo, el arreglo es conocido como un arreglo de antenas adaptativas. Las antenas adaptativas para WiMAX pueden incrementar significativamente la capacidad del sistema, mejorando su funcionamiento. Estos dispositivos están hechos de una estructura de arreglo de antenas y una plataforma de procesamiento digital de señales, el cual está encargado de la identificación de los usuarios quienes pueden reusar el mismo recurso. A fin de lograr lo mencionado anteriormente, cada usuario tiene una identificación espacial la cual depende de su posición geográfica y consecuentemente sobre su ángulo de llegada (AoA) visto por la estación base.

Está demostrado que los receptores con arreglos de antenas inteligentes poseen una mayor resistencia al ruido que los receptores tradicionales de espectro ensanchado, por lo cual su uso incrementa la capacidad, permitiendo así ofrecer servicios a más usuarios dentro de una misma celda sin aumentar los canales de radio, ni los códigos utilizados en la misma.

La aplicación más importante de este tipo de antenas es el uso de SDMA (Acceso múltiple por división de espacio). El principio fundamental de SDMA es que cualquier recurso básico, como canales de frecuencia, *slots* de tiempo, códigos y cualquier otra combinación de ellos, puede ser simultáneamente re-usada por dos o más suscriptores en la misma área geográfica, si y solo si, estos suscriptores están lo suficientemente separados. De esta manera, si hay dos o más usuarios separados por una cierta distancia angular, y sus SINR están por encima de un umbral SINR, pueden compartir el mismo recurso. Para lograr acceso espacial, el servidor común, como una estación base, debe ser equipado con un arreglo de antenas adaptativas o antenas inteligentes.

El resultado final es equivalente a un haz de alta ganancia dirigido por la antena adaptativa a cada uno de los usuarios, como se muestra en la figura 6. Eso es una característica notable, sin embargo, esto es solo una representación de la operación de SDMA. En la práctica, dependiendo del ambiente, puede presentarse propagación multitrayecto, donde el trayecto dominante podría no ser fácilmente identificado, dando como resultado una onda no definida que es producida por el arreglo de antenas. En cambio, la antena inteligente podrá ser usada para conseguir las mejores respuestas que provee un aceptable SINR¹.

¹ Esto es una señal recibida por el usuario deseado lo mejor posible, mientras reduce los niveles de interferencia

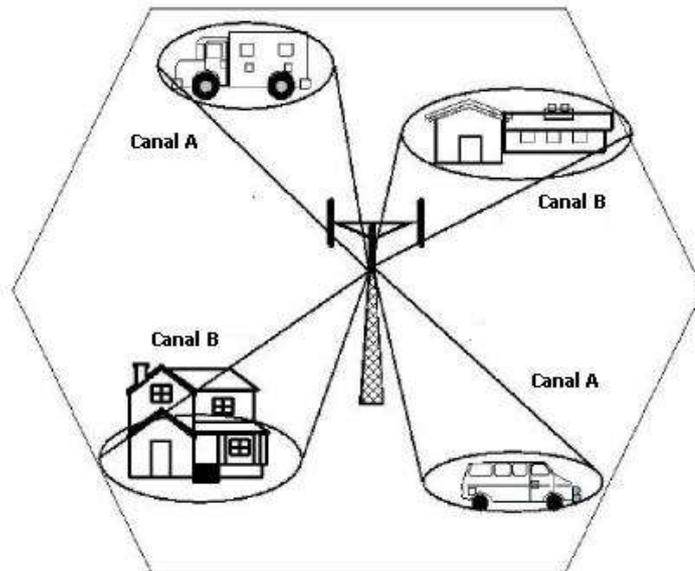


Figura 6. Representación SDMA

ANEXO G

Parámetros del análisis de mercado

Los parámetros de análisis son los siguientes:

- **Tipos de mercado.** Se clasifican en dos: mercados desarrollados y mercados no desarrollados:
 - **Mercados desarrollados:** Estos son industrializados, esto quiere decir que gran parte de su población trabajadora está más involucrada a la industria que a la agricultura. Algunas características son:
 - Mercado amplio, gran demanda y voluntad por pagar conectividad banda ancha.
 - Competencia con redes fijas es inevitable. Incluso donde DSL no es comúnmente ofrecido, puede ser introducido pronto.
 - Mercado establecido con una lenta velocidad de crecimiento. Proveedores de servicio WiMAX necesitan ir más allá del alcance de DSL como primer paso.
 - Demanda incrementada para movilidad y popularidad de conectividad inalámbrica brinda una estimación en la demanda para WiMAX.
 - **Mercados en desarrollo:** Se caracterizan por
 - Oportunidad para el operador WiMAX de ganar o retener una posición dominante en el mercado.
 - Infraestructura inalámbrica puede establecerse primero donde redes cableadas pueden no ser viables, y es más fácil de desplegar, mantener y asegurar.
 - Demanda de conectividad banda ancha es mayormente limitada a áreas urbanas.
 - El segmento de negocios residenciales es aún inmaduro.
 - Baja competencia, pero la regulación puede no estar a favor de nuevos operadores.
- **Actores y tendencias de mercado.** De la mano con la penetración de la banda ancha, las empresas se han ido adaptando a las necesidades de la sociedad sin tener en cuenta su capacidad adquisitiva. Actualmente, aunque los operadores siguen teniendo como eje fundamental la prestación de servicio al mercado empresarial, buscan también ser pioneros en áreas donde DSL y otras alternativas de telecomunicaciones no llega. Los siguientes son los actores y tendencias actuales en el mercado WiMAX:
 - Muchas compañías ven la necesidad de expandir su mercado más allá de los ya consolidados.
 - Las ciudades están invirtiendo mucho en desarrollo.
 - Las comunicaciones son más rápidas, más económicas haciendo del mundo un lugar pequeño.
 - El acceso por parte de la ciudadanía a bienes y servicios prestados por una empresa está cambiando.
 - Nuevas y mejores alianzas corporativas están disponibles.

- **Segmentos de mercado:** Los segmentos de mercado posibles para WiMAX en Colombia son los siguientes:

- **Comercio:** Los negocios comerciales están incrementando la búsqueda de servicios adaptados a sus necesidades, en este segmento se incluyen todas las empresas que requieren soporte de datos, voz y video de acuerdo a aplicaciones específicas.
- **Pequeñas y Medianas Empresas:** Este mercado requiere alternativas costo beneficio en ambientes de baja densidad donde la competencia es principalmente DSL.
- **Gobierno:** Estas instituciones requieren aplicaciones orientadas al bienestar de los ciudadanos, por tanto requieren servicios que complementen los ofrecidos tradicionalmente, tales como: agua, electricidad, seguridad, educación, etc.
- **Residencial:** Donde el servicio está orientado a satisfacer las necesidades de comunicación que general mente están disponibles a través de DSL o cable.

- **Estructura de Mercado.** Se clasifica en:

- **Urbana:** Son los mercados principales. Se caracterizan por ubicarse en la zona central, cuenta con una alta densidad de población, buena infraestructura de comunicaciones y alta densidad de negocios.
- **Suburbana:** Las áreas suburbanas se consideran un complemento de los negocios de la zona urbana. Se caracterizan por no tener a DSL y CABLE siempre disponible, la distancia de a la zona urbana no es tan considerable, su densidad de población es moderada, cuenta con algunos establecimientos de negocios.
- **Rural:** Densidad demográfica baja, constituyen la frontera del área de mercado para operadores de telecomunicaciones, se caracteriza por: La distancia con respecto al centro de la ciudad es considerable, infraestructura de telecomunicaciones pequeña o inexistente y pequeños establecimientos de negocio.

ANEXO H Trama convergente

Para el caso TDD, el canal es dividido en supertramas de longitud fija y dentro de cada supertrama, una o varias tramas de cada tipo se ubican. La figura 7, describe un ejemplo de intercalado de tramas fijas y móviles con duplexación TDD.

La figura 8 describe el caso para FDD. Para cada tipo PHY, subtramas UL y DL separadas son ubicadas como F-DL y F-UL² y M-DL y M-UL. No se requiere ningún tipo de cambio para las tramas fijas. En el caso móvil debe tenerse en cuenta el *scheduler* de la estación BS.

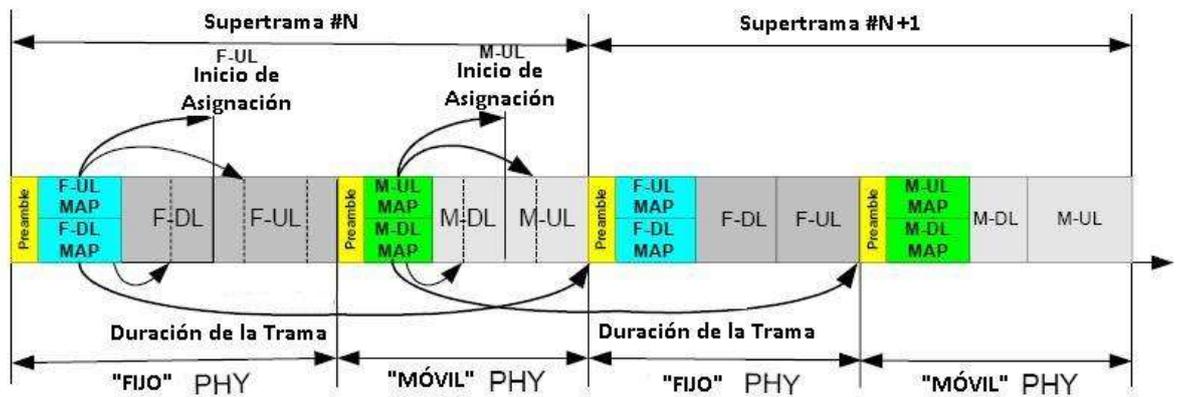


Figura 7. Estructura de la trama para TDD

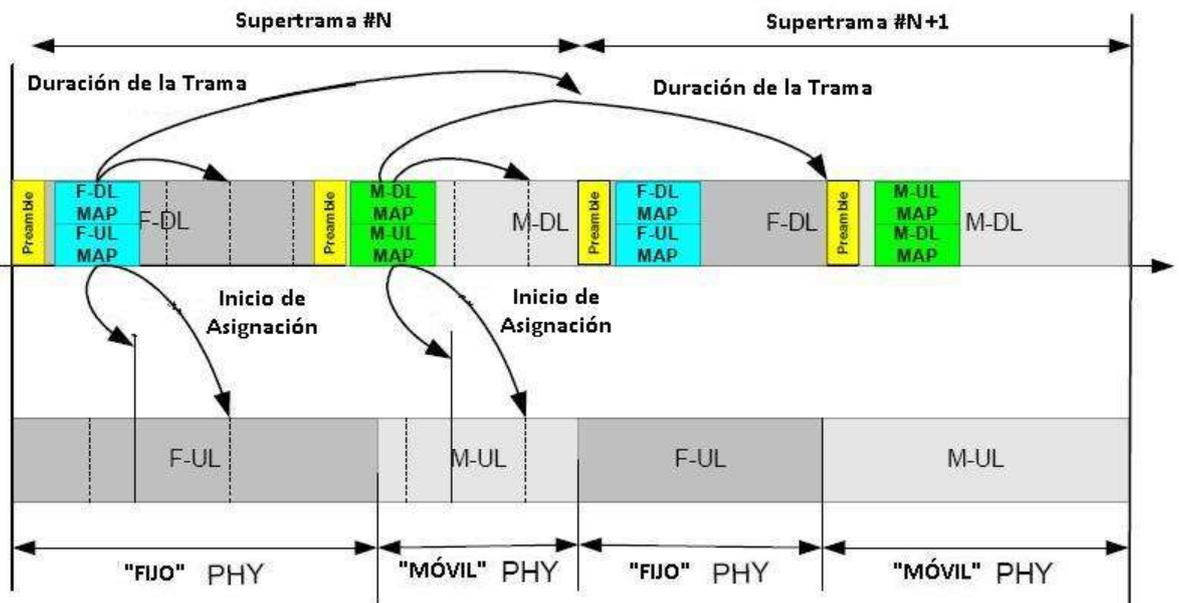


Figura 8. Estructura de la trama para FDD

Nótese en ambos casos que el ancho de banda del canal ya no es el mismo para la red fija, en cuyo caso se deben buscar estrategias que permitan compensar la disminución de capacidad en la red existente.

² F de fijo

REFERENCIAS

- [1] Universidad de Camagüey (2008), "Fundamentos del Sistema MIMO". Documento en PDF disponible en: <http://biblioteca.reduc.edu.cu/biblioteca.virtual/cgi/CD-ROM/otros/FIE2006%20%28G%29/tele/Tel-9/f77.pdf> (Última consulta febrero 6 de 2010)
- [2] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (2006), "**Proceso de Asignación Banda 3.5 GHZ Área de Servicio Departamental**". Documentos en PDF disponibles en: <http://www.mintic.gov.co/mincom/faces/index.jsp?id=1280> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [3] Siemens, (2008). "WayMAX@vantaje, Siemens WiMAX solution". Documento en PDF disponible en: http://optical.usa.siemens.com/pon/downloads/telecomnext_downloads/WayMAX-WiMAX_Brochure.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [4] Cellgis.net, (2009). "Modelo de Propagación COST 231 – Walfisch-Ikegami". Documento en PDF descargable de: <http://cellgis.net/wiki/Walfisch-Ikegami?format=pdf> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [5] Moricaud Nestor F, (2007). "Antenas inteligentes y su desempeño en redes wireless". Artículo en PDF disponible en: <http://www.docstoc.com/docs/27567352/Antenas-Inteligentes-y-su-desempeo-en-redes-wireless> (Última consulta febrero 6 de 2010).