

WiMAX móvil

Ing. Jack Bravo Torres Mgt.
jbravo@ups.edu.ec



Resumen

WiMAX móvil muestra una serie de características que lo hacen ideal para el despliegue en zonas rurales y en países en vías de desarrollo. En este trabajo se presentan las principales características de IEEE 802.16, se analiza el avance en tecnologías de antenas, diseño de Cross Layer, manejo de interferencia, scheduling y las aplicaciones para WiMAX Móvil.

1. Introducción

En la actualidad, las comunicaciones inalámbricas han alcanzado un gran desarrollo en cuanto a cobertura, tasas de transmisión, calidad de servicio, entre otras. Sin embargo, el constante crecimiento en los requerimientos de los usuarios y la compartición del escaso recurso radioeléctrico, en diferentes aplicaciones y tecnologías, hacen necesario que los futuros sistemas prioricen la eficiencia espectral y la fiabilidad del enlace.

El uso de modulaciones y sistemas de codificación que se adapten a las condiciones del canal, las técnicas de múltiple antena que permite incrementar la ganancia de diversidad y mejorar la tasa de error de bit, aumentando los rangos de celda e incrementando las tasas de transmisión a través de la multiplexación espacial o la reducción de la interferencia entre usuarios, son ejemplos de los nuevos avances tecnológicos enfocados a mejorar la eficiencia de los sistemas inalámbricos.

Los sistemas WiMAX basados en los estándares IEEE 802.16-2004 e IEEE 802.16e-2005 presentan características que lo hacen apto para la cubrir los requerimientos de las nuevas aplicaciones en el campo de la transmisión inalámbrica.

En este artículo en el numeral II, analizamos algunas características de WiMAX que le dan ventaja frente a otras tecnologías de acceso inalámbrico, en III hacemos una breve revisión de los avances en sistemas de antenas y su aplicabilidad a WiMAX móvil. En IV se muestra las principales justificaciones de la necesidad del diseño Cross Layer en IEEE 802.16 y se da una revisión a algunos algoritmos propuestos en la literatura. En V se analizan los principales problemas de interferencia entre celdas adyacentes en los sistemas de comunicación móvil basados en WiMAX y la coexistencia con otros sistemas en el mismo espectro. En VI se analizan los algoritmos de programación (scheduling) en Wi-

MAX, y en VII se muestran algunas aplicaciones propuestas para ser desarrolladas en redes de acceso basadas en IEEE802.16d/ IEEE802.16e.

2. Principales características de WiMAX

IEEE 802.16 es un conjunto de estándares que fueron desarrollados para cubrir una variedad de aplicaciones y escenarios de despliegue. Éstos ofrecen diferentes opciones de diseño, como por ejemplo, la capa física se puede basar en una sola portadora, OFDM, OFDMA. Así mismo, en la capa de acceso al medio MAC, tenemos varias arquitecturas, duplexación, bandas de frecuencia de operación, entre otras.

WiMAX se fundamenta en el estándar IEEE 802.16d-2004/IEEE 802.16e-2005, entre las características que lo convierten en el candidato ideal para ser la red de acceso para sistemas de tercera y cuarta generación podemos hacer mención a las siguientes [1, 2, 3]:

- Capa Física Basada en OFDM: la capa física de WiMAX está fundamentada en multiplexación por división de frecuencia ortogonal, un sistema que ofrece muy buena resistencia al multi-trayecto y que permite a WiMAX operar en condiciones NLOS.
- Tasas de datos pico muy altas: WiMAX es capaz de soportar altas tasas de datos pico haciendo uso de sistemas de modulación QAM con tasa de codificación de corrección de error de 5/6.
- Soporte de ancho de banda y tasas de datos escalables, la escalabilidad es soportada en el modo OFDMA, donde el ancho de la FFT puede ser escalado basado en la disponibilidad de ancho de banda.
- Codificación y Modulación adaptativa: WiMAX soporta un número de modulaciones y esquemas de corrección de error (FEC), permitiendo ser cambiado por usuario o

por trama en función de las condiciones del canal. Esto permite maximizar el throughput en un canal variante en el tiempo.

- Retransmisión en la capa de enlace: WiMAX soporta requerimiento de retransmisión automática (ARQ) en la capa de enlace. Además, soporta opcionalmente un ARQ híbrido entre FEC y ARQ.
- Soporte de TDD y FDD: se permite soportar ambos esquemas de duplexación, tanto por división en tiempo como en frecuencia respectivamente. TDD presenta mayores ventajas frente a FDD por lo que es favorecido con una mayor implementación.
- Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA): WiMAX móvil hace uso de OFDM como técnica de acceso, en a varios usuarios se les puede asignar diferentes subconjuntos de tonos OFDM.
- Asignación dinámica y flexible de recursos por usuario: tanto en el enlace de subida como en el de bajada, la asignación de recursos es controlada por un programador en la estación base.
- Soporte de Técnicas de Antena Avanzadas: WiMAX permite el uso de técnicas de múltiple antena, tales como beamforming, codificación de espacio-tiempo, multiplexación espacial, lo que permite mejorar la capacidad total del sistema y la eficiencia espectral.
- Soporte de Calidad de Servicio: la capa MAC es una arquitectura orientada a la conexión, diseñada para soportar una variedad de aplicaciones incluyendo voz y servicios multimedia. Para esto, WiMAX permite una serie de servicios de QoS que dan soporte a estas aplicaciones.
- Robustez en Seguridad: soporta un fuerte sistema de seguridad basado en el protocolo de Privacidad y manejo de clave versión 2 (PMKV2), sistemas de autenticación IETF EAP, encriptación de tráfico con AES-CCM, entre otros.
- Soporte para Movilidad: en WiMAX Mó-

vil se presentan mecanismos para dar soporte a la movilidad, como son handovers para aplicaciones de movilidad total y tolerancia al retardo, tales como VoIP, soporte de mecanismos para manejo de potencia y extensión del tiempo de vida de la batería, entre otros.

- Arquitectura basada en IP: El WiMAX Fórum ha definido una arquitectura de referencia basada en una plataforma de totalidad IP. Todos los servicios extremo a extremo son entregados sobre una arquitectura IP.

En los siguientes apartados analizaremos algunas de estas características con los avances recientes en esos campos.

3. Avances en Tecnologías de Antenas para WiMAX Móvil



El estándar IEEE 802.16 provee algunas características opcionales y una estructura de señalización que permite el uso de sistemas de múltiple antena. Para su análisis en el entorno de WiMAX, estas técnicas pueden ser clasificadas en dos partes [4]: Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO), definida por el Estándar IEEE 802.16 como “Un sistema empleando al menos dos antenas transmisoras y al menos dos antenas receptoras para mejorar la capacidad del sistema, cobertura o throughput y Espacial Beamforming denominado Sis-

temas de Antena Adaptativa (AAS) "A través del uso de más de un elemento de antena, AAS puede mejorar el rango y la capacidad del sistema, por la adaptación del patrón de la antena y concentración de su radiación a cada suscriptor individual".

Podemos notar que ambos MIMO y AAS son técnicas de antena relacionadas que incrementan la complejidad de soluciones de antena para aumentar la diversidad y mejorar la performance de la tasa de error de bit de sistemas inalámbricos, ampliando el rango de las celdas y la tasa de transmisión, a través de la multiplexación espacial y/o reduciendo la interferencia desde otros usuarios.

a) Sistemas MIMO

A diferencia de la ampliación en el presupuesto del canal por medio del incremento en la tasa de codificación o tasa de repetición que compromete la eficiencia espectral, los sistemas MIMO aumentan la complejidad de hardware de la antena, generando un costo adicional contra una superior eficiencia espectral.

MIMO aprovecha el dominio espacial para aumentar la eficiencia espectral y la fiabilidad del sistema de comunicaciones inalámbrico a través de la ganancia de multiplexación espacial y la ganancia por diversidad de antena [5].

La multiplexación espacial permite un incremento lineal en la capacidad del sistema, en cambio, la ganancia por diversidad mejora la fiabilidad del enlace por redirección al canal con menos desvanecimiento y por incremento de la robustez frente a la interferencia co-canal. La diversidad espacial es particularmente atractiva frente a la diversidad de tiempo o frecuencia ya que no incurre en una expansión del tiempo de transmisión o ancho de banda, respectivamente.

La definición de MIMO sólo especifica el número de antenas para un determinado dispositivo, pero cuando se considera las re-

laciones de interfaz entre el hardware transmisor y receptor con las antenas y cuáles son las decisiones de diseño, entonces otro nivel de complejidad puede ser examinado. Varios esquemas han sido planteados en la literatura [6,7], uno de estos es el de combinación de selección, donde la medida de la calidad de la señal recibida permite conmutar el receptor a la antena de mejor señal; mientras que, Maximal Ratio Receive Combining (MRRC) realiza una combinación de las múltiples señales recibidas de manera coherente en amplitud y fase. Ambos esquemas son de lazo abierto dado que no hay retroalimentación de información y, por lo tanto, están fuera del objetivo del estándar IEEE 802.16 ya que actúan en un muy bajo nivel y no son cubiertos por las especificaciones del protocolo.

Los esquemas de antena que son implementados en el estándar son aquellos que generalmente requieren retroalimentación desde el receptor al transmisor o que afectan a la señal transmitida de alguna forma. Bajo este criterio tenemos la codificación espacio-tiempo (STC) que se fundamenta en una arquitectura MIMO con múltiples antenas transmisoras en donde el conocimiento de las características del canal no es requerido en el transmisor, y sin embargo, la señal transmitida es modificada en provisión de la ganancia de diversidad resultante. Esta técnica aprovecha la diversidad espacial para disminuir la probabilidad de error; las señales que se entregan a las antenas son tratadas como vectores de símbolos que representan un cierto código. El objetivo es diseñar un código óptimo para que la señal sea demodulada de una manera eficiente en el receptor y se pueda recuperar con una mejor relación señal a ruido. Alamouti STC es soportado en el estándar IEEE 802.16.

STC sobre el lado del transmisor y MRRC sobre el lado del receptor provee una ganancia de diversidad total con ganancia de diversidad en el receptor de orden cuarto

[6].

Estructuras de detección de los receptores aplicados a MIMO incluyen receptores lineales como zero-forcing (ZF), o de mínimo error cuadrático medio (MMSE), receptores no lineales como detectores óptimos de máxima probabilidad (MLD) y receptores de cancelación de interferencia espacial como BLAST, detectores con retroalimentación, detectores esféricos [8, 9, 10].

b) Sistemas de antena adaptativa

Los sistemas de antenas adaptativas proveen una dirección espacial de la potencia radiada, usando formadores de rayos (beamforming) fijos o adaptativos. Las antenas directivas más comunes son las de rayo conmutado o conjunto de antenas de fase (direccional). En esos sistemas hay múltiples antenas de rayo fijo y el sistema conmuta entre esos diferentes rayos para obtener el mejor rendimiento. La ganancia direccional puede ser fuertemente controlada con un número suficiente de elementos de antena. Estas técnicas trabajan a partir de la adaptación de la fase de cada elemento de la antena en el array, lo cual cambia la localización angular de los rayos de la antena (ángulos con mayor ganancia) y nulos (ángulos con pequeñas ganancias).

Estos sistemas deben conocer la localización angular de las señales deseadas e interferentes para proveer mayor o menor ganancia en las direcciones apropiadas, el rastreo de la localización de los usuarios puede ser un impedimento significativo en sistemas de alta movilidad.

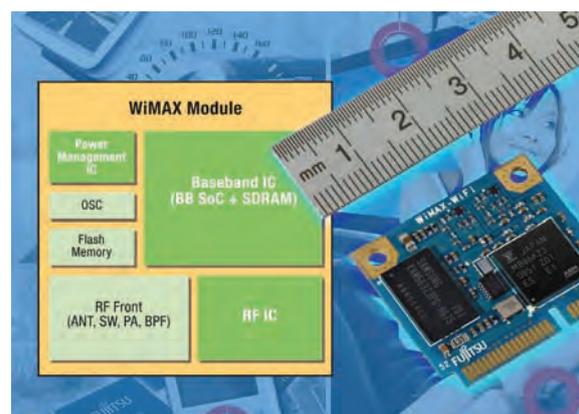
Generalized Co-Phased Transmission Beamforming [7, 12] es una técnica de diversidad en la transmisión, de lazo cerrado, que confía en la multiplexación de la señal de datos a ser transmitida en una matriz de direccionamiento. La misma que es determinada basándose en el CSI (información del estado del canal) y pre compensa las señales, partiendo desde las antenas transmisoras, de tal ma-

nera que los frentes de onda arribando en el receptor se adicionan constructivamente.

Transmision Beamforming con Parcial conocimiento del canal es empleada para reducir la carga extra de retroalimentación requerida para obtener el CSI entre terminales o alternativamente para reducir la complejidad de cálculo de la matriz de direccionamiento. En este sentido, el receptor puede sólo retroalimentar el CSI correspondiente a un subconjunto de antenas receptoras. Así el trasmision beamforming será conducido con una sub matriz de la matriz de direccionamiento del ancho total del canal.

Pseudo Omni Direccional TB (PODTB) es una adaptación de la diversidad multiusuario basado en beamforming donde el trasmisor forma múltiples rayos de banda angosta a través del ancho de banda de interés. Estos rayos de banda angosta pueden ser formados de tal forma que colectivamente se expanden en todas las direcciones posibles (en vez de direcciones aleatorias).

4. Diseño Cross-Layer para WiMAX



El diseño tradicional de protocolos se basa en modularidad, las capas son diseñadas y operadas de manera independiente con interfaces que son estáticas e independientes de cada capa y sus aplicaciones. Los sistemas dinámicos, en cambio, representan la

interacción de protocolos de diferentes capas. Cross-Layer es considerado como una violación a la arquitectura de referencia: permitir la comunicación directa entre protocolos de capas no adyacentes, compartir variables entre capas, entre otras.

Las características propias de las comunicaciones inalámbricas, tales como no fiabilidad del canal, movilidad de usuarios, limitaciones en capacidad del enlace, capacidad computacional y potencia de los equipos móviles, recursos radioeléctricos, entre otros, exigen cambios significativos en el diseño de protocolo para redes inalámbricas de alta velocidad. El diseño cross-layer puede ser totalmente justificado tomando en consideración los siguientes aspectos [13]:

Primero, las premisas consideradas en el diseño de las pilas de protocolos para redes cableadas no son apropiadas para el caso inalámbrico, un ejemplo de esto, es en el caso de TCP, en el que la pérdida de paquetes es considerada ser causada por congestión de la red, pero sin embargo, en los sistemas inalámbricos, esto puede ser efecto de las condiciones del canal. Exponer la corrupción de los paquetes en la señalización desde la capa de enlace a la de transporte podría facilitar la solución de este problema.

Segundo, la heterogeneidad de la red hace necesario la cooperación de la adaptación de múltiples capas para hacer este proceso más simple y eficiente.

Tercero, los recursos de radio y la potencia limitada hace necesario la optimización del rendimiento de la red, la arquitectura basada en capas puede ser sub óptima, como por ejemplo, en los esquemas de corrección de error propuestos para las capas de enlace y transporte, puesto que en el medio inalámbrico serán frecuentemente llamadas y por tanto ineficientes. Una coordinación entre capas resultaría un proceso más eficiente.

Finalmente, las redes emergentes de corto rango como las redes Ad Hoc y de Área Personal, suponen una aproximación de diseño integrado.

En [14] se hace una categorización de las propuestas de diseño Cross-Layer como:

- Comunicación directa entre capas.
- Base de datos compartida entre capas.
- Abstracción completamente nueva.

Algunos ejemplos son presentados en [13], métodos que hacen uso de cabeceras adicionales para cargar información, como en el caso de Interlayer Signalling Pipe que carga información de Cross-Layer en la cabecera de extensión inalámbrica (WEH). Otro esquema es la simple notificación booleana como en el caso de Explicit Loss Notification (ELN) pero con la complejidad de no ser escalable para información más compleja.

ICMP (Internet Control Message Protocol) [13, 15] permite propagar mensajes a través de las capas, cuya información es abstraída a parámetros medidos por las capas correspondientes. Los mensajes nuevos se generan sólo cuando los parámetros cambian bajo un umbral.

Wireless Channel Information (WCI) propuesto en [16] y analizado en [13] especifica un servicio de acceso de red en el que la información del estado del canal y enlace desde la capa física y de enlace son reunidos, abstraídos y manejados por terceras partes, servidores WCI distribuidos, y a donde las aplicaciones interesadas acceden para requerir los parámetros.

Cross Layer Signalling Shortcuts (CLASS) es propuesto en [13], se fundamenta en una señalización directa entre capas no adyacentes, el uso de formatos de poco peso para mensajes internos pero el uso de formatos estandarizados para mensajes externos.

Los sistemas OFDM (como en el caso de IEEE 802.16) proveen excelentes propie-

dades de la capa física y en la capa de enlace. Debido a su fina granularidad, los requerimientos de recursos de los terminales pueden ser servidos, en principio, sin mucho sobre aprovisionamiento de ancho de banda y, así mismo, debido a la diversidad de estos sistemas, el tipo de modulación y potencia de transmisión por sub canal pueden ser adaptados en orden de incrementar la eficiencia. La aproximación de optimización mediante Cross-Layer intenta dinámicamente igualar los requerimientos de las conexiones de enlace de datos a la disponibilidad instantánea de recursos de la capa física en orden de maximizar alguna métrica del sistema. [19]

En el caso de IEEE 802.16, en [17] se propone una estructura de cross-layer para soportar QoS, en la que se plantea dos novedosos mecanismos: el manejo del control de fragmentación de las tramas de datos pertenecientes al mismo datagrama IP en una manera atómica para reducir la pérdida en la transmisión y el remapeo desde QoS IP a QoS en IEEE 802.16, esto es diseñado para reducir el impacto del tráfico por ráfagas en el manejo del buffer.

Así mismo en [18] se presenta una propuesta de estructura Cross Layer para soportar QoS en la transmisión de video sobre redes WiMAX móvil. Incorporando los mecanismos de DiffServ en las características de QoS de la MAC ofrecida por uno de los cuatro flujos de servicio propuestos por WiMAX. Los autores proponen video multicast escalable por capas y de subscripción de usuarios mientras aún mantiene la fiabilidad en las diversas condiciones del canal y demanda de los usuarios. La optimización del sistema proviene de un mejor compromiso entre el número de subscripción de capas de video y el número de paquetes FEC adicionales insertados simultáneamente para satisfacer el ancho de banda disponible y las condiciones estimadas de error del canal inalámbrico.

5. Manejo de Interferencia en WiMAX

La maximización de la eficiencia espectral es un objetivo de suma importancia para los actuales y futuros sistemas inalámbricos y hace necesario operar con el mayor control posible del re-uso de los recursos de frecuencia/tiempo. Como resultado la interferencia es uno de los principales elementos afectando el rendimiento de estos sistemas.

En [20] los autores analizan la interferencia que se produce entre sistemas IEEE 802.16 operando en la región del espectro no licenciado. Ellos proponen una aproximación que permite a cada Estación Base (BS) y estación de suscriptor asociado (SS) mantenerse inactivo por una fracción de tiempo específico, de manera que otros sistemas puedan transmitir en ese instante, reduciendo así la probabilidad de interferencia. Los resultados de simulaciones muestran que el throughput del sistema es muy sensitivo a la fracción de tiempo que cada BS esta activa, el throughput es maximizado cuando cada BS es activada menos del 40% del tiempo para los escenarios de estudio. Otro resultado de esta investigación es que la información de difusión siendo transmitida periódicamente a máxima potencia, tiene un significativo impacto en decremento del sistema.

En [21] se analiza el problema de la interferencia entre celdas (ICI) en los límites de celdas vecinas. Los autores, proponen para mitigar este problema, en el enlace de bajada de un sistema de WiMAX móvil, combinar técnicas de acciones para evitar la interferencia y técnicas de cancelación, junto con la coordinación inter sector y la maximización de la capacidad del usuario. Presentan cómo generar factores de re-uso múltiple en el modo PUSC (uso parcial de sub canales) acorde al ambiente ICI. Aplican beamforming inter sector para evitar la interferencia y obtener la ganancia de beamforming.

En [22] se presenta una descripción de las principales características afectando un escenario de interferencia en WiMAX móvil. Su análisis se enfoca en enlace de bajada modo PUSC y específicamente en el parámetro DLPermBase(DLPB), un índice determinando el mapeo de sub portadoras físicas a sub canales. De este análisis se establecen dos posibles escenarios de interferencia: el primero en el caso de que el mismo DLPB este en todas las celdas, lo que genera que la misma regla de permutación de subportadoras sea aplicada sobre toda la red, resultando en una superposición de los recursos lógicos. El segundo caso, en donde existen distintos DLPB en toda la red, las permutaciones distribuyen aleatoriamente las subportadoras independientemente de un sitio a otro. La interferencia resultará ser expandida sobre todo el ancho de banda del canal y el nivel de interferencia sufrida por los usuarios será relacionado principalmente a la probabilidad de solapamiento de subportadora que está directamente relacionada a la carga de la red. Se propone por parte de los autores dos estrategias para la reducción de la interferencia basadas en la explotación articulada de procedimientos de la capa MAC, tales como control del aumento de potencia, estrategias de asignación dinámica de sub-canales y control de carga.

En [23], haciendo uso de modelación Monte Carlo, se analiza la interferencia generada por diferentes sistemas operando en bandas de frecuencias adyacentes a la banda de licencia WiMAX de 2.5 GHz, se estudia principalmente el efecto de tecnologías operando en la banda no licenciada ISM, precisamente en 2.4 GHz donde opera WLAN, Bluetooth y además se estudia el efecto de la tecnología WiMAX-d. El análisis de los resultados demuestra que existe un efecto sobre el rendimiento de las redes WiMAX, específicamente existe una degradación en términos

de capacidad más evidente con el incremento del número de interferentes.

6. Scheduling en IEEE 802.16e/WiMAX Móvil

A diferencia de las redes WLAN, las redes WiMAX incorporan varios mecanismos de calidad de servicio (QoS) en el nivel de control de acceso al medio (MAC) para garantizar los servicios de voz, datos y video. El estándar IEEE 802.16 no especifica mecanismos de asignación de recursos o de admisión de control, dejando a los comerciantes y operadores escoger entre las técnicas existentes o proveer sus propios algoritmos de programación.

Estos programadores trabajan como un distribuidor de los recursos entre las estaciones móviles (MS); dicha asignación se da en términos lógicos con un número de slots y posteriormente son mapeados a un número de sub canales. El objetivo en este proceso de asignación de recursos es minimizar el consumo de potencia, la tasa de error de bit, y maximizar el throughput total del sistema.

Algunos factores deben ser considerados en el diseño de estos programadores [24] como:

Los parámetros de QoS, es decir el programador debe asegurar los requerimientos de QoS para varias clases de servicio.

Optimización de Throughput, dado que los recursos en las redes inalámbricas son limitados, otra importante consideración es cómo maximizar el throughput total del sistema.

Equidad, aparte de asegurar los requerimientos de QoS, los recursos sobrantes deben ser asignados equitativamente.

Control del consumo de energía y potencia, el controlador necesita considerar la máxima potencia disponible.

Complejidad de implementación, el algoritmo de programación tiene que ser simple, rápido y usar el mínimo de recursos tal como memoria.

Escalabilidad, el algoritmo debe operar eficientemente cuando el número de conexiones se incrementa

Varios esquemas han sido desarrollados y se los ha clasificado de acuerdo a varios criterios, como el uso de la información sobre las condiciones del canal para la toma de decisiones en la programación ó su aplicabilidad para WiMAX.

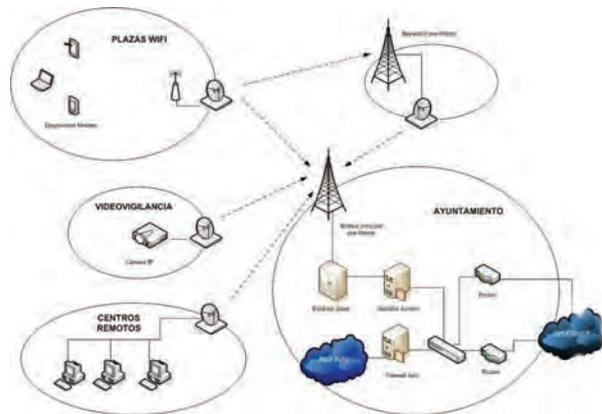
En [24,25] se presenta una visión bastante amplia de las principales propuestas de programadores y su aplicabilidad a WiMAX, entre las técnicas que se destacan podemos mencionar: Algoritmo Round Robin (RR), el cual no asegura QoS para diferentes clases de servicio y por tanto, no es apropiado para WiMAX. Weighted Round Robin que ha sido aplicado para programación en WiMAX, Deficit Round Robin usado para paquetes de ancho variable, maximum Signal-to-Interference Ratio (mSIR) basado en la asignación de los recursos de radio a las estaciones de suscriptor las cuales tienen alta relación señal a interferencia (SIR); este algoritmo permite una alta utilización eficiente de los recursos de radio pero usuarios que tienen siempre un SIR pequeño nunca serán servidos. Algoritmos basados en retardo como el Earliest Deadline First (EDF), Largest Weighted Delay First (LWDF), son diseñados específicamente para clases de servicio de tráfico de tiempo real, algoritmos basados en prioridad como el Deficit Fair Priority Queuing (DFPWQ) garantizan diferentes clases de servicio lo que les permite ser usados en WiMAX.

En [25] se hace una propuesta de algoritmo de programación para WiMAX modificando el algoritmo mSIR, denominado modified máximo Signal-to-Interference Ratio (mmSIR), los autores proponen que las

estaciones base solo sirvan a los suscriptores que no han tenido oportunidades de requerimientos unicast en la misma trama.

Otros algoritmos propuestos para WiMAX son: Temporary Removal Scheduler, Opportunistic Deficit Round Robin, Frame Registry Tree, Adaptive rtPS, entre otros.

7. Aplicaciones de WiMAX



Son múltiples las aplicaciones y servicios que se han propuesto para ser implementadas sobre WiMAX; algunos de estos campos son transmisión de video, triple play, aplicaciones militares, tele-servicios, telemedicina, tele-educación, prevención de incendios y monitoreo, entre otras. A continuación revisaremos algunas de esas propuestas:

En el campo de la transmisión de video, IPTV por ejemplo, permite la entrega del servicio en tiempo real o bajo demanda, en forma broadcast, multicast o unicast lo que resulta en una serie de paquetes de varias fuentes que poseen diferentes parámetros de QoS, generando un verdadero reto.

WiMAX presenta varias características como la capacidad multicast, soporte a la movilidad de usuario a través de IEEE 802.16e, supresión del overhead creado a través de técnicas de supresión o compresión de cabecera, entre otras, que le dan ventaja frente a otras tecnologías de acceso.

En [27,28] se presenta un modelo de

despliegue del sistema para servicios de IPTV sobre WiMAX y se establece los principales retos, que incluyen desafíos en la capa física y de control de acceso al medio, el diseño de los equipos de transmisión- recepción e implementación.

Uno de esos retos se debe a la necesidad de multicasting bajo una diversidad de condiciones de desvanecimiento, en [28] se propone el diseño de una estructura Cross-Layer basada en un esquema de superposición de dos niveles de código multicasting (SCM), alcanzando, de acuerdo a la simulación desarrollada, un mejoramiento de la calidad de video.

En [29] se propone una arquitectura para la entrega de video bajo demanda sobre WiMAX y se desarrolla un estudio de simulación en función de varios escenarios representativos del despliegue de esta tecnología en áreas rurales. Sus resultados muestran que el sistema puede soportar hasta 9/10 usuarios en flujo de video en resolución CIF, 24 tramas/s, y tasas promedio de alrededor de 750 Kbps, cuando los usuarios son distribuidos uniformemente alrededor de la estación base. Además se muestra que el flujo adaptativo basado en SVC (scalable video coding) es una eficiente solución práctica para redes inalámbricas.

En [30] se discute una arquitectura de sistema de red, para soportar aplicaciones triple play, haciendo uso de 802.16e en modo punto a multipunto como tecnología de acceso a última milla. Aplicaciones de triple play como: e-Education, Infotainment, e-governance, son analizadas para ser desarrolladas en áreas rurales en donde tecnologías de acceso como DSL o fibra óptica no son adecuadas por las condiciones topográficas, las simulaciones ejecutadas en estos escenarios indican que 6-8 sesiones de video simultaneo pueden ser soportados, más allá del cual, los límites de tolerancia de retardo son excedidos.

En este mismo campo, en [31] se desarrolla el análisis de algunos sistemas propuestos para la distribución de video en tiempo real y se plantea una nueva técnica para la entrega de video en tiempo real en redes basadas en

802.16e, la cual se sustenta en las características principales de la tecnología de compresión de video MPEG-4/AVC integrada con las características de WiMAX, como los conceptos de flujo de servicio de la capa MAC y el uso de una estructura de Cross Layer.

En el ámbito de la telemedicina, IEEE 802.16 se muestra como una tecnología apropiada para el desarrollo de estos sistemas, debido a características como: ancho de banda, integración de servicios, soporte de QoS y seguridad, comparada con sistemas basados en redes de acceso como WLAN, 2G, 3G debido a sus restricciones en movilidad o velocidad de transmisión.

En [32] se hace una revisión de los principales temas de diseño para redes que permitan servicios de telemedicina basados en WiMAX, entre esos puntos se destacan el mapeo de servicio de los datos hacia uno de los tipos de servicios prestados por WiMAX, el control de admisión y asignación de recursos de manera que los algoritmos sean flexibles frente a las diferentes situaciones y la integración de protocolos de capas superiores. Así mismo, se presenta un algoritmo de control de admisión y asignación de ancho de banda basado en IEEE 802.16/WiMAX diseñado especialmente para servicios de telemedicina, el objetivo de éste algoritmo es maximizar la utilización de los recursos de radio mientras considera los requerimientos de calidad de servicio para el tráfico de telemedicina.

En [33,34] se presenta el proyecto WiMAX Extension to Isolated Research Data networks que desplegará escenarios de aplicación en la implementación de banco de pruebas que permita mejorar y valorar las entidades de administración y control de red en versiones mejoradas de WiMAX. Entre las aplicaciones analizadas podemos mencionar el monitoreo de ambientes, prevención de incendios y telemedicina.

Otra área de interés son las redes de uso militar; en [35] se hace un análisis de la aplicabilidad de IEEE 802.16 para redes militares de alto nivel, se identifican algunas de-

ficiencias técnicas que pueden ser requeridas para los ambientes militares específicos, entre ellos se analiza el soporte de movilidad a ser resuelto por 802.16e y 802.20, otro de los puntos a considerar es el costo de los equipos para el despliegue a larga escala.

8. Conclusiones

WiMAX es una tecnología que se está tomando en una de las mejores alternativas

para el desarrollo de las telecomunicaciones y la disminución de la brecha digital en los países en vías de desarrollo.

En este trabajo hemos estudiado sus características y nos hemos enfocado en analizar los principales avances que se están produciendo, específicamente en áreas como antenas múltiples, diseño Cross Layer, manejo de Interferencia debido a sistemas que se encuentran en la misma banda, técnicas de programación y aplicaciones para ser ejecutadas a través de redes basadas en WiMAX.

9. Bibliografía

- [1] B. Li, Y. Qin and Ch. Lim, "A Survey on Mobile WiMAX", IEEE Communications Magazine, December 2007.
- [2] J. Andrews, A. Ghosh, "Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking", chapter 2, Prentice Hall, 2007.
- [3] Chen Kwang-Cheng and B. de Marca Robert, "Mobile WiMAX", chapter 2, John Wiley & Sons, 2008.
- [4] Paul Piggini, "Emerging Mobile WiMAX Antenna Technologies", IEEE Communications Engineer, Volume 4, Issue 5, October-November 2006, page(s): 29-33.
- [5] Helmut Bölcskei, "MIMO-OFDM Wireless Systems: Basics, Perspectives, and Challenges", ETH Zurich, IEEE Wireless Communications, volume 13, issue 4, August 2006, page(s): 31-37.
- [6] Maode Ma, Current Technology Developments of WiMAX Systems, Springer, 2009.
- [7] L. Jungwon, *et al.*, "Recent Advances in Technologies for the Evolution of mobile WiMAX" en: http://www.geocities.com/jungwon1977/research/wimax_future_mag.pdf.
- [8] Ghosh A., Wolter D.R., Andrews J.G., Chen, R., "Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16: Current performance, benchmarks and future potential". IEEE Communications Magazine, volume 43, Issue 2, February 2005, page(s) 129-136.
- [9] K. Cheng, "Introduction to Mobile WiMAX", NTUEE Mobile Communications, 2007
- [10] Broche Holger, *et al.*, "Smart Antenas: State of the Art", <http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/1547/4/Smart.pdf>
- [11] B. Muquet, *et al.*, "MIMO Techniques for Mobile WiMAX Systems", SEQUANS Mobile WiMAX White Paper, http://www.sequans.com/pdf/mimo_whitepaper.pdf
- [12] J. Lee, *et al.*, "Generalized Co-Phasing for Multiple Transmit and Receive Antennas", IEEE Transactions on Wireless Communications, volume 8, issue 4, April 2009.
- [13] Qi Wang, Abu Rgheff, "Cross-Layer Signalling for Next-Generation Wireless Systems", IEEE Wireless Communications and Networking, volume 2, march 2003.
- [14] S. Shakkotta, *et al.*, "Cross-Layer Design for Wireless Networks" IEEE Communications Magazine, volume 41, issue 10, October 2003.
- [15] J. Postel, "Internet control message protocol" RFC 792, September 1981
- [16] B-J "J" Kim "A network service providing wireless channel information for adaptive mobile applications: part I: proposal," Proc. IEEE ICC'01, Helsinki, Finland, June 2001.

- [17] Yi-Ting Mai, et al. "Cross Layer QoS Framework in IEEE 802.16 Network", The 9th International Conference on Advanced Communication Technology, volume 3, February 2007.
- [18] J. Neng Hwang, et al., "Cross Layer End to End QoS for Scalable Video over Mobile WiMAX", chapter 13 of the book "Mobile WiMAX", 2008, John & Wiley
- [19] Bohge M., et al, Dynamic Resource Allocation in OFDM Systems: An Overview of Cross Layer Optimization Principles and Techniques, IEEE Network, volume 21, Issue 1, February 2007.
- [20] Ashagi, S. Murphy, L. Murphy, Mitigating Interference between IEEE 802.16 Systems Operating in License-exempt Mode, in Proc. of Wired/Wireless Internet Communications, 2005.
- [21] Heung Yeom Jae and Hwan Lee Yong, Mitigation of Inter-Cell Interference in the WiMAX System. Mobile WiMAX Symposium, 2007, IEEE.
- [22] Nicola Riato, Serrelli Federico, Sala Andrea, Capone Antonio, Interference Mitigation Strategies for WiMAX Networks. Wireless Communication Systems, 2007.
- [23] Yehia Hicham, Kamal Hany, Inter-System Interference Effect on WiMAX Network Performance. Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008. ICTTA 2008. 3rd International Conference on Information & Communication Technologies.
- [24] So-In Chackchai, Tamimi Abdel-Karim, Scheduling in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks: Key Issues and Survey, IEEE journal on Selected Areas in Communications, Volumen 27, Febrero 2009.
- [25] Belghith Aymen, Nuaymi Loutfi, Comparison of WiMAX scheduling algorithms and proposals for the rtPS QoS class, Wireless Conference, 2008. EW 2008. 14th European.
- [26] Liangshan Ma, Dongyan Jia, The Competition and Cooperation of WiMAX, WLAN and e3G, Mobile Technology, Applications and Systems, 2005.
- [27] Retnasothie Francis E., et al. "Wireless IPTV over WiMAX: Challenges and Applications", Wireless and Microwave Technology Conference, 2006.
- [28] She James, et al. "IPTV over WiMAX: Key Success Factors, Challenges and Solutions". IEEE Communications Magazine, August 2007, Volume 45, Issue 8.
- [29] Odd Inge, et al. "Delivery of On-Demand Video Services in Rural Area via IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Networks". IEEE International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Wireless multimedia networking and performance modeling, 2006.
- [30] Kalle Ritesh, Das Debabrata and Lele Abhijit. "On the Performance of Triple Play over http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=35 802.16e Based Networks for Rural Environments", IEEE Asia-Pacific Conference on Communications. 2007. APCC 2007.
- [31] Tsitserov Dimitri, Markarian Garik, Manuylov Ivan, "Real-Time Video Distribution over WiMAX Networks", accedido en: <http://www.cms.livjm.ac.uk/pgnet2008/Proceedings/Papers/2008019.pdf>
- [32] Niyato Dusit, Hossain Ekram and Diamond Jeffrey, "IEEE 802.16/WiMAX-Based Broadband Wireless Access and Its Application for Telemedicine/E-Health services", IEEE Wireless Communications, 2007.
- [33] Guainella E., et al., "WiMAX technology support for applications in environmental monitoring, fire prevention and telemedicine". IEEE Mobile WiMAX Symposium, 2007.
- [34] WiMAX Extension to Isolated Research Data Networks (WEIRD), <http://www.ist-weird.eu/>
- [35] Burbank J, Kash W.T., "IEEE 802.16 Broadband Wireless Technology and its Applications to the Military Problem Space". IEEE Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005.