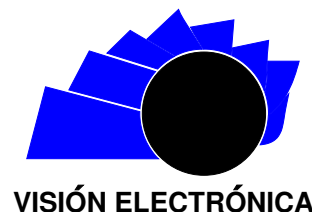




Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/index>



VISIÓN INVESTIGADORA

Técnicas de planificación de recursos en redes WIMAX

Resource scheduling techniques on WIMAX networks

Hermes J. Eslava B.¹, Ernesto Cadena M.², Ingrid P. Páez.³

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: Noviembre de 2014

Recibido: Noviembre de 2014

Aceptado: Febrero de 2015

Palabras clave:

Asignación de recursos

Algoritmos de planificación

Throughput

Comunicaciones inalámbricas



Keywords:

Resource allocation

Scheduling algorithm

Throughput

Wireless communications

RESUMEN

Se presentan los resultados de la investigación orientada a la revisión de la capa física y los algoritmos de planificación en WiMAX: RR, DRR, MDRR, WRR, en la asignación de recursos. Se da a conocer un escenario de simulación en donde se tienen una BS y cinco SS configuradas para generar tráfico de acuerdo a cada una de las clases de servicio soportadas en WiMAX: UGS, nrtPS, rtPS, ertPS, BE. Finalmente se exhiben los resultados de simulaciones evaluando el throughput de cada una de las clases de servicio, seleccionando como algoritmos de planificación de recursos: RR, MDRR y PQ.

ABSTRACT

This paper presents the research results oriented to review of the physical layer and the scheduling algorithms in WiMAX: RR, RRA, MDRR, WRR, in the allocation of resources. Are presented a simulation scenario where you have a BS-five SS configured to generate traffic according to each of the service classes supported in WiMAX:UGS, nrtPS, rtPS, ertPS, BE. Finally, it showed the results of simulations evaluating the throughput of each of the five classes of service, using as resource scheduling algorithms such as RR, MDRR and PQ.

¹Licenciado en Electrónica, Universidad Pedagógica Nacional (Colombia); especialista en Telemática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia); especialista en Instrumentación Electrónica, Universidad Santo Tomás (Colombia); magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Colombia (Colombia); doctor (c) en Ingeniería de Sistemas y Computación Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Director del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Teletecno; profesor asociado Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: hjeslavab@udistrital.edu.co

²Ingeniero en Telecomunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia); magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Profesor Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia), Centro de Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones. Correo electrónico: ecadenam@misena.edu.co

³Ingeniera Eléctrica, Escuela Colombiana de Ingeniería (Colombia); ingeniera Industrial, Universidad de Cantabria (España); doctora en Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad de Cantabria (España); docente investigadora, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá (Colombia), Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial. Correo electrónico: ippaezp@unal.edu.co

1. Introducción

El estándar IEEE 802.16 WiMAX pretende convertirse en la solución de última milla para proveer acceso inalámbrico, con un rango teórico desde 50 kilómetros empleando estaciones fijas y con rangos desde cinco a quince kilómetros para estaciones móviles; con velocidades de transferencia máxima de hasta 100 Mbps [1].

Igualmente, el estándar permite la operación en un rango de frecuencias licenciadas y no licenciadas. El rango de 10-66 GHz ha sido diseñado para operar con línea de vista LOS (Line of Sight) basado en modulación de portadora única SC (Single Carrier); sin embargo, este rango de frecuencias es el menos confiable ya que es susceptible a atenuación producida por lluvia y se presenta el fenómeno de multitrayectoria. En los rangos por debajo de 2-11 GHz puede operar sin línea de vista NLOS (Non Line of Sight) utilizando en el nivel físico PHY modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) que es un sistema de transmisión multiportadora en el que la información es transmitida empleando miles de subportadoras y cada usuario tiene completo control sobre esas subportadoras; en este caso la decisión del planificador es decidir qué slots de tiempo son asignados a cada suscriptor; en el caso de usuarios móviles, la decisión más acertada es reducir el número de subportadoras y aumentar la potencia. La combinación de acceso múltiple por división de frecuencia y tiempo es llamada OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access) [2], [3].

Dentro de los sistemas de 4G como LTE, LTE-Advanced y WiMAX, la asignación de recursos de radio es un tema de gran importancia debido a que estos son escasos, costosos y sus condiciones varían en el tiempo, por lo tanto su administración debe hacerse de forma dinámica. El estándar de WiMAX define los conceptos generales de los denominados RRM (Radio Resource Management), pero no especifica los algoritmos a utilizar dejando su implementación y diseño a los fabricantes de equipos [4]. Actualmente, hay una necesidad en las redes de 4G de administrar de forma más eficiente los recursos de nivel físico; la implementación de estos modelos es pertinente, ya que la tecnología está siendo implementada hoy en día en nuestro país y proyecta ser el estándar utilizado para servicios de 4G.

Por lo anterior, es preciso estudiar la posibilidad de mejora de las arquitecturas tradicionales basadas en capas, como el modelo OSI, de manera que permitan la comunicación entre ellas para optimizar el sistema y la comunicación general. Este tema, sumado a la complejidad del modelamiento de 4G-LTE, no ha sido abordado con suficiente profundidad y aún

faltan estudios para complementar la posibilidad de ir estandarizando los diseños que se puedan realizar para esta tecnología, buscando mejorar el manejo de la energía [5], la asignación de recursos [6], [7], [8], o la optimización general [9].

El artículo se estructura así: Inicialmente se describe el nivel físico de WiMax; luego se estudia la calidad de servicio en WiMax; posteriormente se describen los algoritmos de planificación de recursos en redes WiMAX; luego se exhiben los resultados del comportamiento de los diferentes planificadores en WiMAX a través de simulaciones que corren en diferentes servicios como son: VoIP, Http E-mail, PCM y video conferencia; finalmente se presentan las conclusiones.

1.1. Nivel físico WiMAX

El estándar 802.16 soporta varios tipos de modulaciones en la capa física, la primera de ellas SC (Single Carrier) está diseñada para frecuencias entre 10 a 60 GHz y requiere LOS (Line Of Sight). Por esta razón, no se encuentran muchos equipos comerciales; para la versión de WiMAX fijo (802.16-2004) fijo con frecuencias entre 2-11 GHz se emplea OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), en este caso no se requiere línea de vista, alcanza velocidades de hasta 75 Mbps y alcance hasta de 10 km. Para la versión de WiMAX móvil (802.16e) se emplea OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), que opera en un rango de frecuencias entre 2-6 GHz, alcanzando velocidades de transmisión de hasta 30 Mbps y un alcance máximo de 3.5 Km [10], [11].

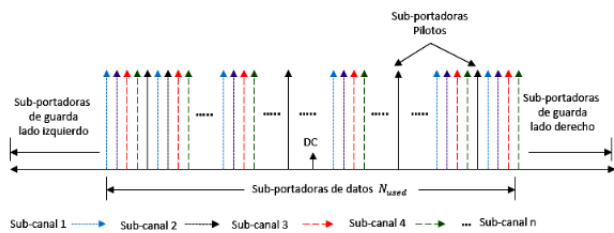
De otra parte, el estándar WiMAX 802.16 en la capa MAC es orientado a la conexión, en donde el nivel físico de WiMAX es el encargado de la transmisión de bits a través de canal de radio; para ello debe tener en cuenta algunos aspectos como tipo de modulación a emplear, bits que serán utilizados para el control de errores, entre otros. WiMAX utiliza como técnica de modulación OFDM para la versión fija y OFDMA para la versión móvil.

Sin embargo, no todas las portadoras en OFDMA son utilizadas para transmitir datos; existen cuatro tipos de subportadoras: datos; pilotos, utilizadas con fines de sincronización; nulas, empleadas como guardas (las guardas son distribuidas simétricamente a la derecha e izquierda de las portadoras de datos la guardas de la izquierda mayor en uno que las guardas de la derecha); DC, correspondiente a la frecuencia central RF [11], la distribución de estas subportadoras puede apreciarse en la figura 1. Es importante notar que un símbolo OFDMA está conformado por un número de subportadoras.

La frecuencia de la portadora y los anchos de banda

son adquiridos por los operadores mediante licitación; los principales anchos de banda del sistema WiMAX son: 1,25 MHz; 3,5 MHz; 5 MHz; 8,75 MHz; 10 MHz; y 20 MHz. En cuanto a los modos de operación, WiMAX tienen dos: FDD y TDD. En el modo FDD se tiene dos frecuencias: una para el canal descendente DL y otra para el canal ascendente UL, lográndose de esta forma comunicaciones Full-duplex. En el modo TDD se tiene solo una frecuencia que debe ser compartida entre el DL y el UL, de tal manera que la trama debe ser dividida en un número entero de slots PS.

Figura 1: Tipos sub-portadoras en un símbolo OFDM [12]



El número de soportadoras en un símbolo OFDMA está determinado por el tamaño de la FFT utilizada; los tamaños de FFT soportados en WiMAX móvil son: 128; 512; 1024; y 2048 (en la versión móvil no se utiliza el FFT de 256). Aunque en el estándar no se utiliza el término OFDMA escalable (SOFDMA), sí se implementa, ya que el espaciado de frecuencia entre soportadoras Δf es constante: 10,94 KHz para todos los anchos de banda. El espacio entre una subportadora y otra es determinado por la expresión (1) [12]:

$$\Delta f = F_s / N_{FFT} \quad (1)$$

Donde N_{FFT} es el número de puntos empleados en la FFT y F_s es la frecuencia de muestreo, que puede determinarse mediante la expresión (2):

$$F_s = \text{floor} \left(\frac{nBW}{8000} \right) 8000 \quad (2)$$

La función floor, redondea el valor de F_s al valor entero más bajo, truncando F_s a un múltiplo de 8 kHz.

Por otra parte, el factor de muestreo n depende del ancho de banda y puede calcularse mediante $n = F_s / BW$, lo valores típicos según el estándar son 8/7; 86/75; 144/25; 316/275; y 28/25.

La duración de un símbolo T_s está determinada el tiempo útil del símbolo más el tiempo de guarda de los símbolos T_s , el tiempo de guarda T_g es utilizado para transmitir el prefijo cíclico CP, $T_g = Tb \times G$, el parámetro G en WiMAX es una fracción calculada

mediante $G = 1/2^m$, donde $m = \{2, 3, 4, 5\}$ es indicada por la ecuación (3)

$$T_s = Tb + Tg = (1 + Tg)Tb = \frac{(1 + G)}{\Delta f} \quad (3)$$

La selección que se haga del valor de G dependerá de las condiciones del canal, si el efecto multirayectoria es importante y las condiciones del canal no son las mejores se debe escoger un valor de G alto, con lo que se aumenta la redundancia del CP. El estándar indica que durante la fase de inicialización las SS utilizara todos los posibles valores de G hasta encontrar el CP utilizado por la BS, este valor será utilizado tanto en el UL como en el DL, una vez se ha fijado este valor no puede ser cambiado por la SS. Si se cambia el CP todas las estaciones SS deberán resincronizarse [12], [13].

Finalmente, la señal transmitida por la antena, en el dominio del tiempo, está dada en (4):

$$S(t) = Re \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{k = -\frac{(N_{used}-1)}{2}}^{\frac{N_{used}-1}{2}} C_k e^{j2\pi k \Delta f (t-T_g)} \right\} \quad (4)$$

Donde t es el tiempo entre $0 < t < T_s$ y C_k es un número complejo que corresponde a la representación del dato a ser transmitido sobre la subportadora, cuya frecuencia está dada por el índice de k .

Calidad de servicio en redes WiMAX

A diferencia de las redes Wifi en donde todas las aplicaciones reciben el mismo nivel de QoS, WiMAX ofrece cinco clases QoS según el tipo de aplicación que se esté utilizando. Es así como en el control de admisión se limita el número de conexiones a la red, examinando el tipo de QoS que demanda cada SF, estableciendo si estos requerimientos pueden ser atendidos. La información del usuario proveniente de capas superiores y viene marcada con un TOS (Type of Service) sobre cada paquete; en la capa MAC el paquete es clasificado según la clase de servicio. Las cinco clases de servicio soportadas por WiMAX son: [14].

- **UGS (Unsolited Grant Services):** diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real, que se caracteriza porque sus paquetes de datos tienen un tamaño fijo, con un CBR, se emiten a intervalos periódicos. Como ejemplo se tienen los sistemas T1/E1, en la transmisión de señales telefónicas basadas en PCM y voz sobre IP sin supresión de silencios, busca mantener una baja latencia y

bajo Jitter. En la clase de servicio UGS la BS provee recursos para la transmisión de datos de tamaño fijo a intervalos periódicos, eliminando de esta forma el overhead y la latencia en las SS cuando hacen requerimientos.

- **rtPS (Real-time Polling Services):** diseñado para soportar flujos de datos de tamaño variable que son emitidos a intervalos periódicos, esto podría ser el caso, por ejemplo, de video Moving Pictures Experts Group (MPEG, por sus siglas en inglés). En esta clase de servicio las BS proveen oportunidades de solicitudes periódicas unicast en el UL con la cual establece las necesidades de los flujos de datos de tiempo real, permitiendo a las SS especificar el tamaño requerido. Este servicio requiere mayores sobre encabezados (overhead) que UGS, pero debe soportar asignación de tamaño variable para optimizar el transporte eficiente de aplicaciones de tiempo real.
- **ertPS (Extended Real-Time Polling Services):** adicionado al estándar 802.16e, el ertPS es un algoritmo de planificación diseñado sobre las características de eficiencia de UGS y rtPS. En este caso la BS provee un mecanismo de concesión de recursos en forma periódica no solicitada al igual que en UGS, guardando los requerimientos de ancho de banda y latencia. Sin embargo, mientras las asignaciones UGS son de tamaño fijo en ertPS la asignación es dinámica. ertPS es una clase de servicio adecuado para aplicaciones de tiempo real de tasa variable con requerimientos de data rate y retardo, por ejemplo, voz sobre IP con supresión de silencios.
- **nrtPS (Non Real-time Polling Services):** diseñado para soportar flujos de datos con tolerancia al retardo que consisten en transmisión de paquetes de datos de tamaño variable en los que se requiere un mínimo de data rate, el estándar considera que este puede ser el caso de transmisiones FTP.
- **BE (Best Effort):** diseñado para soportar flujos de datos en los cuales no se garantiza un mínimo de calidad de servicio. Puede pasar periodos largos de tiempo sin que se transmita ningún paquete.

2. Planificación de recursos en redes WiMAX

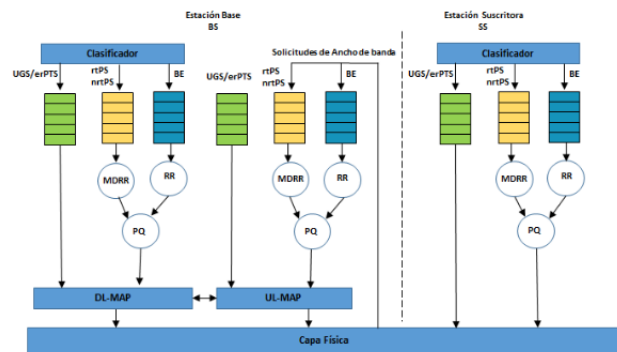
El control de admisión de la BS (Base Station) limita el número de conexiones a la red examinando en cada SF los requerimientos de QoS y verificando que estos puedan ser cumplidos de acuerdo con los recursos disponibles.

La BS WiMAX cuenta con dos planificadores una para DL-MAP y otro para UL-MAP, en donde la BS determina el orden en el cual serán atendidos los paquetes una vez son clasificados en una clase de servicio ya sea UGS, rtPS, ertPS, nrtPS, BE.

La transmisión que se basa en SF permite una asignación de recursos eficiente en un sistema que comparte el recurso radio, al tener un control permanente en el uso del ancho de banda, lo que brinda al usuario una mejor experiencia y aumento en el nivel de satisfacción.

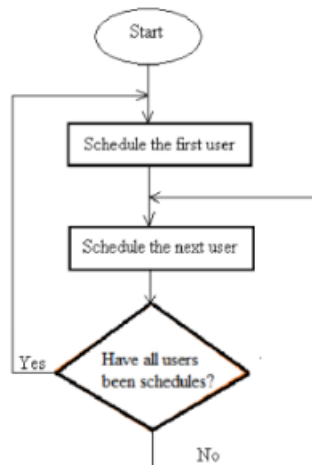
Como puede observarse en la figura 2, después de que el paquete es clasificado en una clase de servicio, pasa a una cola en donde debe esperar para ser transmitido. Las clases de servicio UGS/ertPS son atendidos directamente sin necesidad de someterse a ningún algoritmo de planificación, ya que sus paquetes son sensibles al retardo. Los servicios basados en PS como son rtPS, nrtPS son encolados y atendidos conforme al algoritmo de planificación MDRR (Modified Deficit Round Robin), los paquetes clasificados como BE son atendidos mediante el algoritmo WRR (Weighted Round Robin). Los paquetes PS tendrán prioridad sobre los clasificados como BE, de tal forma que solo serán transmitidos si la cola PS se encuentra vacía [14].

Figura 2: Planificador WiMAX [14]



3. RR (Round Robin)

La asignación de los recursos a los usuarios no tiene en cuenta las condiciones del canal. Se centra en el principio de fairness, ya que a todos los usuarios se les asigna la misma cantidad de recursos. La eficiencia es baja porque al no tener en cuenta las condiciones del canal, disminuye el throughput del sistema. El diagrama se puede observar en la figura 3.

Figura 3: Algoritmo Round Robin para planificación de recursos [15]

3.1. Algoritmo MDRR (Modified Deficit Round Robin)

El MDRR es considerado un extensión del algoritmo DRR [16], al igual que en RR se recorren todas las colas $Q[i]$ en busca de paquetes para transmitir, solo se atenderán las colas que no estén vacías, si la cola no contiene paquetes para transmitir el DC (contador de déficit) será cargado con un valor de cero.

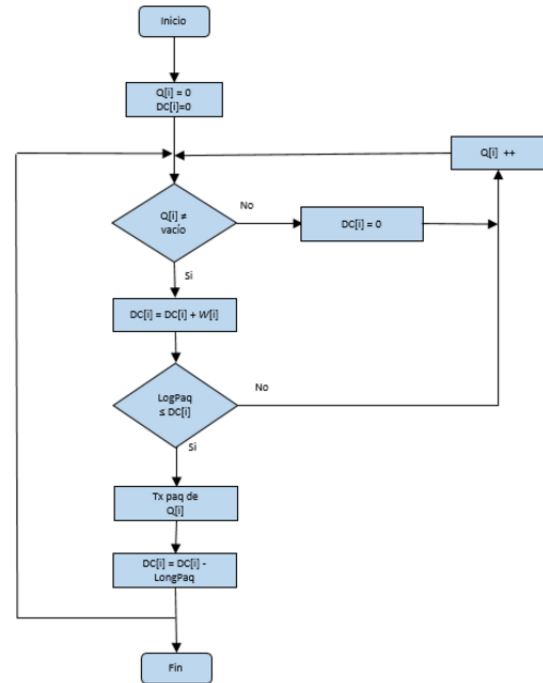
El diagrama de flujo de la figura 4 muestra el funcionamiento del algoritmo MDDR, como se muestra en el diagrama, solo se puede atender la cola y transmitir el símbolo, si el símbolo a la cabecera de la cola tiene una longitud en bytes menor que el valor almacenado en el contador de Déficit $DC[i]$, el símbolo es transmitido y el DC es actualizado con el valor resultante de restar la longitud el símbolo que se transmitió y el valor almacenado en $DC[i]$, se tiene un DC para cada.

Si la cola no está vacía pero el paquete en la cabecera tiene una longitud menor al valor almacenado en el $CD[i]$, el paquete no se transmite quedando en espera en la cola, se procede entonces a incrementar el CD sumándole un peso y pasa a evaluar la siguiente cola $Q[i]$. Si por el contrario la cola está vacía el contador de DC se reinicia a cero.

El peso W_i puede calculado mediante la expresión (5) [14]:

$$W_i = MTU + 512 \left(\frac{MRTR + 512}{CapacidadTotal} \right) 100 \quad (5)$$

Dónde: MTU Unidad Máxima de Transferencia 1500 bytes, $MRTR$ Mínima tasa de tráfico reservado, $CapacidadTotal$ del enlace.

Figura 4: Algoritmo MDRR

Fuente: Elaboración propia.

En la eficiencia del algoritmo es fundamental el valor que se asigne a W_i , si ese valor es muy pequeño se desperdiciarán recursos, al no transmitir símbolos. Si por el contrario su valor es muy elevado, todos los símbolos se transmitirán en cada ronda y su comportamiento y eficiencia será igual a RR. Como se puede ver en el valor de W_i debe ser de por lo menos un para permitir que se transmita mínimo un paquete en la primera ronda. Ver ecuación (5).

La MRTR (Minimum Reserved Traffic Rate) representa la tasa mínima en bps que es reservada para cada flujo de servicio, la BS atenderá las solicitudes de ancho de banda hasta el valor definido en la MRTR, si la SS solicita un valor menor al fijado en la MRTR la BS la utilizará la capacidad excedente para atender otras solicitudes. Por otra parte, la tasa de máximo tráfico sostenido MSTR (Maximum Sustained Traffic Rate) representa el límite superior de la tasa de tráfico permitida a la SS en bps, es utilizada para verificar el límite de los usuarios en cuanto a las asignaciones del ancho de banda que no deben exceder la capacidad total de transmisión como se pude observar en la ecuación (5).

Algoritmo WRR (Weighted round robin)

WRR es un algoritmo de planificación de recurso diseñado para ser utilizado con celdas o paquetes de

tamaño fijo, los paquetes son clasificados y puestos en una cola que es recorrida en forma RR, solo se atenderán las colas que contengan paquetes, el máximo de paquetes que pueden ser atendidos en cada cola dependerá del peso calculado para cada una de ellas. El peso W_i es una constante tipo entero, que es determinada de acuerdo al ancho de banda solicitado.

Para calcular el peso W_i de cada cola se debe considerar el tamaño promedio del paquete, la mínima tasa de tráfico reservada (MRTR) y la tasa de máximo tráfico sostenido (MSTR) que se divide el tamaño promedio de los paquetes por el porcentaje del tamaño promedio de los paquetes [17], [18].

Este algoritmo es una variación de RR en donde se recorren las colas que no estén vacías, se atiende un número de paquetes dependiendo de un peso normalizado que se divide por el porcentaje del tamaño promedio de los paquetes, (6) [17].

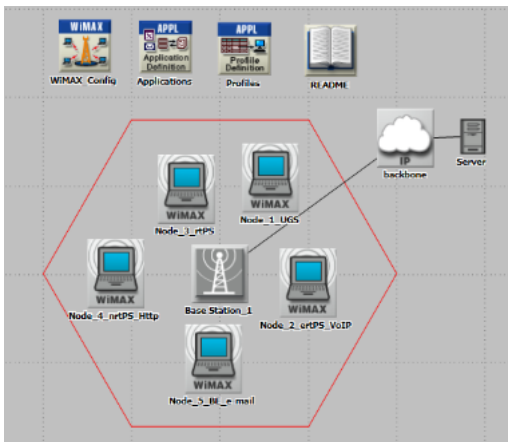
$$W_i = \frac{MRTR_i}{\sum_{j=1}^n MRTR_j} \quad (6)$$

Uno de los problemas en WRR es cuando el tamaño del paquete es variable [17], por esto es conveniente utilizarlo en una cola de paquetes con tamaño fijo.

4. Resultados

Para analizar el comportamiento de los diferentes planificadores en WiMAX se simuló una BS y cinco SS, cada una corriendo diferentes servicios como son: VoIP, Http E-mail, PCM y video conferencia. La figura 5 muestra el escenario de simulación utilizada, se tomó una hora como tiempo de simulación.

Figura 5: Escenario de simulación red WiMAX



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se puede observar el tráfico generado por cada una de las clases de servicio soportadas por WiMAX, como son: ertPS que fue simulada como un servicio de VoIP con supresión de silencios, trafico nrtPS, se simuló mediante un servicio Http, para el servicio BE se modeló mediante un servidor de E-mail, en el caso de clase de servicio UGS fue simulada mediante un tráfico de voz empleando un encoder G 711 con supresión de silencios.

Figura 6: Throughput las clases de servicio ertPS, nrtPS, BE, UGS

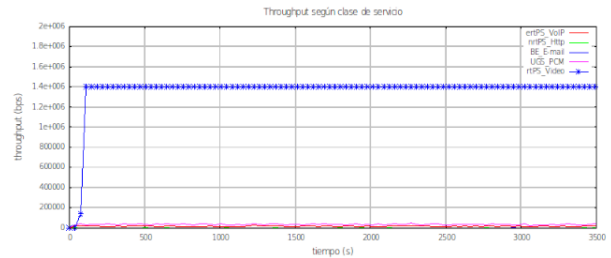


Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse cómo el throughput de servicios como BE y Http son menores en comparación a servicios que son sensibles al retardo, como son UGS y ertPS.

En la figura 7 se observa el tráfico de la clase de servicio rtPS, cuya magnitud es muy superior a las demás clases de servicios cercanas a 1.4 Mbps, ya que los paquetes marcados en el TOS como tráfico de video conferencia son priorizados y la red siempre garantizara los recursos.

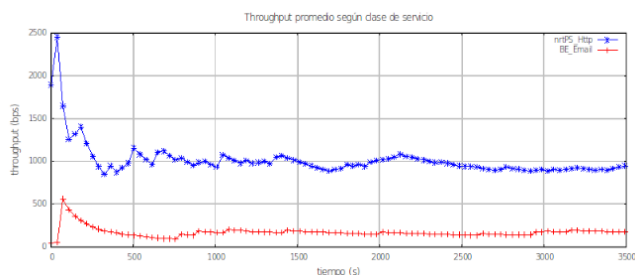
Figura 7: Throughput rtPS vs UGS ertPS, nrtPS, BE



Fuente: Elaboración propia.

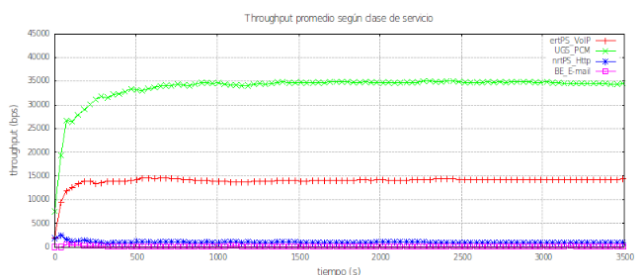
Para facilitar el análisis del throughput se tomaron los resultados obtenidos y se calculó la media, en la figura 8 se puede observar que el throughput promedio de la clase de servicio nrtPS fue de 931 bps y en el caso de BE el throughput promedio resultante es de 173 bps.

Figura 8: Throughput promedio de las clases de servicio nrtPS y BE



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9: Comparación del Throughput promedio de las clases de servicio UGS, ertPS, nrtPS, y BE



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9 se puede observar cómo el tráfico UGS modelado mediante un servidor que transmite voz codificada en PCM alcanza niveles de 35 Kbps, frente al tráfico de VoIP ya que estos servicios se desencolan directamente sin tener que competir por los recursos de la red. Contrario a las clases de servicio BE y nrtPS que son atendidos conforme a los algoritmos RR y MDRR respectivamente.

5. Conclusiones

Mediante el análisis de la capa física se logran identificar los diferentes elementos que componen los planificadores de recursos en redes WiMAX, sus principales algoritmos para atender las diferentes demandas de QoS. Mediante los resultados de simulación se demuestra cómo se prioriza el tráfico sensible al retardo garantizando recursos de red, pero sacrificando servicios como la navegación web y el envío de E-mail.

Utilizando herramientas como el diseño Cross-Layer y su inclusión en los algoritmos de planificación de recursos, se espera obtener algoritmos que permitan un

mejor balance entre throughput y fairness para todos los usuarios conectados a la red, mejorando también temas como la calidad de la experiencia.

Referencias

- [1] “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”. 2004.
- [2] W. P. Furlong and R. Guha, “OFDMA Extension of NS-3 WiMAX Module”. Computer Modeling and Simulation (EMS), 2010 Fourth UKSim European Symposium on, pp. 426–431, 2010.
- [3] M.A. Ismail, G. Piro, L.A. Grieco, and T. Turetletti, “An Improved IEEE 802.16 WiMAX Module for the NS-3 Simulator”. Proceedings of the Second International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, Malaga, 2010.
- [4] R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez-Romero, and O. Sallent, “LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles”. Fundación Vodafone España, 2010.
- [5] T. Melodia, M. Vuran, and D. Pompili, “The State of the Art in Cross-Layer Design for Wireless Sensor Networks”. Wireless Systems and Network Architectures in Next Generation Internet, vol. 3883, M. Cesana and L. Fratta, Eds. Springer Berlin Heidelberg, pp. 78-92, 2006.
- [6] Y. Fang and A. B. McDonald, “Dynamic codeword routing (DCR): a cross-layer approach for performance enhancement of general multi-hop wireless routing”. Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on, pp. 255-263, 2004.
- [7] L. Van Hoesel, T. Nieberg, J. Wu, and P. J. M. Havinga, “Prolonging the lifetime of wireless sensor networks by cross-layer interaction”. Wireless Communications, IEEE, vol. 11, no. 6, pp. 78-86, Dec. 2004.
- [8] M. C. Vuran, V. C. Gungor, and O. B. Akan, “On the interdependency of congestion and contention in wireless sensor networks”. pp. 136-147, 2005.
- [9] A. Ukil, “Cross-layer optimization in QoS aware next generation wireless networks” Information, Communications and Signal Processing, 2009. ICICS 2009. 7th International Conference on, pp. 1-5, 2009.

- [10] S.-I. Chakchai, R. Jain, and A.-K. Tamimi, "Scheduling in IEEE 802.16e mobile WiMAX networks: key issues and a survey". Selected Areas in Communications, IEEE Journal on DOI - 10.1109/JSAC.2009.090207, vol. 27, no. 2, pp. 156-171, 2009.
- [11] L. Nuaymi, WiMAX: technology for broadband wireless access. John Wiley & Sons, 2007.
- [12] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems". May-2009. [En línea]. Disponible en: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2009.pdf>
- [13] M. Ergen, Mobile broadband: including WiMAX and LTE. Springer Science & Business Media, 2009.
- [14] G. D. Castellanos and J. Y. Khan, "Performance of WiMAX packet schedulers for multi-class traffic". Communications (LATINCOM), 2010 IEEE Latin-American Conference on, pp. 1-6, 2010.
- [15] T. Dikamba, "Downlink Scheduling in 3GPP Long Term Evolution (LTE)". Delft University of Technology, 2011.
- [16] K. Mnif, R. Khedher, and L. Kamoun, "Evaluation and comparison of scheduling algorithms in Wimax networks". 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), pp. 884-889, 2014.
- [17] N. M. El-Shennawy, M. A. Youssef, M. N. El-Derini, and M. M. Fahmy, "A dynamic uplink scheduling scheme for WiMAX networks". 2013 8th International Conference on Computer Engineering Systems (ICCES), pp. 111-115, 2013.
- [18] W. Mardini and M. A. Alfool, "Modified WRR Scheduling Algorithm for WiMAX Networks". Network Protocols and Algorithms, vol. 3, no. 2, pp. 24-53, Aug. 2011.