Nexo Revista Científica

Vol. 20, No. 02, pp. 90-101 / Noviembre 2007

ISSN 1818-6742
Impreso en Nicaragua
www.uni.edu.ni/Nexo

Integración óptima de sistemas de antenas adaptivas en redes inalámbricas *multihop* ad hoc utilizando TDMA generalizado como protocolo de acceso al medio

M. Sánchez* y M. Munguía

Facultad de Electrotecnia y Computación, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)
PO Box 5595, Managua, Nicaragua
E-mails: {marvin.sanchez; marcos.munguia}@uni.edu.ni

(recibido/received: 15-Junio-2007; aceptado/accepted: 22-Oct-2007)

RESUMEN

En este artículo se estudia la integración efectiva de sistemas de antenas adaptivas (AAS) para mejorar el desempeño, en términos de capacidad de tráfico (*throughput*) y retardo de paquetes, en redes de transmisión de datos inalámbricas *multihop* ad hoc utilizando TDMA generalizado como protocolo de acceso al medio. El diseño óptimo del sistema para maximizar el *throughput* total de la red se deriva analíticamente tanto para tráfico *unicast* como para tráfico *multicast* y se valida mediante la simulación de eventos discretos. Los resultados mostraron una ganancia significativa como producto de la utilización de AAS con respecto al desempeño de sistemas que utilizan antenas omnidireccionales. La transmisión a través de antena omnidireccional y recepción direccional es más adecuada para la transmisión de tráfico *multicast*. Para tráfico *unicast* el uso de transmisión y recepción direccional es más conveniente, lo que resulta en mucha mayor ganancia con respecto a la transmisión y recepción omnidireccional.

Palabras claves: redes *multihop* ad hoc; sistemas de antenas adaptivas; TDMA generalizado

ABSTRACT

This paper studies the integration of advanced antennas systems (AAS) in multihop ad hoc data networks to increase the overall network performance, in terms of throughput and packet delays, utilising generalised TDMA as MAC protocol. The optimal design of the system, to maximize the throughput of the network, is derived analytically for multicast traffic as well as for unicast traffic and validated by discrete event simulation. Results showed a meaningful gain due to the utilisation of AAS compared to the performance of omnidirectional antenna systems. Transmission through omnidirectional antennas and directional antenna reception is more appropriate for multicast traffic. On the other hand, directional transmission and reception is more convenient for unicast traffic which results in higher gains compared to omnidirectional transmission and reception.

Keywords: advanced antenna systems; generalised TDMA; multihop ad hoc networks

*Autor para la correspondencia

INTRODUCCIÓN

La investigación y desarrollo de tecnologías inalámbricas en general, se determina por el éxito potencial en mercados atractivos donde los usuarios tienen los suficientes ingresos para pagar el precio del *hardware*, de la infraestructura y los servicios. Sin embargo, alrededor del 40 % de la población mundial vive en áreas rurales de países en vías de desarrollo y no tienen acceso a servicios básicos de telecomunicaciones (ITU, 2004). El proveer acceso a los servicios básicos de telecomunicaciones es de mucha importancia tanto para los gobiernos como para la sociedad en su conjunto. Sin embargo, cualquier solución tecnológica a ser implementada enfrenta el reto de que los usuarios potenciales se encentran dispersos en un área geográfica extensa (lo que significa una baja densidad de usuarios /km^2) y tienen bajos ingresos.

Pueden existir varias posibles soluciones tecnológicas para proveer comunicación en áreas rurales, por ejemplo, ampliando el área de servicio de las redes celulares. Algunos países como Bolivia, Nicaragua y Perú han implementado métodos de incentivo económico para ampliar el área de servicio de la telefonía celular a zonas rurales a través del denominado fondo de servicio universal administrado por estos gobiernos (Stephens, 2004). La ampliación del área de servicio para la red celular en zonas de baja densidad de usuarios puede, por ejemplo, implementarse utilizando bandas de frecuencia relativamente bajas e.g. 450MHz (antes utilizadas por NMT450 en Europa y actualmente se utiliza tecnología 3G CDMA2000). Otra alternativa potencial de "bajo costo" es el uso de tecnología inalámbrica *multihop* ad hoc.

En este documento, el término *multihop* ad hoc es usado para indicar que la fuente de información conectada a un nodo (*transceivers* con funcionalidad de *router*) Origen es transportada a través de la red hasta el nodo Destino utilizando paquetes de datos que pueden ser reenviados a través nodos intermedios. El término ad hoc indica que la red es autoconfigurable lo que elimina la necesidad de planeamiento o intervención de un experto para su despliegue. La Fig. 1 ilustra una red *multihop* ad hoc con cuatro nodos. En este caso la comunicación entre los nodos A y E es posible utilizando paquetes de datos enviados desde el origen A hacia B luego reenviados en un instante posterior a C quien luego los reenvía hacia D y finalmente es recibido en el destino E desde D.

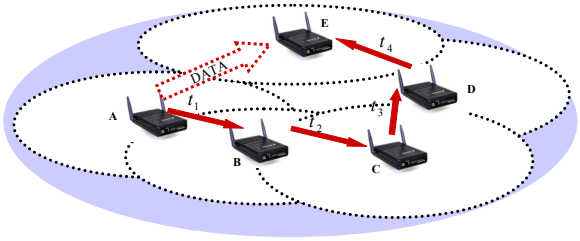


Fig. 1 Red *multihop* ad hoc. El radio alcance de un nodo es ampliado utilizando otros nodos como *relays*.

Si un nodo utiliza potencia de transmisión constante, la potencia recibida disminuye al aumentar la distancia desde el transmisor, una forma de incrementar el radio alcance desde un nodo es la de disminuir el *bit rate*, es decir adaptando el *bit rate* en función de la potencia recibida. Esta relación puede observarse mejor a través del teorema de capacidad de Shannon. El límite para la máxima velocidad de transmisión de datos libre de error, R (bps), a través del ancho de banda W (Hz) sujeto a interferencia más ruido en el receptor, está dada por:

$$R < W \log_2\left(1 + \frac{P_{Rx}}{P_I + P_{Ruido}}\right) \qquad (1)$$

donde P_{Rx} es la potencia recibida en el sitio del receptor, P_I es la potencia total de interferencia a la entrada del receptor (e.g. ocasionada por la transmisión de otros nodos utilizando la misma banda de frecuencia) y P_{Ruido} es la potencia de ruido referida a la entrada del receptor. De esta forma también se puede transmitir de manera simultánea utilizando el mismo canal en partes de la red que se encuentran suficientemente separadas como para producir una potencia de interferencia despreciable. Lo anterior resulta en la reutilización espacial del espectro radioeléctrico.

Sin embargo, las redes *multihop* ad hoc tienen limitaciones de capacidad debido a su misma funcionalidad. Conforme se incrementa el número de nodos en la red, se incrementa tanto el tráfico externo (generado por más usuarios) como el tráfico interno resultante del procedimiento de almacenamiento y reenvío entre nodo Origen y Destino. Gupta y Kumar (2000) han realizado un análisis de la capacidad límite para redes *multihop* ad hoc.

La capacidad de las redes *multihop* ad hoc puede incrementarse utilizando sistemas de antenas adaptivas (AAS). El término sistemas de antenas adaptivas es usado en este artículo para indicar la utilización de varios elementos de antena (arreglo) cuyas señales son procesadas adaptivamente por una red de combinación (similar definición es utilizada para sistemas de antenas inteligentes por Liberti y Rappaport (1999), arreglos adaptivos por Godara (1997), y sistemas MIMO por Gesbert *et al*. (2003)). El método de adaptación utilizado en las evaluaciones numéricas en este estudio es *switched beam*, en el cual el AAS se compone de múltiples patrones de radiación apuntando en direcciones fijas. En este caso el transmisor (o el receptor) pueden seleccionar un patrón de radiación para transmitir (o para recibir). Otros métodos de adaptación son *beam-steering* (también referido solo como *beamforming*) así como *adaptive beamforming and null-steering* (Godara, 1997) y la metodología empleada en este artículo es directamente aplicable para tales métodos.

La utilización efectiva de AAS está estrechamente relacionado a la administración de los recursos del sistema de radio comunicación, controlado a través del protocolo de acceso al medio (MAC). EL uso de antenas direccionales con protocolos de contención como *slotted* ALOHA han sido investigados desde inicios de los 90s (Zander, 1990). Recientemente, un gran número de artículos han analizado el uso de AAS con algunas variantes del protocolo *distributed coordination function* (DCF) del estándar IEEE 802.11™ (IEEE, 1999), e.g. Ramanathan *et al*. (2005).

El análisis de MAC libres de conflicto como *time division multiple accces* utilizando antenas omnidireccionales en redes *multihop* ad hoc ha sido investigado por Xiao *et al*. (2004) y Farman *et al*. (2004). AAS con *spatial reused* TDMA utilizando potencia de transmisión y *bit rate* constantes han sido estudiados por Sánchez *et al*. (2002) y Dyberg *et al*. (2002).

El presente estudio trata sobre la utilización óptima de AAS con TDMA generalizado. TDMA generalizado es un protocolo MAC donde cada nodo recibe un número de ranuras de tiempo (o *slots*) proporcional a su demanda de tráfico (Bertsekas y Gallager, 1992).

La asignación óptima de ranuras de tiempo se deriva analíticamente para maximizar el *throughput* total de la red que produce un tiempo promedio de transmisión de paquetes finito entre el nodo origen y el nodo destino. En nuestras derivaciones analíticas y evaluaciones numéricas utilizamos diferentes políticas de adaptación de antenas con potencia constante y *bit rate* adaptivo. Los resultados aquí mostrados han sido parcialmente presentados por Sánchez y Munguía (2005).

METODOLOGÍA

La red está compuesta por N nodos los cuales se identifican unívocamente a través de su correspondiente número (e.g. nodo i donde i = 1….N). En dependencia del escenario donde la red es desplegada, las condiciones de radiopropagación atenúan la señal limitando la conectividad entre nodos. El fenómeno de radiopropagación, potencia utilizada, esquema de modulación, al igual que el AAS es reflejado en nuestro modelo de capa física.

Modelo de la capa física

a) Modelo de propagación y potencia recibida

La potencia recibida está dada por:

$$P_{ij} = P_i G_{ij} A_{ij}\left(\theta_{ij}\right) A_{ji}\left(\theta_{ji}\right) \qquad (2)$$

donde P_{ij} es la potencia recibida en el nodo j cuando transmite nodo i, P_i es la potencia de transmisión utilizada por el nodo i, G_{ij} es ganancia de radio propagación entre nodo i y nodo j, $A_{ij}(.)$ es el patrón de radiación de antena utilizado por el nodo i para transmitir al nodo j y θ_{ij} es el ángulo hacia el nodo j como es observado desde el nodo i.

En nuestras evaluaciones numéricas y con el objeto de obtener resultados directamente explicables, utilizamos un modelo simple de radio propagación dependiente de la distancia en el que $G_{ij} \propto d_{ij}^{-\alpha}$, donde d_{ij} es la distancia entre el nodo i y el nodo j y α es el exponente de pérdidas de radio-trayecto. El valor de $\alpha = 3$ es utilizado en nuestra evaluación el cual corresponde al escenario de áreas rurales.

b) Modelo de antena

Utilizamos *switched beam* como técnica de AAS. En este caso el AAS tienen M sectores ortogonales cubriendo 360°. El patrón de radiación en el plano horizontal de la antena utilizado por un nodo i en cualquier sector $s=1\ldots M$ está dado por:

$$A_i(\theta,s)=\begin{cases}\dfrac{2\pi}{\phi_h}; & (s-1)\phi_h<\theta<s\phi_h\\ \dfrac{1}{a_{sl}}; & \text{otros casos}\end{cases} \tag{3}$$

c) *Bit rate* adaptivo

Se modela el sistema de transmisión/recepción con esquemas de modulación multinivel para el uso de *bit rate* adaptivo. Se asume que el *bit rate* al cual un enlace puede transmitir esta dado por el teorema de capacidad de Shannon:

$$R < W\log_2\left(1+\gamma_0\right) \tag{4}$$

El sistema tiene la capacidad de seleccionar entre un conjunto discreto de *bit rates* (a través de múltiples niveles de modulación y diferentes razones de códigos para corrección de errores), de forma que si R_0 es el *bit rate* cuando se tiene una razón señal a ruido γ_0, entonces la razón señal a ruido requerida para transmitir con un *bit rate* R_i está dado por:

$$\gamma_i = \left(1+\gamma_0\right)^{\frac{R_i}{R_0}} - 1 \tag{5}$$

En nuestras evaluaciones numéricas asumimos que el sistema utiliza *bit rate* R_0, $2R_0$ y $4R_0$, con $\gamma_0 = 10$ dB, $\gamma_1 = 20.79$ dB y $\gamma_2 = 41.66$ dB. Para determinar el *bit rate* a que un enlace puede transmitir, se determina la potencia recibida dividida entre la potencia de ruido del sistema dado por $P_{noise} = k\,T_0\,B\,F_{sys}$ con constante de Boltzmann $k=1.38\times10^{-23}$ J/K, $T_0=290$ K, y F_{sys} es la figura de ruido del receptor (en nuestra evaluación se asume igual a 15 dB) y B es el ancho de banda equivalente de ruido del receptor (se asume igual al mínimo *bit rate* del sistema, en los ejemplos numéricos $B=R_0$).

Partiendo de la ecuación (2), podemos determinar la SNR en el receptor para cada radio-enlace (i, j) por:

$$\gamma_{ij} = \frac{P_{ij}}{kT_0BF_{sys}} = \frac{P_iG_{ij}A_i\left(\theta_{ij}\right)A_j\left(\theta_{ji}\right)}{kT_0BF_{sys}} \tag{6}$$

Así, el *bit rate* discreto para cada radio enlace entre nodos es determinado mediante:

$$R_{ij}(\gamma_{ij})=\begin{cases}0 & \text{for } \gamma_{ij}<\gamma_0\\ R_0 & \text{for } \gamma_0\le\gamma_{ij}<\gamma_1\\ R_1 & \text{for } \gamma_1\le\gamma_{ij}<\gamma_2\\ & \vdots\\ R_i & \text{for } \gamma_{ij}\ge\gamma_i\end{cases} \tag{7}$$

Modelo de capa de enlace

La topología de la red es analizada a través de la conectividad y el número promedio de vecinos a

un nodo. Definimos el número promedio de vecinos como:

$$E[\text{vecinos}]=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} n_i \qquad (8)$$

donde n_i es el número total de nodos que se encuentran a un solo salto del nodo i. El estudio se limita a redes conectadas, es decir aquellas para las que existe un número finito de saltos entre cada par de nodos en la red. Es fácil demostrar que el límite superior para la ecuación (8) es N-1 para una red totalmente conectada. La conectividad de la red se define entonces por:

$$C=\frac{1}{N-1}E[\text{vecinos}]=\frac{L}{N(N-1)} \qquad (9)$$

donde L es el número de radioenlaces entre nodos existentes en la red.

Dos tipos de tráfico son analizados, el tráfico *multicast* (en particular *broadcast*) y el tráfico *unicast*.

Modelo de capa de red y tráfico

a) *Routing* y tráfico *multicast*

En este caso un paquete es generado por la fuente conectada a un nodo (tráfico externo) con destino para todos los nodos en la red. Se asume que el tráfico externo total de la red *multihop* ad hoc tiene distribución de Poisson con razón de arribo λ (paquetes/ranura de tiempo) igualmente distribuido entre los nodos, es decir, la razón de arribo a cada nodo es en promedio $\lambda_i=\lambda/N$, donde N es el número total de nodos en la red.

Para la transmisión de paquetes *multicast* desde su origen a todos los demás nodos, se construye una tabla de enrutamiento *multicast* utilizando el algoritmo de enrutamiento *spanning tree* (Bertsekas y Gallager, 1992).

La Fig. 2 ilustra la red de estudio A con 20 nodos y el enrutamiento *multicast* para paquetes generados desde el Nodo 18. En este caso el algoritmo de enrutamiento *spanning tree* es construido priorizando los nodos con menor número como ID.

Esto significa que después de la transmisión inicial desde el nodo 18, la tabla de ruta es construida luego enrutado hacia el nodo 2, nodo 11, nodo 15, nodo 17 y así sucesivamente hasta construir todo el árbol.

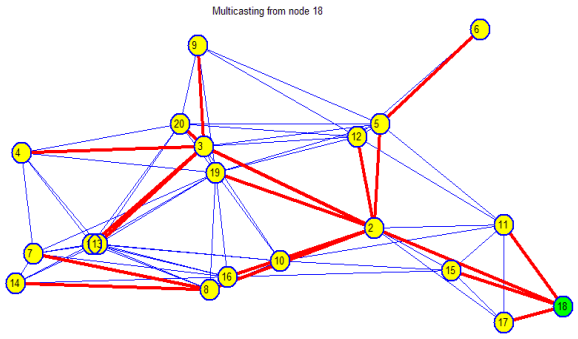


Fig. 2 Caso de estudio, red A con 20 nodos ilustrando la ruta para paquetes de *multicast* provenientes del nodo 18.

b) *Routing* y tráfico *unicast*

El algoritmo *minimum hop* (Sánchez *et al*., 2002) o de salto mínimo es utilizado como algoritmo de enrutamiento para tráfico *unicast*, es decir para el envío de paquetes desde un nodo origen hacia un solo nodo destino. En este caso se selecciona el trayecto entre Origen y Destino que atraviese el menor número de nodos.

TDMA generalizado

En TDMA generalizado cada nodo recibe un número de ranuras de tiempo (o *slots*) proporcional a su demanda de tráfico relativa en la red (Bertsekas y Gallager, 1992). La demanda de tráfico relativa depende del tipo de tráfico externo, *multicast* o *unicast*, de la política de transmisión con AAS y de la rutas seleccionadas por los nodos para conducir paquetes en la red *multihop* ad hoc.

Políticas de transmisión con AAS

En nuestro análisis se consideran las siguientes políticas de utilización de antenas:

a) Transmisión omnidireccional y recepción omnidireccional

En este caso, el nodo que transmite utiliza transmisión omnidireccional y todos los nodos dentro del radio alcance (con SNR suficiente para recibir el paquete sin error) reciben utilizando antena omnidireccional. Este es el caso de referencia utilizado para realizar la evaluación.

(b) Transmisión omnidireccional y recepción direccional

El nodo que transmite utiliza transmisión omnidireccional y todos los nodos dentro del radio alcance (con SNR suficiente para recibir el paquete sin error) reciben utilizando antena direccional.

(c) Transmisión direccional y recepción direccional

Tanto la transmisión como la recepción se realiza utilizando transmisión direccional.

Estrategia óptima de asignación de slots para tráfico multicast

Para este tipo de tráfico es más conveniente la utilización de la política de transmisión (a) y (b). Cuando tenemos transmisión omnidireccional, debido a que el canal de comunicación es *broadcast* todos los nodos con suficiente potencia de señal recibida pueden escuchar la transmisión durante un *slot*. Bajo esta condición, el tráfico que debe de ser manejado por un nodo i, Λ_i, es transmitido a través de todos sus radioenlaces existentes utilizando el *rate* mínimo que permita comunicación (ver Fig. 3), esta dado por:

$$\Lambda_i = \sum_{k=1}^{N} I_k(i)\,\lambda_k = \frac{\lambda}{N}\Pi_i \qquad (10)$$

donde $\Pi_i = \sum_{k=1}^{N} I_k(i)$ es la carga de tráfico *multicast* relativo que pasa por el nodo i, $I_k(i)$ es una variable binaria tal que:

$$I_k(i) = \begin{cases} 1; & \text{Si k usa i como relay} \\ 0; & \text{Otro caso} \end{cases} \qquad (11)$$

Así, por ejemplo, una red totalmente conectada en la que es necesario un único salto para alcanzar cualquier otro nodo, resulta en $\Lambda_i = \lambda_i$. Para la red en la Fig. 2, la carga de tráfico relativa para *multicast* se muestra en la Tabla 1.

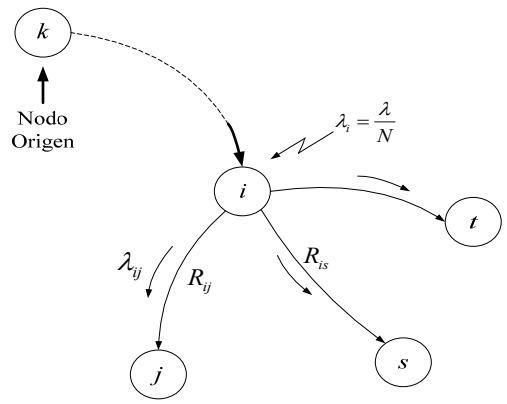


Fig. 3 Ilustración del tráfico que atraviesa un nodo i el cual es utilizado por un nodo origen k en la retransmisión de tráfico *multicast* a través de la red.

Tabla 1 Carga de tráfico relativo para red mostrada en Fig. 2 con tráfico *multicast*.

Nodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	…
Π_i	11	20	16	1	19	1	1	10	1	…

Note que el nodo 2 tiene la mayor carga de tráfico relativa, Π_i = 20, esto es porque para llegar al nodo 18 la mayoría de nodos en la red utiliza al nodo 2 como *relay*. La mayoría de nodos en los extremos de la red, como por ejemplo nodos 4, 6, 7 y 9 no tienen más carga de tráfico que la de ellos mismos.

Basados en la ley de conservación de flujos, a partir de la ecuación (10), el sistema opera bajo condición estable si:

$$\Lambda_i < \frac{t_i}{T_f} R_0^{(i)} \qquad (12)$$

donde $R_0^{(i)} = \min_{\forall j}\left(R_{ij}\right)$ es el mínimo *rate* de transmisión entre el nodo i y cualquiera de sus vecinos, t_i es el tiempo en número de ranuras (*slots*) asignado al nodo i dentro de una trama de longitud T_f *slots*. De esta forma:

$$\sum_{k=1}^{N} I_k(i)\frac{\lambda}{N} < \frac{t_i}{T_f}R_0^{(i)} \tag{13}$$

$$\lambda < \frac{N}{T_f}\frac{t_i R_0^{(i)}}{\sum_{k=1}^{N} I_k(i)} \tag{14}$$

Esto significa que para realizar una asignación del número de ranuras de tiempo que maximice el mínimo *throughput*, λ^*, debemos asignar un número de *slots* a cada nodo i tal que:

$$t_i \propto \frac{\sum_{k=1}^{N} I_k(i)}{R_0^{(i)}} \Rightarrow t_i = \frac{\Pi_i}{R_0^{(i)}}\max_{\forall i}(R_0^{(i)}) \tag{15}$$

Utilizamos $\max_{\forall i}(R_0^{(i)})$ como la constante de proporcionalidad para obtener un número entero en términos de ranuras de tiempo. Así, el *throughput* máximo esta dado por:

$$\lambda^* = \frac{N}{T_f} \tag{16}$$

y la longitud de la trama es:

$$T_f = \sum t_i = \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}\frac{I_k(i)}{R_0^{(i)}} = \sum_{i=1}^{N}\frac{\Pi_i}{R_0^{(i)}} \tag{17}$$

Como una medida de la reducción de la longitud de la trama producto del uso de *bit rate* adaptivo definimos la longitud de trama efectiva como:

$$T_{f_{efectiva}} = \frac{T_f}{\max_{\forall i}(R_0^{(i)})} \tag{18}$$

Estrategia de asignación de slots para tráfico unicast

Para este tipo de tráfico es más conveniente la política de transmisión (c), ya que esta política de transmisión utiliza un haz direccional para transmitir a cada nodo vecino. En este caso, se debe determinar el tráfico que pasa a través de cada enlace en lugar de cada nodo para determinar la política de asignación de ranuras de tiempo adaptada a la demanda de tráfico de cada enlace.

Definimos la variable binaria $I_k^{(s)}(i,j)$ para tráfico *unicast* como:

$$I_k^{(s)}(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{Si tráfico de k con destino s} \\ & \text{es enrutado por el link (i, j)} \\ 0 & \text{Otro caso} \end{cases} \tag{19}$$

Entonces el tráfico *unicast* que utiliza el enlace (i, j) puede expresarse por:

$$\begin{aligned} \Lambda_{ij} &= \sum_{\forall k \forall s} I_k^{(s)}(i,j)\lambda_k^{(s)} \\ &= \sum_{\forall k \forall s} I_k^{(s)}(i,j)\frac{\lambda}{N(N-1)} \\ &= \frac{\lambda}{N(N-1)}\Pi_{ij} \end{aligned} \tag{20}$$

donde $\Pi_{i,j}$ se conoce como la carga de tráfico relativa del enlace (i, j) (Dyberg *et al*., 2002).

Bajo condiciones estables, el tráfico *unicast* de un enlace debe de ser menor que el número de paquetes que ese enlace puede transmitir durante una trama, es decir:

$$\Lambda_{ij} < \frac{t_{ij}}{T_f}R_{ij} \tag{21}$$

Utilizando la ecuación (20) y considerando que el tráfico externo atado a cada nodo es uniformemente distribuido, se tiene:

$$\frac{\lambda}{N(N-1)}\Pi_{ij} < \frac{t_{ij}}{T_f}R_{ij} \tag{22}$$

El máximo *throughput* que produce un tiempo de transmisión de paquete de origen a destino finito se alcanza cuando ecuación (22) es alcanzada por al menos un enlace, es decir:

$$\lambda^* = \min_{(i,j)} \left(\frac{t_{ij}}{T_f} \frac{N(N-1)}{\Pi_{ij}} R_{ij} \right) \tag{23}$$

Así, se maximiza el mínimo *throughput* asignando:

$$t_{ij} \propto \frac{\Pi_{ij}}{R_{ij}} \Rightarrow t_{ij} = \frac{\Pi_{ij}}{R_{ij}} \max_{\forall(i,j)} (R_{ij}) \tag{24}$$

lo cual significa asignar un número de ranuras de tiempo a cada nodo de:

$$t_i = \sum_{\forall j \neq i} t_{ij} = \max_{\forall(i,j)} (R_{ij}) \sum_{\substack{\forall j \neq i \\ R_{ij} > 0}} \frac{\Pi_{ij}}{R_{ij}} \tag{25}$$

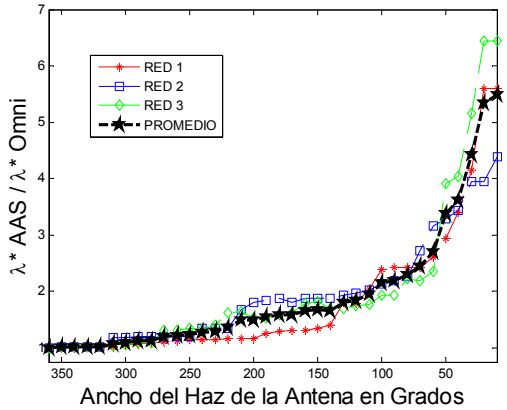
Así el máximo *throughput* está dado por:

$$\lambda^* = \frac{\max_{\forall(i,j)} (R_{ij})\, N(N-1)}{T_f} = \frac{N(N-1)}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{\substack{\forall j \neq i \\ R_{ij} > 0}} \frac{\Pi_{ij}}{R_{ij}}} \tag{26}$$

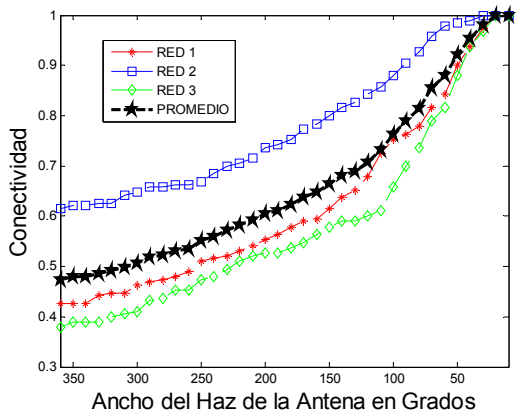
Adicionalmente para reducir el retardo de paquetes, los *slots* asignados a cada nodo, t_i deben distribuirse uniformemente en la trama. Esto puede hacerse utilizando una permutación pseudo-aleatoria de la trama obtenida con las ecuaciones (15) o (25).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

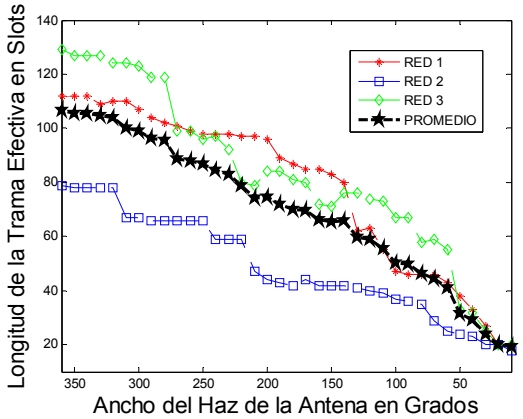
La Fig. 4 presenta los resultados para tráfico *multicast* cuando se utiliza la política de transmisión omnidireccional y recepción direccional para tres diferentes redes (Red1, Red2 y Red3) y el promedio de las mismas. La Fig. 4a muestra que la ganancia en el máximo *throughput* utilizando AAS con respecto al uso de antenas omnidireccionales aumenta de forma significativa al reducir el ancho del haz y aumentar la conectividad (Fig. 4b).



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 a) Ganancia en el *throughput* utilizando diferentes anchos de haz del AAS y tráfico *multicast*, b) conectividad de la Red y c) longitudes de trama efectiva en función del ancho del haz del AAS.

La Fig. 4c muestra que la ganancia es principalmente producto del incremento de la conectividad y no del uso de *bit rate* adaptivo excepto para anchos de haz estrechos (menores de 30 grados) donde algunos nodos transmiten a $2R_0$, lo que se refleja en un valor de longitud de trama efectiva inferior al número de nodos en la red.

La Fig. 5 presenta los resultados para trafico *unicast* utilizando transmisión y recepción direccional para tres diferentes redes (Red1, Red2 y Red3) y el promedio de las mismas. La ganancia al utilizar *bit rate* adaptivo y también cuando se utiliza *bit rate* fijo se muestra en Fig. 5a. Podemos notar que la ganancia por el uso de *bit rate* adaptivo es significativa cuando se utilizan antenas con ancho del haz aproximadamente a 120º, esto se observa mejor en la Fig. 5c. Cuando el ancho del haz es inferior a 120º, podemos observar que la ganancia en el *throughput* alcanza valores superiores al doble del *throughput* obtenido con respecto a antenas omnidireccionales. Las Figs. 5b y 5d muestran que esta ganancia resulta tanto del incremento en la conectividad como de la utilización de *bit rate* adaptivo, esto se observa a través de la reducción de la longitud de la trama cuando se utiliza *bit rate* adaptivo con respecto al uso de *bit rate* fijo.

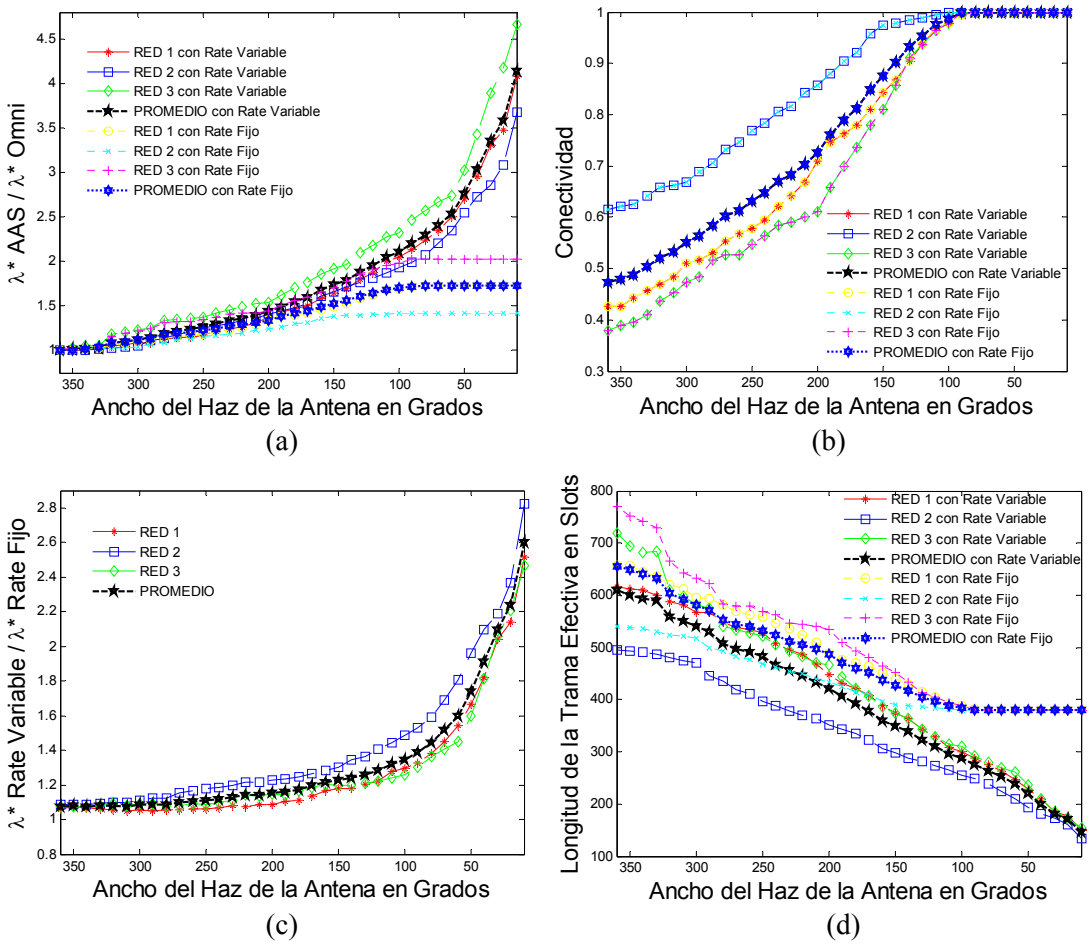


Fig. 5 a) Ganancia en el *throughput* utilizando diferentes anchos de haz para AAS con tráfico *unicast, bit rate* adaptivo y *bit rate* fijo, b) conectividad de la Red, c) ganancia de máximo *throughput* con *bit rate* adaptivo con respecto al máximo *throughput* con *bit rate* fijo, d) longitudes de trama efectiva en función del ancho del haz del AAS.

La Fig. 6 muestra el desempeño del retardo de paquetes para diferentes anchos de haz y diferentes cargas de tráfico. El máximo tráfico simulado corresponde a $0.95\lambda^*$ demostrando la validez del cálculo analítico de la ecuación (26) y reflejando el comportamiento exponencial en el retardo de paquetes. Estos resultados, obtenidos por simulación de eventos discretos (con máxima capacidad de *buffers* de 1000 paquetes por enlace en lugar de la presunción de *buffers* infinita asumida en nuestro análisis), muestran que los limites de desempeño de la red, en términos de máximo *throughput*, están muy cercanos a los resultados analíticos ecuación (26) para tráfico *unicast* confirmando su validez.

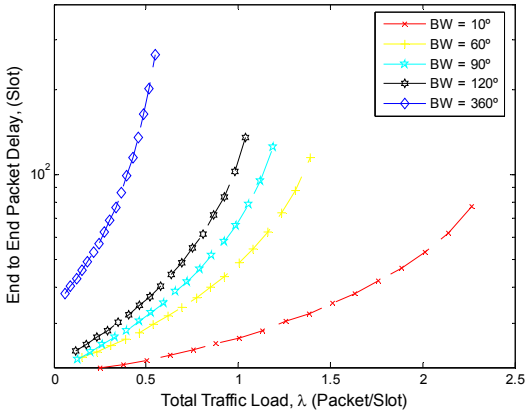


Fig. 6 Comparación del retardo de paquetes para diferentes cargas de tráfico en una red de prueba de 20 nodos utilizando simulación de eventos discretos con *buffers* de longitud 500 paquetes para cada radioenlace.

CONCLUSIONES

En este artículo hemos analizado la utilización de sistemas de antenas adaptivas en redes *multihop* ad hoc cuando se usa TDMA generalizado como protocolo de acceso al medio tanto para tráfico *multicast* como *unicast*.

Aplicando la ley de conservación de flujos se derivó analíticamente la estrategia óptima de asignación de *slots* para maximizar el *throughput* total de la red. A través de la simulación de eventos discretos hemos verificado que el límite teórico es muy cercano al máximo límite determinado al simular nodos utilizando *buffers* suficientemente grandes (1000 paquetes en nuestras simulaciones). Los resultados muestran que para el tráfico *multicast*, el empleo de AAS con transmisión omnidireccional y recepción direccional con ancho de haz entre 120º y 10º, produce una ganancia con respecto a sistemas omnidireccionales entre 1.8 y 5.5 en las redes de muestras utilizadas para la evaluación. Para este caso, la ganancia es principalmente resultado del incremento de la conectividad de la red y no por el uso de *bit rate* adaptivo. Por otro lado, para tráfico *unicast* utilizando AAS con transmisión y recepción direccional, tanto el incremento en la conectividad como la utilización de *bit rate* adaptivo incrementan significativamente la ganancia del máximo *throughput* (entre 2 y 4 para AAS con ancho de haz entre 120º y 10º) en las redes utilizadas en nuestras evaluaciones numérica. Si el sistema no utiliza *bit rate* adaptivo, solamente se obtiene el beneficio del incremento en la conectividad de la red perdiendo el beneficio de la existencia de mejor potencia recibida para algunos enlaces en la red, está perdida aumenta con la reducción del ancho del haz del AAS.

NOTACIÓN

B	Ancho de banda	Hz
C	Conectividad de red	–
G	Ganancia de radio propagación	–
k	Constante de Boltzmann	$J\,K^{-1}$
L	Número de radioenlaces	
N	Número total de nodos en la red	
P	Potencia de transmisión	W
R	Razón de transmisión (*bit rate*)	bps
t_i	Tiempo asignado al nodo para transmisión	*slots*
T_f	Longitud de trama	*slots*
T_0	Temperatura	K

Símbolos griegos

γ	Razón señal a ruido	–
θ_{ij}	Separación angular entre dos nodos	grados
λ	*Throughput* de red	–

Π_{ij}	Carga de tráfico relativa del enlace	–
Λ_i	Tráfico manejado por el nodo i	–

Subíndices

i	Nodo transmisor
j	Nodo receptor

REFERENCIAS

Bertsekas D. y R. Gallager (1992) *Data Networks*. Prentice Hall, USA.

Dyberg K., L. Farman, F. Eklof, J. Gronkvist, U. Stemer y J. Rantakokko (2002) *On the Performance of Antenna Arrays in Spatial Reuse TDMA ad hoc Networks*. Military Communications Conference, Anaheim, CA, Vol. 01, pp. 270-275.

Farman L., U. Stemer y O. Tronarp (2004). *Analysis of Capacity in ad hoc Networks with Variable Data Rates*. Vehicular Technology Conference-Spring, Milan, Italy, Vol. 04, pp. 2101-2105.

International Telecommunications Union, URL:http://www.itu.int/ITU-D/univ_access/

IEEE Std. 802.11 (1999), *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification,* New York, ISBN 0-7381-1658-0.

Gesbert D., M. Shafi, D.Shju, P. Smith y A. Naguid (2003). *From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-time Coded Wireless Systems*, Selected Areas in Communications, Vol. 21, No. 03, pp. 281-302.

Godara L.C. (1997). *Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations*. In Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 07, pp. 1031-1060.

Gupta P. y P.R. Kumar (2000). *The Capacity of Wireless Networks.* IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 46, No. 02, pp. 388-404.

Liberti J.C. y T.S. Rappaport (1999). *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*. Prentice Hall, USA.

Ramanathan R., J. Redi, C. Santivanez, D. Wiggins y S. Polit (2005). *Ad hoc Networking with Directional Antennas: A Complete System Solution*. Selected Areas in Communications, Vol. 23, No. 03, pp. 496-5065.

Sánchez M. y M. Munguía (2005). *Sobre la Integración de Sistemas de Antenas Adaptivas en Redes Multihop Ad hoc utilizando TDMA Generalizado como protocolo de Acceso al Medio*. Congreso Panamericano de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Industrial y Ramas Afines, La Habana, Cuba.

Sánchez M., J. Zander y T. Giles (2002). *Combined Routing & Scheduling for Spatial TDMA in Multihop Ad hoc Networks*, International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Honolulu, HW, Vol. 02, pp. 781-785.

Stephens R.G. (2004). *Telefonía celular – nuevo instrumento para el acceso universal en Latinoamérica*, L@tin.tel Magazine, No. 01.

Xiao L., M. Johansson y S.P. Boyd (2004). *Simultaneous Routing and Resource Allocation via dual Decomposition*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 52, No. 07, pp. 1136-1144.

Zander J. (1990). *Slotted ALOHA Multihop Packet Radio Networks with Directional Antennas*. Electronics Letters, Vol. 26, No. 25, pp. 2098-2100.

Marvin Sánchez se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en 1995. Obtuvo el grado académico de LicEng en Sistemas de Radiocomunicaciones en el Real Instituto Tecnológico (KTH), Suecia en 2004. Actualmente está finalizando sus estudios de doctorado (PhD) en la misma institución. Sus tópicos de investigación incluyen: sistemas de acceso inalámbricos incluyendo sistemas celulares y redes multihop ad hoc integrados con sistemas de antenas avanzadas. Profesor Titular, Facultad de Electrotecnia y Computación, Universidad Nacional de Ingeniería.

Marco Munguía se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en 2004. Desde el 2006, realiza sus estudios de doctorado (PhD) en Procesamiento de Señales en la Universidad de Lund, Suecia. Sus principales tópicos de investigación son: redes multihop ad hoc y procesamiento digital de señales aplicado a telemedicina. Profesor Auxiliar, Facultad de Electrotecnia y Computación, Universidad Nacional de Ingeniería.