

Requerimientos de VoIP en Redes Malladas Inalámbricas con Relaying

Arístides Silvestris¹, Federico Aguirre¹, Noelia Veglia¹ y Ezequiel Tardivo¹,

¹Grupo de Investigación y Desarrollo Aplicado a las Telecomunicaciones (GIDAT) - UNRC
Ruta Nacional N° 36 – Km. 601 – Río Cuarto – Córdoba – Argentina
{asilvestris, faguirre, nveglia, etardivo}@ing.unrc.edu.ar

Resumen. Argentina es un país longitudinalmente extenso, por lo que existen muchas zonas/comunidades de entre 1000 y 2000 habitantes que carecen de infraestructura de telecomunicaciones, ya que no es fácil amortizar económicamente la inversión por parte de las empresas prestatarias. Ante esta realidad, surge la necesidad de plantear un sistema de comunicaciones simple, robusto, de fácil instalación y económico. La mayoría de las publicaciones vinculadas a la temática “cobertura rural” proponen despliegues de redes inalámbricas del tipo punto-multipunto, malladas, híbridas con *relaying*; sin embargo, en ninguna de ellas se toma consideración de los parámetros necesarios para establecer una llamada IP de una calidad aceptable y comprensible, como lo son ancho de banda por canal, latencia, jitter, etc. Este trabajo propone evaluar la factibilidad de un sistema comunicaciones de voz para el caso mencionado, implementando tecnologías de *relaying* sobre una topología mallada inalámbrica realizando una implementación del sistema.

Palabras claves: Redes malladas inalámbricas, Relay, VoIP, latencia, jitter.

1 Introducción

Argentina es un país longitudinalmente extenso, posee determinadas zonas donde la densidad poblacional es baja y los habitantes no tienen la posibilidad de acceder a algunos servicios, esto ocurre porque no se han desarrollado las obras de infraestructura en tiempo y forma, como gasoductos, cloacas, etc. En lo que respecta a las telecomunicaciones, ocurre algo similar, ya que no es fácil amortizar económicamente la inversión debido a la densidad de habitantes. Este problema se mantiene pese al tendido de la red de fibra óptica impulsado por el estado nacional.

En los últimos 10 años las investigaciones referidas a infraestructuras de rápido despliegue y bajo costo, basadas en redes malladas inalámbricas (*WMN*, por sus siglas en inglés “*Wireless Mesh Network*”) [1], ha sido un tópico de inmensa explotación en el dominio de las telecomunicaciones. El abordaje de dicha temática se realizó durante la primera década de este siglo focalizándose en dos aspectos: Análisis radioeléctrico y Algoritmos eficientes de ruteo [2], [3]. Sin embargo, en estos trabajos se exponen resultados de simulaciones realizadas para modelos acotados, sin realizar pruebas piloto en donde se pueda evaluar el desempeño real de este tipo de sistemas.

Por otro lado, la eficiencia energética, primordial para sistemas que deseen poder operar autónomamente, así como el bajo costo de implementación de dicha arquitectura, la cual se obtiene como producto de la utilización de WiFi SoCs (*por sus siglas en inglés "WiFi - System-on-Chip"*) no fue explotada hasta entrado el año 2010. Con respecto a este último punto (bajo costo de infraestructura) se puede citar un reciente artículo [4], en donde se presentan las ventajas de las WMN para aumentar la penetración en el mercado de aplicaciones de comunicación masivas, en particular el trabajo propone la implementación de protocolos de comunicación para internet de las cosas. Mientras que en lo referido a eficiencia energética en topologías WMN, utilizando técnicas de relaying, la bibliografía consultada para los últimos años [5], [6], [7] presentan resultados que en todos los casos mejoran o aumentan la vida útil de las baterías, a costa de disminución en el throughput de la red.

Sin embargo, al analizar trabajos ligados a la aplicación de VoIP en WMN con técnicas de relaying, se observó que la mayoría de los trabajos realizados fueron desarrollados entre de 2005 y 2008 [8], [9], [10]. Esta carencia percibida constituye la principal motivación para la realización del presente artículo.

El objetivo de este trabajo es evaluar la factibilidad de implementar un sistema simple para comunicaciones de voz en caso de que los sistemas de telefonía no sean plausibles económicamente, mediante la implementación de la tecnología inalámbrica de retransmisión de paquetes enfocados en una topología mallada [11]. En la sección 2 se presentan los conceptos sobre la convergencia hacia el mundo IP y evolución de las WMN [1], [12], en 2.1 se presentan las técnicas de relaying y en 2.2 las configuraciones posibles para cada nodo. En la sección 3, se presenta el Hardware utilizado para el despliegue y el escenario. En la sección 4, se presenta como afecta el uso de relaying en un enlace, en 4.1 se realiza un contraste entre el throughput en condiciones ideales contra el experimental para cada estándar utilizado, en 4.2 se presentan las latencias obtenidas y se mencionan las características necesarias para establecer llamadas aceptables de VoIP utilizando el codec G.711 [13].

2 WMN: Convergencia hacia el mundo IP

Los sistemas de telecomunicaciones se encuentran totalmente interconectados y cada vez es más notoria la convergencia hacia el mundo IP, en el que todos los dispositivos del hogar, oficina e industria, se conectan a la red de datos. Acompañado a esto, se han desarrollado y evolucionado las tecnologías inalámbricas a un precio relativamente bajo considerando las versiones b, g y n del estándar IEEE 802.11. Diversos fabricantes diseñan WiFi SoCs que integran cada vez más funcionalidades, como múltiples interfaces de radio, varios rangos de frecuencia de trabajo, etc. Además, el costo del Hardware es bajo en comparación con otros tipos de tecnologías inalámbricas. Por lo tanto, son atractivos y suelen ser aprovechados para el desarrollo de sistemas de bajo costo, consumo y tamaño. Acorde a las ventajas ya mencionadas, se plantea el despliegue de nodos conectados entre sí inalámbricamente con la finalidad de subsanar la falta de infraestructura de telecomunicaciones en zonas remotas. Se aprovecha, además, las ventajas de la topología de las WMN, como la redundancia de caminos, auto configuración, auto reparación, etc. [1], [14].

Las WMN poseen un funcionamiento peculiar, a diferencia de las redes inalámbricas punto-a-multipunto, las cuales se calculan con un radio de cobertura que se ve afectado principalmente por la geografía del terreno o por la distribución de edificaciones, en una WMN no existe un radio de cobertura como tal. En estas redes es posible clasificar a los nodos como cliente mesh, router mesh y gateways. Los clientes mesh pueden ser dispositivos tanto fijos como móviles. Los router mesh, son los encargados de reenviar el tráfico generado por los clientes hacia los gateways, estos últimos son los que proveen de conexión al exterior a la red mesh. Por lo tanto lo que se tiene en realidad es una “nube mesh” formada por los router mesh donde se les brinda servicios a los clientes mesh, ver Fig. 1. Debido a las características de las WMN se pueden superar obstáculos fácilmente sin necesidad de usar grandes torres o altas potencias de transmisión, solventando problemas de infraestructura [5], [15].

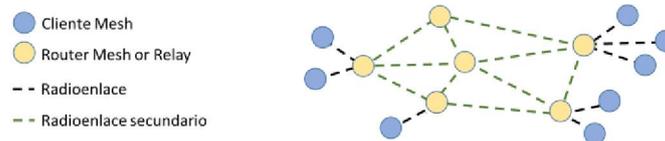


Fig. 1. Esquema de WMN

2.1 Técnicas de Relaying

Las técnicas de retransmisión son un elemento clave para mejorar la capacidad de las redes inalámbricas, debido a sus grandes ventajas, como por ejemplo: mejoras en la cobertura, throughput, capacidad del sistema, duración de las baterías, etc.

En los últimos años, la técnica de relaying para múltiples saltos ha llamado la atención de las universidades y la industria. Los usos más comunes de relaying son Decodificar y reenviar (*DF*, por sus siglas en inglés *Decode-and-Forward*) y Amplificar y reenviar (*AF*, por sus siglas en inglés *Amplify-and-Forward*) [6], [7]. El modo DF, la señal recibida es decodificada, luego vuelve a modularse y transmitirse; por otro lado, el modo AF, solo amplifica y transmite sin decodificar. Comparando ambas técnicas, la complejidad de DF es mayor debido a la capacidad de procesamiento requerida, ya que es necesario poder analizar la capa de control de acceso al medio, sin embargo, la interferencia que produce es menor que el modo AF [16]. En estos procedimientos, es crucial agregar encabezados adicionales al realizar las retransmisiones, ya que las respuestas deben conocer el camino de retorno.

2.2 Configuraciones de Nodos Inalámbricos

Como ya se mencionó anteriormente, cada nodo de la nube mesh posee un rol, y en lo que respecta a la configuración física, se pueden identificar por su funcionalidad.

En las WMN es necesario clasificar los tipos de tráfico, como acceso y troncales o backhaul; el primero se encuentra dedicado al transporte de información neta

dedicada a los clientes; por otro lado, los troncales vinculan los nodos y por ellos se transporta además señalización, como por ejemplo: topología de red, rutas para enviar cada paquete, etc. Es posible que un nodo integre varias interfaces de radio 1, 2 o 3 [17], pudiendo compartir la frecuencia central de trabajo y canales asociados.

En la configuración 1, se posee una interfaz de radio, que es utilizada para transmitir y recibir una frecuencia central “frec.1” con un canal asociado “ch1”, también es llamada configuración SISO (*por sus siglas en inglés, Single-Input-Single-Output*). Esto da como resultado que sea utilizada tanto para tráfico de acceso como troncal, trabajando en modo HD (*por sus siglas en inglés Half Duplex*).

En la configuración 2, se poseen dos interfaces, cada una trabaja en una frecuencia “frec.1” y “frec.2”, con sus respectivos canales. En este caso es posible separar físicamente los tráficos asociados a los clientes del backhaul, obteniendo canales exclusivos, mejorando el desempeño de la red, sin embargo, el modo de transmisión sigue siendo HD, ya que se utiliza la misma interfaz para transmitir y recibir.

Finalmente, la configuración 3, integra una interfaz adicional, en esta se utiliza un radio dedicado al tráfico de clientes operando en “frec.1” con su canal asociado “ch1” en modo HD. Las interfaces restantes se utilizan para la interconexión de nodos, donde cada una de ellas se dedica solo a una función transmitir o recibir, con frecuencia central “frec.2” y canales separados “ch2” y “ch3”, esto último da como resultado que la transmisión sea FD (*por sus siglas en inglés Full Duplex*).

En la tabla 1 puede apreciarse la cantidad de interfaces de radio, tráfico asociado por interfaz, frecuencias y canales asignados, como fue descrito anteriormente.

Tabla 1. Configuraciones posibles para cada nodo.

Interfaces de radio	Clientes	Troncal
1	1 Rx y Tx frec.1 - ch1	
	Half Duplex	
2	1 Rx y Tx frec.1 - ch1	1 Rx y Tx frec.2 - ch2
	Half Duplex	Half Duplex
3	1 Rx y Tx frec.1 - ch1	1 Rx frec.2 - ch2 1Tx frec.2 - ch3
	Half Duplex	Full Duplex

En este artículo se evalúa el desempeño de la configuración 1, que posee una única interfaz de radio 1x1 SISO, comparte la misma frecuencia para transmisión y recepción, y además sólo es posible utilizar un canal para ambos tipos de tráfico.

3 Implementación de una WMN aplicando Relaying

Para el despliegue se propone la utilización de plataformas de código abierto, donde la principal ventaja es la flexibilidad y el bajo costo. Se aprovecha el WiFi-SoC Atheros AR9331 que posee un CPU MIPS de 32-bit corriendo a 400MHZ, 64MB DDR2 RAM, además es posible utilizar diferentes tipos de periféricos mediante USB, como fue utilizado en [18]. Particularmente para este artículo se utilizó una memoria externa con la finalidad de correr aplicaciones y protocolos adicionales; para la

comunicación son soportados estándares IEEE 802.3, IEEE 802.11n, etc. Se posee además una antena omnidireccional del tipo IFA con ganancia de 2,5dBi [19].



Fig. 2. Plataforma de Código Abierto basada en Linux Embebido

Existen diferentes formas de desplegar WMN, por ejemplo, la utilización de redes del tipo Ad-Hoc y para ello el protocolo más evolucionado y estable es B.A.T.M.A.N Avanzado (*por sus siglas en inglés, Better Approach to Mobile Ad-hoc Networking*) o Batman-adv. Este es una implementación, en capa 2 del modelo OSI del protocolo de enrutamiento BATMAN original que trabaja en capa 3 [20]. Este último nació a causa de las deficiencias del protocolo OLSR (*por sus siglas en inglés, Optimized Link State Routing*), también orientado a redes Ad-Hoc, cuya desventaja era el consumo de recursos en los procesadores; estos fueron relevados en los artículos [2], [3], [21].

El *hardware* posee un consumo energético muy bajo, lo que lo hace ideal para que sea alimentado por un pequeño panel solar, respaldado por una batería con capacidad moderada. Además, al plantear la instalación en exteriores, puede ser colocado en una caja estanca de PVC con protección para rayos ultra violeta.

En el escenario propuesto se sitúan los equipos al aire libre, equidistantes entre sí, en donde la distancia se encuentra relacionada a la potencia de transmisión, atenuación del medio y MCS (*por sus siglas en inglés, Modulation and Coding Scheme*) acorde a la sensibilidad del receptor. A modo de clarificar la idea, los nodos son representados en la Fig. 3; cabe mencionar que de esta forma se aproxima la mejor performance posible para las zonas rurales.

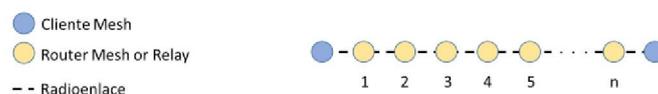


Fig. 3. Escenario propuesto

En dicho escenario, los nodos se encuentran montados sobre una varilla de 1,60mts de altura, son alimentados mediante una batería durante el transcurso del ensayo; fue necesario regular los voltajes de alimentación acorde a los indicados por el fabricante, como se aprecia en la Fig. 4.



Fig. 4. Nodo alimentado por una batería externa

4 Evaluación de WMN-Relaying

El hecho de compartir los canales para los diferentes tipos de tráfico, tiene como consecuencia que el throughput se vea degradado entre saltos [22], ya que es necesario utilizar por lo menos 2 *time-slot* para retransmitir la información, considerando tiempos de computo bajos. La técnica de relay permite la transmisión indirecta de datos entre dos puntos utilizando nodos intermedios, como fue señalado en secciones previas. Al utilizar la misma interfaz de radio para ambos tráficos, el throughput se ve afectado por la ecuación 1, en donde N es el número de saltos.

$$K = 1 / N . \quad (1)$$

La interfaz de radio de cada nodo operará en modo HD, será la encargada de transmitir la información a los clientes que se encuentren en su zona de cobertura y también de re-transmitir la información a los demás nodos junto a la señalización.

4.1 Análisis de Throughput para cada estándar

Al mencionar throughput es posible apreciar que los fabricantes indican las tasas a nivel de capa física. En esta, existe mucha información propia de la especificación como: preámbulos, técnicas de corrección de errores, etc., por lo tanto, al llegar a la capa 3 en donde se realizarán las mediciones, las tasas rondan el 50 y 60% [23], [24], [25], [26]. Si, además, se agrega la técnica de relay, multiplicando por K de la ecuación 1, se enfatizarán aún más las magnitudes; ya que es necesario agregar datos que permitan conocer el origen para poder enviar las respuestas correspondientes.

En la tabla 3 es posible apreciar las magnitudes del throughput de forma ideal, afectado por el número de saltos, por medio de la ecuación 1. Además, al comparar contra la Tabla 4 que posee el throughput medido desde cada nodo por estándar, bajo la configuración ya mencionada. Es notable como este desciende de forma abrupta mientras aumenta la cantidad de saltos en la Fig. 5; similar a lo ocurrido en [27], [28].

Claramente, los valores obtenidos de forma empírica y los calculados idealmente son muy similares.

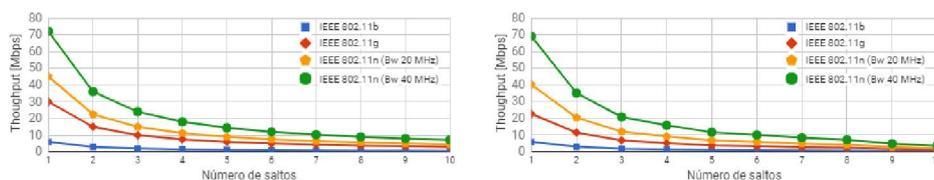
Tabla 3. Throughput ideal para cada especificación contra el número de saltos.

Especificación	Throughput [Mbps] vs Número de saltos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IEEE 802.11b	6,0000	3,0000	2,0000	1,5000	1,2000	1,0000	0,8571	0,7500	0,6667	0,6000
IEEE 802.11g	30,0000	15,0000	10,0000	7,5000	6,0000	5,0000	4,2857	3,7500	3,3333	3,0000
IEEE 802.11n (Bw 20MHz)	45,0000	22,5000	15,0000	11,2500	9,0000	7,5000	6,4286	5,6250	5,0000	4,5000
IEEE 802.11n (Bw 40MHz)	72,0000	36,0000	24,0000	18,0000	14,4000	12,0000	10,2857	9,0000	8,0000	7,2000

Tabla 4. Throughput medido para cada especificación contra el número de saltos.

Especificación	Throughput [Mbps] vs Número de saltos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IEEE 802.11b	5,8690	2,9857	1,7694	1,3440	0,9938	0,8536	0,7141	0,6082	0,4154	0,2950
IEEE 802.11g	22,6350	11,5150	6,8240	5,1835	3,8327	3,2923	2,7541	2,3455	1,6022	1,1378
IEEE 802.11n (Bw 20MHz)	40,1650	20,4330	12,1090	9,1980	6,8010	5,8420	4,8870	4,1620	2,8430	2,0190
IEEE 802.11n (Bw 40MHz)	69,1030	35,1620	20,8377	15,8283	11,7035	10,0532	8,4098	7,1622	4,8924	3,4744

Adicionalmente, los nodos generan una demora por el procesamiento previo a la retransmisión del paquete, lo que degrada aún más el enlace como en los ya mencionados [2], [3], [21], [22].

**Fig. 5.** Throughput ideal (a la izquierda) contra el throughput medido (a la derecha) para cada especificación contra el número de saltos

Al utilizar la misma frecuencia y canal para re-transmitir, se produce interferencia co-canal entre los nodos, sin embargo, debido a la disposición de estos, puede depreciarse. No obstante, las interferencias co-canal son consideradas ya que las mediciones no fueron realizadas en una cámara anecoica, por lo que las mismas no han podido ser discriminadas.

Este prototipo se propuso para solventar los problemas de infraestructura de telecomunicaciones, entonces para que funcione fielmente, es necesario indicar que para establecer una llamada VoIP de calidad decente, deben cumplirse ciertos requisitos: ancho de banda, dependerá de la compresión o codec utilizado; latencia, vinculada a la distancia entre los puntos finales de la comunicación; jitter que acatará el comportamiento la red, como también la pérdida de paquetes. Todos los parámetros mencionados, se ven comprometidos en la solución propuesta.

4.2 Análisis de Latencia

Según los criterios de calidad vinculados a la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) [29] y la IETF (*Internet Engineering Task Force*), es posible tolerar entre los dispositivos finales una latencia menor a 150 ms, junto a un jitter

menor a 100 ms [30]. Por otro lado, el ancho de banda requerido y la pérdida de paquetes, dependen totalmente del codec. Para el modelo propuesto, se adopta el codec G.711 [13] que posee 2 tipos de compresión, ninguna de ellas posee cargos en VoIP. Este comprime logarítmicamente, obteniendo una tasa de bits de 64 Kbps. Este codec no necesita mucha capacidad de procesamiento para entregar una buena calidad de audio con puntaje de opinión media (*MOS*, por sus siglas en inglés “*Mean Opinion Score*”) de 4.2, las muestras se toman cada 20 o 30 ms para garantizar que la señal sea débilmente estacionaria. Sin embargo, el ancho de banda requerido es superior a otros codec licenciados, rondando los 83 Kbps en cada sentido.

Entonces, según los criterios de calidad, es posible establecer una llamada entre 2 dispositivos atravesando saltos mayores a 10 para cualquiera de los estándares, respetando los criterios de ancho de banda. Sin embargo, existen otros parámetros críticos como la latencia y jitter, que indican que no sería recomendable sobrepasar los 5 o 6 saltos, se aprecia en la tabla 5 y en la Fig. 6 de tiempo de ida y vuelta (*RTT*, por sus siglas en inglés, “*Round-Trip Time*”), similares a lo ocurrido en [4], [8].

Tabla 5. RTT para diferente número de saltos [ms]

Tiempo	RTT [ms] vs Número de saltos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	1,33	2,60	3,65	4,89	6,05	7,25	8,59	9,64	10,44	11,32
Promedio	2,86	5,38	8,98	14,03	24,30	26,65	31,01	39,02	41,38	42,96
Máximo	25,15	27,08	62,89	73,17	193,43	203,34	217,79	211,80	213,86	232,25

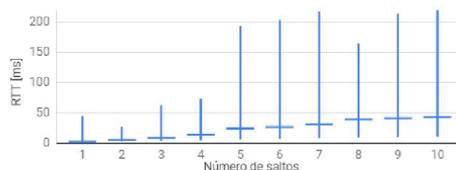


Fig. 6. RTT [ms] para diferente número de saltos

Bajo el mismo escenario para la misma calidad, es posible realizar 15 llamadas concurrentes utilizando 1 salto, 12 llamadas para 2 saltos, 7 llamadas para 3 saltos, 4 llamadas para 4 saltos, 2 llamadas para 5 saltos y 1 llamada para 6 saltos. En caso de que la cantidad máxima de saltos sea superada, se obtiene un audio de mala calidad e incomprensible debido al descarte de paquetes, similar a lo ya indicado en [27], [28].

5 Conclusión

En este trabajo se presentó una solución basada en WMN para brindar conectividad a pequeñas comunidades; fue posible desplegar la arquitectura de forma simple y rápida. Además, con la finalidad de simular distancias mayores y fenómenos de propagación, se ajustó la potencia de transmisión y se fijó los nodos.

Planteado el escenario, se procedió a tomar mediciones acordes a los criterios establecidos. Una vez recabada toda la información, fue posible analizar los valores,

demostrando la factibilidad de realizar una plataforma de comunicación de voz para zonas de cobertura poco extensas debido a la limitación en latencia, consecuencia del uso de más de 6 saltos, como fue expuesto en la sección 4.2.

En este trabajo se encontró un sistema simple que cumple con los objetivos propuestos. Como líneas futuras de investigación, se propone dotar a los nodos de mayor cantidad de interfaces de radio, separando los canales de acceso y troncal. Esto es posible mediante la incorporación de un *Dongle* USB, aprovechando así el mismo *hardware* y escenario. Logrando que la interferencia co-canal sea reducida, ya que no se compartirán los canales, como fue mencionado en la sección 4.1

Referencias

1. Ian.F. Akyildiz, X. Wang, W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey,", vol. 47, Issue 4, pp. 445-487, March 2005
2. M. Abolhasan, B. Hagelstein and J. C. P. Wang, "Real-world performance of current proactive multi-hop mesh protocols," 2009 15th Asia-Pacific Conference on Communications, Shanghai, 2009, pp. 44-47
3. M. S. Singh and V. Talasila, "A practical evaluation for routing performance of BATMAN-ADV and HWMN in a Wireless Mesh Network test-bed," 2015 International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS), Bangalore, 2015, pp. 1-6
4. A. A. dela Cruz, M. L. A. Parabuac and N. M. C. Tiglao, "Design and implementation of a low-cost and reliable wireless mesh network for first-response communications," 2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), Seattle, WA, 2016, pp. 40-46.
5. Ajayi, A.; Roedig, U.; Edwards, C.; Race, N., "A survey of rural Wireless Mesh Network (WMN) deployments," *Wireless and Mobile, 2014 IEEE Asia Pacific Conference on*, vol., no., pp.119,125, 28-30 Aug. 2014
6. Suchitra Shrestha and KyungHi Chang, "Analysis of outage capacity performance for cooperative DF and AF relaying in dissimilar Rayleigh fading channels," 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, ON, 2008, pp. 494-498
7. A. Ali et al., "Performance analysis of AF, DF and DtF relaying techniques for enhanced cooperative communication," 2016 Sixth International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH), Dublin, 2016, pp. 594-599
8. S. Armenia, L. Galluccio, A. Leonardi and S. Palazzo, "Transmission of VoIP traffic in multihop ad hoc IEEE 802.11b networks: experimental results," First International Conference on Wireless Internet (WICON'05), 2005, pp. 148-155
9. Kee Ngoh Ting, Yin Fern Ko and Moh Lim Sim, "Voice performance study on single radio multihop IEEE 802.11b systems with chain topology," 2005 13th IEEE International Conference on Networks Jointly held with the 2005 IEEE 7th Malaysia International Conf on Communic, 2005, pp. 5 pp
10. S. A. Ramprasad, D. Li, U. C. Kozat and C. Pepin, "An Analysis of Joint Aggregation, Bursting, Routing, and Rate Adaptation for Increasing VoIP Capacity in Multi-Hop 802.11 Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 8, pp. 3128-3139, August 2008.
11. L. Zhao, A. Y. Al-Dubai, X. Li and G. Chen, "A New Relay Node Selection Model for Wireless Community Mesh Networks," 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing, Liverpool, 2015, pp. 1178-1185.

12. Rabbi, M.F.; Rahman, M.T.; Uddin, M.A.; Salehin, G.M.A., "An Efficient Wireless Mesh Network: A New Architecture," *Communication Technology*, 2006. ICCT '06. International Conference on , vol., no., pp.1,5, 27-30 Nov. 2006
13. Recommendation ITU-T G.711, Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies, Int'l Telecommunication Union, Geneva, 1988
14. Akyildiz, I. F., Wang, X. & Kiyon (2005), "A Survey on Wireless Mesh Networks", *IEEE Radio Communications*, Vol.0263-6804, pp23-30
15. Kobel, C.; Baluja Garcia, W.; Habermann, J., "A survey on Wireless Mesh Network applications in rural areas and emerging countries," *Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 2013 IEEE , vol., no., pp.389,394, 20-23 Oct. 2013
16. Levin, G., & Loyka, S. (2012, February). Amplify-and-forward versus decode-and-forward relaying: Which is better?. In *International Zurich Seminar on Communications* (p. 123)
17. N. Kaur and J. S. Saini, "Performance enhancement of 802.11 based wireless mesh network by using Multi- Radio Multi-Channel," *2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)*, Chennai, 2013, pp. 71-76
18. F. Aguirre, A. Silvestris, J. Alemany and F. Magnago, "A low cost smart metering infrastructure with centralized demand response management," *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, Montevideo, 2015, pp. 520-524
19. C. Soras, M. Karaboikis, G. Tsachtsiris and V. Makios, "Analysis and design of an inverted-F antenna printed on a PCMCIA card for the 2.4 GHz ISM band," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 1, pp. 37-44, Feb 2002
20. R. Sanchez-Iborra, M. D. Cano and J. Garcia-Haro, "Performance Evaluation of BATMAN Routing Protocol for VoIP Services: A QoE Perspective," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 9, pp. 4947-4958, Sept. 2014
21. Pramod J, Sahana K S, Akshay A and V. Talasila, "Characterization of Wireless Mesh Network performance in an experimental test bed," *2015 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, Bangalore, 2015, pp. 910-914
22. Holland, G., & Vaidya, N. (2002). Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks. *Wireless Networks*, 8(2/3), 275-288
23. V. Visoottiviset, T. Piroonsith and S. Siwamogsatham, "An empirical study on achievable throughputs of IEEE 802.11n devices," *2009 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, Seoul, 2009, pp. 1-6
24. O. O. Olusegun and C. E. Tan, "TCP throughput efficiency enhancement in IEEE 802.11n network," *2013 8th International Conference on Information Technology in Asia (CITA)*, Kota Samarahan, 2013, pp. 1-5
25. P. Mahasukhon, M. Hempel, S. Ci and H. Sharif, "Comparison of Throughput Performance for the IEEE 802.11a and 802.11g Networks," *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA '07)*, Niagara Falls, ON, 2007, pp.792-799
26. Youngsoo Kim, Sunghyun Choi, Kyunghun Jang and Hyosun Hwang, "Throughput enhancement of IEEE 802.11 WLAN via frame aggregation," *IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, 2004. VTC2004-Fall. 2004, 2004, pp. 3030-3034 Vol. 4
27. T. Vanhatupa, M. Hainnikainen and T. D. Hdmalainen, "Multihop IEEE 802.11b WLAN Performance for VoIP," *2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Berlin, 2005, pp. 1925-1930
28. F. Y. Li, A. Hafslund, M. Hauge, P. Engelstad, Ø. Kure and P. Spilling, "Does higher datarate perform better in IEEE 802.11-based multihop ad hoc networks?," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 282-295, Sept. 2007
29. Recommendation ITU-T G.114, One-Way Transmission Time, Int'l Telecommunication Union, Geneva, 1996
30. Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R., and V. Jacobson, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", STD 64, RFC 3550, July 2003