

Técnica de gestión de la conectividad extremo a extremo en sistemas de comunicaciones jerárquicos y heterogéneos

M. C. Lucas-Estañ⁽¹⁾, J. Gozalvez⁽¹⁾, G. Prieto⁽²⁾

m.lucas@umh.es, j.gozalvez@umh.es, gprieto@indra.es

⁽¹⁾Uwicore, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, <http://www.uwicore.umh.es>
Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad, s/n, 03202, Elche España.

⁽²⁾INDRA Sistemas, S.A. C/Anabel Segura 7, 28108 Alcobendas, Madrid, España.

Abstract- The new Factory of the Future concept aims at developing a new factory model where risks to the worker's health and safety are minimized. In this context, the FASyS project proposes the deployment of a hierarchical and heterogeneous communications system that will connect a monitoring and sensing network to control centres in order to continuously and remotely control the worker environment. In this context, a new challenge is to guarantee the end-to-end connectivity of sensor nodes with control centre through the use of heterogeneous links. In this paper, a context-based and adaptive integration and management technique aimed at guaranteeing end-to-end connectivity has been proposed and evaluated. The results obtained show the potential to minimize data losses and provide stable connectivity solutions.

I. INTRODUCCIÓN

En el concepto europeo de la Fábrica del Futuro, los trabajadores son uno de los aspectos más importantes para la competitividad y productividad del proceso de fabricación, y deben tomarse todas las medidas necesarias para mejorar su salud y seguridad en su entorno de trabajo. Con este objetivo, en el proyecto FASyS (Fábrica Absolutamente Segura y Saludable) [1] se ha trabajado en el desarrollo de un nuevo modelo de fábrica que reduzca al mínimo los riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores. Un objetivo clave de FASyS es el despliegue de una red inalámbrica jerárquica y heterogénea que monitoriza continuamente, tanto de forma local como remota desde un centro de control, el entorno de trabajo y la salud y condiciones fisiológicas del trabajador. El sistema de comunicaciones inalámbrico integra capacidades de comunicación de corto, medio y largo alcance para satisfacer las necesidades de monitorización ubicua y grandes demandas de ancho de banda que impone un sistema de seguridad distribuido en tiempo real. Sin embargo, el desarrollo de una plataforma de comunicaciones inalámbricas heterogénea presenta desafíos importantes. Entre otros, la alta variabilidad y dinamismo del entorno industrial puede plantear situaciones críticas en las que el sistema no es capaz de cumplir con los requisitos de las aplicaciones y servicios del entorno industrial, o incluso de garantizar la conectividad extremo a extremo o *end-to-end* entre los nodos desplegados para monitorizar los parámetros del entorno con el centro de control a través del enlace heterogéneo implementado. Por este motivo, es necesario el diseño e implementación de técnicas de gestión que sean capaces de adaptar la configuración del sistema de comunicaciones aprovechando la redundancia existente con el objetivo de proporcionar una solución de conectividad completa a través del enlace heterogéneo propuesto en FASyS.

En la literatura, es posible encontrar técnicas de gestión de redes heterogéneas de 2 niveles que se centran en la selección del nodo que actuará como puente entre las distintas tecnologías. Por ejemplo, en [2] se presenta un mecanismo centralizado de selección de nodo pasarela que conectan los nodos de una red *mesh* con Internet. Considerando la disponibilidad de información sobre el estado de todos los enlaces, una entidad centralizada decide con qué nodo pasarela debe establecer su comunicación cada nuevo nodo de manera que se maximice el beneficio o rendimiento que obtendría el nuevo nodo con la capacidad y recursos residuales. Varios trabajos de la literatura incorporan información sobre el estado de congestión de los nodos basándose en el estado de la cola de datos de estos, como por ejemplo [3] y [4]. Los autores de [4] enuncian que el uso del tamaño de la cola de datos de los nodos como medida del estado de congestión se ha demostrado funcionar suficientemente bien en redes inalámbricas, siendo una elección más natural que detectar el nivel de congestión que en base al nivel de utilización del canal, el cual mide el tráfico en las cercanías del nodo.

Este trabajo propone una técnica de gestión de la conectividad *end-to-end* para sistemas de comunicaciones jerárquicos y heterogéneos que aprovecha la redundancia de enlaces entre distintos nodos de la arquitectura del sistema para garantizar una solución de conectividad completa en el sistema. En base a información sobre la cantidad de datos a enviar por cada nodo y la calidad de los enlaces, la técnica propuesta intenta balancear la carga de los enlaces y nodos con el objetivo de evitar que se produzcan cuellos de botella ante cambios del entorno que puedan suponer la pérdida de conectividad *end-to-end* en el sistema.

II. SISTEMA DE COMUNICACIONES JERÁRQUICO Y HETEROGÉNEO

En el marco del proyecto FASyS se propone el diseño e implementación de una red inalámbrica heterogénea para dar soporte e interconectar las redes de sensores desplegadas en una o varias plantas industriales con el centro de control para permitir la monitorización continua del entorno de trabajo y la salud e integridad de los trabajadores, tanto de manera local como de manera remota y centralizada desde el centro de control. FASyS propone una arquitectura jerárquica del sistema de comunicaciones en el que distintas tecnologías inalámbricas con distintas prestaciones son utilizadas en cada nivel de la arquitectura. En concreto, la arquitectura se divide en tres niveles, el nivel local que implementa una red de

sensores (*Wireless Sensor Network*, WSN) con la tecnología de corto alcance IEEE 802.15.4/ZigBee, el nivel intermedio que utiliza la tecnología IEEE 802.11 para comunicar los coordinadores de las redes WSN con las pasarela, que hacen de puente entre la tecnología IEEE 802.11 y la tecnología IEEE 802.16 implementada en el nivel de *backhaul*.

Los nodos de la red de sensores implementada en el nivel local de la arquitectura recoge y envía de forma periódica información del sistema al nodo coordinador de la red WSN. El nodo coordinador es el encargado de enviarla hacia el centro de control a través de un enlace heterogéneo que integra las tecnologías de medio y largo alcance para el envío de la información agregada hacia el centro de control. Los nodos sensores envían los datos al coordinador sin formato, estando los coordinadores encargados de recoger estos datos y enviarlos al centro de control en formato SensorML. La transformación de los datos a formato SensorML implica un aumento en la cantidad de datos a enviar por los coordinadores hacia el centro de control, que según se ha podido extraer de pruebas realizadas supone un factor de aumento igual a 10.

Los nodos también realizar la monitorización continua del estado de sus enlaces con otros nodos y sobre su propio estado, enviándola periódicamente al centro de control donde es gestionada por una herramienta de monitorización.

En sentido descendente, el centro de control envía órdenes de reconfiguración y actuación a los distintos nodos de la plataforma. Sin embargo, la cantidad de tráfico en este sentido es mucho menor que la generada en sentido contrario, por lo que este trabajo se centra en el sentido ascendente.

III. GESTIÓN DE LA CONECTIVIDAD END-TO-END

En pruebas previas sobre el rendimiento del enlace heterogéneo en las que fue desplegado el enlace heterogéneo con las distintas tecnologías y los correspondientes nodos coordinador, pasarela y centro de control, se observó que la parte del enlace que puede limitar el rendimiento global del enlace es la parte correspondiente al nivel intermedio. En base a estos resultados, en este trabajo se propone una técnica de gestión permanente de la conectividad *end-to-end* centrada en realizar la gestión de los enlaces del nivel intermedio para evitar la pérdida de conectividad en la plataforma. La técnica propuesta intenta explotar la redundancia de enlaces entre nodos coordinadores y nodos pasarela, para adaptar la configuración de la red en base a información sobre el estado de los enlaces y nodos del sistema, y así garantizar la conectividad *end-to-end* de los nodos sensores con el centro de control. Para evitar la pérdida de conectividad en el sistema, la técnica propuesta intenta balancear la carga procesada por los distintos enlaces, en términos del nivel de utilización del canal, con el objetivo de evitar la saturación de estos ante cambios del entorno.

La conectividad *end-to-end* en el sistema de comunicaciones considerado en este trabajo se cumple cuando se garantiza que un paquete enviado por un nodo sensor es capaz de alcanzar el centro de control [5]. En este contexto, la pérdida de conectividad en el sistema vendrá dada por la pérdida de paquetes enviados por los nodos sensores hacia el centro de control. En los sistemas CSMA-CA, las dos principales causas que producen la pérdida de paquetes son las colisiones de paquetes y la congestión de las colas de datos de

los nodos [6]. Con el objetivo de evitar las pérdidas por colisiones, en este trabajo se ha propuesto el uso de la función PCF (*Point Coordination Function*) definida en el estándar 802.11 para coordinar el acceso al canal de los nodos del nivel intermedio. Mediante esta función, los nodos pasarela que actúan como puntos de acceso de la red, coordinan el acceso al canal de los nodos coordinadores mediante el envío de mensajes de sondeo. Solamente el nodo que recibe el mensaje de sondeo por parte del nodo pasarela puede acceder al canal para transmitir en cada momento, evitando colisiones entre las transmisiones de los nodos suscritos a dicho nodo pasarela. De esta manera, la pérdida de conectividad *end-to-end* vendrá dada por la pérdida de datos ocasionada por la saturación de la cola de datos de los nodos.

A. Utilización del canal

El objetivo de la técnica de gestión de la conectividad *end-to-end* propuesta es evitar la pérdida de datos generada por la saturación de la cola de datos de los coordinadores provocada por una elevada ocupación del enlace entre estos y los correspondientes nodos pasarela. Considerando que la velocidad a la cual un nodo coordinador i recibe datos desde el nivel local de la arquitectura viene representada por la variable IR_i , medida en kbps, para que la cola de datos del coordinador no aumente de tamaño, el nodo debería hacer llegar la información a la pasarela a la misma velocidad. Considerando que el coordinador i experimenta una tasa de error de paquete (PER, *Packet Error Rate*) PER_{ij} en el enlace con la pasarela j , la tasa de datos con la que el coordinador i debería transmitir viene dada por $OR_{ij} = IR_i / (1 - PER_{ij})$.

Conociendo el modo de transmisión m_{ij} a utilizar por el coordinador i en el enlace con la pasarela j , es posible calcular el tiempo de utilización del canal CU_{ij} que conlleva la transmisión del coordinador i en el enlace con la pasarela j . Tomando como referencia un periodo de 1s, el nodo i debe transmitir OR_{ij} bits a la pasarela j . Si cada paquete enviado por el coordinador i tiene una longitud $pktLgth$ en bytes, el número de paquetes NP_{ij} que el coordinador i debe enviar cada segundo vendrá dado por:

$$NP_{ij} = \left\lceil \left(\frac{OR_{ij}}{1 - PER_{ij}} \right) / (pktLgth \cdot 8) \right\rceil + 1 \quad (1)$$

donde $\lceil \cdot \rceil$ expresa la parte entera del resultado de la expresión que figura en el interior.

El tiempo de transmisión de un paquete de datos de longitud d (en bytes) implica, además del tiempo de transmisión de los datos, es decir, de la carga útil del paquete, el tiempo de transmisión de cabeceras y otros bits que forman el paquete a enviar por el canal radio. Considerando IEEE 802.11a, este tiempo viene dado por [8]:

$$T(pkt(d)) = 20\mu s + \frac{34 \cdot 8 + 16 + 6}{rate(m_{ij})} + \frac{d \cdot 8}{rate(m_{ij})} \quad (2)$$

Además, según la función PCF, la transmisión de cada paquete de datos por un coordinador, implica la transmisión previa de un paquete de sondeo T_{poll} desde la pasarela j hasta el coordinador i , y el transcurso de los correspondientes tiempos entre transmisiones de tramas (periodo SIFS, *Short Inter Frame Space*), por lo que el tiempo de utilización del canal que conlleva la transmisión de un paquete de datos de longitud d representado por $CU_{ij}(pkt(d))$ viene dado por:

$$CU_{ij}(pkt(d)) = 50.33\mu s + 2 \cdot 16\mu s + T(pkt(d)) \quad (3)$$

Considerando las expresiones (1), (2) y (3), el tiempo de utilización del canal que implica la transmisión del coordinador i a la pasarela j viene dado por:

$$CU_{ij} = (NP_{ij}) \cdot CU_{ij}(\text{pkt}(\text{pktLgth})) \quad (4)$$

Utilizando (4), es posible conocer la utilización del canal que supone la transmisión de cada coordinador a cada pasarela si se conoce tanto el PER que se experimentará en el canal como la tasa de transmisión a utilizar. Esta información se puede extraer del mecanismo de *Rate Adaptation* (RA) implementado en los nodos del nivel intermedio y las medidas sobre el estado de los enlaces, en concreto del SNR, realizadas por los nodos y enviadas de forma periódica al centro de control. El SNR de los enlaces entre los coordinadores y las pasarelas pueden ser relacionadas con el PER que experimentará en cada enlace a través de la relación SNR-PER dada en [7] para cada modo de transmisión. En base a la relación SNR-PER de [7], el mecanismo de RA implementado en cada coordinador elegirá en cada momento el modo de transmisión que le proporcione mayor *throughput*, por lo que es posible conocer tanto la tasa de transmisión $rate(m_{ij})$ que utilizaría cada coordinador en cada enlace, como el PER_{ij} del enlace, y por tanto, calcular el tiempo de utilización del canal que requeriría cada coordinador con cada pasarela.

B. Técnica CU-Balance

En base al valor de la utilización del canal que supone la transmisión de cada coordinador con cada pasarela, la técnica de gestión de la conectividad propuesta decide con qué pasarela debe comunicar cada coordinador, intentando realizar el balance del tiempo de utilización del canal en cada enlace con cada nodo pasarela. En este contexto, la técnica se ha denominado CUBalance-CM (*Channel Utilization Balance-based Connectivity Management*).

Para ello, la técnica CUBalance-CM expresa de manera matemática el problema a resolver. Con el objetivo de balancear el nivel de utilización de los enlaces con las distintas pasarelas, CUBalance-CM busca minimizar el valor de utilización del enlace con mayor carga en términos del nivel de utilización del canal, lo cual es expresado como:

$$\min \max_j K_j, \text{ donde } K_j = \sum_{i=1}^C CU_{ij} \cdot y_{ij} \quad (5)$$

donde K_j representa el nivel de ocupación del enlace con la pasarela j , C representa el número total de coordinadores implementados en el sistema, e y_{ij} es una variable binaria que toma el valor 1 si el coordinador i es asignado a la pasarela j y 0 en caso contrario. Cada nodo coordinador solamente puede comunicar con una pasarela en cada momento, $\sum_{j=1}^P y_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, C\}$, siendo P el número total de pasarelas. El problema modelado por CUBalance-CM, es expresado de manera lineal como:

$$\begin{aligned} & \min K \\ & \text{s.a.} \dots \\ & \sum_{i=1}^C CU_{ij} \cdot y_{ij} \leq K, \quad \forall j \in \{1, \dots, P\} \\ & \sum_{j=1}^P y_{ij} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, C\} \\ & K \in \mathfrak{R}, K < 1 \\ & y_{ij} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (6)$$

Al resolver el problema planteado, CUBalance-CM decide con que pasarela debe comunicar cada coordinador según la variable y_{ij} que toma el valor 1 para cada nodo.

IV. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO

A. Entorno de Evaluación

El rendimiento de la técnica de gestión de la conectividad *end-to-end* propuesta se ha llevado a cabo en una plataforma *software* que emula el sistema de comunicaciones jerárquico y heterogéneo propuesto en FASyS. La plataforma implementa las características más relevantes del sistema de comunicaciones que pueden influir en el rendimiento de la técnica de gestión de la conectividad implementada, por lo que el desarrollo de la plataforma se ha centrado principalmente en este nivel de la arquitectura.

Para los enlaces entre coordinadores y pasarelas, la plataforma considera los modos de transmisión definidos en el estándar IEEE 802.11a. Para modelar distintas condiciones de propagación radio, la plataforma incluye mapas de SNR en los que se considera condiciones de visión directa y no visión directa. Los nodos de este nivel de la arquitectura consideran el mecanismo de RA presentado en el apartado III.B. e implementa la función PCF para coordinar el acceso de los nodos coordinadores al canal radio.

Considerando las altas tasas de transmisión y el alto *throughput* de IEEE 802.16 en comparación con la tecnología IEEE 802.11, se ha establecido que todos los datos que llegan a las pasarelas son transmitidos al centro de control por los enlaces de *backhaul*. Por otro lado, teniendo en cuenta que la técnica de gestión de la conectividad solamente considera información sobre la cantidad de datos que llegan a los coordinadores desde el nivel local, se ha omitido la simulación de los enlaces de este nivel para ahorrar costes computacionales. La llegada de datos a los coordinadores se ha simulado mediante fuentes de datos asociadas a ellos que emulan la cantidad de datos generados por la red de sensores.

El escenario de evaluación considerado simula una planta industrial de 200m x 300m en el que se distribuyen 9 coordinadores y 3 nodos pasarela tal y como muestra la Fig. 1. En el escenario se simula el tráfico generado por 300 nodos sensores fijos y 400 nodos sensores móviles los cuales transmiten 10 paquetes de datos por segundo de 40 bytes. Al comienzo de la simulación se considera que los nodos sensores se distribuyen de manera homogénea por toda la planta. En los instantes 110s y 100s respectivamente se anuncia el comienzo de determinados trabajos en las zonas A y B marcadas en la Fig. 1, y 100 y 200 nodos móviles se desplazan hasta dichas zonas. En el instante 500s, los trabajos en ambas zonas finalizan y los nodos vuelven a distribuirse de manera homogénea por la planta.

En el nivel intermedio, los nodos coordinadores transmiten paquetes de datos de 1500 bytes, y tienen capacidad para

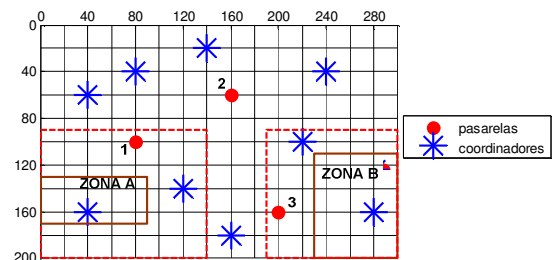


Fig. 1. Escenario de evaluación.

almacenar 32 kbytes en su cola de datos. El enlace de cada pasarela se establece en canales distintos. El tiempo de simulación es de 900s.

B. Resultados

Para la evaluación del rendimiento que proporciona la técnica de gestión de la conectividad propuesta, los resultados obtenidos son comparados con el rendimiento del sistema cuando no se aplica ninguna técnica de gestión de la conectividad y cada coordinador comunica siempre con la pasarela que le proporciona el enlace con mayor SNR. Además, los resultados son comparados con los obtenidos por una técnica de gestión de la conectividad basada en el estado de la cola de datos de los coordinadores (QueueBased-CM). Cuando la cola de datos de un coordinador se encuentra al 95% de su capacidad, este solicita el cambio de pasarela. Si el nodo puede establecer enlace con otro nodo pasarela, el nodo cambia de pasarela. Para evitar cambios continuos de coordinadores entre pasarelas, se establece que un nodo no podrá cambiar de pasarela hasta haber transcurrido 5s en ella. Finalmente, es importante decir que la técnica propuesta CUBalance-CM es aplicada de forma periódica cada vez que se actualizan los datos en el centro de control (periodo de 1s).

El rendimiento de las técnicas de gestión de la conectividad se ha medido en función de la cantidad de datos perdidos en el sistema, y en concreto, en los enlaces del nivel intermedio. Para mostrar el efecto de la movilidad y la concentración de nodos en determinadas zonas, los resultados son mostrados agrupando los coordinadores en tres zonas: la zona de influencia de la zona de trabajo A (marcada con línea discontinua en la Fig. 1 alrededor de la zona A), la zona de influencia de la zona de trabajo B (zona marcada con línea discontinua alrededor de la zona B), la zona correspondiente al resto de la planta. Como muestra la Tabla I, cuando no se aplica ninguna técnica de gestión de la conectividad, el cambio que se produce en el entorno hace que el despliegue y configuración realizada de la red de comunicaciones no sea adecuada para cumplir con los requisitos del sistema, ya que la elevada carga de tráfico generada en determinadas zonas hace que se desborde la cola de datos de los coordinadores

TABLA I
CANTIDAD DE DATOS PERDIDOS (KBYTES)

	Sin gestión de conectividad	CUBalance-CM	QueueBased-CM
ZONA A	6844.07	350.21	3994.32
ZONA B	43876.76	7408.46	13098.55
Fuera zona influencia	79.85	36.98	195.57

TABLA II
NÚMERO DE CAMBIOS DE NODO PASARELA POR NODO COORDINADOR

	Sin gestión de conectividad	CUBalance-CM periódico	QueueBased-CM
ZONA A	0.00	5.89	113.11
ZONA B	0.00	11.22	57.61
Fuera zona influencia	0.00	18.84	19.71

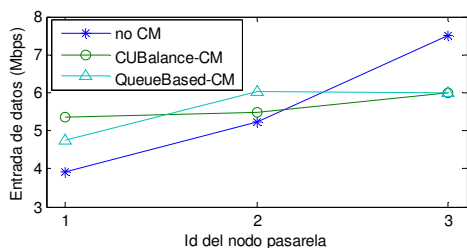


Fig. 2. Tasa media de llegada de datos a los nodos pasarela.

que dan soporte a dichas en esas zonas.

Aunque la técnica de referencia QueueBased-CM mejora considerablemente el rendimiento del sistema (reduce un 65.9% la pérdida de datos), la mejora conseguida es menor que la que obtiene la técnica CUBalance-CM (reduce las pérdidas en un 84.7%). La Tabla II muestra el número medio de cambios de pasarela que realiza cada coordinador en las distintas zonas de la planta. Con la técnica QueueBased-CM, los nodos coordinadores realizan un elevado número de cambios de pasarela, lo cual puede resultar incluso inviable en algunos casos; los nodos coordinadores cerca de la zona A realizan, en media, un cambio cada 8s, mientras que CUBalance-CM proporciona una solución mucho más estable.

Por último, la Fig. 2 muestra la tasa media de llegada de datos a las pasarelas a lo largo de la simulación. Como se puede observar, CUBalance-CM consigue distribuir de forma más homogénea la carga de tráfico entre las 3 pasarelas, lo cual le permite un mayor margen de reacción ante posibles cambios repentinos en el entorno.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto una técnica de gestión de la conectividad *end-to-end* para un sistema de comunicaciones inalámbricas jerárquico y heterogéneo. La técnica de gestión propuesta aprovecha la redundancia de enlaces en el sistema para adaptar la configuración de la plataforma a los cambios de operación y modificaciones operativas del entorno y proporcionar una solución de conectividad completa. La técnica propuesta CUBalance-CM basa su decisión en información sobre el contexto actual del sistema (SNR de los enlaces y cantidad de datos que debe transmitir cada coordinador) como sobre la utilización del canal que la elección de cada enlace conllevaría. La evaluación de la técnica propuesta ha demostrado su potencial para adaptar la configuración del sistema de comunicaciones ante cambios del entorno minimizando la pérdida de datos en el sistema y proporcionando una solución estable que evita el cambio continuo de los enlaces establecidos entre los nodos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación en el proyecto CENIT CEN-20091034.

REFERENCIAS

- [1] FASyS official website: <http://www.fasys.es/en/>.
- [2] E. Ancillotti, R. Bruno, M. Conti, "Load-balanced Routing and Gateway Selection in Wireless Mesh Networks: Design, Implementation and Experimentation", *Proc. of WoWMoM*, pp. 1-7, Montreal, Canada, 2010.
- [3] C. Basaran, Kyoung-Don Kang, M. H. Suzer, "Hop-by-hop congestion control and load balancing in wireless sensor networks", *Proc. of the IEEE 35th LCN Conference*, pp. 448-455, Denver, USA, 2010.
- [4] S. Rangwala, A. Jindal, Ki-Young Jang, K. Psounis, R. Govindan, "Neighborhood-Centric Congestion Control for Multihop Wireless Mesh Networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 19, no.6, dic. 2011.
- [5] T. Braun, M. Diaz, J. E. Gabeiras, T. Staub, *End-to-End Quality of Service Over Heterogeneous Networks*, Springer, 2008.
- [6] Jang-Ping Sheu, Li-Jen Chang, Wei-Kai Hu, "Hybrid Congestion Control Protocol in Wireless Sensor Networks", *Journal of Information Science and Engineering*, vol 25, pp. 1103-1119, 2009.
- [7] J. He, W. Guan, L. Bai, K. Chen, "Theoretic Analysis of IEEE 802.11 Rate Adaptation Algorithm SampleRate", *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no.5, pp. 524-526, mayo 2011.
- [8] M. Ergen, P. Varaiya, "Throughput Analysis and Admission Control for IEEE 802.11a", *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, pp. 705-716, 2005.