

Evaluation of MAC protocols for IoT satellite systems

Tomás Ferrer¹, Sandra Céspedes¹, and Alex Becerra²

¹Dep. of Electrical Engineering, Universidad de Chile, Santiago, Chile,

²Aurora Space ,

abecerra@auroraspace.cl, (tferrer, scespedes)@ing.uchile.cl

Abstract

The growing development of Internet of Things (Internet of Things) applications and machine-to-machine (M2M) communications has extended throughout the world, including remote areas as well as extreme and unpredictable mobility applications. This fact motivates the use of satellite technology as an alternative to connectivity for the growing number of devices destined to the IoT around the globe. The existing solutions for this service (e.g., Argos) may not offer a scalable solution to the expected number of devices to be connected in the near future. This promotes the consideration of MAC protocols development for the satellite environment. In addition, given the current interest and relevance of low-cost solutions for space technology with *cubesats*, simple, low processing and low storage demands protocols are prioritized. This document reviews and exposes the performance of the main protocols considered for satellite IoT.

1 INTRODUCCIÓN

La llegada de las comunicaciones de quinta generación en conjunto con el nuevo paradigma del Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés), traen consigo la creación de un sinfín de aplicaciones y el inmenso incremento en la cantidad de dispositivos conectados a la red de Internet. Muchas de estas aplicaciones se dan en ambientes remotos, sin posibilidad

Copyright © by the paper's authors. Copying permitted for private and academic purposes.

In: Proceedings of the IV School of Systems and Networks (SSN 2018), Valdivia, Chile, October 29-31, 2018. Published at <http://ceur-ws.org>

de conectar con redes convencionales, o en algunos casos, por la naturaleza móvil de la aplicación, resulta dificultoso realizar algún tipo de conexión. Respecto a esto último, adquiere relevancia y protagonismo la tecnología satelital, en específico el desarrollo de constelaciones satelitales, capaces de dar conectividad al 100% de la superficie terrestre.

Esta tecnología no es algo nuevo, varios sistemas satelitales ya han sido desplegados y están operativos. Las aplicaciones de estos son principalmente el servicio de voz, servicio de banda ancha y monitoreo remoto [Woo03]. En servicio de voz destacan las constelaciones de Iridium [Leo92], Globalstar [WV93], entre otras. Sin embargo este servicio se vió opacado por el auge de las redes GSM y la gran cobertura de las redes celulares. Para servicio de banda ancha destaca Teledesic [Woo03], además de futuros proyectos, tales como el de la empresa SpaceX, con la intención de formar una constelación de 4.000 satélites (proyecto ya aprobado por la FCC-*Federal Communications Commission* [18]). En cuanto a monitoreo remoto, en 1978 nace Argos [Cla89], sistema consistente en una constelación de satélites monitoreando sensores terrestres dispuestos a lo largo de todo el globo.

Dado el panorama actual en cuanto a desarrollo de nanosatélites y *cubesats*, resalta el bajo costo de implementación y el fácil acceso a la tecnología [PTA01]. Esto motiva el despliegue de aplicaciones científicas y comerciales a un menor costo que los despliegues que usan los sistemas satelitales tradicionales antes descritos.

Pensando en una red satelital de bajo costo orientada a proveer servicio de acceso a dispositivos de IoT para monitoreo remoto, considerando en ello los recursos limitados del nanosatélite y el carácter masivo de las aplicaciones típicas de IoT, se prevé la dificultad de coordinar el acceso a los canales, o el único canal en muchos casos, que será otorgado a los nodos terminales bajo la huella del satélite, huella cuyo radio se extiende hasta el orden de cientos de kilómetros,

donde se pueden localizar desde cientos hasta miles de nodos. La Fig. 1 ilustra un escenario esperado de IoT satelital, con cobertura del satélite en un área definida por un radio de $600[km]$ aproximadamente y 600 nodos terminales (i.e., estaciones terrenas) bajo la huella del satélite.

La necesidad de un acceso coordinado hacia el satélite motiva el estudio de protocolos de Control de Acceso al Medio (MAC por sus siglas en ingles), encargados de regular y coordinar el acceso al canal de comunicaciones de todos los actores de la red, con el fin de impedir la pérdida de información, minimizando los tiempos ociosos y haciendo uso del canal de la manera más eficiente posible.

En este artículo se hace una revisión de protocolos MAC desarrollados para entornos satelitales, y se evalúa de forma cuantitativa y cualitativa su pertinencia para ser utilizados en el nuevo contexto de IoT satelital.

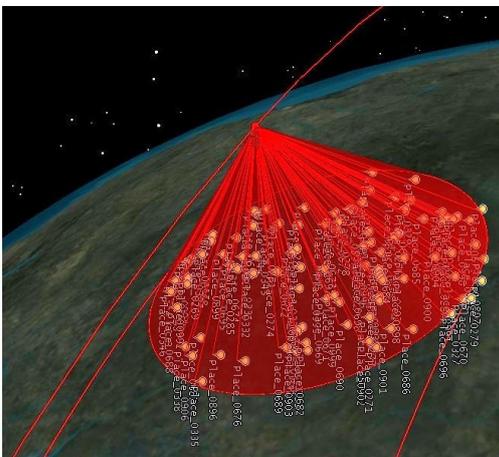


Figure 1: Huella de visión de satélite en tierra y nodos visibles en un instante.

2 REVISIÓN DE PROTOCOLOS

Muchos son los protocolos MAC que han sido desarrollados para distintas aplicaciones. A grandes rasgos, estos se pueden clasificar principalmente en 5 categorías [Pey99]: asignación fija, asignación por demanda, acceso aleatorio, mecanismo adaptativo y asignación por reserva.

En cuanto a las constelaciones satelitales mencionadas, las destinadas a servicios de voz y banda ancha utilizan principalmente protocolos de asignación fija, tales como TDMA, FDMA, CDMA. Argos, en cambio, utiliza una adaptación de Aloha [RS12], uno de los protocolos más representativo de la categoría de acceso aleatorio.

Pensando en el servicio de IoT, en este trabajo se descartan los protocolos de asignación fija debido a su rigidez en cuanto a la cantidad variable y masiva de terminales considerada en el escenario de estudio. Más aún, en cualquier caso, ya sea un protocolo de

reserva, demanda o adaptativo, requerirá en algún nivel, mecanismos aleatorios, ya sea para realizar la reserva del canal, o bien para solicitar recursos. Por esto, se enfatiza el estudio en protocolos acceso aleatorio.

En ambientes satelitales, los protocolos MAC de acceso aleatorio o similar que destacan son:

Aloha [RS12][HL10]: Cada nodo envía datos cuando tiene datos para enviar, esperando que no se genere una colisión en la recepción. Cuando el receptor recibe correctamente el mensaje envía un ACK (*acknowledgement*), de lo contrario, el nodo reenviará el mismo mensaje al cabo de un tiempo constante o aleatorio. Su principal ventaja consiste en su simpleza y fácil implementación, pues el nodo receptor solo debe enviar el ACK. Como fue mencionado, Argos utiliza este mecanismo. Sus desventajas radican principalmente en que el rendimiento, en cuanto a utilización del canal, cae drásticamente para cargas altas del canal. En [HL10] se propone *Enhanced Aloha*, el cual realiza mejoras a este protocolo, con el fin de mejorar el rendimiento para un número mayor de terminales.

CRDSA [CDD07]: Protocolo muy parecido a *Diversity Slotted Aloha* [CR83] (*Aloha* con canal discretizado y número limitado de dos retransmisiones), con la gran diferencia de que resuelve sucesivamente las interferencias entre paquetes, a través del algoritmo *SIC-Successive Interference Cancellation*. Permite mayores sobrecargas del canal con buen rendimiento. Su principal desventaja es que su implementación demanda alto procesamiento y almacenamiento, además de requerir buenas condiciones de canal. Tiene versiones más avanzadas como CRDSA++, MuSCA [DS16], MC-PCA-CA [Won+18], las cuales logran mejoras en rendimiento. Estos protocolos se utilizan principalmente en sistemas geoestacionarios para el registro de terminales al sistema y la inicial demanda de recursos. Para la posterior comparación se considerará CDRSA y MuSCA.

FC-TDMA: Propuesto en [LZG16], es un protocolo adaptativo, que combina *Slotted Aloha* y TDMA. Inicialmente el acceso es aleatorio y progresivamente se tienden a repartir intervalos de tiempo entre el número arbitrario de nodos, en el mejor de los casos, se alcanza a repartir eficientemente el canal y el protocolo se comporta como TDMA. Se desarrolla con el fin de ser aplicado a un sistema similar al escenario de este estudio, consistente en monitoreo de boyas marinas a través de un satélite. Este protocolo tiene resultados simulados satisfactorios, variando su utilización de canal entre 36.7% en los peores casos (máximo de *Slotted Aloha*) y alcanzando 100% (máximo para TDMA) bajo circunstancias específicas.

CSMA/CA [BFO96]: En [CW07] se evalúa el rendimiento de este protocolo, usado ampliamente en comunicaciones inalámbricas, esta vez adaptado para

aplicación satelital. Básicamente, consiste en que todos los nodos realizan una disputa por el acceso antes de enviar sus datos, esta disputa se lleva a cabo mediante la espera de un tiempo aleatorio complementado con el constante monitoreo de la ocupación del canal.

3 Evaluación Comparativa

Como fue mencionado, el servicio de IoT satelital considera una cantidad masiva de terminales terrestres, que pueden corresponder a nodos sensores o actuadores, por lo que en esta sección se revisa el rendimiento de los protocolos para distintas cargas. Para esto, principalmente nos enfocamos en dos métricas: Carga ofrecida normalizada y Rendimiento normalizado.

Carga ofrecida normalizada (C): Es el cociente entre el total de datos inyectados a la red y el máximo de datos que se podrían enviar en el mismo tiempo considerando la capacidad del canal. La carga ofrecida normalizada está calculada de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$C = \frac{\sum D_i}{T_x \cdot t}, \quad (1)$$

donde D_i son los datos a enviar por el nodo i durante el tiempo t arbitrario, T_x es la capacidad del canal.

Rendimiento normalizado (S): Es el cociente entre el total de datos recibidos por el satélite en un tiempo dado y el total de datos que se podrían enviar durante el mismo tiempo considerando la capacidad del canal. Se puede interpretar como cuán efectivo es el uso del canal. Siempre se cumple que $S \leq C$. El rendimiento normalizado se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación

$$S = \frac{D_r}{T_x \cdot t}, \quad (2)$$

donde D_r son los datos recibidos por el satélite, T_x es la capacidad del canal y t es un tiempo arbitrario. Según estas métricas se evalúan los protocolos descritos en la sección 2.

Con el fin de comparar los protocolos bajo las mismas condiciones, se define un escenario genérico que corresponde a tráfico típico de IoT que es recolectado por nodos sensores y enviados a través de terminales terrenas hacia un *cubesat*.

Considerando un despliegue con *cubesats* de altura de aprox. $600[km]$, con un único canal con capacidad de $10[kbps]$, se asume que el satélite establece conexión en un diámetro de $1200[km]$ en tierra (este valor depende de la apertura de la antena) y que puede ver un mismo punto en la tierra durante $120[s]$ (valor que queda definido por la velocidad de satélite y en consecuencia, por su altura). Luego, asumiendo que cada terminal desea enviar al satélite una cantidad de datos de tamaño $250[B]$ y considerando que son 600 terminales, se tendría una carga normalizada igual a:

$C = \frac{600 \cdot 250[B]}{10[kbps] \cdot 120[s]} = 1$. Si se exige que el 90% de los terminales logre enviar los datos, se tendría un Rendimiento normalizado de $S = 0.9 \cdot C = 0.9$.

Este escenario sirve como referencia para visualizar las capacidades de cada protocolo, y tomando las asunciones como cercanas a la realidad, se puede analizar la pertinencia de los protocolos descritos para escenarios esperados de IoT.

3.1 Discusión de resultados

Tomando como referencia el escenario de IoT descrito, se discuten los resultados expuestos en la Tabla 1, obtenidos para los protocolos MAC más relevantes de acceso aleatorio para IoT satelital; Enhanced Aloha [HL10], CRDSA [CDD07], FC-TDMA [LZG16] y CSMA/CA [CW07].

En la tabla se muestran los mejores rendimientos alcanzados por cada protocolo para la cantidad máxima de nodos según los casos de estudio. Luego, el balance para cada caso es el siguiente:

Protocolos	S	C	Nodos
Enhanced Aloha	0.51	0.57	115
CRDSA	0.55	0.6	100
MuSCA	1.4	1.4	700
FC-TDMA	1	1	50
CSMA/CA	0.6	1	50

Table 1: Comparación de protocolos MAC. S: Rendimiento normalizado, C: Carga normalizada

Enhanced Aloha: Ventajas: Fácil implementación.

Desventajas: Su rendimiento es insuficiente respecto al escenario de ejemplo.

CRDSA/MuSCA: Ventajas: Extraordinario desempeño para altas cargas, satisface con creces el escenario de ejemplo, sin embargo el número máximo de nodos es fijo y está previamente definido por la cantidad de intervalos de tiempo en los cuales se divide el canal.

Desventajas: El nivel de procesamiento es excesivo para un *cubesat*, además, las condiciones de canal que se tienen que dar para realizar la cancelación de interferencia son desproporcionadas para un enlace satelital de orbita baja.

FC-TDMA: Ventajas: Buen desempeño, suficiente para el escenario ejemplo, aunque hace falta evaluación para una mayor cantidad de nodos.

Desventajas: La evaluación no considera el retardo en la adaptación del esquema de control de acceso. Además, en la literatura no se provee el algoritmo esencial para la implementación del protocolo.

CSMA-CA: Ventajas: Buen rendimiento.

Desventajas: Por razones propias del entorno satelital, la cantidad de nodos escondidos es consider-

able. Bajo esta condición el rendimiento del protocolo decae drásticamente.

4 TRABAJO FUTURO

Del análisis previo se desprende que de los protocolos desarrollados actualmente para entornos satelitales no hay alguno que sea simple, masivo y aplicable a la dinámica del escenario.

A futuro se podrían considerar dentro de la evaluación a protocolos MAC desarrollados para entornos distintos al satelital y evaluar posibles adaptaciones que les permitan ser aplicados con buen desempeño en este entorno para IoT. Para esto se podrían considerar redes con características similares: en donde los recursos compartidos entre transmisores y receptores sean limitados, se vele por la eficiencia energética y la simpleza en la implementación. Un ejemplo de redes que se ajustan a estas características son las redes inalámbricas de sensores (WSN- *Wireless Sensor Networks*).

References

- [CR83] Gagan Choudhury and Stephen Rappaport. “Diversity ALOHA—A random access scheme for satellite communications”. In: *IEEE Transactions on Communications* 31.3 (1983), pp. 450–457.
- [Cla89] David D Clark. “Overview of the Argos system”. In: *OCEANS’89. Proceedings*. Vol. 3. IEEE. 1989, pp. 934–939.
- [Leo92] Raymond J Leopold. “The Iridium communications systems”. In: *Singapore ICCS/ISITA’92. Communications on the Move’*. IEEE. 1992, pp. 451–455.
- [WV93] Robert A Wiedeman and Andrew J Viterbi. “The Globalstar mobile satellite system for worldwide personal communications”. In: (1993).
- [BFO96] G Bianchi, L Fratta, and M Oliveri. “Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs”. In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1996. PIMRC’96., Seventh IEEE International Symposium on 2* (1996), 392–396 vol.2. DOI: 10.1109/PIMRC.1996.567423.
- [Pey99] H. Peyravi. “Medium access control protocols performance in satellite communications”. In: *IEEE Communications Magazine* 37.3 (1999), pp. 62–71. ISSN: 01636804. DOI: 10.1109/35.751497. URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs%7B%5C_%7Da11.jsp?arnumber=751497.
- [PTA01] Jordi Puig-Suari, Clark Turner, and William Ahlgren. “Development of the standard CubeSat deployer and a CubeSat class PicoSatellite”. In: *Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings*. Vol. 1. IEEE. 2001, pp. 1–347.
- [Woo03] Lloyd Wood. “Satellite constellation networks”. In: *Internetworking and Computing over Satellite Networks*. Springer, 2003, pp. 13–34.
- [CDD07] Enrico Casini, Riccardo De Gaudenzi, and Oscar Del Rio Herrero. “Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): An enhanced random access scheme for satellite access packet networks”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 6.4 (2007), pp. 1408–1419. ISSN: 15361276. DOI: 10.1109/TWC.2007.348337.
- [CW07] Andrew D. Cawood and Riaan Wolhuter. “Comparison and optimisation of CSMA/CA back-off distribution functions for a low earth orbit satellite link”. In: *IEEE AFRICON Conference (2007)*. DOI: 10.1109/AFRCON.2007.4401598.
- [HL10] Haoling Ma and Lin Cai. “Performance analysis of randomized MAC for satellite telemetry systems”. In: (2010), pp. 1–5.
- [RS12] Raphael Rom and Moshe Sidi. *Multiple access protocols: performance and analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [DS16] Paul Dickson and Christian Schlegel. “Analysis and verification of iterative estimation for joint random access satellite communications”. In: *Aerospace Conference, 2016 IEEE*. IEEE. 2016, pp. 1–10.
- [LZG16] Peng Luan, Jiang Zhu, and Kai Gao. “An improved TDMA access protocol in LEO satellite communication system”. In: *ICSPCC 2016 - IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, Conference Proceedings (2016)*, pp. 5–8. DOI: 10.1109/ICSPCC.2016.7753612.
- [18] *FCC Authorizes SpaceX to Provide Broadband Satellite Services*. May 2018. URL: <https://www.fcc.gov/document/fcc-authorizes-spacex-provide-broadband-satellite-services>.
- [Won+18] David Tung Chong Wong et al. “Multi-Channel Pure Collective Aloha MAC protocol with decollision algorithm for satellite uplink”. In: *Internet of Things (WF-IoT), 2018 IEEE 4th World Forum on*. IEEE. 2018, pp. 251–256.