

Internet Interplanetario: desafíos y propuestas de implementación

Alexis Diomedi

Resumen—Las comunicaciones de espacio profundo se caracterizan por poseer retardos de propagación considerablemente largos, además de una inherente intermitencia en los enlaces producto del constante movimiento en el que se encuentran tanto planetas como satélites. La exploración del sistema solar requiere tanto de una infraestructura como de un conjunto de protocolos que sean capaces de transportar datos científicos y de telemetría a grandes distancias, lidiando de manera efectiva con los problemas antes mencionados, a la vez que se intenta comprometer lo menos posible el desempeño del sistema. Este trabajo explora las propuestas que han surgido a la fecha para la implementación de estas ideas, que dan lugar al concepto del internet interplanetario.

Index Terms—Internet, interplanetario, exploración espacial, comunicaciones espaciales, DTN.

1. INTRODUCCIÓN

LA exploración espacial de nuestro Sistema Solar involucra la comunicación de estaciones terrestres con sondas a millones de kilómetros de distancia, a lo largo de enlaces de alta latencia e intermitencia periódica. En la actualidad la forma más común de comunicación es la utilización de enlaces punto a punto, que requieren de transmisores de altísima potencia y receptores extremadamente sensibles, equipo que para muchas agencias hoy en día sólo se encuentra disponible como parte de las instalaciones de la Deep Space Network, administrada por la NASA, que posee un número limitado de antenas y debe atender a decenas de misiones distintas, por lo que las ventanas de tiempo para poder utilizar los transmisores son un recurso cada vez más escaso.

Con tantas misiones de exploración desplegándose, va tomando fuerza la idea de implementar una red de comunicación interplanetaria que permita la interoperabilidad entre distintas misiones, dando la posibilidad de comunicarse localmente entre ellas además de enviar mensajes de vuelta a la Tierra. Esta red, al distribuir la capacidad de transmisión por todo el Sistema Solar, facilitaría la comunicación entre todos los nodos que la compongan, facilitando el desarrollo de misiones de exploración y de futuras iniciativas comerciales y de colonización.

En este trabajo se pretende investigar y evaluar las varias propuestas que han surgido para la implementación efectiva de una red de comunicación interplanetaria inspirada en la Internet.

2. TECNOLOGÍAS Y ESTÁNDARES EXISTENTES

A lo largo de las décadas pasadas, agencias espaciales y empresas privadas de varios países han lanzado cientos de satélites al espacio. A medida que el número de agencias ha ido aumentando, se ha hecho necesario establecer ciertos estándares para promover la colaboración. Si bien, se han

obtenido grandes logros, todavía existe dificultad para establecer enlaces de comunicación a distancias interplanetarias, siendo la Deep Space Network la infraestructura de red más utilizada para este tipo de comunicaciones.

2.1. Deep Space Network

La NASA, con el propósito de dar soporte a las múltiples misiones de exploración espacial que se llevan hoy en día, opera y mantiene 3 redes de comunicación, telemetría, control y seguimiento para apoyar a distintos tipos de misiones: la Near Earth Network (NEN), la Space Network (SN) y la Deep Space Network (DSN). La NEN da soporte a las misiones desarrolladas en espacio cercano, no más allá de la órbita lunar; la SN tiene como objetivo primario aumentar la tasa de transmisión de datos para los sistemas de comunicación satelital; y finalmente, la DSN proporciona servicios de seguimiento, transmisión y recepción de datos a todas las misiones que se desarrollan en espacio interplanetario.

La infraestructura planetaria de la Deep Space Network consiste en 3 instalaciones situadas a aproximadamente 120 grados de distancia en longitud terrestre, estos complejos se localizan en Goldstone, California; en las afueras de Madrid, España; y cerca de Canberra, en Australia. Cada instalación posee un conjunto de antenas de alta directividad y distintos diámetros que son usadas para transmitir en algún canal de *uplink* (desde la Tierra al espacio) o recibir en alguna frecuencia de *downlink* (desde el espacio a la Tierra). De todas las antenas disponibles, las más grandes corresponden a los reflectores de 70 m de diámetro, poseen una potencia de transmisión máxima de 20 kW, con una tasa máxima de *uplink* de 256 kbits/s, y de hasta 6 Mbits/s de *downlink* para enlaces de espacio profundo.

A pesar del nombre, hoy en día no existen planes para lanzar satélites parte de la DSN dedicados exclusivamente a manejar comunicaciones entre distintos agentes pertenecientes a distintas misiones espaciales, por lo que en

realidad la DSN es una “red” que posee toda su equipo de transmisión y recepción en la Tierra, lo que restringe severamente la transmisión de datos de todas la sondas y naves espaciales debido a su distancia a nuestro planeta. Además, los transmisores de 70 m, que son los más potentes de toda la red, son viejos y se acercan al final de su vida útil, lo que en el futuro cercano complicará más aún las comunicaciones a misiones de espacio profundo.

2.2. Propuestas actuales

El Comité Consultivo de Sistemas de Datos Espaciales (CCSDS) ha propuesto un conjunto de extensiones a protocolos existentes y propuestas de nuevos protocolos, dentro de los cuales los más prometedores son los que implementan el concepto de Delay-Tolerant Networking (DTN).

Una DTN es, en esencia, una red compuesta de varias redes más pequeñas. Las DTN están pensadas para soportar la compatibilidad entre distintas redes permitiendo la existencia de grandes retardos de comunicación entre estas y traduciendo entre los distintos protocolos que soportan las capas inferiores de dichas redes. A diferencia de las redes que se usan comúnmente, que usan una estrategia de conmutación de paquetes, las DTN funcionan en base al principio *store and forward*, siguiendo un modelo de envío de paquetes reminiscente a los servicios postales de antaño.

Las ideas detrás de las Delay-Tolerant Networks nacieron de una adaptación de un concepto más antiguo, propuesto por Vinton Cerf en 1997: La Internet Interplanetaria. Cerf imaginaba un futuro donde varias Internets planetarias estuvieran conectadas a lo largo del Sistema Solar por un conjunto de estaciones orbitando en espacio interplanetario. Esta “Internet de Internets” posee un modelo de comunicación tipo *store and forward* para comunicar las redes planetarias entre sí. Una serie de experimentos llevados a cabo en la década de los 2000 que implementaron sistemas de tipo DTN han probado la factibilidad de construir una Internet interplanetaria.

El protocolo estándar que existe hoy para la implementación de una DTN es el Bundle Protocol, que implementa los principios básicos detrás de este tipo de redes, y funciona en conjunto con el Licklider Transmission Protocol, que hace las veces de protocolo de capa de enlace para la transmisión de datos a distancias interplanetarias. Estos dos son los protocolos más importantes que se han propuesto hasta la fecha para la implementación de una DTN.

3. BUNDLE PROTOCOL

La arquitectura DTN implementa el principio *store and forward* por medio del protocolo Bundle, el cual se sitúa como una sub-capa del modelo OSI, entre las capas de aplicación y transporte. El BP une protocolos de capas más bajas de modo que se pueda usar sobre distintas arquitecturas de red, basadas en distintos tipos de protocolos.

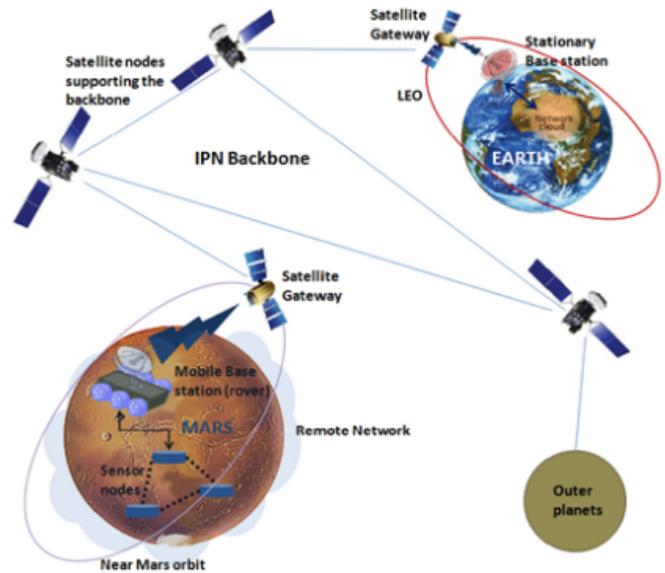


Figura 1: Representación de una posible arquitectura de red de espacio profundo. Se muestra un conjunto de redes planetarias comunicándose con el Internet terrestre. Las redes remotas eligen entre distintos gateways satelitales para acceder al backbone IPN (InterPlanetary Network), los cuales actúan de interfaz entre dichas redes y el resto de la red interplanetaria.

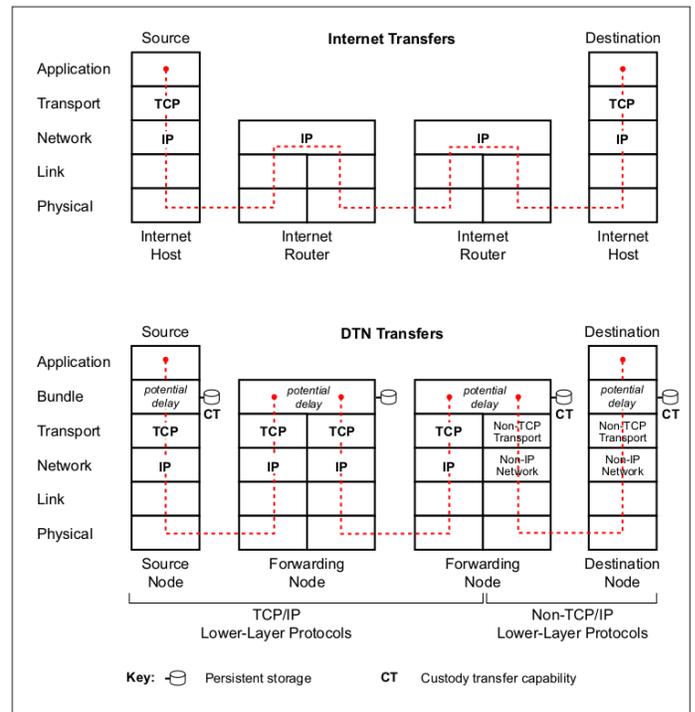


Figura 2: Comparación entre una transacción de datos típica de internet y una en DTN. El BP especifica que existe capacidad de almacenamiento en todos los nodos intermedios de la red, permitiendo la existencia de retrasos sin perturbar el envío de paquetes.

Version (1 byte)	Bundle Processing Flags (SDNV)
Block length (SDNV)	
Destination scheme offset (SDNV)	Destination SSP offset (SDNV)
Source scheme offset (SDNV)	Source SSP offset (SDNV)
Report-to scheme offset (SDNV)	Report-to SSP offset (SDNV)
Custodian scheme offset (SDNV)	Custodian SSP offset (SDNV)
Creation Timestamp time (SDNV)	
Creation Timestamp sequence number (SDNV)	
Lifetime (SDNV)	
Dictionary length (SDNV)	
Dictionary byte array (variable)	
Fragment offset (SDNV, optional)	
Total application data unit length (SDNV, optional)	

(a) Formato de bloque Bundle primario

Block type	Bundle Processing Flags (SDNV)	Block length (SDNV)
Bundle Payload (variable)		

(b) Formato de bloque de *payload*

Figura 3: Formatos básicos de bloque del protocolo Bundle

Los agentes que corren BP almacenan y reenvían la información en paquetes llamados *bundles* entre los distintos nodos de la red. El protocolo está diseñado para correrse de forma común a varias redes, las cuales a su vez tendrán una pila de protocolos inferiores que serán elegidos acorde a las características de estas subredes. Este además tiene una serie de consideraciones de seguridad implementadas en el Bundle Security Protocol, una extensión adicional al BP.

3.1. El paquete *Bundle*

Cada bundle es una secuencia concatenada de al menos 2 tipos de bloque distintos. El primer bloque debe ser un bloque de *bundle* primario, que hace las veces de header principal: contiene información como la versión del protocolo, el destino, el largo o el tiempo de vida del paquete. Los siguientes bloques deben ser de *payload*, y contienen un header básico más la información que se desea enviar a través de la red.

3.2. Envío de *bundles*

El BP, a diferencia de TCP, es un protocolo orientado a mensajes, pensado para que el envío completo de un *bundle* tome la menor cantidad de mensajes de ida y vuelta posible. Cada nodo intermedio posee su propio espacio de almacenamiento, para guardar los mensajes hasta que se cumpla el tiempo máximo de vida del paquete, o el nodo siguiente acepte la custodia del mismo. En todo momento existe un nodo que posee la "custodia" del paquete a enviar, el cual espera hasta que el nodo siguiente esté visible para poder enviar el *bundle*, el nodo receptor, a su vez,

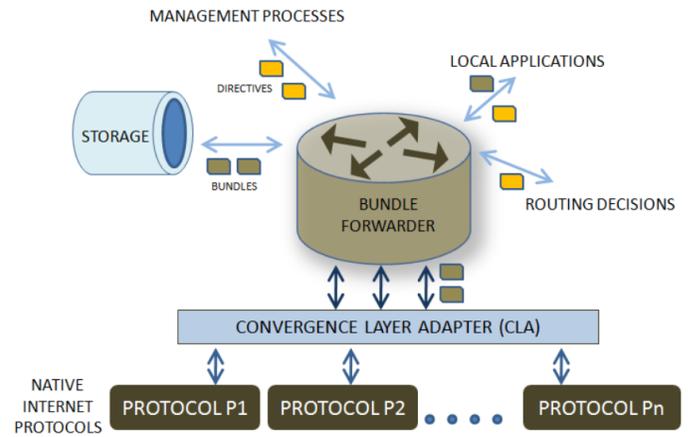


Figura 4: Ejemplo de un nodo implementando del protocolo Bundle. La arquitectura muestra como el nodo interactúa con los otros componentes, particularmente con la capa de convergencia que le permite correr sobre varios tipos de red distintas.

envía al transmisor un mensaje de "aceptación de custodia", con lo cual el transmisor puede borrar el paquete de su almacenamiento. Cada nodo repite este proceso hasta que el *bundle* llega a su destino. Para un ejemplo más detallado del proceso, leer [4].

3.3. Capa de convergencia

La operación exitosa del protocolo depende de funcionamiento de los protocolos de la capa inferior, los cuales son denominados "la capa de convergencia". Esta capa es la que permite la operación del BP sobre una diversa variedad de redes. Estos protocolos, por especificación del BP, deben proveer ciertas condiciones mínimas para servir de manera correcta como un protocolo de capa de convergencia, condiciones que están especificadas en [6].

4. LICKLIDER TRANSMISSION PROTOCOL

Diseñado para proveer confiabilidad sobre enlaces caracterizados por tiempos de propagación extremadamente largos, el Licklider Transmission Protocol (LTP) fue resultado del consenso del Delay Tolerant Networking Research Group de la IRTF para la implementación de un protocolo adecuado para ser usado en la capa de convergencia de BP en el contexto de las comunicaciones interplanetarias. LTP hace retransmisión automática de datos por medio de la solicitud de reportes que confirman selectivamente la recepción de segmentos. La transmisión posee varios estados, y no tiene ningún tipo de handshake o negociaciones previas.

4.1. Formato del segmento

Como se muestra en la figura 5, la estructura de cada segmento LTP consta de 3 partes: un header, con información básica del segmento y la conexión, una sección de contenido donde van los datos a transmitir, y un campo de extensión que proporciona funciones adicionales, como autenticación.

Bit	0	1	2	3	4	5	6	7
Header	Version number				Segment Type Flags			
	Session ID							
	Header Extension Cnt.				Trailer Extension Cnt.			
	Header Extensions							
Trailer	Segment Content							
	Trailer Extensions							

Figura 5: Formato básico de segmento del Licklider Transmission Protocol. Más detalles de los campos en [7].

Existen varios tipos de segmentos en LTP de los cuales los más importantes de son los segmentos de datos y de reporte. Los primeros, además de la carga obvia, transportan información acerca del largo y el offset de los datos dentro del bloque a transmitir, además de una referencia al checkpoint al cual están asociados. Los segmentos de reporte son enviados por el receptor cada vez que reciben un segmento de datos marcado como checkpoint, y en el reporte indican todos los bloques de segmentos que no ha recibido desde el checkpoint anterior, de este modo el emisor sabe cuáles debe retransmitir.

4.2. Envío de segmentos

LTP es un protocolo punto a punto. Cada envío consta de una parte "roja" y otra "verde", y se diferencian en que la primera consiste en paquetes que el usuario ha solicitado que lleguen confiablemente a destino, cuyos segmentos son reenviados si es necesario, para asegurar esta garantía; la parte verde es de baja prioridad, y se envía una sola vez, sin ningún tipo de garantía de que llegue a destino.

La figura 6 La transmisión comienza con el emisor enviando al receptor un mensaje con los parámetros de la sesión, luego de lo cual empieza mandando la parte roja del paquete a transmitir. Al enviar los segmentos rojos, periódicamente se envía un segmento marcado como checkpoint, al cual el receptor deberá responder con un segmento de reporte, con lo cual el emisor sabrá que segmentos debe retransmitir. Una vez enviada la parte roja del mensaje se comienza con la transmisión de la parte verde, luego de lo cual se espera a que el receptor confirme la llegada de todos los segmentos rojos para cerrar la transmisión.

5. TRABAJO FUTURO

Existen varios puntos que faltan investigar en detalle, además de algunos problemas abiertos de investigación que hasta el día de hoy no han sido resueltos del todo. Queda pendiente investigar los posibles métodos y protocolos de ruteo para la implementación de una red interplanetaria tan automatizada como lo es la Internet. Los planetas y

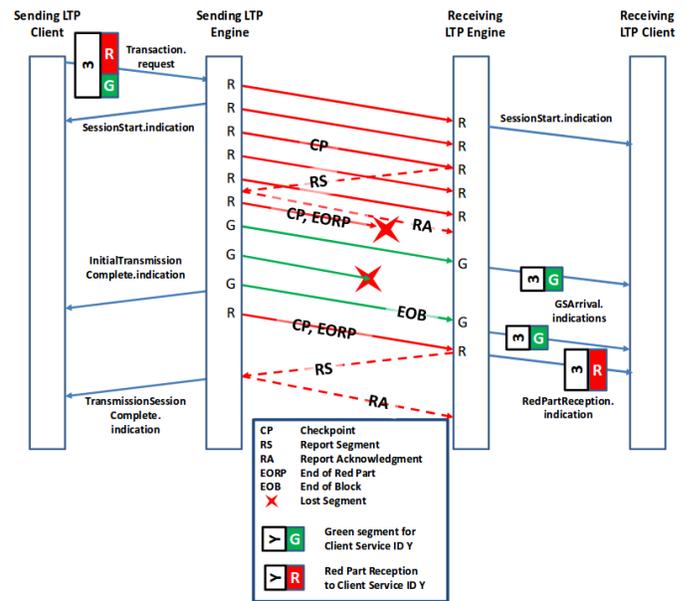


Figura 6: Ejemplo de transacción de sesión LTP.

las naves se mueven constantemente en el espacio, por lo que hará falta la implementación de un método para poder rutear los paquetes aplicable a redes móviles.

Otro problema que falta ver es el tema de la seguridad en este tipo de redes. En el espacio no hay mucha preocupación de que alguien vaya a intervenir los datos que se envían por radioenlaces, pero en el futuro esta realidad podría cambiar.

En la implementación física falta mucho por recorrer. Posiblemente pasen décadas hasta que se lancen al espacio los satélites que formarán parte del backbone de la red, y hace falta planear la localización y las órbitas más convenientes para que el envío de datos sea eficiente.

Finalmente, a lo largo de los años hay varias personas que han visto el potencial que tiene la utilización de estas redes no sólo en el espacio, si no para comunicar varios puntos aislados del planeta Tierra. Tanto los habitantes de lugares geográficamente aislados como los de países políticamente oprimidos podrían beneficiarse del acceso libre a Internet por medio de la implementación de este tipo de tecnologías a nivel planetario.

REFERENCIAS

- [1] J. Mukherjee y B. Ramamurthy, "The Interplanetary Internet implemented on a terrestrial testbed", 2013 IEEE International Conference on Communications, Budapest, Hungría, 2013.
- [2] S. El Alaoui, S. Palusa y B. Ramamurthy, "The Interplanetary Internet Implemented on the GENI Testbed", 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
- [3] S. Burleigh, V. Cerf, J. Crowcroft y V. Tsoussidis, "Space for Internet and Internet for Space", Ad Hoc Networks 23, Elsevier, 2014, pp. 80-86.
- [4] F. Warthman, "Delay- and Disruption-Tolerant Networks (DTNs), A Tutorial", ipnsig.org, Septiembre 2015. [Online]. Disponible: http://ipnsig.org/wp-content/uploads/2015/09/DTN_Tutorial_v3.2.pdf. [Accedido: 15-Nov-2017].

- [5] J. Mukherjee y B. Ramamurthy, "*Communication Technologies and Architectures for Space Network and Interplanetary Internet*", IEEE Communications Surveys & Tutorials 15, IEEE, 2013.
- [6] K. Scott y S. Burleigh, "*Bundle Protocol Specification*", IETF Request for Comments RFC 5050. <http://tools.ietf.org/html/rfc5050>, 2007.
- [7] S. Burleigh, M. Ramadas y S. Farrell, "*Licklider Transmission Protocol - Specification*", IETF Request for Comments RFC 5326. <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5325.txt>, 2008.