

# Calculo del Enlace para un Radio Telescopio en Orbita que Pueda ser Utilizado en un Sistema VLBI

## Link Calculation for an In-Orbit Radio Telescope that Could Be Used in a VLBI System

Cesar E. Vásquez, *Ingeniero en ensamblaje, integración y pruebas satelitales, ABAE*

**Resumen**—Los sistemas VLBI (Very Long Baseline Interferometry) son utilizados actualmente tanto para obtener imágenes de cuerpos celestes con una gran resolución como para el estudio de fenómenos geodésicos y geofísicos. Aprovechando los beneficios que nos ofrece la tecnología espacial se puede colocar en orbita un radio telescopio que nos permitiría mejorar los sistemas actuales de observación VLBI. El objeto de este documento es hacer un análisis del enlace necesario para realizar una comunicación efectiva entre un radio telescopio en orbita y la estación terrena, de forma que la data del mismo pueda ser utilizada en tierra de manera eficiente y con poca perdida de fidelidad, integrado dentro de un sistema VLBI.

**Palabras clave:** radiotelescopio en orbita, VLBI, enlace

**Abstract:** VLBI systems (Very long Base line interferometry) are currently used as a way to obtain celestial bodies images with great resolution as to study geodesic and geophysical phenomena. Taking advantage of space technology we can use an in-orbit radio telescope, that could improve actual VLBI observation systems. This document objective is to do an analysis of the needed link to achieve an effective communication between an in-orbit radio telescope and its terrestrial base, in a way that its data could be used in an efficient way with little fidelity loss embedded in a VLBI system.

**Index terms:** in-orbit radio telescope, VLBI, link

### I. INTRODUCCIÓN

LOS cuerpos celestes emiten energía, algunos de ellos en forma de luz visible, otros en forma de ondas de radio y otros tantos emiten ambos tipos de energía. Convencionalmente la energía lumínica es observada con telescopios ópticos, mientras que las ondas de radio son estudiadas con radiotelescopios. Para obtener lecturas con mayor resolución y por ende aumentar la precisión en la medición de la fuente emisora de ondas de radio, se utilizan 2 o mas radiotelescopios de manera conjunta, que al combinar las señales provenientes de cada uno y con ayuda de la interferometría se logra una mayor precisión.

### II. SISTEMAS VLBI

Los sistemas usados en radio astronomía para obtener gran resolución en la adquisición de datos de una fuente emisora de radio frecuencias son denominados VLBI, cuyas siglas provienen del ingles Very Long Baseline Interferometry y significa: interferometría de muy larga base. En esta técnica se utilizan múltiples radiotelescopios ubicados en diferentes posiciones que son utilizados como un único radio-telescopio de gran apertura por medio de técnicas interferométricas, cuya apertura viene dada por la distancia de los radiotelescopios individuales utilizados en el sistema. La separación de las antenas estaba limitada por la transmisión de los datos, que se requería fueran en tiempo real, sin perder la sincronía de las señales proveniente de las diferentes antenas; una vez superado este inconveniente, el limite en la separación máxima de las antenas es impuesto por la curvatura terrestre. Para superar este ultimo, se utiliza un radio-telescopio a bordo de un satélite, mejorando de esta forma, la resolución general del sistema.

### III. FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA VLBI

En VLBI se mide una fuente de energía simultáneamente desde dos o mas antenas distribuidas en la superficie terrestre separadas a una gran distancia; el espectro de frecuencias recibido sera trasladado a una frecuencia menor por limitaciones en los equipos (problemas de ingeniería) para poder amplificar y relacionar los datos con los obtenidos de otras antenas. En los enlaces tradicionales a corta distancias, esto es realizado en tiempo real corelacionando las amplitudes y fases de las ondas medidas. Para preservar estos datos de amplitud y fase de las frecuencias medidas, la traslación de frecuencias se realiza utilizando un oscilador local de alta precisión (Reloj atómico) como referencia de frecuencia, estos datos son luego almacenados y transportados hasta una estación de procesamiento donde son sincronizados y corelacionados para obtener la imagen de la región medida.

Los datos almacenados conteniendo una estampa de tiempo del oscilador local y un paquete de GPS. En el sitio de análisis los datos de todos los radiotelescopios son leídos de manera simultanea y en sincronía por el correlador en concordancia con la data del oscilador local embebida en el flujo de datos y las horas estimadas de la recepción de los datos en cada radiotelescopio. La ultima distancia conocida entre las antenas

provee una pista del tiempo de retardo entre ellas para recibir la misma señal, el cual debe ser agregado en las señales recibidas de las otras antenas, si la posición de las antenas es desconocido o existen efectos atmosféricos, estos tiempos de retardo deben ser ajustados hasta que se encuentren franjas de interferencia. En el pico de la función de correlación la amplitud y la fase son utilizadas para calcular un retardo relativo preciso. Con este retardo y la velocidad de la luz, se calcula la posición de la fuente en el firmamento o la orientación de la línea base en el espacio.

#### IV. DESCRIPCIÓN DEL ENLACE DE UN RADIO-TELESCOPIO VLBI EN ÓRBITA

Al igual que en cualquier otro satélite, este necesita de un enlace de comunicación bidireccional, un canal de telecomandos, destinado al control de la nave en órbita y un canal de telemetría desde el cual reciben en la estación terrena los parámetros y datos enviados por la nave. A diferencia de los radio telescopios localizados directamente sobre la superficie terrestre, los datos deben ser recibidos a través de este enlace para ser grabados luego en tierra y ser enviados para su correlación con otras señales.

Los radiotelescopios en tierra tienen un oscilador local de muy alta precisión para registrar la hora de recepción de las señales y poder sincronizarlas luego con las señales de otros radiotelescopios. Sin embargo esto no es posible en un radio telescopio ubicado en el espacio por no existir tales equipos que sean aprobados para su uso fuera del ambiente terrestre, es por ello que se hace necesario enviar desde la estación terrena tal señal de sincronía.

El recorrido de la señal sería como sigue:

El espectro recibido por la antena espacial es procesado a bordo para colocarle la estampa de tiempo y la señal de sincronía proveniente de la estación terrena, como se muestra en la 1, estos datos son enviados a tierra donde son recibidos y analizados por una posible falla en la transmisión y por consiguiente la corrupción de datos en la recepción, estos datos luego son grabados y enviados hacia su estudio de correlación.

#### V. CARACTERÍSTICAS DEL ENLACE

Por ser un objeto moviéndose a una velocidad variable orbitando la tierra el establecimiento del vector de posición y velocidad es mas complicado, por lo que es necesaria la transmisión hacia el satélite desde tierra de los datos tiempo y sincronía para ser agregadas a la señal recibida antes de ser enviadas a la estación terrena. Durante esta transmisión (que puede ser analógica o digital) se produce una degradación de la señal antes de ser recibida en tierra debido a la ionosfera, en la que se puede producir alteración de fase y cuantización de datos, dando como consecuencia errores en la recepción de la fase de onda.

##### A. Función de correlación

Antes de iniciar es necesario aclarar los nombres de los siguientes términos:

$\xi$  = Relación señal ruido de observación

S = Densidad de flujo espectral

A = Área efectiva de la antena

T = Temperatura de ruido del sistema

k = constante de boltzmann

B = ancho de banda observada

$\eta$  = Eficiencia de apertura

D = Diámetro de la antena

S\* = densidad de flujo equivalente

S<sub>th</sub> = Limite de densidad de flujo equivalente de ruido

$\tau$  = tiempo de integración

R<sub>xy</sub> = función de correlación

$\langle \rangle$  = es la media de la observación en el tiempo

x(t) y y(t) = señales a ser correlacionadas

g = factor de coherencia

$\zeta_{\text{tlm}}$  = relación señal ruido del enlace

S<sub>0</sub> = Sensitividad efectiva del sistema espacial

L = niveles de cuantización

N = numero de bits

Para el correcto calculo de la función de correlación debemos recordar que el área efectiva de una antena esta determinada con la ecuación 1 y que la densidad del flujo equivalente del ruido de sistema esta expresada en 2

$$A_m = \eta_m \pi \frac{D_m^2}{4} \quad m = 1..n \quad (1)$$

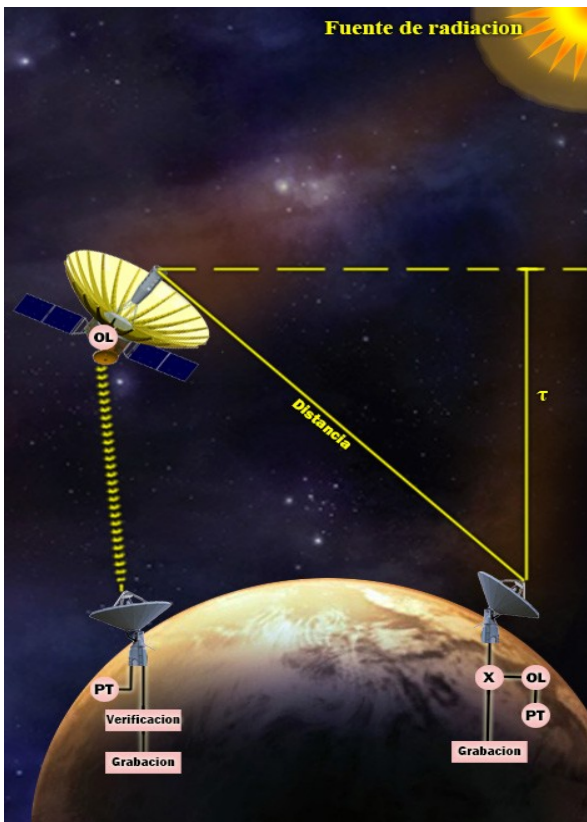


Fig. 1: Flujo de datos de VLBI Espacial

$$S_m^* = \frac{2kT_m}{A_m} = \quad m=1..n \quad (2)$$

Sustituyendo 1 en 2 nos queda

$$S_m^* = \frac{8kT_m}{\eta_m \pi D_m^2} \quad m=1..n \quad (3)$$

Como toda señal recibida esta contaminada con ruido su relación con la señal es calculada mediante 4:

$$\xi_m = \frac{\frac{1}{2} S_m \cdot A_m \cdot B}{kT_m \cdot B} = \frac{S_m \cdot A_m}{2kT_m} \quad m=1..n \quad (4)$$

Y al sustituir 2 en 4 nos queda

$$\xi_m = \frac{S_m}{2kT_m / A_m} = \frac{S_m}{S_m^*} \quad m=1..n \quad (5)$$

Definiendo así la relación señal ruido de observación. La relación señal ruido de la función de correlación se puede expresar en función de las relaciones señal ruido de observación de la siguiente forma:

$$X_{1,2} = \sqrt{\xi_1 \cdot \xi_2 \cdot 2B\tau} \quad (6)$$

También puede ser expresada en función de la media de la densidad de flujo de la siguiente forma

$$X_{1,2} = S_{1,2} \cdot \sqrt{\frac{2B\tau}{S_1^* \cdot S_2^*}} \quad (7)$$

Definiendo la densidad de flujo de ruido de esta forma

$$S_{th} = \sqrt{\frac{S_1^* \cdot S_2^*}{2B\tau}} \quad (8)$$

Podremos escribir la relación señal ruido de la correlación e introducir los efectos del parpadeo aparente (g) lo que dejaría la siguiente ecuación

$$X_{1,2} = \frac{S_{1,2}}{S_{th}} = \frac{g \cdot S_{1,2}}{S_{th}} = \frac{S_{1,2}}{S_0} \quad (9)$$

Partiendo de esta ecuación, al despejar  $S_0$  obtenemos la sensibilidad efectiva del sistema espacial

$$\frac{g \cdot S_{1,2}}{S_{th}} = \frac{S_{1,2}}{S_0} \rightarrow S_0 = \frac{S_{th}}{g} \quad (10)$$

Para calcular la correlación de las señales la amplitud y fases relativas son utilizadas de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_{xy}(\tau_g) = \langle x(t) \cdot y(t - \tau_g) \rangle \quad (11)$$

Donde:  $R_{xy}$  es la función de correlación,  $\langle \rangle$  es la media de la observación en el tiempo,  $x(t)$  y  $y(t)$  señales a ser correlacionadas y  $\tau_g$  es el retardo.

### B. Degradación de la señal

En la transmisión de los datos obtenidos hacia la estación terrena para su grabación o análisis, se produce una degradación de la señal transmitida, por lo que la relación señal ruido se calcula mediante la ecuación 12

$$X_q = \left[ \frac{(1 - \text{Erfc} \sqrt{\xi_{itm}})^2 \cdot 2}{\pi} \right] \cdot \sqrt{\xi_1 \cdot \xi_2 \cdot 2B\tau} \quad (12)$$

Por lo que para una transmisión digital la degradación se calcula mediante

$$X_d = \frac{X_q}{X_{1,2}} = \frac{(1 - \text{Erfc} \sqrt{\xi_{itm}})^2 \cdot 2}{\pi} \quad (13)$$

### C. ancho de banda requerido

La modulación por fase ha demostrado ser la mejor opción para la transmisión digital de datos, por lo que se escoge QPSK, la velocidad de transmisión (symbol rate) se calcula mediante la siguiente ecuación

$$R_s = B \cdot \log_2(L) = Bn \quad (14)$$

Según recomendación del ITU-R S.A.1015 el ancho de banda requerido para obtener perdidas menores a 0.3 dB es el siguiente

$$W = 4 R_s = 4 Bn \quad (15)$$

Por lo que si se desean realizar observaciones con un ancho de banda de 50 MHz y una modulación con 8 niveles de cuantización, el requerido para el enlace seria de 600MHz.

### D. Ruido de fase

Para la determinación de la frecuencia del oscilador a bordo, hay errores en su determinación que deben ser calibrados, esta calibración se realiza midiendo los cambios de fase de la señal al ir de la tierra al satélite y de regreso, se considera que estos errores son recíprocos, y son calculados mediante la siguiente ecuación:

$$\Phi_{up} = \frac{f_{up}}{2 \cdot f_{down}} \Phi_{round} \quad (16)$$

Existe un retardo de propagación debido a la ionosfera

$$\Phi_{up} = \frac{f_{up}}{2 \cdot f_{down}} \Phi_{round} + f_{up} \cdot \pi \cdot [\tau_i(f_{up}) - \tau_i(f_{down})] \quad (17)$$

Donde

$$\tau_i(f) = \frac{40.3}{c \cdot f^2} TEC_i \quad (18)$$

Por lo que el error de fase se puede escribir como

$$\varphi_{error} = \varphi_{up} - \frac{f_{up}}{2 \cdot f_{down}} \cdot \varphi_{round} \cdot f_{up} \cdot \pi \cdot [\tau_i A(f_{up}) - \tau_i(f_{down})] \quad (19)$$

A frecuencias mayores existe un error de fase mucho menor, por lo que si elegimos frecuencia de subida y bajada 15.3 GHz y 14.2 GHz tendremos un error de 37.

## VI. CONCLUSIÓN

Queda de esta forma demostrado que para el correcto funcionamiento del enlace, son necesarias frecuencias de transmisión altas, ya que permiten un ancho de banda mucho mayor y sufren menos alteraciones al cruzar la ionosfera,

produciendo de esta manera menos errores de transmisión.

## REFERENCIAS

- [1] Desconocido, 2017, [online] <http://www.phys.hawaii.edu/~anita/new/papers/militaryHandbook/antennas.pdf>
- [2] Nikolova, 2016, [online] [http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna\\_dload/current\\_lectures/L07\\_Noise.pdf](http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L07_Noise.pdf)
- [3] Desconocido, 2017, [online] <http://www.qsl.net/ea3du/2004/01/Antenas.html>
- [4] Unión Internacional de telecomunicaciones, Bandas de frecuencia y anchuras de banda preferidas para la transmisión de datos de interferometría espacial con línea de base muy larga en las atribuciones existentes al servicio de investigación espacial (SIE), 2009

[1][2][3][4]