

# Interferometría Amateur con el satélite lunar DSLWP-B

Dr. Daniel Estévez, EA4GPZ / M0HXM

Trabajo conjunto con Wei Mingchuan BG2BHC (HIT) y el radiotelescopio de Dwingeloo  
PI9CAM

6 de abril de 2019  
STARcon 2019, Madrid

# Cuñía publicitaria: ESA Summer of Code in Space

- Programa de la ESA para que estudiantes realicen prácticas en un proyecto de software open-source relacionado con el espacio.
- Se realiza durante los 3 meses de verano.
- Financiado con 4000€ por estudiante.
- Proyectos propuestos por mentores de distintas organizaciones.
- Plazo de solicitud para estudiantes: 11 de abril a 4 de mayo.
- Soy mentor del proyecto número 34: *gr-satellites, a SDR amateur satellite receiver framework: expanding the CCSDS stack support*
- *gr-satellites* es un decodificador en GNU Radio para la telemetría de más de 60 satélites. En el proyecto se busca ampliar el soporte del stack de protocolos CCSDS.
- <https://socis.esa.int/>
- No dudéis en contactarme si estáis interesados:  
[daniel@destevez.net](mailto:daniel@destevez.net)

- 1 El satélite DSLWP-B
- 2 VLBI Amateur
- 3 Experimentos VLBI con DSLWP-B

- 1 El satélite DSLWP-B
- 2 VLBI Amateur
- 3 Experimentos VLBI con DSLWP-B

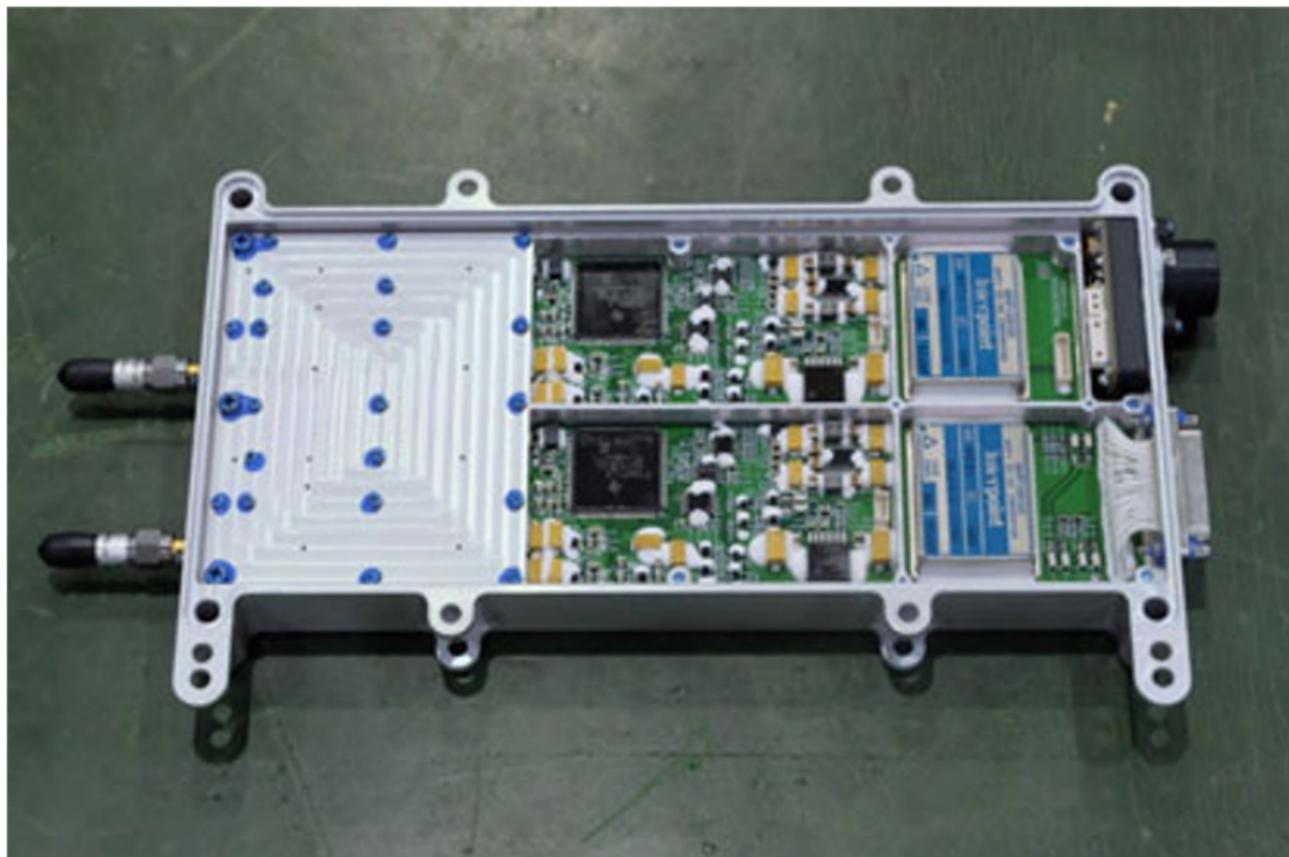
- *Chang'e 4* es una misión china que aterrizó un rover (Yutu 2) en la cara oculta de la Luna en enero de 2019.
- Para soportar las comunicaciones de la misión, el 20 de mayo de 2018 se lanzó *Queqiao*, un relé de comunicaciones que orbita el punto L2. Con su antena de 4.2m, soporta hasta 2Mbps usando banda X con el rover y banda S con la Tierra.
- Con *Queqiao* se lanzaron dos microsátélites, que han sido conocidos con varios nombres: microsátélites CE-4, DSLWP-A1 y -A2, DSLWP-A y -B, y Longjiang 1 y 2.

# Los microsatelites DSLWP

- Peso 45kg.
- Tamaño 50x50x40cm.
- Diseñados y construidos por el Harbin Institute of Technology (China)
- Misión científica: radioastronomía con interferometría en 1-30MHz. Vuelo en formación a una distancia de 1 a 10km.
- DSLWP-B lleva una cámara diseñada por King Abdulaziz City for Science and Technology (Arabia Saudí).
- Telemetría y telecomando en banda S, link inter-satélite en banda S, datos científicos en banda X (1Mbps).
- Payload Amateur diseñado y construido en el BY2HIT, el radioclub del Harbin Institute of Technology.

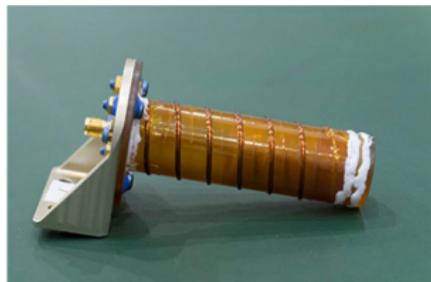
# Payload Amateur en DSLWP

- Proyecto dirigido por Wei Mingchuan BG2BHC.
- Equipo SDR basado en los diseños de LilacSat 1 y 2.
- Uso: Telemetría y telecomando auxiliar. Experimentos por Radioaficionados.
- TX: 70cm, RX: 2m.
- Cámara (Inory Eye) para transmitir imágenes SSDV.
- Estaciones de tierra principales: PI9CAM, Dwingeloo (Holanda), disco de 25m. Shahe, Pekín (China), disco de 12m.
- Experimento de VLBI.
- Modulaciones empleadas:
  - GMSK 250 ó 500 baud con código Turbo  $r = 1/2$ . Transmisión de telemetría y SSDV.
  - JT4G. Telemetría (abreviada) y repetidor de mensajes.
- Posibilidades de telecomando por Radioaficionados:
  - Transmisión de mensajes a través del repetidor JT4G.
  - Control de la cámara.



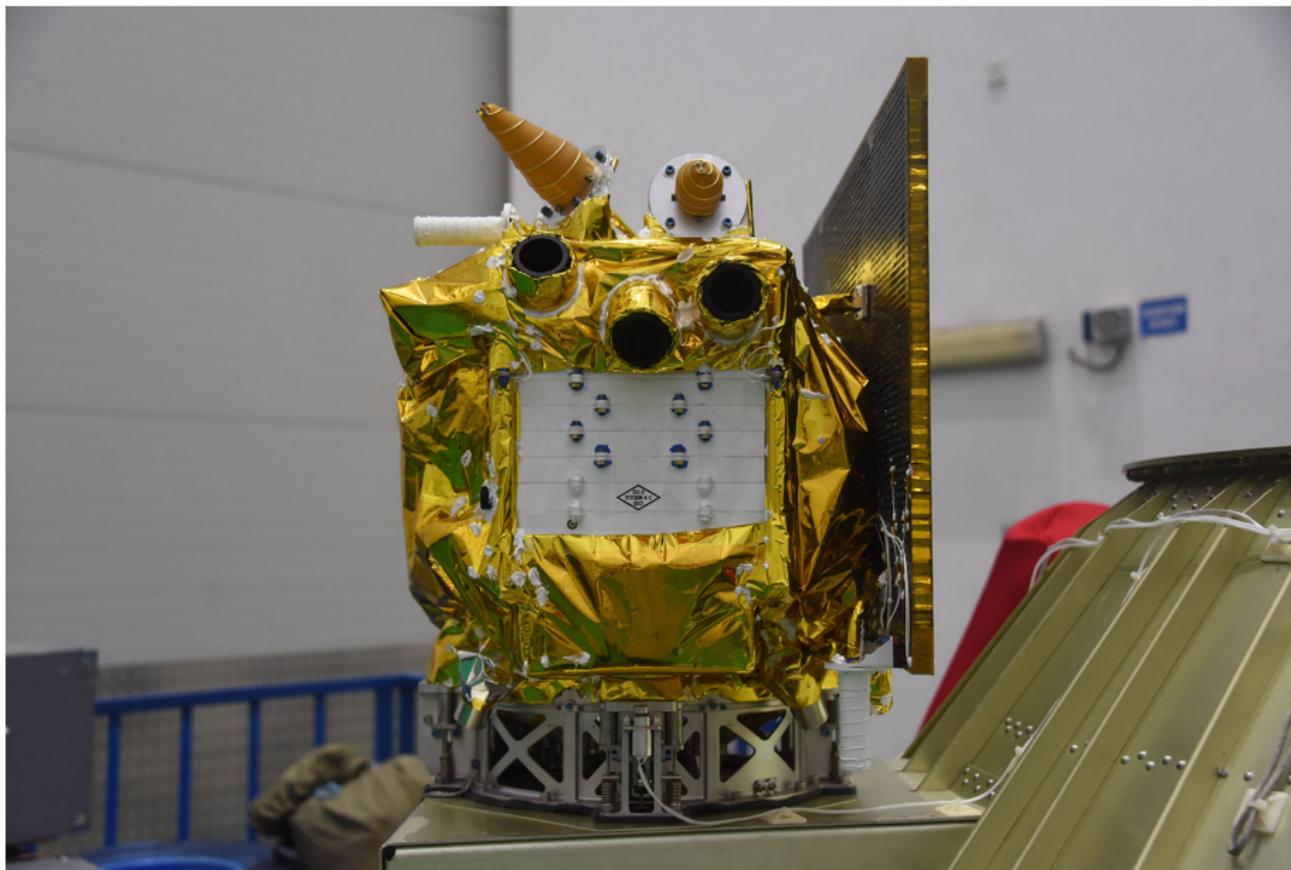
# Antenas para el Payload Amateur

- Diseño: doble hélice acortada bibanda.
- Polarización lineal.
- Ganancia pico aprox. 0dBi en UHF, -9dBi en VHF.









# Hitos principales de la misión

- 2018-05-25 Inserción en órbita lunar de DSLWP-B (DSLWP-A se perdió en el camino)
- 2018-06-02 Primeras transmisiones GMSK desde órbita lunar
- 2018-06-10 Primer experimento de interferometría Amateur (VLBI)
- 2018-06-16 Primeras transmisiones JT4G
- 2018-07-15 Primera prueba del repetidor GMSK⇒JT4G por Reinhard Kuehn DKL5A
- 2018-08-03 Primera transmisión SSDV
- 2018-10-07 Se observa la señal de DSLWP mediante rebote lunar por primera vez
- 2018-10-09 Fotos de la tierra y la luna transmitidas por SSDV
- 2018-10-19 Se decodifica la señal JT4G recibida por rebote lunar
- 2018-11-21 Segundo experimento de VLBI
- 2019-07 (finales) o 2019-08 (principios) Fin de la misión (colisión con la luna)

- 1 El satélite DSLWP-B
- 2 VLBI Amateur
- 3 Experimentos VLBI con DSLWP-B

# ¿Qué es VLBI?

- VLBI = Very Long Baseline Interferometry (Interferometría de baselínea muy larga).
- *Inteferometría*: comparar la señal recibida por dos o más estaciones de radio (muchas veces sumándolas o multiplicándolas, para que se interfieran).
- *Baselínea*: es la distancia que una las estaciones que participan en la inteferometría.
- *Muy larga*: miles de kilómetros. Estaciones en distintas partes del planeta.

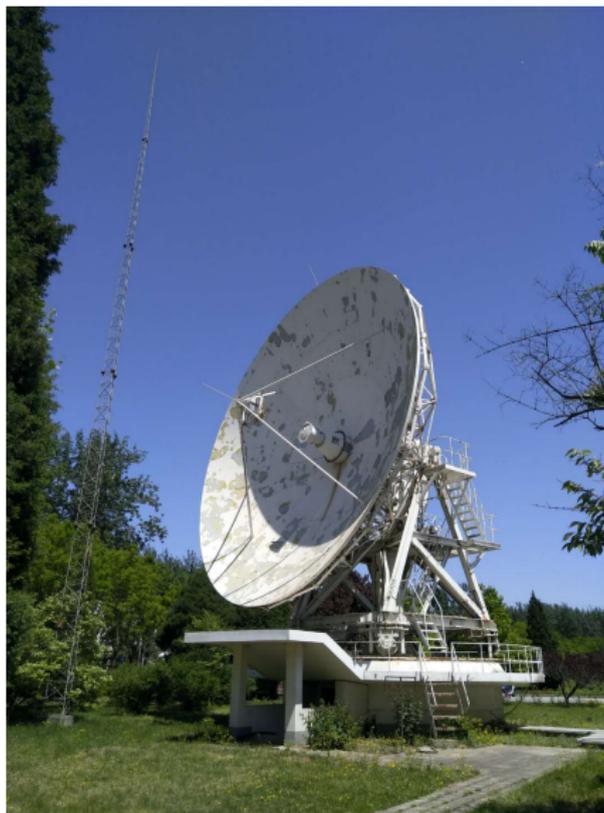
- Objetivo: Medir la diferencia de tiempos de llegada de una señal a dos estaciones (o más).
- Como la luz viaja a  $c$  en el espacio libre, esto nos da la diferencia de distancias entre el transmisor y cada estación.
- También se mide la diferencia de frecuencias (o fases) en la señal observada por cada estación.
- Debido al efecto Doppler, esto nos da la diferencia de velocidades entre el transmisor y cada estación.

- VLBI es muy empleado en radioastronomía.
- Podemos suponer que los objetos astronómicos están en el infinito, de modo que sus rayos llegan paralelos a la Tierra.
- Como los rayos son paralelos, la diferencia de tiempos de llegada depende solamente del ángulo entre los rayos y la línea que une las dos estaciones.
- De esta manera se aumenta enormemente la resolución angular de las observaciones.
- La resolución angular de un radiotelescopio es del orden del ancho de haz: décimas de grado.
- La resolución angular de una observación VLBI es del orden de microsegundos de arco o inferior.

- La luna está lejos (380000km), pero no tanto.
- Los rayos no llegan paralelos a las estaciones de tierra.
- Interpretar las observaciones ya no es tan sencillo como el ángulo de llegada.
- Aun así, empleando medidas realizadas entre 4 estaciones o más, se puede determinar la posición y velocidad del satélite.
- Las medidas VLBI se pueden emplear para determinación de órbitas, incluso usando solo 2 estaciones.

- Para comparar las medidas realizadas por distintas estaciones, se requiere que los receptores estén sincronizados.
- Para DSLWP-B se han usado receptores SDR USRP sincronizados por GPS (con 1PPS y 10MHz).
- Se observa la señal de DSLWP-B simultáneamente desde varias estaciones y las observaciones se guardan como ficheros de muestras IQ para su procesamiento.
- Las señales de DSLWP-B son débiles. Para tener buen SNR hacen falta antenas grandes:
  - PI9CAM, Dwingeloo, disco 25m
  - Shahe, Pekín, disco 12m
  - BY2HIT, Harbin, 8 yagis de 15 elementos







# Procesamiento de señal VLBI

- La herramienta básica para el procesamiento VLBI es la correlación.
- Si  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  son las señales recibidas por la estación 1 y 2, la correlación en el tiempo  $t$ , para un retraso  $\tau$  y una frecuencia angular  $\omega$  es

$$C(t, \tau, \omega) = \int_0^T x_1(t + s) \overline{x_2(t + s - \tau)} e^{-i\omega t} ds,$$

donde  $T$  es el periodo de integración coherente.

- Los valores de  $\tau$  y  $\omega$  que maximizan  $|C(t, \tau, \omega)|$  indican la diferencia de tiempos de llegada y frecuencias observadas por las dos estaciones.
- $C(t, \tau, \omega)$  puede escribirse como una convolución, y la transformada de Fourier transforma la convolución en un producto. Por tanto es usual calcular la correlación mediante FFTs.

- Las medidas de retardo  $\tau$  se realizan empleando la modulación de la señal (retardo de grupo).
- La precisión de estas medidas depende de la tasa de símbolos de la señal.
- GPS 1.023Msym/s, longitud del símbolo 293 metros. Precisión de las medidas en torno a 1 metro.
- DSLWP-B 250 ó 500 sym/s, longitud del símbolo 1200km ó 600km. Precisión 2000 veces peor que GPS.

- Las medidas de frecuencia  $\omega$  o fase se realizan empleando la portadora de la señal (retardo de fase).
- La precisión de estas medidas depende de la frecuencia de portadora.
- GPS 1575.42MHz. Longitud de onda 19cm. Precisión de las medidas sub-cm.
- DSLWP-B 436.4MHz. Longitud de onda 69cm. Solamente 3.6 veces peor que GPS.
- Las medidas de fase son ambiguas y para muchos usos requieren estabilidad en frecuencia del transmisor (no es el caso en DSLWP-B).
- Aun así, el Doppler puede emplearse para obtener medidas muy precisas de velocidad.
- *Conclusión:* En el caso de DSLWP-B, las medidas de velocidad serán mucho más precisas que las de distancia.

- 1 El satélite DSLWP-B
- 2 VLBI Amateur
- 3 Experimentos VLBI con DSLWP-B

## 2018-06-10 Primer experimento de VLBI

- Estaciones receptoras: PI9CAM y Shahe.
- Señales empleadas: balizas GMSK 250 baud en 435.4MHz y 436.4MHz. Duración de cada baliza 15 segundos. Transmitidas cada 5 minutos.

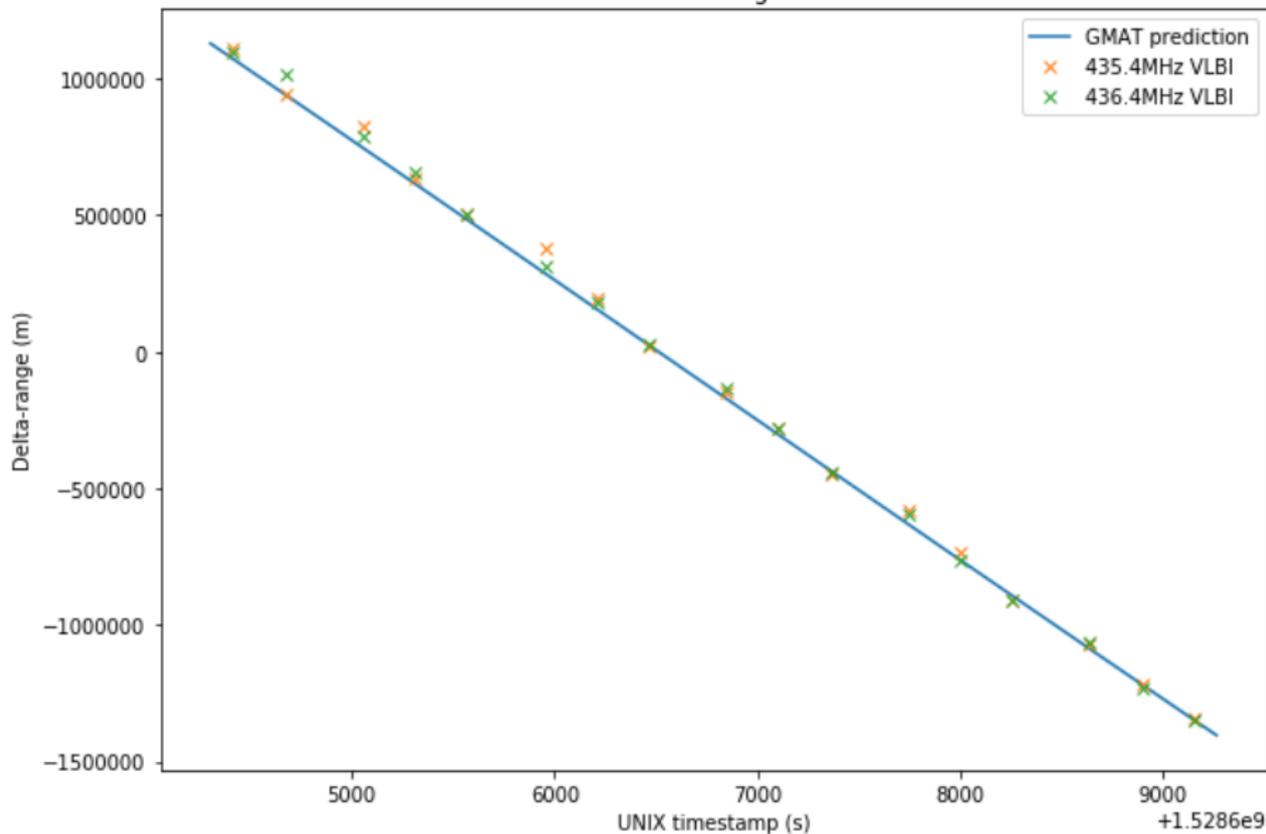
## 2018-11-21 Segundo experimento de VLBI

- Estaciones receptoras: PI9CAM, Shahe y BY2HIT
- Señales empleadas: transmisión GMSK 500 baud SSDV en 436.4MHz (también disponibles balizas en 435.4MHz)
- Tres transmisiones SSDV disponibles, cada una con una duración de 30 minutos.

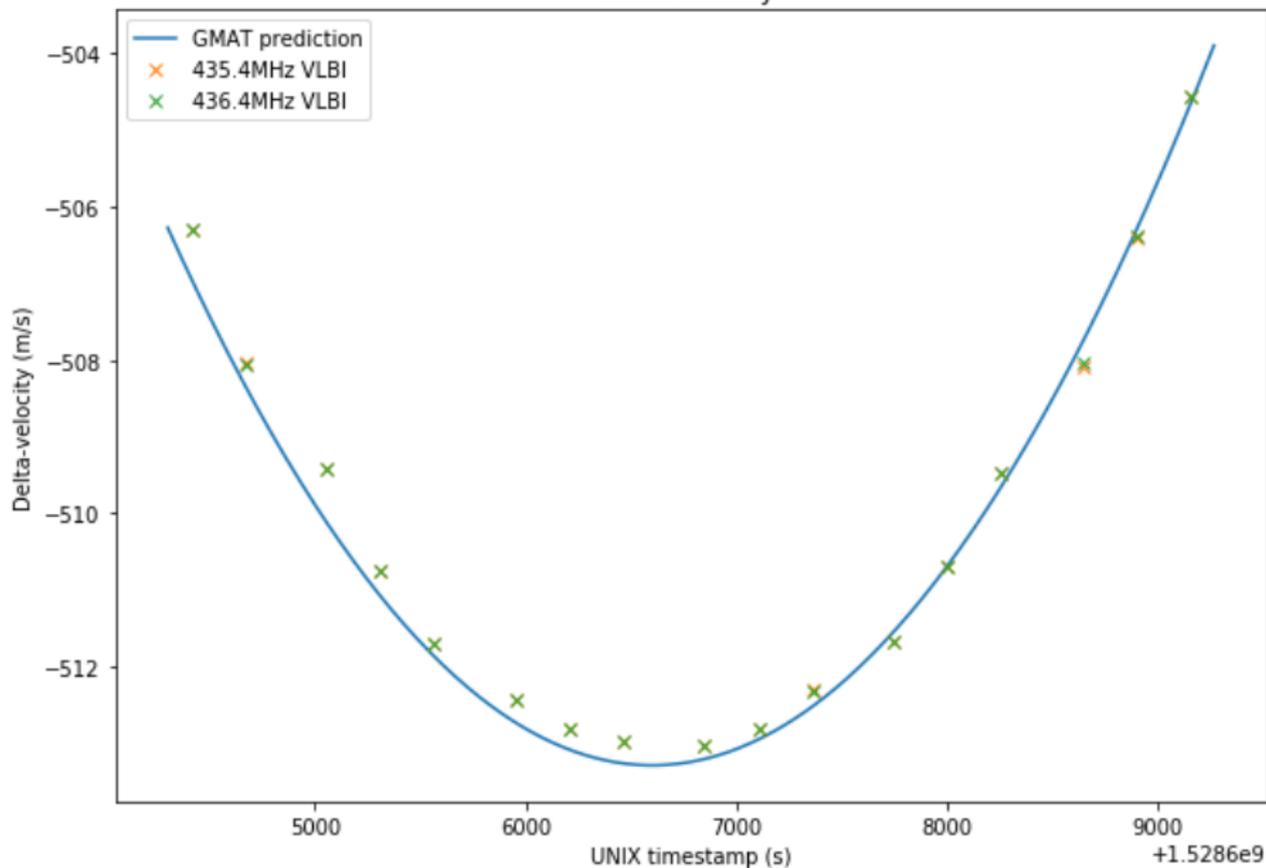
# Procesamiento de señal para el primer experimento

- La corta duración de cada baliza impide tener medidas continuas.
- Se empleó una integración coherente por baliza, obteniendo una medida por baliza.
- Obtención de medidas de delta-rango (diferencia de distancia) y delta-velocidad (diferencia de velocidades)
- Resolución en frecuencia 0.05Hz (0.3m/s) para las medidas de delta-velocidad.
- La señal en 436.4MHz era bastante más fuerte que la señal en 435.4MHz (depende de la orientación del satélite y las antenas).
- Medidas obtenidas comparadas con la predicción en GMAT usando las efemérides del DSN Chino.

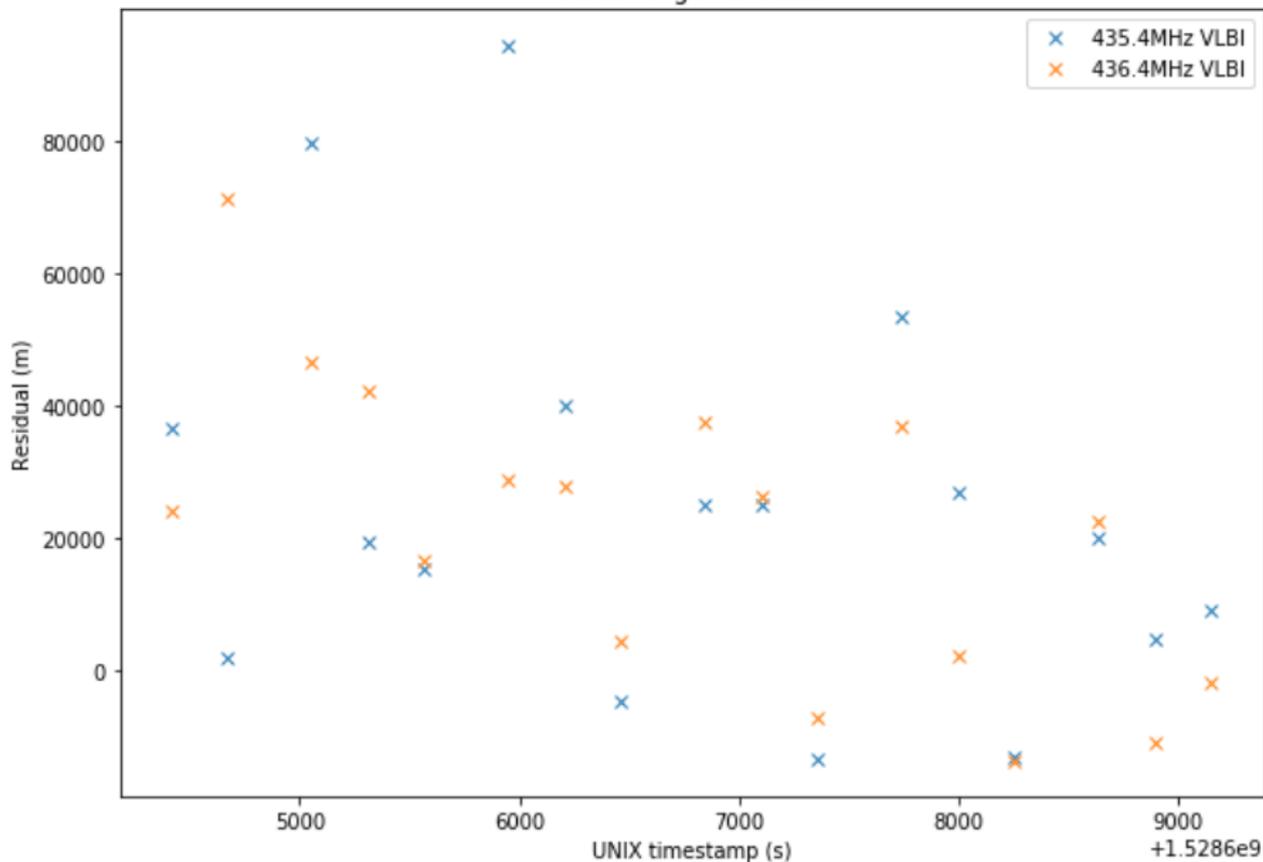
### Delta-range



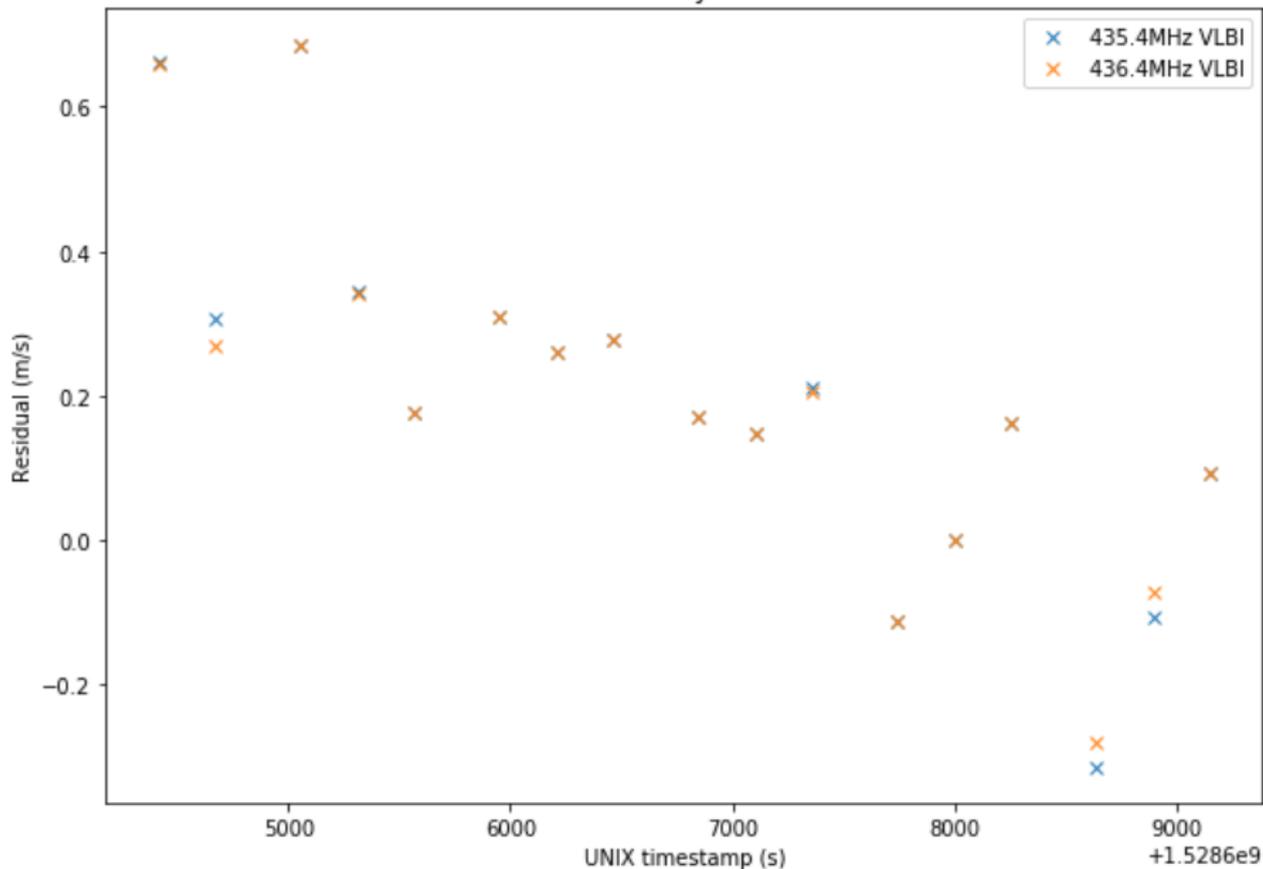
# Delta-velocity



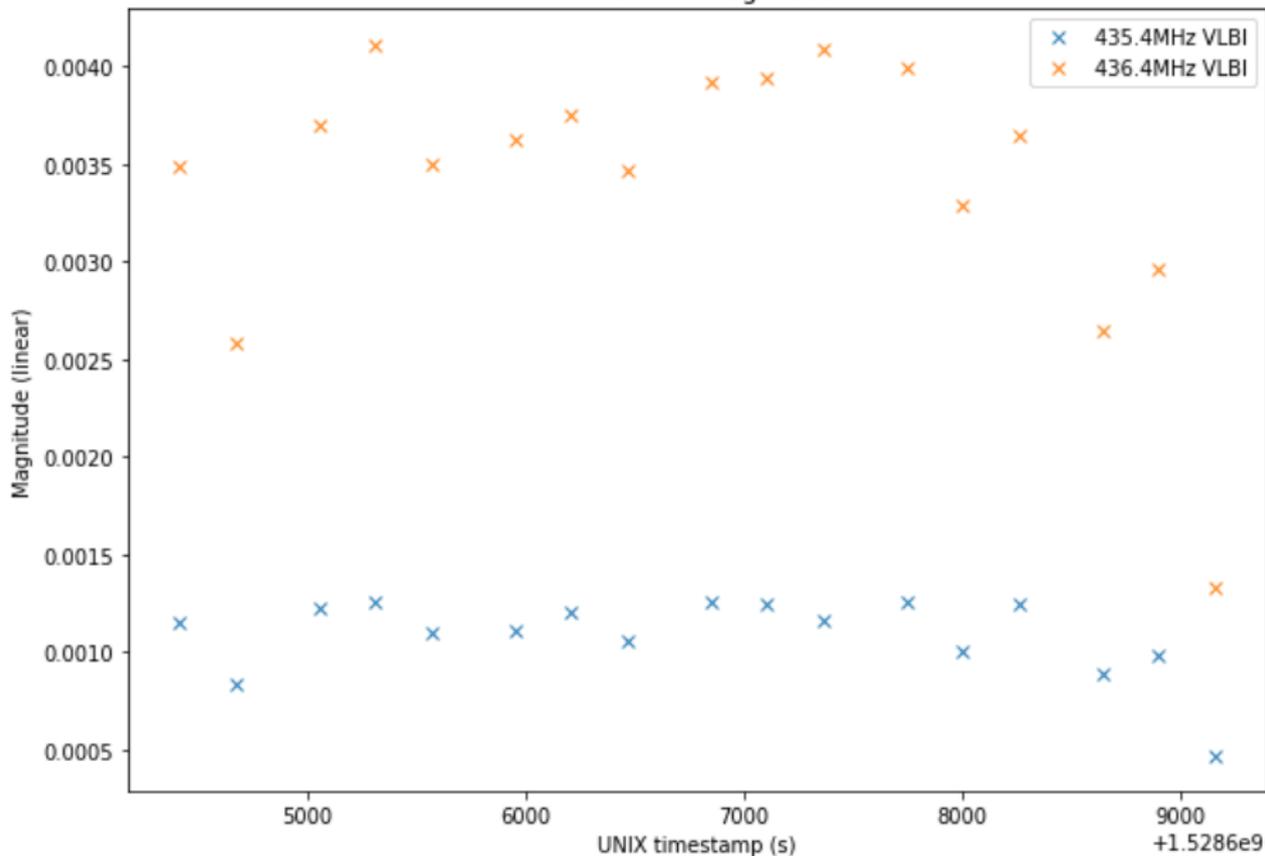
### Delta-range residuals



### Delta-velocity residuals



### Correlation magnitude

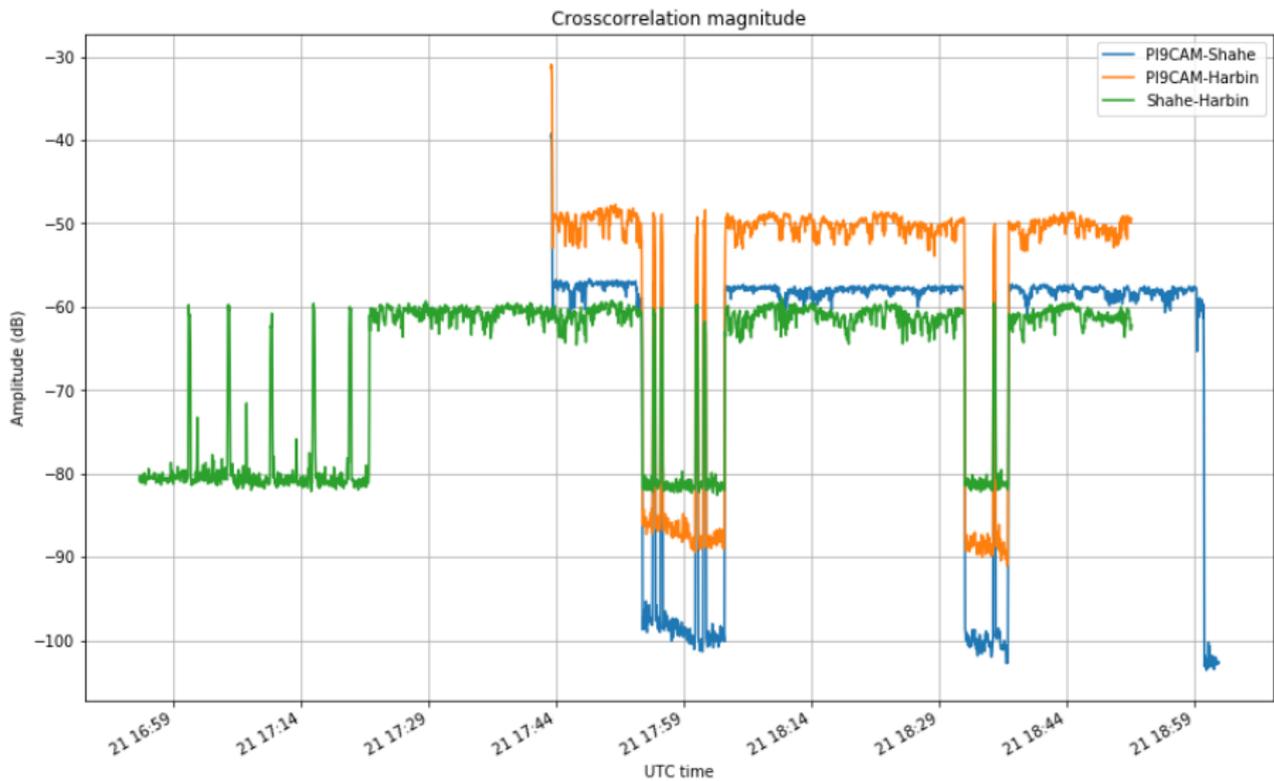


# Resultados obtenidos en el primer experimento

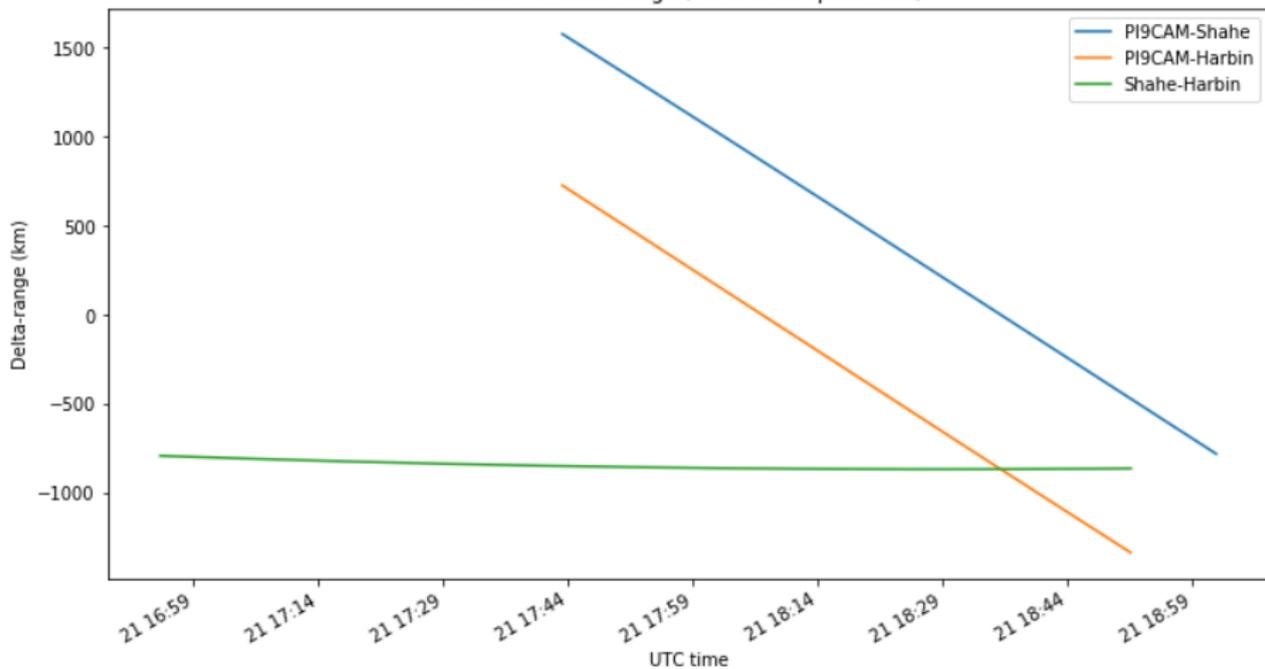
- El ruido de las medidas de delta-rango está en torno a los 40km. Parece difícil mejorar mucho esta precisión mediante el procesamiento de los datos.
- Las medidas de delta-velocidad tienen un ruido en torno a 0.1 m/s, que resulta excelente.
- Parece haber un bias entre las medidas y la predicción calculada con GMAT. Puede ser debido a una inexactitud de las efemérides o a un bias introducido durante el procesamiento (que debería ser corregido).

# Procesamiento de señal para el segundo experimento

- Se aprovecha la larga duración de cada transmisión SSDV para obtener medidas continuas.
- Se empleó una integración coherente de unos 3 segundos.
- Obtención de medidas de delta-rango de código (retardo de grupo) y de fase.
- La delta-velocidad se calcula derivando las medidas de fase.
- Filtrado de las medidas de código usando las medidas de delta-velocidad:
  - Filtro de Hatch
  - Filtro de Kalman
- Distinto SNR obtenido con cada par de estaciones (la señal de PI9CAM tiene mucho más SNR).
- Medidas obtenidas comparadas con la predicción en GMAT usando las efemérides del DSN Chino.



DSLWP-B delta-range (Reference ephemeris)



- $r_k$  las medidas de código,  $v_k$  las medidas de delta-velocidad (obtenidas derivando las medidas de fase),  $y_k$  las medidas de delta-rango filtradas

$$y_k = \alpha r_k + (1 - \alpha)(y_{k-1} + v_k),$$

done  $0 < \alpha < 1$  es un parámetro.

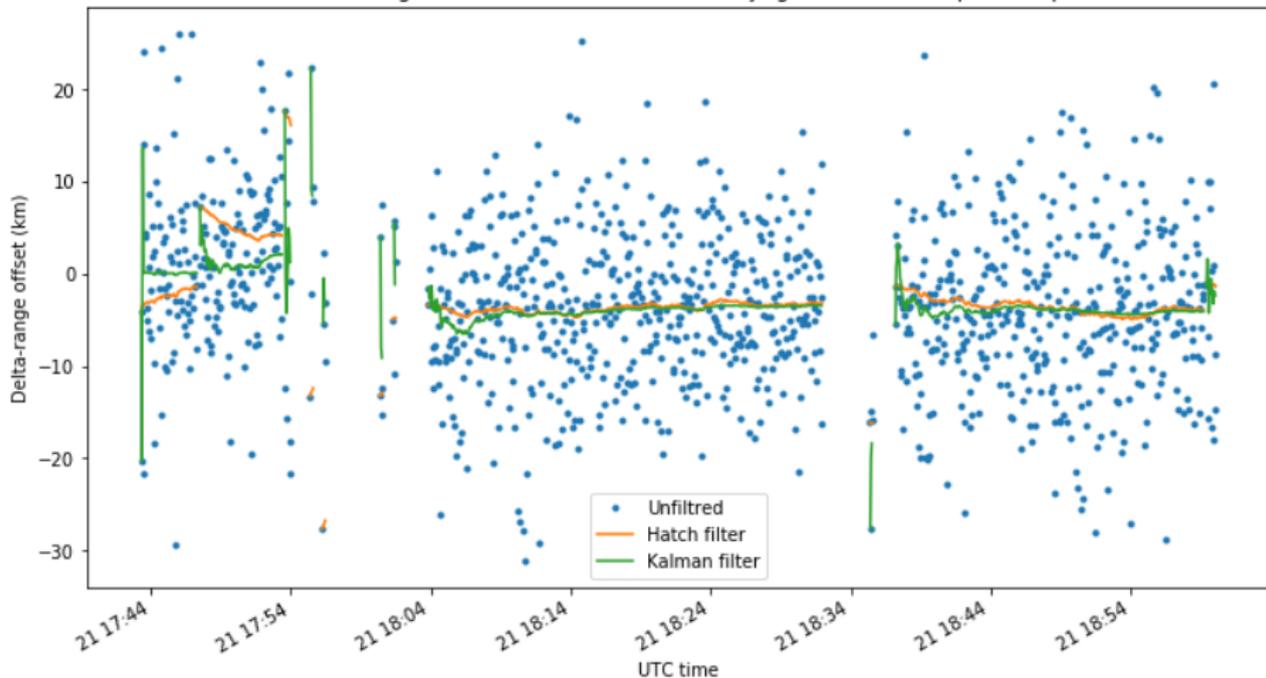
- $x_k$  el estado,  $n_k$  el ruido del proceso (gaussiano con covarianza  $Q$ ),  $z_k$  las observaciones,  $m_k$  el ruido de observación (gaussiano con covarianza  $R_k$ ).
- Evolución del estado y observación del estado lineales:

$$x_{k+1} = Fx_k + n_k, \quad z_k = Hx_k + m_k.$$

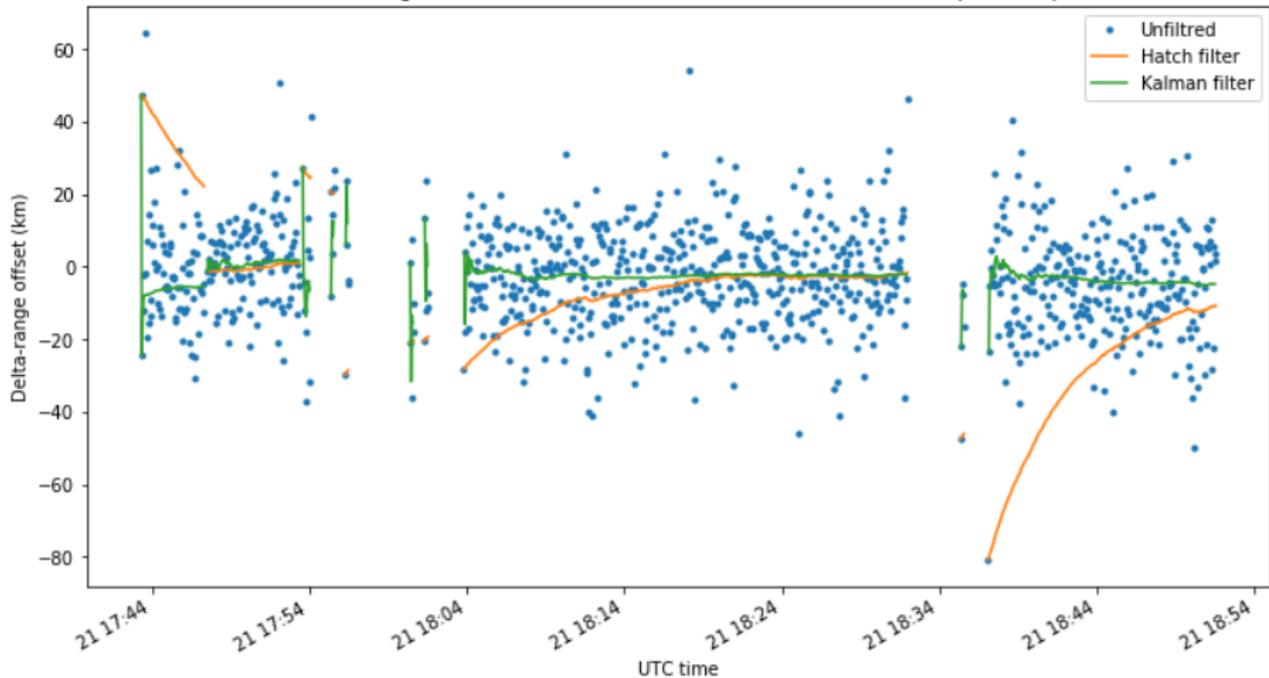
- El filtro es un estimador óptimo para el estado  $x_k$  y la covarianza del error del estado  $P_k$  a partir de las observaciones  $z_k$ .
- Usamos  $x_k = (r_k, v_k)^T$ ,  $H = I_{2 \times 2}$ ,

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

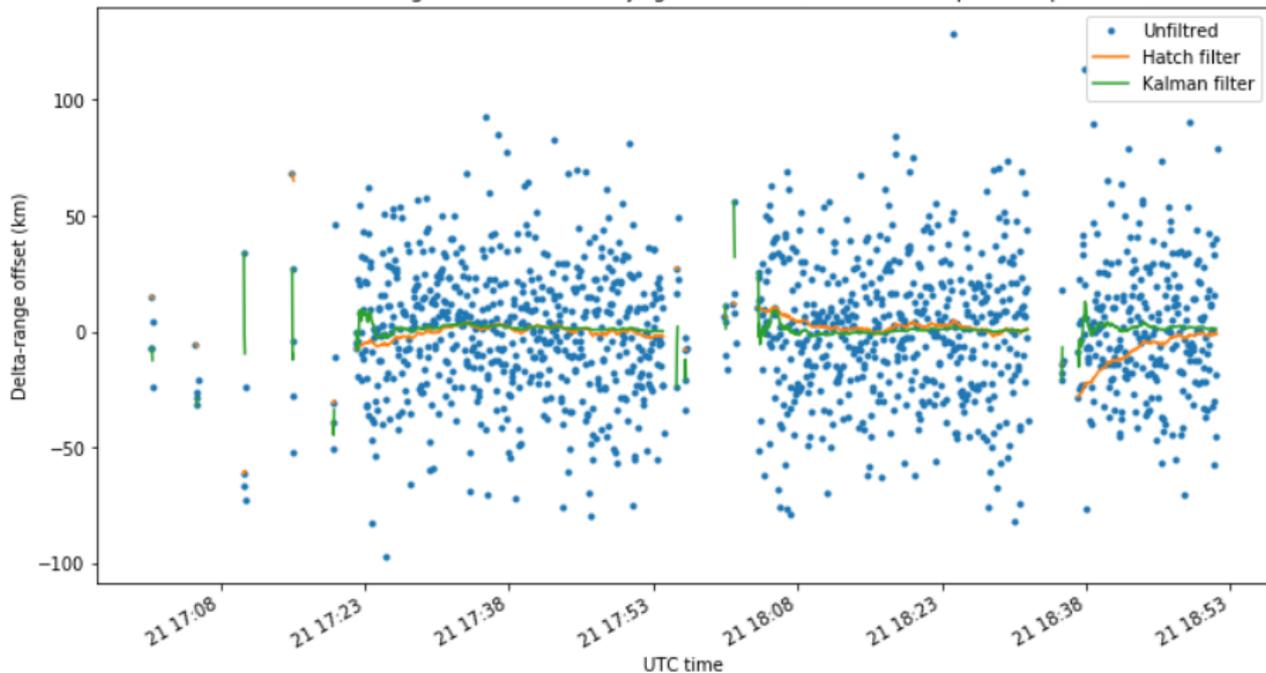
DSLWP-B delta-range VLBI between PI9CAM and Beijing (offset with respect to ephemeris)



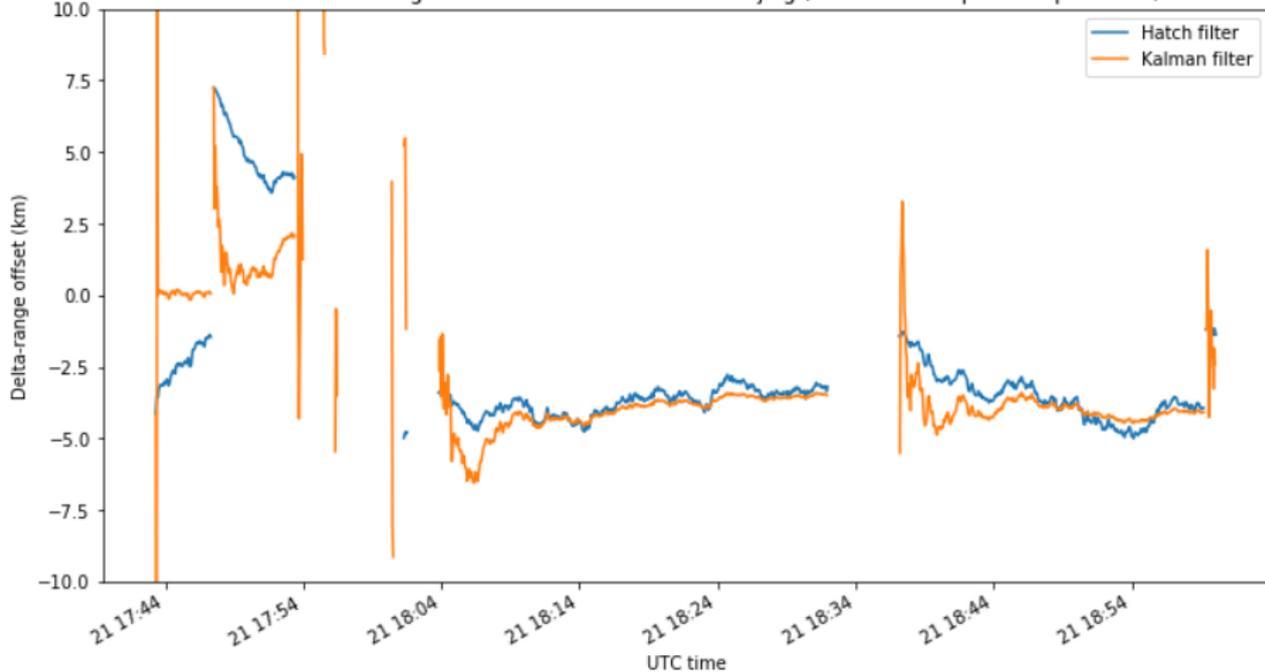
DSLWP-B delta-range VLBI between PI9CAM and Harbin (offset with respect to ephemeris)



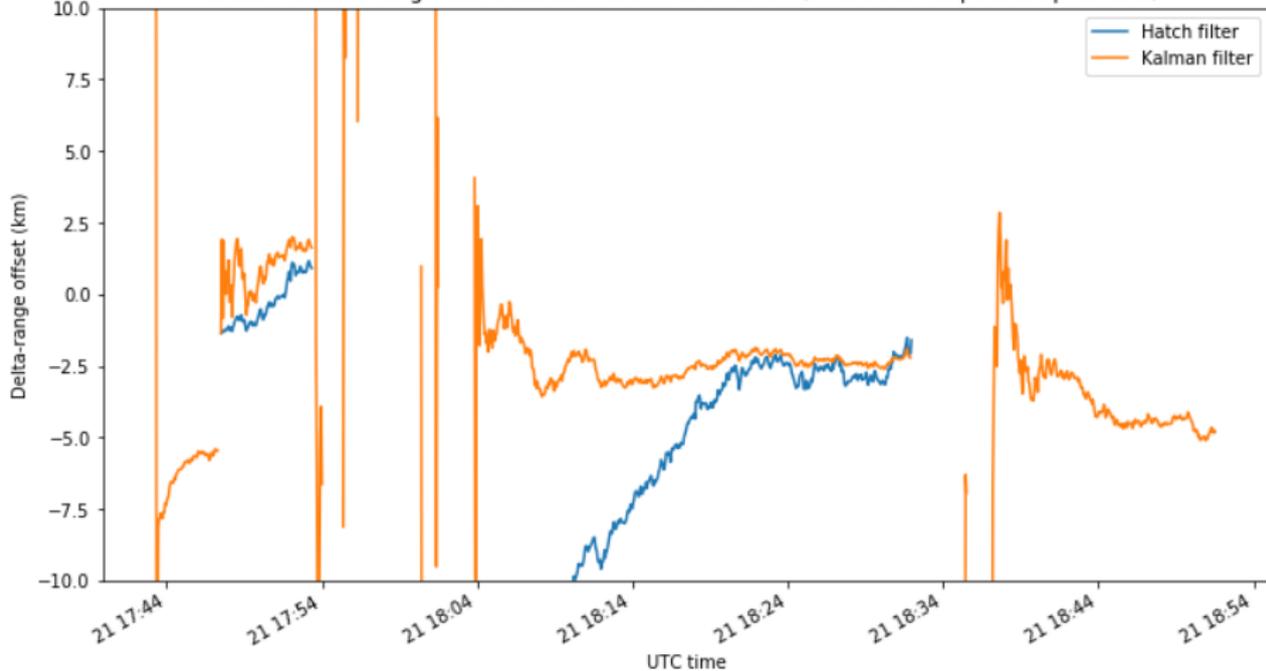
DSLWP-B delta-range VLBI between Beijing and Harbin (offset with respect to ephemeris)



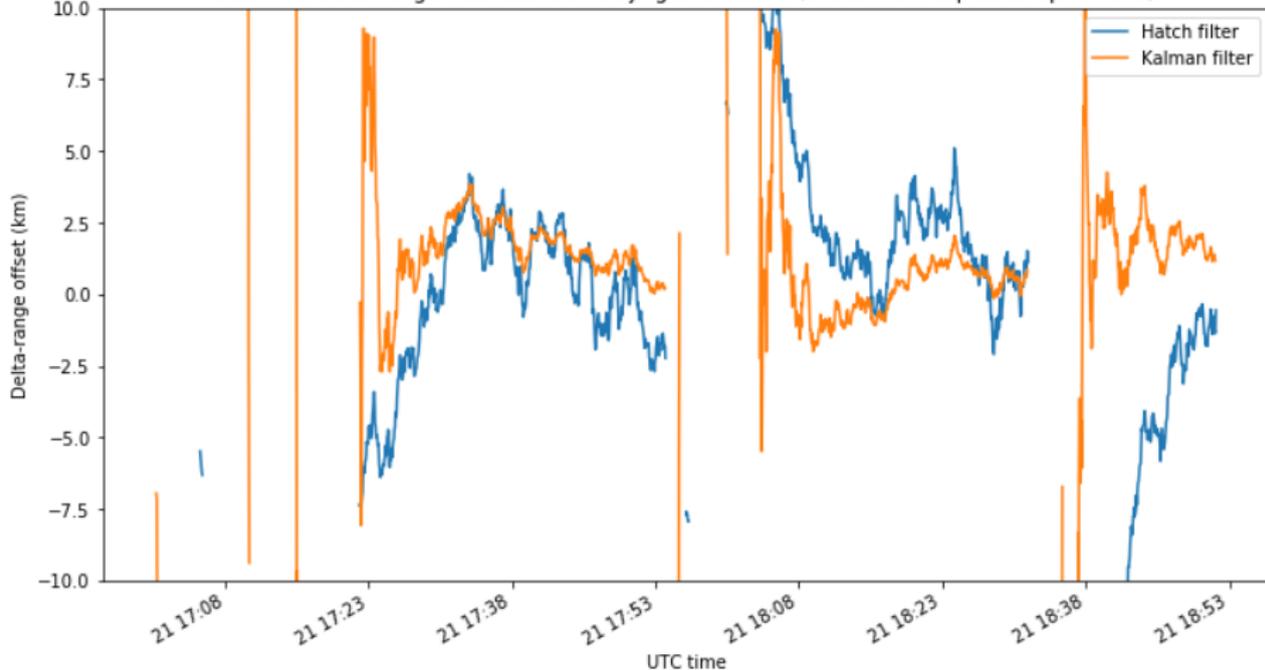
DSLWP-B delta-range VLBI between P19CAM and Beijing (offset with respect to ephemeris)



DSLWP-B delta-range VLBI between P19CAM and Harbin (offset with respect to ephemeris)

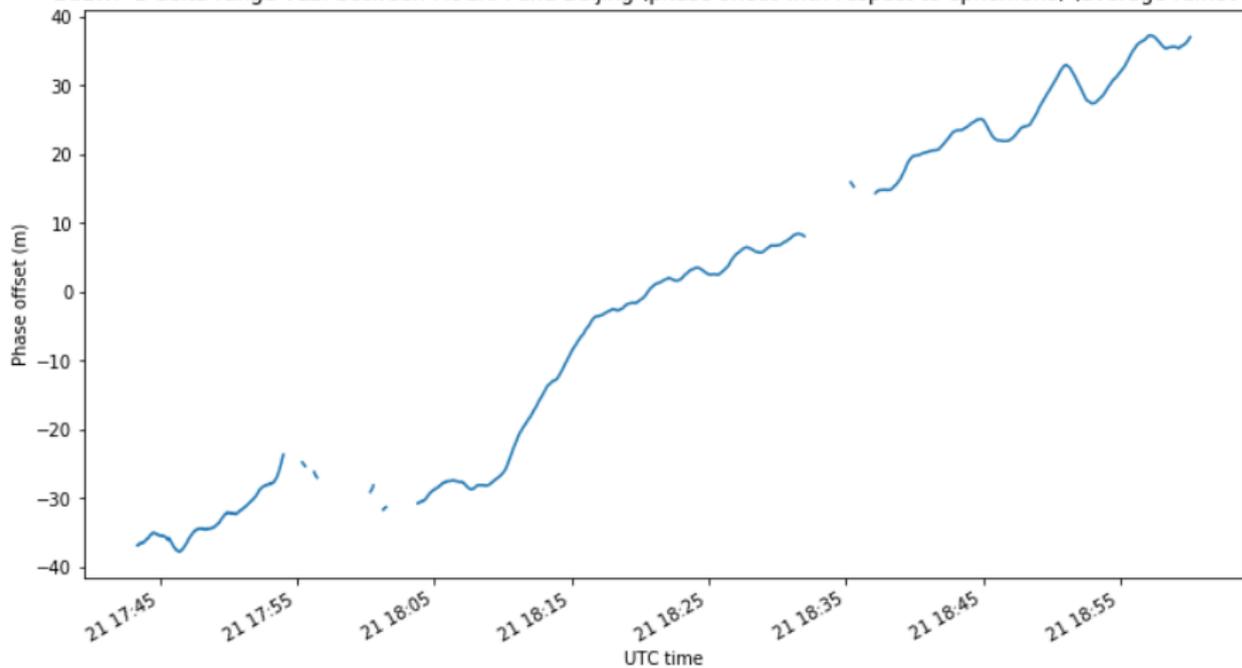


DSLWP-B delta-range VLBI between Beijing and Harbin (offset with respect to ephemeris)

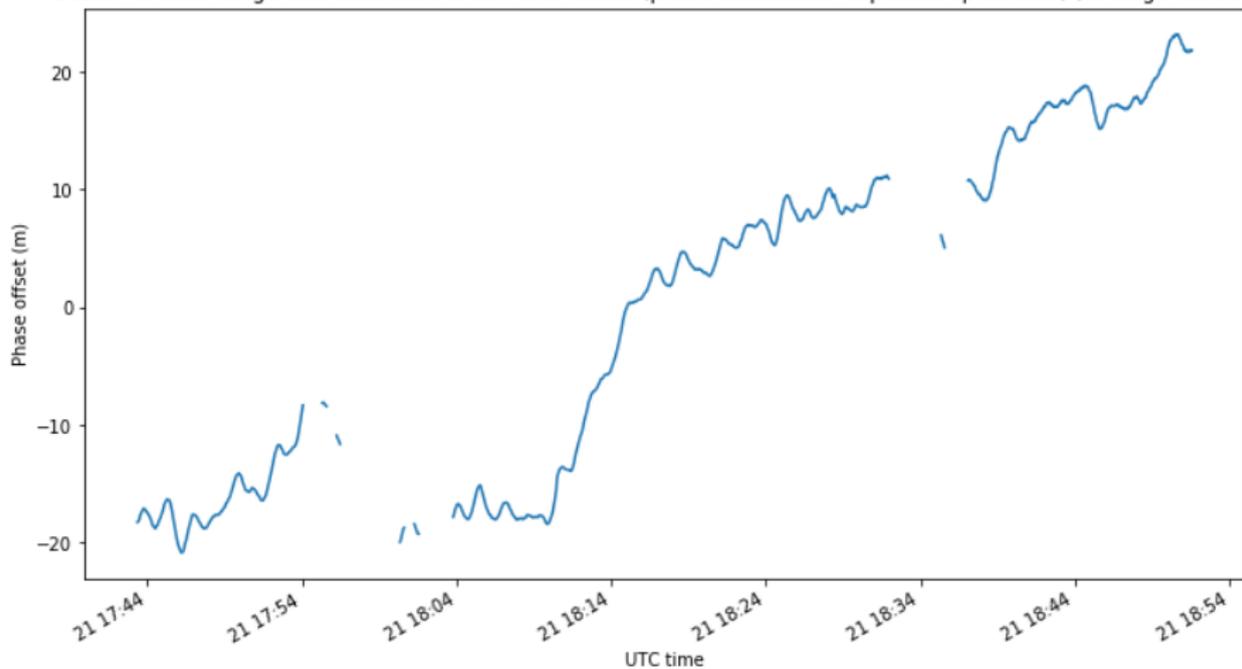


- Las medidas de fase son muy precisas, pero son ambiguas por un número entero de longitudes de onda.
- Pueden usarse de dos maneras:
  - Fase acumulada: mide el delta-rango (más un número entero de longitudes de onda dado por la ambigüedad).
  - Derivando: se obtiene la delta-velocidad.
- En las medidas de fase acumulada, cualquier error se acumula, divergiendo el valor de la medida real.
- El transmisor tiene que ser muy estable en frecuencia. Un pequeño error en frecuencia se va acumulando en las medidas de fase.
- Si el transmisor es suficientemente estable y las medidas de retardo de grupo son suficientemente precisas, se puede determinar y eliminar la ambigüedad. En el caso de DSLWP-B es imposible hacer esto.

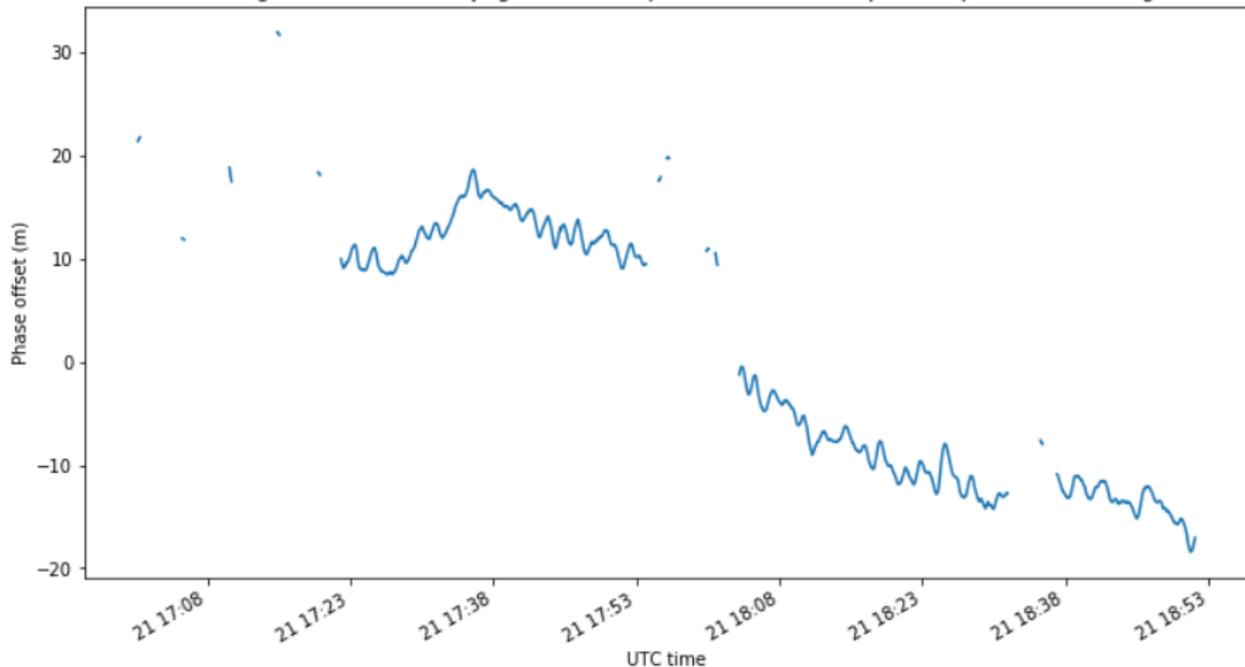
DSLWP-B delta-range VLBI between PI9CAM and Beijing (phase offset with respect to ephemeris) (average removed)



DSLWP-B delta-range VLBI between PI9CAM and Harbin (phase offset with respect to ephemeris) (average removed)



DSLWP-B delta-range VLBI between Beijing and Harbin (phase offset with respect to ephemeris) (average removed)



# Calidad de las medidas de fase

- En el caso de las medidas de fase acumulada de DSLWP-B, la inestabilidad del transmisor introduce errores de nivel métrico o decimétrico.
- El error en delta-velocidad es

$$\delta v = v \frac{\delta f}{f},$$

donde  $v$  es la delta-velocidad,  $\delta f$  es el error en frecuencia del transmisor y  $f$  es la frecuencia nominal.

- En un intervalo  $[0, T]$ , esto introduce un error de

$$\Delta r = (r(T) - r(0)) \frac{\delta f}{f},$$

donde  $r(t)$  es el delta-rango en el tiempo  $t$ .

- En el caso de las observaciones de DSLWP-B, tenemos diferencias de delta-rangos del orden de  $10^6$ m, por lo que inestabilidades de 1ppm producen errores del orden métrico.

- Por tanto, a pesar de la inestabilidad en frecuencia, las medidas de fase son mucho más precisas que las medidas de retraso de grupo, pero es imposible determinar la ambigüedad de las medidas.
- El único uso práctico es para obtener medidas de delta-velocidad.

- El uso más interesante de las medidas VLBI es la determinación de orbitas.
- Procedimiento: modificar el vector de estado orbital para intentar minimizar el error cuadrático medio de las medidas obtenidas.
- Se deben ponderar adecuadamente las medidas de delta-rango en bruto (muy ruidosas) y las medidas de delta-velocidad (poco ruidosas).

- GMAT es una herramienta open-source de la NASA que permite hacer planificación de misiones interplanetarias, propagación de órbitas, determinación de órbitas, etc.
- Tiene un filtro batch para determinación de órbitas con medidas tipo DSN.
- Ya se ha empleado para determinación orbital de DSLWP-B usando medidas de Doppler de la baliza en banda S tomadas por Scott Tilley VE7TIL.
- No soporta medidas tipo VLBI.
- Idea: añadir soporte como un plug-in o usar el propagador de GMAT como herramienta externa.

- <https://destevez.net/tag/dslwp/>
- <https://twitter.com/ea4gpz>
- **Wei Mingchuan BG2BHC** <https://twitter.com/bg2bhc>
- **Cees Bassa** <https://twitter.com/cgbassa>
- **Tammo Jan Dijkema** <https://twitter.com/tammojan/>
- **Web de LilacSat y DSLWP** <http://lilacsat.hit.edu.cn/>