

Satélites Amateur: proyectos en curso e ideas futuras

Dr. Daniel Estévez
EA4GPZ / M0HXM

21 de abril de 2018
STARcon 2018, Murcia

- 1 Modos WSJT-X y transpondedores lineales en LEO
- 2 Estudios de la polarización
- 3 Ranging Amateur

- 1 Modos WSJT-X y transpondedores lineales en LEO
- 2 Estudios de la polarización
- 3 Ranging Amateur

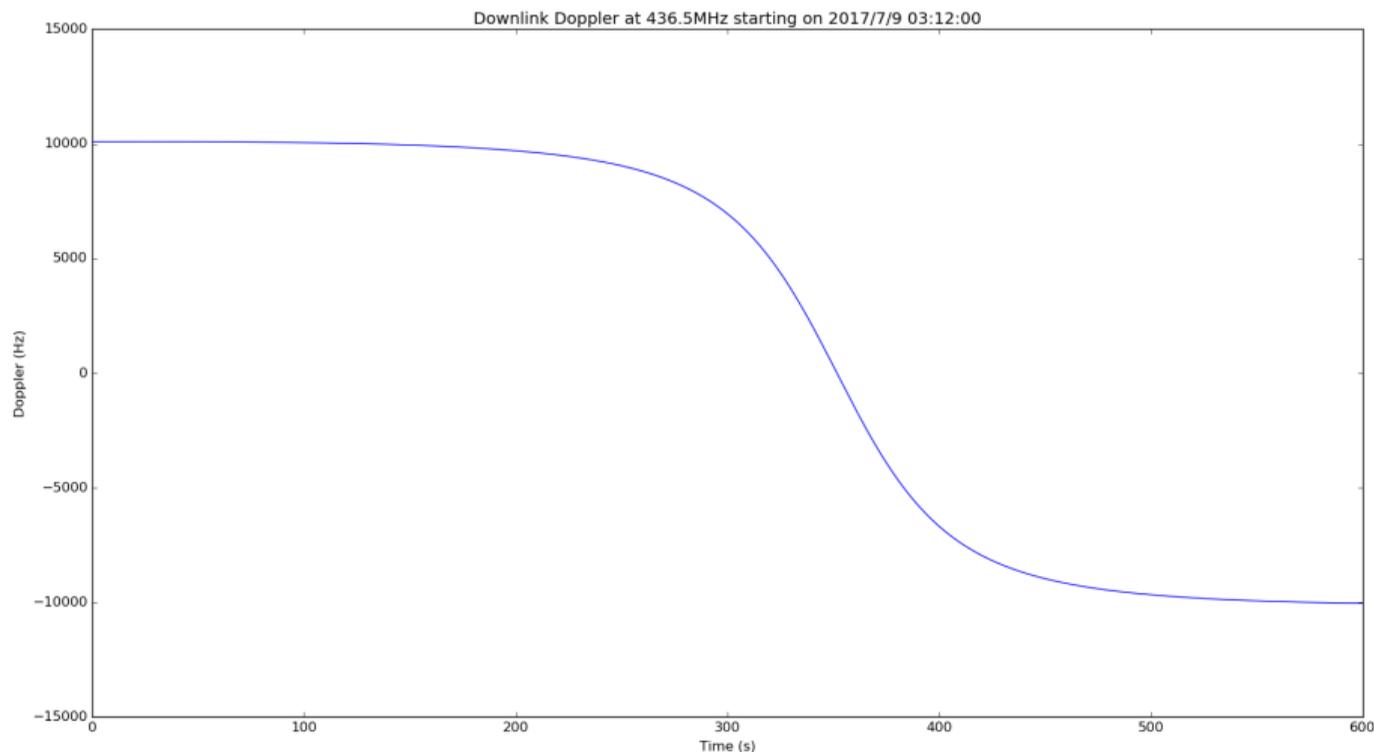
Satélites Amateur en LEO

- Actualmente hay muchos satélites Amateur en baja órbita terrestre (LEO)
- La mayoría solo transmiten datos (telemetría), pero varias docenas pueden emplearse para comunicaciones bidireccionales entre Radioaficionados
- Dos sistemas principales de comunicaciones: repetidor FM y transpondedor lineal
- El transpondedor lineal solamente traslada en frecuencia (“bent-pipe transponder”). Permite varios usuarios simultáneos y distintas modulaciones en un ancho de banda de entre 20kHz y 100kHz
- Modos usuales: SSB (banda lateral con portadora suprimida) y CW (telegrafía)
- Bandas usuales: 2m (145MHz) y 70cm (435MHz)
- Link budget típico: El satélite transmite con poca potencia (100mW-1W). La parte difícil es recibir. Generalmente hace falta al menos una yagi pequeña (1m de boom).
- SNRs mínimos (en 2500Hz). SSB: 6dB, CW: -5dB

- WSJT-X es un software creado por Joe Taylor K1JT, Steve Franke K9AN, Bill Somerville G4WJS, Nico Palermo IV3NWV y otros
- Distintos modos digitales pensados para rebote lunar, meteor scatter, señales débiles en HF, etc
- SNRs mínimos entre -28dB y -17dB dependiendo del modo.
- Periodos de transmisión de 60 segundos (ó 15 segundos ó 120 segundos, según el modo) coordinados con el tiempo UTC
- Mensajes de 72 bits con la información mínima para establecer un contacto válido (QSO) entre Radioaficionados
- Usar modos WSJT-X a través de transpondedores lineales en LEO permitiría estaciones mucho más sencillas, con antenas omnidireccionales

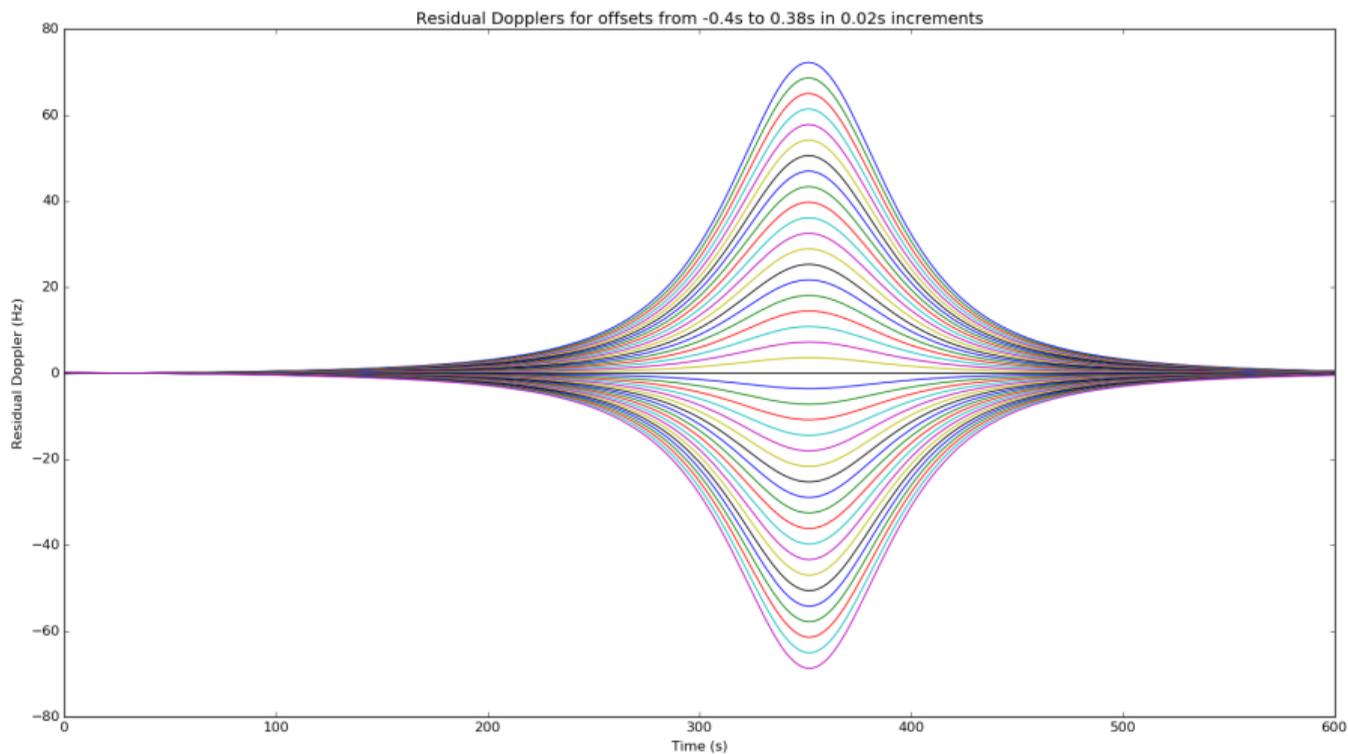
- Parámetros orbitales:
 - 400-1000km de altura
 - Velocidad orbital 7.5km/s
 - Duración de pase de 10 a 15 minutos
- Doppler. 70cm: $\pm 10\text{kHz}$, 2m: $\pm 3\text{kHz}$
- Tasa de cambio de Doppler: hasta 150Hz/s en pases de mucha elevación
- Dificultad principal para WSJT-X: la tasa de cambio de Doppler
- Corrección de Doppler por ordenador imprescindible
- Se usan los TLEs del satélite y el modelo SGP4 para calcular el Doppler y corregirlo
- La corrección no es perfecta y siempre queda un “Doppler residual”

Perfil de Doppler típico (70cm, alta elevación)



- Causas:
 - Desfase temporal: error en el reloj del receptor, las muestras no se etiquetan temporalmente de forma correcta (buffers). A 150Hz/s, cada ms cuenta.
 - Efemérides imprecisas: Falta de precisión en los cálculos con TLEs, TLEs antiguos, etc.
- Para la primera causa, es interesante estudiar $R(t, \delta) = D(t) - D(t - \delta)$ donde $D(t)$ es el Doppler en función del tiempo y δ es un parámetro pequeño.
- Para la segunda causa, $R(t, \delta)$ también es interesante, ya que la mayor parte del error se produce en la componente a lo largo de la órbita (el satélite va “adelantado” o “retrasado”).
- Observación: $R(t, \delta) \approx -\delta D'(t)$.

$R(t, \delta)$ típico



Experimento de umbrales de decodificación

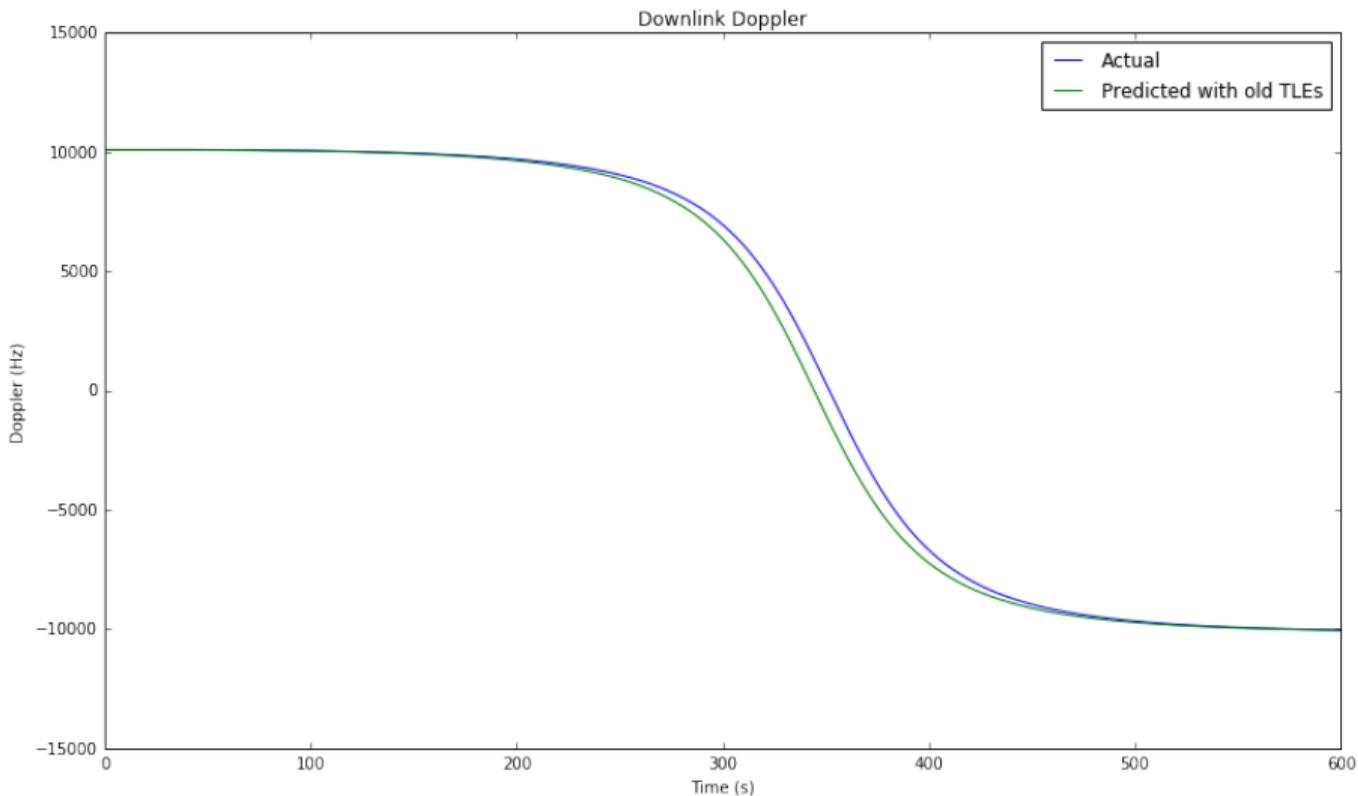
- Buscamos qué valor máximo de δ pueden tolerar los distintos modos WSJT-X en $R(t, \delta)$. El umbral depende del SNR.
- Datos de Doppler reales usando un TLE para LilacSat-1 y un pase de alta elevación sobre mi estación (2017/7/9 03:12:00 UTC).

Modo	SNR bajo	Umbral SNR bajo	Umbral -20dB	Umbral -15dB
JT9A	-24	0.05	0.06	0.06
QRA64A	-24	0.12	0.12	0.12
QRA64C	-24	0.13	0.16	0.17
QRA64E	-22	0.16	0.18	0.21
FT8	-18	0.17		0.26
JT4G	-22	0.12	0.14	0.16

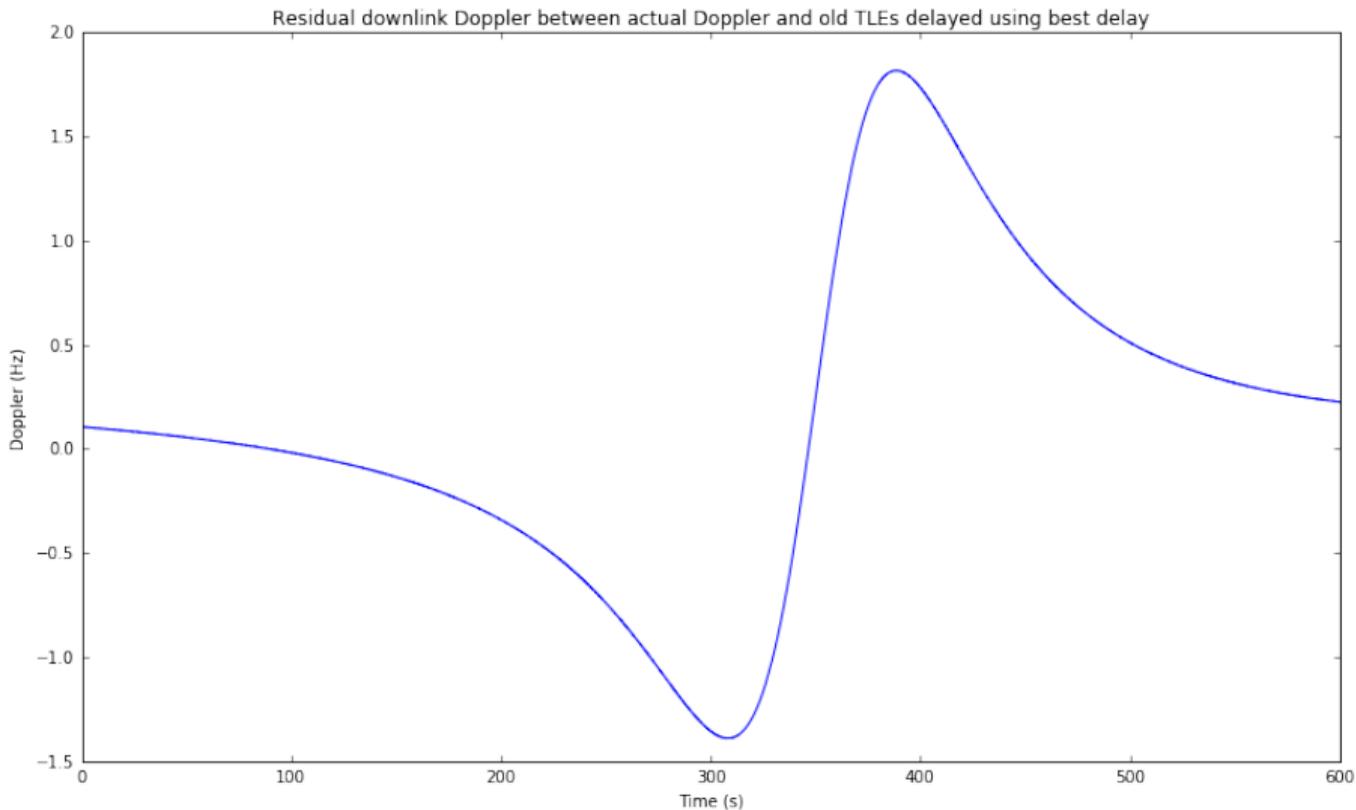
- Idea para la decodificación: Realizar una búsqueda en δ aplicando a la señal recibida una corrección en frecuencia de $R(t, \delta)$ para distintos valores de δ antes de pasar la señal al decodificador de WSJT-X.

- El uso de TLEs antiguos causa un error en el cálculo de la órbita del satélite
- La mayor parte del error se produce en la componente a lo largo de la órbita (principio general en dinámica orbital: el error en velocidad se acumula a lo largo del tiempo)
- Aplicando un desplazamiento temporal adecuado a la curva de Doppler calculada con TLEs antiguos, se puede aproximar bastante bien la curva de Doppler correcta

Ejemplo con TLEs de 6 días de antigüedad

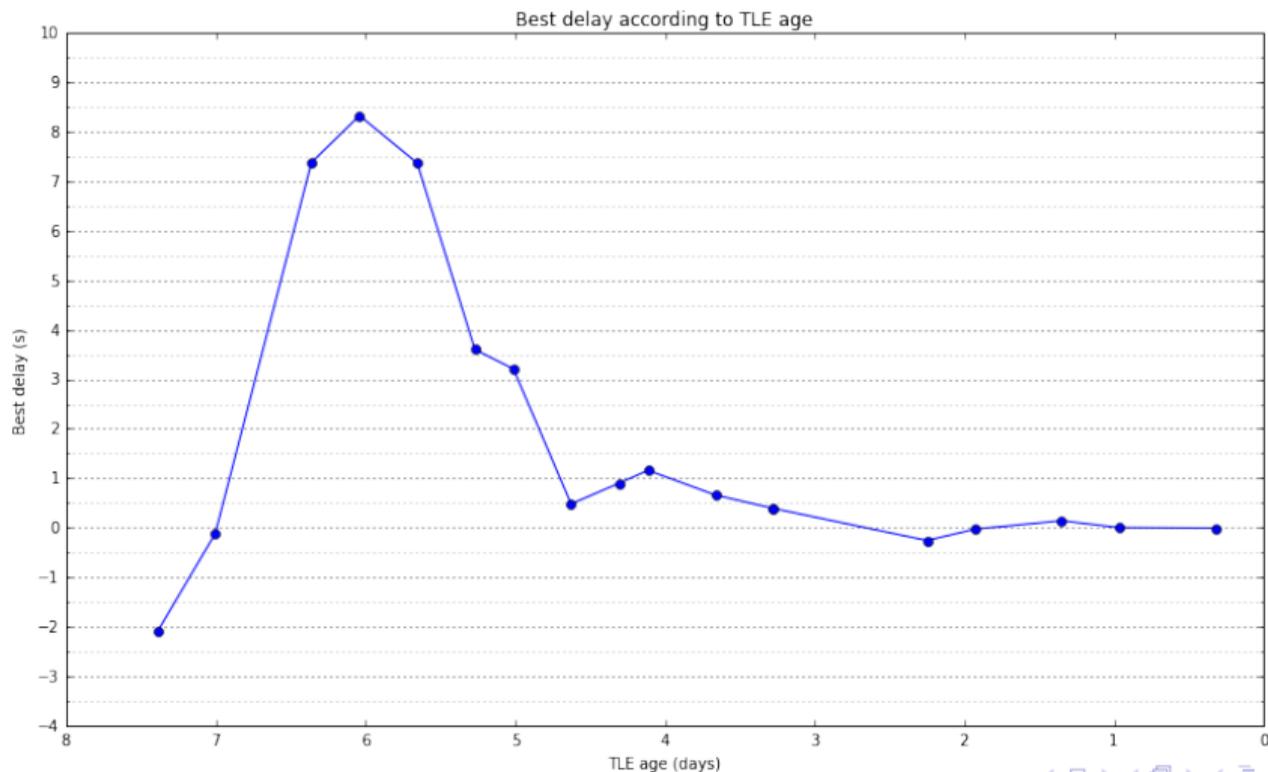


Error en la aproximación (aplicando retraso de 7.38s)

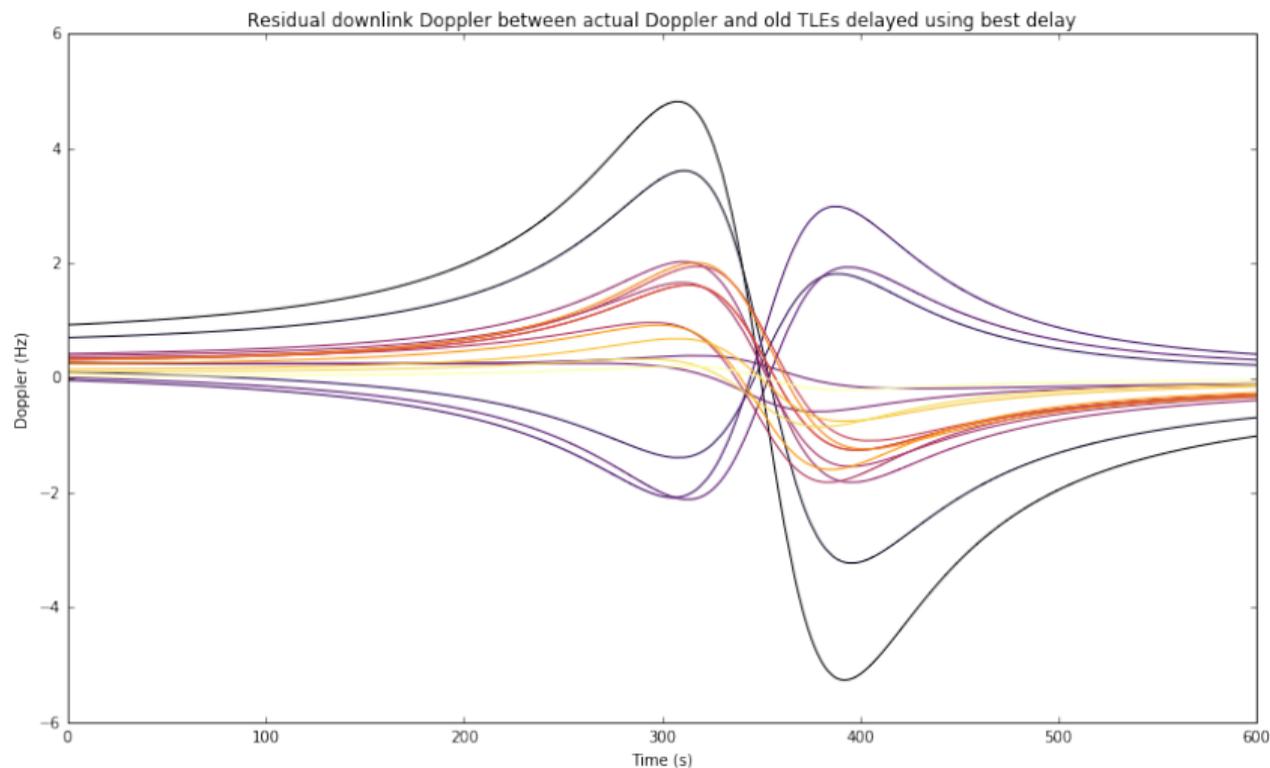


Retraso a aplicar a distintos TLEs antiguos

El retraso se calcula como la diferencia entre cortes por cero de las curvas de Doppler

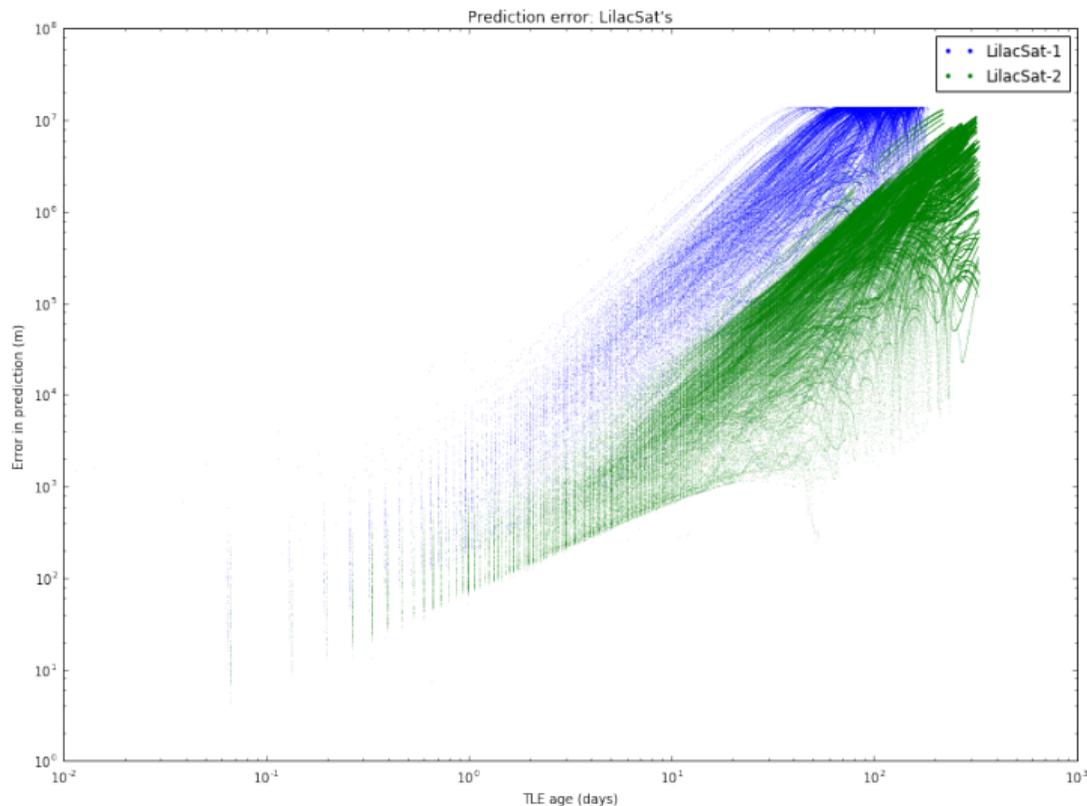


Errores en la aproximación



- La gráfica anterior es solo un ejemplo concreto. Para un estudio más detallado, analizamos los TLEs de varios satélites Amateur a lo largo de todo el año 2017
- Definimos la variación entre TLEs T_1 y T_2 como la distancia entre las posiciones del satélite calculadas con T_1 y T_2 , ambas calculadas en la época de T_2 , dividida entre la diferencia de épocas de T_1 y T_2 . Tiene unidades de m/s
- La variación entre TLEs consecutivos típicamente oscila entre 10^{-2} y 10^{-3} m/s (a veces llegando a 10^{-1} m/s)
- Una variación de 10^{-2} m/s corresponde a un cambio en el retraso δ de 0.11 s/día
- Por tanto, típicamente se pueden usar TLEs con 1 ó 2 días de antigüedad sin realizar una búsqueda en δ

Error en posición vs. antigüedad de TLEs

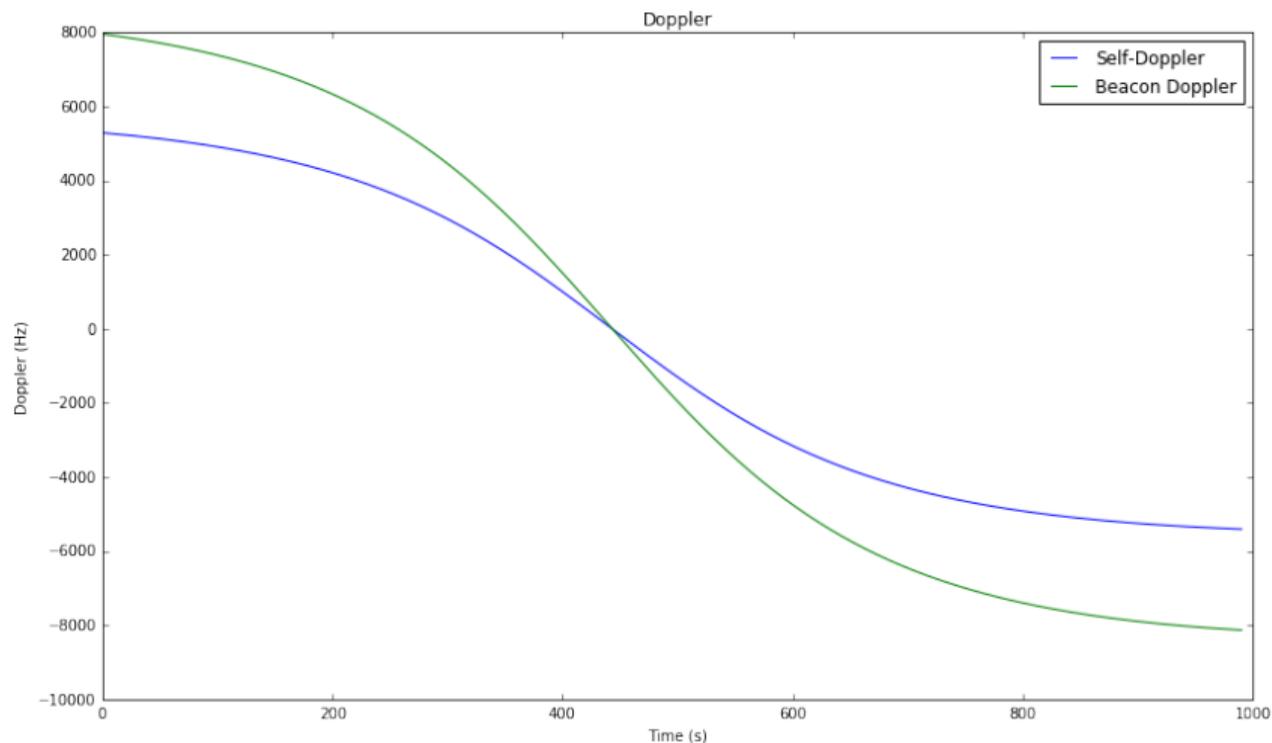


Doppler en la subida

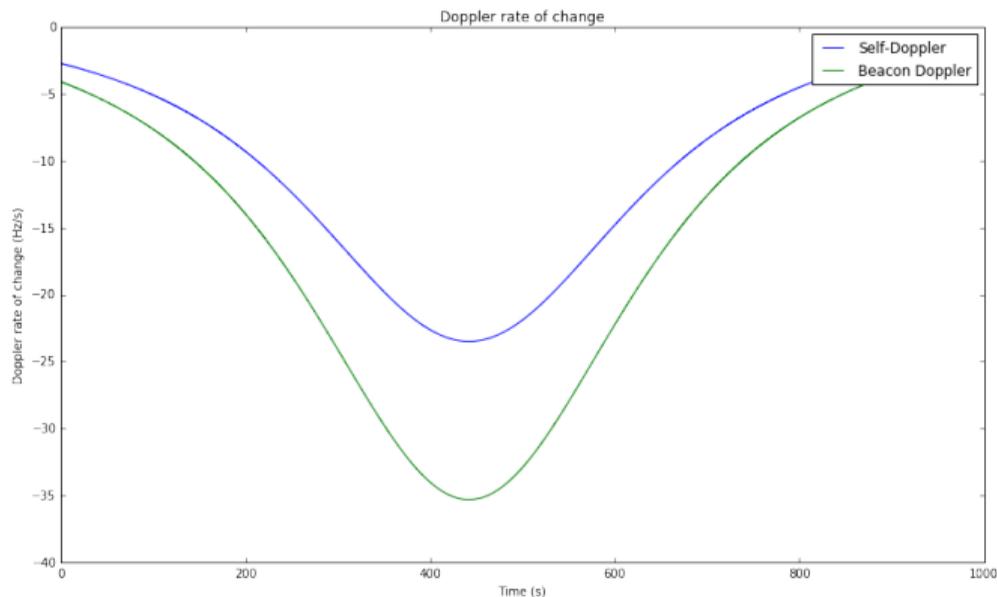
- La búsqueda en δ usando $R(t, \delta)$ corrige el Doppler residual en la bajada, pero ¿cómo corregir el Doppler en la subida?
- Generalmente la estación receptora no puede calcular el Doppler en la subida, ya que depende de la posición de la estación transmisora (desconocida, en principio)
- Posibles ideas para corregir Doppler residual en subida:
 - La estación transmisora escucha sus propias transmisiones para estimar un valor de δ y aplicar una corrección de Doppler residual
 - Se realiza una medición más precisa de δ utilizando la baliza del satélite o una transmisión potente a través del transpondedor. El valor de δ se publica como una corrección a los TLEs
- Distintos casos dependiendo del modo del transpondedor: U/V (subida en 70cm, bajada en 2m, más difícil) ó V/U (subida en 2m, bajada en 70cm, más fácil)
- La geometría juega en nuestro favor: en cada momento del pase, hay pocas estaciones con el satélite “encima” (y por tanto con una tasa de cambio de Doppler alta)

- FT8 usa periodos de 15s y ha ganado mucha popularidad por ello en HF
- FO-29 es uno de los satélites más antiguos y populares. Tiene un transpondedor lineal V/U de 100kHz con 1W de potencia y una baliza CW con 100mW de potencia. Su órbita es bastante alta (menor Doppler).
- Experimento: Transmisión de FT8 a lo largo de todo el pase, frecuencia fija 145.990MHz. Grabación de la bajada del transpondedor para su posterior procesado.
- Pase con una elevación máxima de 40°.

Doppler de FO-29

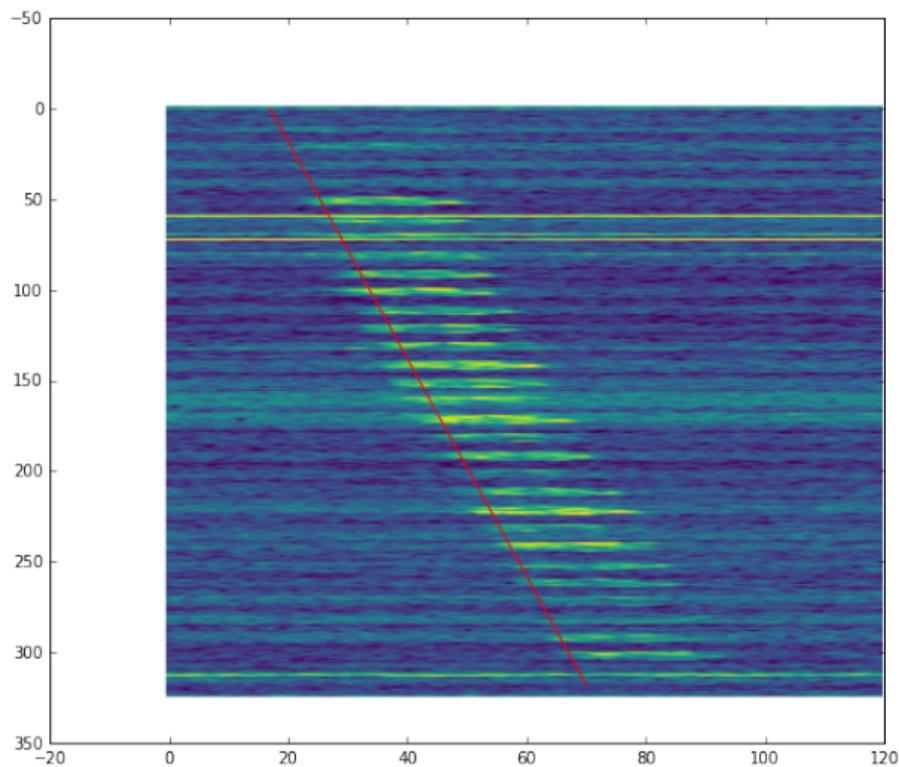


Tasa de variación del Doppler



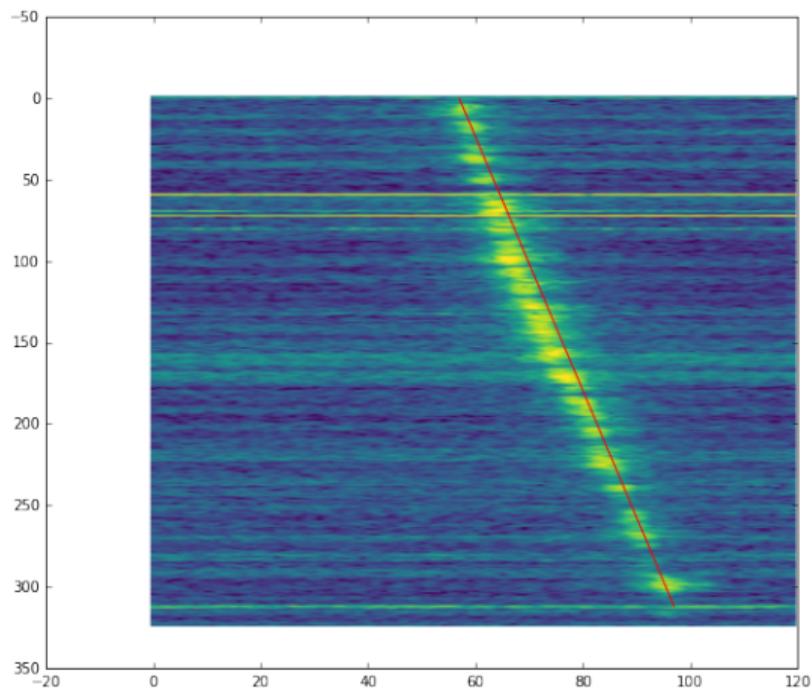
Es 6 veces menor que en el estudio con LilacSat-1. No ha hecho falta corrección del Doppler residual usando los TLEs más cercanos a la fecha del pase.

Señal FT8



- De 33 periodos, se pudieron decodificar 24 con éxito
- Tras la corrección del Doppler, hay presente un drift lineal de 111mHz/s
- Aparte de dicho drift lineal, el drift restante es pequeño

Baliza CW

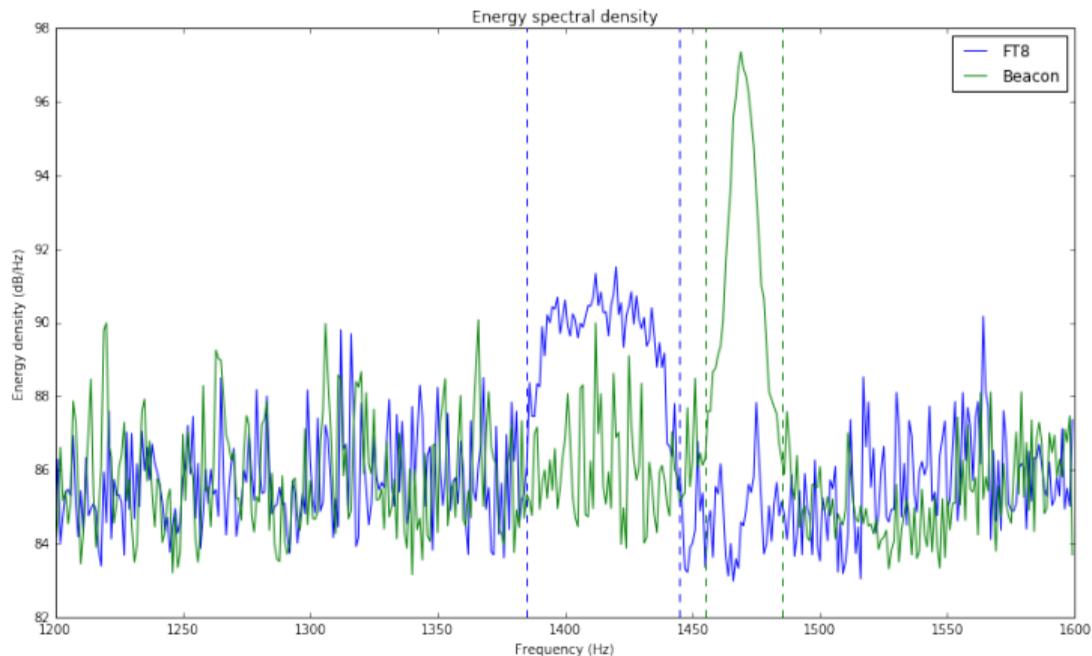


El drift lineal son 85mHz/s

- El drift es de 111mHz/s en la señal FT8 y de 85mHz/s en la baliza CW
- Se descarta que la causa del drift sea mi transmisor (está presente también en la baliza), de mi receptor (es distinto en ambas señales) o de la corrección de Doppler (el auto-Doppler en la señal FT8 es menor que el Doppler en la baliza de CW)
- La explicación más plausible es un drift en el oscilador maestro de FO-29. El cociente entre las frecuencias del oscilador del transpondedor lineal y el oscilador de la baliza es 1.335. El cociente entre los drifts que se han medido es 1.306. Coinciden a un error del 2%.
- Poco antes del pase, FO-29 entró en eclipse, lo que cuadra con que el reloj se enfríe causando el drift.

Estudio de la potencia

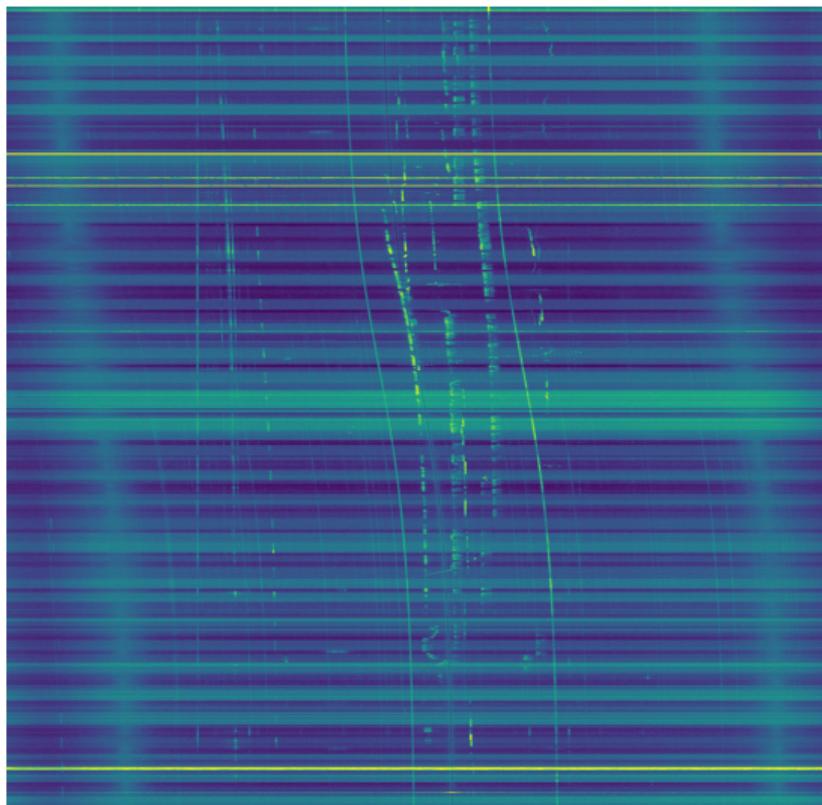
Densidad espectral de energía en toda la grabación, tras eliminar el Doppler y drift lineal



Energías totales. Señal FT8: 107.52dB. Baliza CW: 107.78dB.

- Se ajustó la potencia de transmisión durante el pase para no causar una señal excesiva (lo cual malgasta potencia del transpondedor y perjudica a otros usuarios)
- La señal FT8 podría haber sido 5dB más débil y todavía se habría podido decodificar sin problemas
- Es necesario realizar estos experimentos de manera responsable para evitar interferir a otros usuarios empleando potencia excesiva

Waterfall de la grabación completa



Conclusiones

- FT8 puede ser un modo muy bueno para comunicaciones débiles a través de transpondedores lineales en LEO
- La corrección por ordenador del Doppler es imprescindible en la transmisión y recepción
- En muchos casos no es necesario aplicar ninguna corrección adicional al Doppler residual
- En los casos en los que sea necesario, se pueden aplicar las técnicas que hemos descrito para corregir el Doppler residual
- Son necesarios muchos más experimentos prácticos para ver el rendimiento real en muchas situaciones distintas (antenas de compromiso, distintos tipos de pase, distinto satélites, etc)
- Las transmisiones se deben hacer de manera responsable, empleando la mínima potencia necesaria
- Es necesario concienciar a los Radioaficionados de que SSB y CW no son los únicos modos usables a través de transpondedores lineales en LEO

- <http://destevez.net/2017/08/wsjt-x-and-linear-satellites-part-i/>
- <http://destevez.net/2017/10/wsjt-x-and-linear-satellites-part-ii/>
- <http://destevez.net/2017/11/first-ft8-test-through-fo-29/>
- <http://destevez.net/2017/11/waterfall-from-the-ft8-test-through-fo-29/>
- <http://destevez.net/2017/11/a-brief-study-of-tle-variation/>

- 1 Modos WSJT-X y transpondedores lineales en LEO
- 2 Estudios de la polarización
- 3 Ranging Amateur

- Polarización: indica en qué dirección espacial oscila una onda transversa
- Puede ser horizontal, vertical, o una combinación de éstas (por ejemplo diagonal). Puede ser circular derecha, circular izquierda, o una combinación de éstas.
- La polarización es realmente una propiedad cuántica de los fotones (spin). Se puede representar como un punto en la esfera de Bloch (o Poincaré).
- Dos puntos antipodales de la esfera representan polarizaciones ortogonales (por ejemplo $|H\rangle$ y $|V\rangle$ ó $|R\rangle$ y $|L\rangle$). Cualquier punto de la esfera se puede escribir como “superposición cuántica” de dos polarizaciones ortogonales (del mismo modo que un qubit es una superposición cuántica de $|0\rangle$ y $|1\rangle$).
- Formalmente, la superposición cuántica se escribe como el vector de Jones, que es un vector de norma uno en \mathbb{C}^2 , y un par de polarizaciones ortogonales son una base ortonormal de \mathbb{C}^2 .
- Ejemplos: polarización diagonal a 45°

$$|A\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}; \quad |R\rangle = (|H\rangle - i|V\rangle)/\sqrt{2}.$$

- Cada tipo de antena está diseñado para recibir una polarización concreta y no recibe nada en la polarización ortogonal
- Para recibir una polarización arbitraria se utiliza un sistema de polarización dual: antenas para dos polarizaciones ortogonales (normalmente $|H\rangle$ y $|V\rangle$, aunque también pueden ser $|R\rangle$ y $|L\rangle$) conectadas a receptores sincronizados en fase
- Se puede obtener cualquier polarización combinando (digitalmente) las señales recibidas en ambos receptores (usando el vector de Jones)

Polarización en satélites Amateur en LEO

- La mayor parte de satélites Amateur utilizan dipolos o monopolos, que tienen polarización lineal (en la dirección del dipolo)
- Otros satélites utilizan dipolos a 90° enfasados para obtener polarización circular (tipo turnstile). Este tipo de antena es $|R\rangle$ cuando los dipolos se ven desde delante (front beam), $|L\rangle$ cuando los dipolos se ven desde detrás (back beam) y lineal cuando los dipolos se ven desde un lateral
- Un caso curioso: LilacSat-2. Antena tipo turnstile. Transmite dos señales, cada una en una de las dos polarizaciones ortogonales
- La polarización recibida en la estación de tierra depende de la orientación geométrica relativa entre las antenas del satélite y la estación de tierra
- La mayor parte de satélites Amateur tienen sistemas de control de actitud muy básicos o inexistentes
- Por tanto: la polarización que se recibe en tierra es prácticamente impredecible y siempre cambiante

Polarización en satélites Amateur en LEO

- La mayor parte de Radioaficionados con estaciones fijas tienen recepción en sólo una polarización (lineal, normalmente). Esto crea fading profundo cuando la polarización recibida es la ortogonal
- Los Radioaficionados que utilizan yagis de mano, pueden rotar la yagi y seguir “a oído” la polarización lineal durante el pase
- Ya que la polarización es algo complejo de entender y la geometría de un pase no es sencilla incluso para satélites con control de actitud, se han creado varios mitos entre los Radioaficionados con respecto a la polarización
- Por tanto sería interesante estudiar la polarización recibida realizando grabaciones de varios pases de distintos satélites con un receptor de polarización dual y obtener datos reales

Medición de la polarización de una señal

- Supongamos que nuestro receptor dual recibe en $|H\rangle$ y $|V\rangle$ y que el receptor es ideal o ha sido calibrado
- Calcular la polarización de la señal de interés es equivalente a calcular su vector de Jones, que se calcula a partir de la relación de amplitudes y diferencia de fases entre las señales recibidas en los canales $|H\rangle$ y $|V\rangle$
- Si la señal es un tono fuerte, es sencillo medir la amplitud y la fase instantáneas
- Sin embargo, para señales con modulación o débiles, esto no es práctico. La medición instantánea de amplitud y fase es un proceso no lineal y ruidoso que debe filtrarse para obtener una medida limpia
- Este cálculo asume que la señal es completamente polarizada, lo cual podría no ser cierto debido a la propagación
- Los parámetros de Stokes son una alternativa muy útil para medir la polarización. Se emplean en óptica y radioastronomía, donde se trabaja con ondas incoherentes, por lo que la presencia de modulación y ruido no les afecta tanto

Parámetros de Stokes

- Son una tupla de cuatro números reales: I , Q , U y V
- Se calculan expresando la señal con respecto a tres pares de polarizaciones ortogonales: $|H\rangle$, $|V\rangle$; $|A\rangle$, $|B\rangle$ (polarizaciones “diagonales” a $\pm 45^\circ$) y $|R\rangle$, $|L\rangle$. Si la señal está expresada con respecto a un par de polarizaciones ortogonales, pasar a otro par es realizar un cambio de base (transformación lineal)
- E_H representa la amplitud de la componente correspondiente al vector $|H\rangle$ cuando la señal se escribe con respecto al par $|H\rangle$, $|V\rangle$, etc. Denotamos por $\langle \cdot \rangle$ la media

$$I = \langle E_H^2 \rangle + \langle E_V^2 \rangle = \langle E_A^2 \rangle + \langle E_B^2 \rangle = \langle E_R^2 \rangle + \langle E_L^2 \rangle$$

$$Q = \langle E_H^2 \rangle - \langle E_V^2 \rangle$$

$$U = \langle E_A^2 \rangle - \langle E_B^2 \rangle$$

$$V = \langle E_L^2 \rangle - \langle E_R^2 \rangle$$

- Los parámetros de Stokes tienen una interpretación natural en función de la potencia recibida por antenas de distintas polarizaciones.

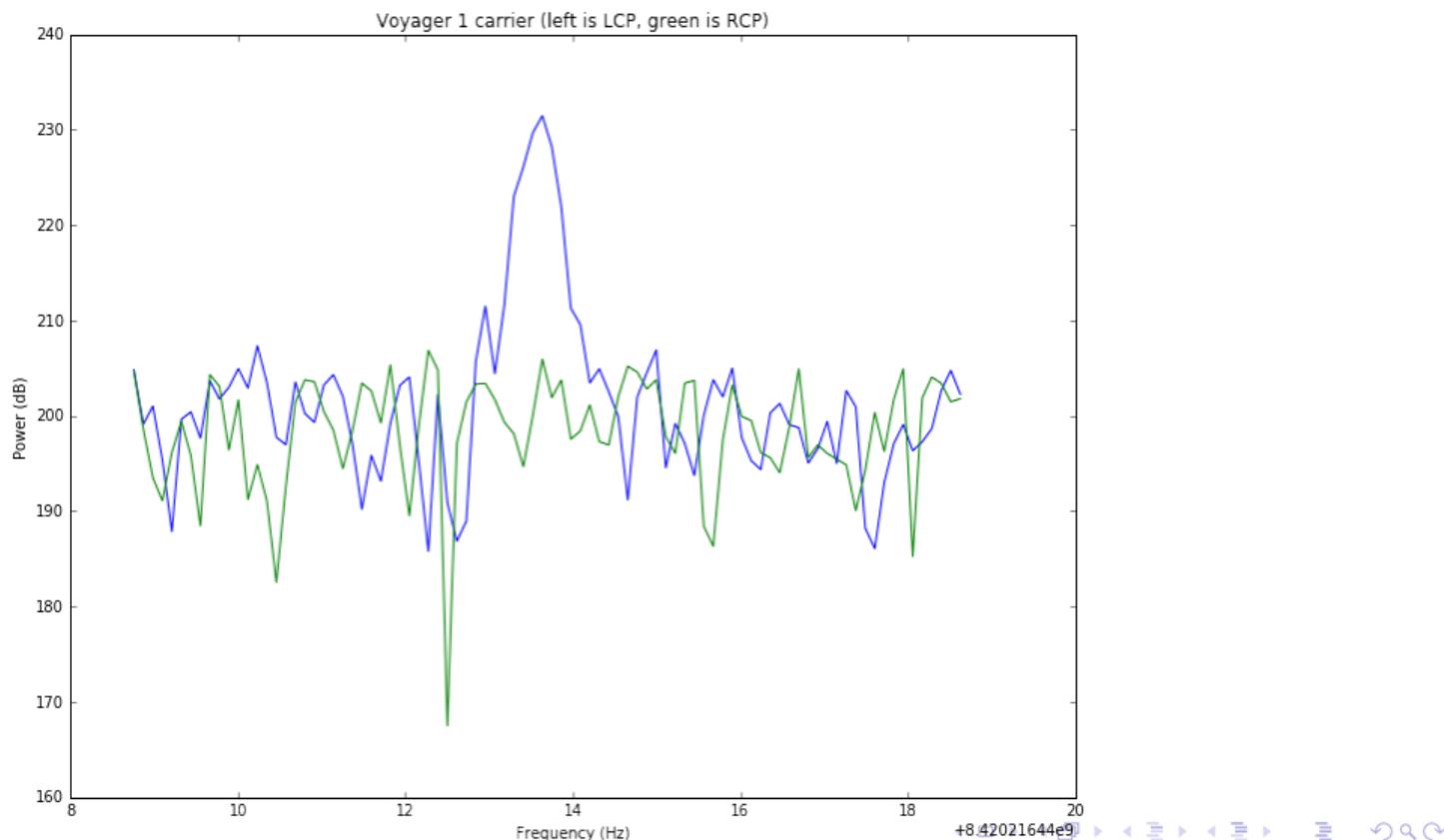
Análisis de los parámetros

- I tiene la interpretación de la intensidad total. $I_p = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}$ es la intensidad polarizada. Tenemos $I_p \leq I$.
- Se define el grado de polarización $\rho = I_p/I$
- La intensidad compleja de polarización lineal es $L = Q + iU$. Dentro de la señal polarizada, el grado de polarización lineal es $|L|/I_p$. El ángulo de la polarización lineal es $\arg L$
- Dentro de la señal polarizada, el grado de polarización circular es $|V|/I_p$. El signo de V indica si la polarización es izquierda o derecha
- El punto $(Q, U, V)/I_p$ representa la polarización en la esfera de Bloch
- Pueden relacionarse los parámetros de Stokes con la elipse de polarización

Caso práctico: Polarización de la señal de Voyager-1

- Grabación en polarización dual (circular) de Voyager-1 por el Green Bank Telescope (frecuencia 8420.216MHz)
- https://github.com/daniestevez/jupyter_notebooks/blob/master/VoyagerGBT.ipynb
- Calculamos los parámetros de Stokes de la portadora de la telemetría
- $I=4.0083096878627821e+23$, $Q=-1.1498752538263949e+22$,
 $U=-3.1455972770169882e+22$, $V=3.7956906721893508e+23$
- Grado de polarización 0.9506346268210194
- Grado de polarización lineal 0.087894838343176782 , ángulo de la polarización lineal -55.039960017706704
- La señal está en polarización circular izquierda de forma prácticamente completa, como cabía esperar

Espectro de la portadora en ambas polarizaciones



- Necesitamos muchas grabaciones de satélites en polarización dual, y animar a la gente a realizarlas
- Construcción de una antena en polarización dual sencilla (dipolos cruzados, yagis cortas cruzadas)
- Receptor LimeSDR o similar
- Calibración del sistema. Basta emplear una señal de referencia en polarización lineal. Es posible emplear parámetros de Stokes para calibrar
- Procesamiento de las grabaciones para medir, graficar e interpretar los parámetros de Stokes

- 1 Modos WSJT-X y transpondedores lineales en LEO
- 2 Estudios de la polarización
- 3 Ranging Amateur

- Ranging (radiodeterminación): consiste en determinar la posición y velocidad de un objeto
- Para satélites es más o menos equivalente a determinar los parámetros orbitales
- Interés de realizar ranging de satélites Amateur con medios Amateur:
 - Uso de la tecnología para objetivos distintos a las comunicaciones (el objetivo usual de la tecnología de Radioaficionados)
 - Obtención de efemérides precisas para la corrección de Doppler (enlaza con la primera parte de la charla)
 - Interesar a todo un sector de gente en temas como la dinámica orbital
- Tipos de ranging:
 - Activo: las estaciones que realizan el ranging transmiten y reciben. Requiere un transpondedor lineal en el satélite
 - Pasivo: las estaciones solo reciben. Distinguimos dos tipos
 - El satélite transmite señales específicamente diseñadas para el ranging. Caso similar al activo. No hay ningún satélite con estas características actualmente
 - Oportunista. Se utilizan señales transmitidas por el satélite con otro propósito (baliza, telemetría, etc.)

Fundamentos del ranging

- Idea básica: Calcular el tiempo de propagación de la señal (retardo). La distancia es el tiempo de propagación multiplicado por c (la velocidad de la luz en el vacío)
- Puede usarse:
 - Datos/modulación (retardo de grupo). La precisión viene dada principalmente por el baudrate
 - Fase de la portadora (retardo de fase). Mucho más preciso (la frecuencia de la portadora es muy alta). Ambigüedad de número de vueltas entera. Ideal para cálculo de velocidad (Doppler)
- Códigos de ranging: secuencias binarias construidas para que su autocorrelación sea muy baja para retardos distintos de cero
- El retardo se calcula correlando la señal recibida contra una réplica generada localmente

- Constelación de satélites transmitiendo códigos de ranging a 1.023MHz en la frecuencia 1575.42MHz, sincronizados mediante un estándar atómico
- Un receptor desconoce su posición y su tiempo
- Mide los retardos de las señales de 4 satélites y los utiliza para calcular su posición y tiempo
- Modelo adaptable para ranging Amateur activo a través de satélites con transpondedor lineal

Ranging Amateur activo para transpondedores lineales

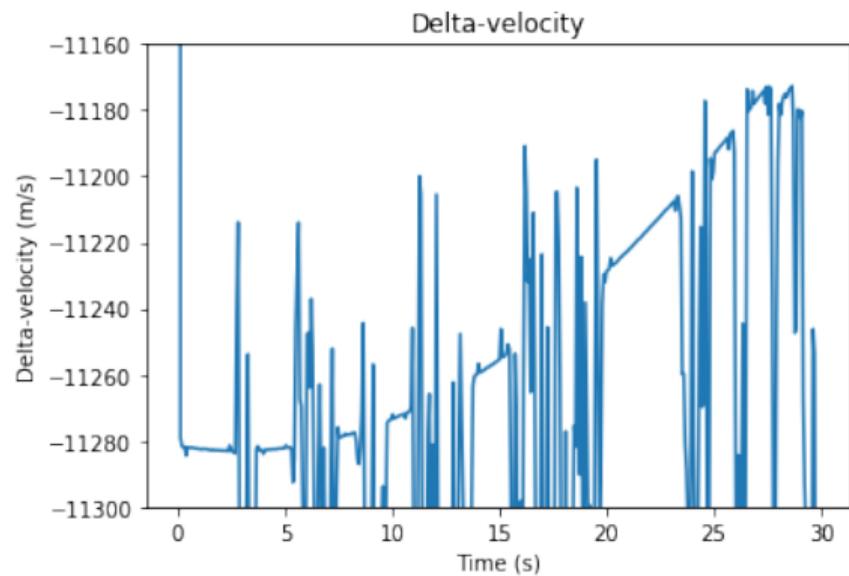
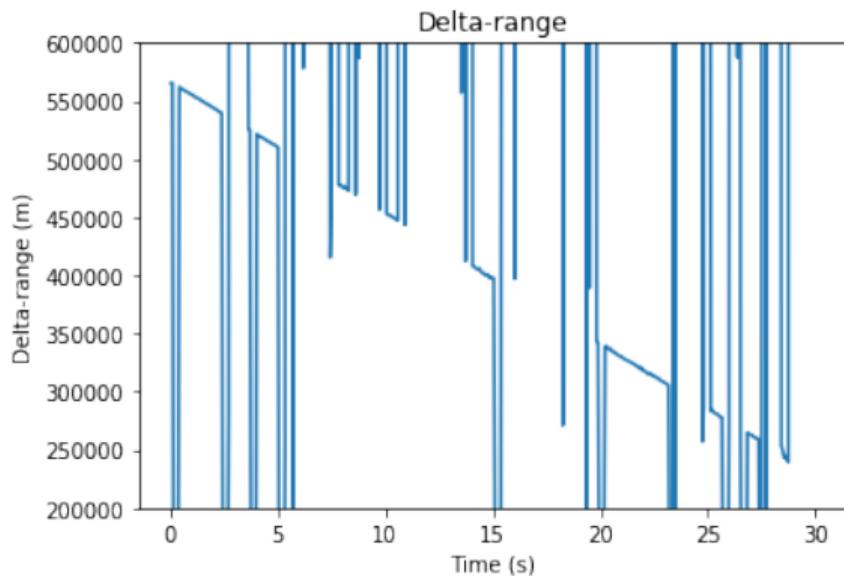
- Una o varias estaciones transmiten códigos de ranging a través del transpondedor (CDMA para varias estaciones)
- Tres o más estaciones reciben los códigos retransmitidos por el transpondedor
- Es necesaria sincronización temporal entre todos los transmisores y receptores. Fácil de obtener con GPS
- Con las medidas de tres o más estaciones se puede calcular la posición y velocidad del satélite
- Adaptar el baudrate del código de ranging al ancho de banda del transpondedor (20kHz a 100kHz)

- Realizar mediciones reales a través de algún satélite. Candidato ideal: FO-29 (transpondedor de 100kHz)
- Las mediciones se pueden realizar usando una sola estación
- Procurar no interferir a otros usuarios, realizando el experimento en horas de baja actividad y ajustando la potencia de transmisión
- Se requiere un transmisor de banda ancha y a ser posible que permita ser sincronizado por GPS

Ranging pasivo oportunista: Amateur VLBI

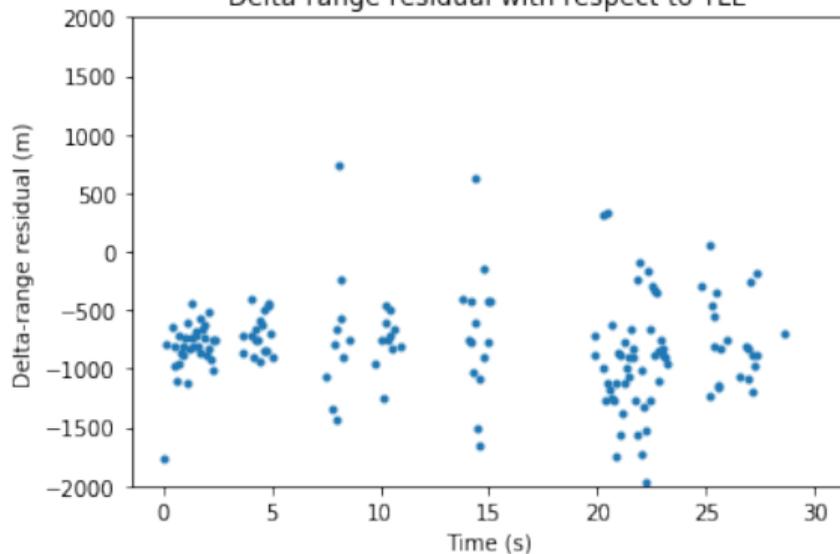
- Amateur VLBI: proyecto del Instituto de Tecnología de Harbin (China), de cara a la misión lunar DSLWP
- Grabaciones sincronizadas de la señal de telemetría desde distintas estaciones de tierra
- Experimento con LilacSat-2, grabado desde Harbin y Chongqing (2500km de distancia)
- Colaboración con Wei Mingchuan BG2BHC, de Harbin
- Señal GMSK 4800baud en 437.225MHz
- Medidas naturales: delta-rango y delta-velocidad
- Se han obtenido buenos resultados

Medidas de LilacSat-2

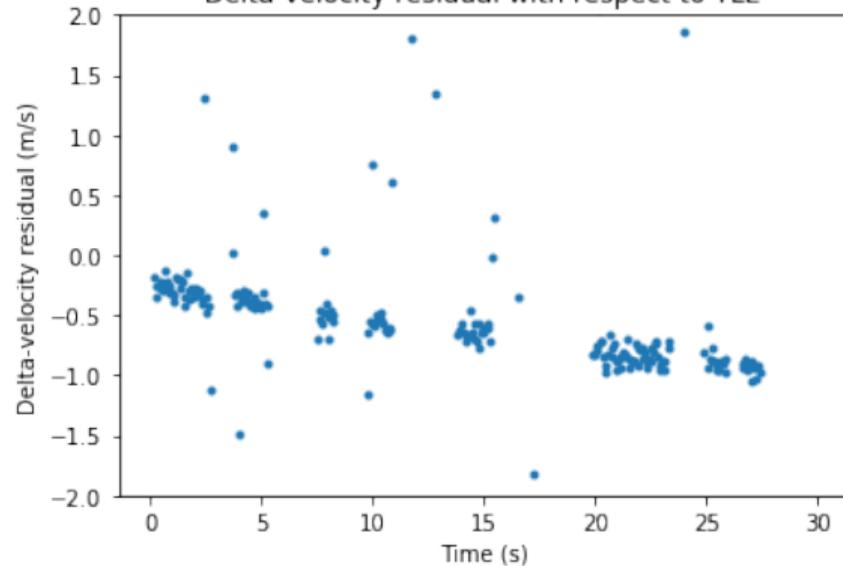


Comparativa con los TLEs

Delta-range residual with respect to TLE



Delta-velocity residual with respect to TLE



- <https://github.com/bg2bhc/amateur-vlbi>
- <http://destevez.net/2018/03/amateur-vlbi-experiment-with-lilacsat-2/>
- <http://destevez.net/2018/03/improved-signal-processing-for-lilacsat-2-vlbi/>