

# Decodificación de satélites digitales

Dr. Daniel Estévez  
EA4GPZ / M0HXM

16 de septiembre de 2017  
III Iberradio, Ávila

# Satélites digitales en las bandas de Aficionados

- Actualmente más de 100 satélites transmiten en nuestras bandas.
- Los más populares incorporan un transpondedor lineal (AO-7, FO-29, FUNcube, XW-2) o repetidor FM (SO-50, AO-85, LilacSat-2). Permiten hacer QSOs.
- La mayoría sólo transmiten datos de telemetría. Realizan misiones educativas, científicas o experimentales y pertenecen a grupos de Radioaficionados, centros educativos y entidades privadas.
- Todavía se transmite mucha telemetría en CW. Muy fácil de implementar y recibir, pero poco volumen de datos.
- El resto de telemetría se transmite en diversos modos digitales.
- Últimamente no es sólo telemetría: también voz digital e imágenes.
- Una nueva posibilidad: Telecomando abierto. Controlar una cámara a bordo de un satélite para tomar y descargar imágenes.

# Origen de gr-satellites

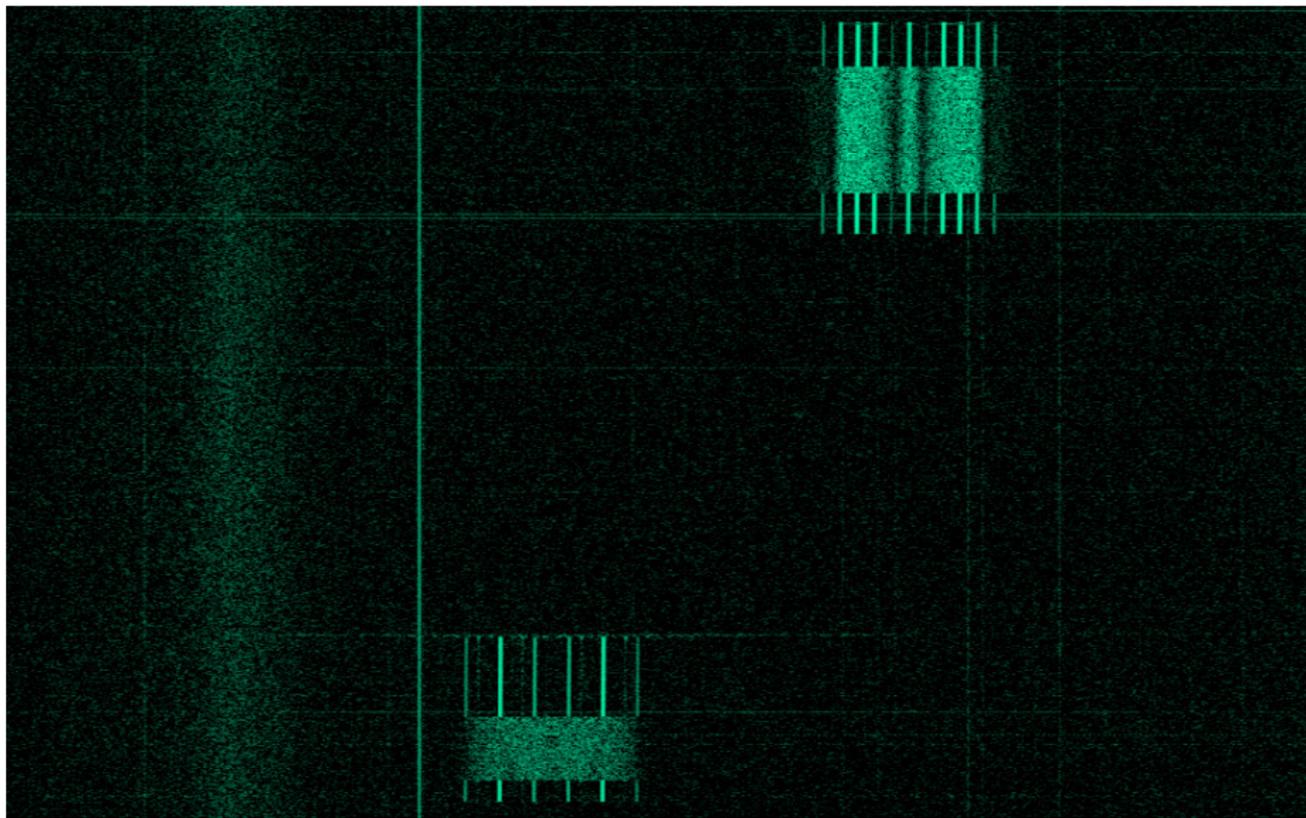
- Mucha telemetría digital se transmite usando packet radio: 1k2 AFSK AX.25, 9k6 FSK AX.25, incluso 19k2 FSK AX.25. Diversos programas para decodificar (ej: Direwolf).
- Para otros modos, hay poco o ningún software disponible (salvo FUNcube y FOX-1).
- Los Radioaficionados no podemos usar cifrado: cualquiera debe poder escuchar nuestras transmisiones. Cualquiera debería poder decodificar los satélites que transmiten en las bandas de Aficionados.
- Desde otoño de 2015 me he interesado en programar decodificadores para estos satélites. No es fácil: muchas veces se publican especificaciones incompletas de los modos.
- El resultado: **gr-satellites**, una colección de decodificadores en GNU Radio que actualmente soporta 30 satélites distintos.

- Software open-source (GPLv3). Repositorio Github  
<https://github.com/daniestevez/gr-satellites>
- Soporta multitud de modos, incluyendo transceivers NanoCom U482C y AX100 de GOMspace, stack CCSDS usado por satélites de Harbin (China) y BPSK AX.25.
- Bloques de construcción para crear rápidamente decodificadores para nuevos satélites.
- 41 bloques de GNU Radio. La mayoría en Python. Algunos en C++.
- Soporta envío de telemetría al servidor de SatNOGS.
- Desde mayo 2017, incluye una colección de grabaciones de muestra de diversos satélites, para probar los decodificadores. Actualmente 27. Necesitamos más grabaciones.
- Mucha más información en mi blog <http://destevez.net/>

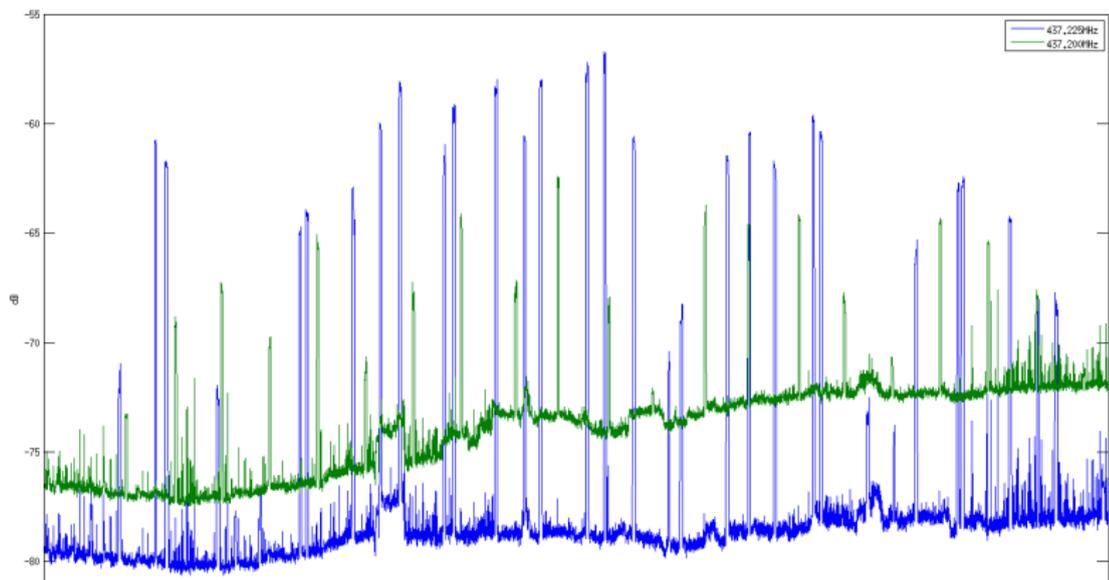
La historia de gr-satellites. . .

. . . y de los satélites que soporta

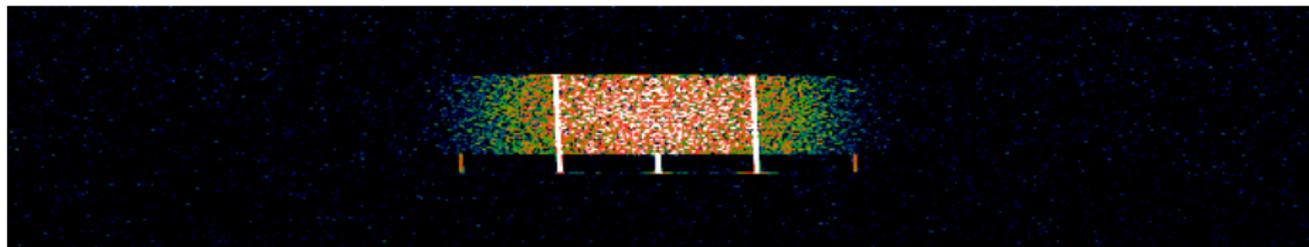
- Creado por el Instituto de Tecnología de Harbin (HIT), China, responsable Wei BG2BHC.
- Lanzado el 19 de septiembre de 2015, junto con los XW-2 y CAS-3.
- Telemetría 9k6 BPSK y 4k8 GMSK en dos frecuencias distintas. Usa dos radios distintas (SDR y hardware) y dos polarizaciones circulares complementarias en la misma antena turnstile.
- Usa stack CCSDS. FEC (corrección de errores) con código convolucional y Reed-Solomon. Usa CSP. Incorpora un repetidor FM usando SDR (también se ha usado como transpondedor lineal brevemente).
- Sistema sofisticado y novedoso para un satélite de Radioaficionados.
- BG2BHC publica un decodificador GNU Radio  
<https://github.com/bg2bhc/gr-lilacsat>
- En noviembre de 2015 empiezo a estudiar y mejorar este decodificador.



# Estudio de la potencia del downlink de LilacSat-2



- Creado por la universidad de Aalborg (Dinamarca).
- Lanzado el 25 de abril de 2016 junto con OUFTI-1 (D-STAR) y e-st@r-II. Al día siguiente, grabo su señal e intento decodificarla.
- 2k4 FSK. Especificaciones del formato de trama disponibles.
- El equipo del AAUSAT-4 había publicado un bloque GNU Radio con el decodificador FEC (usa código convolucional y Reed-Solomon).
- Lo integro en un flowgraph GNU Radio y soy el primer Radioaficionado en decodificar AAUSAT-4.
- Usa el protocolo CSP.



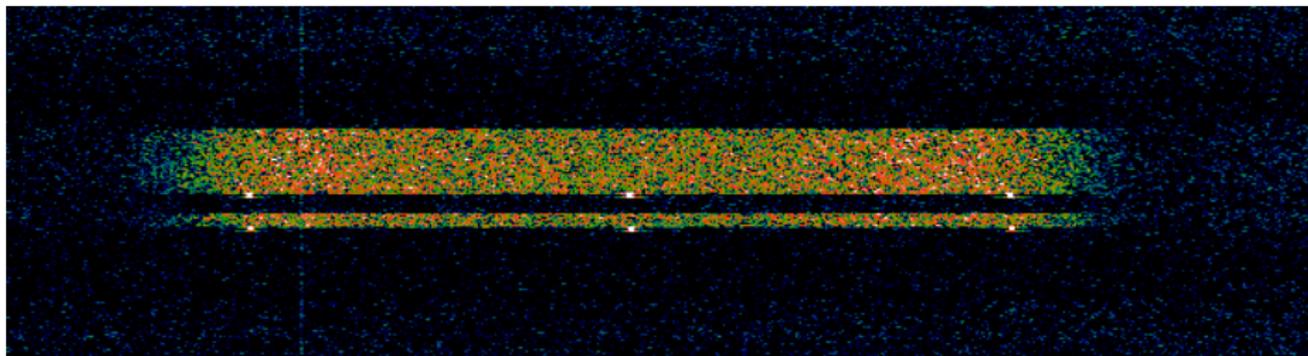
COM:

Boot count: 4  
Packets received: 62  
Packets send: 556  
Latest rssi: -91  
Latest bit corrections: 24  
Latest byte corrections: 0

EPS:

Boot count: 3  
Up time: 21382 seconds  
Real time clock: 2016-04-26 07:46:00  
Battery voltage: 7920 mV  
Cell difference: 40.0 mV  
Battery current: 190 mA  
Solar power: 40  
Temperature: 15 C  
PA temperature: 17 C

- Creado por GOMspace (empresa surgida en la universidad de Aalborg).
- Lanzado el 5 de octubre de 2015 desde la ISS. Reentró el 18 de octubre de 2016.
- 19k2 FSK, CSP. Incorpora un receptor ADS-B SDR. Transmite los datos ADS-B con la telemetría.
- Mike DK3WN me muestra un decodificador publicado por GOMspace.
- Estudio y uso el decodificador, pero no conocemos el formato de la telemetría.



```
* MESSAGE DEBUG PRINT PDU VERBOSE *
```

```
pdu_length = 28
```

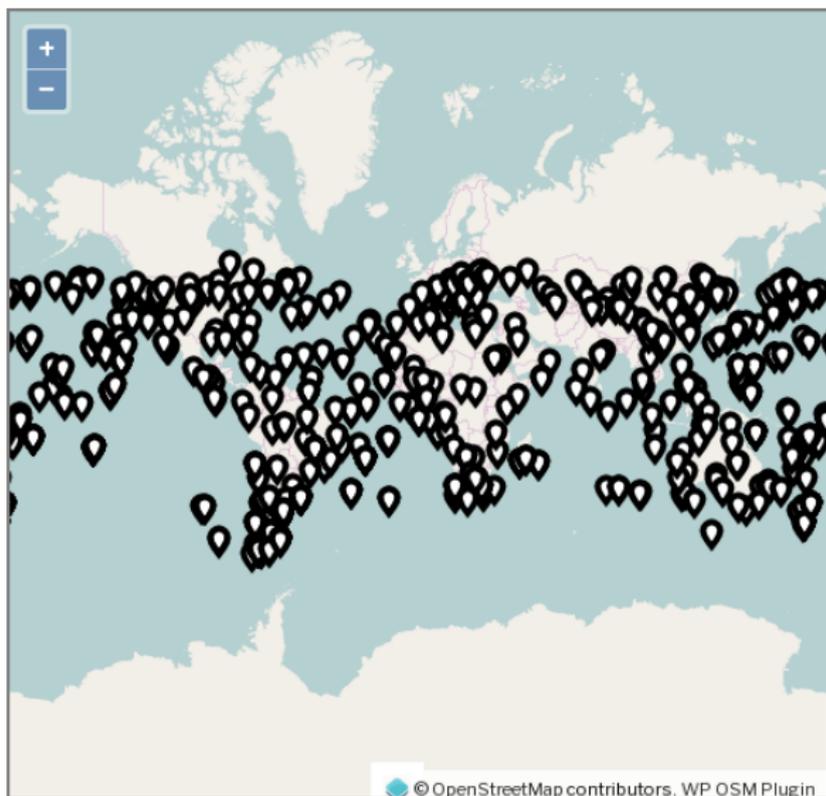
```
contents =
```

```
0000: 01 01 af 8a 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0a 0b
```

```
0010: 0c 0d 0e 0f 10 11 12 13 cc 79 eb e6
```

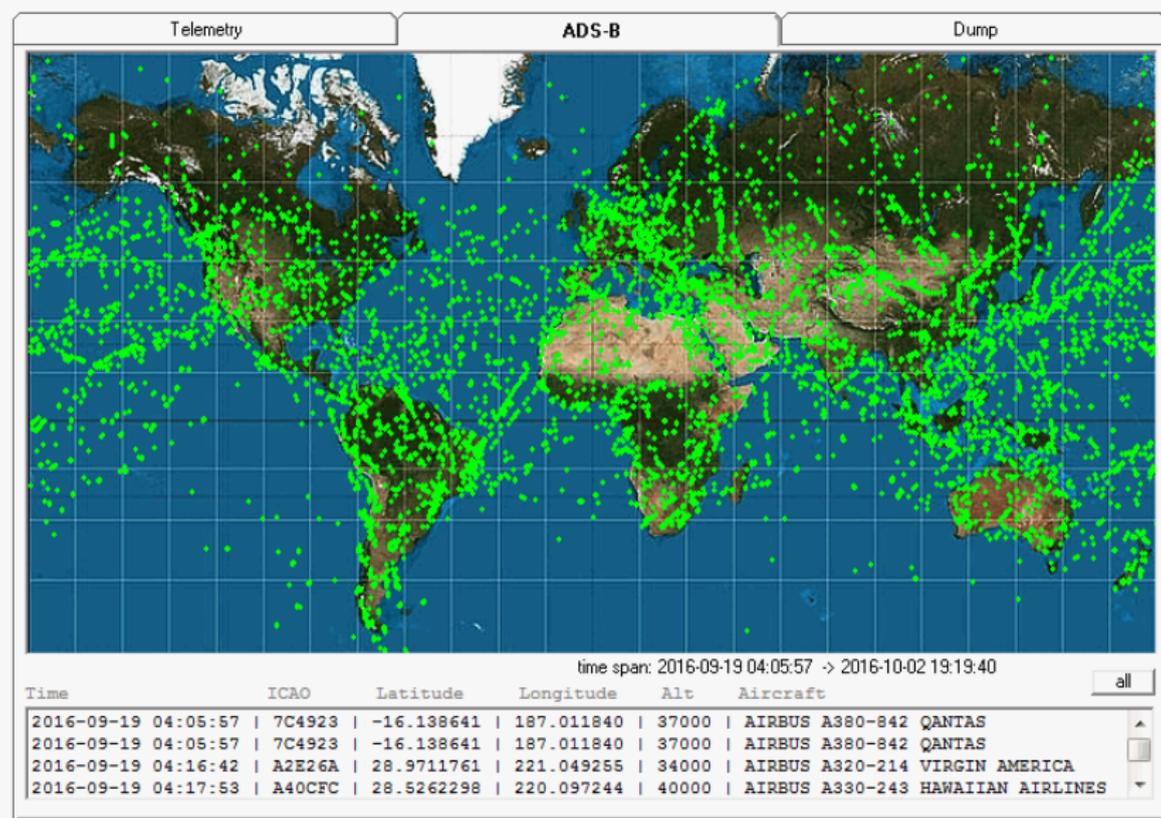
- Estudio el protocolo CSP y unas especificaciones antiguas e incompletas del formato de telemetría.
- Haciendo ingeniería inversa logro averiguar cómo se transmiten los datos ADS-B y creo un decodificador.
- El primer ADS-B decodificado es de VH-VFN, un A320-232 de JetStar Airways cubriendo el vuelo Sydney-Auckland a las 10:00 UTC del domingo 8 de mayo de 2016. La grabación la realicé desde Madrid durante el concurso V-UHF.
- GOMX-3 usa la radio NanoCom AX100 de GOMspace, que ha resultado muy popular en cubesats, por lo que el decodificador sirve para otros satélites.

## Exportador de datos ADS-B a KML



# Más mapas disponibles en la web de DK3WN

<http://www.dk3wn.info/p/?p=75628>



Latitude (°)

- Junio 2016. ÑuSat-1 y -2 (ÑuSat-1 incorpora el LUSEX). 40k FSK. Ningún conocimiento previo. Hago ingeniería inversa del formato de tramas. Hasta agosto de 2017 el equipo no proporcionó más detalles.
- Agosto 2016. 3CAT-2, creado por la UPC. 9k6 BPSK AX.25. Decodifico la telemetría y observo que envía los datos en ASCII. Más tarde el equipo publica las especificaciones del formato y creo un decodificador de telemetría.
- Agosto 2016. Decido crear gr-satellites, integrando todos mis experimentos con decodificadores de satélites, para unificar el trabajo y hacerlo más fácil de usar.
- Septiembre 2016. BEESAT-1, -2 y -4, creados por la TU Berlín. Usan el protocolo MOBITEX-NX, y la TUB publica un decodificador GNU Radio en agosto. Estudio el protocolo y decodificador y contribuyo algunas mejoras en el decodificador de FEC.

- Creado por GOMspace y lanzado el 21 de noviembre de 2013.
- Integra un receptor ADS-B como GOMX-3.
- En marzo de 2015 había intentado decodificarlo, pero las especificaciones disponibles eran muy vagas y GOMspace indicaba usar un receptor hardware muy caro. Decido intentarlo de nuevo, ya que GOMX-3 reentraría pronto.
- Consigo hacer ingeniería inversa de la modulación, salvo el código Golay usado como FEC de la cabecera del mensaje. El formato de telemetría está publicado por el equipo.
- Vuelvo a mi grabación de marzo de 2015 y...

Timestamp: 2015-03-31 20:57:01

Flags: 0x79

Beacon A:

OBC:

Boot count: 573  
Board temp 1: -6.0°C  
Board temp 2: -4.0°C  
Panel temps: [0.0, -28.5, -26.75, -13.25, -28.25, -20.0]°C

COM:

Bytes corrected by RS: 187  
RX packets: 55  
RX errors: 35  
TX packets: 4633  
Last temp A: -2°C  
Last temp B: -3°C  
Last RSSI: -106dBm  
Last RF error: -10840Hz  
Last battery voltage: 8.42V  
Last TX current: 848mA  
Boot count: 1104

EPS:

Boost converter voltages: [5.837, 5.82, 0.0]V  
Battery voltage: 8.251V  
Current out: 4, 2, 146, 30, 7, 0mA  
Current in: 81, 438, 0mA  
Boost converter current: 308mA  
Battery current: 184mA  
Temperature sensors: -4, -3, -4, -4, -1, -2°C  
Output status: 0x1c  
EPS reboots: 81  
WDT I2C reboots: 42  
WDT GND reboots: 28  
Boot cause: 8  
Latchups: 0, 0, 0, 0, 0, 0  
Battery mode: invalid mode 4

GATOSS:

Average FPS 5min: 0  
Average FPS 1min: 0  
Average FPS 10sec: 0  
Plane count: 0  
Frame count: 0  
Last ICAO: 0x0  
Last timestamp: 1970-01-01 00:00:00  
Last latitude: 0.0  
Last longitude: 0.0  
Last altitude: 0ft  
CRC corrected: 0  
Boot count: 0  
Boot cause: 0

HUB:

Temp: -8°C  
Boot count: 124  
Reset cause: 2  
Switch status: 0xfc  
Burn tries: 0, 0

ADCS:

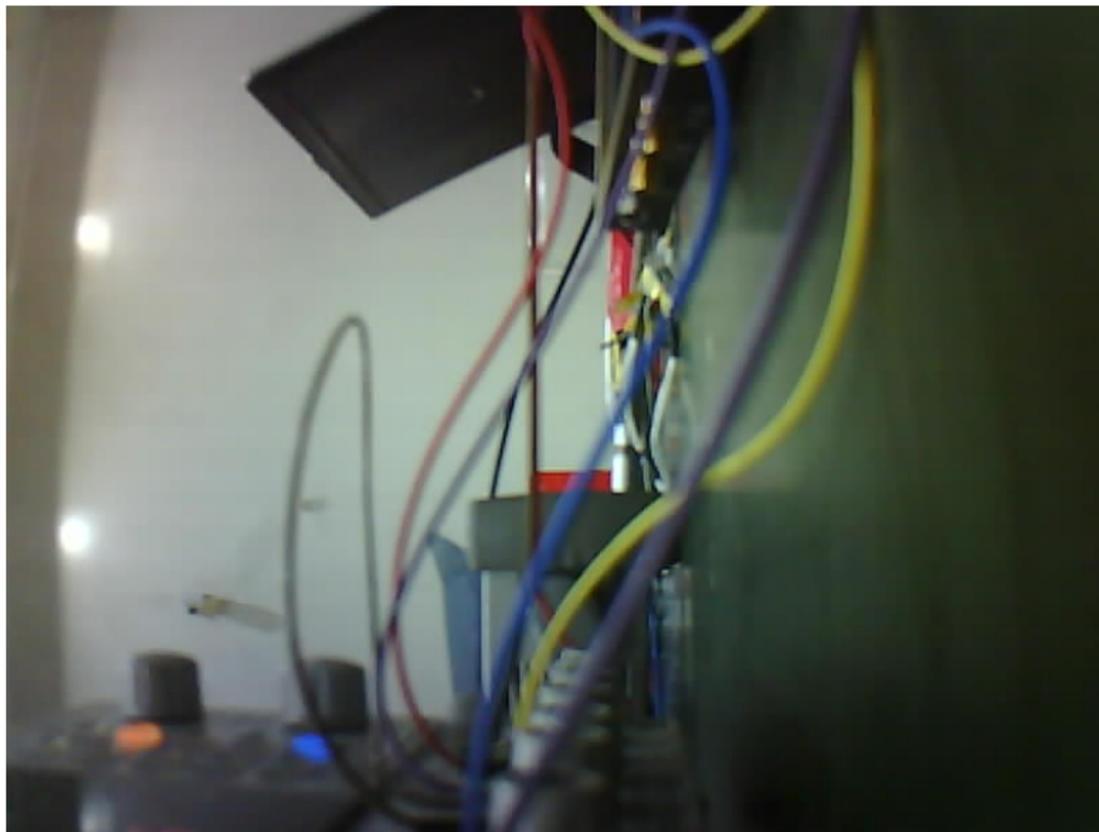
Tumble rate: -0.652618408203125, -3.70880126953125, 0.2416229248046875  
Tumble norm: 3.9943442344665527, 0.5196681618690491  
Magnetometer: -344.3216247558594, 178.07089233398438, -84.8233642578125  
Status: 0x3  
Torquer duty: 85.0, 85.0, -85.0  
ADS state: 0x22  
ACS state: 0x22  
Sun sensor: 4, 5, 77, 110, 4, 0, 2, 0

- Desafortunadamente el receptor de ADS-B (GATOSS) ya no estaba activo, y no ha vuelto a estarlo.
- Más tarde Andy UZ7HO consiguió hacer ingeniería inversa del código Golay. Publico un decodificador open-source para este código.
- GOMX-1 usa la radio NanoCom U482C de GOMspace, muy usada en cubesats. El decodificador es útil para otros satélites.

- Satélite Chino lanzado en un vuelo de prueba (pero quedó en una órbita de 1000km x 500km por un fallo en el lanzamiento). Unido con CAS-2T (repetidor FM que nunca funcionó) a la superior del cohete. Ha estado activo poco tiempo.
- Ningún detalle disponible. Modulación 20k FSK. Consigo hacer ingeniería inversa del FEC, pero me faltan algunos detalles.
- En enero de 2017, un miembro del equipo me da algunas indicaciones y consigo decodificarlo completamente, aunque no tenemos el formato de la telemetría.
- Usa CSP.

- Creado por el Instituto de Tecnología de Harbin en colaboración con un colegio de Pekín. Lanzado el 28 de diciembre de 2016. Un fallo en el lanzamiento lo pone en una órbita de corta duración. Reentró el 18 de febrero de 2017.
- Incluye un donwlink de imágenes: tiene una cámara a bordo y transmite imágenes JPEG de 800x600 píxeles.
- 9k6 BPSK con stack CCSDS, con código convolucional pero sin Reed-Solomon. Usa CSP. Incorpora un repetidor FM.
- El 19 de diciembre, BG2BHC publica una grabación pre-lanzamiento y un decodificador GNU Radio.
- El receptor de imágenes es de código cerrado. Con un poco de ingeniería inversa y un poco de especificaciones dadas por BG2BHC, publico un receptor de imágenes mejorado y open-source.
- El receptor de imágenes funciona en tiempo real. La imagen se va mostrando según se recibe.

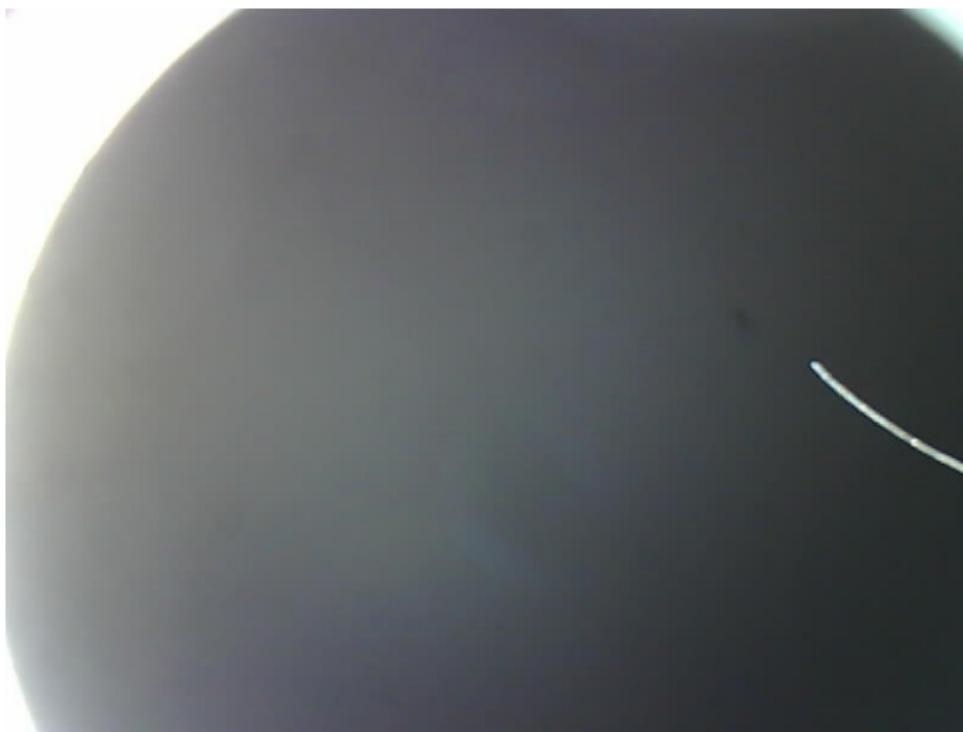
## Imagen en la grabación pre-lanzamiento



No es fácil recibir imágenes JPEG desde el espacio. Un sólo error destroza toda la imagen. Primera imagen recibida en órbita el 28 de diciembre, decodificada de una grabacion de Tetsu JA0CAW después de mejorar el rendimiento del decodificador el 30 de diciembre.



La misma imagen recibida por Wei BG2BHC desde la estación de tierra del HIT



- El 4 de enero, Wei BG2BHC habilita el telecomando abierto y publica grabaciones de los comandos para operar la cámara.
- Cualquier Radioaficionado puede operar remotamente la cámara de BY70-1, tomando imágenes y descargándolas.
- El 6 de enero, publico un análisis de las grabaciones y una herramienta para generar los comandos. Se usa 1k AFSK AX.25, con tonos a 1000Hz y 1833.33Hz.

<http://destevez.net/2017/01/open-telecommand-for-by70-1/>

- Usar el telecomando y recibir las imágenes completas no es fácil. Comienza un esfuerzo colectivo para hacerlo colaborativamente y reparar las imágenes JPEG corruptas. Scott K4KDR y Bob N6RFM consiguen buenos resultados.

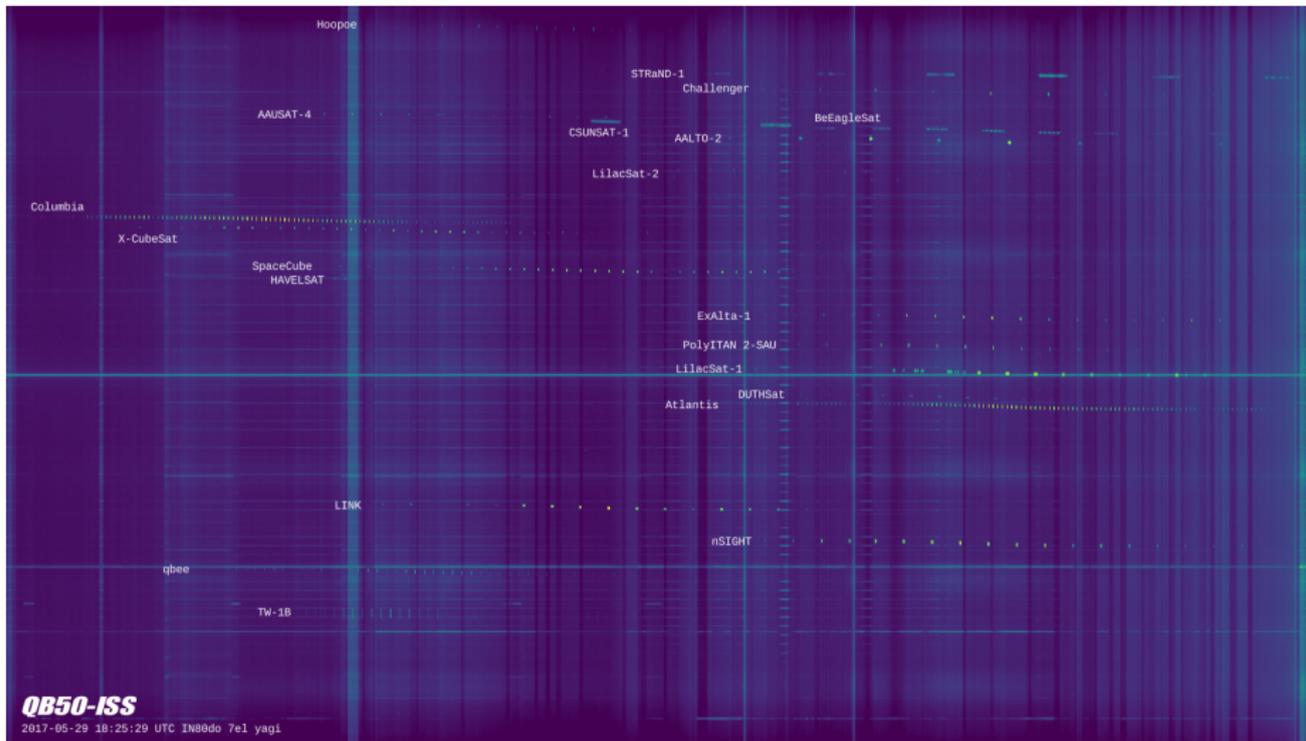
Foto tomada y descargada por Scott K4KDR y Bob N6RFM el 20 de enero de 2017



- Lamentablemente, BY70-1 duró sólo un mes y medio en órbita. . .
- . . . pero LilacSat-1, que está ahora en órbita, usa la misma tecnología, así que el esfuerzo por desarrollar el software no ha sido en vano.
- Hemos aprendido de algunos problemas de BY70-1: el downlink de imagen y telemetría no se podían usar simultáneamente al repetidor FM, pues usaban la misma radio y frecuencia.
- El downlink de imagen tenía preferencia, pero los usuarios del repetidor FM hacían QRM al telecomando abierto, pues los comandos se recibían por la frecuencia de entrada del repetidor FM.
- Fue prácticamente imposible usar el telecomando abierto en Europa, dada la gran popularidad del repetidor FM.

- Febrero 2017. Estudio el FEC de AO-40 y añado un decodificador para AO-73, UKube-1 y Nayif-1 a gr-satellites. El formato de la telemetría FUNcube es bastante complejo, y el decodificador de telemetría de gr-satellites no es 100 % completo, pues no hay especificaciones completas.
- Mayo 2017. Pieter N4IP publica una grabación de SDR de AO-40 hecha en 2003. La grabación incluye la baliza sin FEC. Estudio las especificaciones y añado un decodificador a gr-satellites.

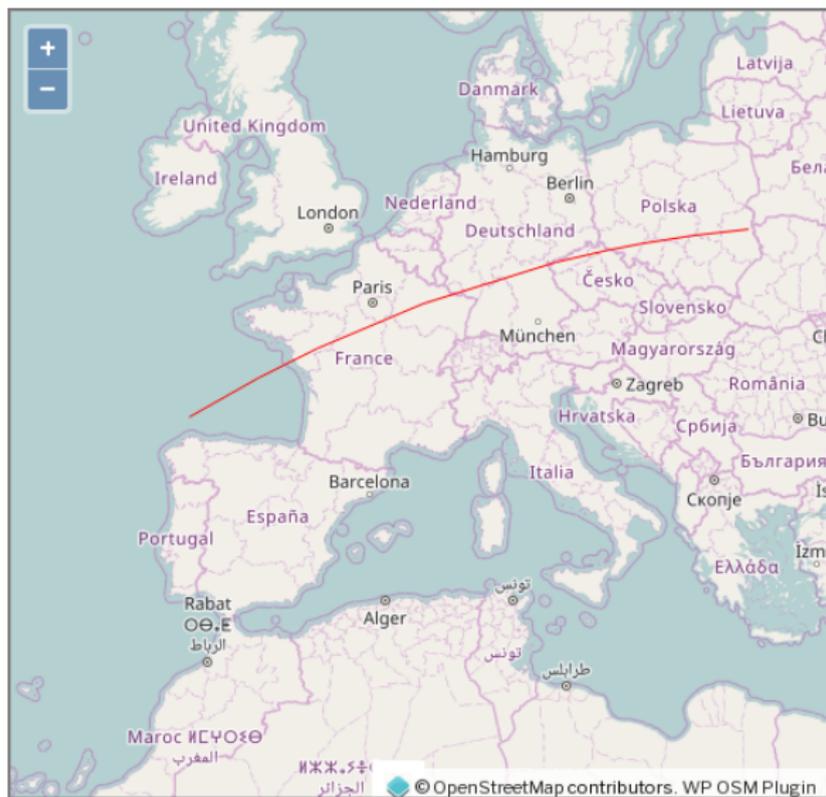
- Constelación de 36 satélites producidos por diversas universidades para estudiar la termosfera. Proyecto del Instituto von Karman de dinámica de fluidos.
- Todos transmiten telemetría en las bandas de Aficionados (principalmente 70cm y 13cm).
- 28 de ellos lanzados desde la ISS a finales de mayo. Algunos no llegaron a funcionar.
- El 29 de mayo, después de que todos hayan sido lanzados, hago una grabación de un pase de la ISS con el LimeSDR. La grabación cubre los 3MHz de la banda de satélites en 70cm (435-438MHz).
- 21 satélites están presentes en la grabación. Creo decodificadores para algunos de ellos.
- Todos los que producen telemetría digital válida pueden ser decodificados con Direwolf (si usan packet radio AFSK/FSK) o gr-satellites.



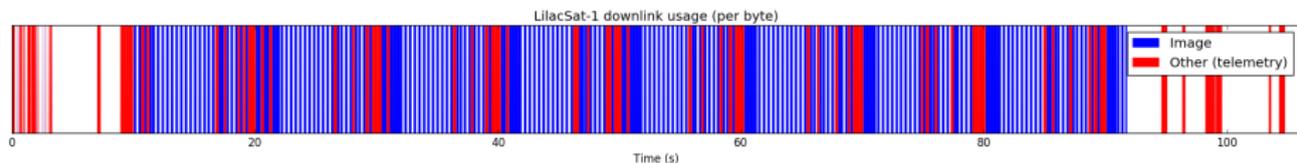
- Satélite del Instituto de Tecnología de Harbin para el proyecto QB50.
- Una evolución de la tecnología de LilacSat-2 y BY70-1.
- Incorpora un repetidor FM/Codec-2. Es un concepto muy novedoso.
- Codec-2 es un codec de voz digital open-source y libre de patentes usado en FreeDV. En 1300bps consigue una calidad de voz aceptable, comparable al codec AMBE patentado usado en D-STAR, System Fusion y DMR.
- 9k6 BPSK con stack CCSDS y CSP, igual que BY70-1.
- Incorpora un downlink de imagen con telecomando abierto, igual que BY70-1.
- El downlink Codec-2 y el downlink de imagen/telemetría están multiplexados. Se pueden usar simultáneamente.
- gr-satellites incluye un decodificador mejorado de baja latencia.

# Grabación del downlink Codec-2 y demo del downlink de imagen

# Decodificador de telemetría GPS a KML



## Estudio del uso del downlink de LilacSat-1 (25 de junio)



- Junio 2017. Añadido decodificador Viterbi al decodificador de U482C. Permite decodificar los satélites QB50 INSPIRE-2 y UNSW-EC0.
- Junio 2017. Añadido decodificador para el satélite QB50 PEGASUS, que usa el protocolo TT-64. El decodificador Reed-Solomon (64,48) se implementó después, en agosto.
- Julio 2017. Estudio del BER (bit error rate) de los decodificadores, en colaboración con David Rowe VK5DGR. Trabajo en progreso.
- Agosto 2017. Añadido decodificador de imágenes para el satélite D-SAT.
- Agosto 2017. Obtenidas especificaciones del equipo de ÑuSat y añadido decodificador para ÑuSat.

# Una mirada al futuro: la misión lunar DSLWP

- DSLWP es un satélite de Radioaficionados en órbita lunar previsto para finales de 2018.
- Proyecto del Instituto de Tecnología de Harbin, liderado por Wei BG2BHC.
- David VK5DGR y yo estamos colaborando en el diseño de las comunicaciones digitales.
- Incluirá una cámara con telecomando abierto, pero el modem es muy distinto a los satélites de baja órbita terrestre del HIT. Las pérdidas por espacio libre desde la luna son grandes.
- Se propone un modem coherente GMSK a 250baud y un código turbo con  $r = 1/2$ .
- Usará SSDV en lugar de JPEG. SSDV se utiliza en globos de alta altitud y es resistente a pérdidas de paquetes.
- Decodificador preliminar disponible en gr-satellites, junto con señal de prueba <http://destevez.net/2017/07/a-first-look-at-dslwp-ssdv-downlink/>

## Imagen SSDV 640x480 en la señal de prueba generada por BG2BHC



Se tarda 32 minutos en transmitir esta imagen. Lleva mucho tiempo transmitir datos a 125bps desde la luna.

- Es necesario disponer de decodificadores open-source para todos los modos que se utilicen en las bandas de Aficionados.
- Gracias a gr-satellites, ahora esto está más cerca de ser una realidad en el caso de los satélites.
- Un conocimiento de los modos digitales es necesario para los Radioaficionados del siglo XXI.
- Los Radioaficionados deberían construir sus propios modos digitales igual que construyen sus propios equipos y antenas.
- GNU Radio es una herramienta muy útil para lograrlo.

**Agradecimientos:** Mike DK3WN, Jan PE0SAT, Scott K4KDR, Bob N6RFM, Wei BG2BHC, David VK5DGR.