

# Introducción a sistemas de comunicaciones para picosatélites

“Por favor no uséis AX.25”

Dr. Daniel Estévez

3 Marzo 2020

Curso de Picosatélites y Servicio de Radioaficionados por Satélite, ETSIT, UPM

- Trabajo en GMV (Tres Cantos), desarrollando receptores GNSS (GPS, Galileo, etc.)
- Radioaficionado: EA4GPZ / M0HXM
- Diversos proyectos personales sobre comunicaciones por radio y radio ciencia, muchos de ellos sobre satélites
- <http://destevez.net>
- Twitter @ea4gpz

- 1 **Introducción**
- 2 Modulación
- 3 Sincronización
- 4 Scrambling
- 5 Corrección de errores (FEC)
- 6 CRC
- 7 Protocolos de comunicaciones
- 8 Ejemplos

- Cualquier satélite requiere de un sistema de comunicaciones por radio para:
  - Telemetría
  - Telecomando
  - Detección/Determinación orbital
- Es un sistema crítico con la misma importancia/requisitos/seguridades que el de un satélite más grande
- Debe diseñarse e implementarse usando una solución técnica adecuada
- AX.25 es una elección muy popular, pero es tecnología anticuada llena de problemas. Imposible decodificar las tramas si la señal no se buena
- En esta charla se da un vistazo a las distintas técnicas que se pueden emplear para diseñar una solución robusta con tecnología actual

- d) About half of university small-satellite missions fail. The main causes are an inappropriate choice of communication system (often the 1980's AX.25 digital communications over narrow-band FM) and poor hardware component choices for space operation. The success rate of Radio Amateur satellite programs is not perfect, but is significantly higher than university programs. One important factor is continuity of the researchers. Researchers go on to other projects and students graduate and move on, while engineers often remain associated with Amateur Radio organizations for a lifetime.
- e) Amateurs have designed better systems which universities can use in their satellite programs, such as the digital satellite modem designed by Phil Karn KA9Q. Karn's design is much more reliable than the AX.25-over-narrow-band-FM communication systems often used by university satellite programs. It provides processing gain to facilitate a robust link power budget, and can survive signal fades approaching one minute long without data loss.

Fuente: Open Research Institute, comment on “Streamlining Licensing Procedures for Small Satellites”, <https://t.co/p7E49Q1SjX>

- 1 Introducción
- 2 Modulación**
- 3 Sincronización
- 4 Scrambling
- 5 Corrección de errores (FEC)
- 6 CRC
- 7 Protocolos de comunicaciones
- 8 Ejemplos

- La modulación define cómo se trasladan los símbolos a enviar (unos y ceros) a una señal RF
- Modulaciones más usuales en picosatélites:
  - BPSK. Los símbolos se transmiten como un cambio de  $180^\circ$  en la fase de la portadora.
  - FSK. Los símbolos se transmiten haciendo que la portadora salte entre dos frecuencias cercanas.
- Baudrate es la tasa a la que se envían los símbolos (símbolos por segundo). Su elección es un equilibrio entre velocidad de transmisión y potencia de transmisión requerida. Valores entre 1200 y 9600 baud son usuales.
- A la hora de evaluar la elección de una modulación, es importante estudiar el canal por el que van a transmitirse los datos

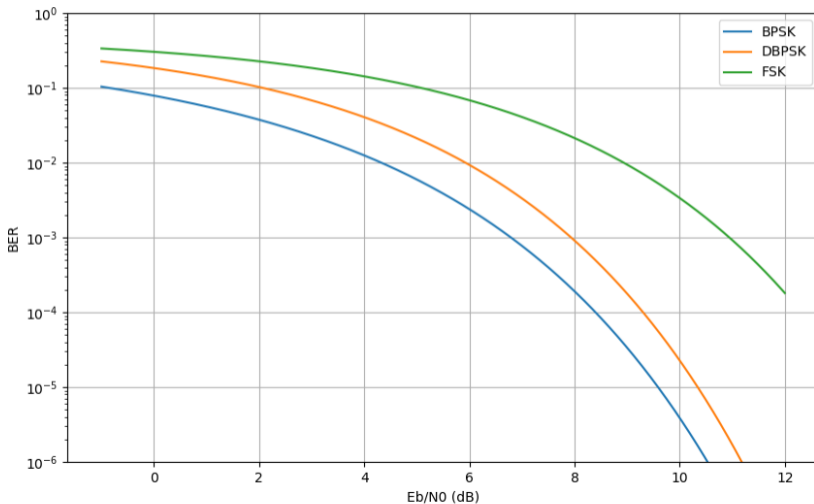
# Canal de propagación para picosatélites LEO

- Bandas usuales: 145MHz, 435MHz. Algunos 2.4GHz
- Propagación por línea directa. Pérdidas en espacio libre (300 a 2000km)
- No hay multipath
- El Doppler es significativo, pero suele corregirse por ordenador usando los TLEs
- Para las potencias de transmisión y antenas usuales, las señales en general son relativamente fuertes
- La mayoría de picosatélites no tienen sistema de ADCS o es muy sencillo. El satélite rota erráticamente. Fading y dificultad en el tracking de fase.



- BPSK es más sensible que FSK (menos errores al mismo SNR)
- La demodulación BPSK se ve afectada por cambios erráticos en la fase: se suele emplear BPSK diferencial (DBPSK)
- FSK no requiere codificación diferencial
- FSK es más sencillo de implementar en hardware: numerosos chips COTS de transceiver FSK

# BER para distintas modulaciones



# FSK, GFSK, MSK, GMSK...

- Con frecuencia se emplean los términos FSK, GFSK, MSK, GMSK...
- Es importante no confundirse: se refieren a cosas muy similares, la diferencia muchas veces no es demasiado relevante, y muchas veces los términos se emplean incorrectamente
- “G” significa “Gaussian”. Se refiere a que el filtro del pulso. Cualquier transmisor FSK emplea algún tipo de filtrado de pulso, generalmente Gaussiano. Usar un filtro adaptado en el receptor no es muy crítico.
- MSK se refiere a que la desviación es  $1/4$  del baudrate. Ésta es la desviación mínima que puede emplearse, por lo que MSK emplea menos ancho de banda que un FSK con desviación mayor.
- MSK puede recibirse coherentemente como OQPSK, pero no suele hacerse con picosatélites (cambios erráticos de fase)

- 1 Introducción
- 2 Modulación
- 3 Sincronización**
- 4 Scrambling
- 5 Corrección de errores (FEC)
- 6 CRC
- 7 Protocolos de comunicaciones
- 8 Ejemplos

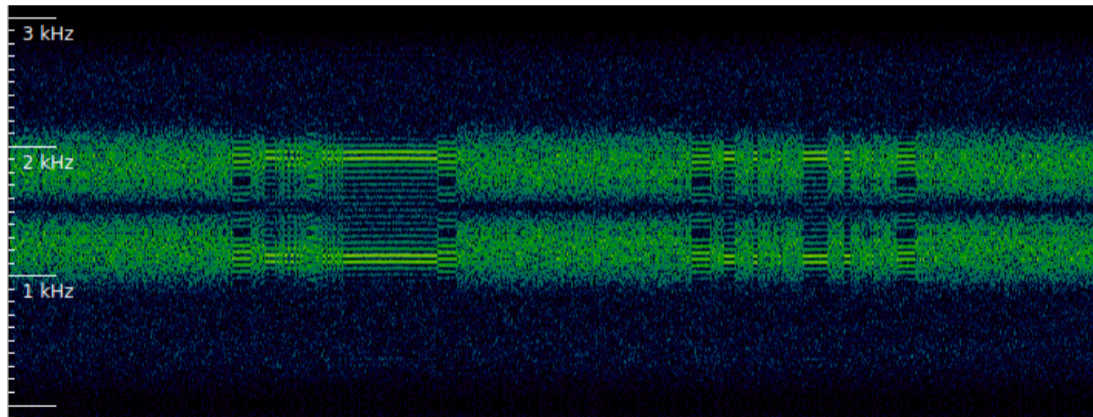
- Tras la demodulación obtenemos un stream de símbolos
- La sincronización consiste en averiguar el principio/alineación de los bytes o las tramas
- Suele realizarse insertando una secuencia de 16 o 32 bits (syncword) al principio de la trama. El receptor busca esta secuencia
- Es usual emplear el syncword (ASM) CCSDS  $0 \times 1ACFFC1D$
- Algunos chips transceiver FSK emplen su propio syncword. Es posible incorporarlo al protocolo o ignorarlo
- Utilizar un syncword más largo permite al receptor reconocerlo incluso si hay errores de bit. Cuidado con las detecciones falsas.

- 1 Introducción
- 2 Modulación
- 3 Sincronización
- 4 Scrambling**
- 5 Corrección de errores (FEC)
- 6 CRC
- 7 Protocolos de comunicaciones
- 8 Ejemplos

- Los datos a transmitir suelen tener estructura: largas cadenas de ceros, o partes que se repiten
- El scrambler sirve para romper esa estructura y obtener unos datos que parezcan aleatorios
- Esto es conveniente: evita la aparición de líneas espectrales, ayuda en la recuperación de reloj, etc
- “Any sufficiently advanced communication scheme is indistinguishable from noise” – Phil Karn KA9Q

# Ejemplo de scrambling

Baliza QO-100. BPSK 400 baud con código Manchester. Tramas con scrambling y tramas sin scrambling.

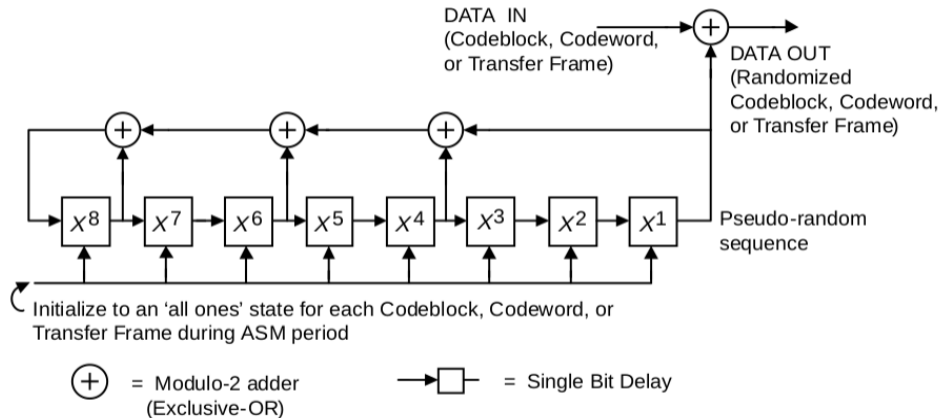




# Scrambling síncrono vs. scrambling asíncrono

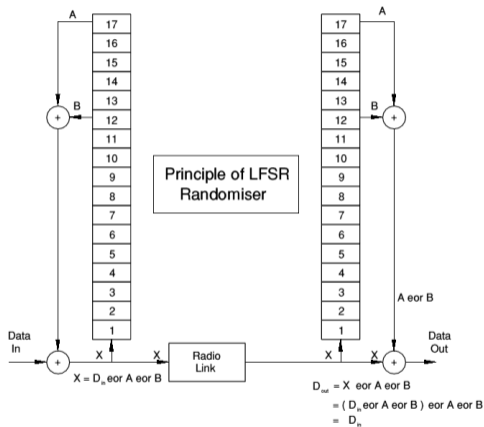
- Existen dos arquitecturas de scramblers
- Scrambling síncrono (aditivo): se realiza independientemente sobre cada trama. El transmisor y receptor reinician el scrambler al principio de cada trama.
- Scrambling asíncrono (multiplicativo): se realiza sobre todo el stream de datos. No requiere sincronización entre transmisor y receptor. El receptor realiza el descrambling antes de buscar el syncword.
- Scrambler síncrono más usual: CCSDS
- Scrambler asíncrono más usual: G3RUH
- Cada arquitectura tiene sus ventajas e inconvenientes

# Scrambler CCSDS



Fuente: CCSDS TM Synchronization and Channel Coding Blue Book

# Scrambler G3RUH



Fuente: James Miller G3RUH, 9600 Baud Packet Radio Modem Design

- 1 Introducción
- 2 Modulación
- 3 Sincronización
- 4 Scrambling
- 5 Corrección de errores (FEC)**
- 6 CRC
- 7 Protocolos de comunicaciones
- 8 Ejemplos

# FEC (Forward Error Correction)

- FEC es un mecanismo para que el receptor repare los errores de símbolo que ocurren en la comunicación
- Se envía información redundante. El receptor puede recuperar la trama original, incluso si algunos símbolos están corruptos
- En la práctica, van a ocurrir errores de símbolo (bajo SNR, fading...). Es imprescindible usar FEC
- Tipos de FEC:
  - Reed-Solomon
  - Códigos convolucionales
  - Códigos Turbo
  - LDPC
  - Otros...

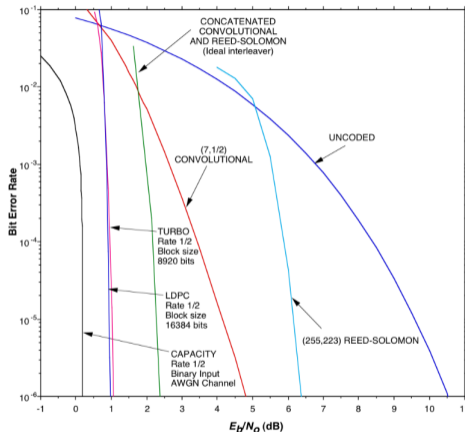
- Generalmente operan por bytes (trabajan en  $GF(2^8)$ )
- Se especifica como código Reed-Solomon  $(n, k)$ . Un mensaje de  $k$  bytes se codifica usando  $n$  bytes. Se pueden corregir hasta  $(n - k)/2$  bytes erróneos.
- Código más usual: Reed-Solomon (255,223) CCSDS (CCSDS TM Synchronization and Coding Blue Book, Section 4). También se usan otros códigos similares.
- Se puede utilizar como código acortado  $(k + 32, k)$ , con  $k \leq 223$
- Atención: hay dos elecciones para la “base” del código, la convencional y la dual.

- Se decodifican con el algoritmo de Viterbi
- Código más usual: CCSDS  $r = 1/2$ ,  $k = 7$ , (CCSDS TM Synchronization and Coding Blue Book, Section 3). Atención, dos convenciones: CCSDS/NASA-GSFC y NASA-DSN.
- Por cada bit se transmiten 2 bits
- Puede corregir muchos errores de bit, pero falla con ráfagas de errores. A veces se usa interleaving (entrelazado), para romper las ráfagas de errores
- Se puede realizar en modo streaming (sobre todos los símbolos transmitidos) o independientemente por cada trama
- Suele emplearse junto con Reed-Solomon

- Son código del estado del arte. Ofrecen mejor performance que código convolucional + Reed-Solomon, pero son más complejos
- El CCSDS TM Synchronization and Channel Coding Blue Book describe unos códigos Turbo y LDPC para emplear en aplicaciones espaciales
- No son muy usados en picosatélites



# Comparativa de FECs CCSDS



Fuente: CCSDS TM Synchronization and Channel Coding Green Book

- 1 Introducción
- 2 Modulación
- 3 Sincronización
- 4 Scrambling
- 5 Corrección de errores (FEC)
- 6 CRC**
- 7 Protocolos de comunicaciones
- 8 Ejemplos

- En general, es usual y recomendable emplear algún tipo de CRC en cada trama para comprobar si hay errores no corregidos por el FEC
- Hay un gran número de variantes de CRCs. Herramientas útiles:  
`http://www.sunshine2k.de/coding/javascript/crc/crc\_js.html` y  
`pycrc`
- Para especificar un CRC completamente debe darse la longitud, el polinomio, el XOR de entrada, el XOR de salida, el orden de bits de entrada y el orden de bits de salida
- Son usuales CRC-16CCITT (AX.25), CRC-32C (CSP)
- Usar un CRC de 16 bits puede producir demasiados falsos positivos
- No es estrictamente necesario emplear CRC si se usa Reed-Solomon, ya que produce un número bajo de decodificaciones falsas

- 1 Introducción
- 2 Modulación
- 3 Sincronización
- 4 Scrambling
- 5 Corrección de errores (FEC)
- 6 CRC
- 7 Protocolos de comunicaciones**
- 8 Ejemplos

- Las tramas que se envían pueden usar distintos protocolos de comunicaciones:
  - Protocolo ad-hoc: se codifican los datos específicos de la misión en un formato custom. No suele haber cabeceras
  - Tramas AX.25. Contiene el identificativo del transmisor y receptor. Se suelen usar tramas UI
  - CSP (Cubesat Space Protocol). Contiene direcciones y puertos de origen y destino. Es un protocolo para todo el bus del satélite.
  - Protocolos CCSDS: TM Space Data Link, TC Space Data Link, Space Packet
  - ECSS PUS (packet utilization standard)
- Recordatorio: en el Servicio de Aficionados por Satélite es obligatorio identificar las transmisiones
- Puede ser útil identificar distintos puertos/servicios/tipos de paquete
- A veces es necesario realizar la fragmentación de paquetes. Los protocolos CCSDS Space Data Link tienen soporte para fragmentación.

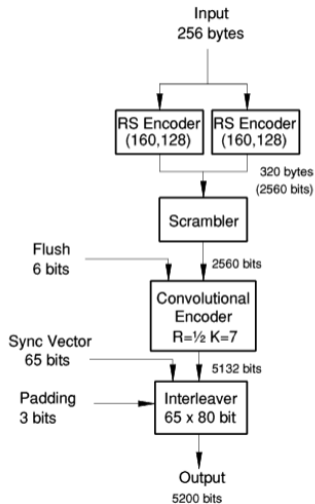
- 1 Introducción
- 2 Modulación
- 3 Sincronización
- 4 Scrambling
- 5 Corrección de errores (FEC)
- 6 CRC
- 7 Protocolos de comunicaciones
- 8 Ejemplos**

- Es un protocolo de los años 80 empleado para “packet radio” por Radioaficionados
- Existe en dos variantes principales 1k2 AFSK (tradicional) y 9k6 FSK (“alta” velocidad)
- En picosatélites también se emplea BPSK y tasas 2k4, 4k8, 19k2
- Utiliza codificación diferencial (NRZ-I), incluso en FSK
- No usa FEC
- Usa CRC-16CCIT
- Utiliza el protocolo HDLC para la codificación de línea y sincronización
- En 1k2 no se utiliza scrambler. En 9k6 se utiliza el scrambler asíncrono G3RUH
- HDLC incluye elementos “extraños” como el bit-stuffing y el orden LSB de los bytes
- Es difícil añadir un FEC de manera correcta sobre AX.25. La mejor solución es FX.25, que no es muy usado

- Desarrollado por Phil Karn KA9Q en 2002 para la baliza de AO-40
- Empleado por los satélites FUNcube de AMSAT-UK, así como SMOG-P y ATL-1 de Univ. Tecnología y Economía de Budapest, y la baliza de QO-100
- Utiliza DBPSK Manchester 400 baud en AO-40 y QO-100, 1k2 DBPSK en FunCUBE, FSK en SMOG-P y ATL-1
- La sincronización es mediante una syncword distribuida de 65 bits
- Usa scrambler síncrono CCSDS
- Usa código convolucional CCSDS  $r = 1/2$ ,  $k = 7$  y código Reed-Solomon CCSDS (160, 128)
- Usa interleaving
- Las tramas son de 256 bytes, codificados como 5200 símbolos
- Referencias: Phil Karn KA9Q, Proposed Coded AO-40 Telemetry Format; James Miller G3RUH, Oscar-40 FEC Telemetry



# Protocolo FEC AO-40



- Definido en el TM Synchronization and Channel Coding Blue Book
- Empleados en multitud de misiones de satélites, incluyendo espacio profundo
- En picosatélites, empleados por los satélites de la Univ. de Harbin (China) (LilacSat-1 y 2, BY70-1) y otros
- Puede usarse codificación diferencial de manera opcional (conveniente para BPSK)
- Se usa código convolucional en streaming
- Para la sincronización se usa la syncword de 32 bits  $0 \times 1ACFFC1D$
- Se usa scrambler síncrono CCSDS
- Se usa Reed-Solomon con un tamaño de trama adecuado a las características de la misión (tamaño de paquetes a transmitir)
- Suelen usarse tramas CCSDS Space Data Link