

RECEPTOR DCS PARA EL SATÉLITE SAC-D/AQUARIUS. DESDE EL CONCEPTO A LOS ENSAYOS INTEGRADOS.

Lorente, Hugo E.; Sager, Gerardo E.^(*); Juárez, José M.; Carlotto, Jorge A.; Fernández Michelli Juan
Grupo de Investigación y Desarrollo en Comunicaciones Digitales (GridCOMD). Departamento de
Electrotecnia Facultad de Ingeniería UNLP.

^(*)Autor de contacto: Calle 48 y 116 2do Piso 1900 La Plata
e-mail: ger@ing.unlp.edu.ar.

Resumen:

La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CoNAE) ha incluido en la misión SAC-D/AQUARIUS un receptor destinado a la recolección satelital de datos provenientes de plataformas terrestres. El Grupo de Investigaciones en Comunicaciones Digitales (GridCOMD) ha suscripto un convenio para realizar el desarrollo, integración y ensayos de dicho receptor. El sistema de recolección satelital de datos está basado en sistemas ya existentes como el ARGOS (EEUU-Francia) y el SCD (Brasil) y es compatible con ellos. Se describe el trabajo realizado, poniendo de manifiesto las particularidades que existen en el desarrollo y la transferencia de un prototipo utilizable (Modelo de Proto Vuelo). También se reseñan las perspectivas de este trabajo, que en la actualidad redundan en la firma de un segundo convenio para el diseño de las plataformas terrestres.

INTRODUCCIÓN

El sistema de recolección de datos satelital (DCS, del inglés Data Collection System), consta de tres segmentos: segmento espacial, segmento terreno y segmento de usuario. El segmento espacial consiste principalmente en el receptor del sistema embarcado en el satélite. El segmento terreno, consiste de las estaciones habilitadas para recibir y procesar los datos almacenados por el receptor en el satélite y el segmento de usuario consta de las plataformas de recolección de datos DCP (del inglés Data Collection Platforms) que a su vez están integradas por los distintos sensores y el transmisor PTT (Platform Transmitter Terminal) [1]. El receptor del sistema DCS recibirá datos remotos provenientes de las DCP ubicadas en cualquier sitio de la tierra. Estas últimas pueden encontrarse fijas o móviles. Las DCP enviarán un mensaje a intervalos prefijados, sin ningún tipo de interrogación por parte del receptor. Todas las plataformas transmiten en la misma frecuencia y sin coordinación entre sí, lo que permite caracterizar el acceso al medio como un sistema de tipo ALOHA. Es bien conocido que en un sistema de este tipo, se producirán colisiones que reducirán que la eficiencia máxima del canal sea de solamente 18%. Por otra parte, la simplicidad del acceso al medio lo hace de todas maneras interesante para recabar información que no es crítica como datos biológicos o ambientales en lugares poco accesibles y a bajo costo.

Desde hace un tiempo, existen sistemas de este tipo como ARGOS, que es un emprendimiento conjunto entre Francia y la NOAA [2] de EEUU y el sistema SCD de Brasil. Uno de los objetivos de este trabajo es implementar un receptor DCS destinado a operar en la frecuencia asignada a Argentina (401.55 MHz), pero que a su vez sea compatible con los sistemas mencionados. (401.65 MHz y 401.62MHz respectivamente)

REQUERIMIENTOS DEL RECEPTOR

Sensibilidad

El sistema de modulación que utiliza el DCS, es PSK binario (fig.1), con dos señales cuya fase varía en $\pm 1.1 \pm 0.1$ rad (aprox. $\pm 63^\circ$). La forma del pulso $p(t)$ es Manchester (biphase-L). Para un sistema binario antipodal, la probabilidad de error de bit P_{e_b} utilizando el receptor óptimo se calcula como:

$$Pe_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (1)$$

donde E_b es la energía de bit y $N_0/2$ es la densidad espectral de potencia del ruido, que se asume como aditivo, blanco y gaussiano (AWGN). Para una Pe_b de 10^{-5} , necesitamos una relación E_b/N_0 de 9,6 dB. En nuestro caso, manteniendo la energía por símbolo, las señales se encuentran a una distancia menor (en el espacio de señales), es decir son más "parecidas" para el receptor, por lo que la Pe_b se incrementará. Si queremos mantener fija esta última, deberemos entonces aumentar la energía de la señal, para un mismo nivel de ruido.

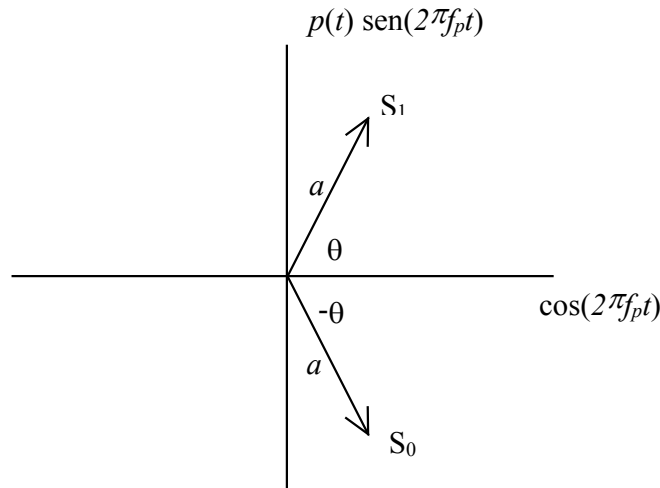


Fig. 1 Constelación del sistema.

Si ambas señales son equiprobables, la energía media de la señal transmitida es a^2 , lo que coincide con la energía de bit E_b dado que la constelación del sistema la forman dos señales, las cuales puedo representar por 1 bit. La distancia entre S_0 y S_1 es:

$$d_{01} = 2a \cos(\pi/2 - \theta) \quad (2)$$

La probabilidad de error de bit es:

$$Pe_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{d_{01}^2}{4N_0}}\right) \quad (3)$$

reemplazando (2) en (3), tenemos:

$$Pe_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{a^2 \cos^2(\pi/2 - \theta)}{N_0}}\right) \quad (4)$$

y finalmente:

$$Pe_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b \cos^2(\pi/2 - \theta)}{N_0}}\right) \quad (5)$$

De (5) puede inferirse que la degradación D respecto al binario antipodal es:

$$D = 10 \log(\cos^2(\pi/2 - \theta))$$

Entonces para $\theta = 1.1$ rad, nos queda $D=1$ dB, es decir que, para mantener la Pe_b constante en 10^{-5} , debemos aumentar la potencia de señal en aproximadamente 1 dB (para el mismo nivel de ruido). Entonces, para el sistema DCS, podemos lograr una $Pe_b = 10^{-5}$, si tenemos una relación $E_b/N_0=10,6$ dB.

Para poder calcular la sensibilidad necesaria del receptor, es necesario realizar un cálculo de las distancias máximas y mínimas a las que operará el satélite respecto a las DCP. Teniendo en cuenta que la órbita es cuasi polar y heliosincrónica con una altura aproximada de 800Km, puede calcularse que la distancia máxima desde la plataforma al satélite es de aproximadamente 3293 Km cuando el satélite aparece en el horizonte del transmisor, y cuando el mismo se encuentra en el cenit, la distancia es de 800 Km, como resulta lógico.

Otro parámetro de interés es el corrimiento doppler de frecuencia que influirá en el ancho de banda necesario en el receptor para acomodar las señales recibidas. Puede estimarse este corrimiento en aproximadamente $\pm 9\text{KHz}$.

También es necesario tener en cuenta la tasa de bits en la transmisión que está fijada en 400 bps y la temperatura de ruido estimada del receptor que para ser conservadores se estima en 1000K

En base a estos datos, considerando antenas transmisoras y receptoras con ganancia de 0dBi y tomando un margen de 5 dB de pérdidas debido a los errores de implementación con respecto aun receptor ideal, se llega a que la sensibilidad del receptor debe ser de -125 dBm para una $P_{e_b} = 10^{-5}$. En las peores condiciones para el enlace la perdida del espacio libre es de 154 dB, con lo cual la potencia transmitida desde las plataformas debería estar en aproximadamente 30dBm lo que es compatible con las especificaciones ARGOS y SCD.[2]

Requerimientos Ambientales

El ambiente de operación del receptor DCS a bordo del satélite tiene algunas particularidades. En primer lugar el vacío obliga a un diseño térmico en el cual toda la disipación se produce por radiación o conducción, y limita la potencia que puede utilizar el instrumento. En este caso la temperatura de operación del receptor esta especificada entre -10°C y 40°C . También obliga a utilizar materiales que en condiciones de vacío y microgravedad, no sublimen. En esas condiciones existen otros fenómenos que afectan a ciertos materiales como la formación de dendritas que pueden llevar a producir contactos no deseados. Otros requerimientos tienen que ver con el proceso de lanzamiento en el cual todo el satélite está sometido a vibraciones de muy alta intensidad, que imponen un diseño mecánico en el cual las partes componentes no tengan resonancias en cierto rango de frecuencias. También es necesario controlar las emisiones electromagnéticas no deseadas que podrían afectar a otros componentes o instrumentos a bordo del satélite y proveer inmunidad contra las interferencias electromagnéticas producidas por tormentas solares o emisiones provenientes desde tierra. Por último se debe tener en cuenta que en el espacio existen radiaciones ionizantes en forma de radiación gamma o partículas cargadas que pueden afectar el funcionamiento de los componentes electrónicos, por lo que es necesario seleccionar componentes que resistan una cierta dosis de radiación y/o energía de partículas incidentes sin dañarse.

IMPLEMENTACIÓN

El diagrama en bloques del receptor del sistema puede observarse en la Fig. 2. La etapa de RF, recibe la señal a la salida de la antena, la amplifica y, mediante triple conversión, la lleva a una frecuencia intermedia (FI) de 464 kHz. Luego, la señal en FI ingresa a un rotador de fase que permite obtener señales en fase y cuadratura y es muestreada mediante sendos convertidores AD de 16 bits a una tasa de 32 KSPS. Las muestras ingresan al DSP donde se implementa la Unidad de Búsqueda y la Unidad de Recuperación de Datos. La primera detecta transmisiones presentes, mientras que en la segunda se encarga de la recuperación de los datos. Estos son almacenados en una unidad externa al receptor a la que se accede por la interfaz RS422 de comandos y datos hasta que puedan enviarse a la estación terrena, desde donde son distribuidos a los usuarios.

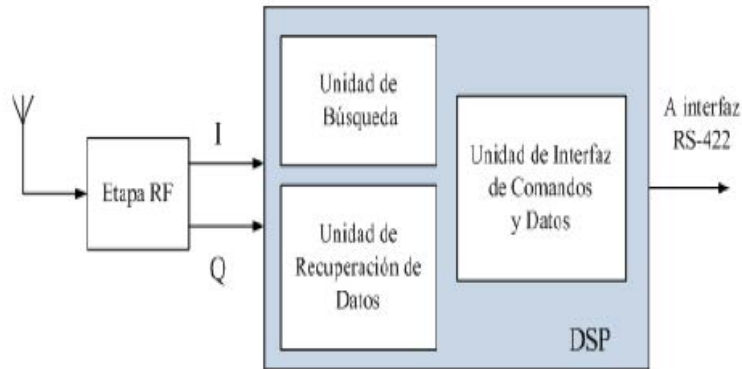


Figura 2. Diagrama en Bloques del Receptor.

Etapa de RF

El diseño de esta etapa debe tener en cuenta varios aspectos:

- Ganancia total de unos 110 dB .
- AGC con rango dinámico de 40 dB.
- Posibilidad de sintonización entre 401 y 403 MHz con una canalización de 10 KHz.
- Ancho de banda de 15 KHz.
- Bajo consumo.

Para obtener estas características se recurrió a un diseño basado en triple conversión a 70MHz, 10.7MHz y 464 KHz, Las etapas de FI de 70MHz y 10.7 MHz, poseen sendos amplificadores de ganancia variable tipo AD8330, El AGC actúa sobre la etapa de FI de 10.7 MHz. La sintonización se logra mediante el empleo de un sintetizador de frecuencias LMX2306. Para obtener el ancho de banda deseado se utilizó un filtro monolítico de 70 MHz con ancho de banda de 23 KHz y un filtro a cristal de 4 polos y ancho de banda de 15 KHz en 10.7 MHz. A la entrada se ubico un filtro pasabanda con un ancho de banda de 4MHz, destinado a rechazar Frecuencia Imagen y a prevenir la saturación del LNA por alguna posible señal interferente. A la salida de la FI de 464 KHz se implemento un amplificador de potencia destinado a proveer una salida adecuada par los convertors AD. El rotador de fase que provee señales en fase y cuadratura se implemento mediante una red de desplazamiento de fase polifásica diferencial.

La tecnología que se utiliza en componentes activos de RF es inherentemente robusta frente a radiación, así que se seleccionaron los componentes para que estuvieran calificados según norma MIL-883 de manera de garantizar su confiabilidad frente a las condiciones ambientales ya mencionadas.

Debido a la gran ganancia que provee esta etapa y para evitar un acoplamiento inverso entre salida y entrada, se decidió implementarla en dos PCB`s que se ubicaron en dos cajas blindadas y conectadas entre sí solamente a través de coaxiales semi-rígidos ubicados en los laterales de las mismas.

DSP

En el bloque DSP (Procesador Digital de señales) se implementaron tanto las funciones de procesamiento de señales como las de interfaz, comando y almacenamiento. En primer término se procede al muestreo y conversión AD de la señal en fase y cuadratura mediante sendos convertidores de 16 bits LTC1604. Estos convertors fueron seleccionados, porque en informes de ensayo de NASA se ha establecido que son altamente resistentes a la radiación. Estos convertors están conectados directamente al bus de datos del DSP AD21060, simplificándose la interfaz entre los mismos. El DSP arranca leyendo un programa almacenado en una memoria EEPROM 28C010 calificada militarmente y resistente a radiación. El DSP en sí es de calidad industrial, pero su ubicación dentro de la caja de aluminio provee un blindaje importante frente a la radiación acumulativa.

Para las funciones de interfaz y comando se empleo un controlador de comunicaciones Z85230 y convertidores RS422 LTC 26CT31 y 26CT32. Estos últimos fueron seleccionados con alta resistencia a radiación y calificación espacial, ya que un requerimiento general del satélite, especifica este tipo de calificación en todos los componentes de interfaz interna. También se conectó un DAC que permite obtener una tensión de control para el AGC. Se consideró conveniente proveer una alimentación separada para los componentes analógicos y los digitales.

Software

Las divisiones funcionales de la figura 1 se implementan en software, la Unidad de Búsqueda se basa en realizar una FFT y determinar la presencia de señal mediante un algoritmo basado en un test generalizado de máxima verosimilitud. [3] [4] La Unidad de Recuperación de Datos, implementa un lazo de enganche de fase para sincronizar la portadora, el cual es inicializado a partir de la estimación de frecuencia realizada por la unidad de búsqueda. Una vez enganchada en fase la portadora se activa el lazo de sincronismo de bit, basado en un esquema denominado SCCL (Sample Correlate Choose Largest) [5] [6] y por ultimo, se busca una palabra de sincronismo que permite decidir frente a la ambigüedad de la fase de bit. A partir de allí se almacenan los datos recibidos en un buffer que permite guardar hasta 16 mensajes y se esperan comandos para transferirlos al almacenamiento externo.

Todo el funcionamiento del software está basado en una máquina de estados muy sencilla cuyo diagrama de transiciones se muestra en la figura 3. Las transiciones están gobernadas por los comandos que recibe el receptor. El modo normal de operación donde recibe datos desde las DCP es el modo 2 (DCP_RX) [7].

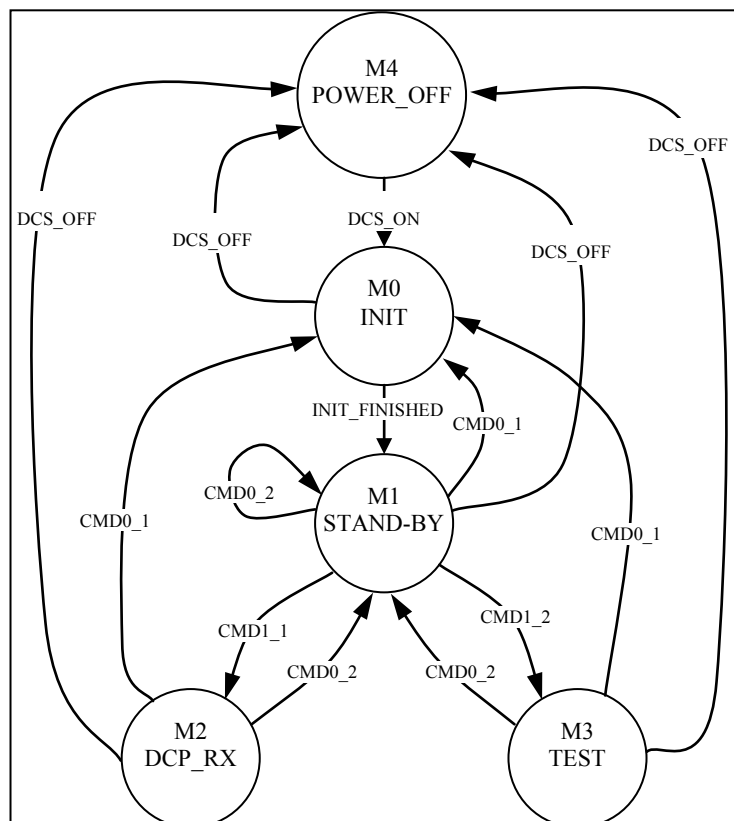


Figura 3

Implementación Física

En este tipo de desarrollos, la implementación física no es indiferente, ya que para cumplir con los requerimientos ambientales es necesario tener en cuenta múltiples factores como ya

se adelantó. En primer lugar la selección de componentes de alta confiabilidad entra en conflicto con los costos, por ejemplo el costo de un circuito integrado calificado para uso espacial puede llegar a ser 100 a 500 veces el costo del mismo circuito integrado de uso comercial. Una solución de compromiso empleada en esta misión involucró seleccionar componentes de la más alta calificación solamente en las interfaces, ya que una falla allí podría propagarse a otros sistemas, provocando una cadena de fallas. Los componentes internos de cada subsistema, en cambio, podían tener calificación militar preferentemente pero también podían ser de tpo industrial con lo que los costos disminuyeron sensiblemente. La disposición mecánica también influye sobre todo frente a vibraciones y a disipación térmica. En este caso se optó por una estructura basada en cajas superpuestas, unidas entre sí por medio de espárragos lo que proporciona gran rigidez mecánica, y la ubicación de los componentes que disipan mayor potencia en la caja que está vinculada térmicamente con la estructura de la plataforma del satélite. Para minimizar acoplamientos eléctricos indeseados entre las cajas se optó por realizar las interconexiones de señal por medio de coaxiales semirrígidos y las de alimentación a través de filtros pasantes (feedthrough). El diseño de cada caja también contempló el montaje de las placas de PCB mediante tornillos de manera que funcionaran mecánicamente como una placa empotrada en sus cuatro bordes, confiriéndole una alta rigidez. Por último todos los componentes de cada placa, como asimismo el cableado interno fue amurado a las placas o a las paredes de las cajas mediante la técnica conocida como "staking". Una vez realizado esto se realizó un recubrimiento de toda la superficie expuesta mediante el procedimiento conocido como "coating", esto evita contactos eléctricos accidentales y protege de la corrosión y desgase de los componentes y materiales utilizados. Se pueden apreciar algunas de estas técnicas en la figura 4.

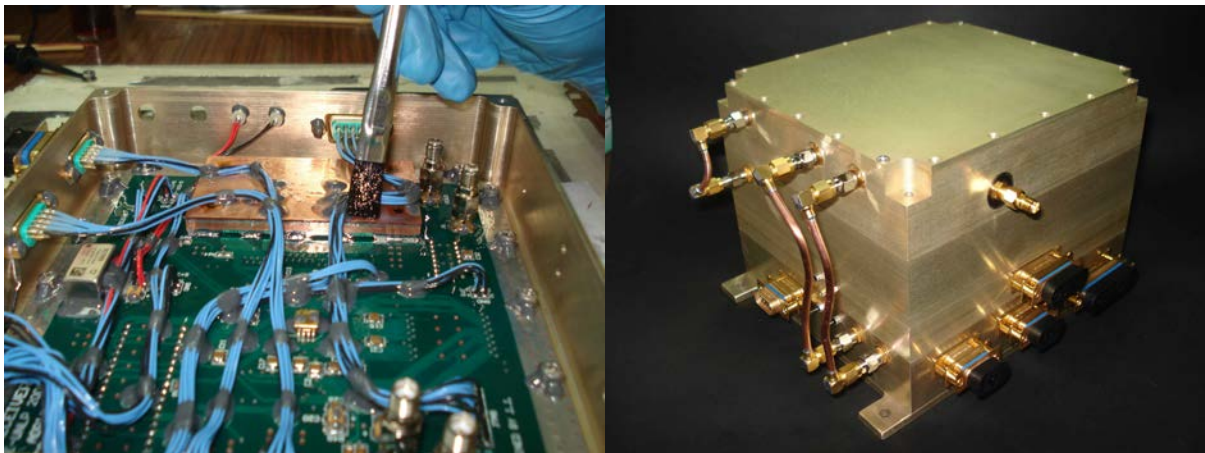


Figura 4 Izq. Procedimiento de "coating" Der. Caja terminada

RESULTADOS

Los primeros ensayos realizados sobre el receptor, permitieron determinar que respondía adecuadamente a los comandos, que la ganancia y sensibilidad estaban dentro de lo especificado y que recuperaba las tramas recibidas desde un emulador de DCP.

A partir de allí se realizó la siguiente secuencia de operaciones y ensayos sobre el receptor, que están pautadas para resultar en una calificación del mismo, esto es certificar que está calificado para poder integrar la misión del satélite cumpliendo con su funcionalidad y sin degradar el comportamiento de otros sistemas:

- Ensayos ambientales "stand-alone"
- Preintegración con el almacenamiento externo
- Ensayo de aceptación en banco
- Integración al satélite
- Ensayos funcionales post integración

- Ensayos ambientales integrados

A continuación se describen los resultados relevantes de cada uno de ellos.

Ensayos Ambientales “stand-alone”

Consistieron en ensayos de vibración y de termo-vacío del receptor en modo autónomo. Para verificar la funcionalidad durante estos ensayos, fue necesario simular las conexiones externas, lo que se realizó mediante un Electric Ground Support Equipment (EGSE) diseñado y construido al efecto. Durante estos ensayos se advirtió una falla en el tramo de temperatura alta del ciclado térmico. Mediante mediciones y recurriendo al uso de fotografías tomadas durante la etapa de armado, se llegó a la conclusión que un capacitor electrolítico había sido conectado en forma invertida. Una vez determinado el motivo, se procedió a realizar un retrabajo y se volvió a ensayar con éxito. También en los ensayos de EMI-EMC se llegó a la conclusión que la emisión de señal en la banda del instrumento AQUARIUS era mayor a lo permitido, Se realizó un envoltorio en tela conductiva que permitió disminuir la emisión a un nivel que cumplía con lo especificado.

Preintegración con el almacenamiento externo

Este ensayo permitió ajustar el procedimiento de integración (ensamblado) mecánico, eléctrico y funcional con el resto del satélite. Se encontraron algunas incompatibilidades de software con el almacenamiento externo, que fueron corregidas en una nueva versión de software.

Ensayo de aceptación en banco

Durante este ensayo se ensayan las interfaces para verificar que los niveles eléctricos son compatibles con el resto del satélite y que se corresponden con lo previsto. También se hace una pequeña prueba funcional para demostrar que el receptor cumple con sus especificaciones previamente a ser integrado con el resto del satélite.

Integración al satélite

Durante la integración al satélite se van estableciendo las conexiones que vinculan el receptor con el satélite una por una, mediante una caja de conexión. Mientras tanto se toman lecturas de las formas de onda y niveles de tensión. Este paso es crítico, ya que un error puede producir una falla que afecte a otro sistema del satélite. En el caso de DCS esta etapa se superó con éxito.

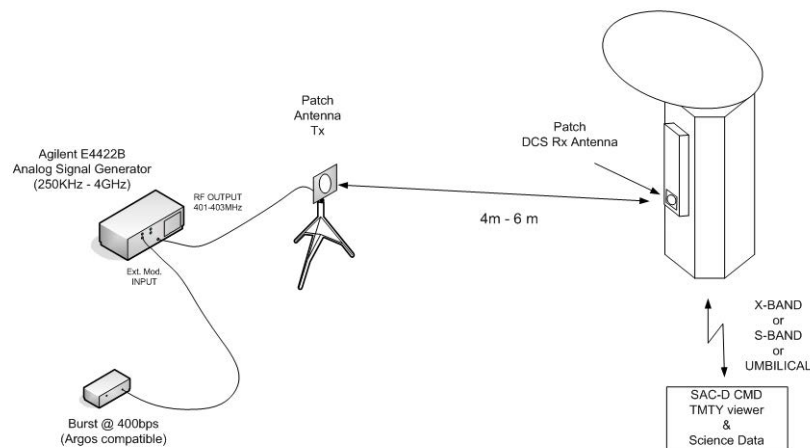


Figura 5: Ensayo de DCS con antena integrado a SP

Ensayos funcionales post integración

Una vez integrado el receptor al satélite, se realiza un nuevo ensayo funcional, pero en este caso, la excitación de señal debe realizarse mediante una antena transmisora como se muestra en la figura 5. Este esquema se mantuvo para el resto de los ensayos funcionales subsiguientes

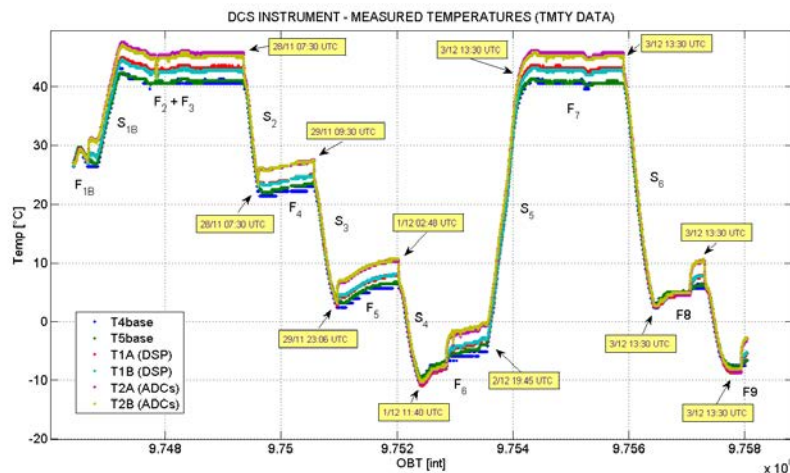


Figura 6: Comportamiento térmico de DCS durante termo-vacío

Ensayos ambientales integrados

Esta campaña de ensayos ocupó 6 meses, durante los cuales se realizaron pruebas pautadas de EMI-EMC, vibración y ciclado térmico en condiciones de vacío para todo el satélite integrado. En particular cada uno de los instrumentos y/o sistemas embarcados debía ser comandado de manera muy similar a la que se utilizará en vuelo. Durante estos ensayos el comportamiento del receptor estuvo dentro de lo especificado y uno de los resultados de interés fue la verificación de que el comportamiento térmico se correspondía con el diseño en el que se había establecido que la sobre elevación de temperatura respecto de la plataforma no debía ser mayor a 5° C como se muestra en la figura 6.

CONCLUSIONES

Se ha descrito el proceso de desarrollo, implementación y ensayos de un receptor completo para el sistema DCS que fue integrado al satélite SAC-D/AQUARIUS. El trabajo planteó un gran desafío ya que además de los aspectos técnicos de diseño hubo que satisfacer una serie de requerimientos ambientales extremos e implementar la construcción del mismo de acuerdo a estándares estrictos de calidad y procedimientos. También fue necesario desarrollar procedimientos de ensayo y sistemas de soporte para los mismos en tiempos muy acotados. Para GridCOMD ha sido una experiencia enriquecedora que nos permitió consolidarnos como grupo de trabajo y nuestro esfuerzo ha sido reconocido por CoNAE, que acaba de firmar un nuevo convenio, ahora para el diseño de las plataformas terminales de transmisión (PTT) que planea transferir a la industria para su posterior fabricación.

Bibliografía

- [1]Marlin-Yug Ltd. (2005). MT105A Series PTT. User's Manual rev. 1.0. Sebastopol, Ucrania.
- [2]National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. (2000). NOAA KLM User's Guide, september 2000 revision. USA.
- [3] Kay, Steven M.: Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory. Prentice-Hall PTR. ISBN 0-13-504135-X (1998).
- [4] Kay, Steven M.: Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. Prentice-Hall PTR. ISBN 0-13-345711-7 (1993).
- [5] Chen, Kwang-Cheng (1992). Analysis of a New Bit Tracking Loop-SCCL, IEEE Trans. on Communications, Vol.40, No.1.
- [6]Franks, L. E. (1980). Carrier and Bit Synchronization in Data Communication- A tutorial review, IEEE Trans. on Communications, Vol.28, No.8.
- [7] Carlotto A., Lorente H.: Análisis de un Sistema de Recolección de Datos Satelital. Memorias de AADECA 2006, XX Congreso Argentino de Control Automático, Buenos Aires, Argentina, 28-30 de agosto 2006. ISBN 978-950-99994-4-2. (2006)

