

Equipos Especiales de Verificación para el Subsistema de Control de Órbita y Actitud Satelital

Raquel Vanessa Rodríguez González
e-mail: rrodriguez@abae.gob.ve

RESUMEN: La verificación del subsistema de control de órbita y actitud se realiza mediante la utilización de equipos especiales de verificación que simulan la dinámica del satélite, estimulan los sensores y monitorean que la respuesta de los actuadores corresponda con los valores esperados de diseño.

El siguiente trabajo describe las tareas, composición y funciones del SCOE de AOCS dentro de un proceso de verificación y validación de desempeño del subsistema. Adicionalmente se muestran alternativas que en ésta materia diversas compañías y agencias espaciales de todo el mundo han desarrollado.

PALABRAS CLAVE: AOCS, SCOE, Estado del Arte del SCOE de AOCS

1. INTRODUCCIÓN

Los satélites de observación remota, operan en su mayoría en órbita baja terrestre (LEO), cuya elevación oscila entre los 400 y 2500 km de altura [1]. Por lo cual, efectuar reparaciones a los equipos a bordo una vez puesto en órbita el satélite, no es una alternativa viable en relación a los riesgos asociados y costos adicionales (a partir de éste punto quedará entendido que el término "a bordo" hace referencia a los componentes que integran al satélite). En consecuencia, es preciso comprobar exhaustivamente los subsistemas que lo conforman, antes de realizar el lanzamiento del satélite al espacio, comprendiéndose que el cumplimiento de su vida útil, el logro de los objetivos para el que fue creado y en general, el éxito de la misión, dependen del correcto funcionamiento de todos los subsistemas que lo constituyen.

En éste orden de ideas, uno de los componentes de mayor importancia a bordo, es el subsistema control de órbita y actitud (AOCS: Attitude and Orbit Control Subsystem), el cual permite al satélite permanecer en la órbita diseñada durante todas las fases de la misión. Esto lo realiza mediante un sistema de control de lazo cerrado donde el valor requerido de actitud se compara con la medición actual del satélite, siendo el delta de este proceso la desviación de actitud, valor que se transfiere al controlador, que genera y transfiere los comandos para el actuador.

En respuesta, los actuadores crean un torque controlado que modifica activamente la actitud del satélite, resultado que es medido nuevamente por los sensores y enviado a la computadora de control, que al lograr la actitud deseada, envía la orden a los

actuadores para detener la ejecución de sus funciones, quedando éstos a la espera de una próxima orden de control, conformándose de este modo el lazo cerrado. El proceso descrito se muestra en la Fig. 1, donde se ilustra de manera general la tarea de control ejercido por el subsistema en órbita.

Es evidente entonces, la importancia de éste subsistema para el satélite, razón por la cual, los procesos para su comprobación deben realizarse metódicamente mediante el uso de equipos especiales de verificación (SCOE: Special Checkout Equipment), que permitan asegurar que se cumple con los requerimientos de la misión. En general, la comprobación del correcto funcionamiento de los equipos de AOCS, requiere la simulación de los diferentes fenómenos que experimenta el satélite en órbita (incidencia de los rayos solares, cambios de actitud, entre otros), mediante equipos especiales de verificación que trabajen en combinación con los dispositivos reales a bordo.

Debido a la importancia de los equipos especiales de verificación, el presente trabajo de investigación se enfoca en el SCOE utilizado para las pruebas del subsistema de control de órbita y actitud, sus principales tareas, composición, funciones y las alternativas que han planteado diversas compañías y agencias espaciales de todo el mundo para la optimización de las tareas de verificación del AOCS.

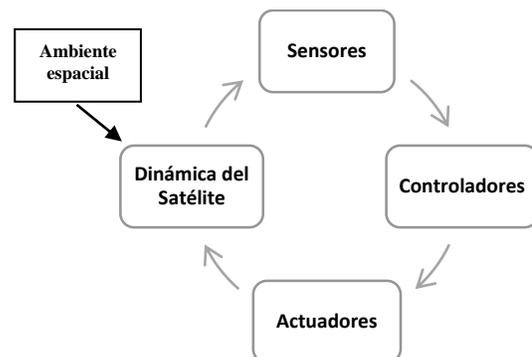


Figura 1. Control de lazo cerrado del sistema de AOCS

2. TAREAS DEL SCOE DE AOCS

La Fig. 1, como se mencionó con anterioridad, ilustra el funcionamiento del subsistema de control de

órbita y actitud, mostrando que se basa en un sistema de control a lazo cerrado, donde participan los sensores, la computadora de control de AOCS y los actuadores a bordo. Siendo éste su funcionamiento en órbita, es de lógica considerar que parte del proceso de verificación del subsistema, involucra pruebas a lazo cerrado donde participan los equipos que componen el satélite.

Debido que las condiciones existentes en el espacio no se encuentran en Tierra, los valores de ciertos fenómenos como incidencia de luz del Sol, el mapa de estrellas, la dinámica del satélite en órbita, entre otros, deben ser simulados para estimular los sensores a bordo y éstas simulaciones, demandan rendimiento en tiempo real, alta fidelidad, flexibilidad, conectividad con el hardware a bordo y constante monitoreo de la respuesta de los actuadores ante los estímulos que el SCOE brinda a los sensores.

En general, las tareas realizadas por el SCOE del sistema de control de órbita y actitud pueden resumirse como sigue [2]:

- Monitoreo del requerimiento de corriente de las ruedas de momento y los propulsores.
- Cálculo de la dinámica de movimiento del satélite como resultado de los requerimientos de los actuadores.
- Traducción de estos movimientos en ángulos y tasas angulares importantes para cada uno de los sensores.
- Estimulación eléctrica de la electrónica correspondiente a cada sensor.

Lo anterior evidencia que los equipos de verificación monitorean, no sólo la respuesta de los actuadores ante las señales de estimulación de los sensores, sino también el consumo de energía de cada uno de los equipos de AOCS a bordo, para comprobar que se encuentran dentro de los valores nominales de funcionamiento. El propósito de estas comprobaciones consiste en evitar daños, tanto a los equipos del satélite como al SCOE durante las diferentes pruebas de funcionamiento del subsistema.

3. COMPOSICIÓN Y FUNCIONES DEL SCOE DE AOCS

La principal función del SCOE consiste en estimular al satélite para comprobar el estado de funcionamiento de los equipos a bordo. Siendo así, es fundamental que la mayor cantidad de equipos de AOCS del satélite sean conectados al SCOE, incluyendo los sensores y actuadores reales utilizados.

De esta manera, es posible garantizar el funcionamiento coordinado de todos los componentes del subsistema. Con base en esta premisa, es de gran importancia conocer la composición y funciones de los equipos especiales de verificación del subsistema de control de órbita y actitud, razón por la cual se describen brevemente a continuación.

3.1. COMPOSICIÓN

Los equipos especiales de verificación, generalmente son configurados dependiendo del satélite sometido a prueba, esto, con el propósito de adaptarlos a las especificaciones y requerimientos del satélite particular. Aun así, es posible generalizar los requerimientos mínimos de equipos necesarios para la ejecución de las pruebas de AOCS tal como se lista a continuación:

- Computadora de pruebas.
- Equipo fuente de señal para los sensores.
- Equipo de recolección de señales de los actuadores.

Las funciones del SCOE de AOCS se describen brevemente en la próxima sección. Es importante destacar, que además de los equipos anteriormente listados, se requiere contar para los procesos de verificación, con un servidor de base de datos que se encargue de almacenar los fundamentos de las pruebas, resultados obtenidos y demás datos de relevancia que puedan requerirse en análisis posteriores.

3.2. FUNCIONES

Las funciones del SCOE y su interacción con los equipos a bordo puede describirse en términos generales de la siguiente manera: una vez que la computadora de pruebas envía las señales a través del equipo de fuente de señal para los sensores, se produce una respuesta en los sensores a bordo, que al ser estimulados, envían señales al controlador de AOCS (AOCC: Attitude and Orbit Control Computer), el cual genera la orden de ejecución para los actuadores, produciéndose en éstos, una reacción que es recibida por el equipo de recolección de señal de los actuadores y enviada a la computadora dinámica, que utilizará estos parámetros para generar nuevas entradas para los sensores.

Las funciones de cada uno de los equipos especiales de verificación se explican brevemente a continuación.

3.2.1. COMPUTADORA DE PRUEBAS

La función de la computadora de pruebas, consiste en enviar señales al equipo de fuente de señal para los sensores y recibir la información suministrada por el equipo de recolección de señales de los actuadores. La data recibida es computada mediante algoritmos especializados basados en la dinámica del satélite y el resultado de estos cálculos produce una nueva señal que se envía nuevamente al equipo de fuente de señal para los sensores.

3.2.2. EQUIPO FUENTE DE SEÑAL PARA LOS SENSORES

La función del equipo de fuente de señal para los sensores, consiste en adaptar las señales enviadas por

la computadora de pruebas y traducirlas en las señales eléctricas u ópticas necesarias para estimular los sensores a bordo del satélite.

3.2.3. EQUIPO DE RECOLECCIÓN DE SEÑALES DE LOS ACTUADORES

El equipo de recolección de señales de los actuadores se encarga de recibir la señal de respuesta de los actuadores del satélite y adaptarla a niveles que puedan ser recibidas por la computadora de pruebas para su posterior procesamiento.

El principio de funcionamiento de los equipos especiales de verificación con los equipos a bordo del satélite se ilustra en la Fig. 2 y se denomina prueba a lazo cerrado de AOCS. En general, en las pruebas a lazo cerrado, se procede a comprobar el funcionamiento de los equipos a bordo inyectando secuencias que simulan las etapas que atraviesa el satélite en órbita, pudiéndose verificar los modos de funcionamiento normal y el modo de funcionamiento de emergencia de AOCS.

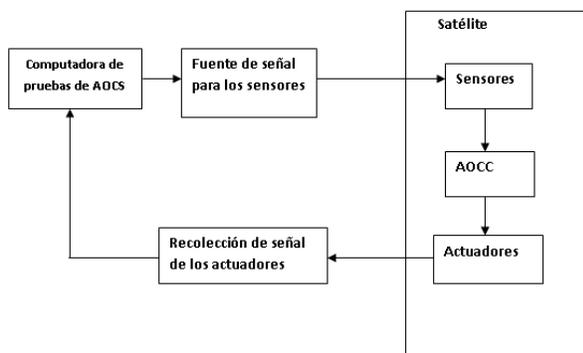


Figura 2. Flujo de procesos entre el SCOE y los equipos a bordo del satélite

4. ESTADO DEL ARTE DE LOS EQUIPOS DE VERIFICACIÓN DE AOCS

Existe actualmente una tendencia hacia el diseño de equipos genéricos fácilmente configurables y reutilizables, con el objeto de minimizar los costos de las pruebas de AOCS en las diferentes etapas de desarrollo del satélite. Para lograr un grado amplio de reusabilidad, es necesaria la adopción de interfaces estándar y mejores prácticas para el desarrollo de software genérico [3]. En éste sentido, el estándar ECSS-E-TM-10-21A, ofrece un conjunto de herramientas de simulación disponibles para dar soporte a actividades de ingeniería espacial, donde se brinda la oportunidad de reutilizar tanto el hardware como el software en una arquitectura modular.

Además, compañías y agencias de todo el mundo, como la SENER, la ESA (European Space Agency), la

NSPO (National SPace Organization), la NLR (Nationaal Lucht en Ruimtevaartlaboratorium), la INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), Astro und Feinwerktechnik Adlershof GmbH entre otras, han desarrollado equipos especiales de verificación de AOCS para satisfacer los requerimientos arriba mencionados en proyectos satelitales de gran renombre.

A continuación se ofrece una breve descripción del SCOE desarrollado por cada una de las agencias mencionadas y sus características más importantes.

4.1. SCOE DE AOCS DESARROLLADO POR SENER

SENER ha desarrollado un banco de pruebas genérico para los equipos de AOCS, denominado GATB, con el objetivo de facilitar la adaptabilidad del SCOE a casi cualquier satélite bajo prueba. En general, la propuesta de SENER se compone de los elementos que se listan a continuación [4]:

4.1.1. HOST MATLAB® Y NI LABVIEW

Consiste en una computadora con sistema operativo Windows® XP utilizada para desarrollar y administrar el software de simulación que ofrece una representación de la dinámica y cinemática del vehículo espacial, además del ambiente para los sensores y actuadores. En este caso, los modelos de software son traducidos al código requerido por el sistema en tiempo real de LabView usando la herramienta de interfaz de simulación.

4.1.2. HOST SCOS 2000

Consiste en una computadora con sistema operativo Linux, dedicada a albergar los comandos ESA SCOS 2000 y las herramientas de monitoreo y control desde el cual se efectuará la comunicación con el satélite.

4.1.3. RACK PXI

Este elemento alberga el controlador PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) junto con los tableros de entrada/salida que funcionan de interfaz con el AOCS. El controlador PXI ejecuta el software de simulación. Los tableros de entrada/salida generan las señales digitales y analógicas y gestionan las comunicaciones del bus de datos. En general, este equipo consiste en un chasis de 18 espacios con salidas analógicas y digitales, controlador PXI e interfaz por bus CAN (Controller Area Network)

4.1.4. RACK VME

Este contiene el procesador de vuelo ERC32. Tiene interfaz con el rack PXI vía tablero VME-MXI-2.

El SCOE de AOCS para Meteosat fue adjudicado a SENER por la empresa alemana de soluciones tecnológicas OHB System AG, este contrato contempla el desarrollo, integración y suministro de los equipos de

verificación de AOCS, además, contiene el EGSE para el SADA, STR, Gyros, CCS, PROP y RW además de las computadoras de simulación de ambiente dinámico [4].

4.2. SCOE DE AOCS DESARROLLADO POR LA ESA

Por su parte, la ESA (European Space Agency) desarrolló el SCOE de GAIA para la comprobación del AOCS [6], el cual consiste en un simulador en tiempo real, equipos rastreadores de estrella y equipos de estimulación para los sensores ópticos. Además, ha diseñado modelos para el análisis de rendimiento del AOCS [5], cuyas simulaciones fueron realizadas en MATLAB®/Simulink® para bancos de prueba en tiempo real. La arquitectura de alto nivel de cada modelo fue desarrollado en tres capas:

4.2.1. CAPA DE FUNCIONES

Realiza los cálculos fundamentales requeridos para producir las salidas correspondientes de las unidades

4.2.2. CAPA DE SERVICIO

Maneja la conmutación entre varios modos de las unidades, modelos de potencia y comportamiento térmico. Además de los protocolos de comunicación, sincronización, estado de la máquina, entre otros aspectos de interés.

4.2.3. CAPA FÍSICA

En términos generales, la capa física provee la interfaz externa del modelo.

La figura 3 muestra el modelo por capas desarrollado por la ESA. Al igual que el modelo desarrollado por SENER, su objetivo primordial consiste en ser genérico y reutilizable en otros proyectos satelitales.

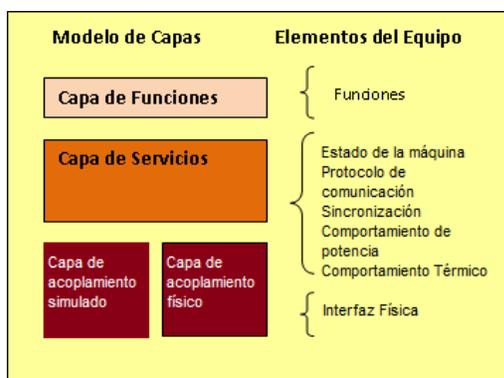


Figura 3. Modelo por capas de la ESA [6].

4.3. SCOE DE AOCS DESARROLLADO POR LA NSPO

La NSPO por su parte, utiliza un banco de pruebas de AOCS compuesto de dispositivos eléctricos y mecánicos, además de un conjunto de interfaces eléctricas. En general, el equipo se compone de una unidad de procesamiento de datos con puertos de entrada/salida, un equipo de soporte eléctrico acondicionador de señal, un monitor y el arnés. Todos los equipos son acomodados en un rack. Los componentes mencionados se describen a continuación:

4.3.1. UNIDAD DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Se encuentra equipada con tableros PCI para adquisición y procesamiento de señales, además contiene los controladores para los diferentes sensores de AOCS.

4.3.2. EGSE ACONDICIONADOR DE SEÑALES

Se encarga de adecuar las señales entre el objetivo y el arnés.

4.3.3. UNIDAD DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Se encuentra enlazada con la unidad de procesamiento de datos.

Además, el banco de pruebas desarrollado por la NSPO tiene la capacidad para recibir la salida de los actuadores, contiene las interfaces correspondientes para los sensores y para el suministro de energía.

4.4. SCOE DE AOCS DESARROLLADO POR ASTRO UND FEINWERKTECHNIK ADLERSHOF GMBH

Astro und Feinwerktechnik Adlershof GmbH, ha desarrollado varios equipos de soporte en tierra, tanto eléctricos como mecánicos, así como equipos de pruebas de AOCS para el proyecto de pequeño satélite TET-1 [6].

La estructura desarrollada se compone de un armazón circular metálico con un soporte para el modelo de ingeniería del satélite conectado mediante un bus de comunicaciones a los equipos de pruebas de AOCS y desde el cual es posible realizar las pruebas a nivel de subsistema.

4.5. SCOE DE AOCS DESARROLLADO POR EL NLR

El laboratorio aeroespacial nacional (NLR) de Holanda, desarrolló una nueva generación de equipos de prueba y verificación (TVE) para la comprobación del sistema de control de órbita y actitud del satélite, basado en un prototipo desarrollado por la ESA, los equipos de prueba han sido desarrollados para pruebas a nivel de sistema y subsistema de AOCS del satélite XMM.

La característica de los equipos de prueba y verificación desarrollados para AOCS consiste en su capacidad de reutilización, pruebas de lazo abierto y lazo cerrado, además de la posibilidad de ser empleado en cualquier etapa de desarrollo del satélite. Se compone de unidades de sensor integrados, interfaz de pruebas para medir la estimulación física, estimulación óptica para los sensores y la computadora de simulación que computa los efectos de la dinámica del satélite.

En particular, los equipos de verificación de XMM se componen de equipos terminales (FE), software de pruebas y software de simulación [7]. Cada uno de los cuales se describe brevemente a continuación:

4.5.1. Equipos terminales (FE)

Contiene las interfaces para los buses MACS y OBDH, además ofrece el monitoreo y estimulación dedicada para las unidades de sensores y actuadores. Todas las interfaces se construyen en dos capas: una interfaz de bajo nivel de hardware y un procesador de protocolo de alto nivel.

Los equipos terminales de AOCS de los EGSE consisten en un simulador de unidad de distribución de potencia, un simulador de unidad terminal remota, un equipo de estimulación y monitoreo, entre otras.

4.5.2. Software de pruebas

Se encarga de actividades relacionadas con las simulaciones de lazo cerrado, adquisición de los datos, procesamiento de TM/TC, ejecución de las actividades de prueba y almacenamiento de los datos, además de proporcionar interfaces de usuario dedicadas.

El software está basado en una herramienta de soporte de simulación de propósito general, llamada PROSIM (Programme and Real time Operations SIMulation), desarrollado por la NRL como un programa de simulación independiente para sistemas de vuelo avanzados. En el caso particular de AOCS, PROSIM ha sido ampliado con interfaces para los FE (Equipos terminales) y los EGSE (Electrical Ground Support Equipment), además de procesamiento de TM/TC, entre otras funciones.

4.5.3. Software de simulación

Es responsable de la simulación de la dinámica del satélite, el ambiente espacial y las unidades de AOCS. En general, las funciones de éste software dependen de la presencia y configuración de las unidades reales durante la prueba. En éste sentido, puede simular la cabeza de los sensores y actuadores e incluso las unidades completas de ser necesario.

4.6. SCOE DE AOCS DESARROLLADO POR EL INPE

El instituto brasileño para investigaciones espaciales (INPE) [3], se encuentra desarrollando un

simulador de dinámica del vehículo espacial, siendo el modelado matemático de los dispositivos y fenómenos físicos realizado en MATLAB®. Actualmente el sistema contiene modelos de los sensores, actuadores y dinámica de actitud.

5. CONCLUSIONES

El subsistema de control de órbita y actitud permite al satélite cumplir con éxito la misión para el cual fue diseñado, siendo su verificación y validación, de vital importancia para garantizar la confiabilidad de los equipos a bordo durante el trabajo en órbita. Por ello, el proceso de pruebas durante las etapas de ensamblaje e integración, deben realizarse con equipos especiales de verificación confiables, precisos, altamente escalables y reutilizables.

Por este motivo, diversas compañías y agencias espaciales a nivel mundial, han orientado sus esfuerzos hacia el diseño de sistemas de verificación robustos, que además puedan ser utilizados en las diferentes etapas de desarrollo del satélite, e incluso para distintos proyectos satelitales.

La verificación de los equipos de AOCS se realiza mediante la combinación entre el software de simulación dinámica e interfaces especiales que permiten la interacción con los equipos a bordo. En este sentido, agencias espaciales de renombre a nivel mundial han empleado poderosas herramientas de software como apoyo a las simulaciones, tal es el caso de MATLAB®, y PROSIM, las cuales han permitido la escalabilidad y reutilización del software en las diferentes etapas de desarrollo del satélite, pudiéndose emplear desde las pruebas en la fase de diseño, con la simulación total de los equipos del vehículo espacial, hasta en la fase de verificación, con la incorporación en las pruebas de lazo abierto y lazo cerrado del hardware a bordo junto con el SCOE de AOCS.

La continua mejora de los equipos de verificación del subsistema de control de órbita y actitud permitirá la realización de misiones satelitales exitosas con componentes a bordo validados por un SCOE confiable, preciso y robusto, por lo que es absolutamente necesario para las agencias espaciales a nivel mundial, enfocar sus esfuerzos en la mejora constante de las tecnologías de verificación.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Castro, "Teleinformática para Ingenieros en Sistemas de Información", 2da Edición. Barcelona: Editorial Reverté S.A, 1999.
- [2] A. Elfving, "The Attitude and Orbit Control of XMM" [En línea]. Holanda: ESA Directorate for Scientific Programmes, ESTEC, 1999. Disponible en: <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet100/ELFVING.pdf>

- [3] L. Hoffmann, C. Moreira, I. Lopes, M. Hidalgo, R. Lopes, "AMORE – An Accredited Model Repository Towards The Reuse On AOCS Project" [En línea]. Brasil: Brazilian Institute for Space Research (INPE), sin fecha. Disponible en:
https://dnnpro.outer.jhuapl.edu/Portals/35/ISSFD24_Abstacts/ISSFD24_abstract_S13-5_Hoffmann.pdf

- [4] A. Ayuso, "Usage of NI and European Space Agency (ESA) solutions into a PC-based system that controls a PXI rack where all interchanged signals with the real or emulated On Board Computer are simulated into the PXI controller." [En línea]. Sener Ingeniería y Sistemas, sin fecha. Disponible en: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11190>

- [5] P. Castellaneta, "MTG DHS SCOE Requirements Specification" [En línea]. Alemania: OHB System AG, 2012. Disponible en: http://emits.sso.esa.int/emits-doc/OHBSYS/MTG/16-3-DHSSCOE/MTG-OHB-PF-RS-0052-01_DHS_SCOE.pdf

- [6] M. Pigg, D. Dungate, T. Pattenden, B. Girouart, C. Bakouche, N. Perriault, F. Maingam, A. Bacchetta, B Polle, D. Theureau, "Development Of Generic AOCS Unit Simulation Models" [En línea]. Reino Unido: ESA-ESTEC, 2012. Disponible en: http://congrexprojects.com/docs/12c09_docs/poster-2_pigg.pdf?sfvrsn=2.

- [7] "Power SCOE Requirement Specification", GAIA.ASU.SP.ESM.00021, 2007 [En línea]. Disponible en: http://emits.sso.esa.int/emits-doc/ASTRIUMLIM/GAIA_POWERSCOE/GAIA.ASU.SP.ESM.00021.pdf

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE).

Al Dr. Francisco Varela.

Al Dr. Kien Hung.

A la Lic. Carla Rodríguez.