

PONIENDO A PUNTO LAS ESTRUCTURAS LABORATORIOS Y ENSAYOS EN TIERRA

EADS CASA Espacio

Los satélites y vehículos espaciales están sometidos a fuertes vibraciones y a aceleraciones tan elevadas que pueden llegar a deformar cualquier estructura. Por eso, resulta indispensable realizar ensayos en tierra que verifiquen el funcionamiento de los componentes y equipos en condiciones similares a las que sufrirán a lo largo de su vida operativa. Este artículo se centra en los trabajos llevados a cabo en EADS CASA Espacio para el desarrollo de un laboratorio para la medida de deformaciones micrométricas y la verificación de instrumentos ópticos espaciales.

Las condiciones ambientales a las que se ven sometidos los vehículos espaciales son muy agresivas. Un satélite ha de sobrevivir a las cargas de lanzamiento (aceleraciones elevadas, vibraciones intensas, choques y presión acústica) y, una vez en órbita, operar correctamente en el entorno espacial (ausencia de gravedad, alto vacío, variaciones térmicas, radiaciones ionizantes y meteoroides). Por esa razón, la selección de los materiales y el diseño estructural de los instrumentos y equipos resulta de vital importancia en el campo aeroespacial, ya que será necesario asegurar prestaciones tales como alta rigidez y resistencia para poder soportar el lanzamiento, o estabili-

dad dimensional frente al entorno de vacío térmico orbital.

Una de las competencias de EADS CASA Espacio es el desarrollo (diseño, fabricación y verificación) de estructuras tanto de lanzadores como de satélites. Ya en la década de los 80 la por entonces División Espacio de CASA se manifestó como una de las referencias europeas en el diseño y fabricación de estructuras de alta estabilidad.

Se trata de estructuras utilizadas para la realización de instrumentos que no admiten prácticamente deformación para su correcto funcionamiento. Muchas de ellas

están basadas en el uso de materiales compuestos, a base de fibra de carbono embebida en resina, matriz metálica o cerámica. La instrumentación óptica es la que más demanda el uso de este tipo de estructuras (telescopios de observación estelar y de la Tierra, interferómetros, sensores ópticos), aunque también se utilizan en reflectores de antenas de satélites de telecomunicación o sensores de gravedad, entre otros.

A finales de los 80, una de las carencias de la División Espacio de CASA era la imposibilidad de verificar las estructuras de alta estabilidad que diseñaba y fabricaba. Por ello, se planteó el reto de desarro-

llar un laboratorio que permitiera medir las prestaciones de estabilidad dimensional de dichas estructuras. De esta forma, se dotaría de un importante valor añadido a tal tipo de productos: la posibilidad de entregarlos al cliente verificados experimentalmente.

El planteamiento del problema

Como ya se ha dicho, son muchas las cargas a las que está sometido un satélite y, por tanto, muchas las causas que pueden generar deformación de una estructura. Una de las más importantes es la variación de temperatura que se produce en los elementos del satélite debido a su distinta orientación respecto a las fuentes de radiación térmica (sol, espacio profundo y albedo terrestre) en su recorrido orbital.

La temperatura de los componentes en el exterior del satélite (como es el caso de los reflectores de las antenas de telecomunicación) puede llegar a variar hasta 300 °C (entre +120 °C y -180 °C), mientras que los elementos interiores varían mucho menos, unos 100 °C (entre +60 °C y -40 °C) al no estar directamente sometidos a la radiación térmica exterior. En el caso de instrumentos ópticos, la variación de temperatura suele ser mucho menor, en torno a 50 °C (entre +40 °C y -10 °C) gracias al control térmico de que se les dota.

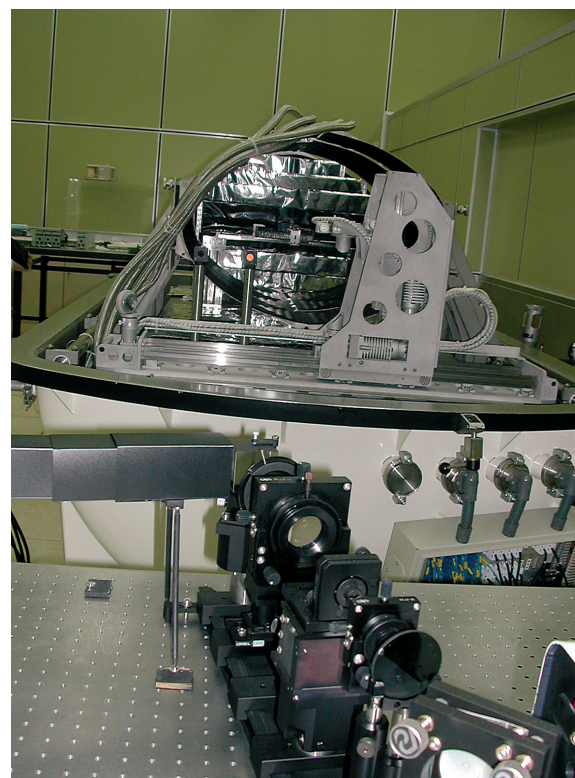
Por otro lado, para ser embarcado en un satélite, un instrumento óptico ha de alinearse en tierra antes del lanzamiento y este alineamiento se ha de mantener durante toda la vida operativa de la misión para la que se ha diseña-

do. La estabilidad exigida depende del tipo de instrumento. Uno de los casos más críticos son los telescopios, en los que la distancia entre espejos debe mantenerse, respecto a su posición nominal, en el rango de las micras (10^{-6} m).

Un análisis de las dimensiones de los instrumentos, las estabilidades requeridas y las variaciones del entorno ambiental nos lleva a la conclusión de que las estructuras deben diseñarse para asegurar estabilidades, frente a variaciones térmicas, entre 1 y 100 micras. Ello conduce a la utilización de materiales de coeficiente de expansión térmica, $\alpha = \Delta L / (L \cdot \Delta T)$, del orden de, o inferiores a, 10^{-6} m/(m·K).

Para poder verificar las prestaciones de estabilidad dimensional de tal tipo de estructuras, se necesita una técnica de medida con precisión submicrométrica, lo que implica el uso de métodos sin contacto. Como de lo que se trata es de medir variaciones de longitud, y no longitudes absolutas, lo más adecuado es hacer uso de técnicas interferométricas, y es aquí donde se manifiesta el reto más complejo.

La interferometría es una técnica muy potente para la realización de medidas diferenciales micrométricas, ya que es capaz de asegurar resoluciones de hasta el nanómetro (10^{-9} m). Sin embargo, la interferometría exige una superficie de trabajo muy estable, es decir, requiere aislamiento sísmico. Por otro lado, mientras que los especímenes objeto de ensayo deben estar bajo entorno de vacío térmico, la interferome-



→ Verificación de la estabilidad dimensional de la estructura del satélite GOCE de la ESA. EADS CASA Espacio

tría exige el uso de elementos que son claramente incompatibles con vacío y entornos térmicos variables: un láser estabilizado en frecuencia y una cámara digital para recepción de imagen.

Con todo lo anterior, el desarrollo de la instalación de ensayos que se planteaba debería permitir:

- controlar un entorno de vacío térmico variable en los especímenes objeto de ensayo
- configurar una o varias cavidades interferométricas en las estructuras en función de las prestaciones a verificar
- asegurar aislamiento sísmico
- por último, instalar la óptica y los ⇒

Son muchas las cargas a las que está sometido un satélite y, por tanto, muchas las causas que pueden generar deformación de una estructura

equipos auxiliares requeridos por la técnica interferométrica fuera del entorno de vacío térmico.

La solución

Creación del entorno ambiental

El entorno de vacío se crea en el interior de una cámara de vacío, dotada con un equipo de bombeo que permite alcanzar una presión de hasta 10^{-5} mbar ($1\text{mbar} \approx 10^{-3}$ atm). Para facilitar los montajes de ensayo, la cámara de vacío se abre por su generatriz, pudiendo retirarse su parte superior. La parte inferior es fija y lleva todas las conexiones.

Para proporcionar el ambiente térmico controlado sobre los especímenes objeto de ensayo existe un conjunto de camisas térmicas que se pueden configurar de forma modular. Así, el ambiente térmico, que se configura en el interior de la cámara de vacío y es exclusivamente radiativo, se puede adaptar a cada ensayo en función de la forma y dimensión del espécimen y de las prestaciones a verificar. El controlador (tipo PID) tiene 4 grados de libertad, lo que permite crear gradientes térmicos a voluntad. Los gradientes térmicos son uno de los factores más degradantes de la estabilidad dimensional. El rango de temperaturas que se puede alcanzar está entre -50°C y $+100^{\circ}\text{C}$.

El aislamiento sísmico

En el interior de la cámara de vacío se instaló una mesa óptica que constituye la superficie de montaje de las estructuras a verificar. La mesa óptica se apoya sobre un bloque sísmico, el cual permite aislar la superficie de trabajo de las perturbaciones exteriores (aquellas que provienen del exterior de la cámara de vacío). La mesa óptica tiene su propio sistema amortiguador para minimizar las perturbaciones de la cámara de vacío. De

esta forma la superficie de montaje alcanza la estabilidad requerida por la interferometría.

La técnica interferométrica

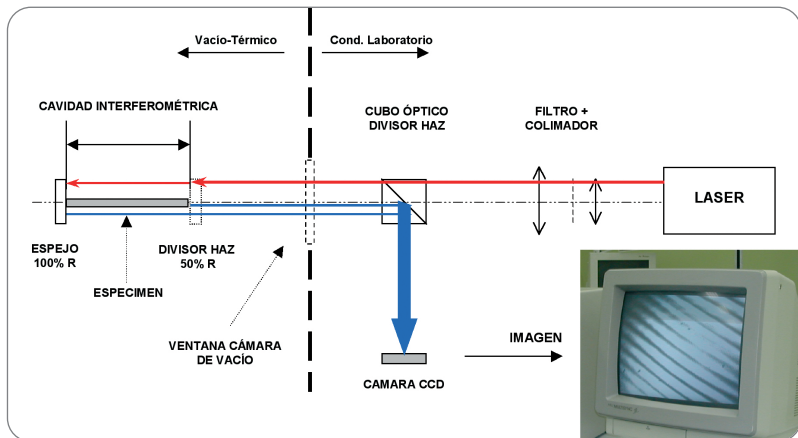
Aunque se pueden configurar distintos tipos de interferómetro, el más adecuado para la medida de distorsión axial es un interferómetro tipo Fizeau. Tal interferómetro da como resultado una imagen de franjas paralelas y equidistantes, que se caracterizan por tres parámetros: interfranja, inclinación y fase.

Los parámetros de la imagen dependen de la posición relativa entre los espejos que forman la cavidad interferométrica. Cuando el espécimen se deforma, los espejos cambian su posición relativa y por tanto la imagen cambia. Midiendo la variación de

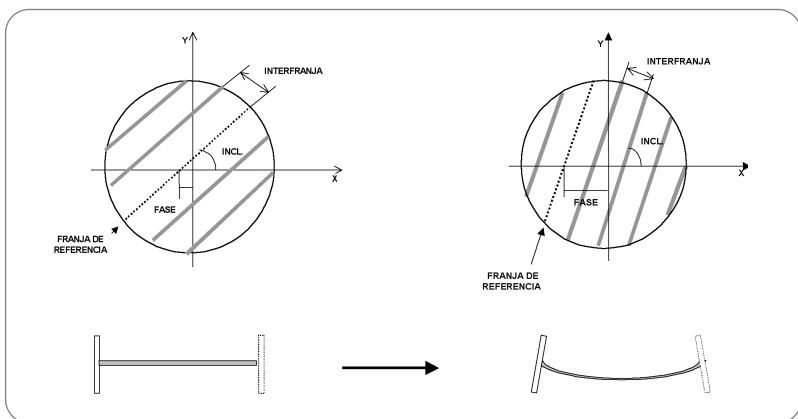
los parámetros de la imagen se puede determinar la deformación sufrida por el espécimen.

La calidad opto-mecánica y el procesado de imagen (desarrollado a medida) permiten alcanzar una resolución en la medida de deformación axial de $0,03$ mm, para un rango de deformaciones de entre 1 mm y 500 mm.

Con excepción de las cavidades interferométricas, todos los componentes ópticos necesarios (láser, óptica auxiliar y cámara de recepción de imagen) se han instalado en una mesa óptica, soportada por el bloque sísmico, fuera de la cámara de vacío. El acceso óptico entre el interior de la cámara de vacío y el exterior se hace a través de las ventanas de la «tapa» de la cámara de vacío.



→ Esquema óptico del interferómetro para la medida de deformación axial



→ Imagen interferométrica

La ubicación

Dadas las características del sistema, resultó imprescindible su ubicación en un área limpia. La instalación es una sala de clase 10.000, con temperatura y humedad relativa controladas.

El resultado

Teniendo en cuenta la técnica de medida, la instalación de ensayos se denominó «Sistema Óptico de Medida». Su acrónimo OMS proviene de las siglas en inglés y así se le conoce en el sector espacial europeo.

Aunque el objetivo inicial del sistema era la medida de distorsiones micrométricas, actualmente se puede decir que el OMS es un laboratorio óptico con capacidad para trabajar en un ambiente de vacío térmico.

El contexto del desarrollo

Los requisitos funcionales básicos del OMS fueron elaborados por la ESA. El desarrollo del sistema fue una inversión de CASA, parcialmente financiado por el INI y el CDTI. Siempre que fue posible, se involucró a la industria española en la fabricación de componentes.

El desarrollo del OMS duró casi 4 años, desde mediados de 1989 hasta marzo de 1993, en que estuvo completamente operativo.

Aplicaciones y uso del laboratorio

Desde 1993 el OMS se ha utilizado en gran cantidad de proyectos, tanto de desarrollo como de aplicación. Uno de los primeros trabajos consistió en una serie de ensayos para la medida del coeficiente de

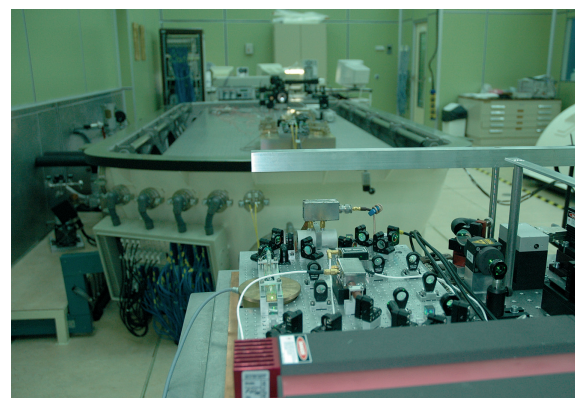
expansión térmica de los materiales seleccionados para la estructura de un telescopio militar. Con el tiempo, este tipo de ensayos se ha estandarizado para distintos tipos de probetas: planas, tubos y configuraciones en «sándwich».

Aunque conceptualmente el OMS no ha variado desde su desarrollo, la demanda de distintos tipos de ensayos lo ha hecho evolucionar, fundamentalmente en el desarrollo e implantación de nuevas técnicas de medida. Actualmente, el OMS cuenta con las siguientes capacidades:

- Medida del coeficiente de expansión térmica.
- Verificación de la estabilidad dimensional de muy distintos especímenes, tanto por sometimiento a un entorno de vacío (pérdida de humedad de materiales higroscópicos), como por excursiones y gradientes térmicos.
- Ejecución de ensayos funcionales de equipos de satélites en un entorno de vacío térmico.
- Verificación de la estabilidad del frente de onda de elementos ópticos.
- Medidas de deformación angular estructural, aplicando defletoimetría óptica.

Además del uso en proyectos internos de EADS CASA Espacio, el OMS ha sido utilizado por instituciones europeas tales como la ESA y el CERN, por la industria espacial europea (Aerospatiale, Alenia, Alcatel, Dornier, Bertin, MMS...) y por centros de investigación españoles (IAC, CAB, Universidad Miguel Hernández y Universidad de Cantabria).

Por último, cabe reseñar uno de los



→ Montaje para la verificación de prestaciones de sensores ópticos de precisión nanométrica. EADS CASA Espacio

ensayos más recientes realizados: la verificación de prestaciones de los primeros prototipos de sensores ópticos de alta precisión (*High Precision Optical Metrology*). Dichos sensores están siendo desarrollados por la ESA para ser aplicados en el vuelo de satélites en formación. Se trata de una de las tecnologías más punteras que existe en el mundo espacial, pues deben ser capaces de medir la posición relativa y absoluta entre satélites con precisión nanométrica (10^{-9} m). Uno de los usos por excelencia de estos sensores será la futura misión *Darwin*, que se concibe como una flotilla de satélites para configurar un interferómetro capaz de detectar planetas similares a la Tierra. ■

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Gonzalo Galapienso Calatayud, responsable del Departamento de Tecnología y Desarrollo de CASA hasta el año 1998. Sin su constante apoyo e inestimable colaboración, el desarrollo del Sistema Óptico de Medida no habría llegado a buen puerto.

Isabel Cabeza Vega es doctora en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. En 1989 se incorpora a EADS CASA Espacio, donde actualmente es responsable de la Sección de Proyectos Avanzados.

Un instrumento óptico ha de alinearse en tierra antes del lanzamiento y este alineamiento se ha de mantener durante toda la vida operativa de la misión