

## CASO PRÁCTICO

# El radiómetro de microondas MWR de Sentinel-3: Nuestra contribución al éxito de Copernicus

Palacios, M.A.<sup>\*1</sup>, Bergadà, M.<sup>1</sup>, González, R.<sup>1</sup>, Gamonal, A.<sup>1</sup>, García Fernández, J.L.<sup>1</sup>, Camacho, Y.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> EADS CASA Espacio, Avda. Aragón, 28022 Madrid, España.

---

**Resumen:** El radiómetro MWR, desarrollado por EADS CASA Espacio, constituye la misión topográfica de Sentinel-3 (S3) junto al radar altímetro SRAL. Su función es la generación de información auxiliar para la corrección troposférica de las medidas del SRAL. Sus datos también pueden servir para caracterizar magnitudes físicas del suelo y la criosfera, así como para la evaluación de balances energéticos. El MWR es un radiómetro de inyección de ruido (NIR) que funciona a dos frecuencias (23,8 y 36,5 GHz) e incorpora una bocina para la obtención de la temperatura de brillo del cielo como medio de calibración autónoma.

**Palabras clave:** NIR, calibración, precisión, resolución radiométrica.

## Sentinel-3 MWR Microwave Radiometer – Our contribution to the success of the Copernicus programme

**Abstract:** The MWR builds, together with the SRAL altimeter, the S3 topography mission. The MWR, developed by EADS CASA Espacio as prime contractor, provides information for tropospheric path correction of SRAL measurements. MWR data can also be used for determining surface emissivity and soil moisture over land, surface energy budget investigations and ice characterization. The MWR instrument is a Noise Injection Radiometer (NIR), working at two frequencies (23.8/36.5 GHz), embarking a dual frequency horn antenna pointing to the cold sky for embedded autonomous calibration.

**Key words:** NIR, calibration, accuracy, radiometric resolution.

---

## 1. Introducción

Varias misiones de las últimas décadas han embarcado radiómetros de microondas para la extracción de parámetros atmosféricos. Tras los radiómetros de ERS1/2 y ENVISAT de la ESA (Eymard, 1994; Guijarro, 2000; L'Abbate, 2003), el S3 MWR, desarrollado por EADS CASA Espacio como parte de la misión topográfica de S3 (Aguirre, 2007; Mavrocordatos, 2007; Klein, 2009), es un radiómetro de inyección de ruido (NIR) que funciona en dos

bandas de frecuencia (23,8/36,5 GHz), con sendas secciones nominal y redundante, con control e integración digitales. Para temperaturas de antena por encima de la carga de referencia, funciona como un radiómetro Dicke convencional. Incluye una bocina que mira al espacio profundo y sirve para su calibración absoluta en vuelo, incorporada a la propia operación del instrumento.

Este artículo describe someramente el diseño del MWR (ver Bergadà, 2010 para más detalles), su

\* Autor para la correspondencia: [MiguelAngel.Palacios@astrium.eads.net](mailto:MiguelAngel.Palacios@astrium.eads.net)

principio de funcionamiento, la filosofía de desarrollo, la calibración en tierra y las prestaciones obtenidas en la campaña de ensayos del modelo PFM.

## 2. Diseño del sistema

El MWR se compone del REU (*Radiometer Electronics Units*), un subsistema de antena, la estructura, y los elementos de control térmico. Todos los elementos del sistema cuentan con una sección nominal y otra redundante, excepto la antena.

El subsistema de antena, de polarización lineal, consiste en un reflector de observación que apunta al nadir, más la bocina de calibración dirigida hacia el espacio profundo. Sus salidas llegan a un conmutador en guía (MSA) por medio de cuatro guías de onda.

El REU está compuesto por el RFFE (*RF Front-End*), el RPM (*Radiometer Processing Module*), y el cableado de conexión. Un conjunto de termistores distribuidos por todo el instrumento permiten obtener de manera precisa la temperatura física del RFFE y la antena, para así compensar los efectos del ruido térmico. La telemetría científica y de *housekeeping* se envía a la plataforma sirviéndose de un bus redundado MIL-1553.

La Figura 1 muestra la configuración física del MWR. La estructura está fabricada con paneles de fibra de carbono y núcleo de aluminio, logrando buenas características de rigidez y resistencia con una masa reducida. El control térmico hace uso de mantas MLI, termistores, termostatos, calefactores y un radiador. El objetivo es mantener al RFFE y al RPM a una temperatura estable, y a la vez minimizar el gradiente térmico en las guías.

### 2.1. Funcionamiento del MWR

El MWR es un radiómetro de inyección de ruido (NIR) digital empleado para la obtención de la temperatura de brillo de la escena observada (la superficie terráquea a través de la atmósfera). El funcionamiento del instrumento en dos bandas de frecuencia próximas a la llamada línea del vapor de agua permite estimar y corregir la influencia que el vapor de agua atmosférico tiene en las medidas obtenidas por el radar altímetro a bordo de Sentinel-3.

Según el principio de operación de un radiómetro NIR, la inyección de ruido mitiga el efecto de

las inestabilidades a medio y largo plazo. El ruido capturado en ambos canales (23,8/36,5 GHz) se compara con sendas cargas Dicke cuya temperatura ( $T_{ref}$ ) es medida con una elevada precisión. El bucle radiométrico inyecta una fracción de la potencia producida por una fuente de ruido ( $\eta \cdot T_n$ ) para igualar las contribuciones de la carga Dicke, con la suma de la escena observada y la potencia de la fuente de ruido ( $T_a + \eta \cdot T_n$ ).

El lazo de control integra estas contribuciones durante un ciclo Dicke (~12,76 ms), y estima el ruido a inyectar en el siguiente período. Este proceso se repite y se integra durante 12 ciclos Dicke. El valor integrado de  $\eta$  forma parte de la telemetría científica. Así, la temperatura de antena se puede obtener de parámetros conocidos:

$$T_a = T_{ref} - \eta \cdot T_n \tag{1}$$

Donde  $\eta$  es la fracción de ruido inyectado.  $T_n$  se obtiene periódicamente con la bocina de calibración.

(1) sólo se puede usar si  $T_a < T_{ref}$ . Para escenas muy calientes, o si el receptor está frío, el instrumento no puede encontrar el equilibrio y funciona en modo Dicke no equilibrado (DNB), en el que  $T_a$  se obtiene a partir de la tensión de error del bucle ( $V_e$ ), que es la diferencia entre la potencia integrada en el primer y segundo semiperíodo Dicke:

$$V_e = G \cdot (T_a - T_{ref}) \Rightarrow T_a = \frac{V_e}{G} + T_{ref} \tag{2}$$

Donde G es la ganancia del receptor, también obtenida periódicamente gracias a la bocina de calibración. El valor integrado de  $V_e$  se incluye igualmente en la telemetría científica. El hecho de que la ganancia del receptor sea susceptible de sufrir variaciones a corto plazo hace que este modo de funcionamiento sea intrínsecamente menos preciso y estable que el modo NIR, que será el más habitual a lo largo de la vida del instrumento.

#### 2.1.1. Frecuencia Dicke y mitigación de RFI del SRAL

El MWR comparte el espectro con el radar SRAL, que opera en modo SAR (con una BRF ~78 Hz) o en modo LRM (PRF ~1.923 Hz). El MWR implementa una novedosa estrategia para mitigar de manera dinámica posibles interferencias de los pulsos de alta potencia procedentes del SRAL:

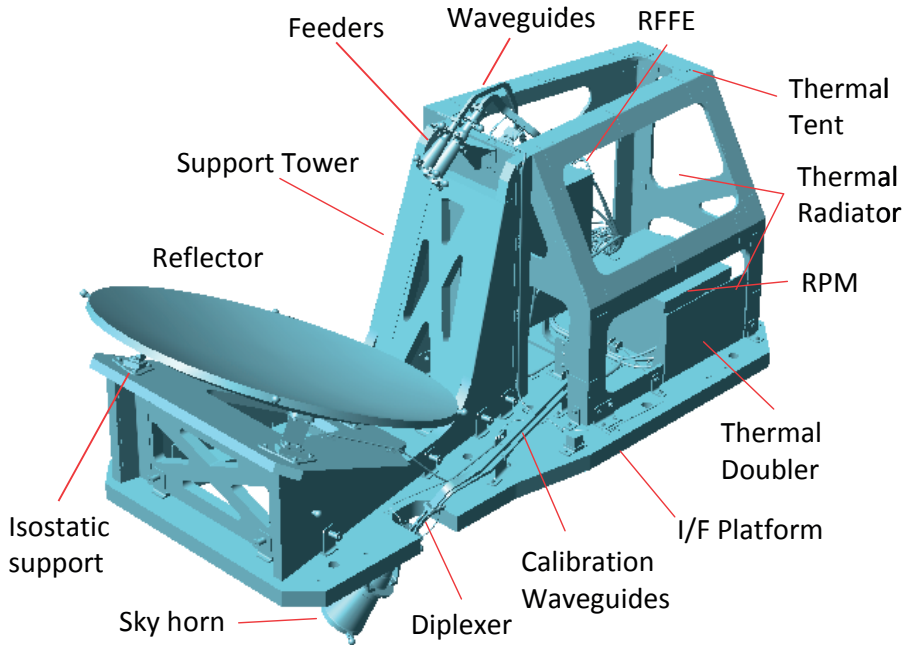


Figura 1. Configuración física del S-3 MWR.

**Modo SAR** – el reloj Dicke se sincroniza con las ráfagas del radar (es decir, con su señal *blanking*), para evitar interferencias que lleguen al receptor por el camino de antena del radiómetro. Así, durante los 4,38 ms en que el SRAL está emitiendo una ráfaga de pulsos, el MWR hace coincidir su funcionamiento con la observación de las cargas Dicke (por lo tanto, presentando un alto aislamiento en el camino de radiofrecuencia procedente de la antena, minimizando así la posibilidad de las interferencias).

**Modo LRM** – Cuando un pulso radar, de una duración aproximada de 55  $\mu$ s, cae en el semiperíodo de observación por la antena, el RPM descarta estas muestras, lo que supone cierta degradación de la resolución radiométrica.

El MWR recibe las señales de *blanking*, trenes de pulsos empleados para discernir el modo de funcionamiento del SRAL. Estas señales condicionan la selección de la frecuencia de Dicke, que se aproximará tanto como sea posible a la frecuencia SAR. Así, el período de integración dura del orden de 153 ms. La frecuencia Dicke es programable en vuelo.

## 2.2. Subsistema de antena

**Antena Principal** – La antena del MWR es un reflector *offset* parabólico fabricado en CFRP, con una apertura de 600 mm. Tiene una capa de *kapton* aluminizado para minimizar las pérdidas óhmicas. El reflector es iluminado por dos bocinas alimentadoras cónicas, cada una de ellas correspondiente a un canal de frecuencia.

Las huellas de las antenas en tierra tienen unos 20 km de diámetro, y se sitúan bajo la trayectoria del satélite, separadas  $\pm 1,95^\circ$  ( $\pm 25$  km) respecto del nadir. La diferencia de apuntamiento entre ambos canales en dirección perpendicular a la trayectoria del satélite es menor que  $0,025^\circ$ , lo que permite una correcta geolocalización de la huella observada por el radiómetro sobre la traza recorrida por el satélite proyectada en la superficie terrestre.

**Bocina de calibración** – La referencia fría para calibración es obtenida por una bocina que apunta hacia el espacio profundo. El *Sky Feeder Assembly* (SFA) está formado por una bocina corrugada para los dos canales, más un diplexor y un soporte mecánico. Con este diseño y su ubicación, nos

aseguramos de que más de un 99,9% de la energía recibida por la bocina provenga del espacio profundo.

### 2.3. Radiometer Electronic Units (REU)

**RFFE** – El RFFE contiene un módulo por canal, compuesto por el MSA, y un conjunto redundado de receptor, carga de referencia y fuente de ruido.

El MSA permite seleccionar entre sección nominal y redundante, así como entre el camino de observación y el de calibración. Sus *drivers* están redundados.

Las fuentes de ruido se componen de un diodo y dos conmutadores PIN en cascada, lo que garantiza un elevado aislamiento cuando no se selecciona la inyección de ruido.

Cada receptor se compone de un amplificador de bajo ruido, un convertidor ( $FI = 2,5$  GHz), y etapas de amplificación y filtrado que llevan a una ganancia global de unos 65 dB. Finalmente, las señales de vídeo para el RPM se obtienen con un detector cuadrático y un filtro paso bajo (50 kHz).

**RPM** – Trabaja en redundancia fría. Recibe las señales de vídeo de los canales de 23,8 y 36,5 GHz. Son digitalizadas a 100 kHz, y el bucle radiométrico las integra para calcular el nivel de ruido a inyectar. El RPM controla los conmutadores del MSA, de la carga Dicke y de la fuente de ruido. Asimismo, obtiene las temperaturas del instrumento, integrando toda esta información en la telemetría científica y de *housekeeping*.

Esta unidad actúa como interfaz TM/TC con el satélite, y ejerce el control térmico activo, controlando las líneas de calefactores para alcanzar las temperaturas objetivo configuradas por medio de telecomandos.

Finalmente, los convertidores de potencia del RPM distribuyen líneas de tensión secundaria para el RFFE y para uso interno.

### 2.4. Diseño termo-mecánico

Los paneles de CFRP/Al del MWR permiten cumplir con exigentes requisitos de rigidez, resistencia y ligereza (con una masa total inferior a 25 kg), así como de estabilidad en el apuntamiento bajo elevadas cargas mecánicas y térmicas. El interfaz con la plataforma es un panel unido por medio de diez

insertos con arandelas térmicas y una MLI que garantizan el aislamiento térmico.

El REU se aloja en un habitáculo de fibra de carbono cubierto de MLIs, lo que permite tener un entorno homogéneo. El control del RPM mantiene a las unidades en torno a las temperaturas objetivo, procurando variaciones de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  a lo largo de la órbita. Para los modos no operativos, las líneas de supervivencia alimentan a calefactores controlados por termostatos que mantienen al MWR dentro del rango térmico de supervivencia.

El conjunto se cubre con MLIs, excepto en el caso de la cara +Y del habitáculo, cubierta por un radiador de *SSM ITO Silver Teflon*, que proporciona la interfaz de radiación con el entorno.

## 3. Plan de desarrollo

El plan de desarrollo del MWR busca garantizar las prestaciones funcionales, radiométricas y termomecánicas óptimas en el instrumento, minimizando al mismo tiempo los riesgos técnicos en las etapas más tempranas del desarrollo.

El modelo estructural (**SM**) permite la calificación del instrumento en lo referente al alineamiento, la estabilidad de apuntamiento, resistencia y rigidez.

Los modelos **EQM** del REU permiten ensayar las prestaciones eléctricas, funcionales y radiométricas por medio de modelos equivalentes, no de vuelo, de las unidades.

El modelo **PFM** lleva a la calificación y caracterización completas del MWR. La campaña PFM comprende ensayos *protoflight* desde el nivel de unidad. La campaña PFM del instrumento incluye propiedades másicas, ensayos de calificación de vibración, un ensayo combinado de balance y ciclado térmico, y finalmente el ensayo de calibración, detallado más adelante. Un segundo modelo de vuelo (**FM2**) está siendo sometido en el momento de la edición de este artículo a ensayos de aceptación. En este caso se obviará el balance térmico, pero sí se incluirá una calibración completa.

## 4. Prestaciones radiométricas, calibración y ensayos

La calibración absoluta del MWR es clave para asegurar unas prestaciones óptimas. La bocina de calibración permite calibrar en vuelo, pero antes

del lanzamiento es necesaria una caracterización completa en tierra. Este ensayo será el punto de partida para la fase de *commissioning*, que fijará la configuración de vuelo del radiómetro.

#### 4.1. Modelo radiométrico

Se ha desarrollado un modelo radiométrico fijando el plano de referencia a la salida del conmutador de Dicke. Antes de este plano, las contribuciones de ruido térmico se compensan midiendo con precisión las temperaturas físicas y las pérdidas RF de los diferentes elementos. Con este objeto se disponen 24 termistores en el reflector, la bocina de calibración, las guías de onda, y diferentes elementos internos del RFFE hasta alcanzar el conmutador Dicke.

Las antenas se caracterizan en lo referente a su eficiencia, ángulos de apuntamiento, y contribuciones espurias a través de lóbulos secundarios.

La Figura 2 muestra de manera esquemática el modelo.

#### 4.2. Calibración en vuelo

Aun siendo los diodos de ruido unas fuentes estables, y existiendo una campaña de calibración en tierra, se prevén los siguientes modos de calibración en vuelo:

**Calibración absoluta** – tiene lugar con una frecuencia reducida (pueden transcurrir más de

3 órbitas entre calibraciones), durando un máximo de 15 s. Se divide en tres secciones: en la primera se observa el cielo en modo NIR (obteniendo  $\eta_{cal}$ ); sigue una observación del cielo forzando  $\eta=1$  (se obtiene una tensión error  $V_h$ ), y finalmente se fuerza  $\eta=0,5$  (con tensión error  $V_c$ ). De estos tres pasos se extraen los parámetros  $T_n$  y  $G$  para las ecuaciones (1) y (2). Hasta la siguiente ejecución de un período de calibración, estos valores permitirán la adecuada adquisición de datos tanto en modo NIR como en modo Dicke (DNB).

**Monitorizaciones** – Se produce al menos una vez cada 2,5 minutos, con una duración de hasta 0,5 s. Consiste en una mirada breve a través de la bocina de calibración para asegurarnos de que la operación de las fuentes de ruido es estable y no requiere de nuevas calibraciones. El resultado de una monitorización no se puede emplear como una nueva calibración de  $T_n$ , sino que ha de ser el indicativo de que todo va bien, o de que una calibración absoluta es necesaria.

En ambos casos, calibraciones y monitorizaciones se producen con una frecuencia y duración no fijas, y que pueden ser configuradas en vuelo.

#### 4.3. Calibración en tierra

Antes del lanzamiento es necesario llevar a cabo una calibración completa del radiómetro. Para ello se pueden observar escenas conocidas, como en el caso de la llamada calibración *tipping* (Xie, 2013), o bien usando cargas de ensayo (Maschwitz, 2013).

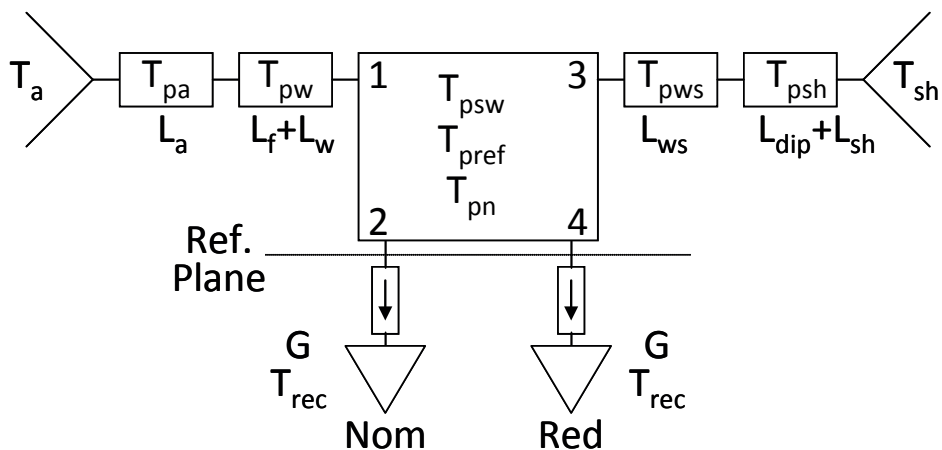


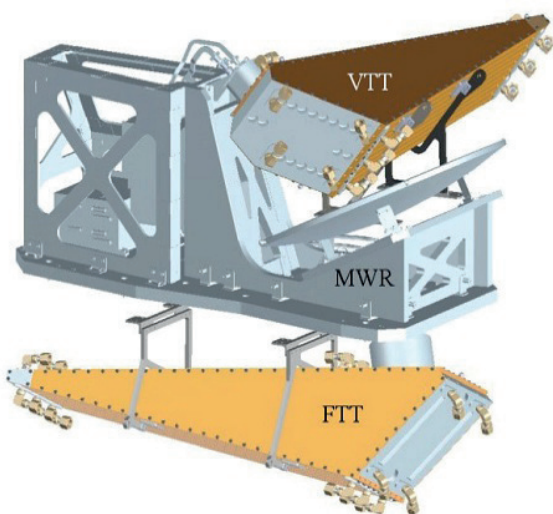
Figura 2. Modelo radiométrico del S-3 MWR.



Este tipo de cargas tienen una emisividad tan cercana como sea posible al 100%, lo que supone que su temperatura de brillo es igual a la temperatura física del cuerpo (comportándose, por tanto, como un cuerpo negro a las frecuencias de interés). Habitualmente, este tipo de cargas se construyen a base de agrupaciones de conos y pirámides anecoicas, refrigerados por medio de nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>). Esta disposición presenta problemas tales como los gradientes de temperatura en el material, la dificultad de ensayar a diferentes temperaturas...

En el caso del MWR se han construido dos cargas de calibración de idéntica geometría (Murk, 2012). Se trata de una cuña de cobre recubierta de material absorbente (ver Figura 3). La emisividad se obtiene por medio de la geometría del cuerpo: se consiguen múltiples reflexiones, y en cada una de ellas se produce una absorción parcial de la energía de la onda incidente. En último término, se consigue una adaptación muy elevada (por encima de los 60 dB) a las frecuencias de trabajo.

En el cobre se han mecanizado conductos por los que se suministra nitrógeno líquido. En una de las cargas (FTT – *Fixed Temperature Target*), el nitrógeno se mantiene a 77 K, y de este modo el cuerpo simula la observación del espacio profundo. La segunda carga (VTT – *Variable Temperature Target*) recibe un flujo de nitrógeno calefactado, que permite llevar el material a cualquier temperatura en el rango de 77 a 313 K. De este modo se puede obtener una calibración precisa del instrumento en



**Figura 3.** Representación esquemática de las cargas FTT y VTT en torno al MWR.

cualquier punto de su rango dinámico de funcionamiento. Cuatro termistores de platino sirven para medir con alta precisión la temperatura de cada uno de los cuerpos.

De la campaña de calibración, por lo tanto, se extraerán coeficientes de corrección de linealidad y de dependencia térmica de las fuentes de ruido. Llegar a una temperatura de escena de 313 K permitirá que esta calibración no sólo sea válida para el modo NIR, sino también para el DNB.

El ensayo de calibración se ha ejecutado en IABG (Ottobrunn, Alemania, ver Figura 4) como punto culminante de una campaña que ha incluido ensayos mecánicos, de compatibilidad electromagnética, balance y ciclado térmico, tanto a nivel unidad como a nivel instrumento.

Para la ejecución del ensayo se ha dispuesto el MWR dentro de una cámara de vacío térmico de 2 m de diámetro. El FTT y el VTT han recibido un constante suministro de LN<sub>2</sub> por medio de un conjunto de tuberías flexibles completamente envueltas en mantas térmicas MLI. La complejidad del montaje, y de la propia ejecución del ensayo, han convertido la calibración del radiómetro en uno de los hitos del desarrollo del instrumento. El ensayo ha durado seis días de ejecución ininterrumpida, a lo largo de los cuales el VTT y el RFFE se han llevado a diferentes temperaturas. Para todas las configuraciones, el VTT se ha declarado estable si los termistores mostraban variaciones de temperatura inferiores a 0,5 K/h, y una dispersión menor que 0,4 K. Las siguientes configuraciones se han ensayado (manteniendo siempre el FTT a 77 K):

- RFFE a 25°C, y VTT a 77-125-150-175-200-225-250-275-300-313 K
- RFFE a 33°C, VTT a 150-175-200-225-275-313 K
- Ensayo de estabilidad de 2 dos horas con el FTT a 77 K
- Con VTT a 150 K, el RFFE se ha variado de 10°C a 40°C en pasos de 5°C

La Figura 5 muestra las temperaturas del VTT y del FTT a lo largo del ensayo (gráfica superior). Se aprecian los diferentes escalones de estabilización del VTT. En la gráfica inferior se muestran las temperaturas del RPM, RFFE, y de las guías de calibración y de la antena principal. También en este caso

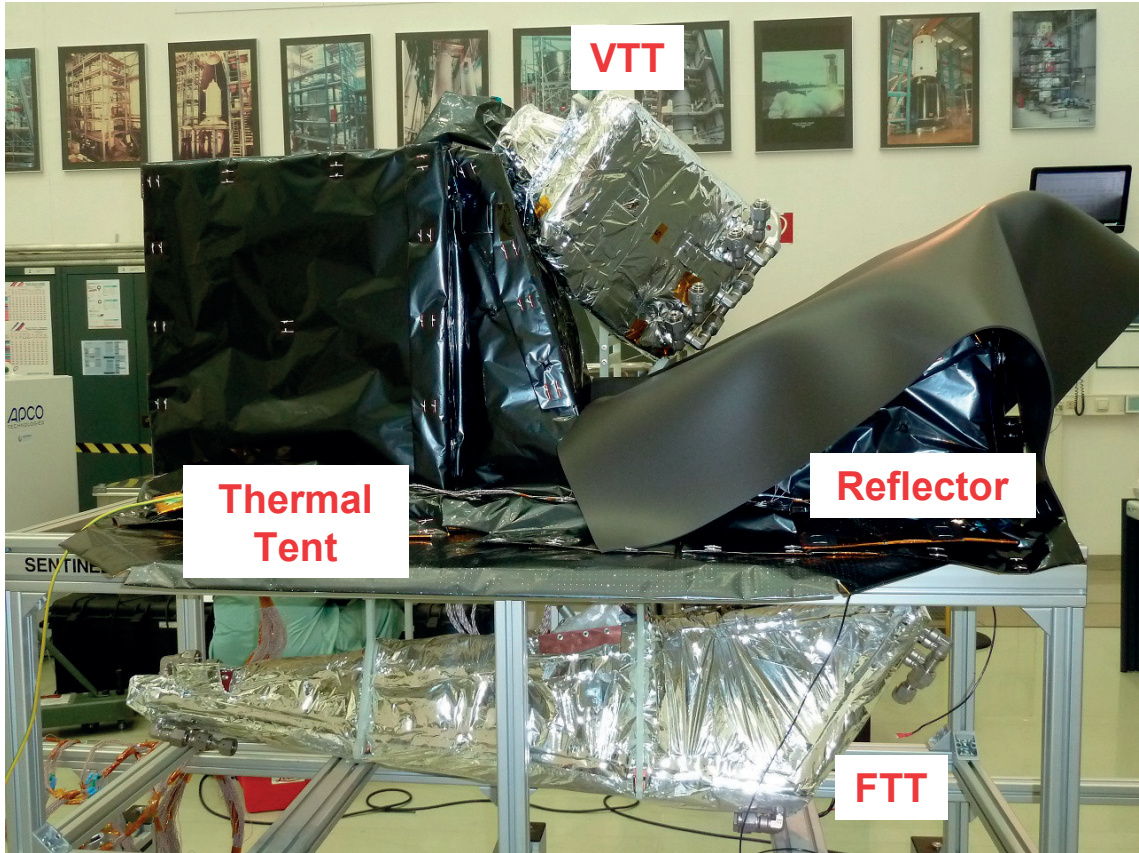


Figura 4. Preparación del ensayo de calibración en IABG.

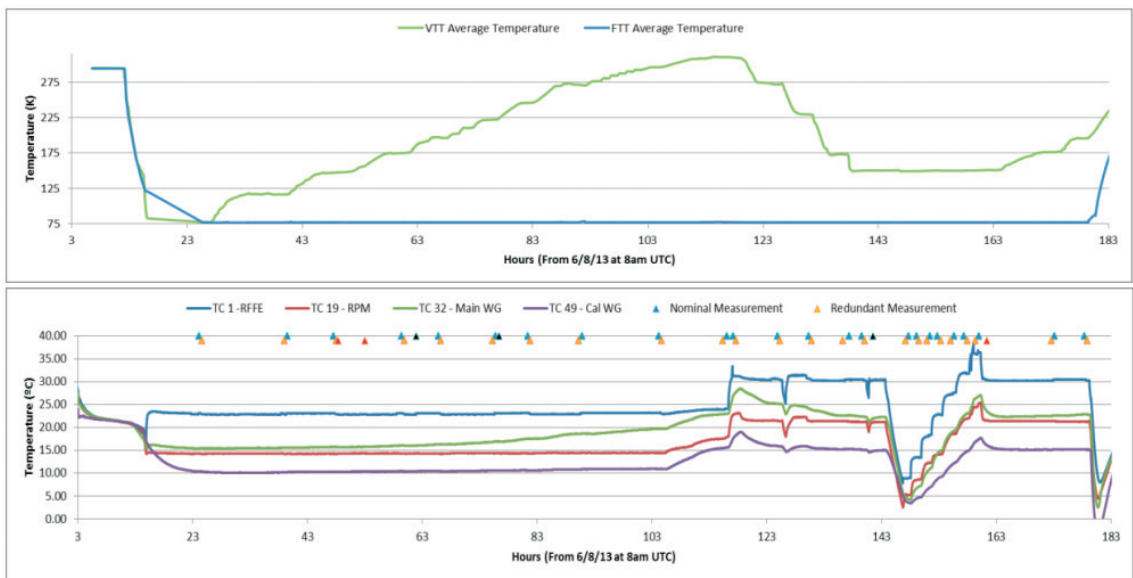


Figura 5. Temperatura del VTT y FTT a lo largo del ensayo de calibración (gráfica superior); diferentes temperaturas del MWR, incluyendo el RFFE, RPM, y guías de onda (gráfica inferior).

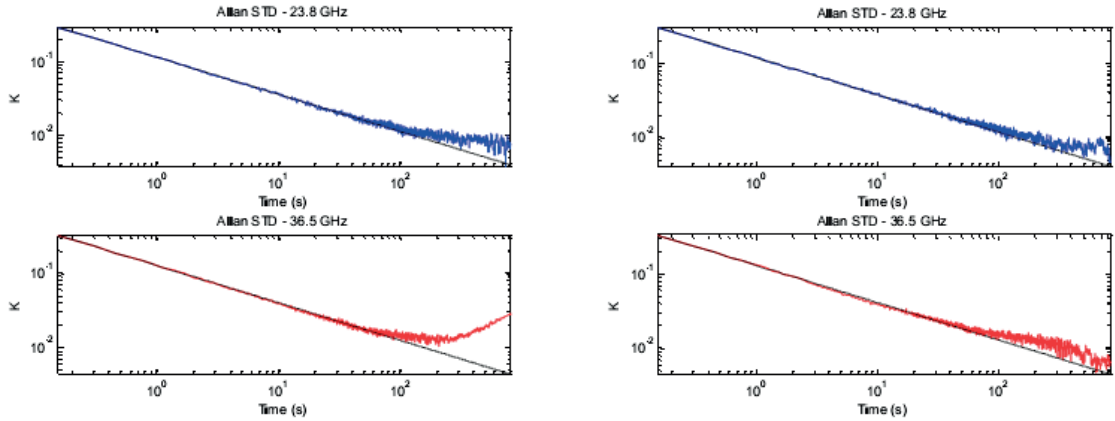


Figura 6. Varianza de Allan (FTT a 77K, RFFE a 25°C).

se observan los diferentes escalones a que ha sido llevado el instrumento.

#### 4.4. Resultados de la calibración

Tras la ejecución del ensayo y un minucioso procesamiento de los datos obtenidos, se llega a las siguientes conclusiones:

- El funcionamiento del radiómetro es casi idealmente lineal en las temperaturas de operación esperadas, por lo que no se espera que sea necesaria una corrección en este sentido
- La precisión obtenida tras la calibración para todos los canales (23,8 y 36,5 GHz, secciones nominal y redundante) es siempre mejor que 0,8 K para todo el rango dinámico de escena (ver Tabla 2)
- La resolución radiométrica (ver Tabla 2) se encuentra en el entorno de los 0,3 K, muy por debajo del requisito impuesto (0,6 K).
- La estrategia de mitigación del altímetro en modo LRM supone una degradación de la resolución radiométrica de un 20% - 30%, en línea con lo predicho por las simulaciones teóricas.

Tabla 1. Prestaciones generales del MWR

Parámetro	Prestaciones			
Masa	24,2 kg			
Consumo	Seguro:20 W / Inicialización:3 W / Operación:26 W			
Frec. Dicke	78,5 Hz (programable 76 – 80 Hz)			
Rango din.	2,7 K to 320 K (prestaciones garantizadas 150 K-313 K)			
Tiempo Int.	152,88 ms (programable 142,8 – 157,5 ms)			
BW	200 MHz			
Estab. frec.	180 kHz/°C (23,8 GHz)		220 kHz/°C (36,5 GHz)	
Precisión	< 0,8K			
Resolución	0,26 – 0,33 K			
Estabilidad	< 0,6 K			
	23,8 GHz		36,5 GHz	
Ef. Haz	93,6%		97,4%	
Huella	23,5 km		18,5 km	
SLL	<-36 dB		<-45 dB	
Apuntamiento	Along:	Across:	Along:	Across:
	1,99°	0,0°	-1,94°	0,0°



**Tabla 2.** Resumen de prestaciones radiométricas del MWR.

NIR Mode	Requirement	Nominal		Redundant	
		23,8 GHz	36,5 GHz	23,8 GHz	36,5 GHz
Max. abs. accuracy	Thresh. < 3 K	0,51 K	0,64 K	0,71 K	0,24 K
Avg. abs. accuracy	Goal < 1K	0,26 K	0,46 K	0,27 K	0,08 K
Avg. abs. accuracy (SAR)		0,26 K	0,45 K	0,27 K	0,10 K
Avg. abs. accuracy (LRM)		0,26 K	0,45 K	0,25 K	0,10 K
Max. interchannel acc.		0,51 K		0,56 K	
Avg. interchannel acc.	< 1,2 K	0,22 K		0,22 K	
Max. sensitivity	Thresh. < 0,6 K	0,28 K	0,34 K	0,30 K	0,34 K
Avg. sensitivity	Goal < 0,3 K	0,27 K	0,31 K	0,29 K	0,31 K
Avg. sensitivity (SAR)		0,28 K	0,31 K	0,29 K	0,32 K
Avg. sensitivity (LRM)		0,35 K	0,38 K	0,36 K	0,38 K
<b>DNB Mode</b>					
Max. abs. accuracy	Thresh. < 3 K	0,56 K	0,80 K	1,43 K	1,16 K
Avg. abs. accuracy	Goal < 1K	0,28 K	0,37 K	0,86 K	0,79 K
Max. sensitivity	Thresh. < 0,6 K	0,28 K	0,31 K	0,29 K	0,33 K
Avg. sensitivity	Goal < 0,3 K	0,25 K	0,27 K	0,26 K	0,29 K

La precisión no se ve afectada por esta estrategia de mitigación.

- En cuanto a la estabilidad a largo plazo (ver Figura 6), la resolución para los canales de 23,8 GHz mejora integrando resultados hasta los 500 segundos, llegando a resoluciones del orden de 6-8 mK. Para los canales de 36,5 GHz la estabilidad llega hasta 200 segundos, a lo largo de los cuales se puede mejorar la resolución hasta 11-12 mK.

## 5. Resumen de prestaciones

Dos tablas presentan de manera resumida las prestaciones del MWR. En la tabla 1, los caracteres en negrita expresan resultados ensayados, mientras que las otras cifras son estimaciones o resultados de modelos. La tabla 2 presenta un resumen de prestaciones radiométricas tras el ensayo de calibración del instrumento.

## Agradecimientos

Los autores querían agradecer el apoyo y la contribución por parte de los clientes del MWR (ESA y TAS-F), así como de los principales subcontratistas, TAS-E, CRISA, TAS-I, CDE, RYMSA, COBHAM, HVS, ABSL, APCO, IABG e ITD.

## Referencias

- Aguirre, M., Berruti, B., Bezy, J.L., Drinkwater, M., Heliere, F., Klein, U., Mavrocordatos, C., Silvestrin, P., Greco, B., Benveniste, J., 2007. Sentinel-3. The Ocean and Medium-Resolution Land Mission for GMES Operational Services. *ESA bulletin*, 131, 24-29.
- Bergadà, M., Brotons, P., Camacho, Y., Diez, L., Gamonal, A., García, J.L., González, R., Pacheco, A., Palacios, M.A., Klein, U., 2010. Design and development of the Sentinel-3 Microwave Radiometer. En: *Proceedings SPIE*, 7826, 78260M. doi:10.1117/12.864575
- Eymard, L., Le Cornec, A., Tabary, L., 1994. The ERS-1 microwave radiometer, *Int. J. Remote Sensing*, 15(4), 845-857. doi:10.1080/01431169408954120
- Guijarro, J., Auriol, A., Costes, M., Jayles, C., Vincent, P., 2000. MWR & DORIS-Supporting Envisat Radar Altimetry Mission, *ESA bulletin*, 104, 41-46.
- Klein, U., Borde, F., Berruti, B., Mavrocordatos, C. and the S3 Team. The Sentinel-3 Topography Payload. En: *Advanced RF Sensors and Remote Sensing Instruments 2009*, ARSI-09 Proceedings
- L'Abbate, M., Bombaci, O., Alberti, G., Femenias, P., 2003. ENVISAT-1 MWR, in flight functional and performance verification. En: *Proceedings of Envisat Validation Workshop*, Frascati (Italy).

- Mavrocordatos, C., Berruti, B., Aguirre, M., Drinkwater, M., 2007. The Sentinel-3 mission and its topography element. En: *Proceedings IGARSS 2007*, pp. 3529-3532
- Maschwitz, G., Löhnert, U., Crewell, S., Rose, T., Turner, D.D., 2013. Investigation of ground-based microwave radiometer calibration techniques at 530 hPa, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2641-2658. doi:10.5194/amt-6-2641-2013
- Murk A., Wylde, R., Bell, G., McNamara, A., Reveles-Wilson, J., Zivkovic, I., Dewell, R., de Maagt, P. 2012. Development of microwave calibration targets for upcoming ESA missions. En: *IGARSS 2012*, pp. 2949-2952. doi:10.1109/IGARSS.2012.6350707
- Xie, Y., Chen, J., Liu, D., Lv, C., Liu, K., Miao, J., 2013. Development and calibration of a K-Band ground-based hyperspectral microwave radiometer for water vapor measurements, *Progress In Electromagnetics Research*, 140, 415-438. doi:10.2528/PIER13050704