

RECOMENDACIÓN UIT-R RA.1750-0*

Planificación mutua entre el servicio de exploración de la Tierra por satélite (activo) y el servicio de radioastronomía en las bandas de 94 GHz y 130 GHz

(2006)

Cometido

Esta Recomendación describe las medidas que deben tomar el servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS) (activo) y el servicio de radioastronomía (SRA) para minimizar la posible influencia de los radares de cartografía de nubes del SETS (activo) en 94 GHz y 130 GHz sobre las observaciones del SRA en bandas adyacentes.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los actuales y futuros experimentos de cartografía de nubes mediante radares a bordo de satélites del servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS) (activo) en las bandas de 94 GHz y 130 GHz compartidas con el servicio de radioastronomía (SRA) cabe esperar que arrojen importantes resultados científicos sobre el clima mundial;
- b) que se espera que el SRA continúe estudiando importantes cuestiones científicas en las bandas de 94 GHz y 130 GHz compartidas con el SETS (activo);
- c) que en las longitudes de onda milimétricas, la ganancia de antena directiva disponible en el satélite y en las estaciones en el suelo del SRA es muy elevada, lo que aumenta las posibilidades de que se produzca un acoplamiento de haz principal a haz principal muy intenso entre la antena del transmisor del satélite y una antena del SRA;
- d) que para obtener los adecuados ecos del radar procedentes de los fenómenos atmosféricos, los radares en órbita del SETS (activo) requieren un valor de p.i.r.e. muy elevado que puede provocar daños físicos a los sensibles receptores del SRA en el caso de que se produzca el acoplamiento de haz principal a haz;
- e) que los instrumentos individuales del SRA pueden consistir en docenas o incluso centenares de antenas codirectivas, algunas de las cuales o todas pueden estar situadas dentro del haz principal de un satélite del SETS (activo) en un instante determinado, lo que multiplica enormemente las consecuencias de un encuentro de haz principal a haz principal;
- f) que en las longitudes de onda milimétricas la tecnología actual no permite la construcción de filtros de banda eliminada de alto rendimiento que presenten unas pérdidas de inserción suficientemente bajas dentro de la banda de paso deseada;

* La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones introdujo modificaciones redaccionales en esta Recomendación en 2017, de conformidad con la Resolución UIT-R 1.

g) que los receptores utilizados por el SRA en longitudes de ondas milimétricas deben utilizar la tecnología más avanzada a fin de que tengan la sensibilidad suficiente para llevar a cabo investigaciones astronómicas originales y que dicha tecnología permite actualmente una gama dinámica muy limitada con un umbral de saturación relativamente bajo;

h) que debido al elevado valor necesario de la p.i.r.e. del radar de cartografía de nubes, el acoplamiento de haz principal a lóbulo lateral entre el transmisor del satélite y la estación del SRA puede causar saturación en el receptor del SRA, impidiendo posiblemente las observaciones en una estación del SRA durante una parte significativa del tiempo en que el satélite del radar de cartografía de nubes activo se encuentra por encima del horizonte local;

j) que la tecnología actual permite equipar a las estaciones del SRA con sistemas receptores multielemento de plano focal con una plena sensibilidad de haz principal que subtiende 1 000 veces la zona angular de un receptor de un solo píxel,

considerando también

a) que por necesidad, los observatorios del SRA en ondas milimétricas funcionan con frecuencias compartidas con el SETS (activo) solamente en condiciones de cielo despejado y seco de manera que la atenuación atmosférica no proporciona protección a la estación del SRA contra el radar del satélite;

b) que es esencial una planificación mutua entre los operadores del SETS (activo) y los radioastrónomos para evitar daños en la instrumentación del SRA y mantener en la mayor medida posible la integridad de los datos tanto del SRA como del SETS (activo);

c) que el Grupo de Coordinación de Frecuencias Espaciales (SFCG) y el Comité Científico sobre Asignación de Frecuencias para Radioastronomía y Ciencias Espaciales (IUCAF) han desarrollado un procedimiento de planificación mutua¹ entre organismos miembros del SFCG y los observatorios de radioastronomía para que los radares de cartografía de nubes a bordo de vehículos espaciales puedan funcionar en la banda 94-94,1 GHz,

recomienda

1 que lo antes posible durante el ciclo de diseño de dicho sistema de radares de cartografía de nubes del SETS (activo), se establezcan contactos entre los diseñadores y operadores del SETS (activo), por un lado, y los emplazamientos de radioastronomía, por otro. La organización internacional IUCAF puede proporcionar el vínculo inicial entre los operadores del SETS y los posibles observatorios de radioastronomía que puedan resultar afectados;

2 que se mantenga un estrecho contacto entre los radioastrónomos y los operadores de los sistemas del SETS (activo) a lo largo de los ciclos de diseño y vida útil de todos los sistemas que vayan a compartir las bandas de 94 y 130 GHz, de manera que cada una de las partes sea consciente de los desarrollos pertinentes realizadas por la otra;

3 que el diseño y explotación de los sistemas que funcionan en cada servicio se lleve a cabo de manera que se tenga en cuenta la compartición en la mayor medida posible;

4 que en el diseño y explotación de tales sistemas se tengan en cuenta las consideraciones relativas a la compartición indicadas en el Anexo 1;

5 que en el diseño y explotación de las estaciones de ambos servicios se tenga en cuenta el ejemplo que figura en el Anexo 2 sobre la influencia que tiene sobre un instrumento que funciona en el servicio de radioastronomía un satélite que funciona en el SETS (activo).

¹ Véase la Resolución 24-2 del SFCG en: [https://www.sfcgonline.org/resolutions/RES_SFCG_24-2_\(94_GHz_allocation_use\).pdf](https://www.sfcgonline.org/resolutions/RES_SFCG_24-2_(94_GHz_allocation_use).pdf).

Anexo 1

Consideraciones relativas al diseño y explotación de sistemas del SETS (activo) y del SRA que van a compartir las bandas de 94 GHz y 130 GHz

Para el SETS (activo):

- Un sistema de radar activo debe diseñarse de acuerdo con las prácticas de ingeniería más adecuadas a fin de minimizar tanto las emisiones no deseadas como las emisiones fuera del eje procedentes de la antena del radar en los lóbulos laterales.
- En la medida de lo posible, un sistema del SETS (activo) debe diseñarse y explotarse de tal forma que se eviten las transmisiones dirigidas directamente a través de su haz principal a estaciones del SRA.
- Los operadores de un sistema del SETS (activo) deben asegurarse de que se presta toda la asistencia operativa posible a las estaciones del SRA, por ejemplo, dando información pertinente sobre detalles de los horarios orbitales del radar del satélite.

Para el SRA:

- Las estaciones del SRA deben diseñarse de tal forma que sus antenas no apunten directamente al radar en órbita, mediante una programación dinámica flexible de las observaciones o por otros medios.
- Las estaciones del SRA deben proporcionar los medios para proteger a sus receptores contra los daños físicos si es imposible evitar completamente los encuentros de los haces principales.
- En la medida de lo posible, y sin comprometer la capacidad de la estación del SRA, los sistemas del receptor del SRA deben diseñarse de manera que tengan una elevada tolerancia contra los daños que se producen al recibir transmisiones de alta potencia, y deben poseer una gama dinámica de valor tan elevado como sea posible.
- Las antenas del SRA deben diseñarse con los niveles de lóbulo lateral más bajos posibles de forma que puedan continuar las observaciones mientras el radar del satélite se encuentra por encima del horizonte local, aunque su antena no esté dirigida hacia la estación del SRA.
- Los sistemas de adquisición de datos del SRA deben diseñarse de modo que sean capaces de registrar o mostrar instancias de posible interferencia procedentes del radar en órbita, basándose en los parámetros operacionales conocidos del SRA y del satélite.
- El SRA debe continuar dedicando recursos a ampliar las posibilidades de las técnicas de reducción de la interferencia en RF en tiempo real o posteriores a la observación.

Anexo 2

Ejemplo de consideraciones relativas a la compartición que deben tenerse en cuenta en el diseño y explotación de los sistemas del SRA y del SETS (activo) en la banda de 94 GHz

El CloudSat e implicaciones para el Atacama Large Millimeter Array (ALMA)

Resumen

El observatorio Atacama Large Millimeter Array (ALMA) está siendo construido al norte de Chile y se convertirá en el principal radiotelescopio del mundo que trabajará con frecuencias de longitudes de onda milimétricas y submilimétricas. CloudSat es un radar a bordo de un satélite cuya antena está orientada hacia abajo, funciona en la banda de 94 GHz y se lanzará en 2005. El valor de PIRE de cresta del haz del radar es de 4×10^9 W aproximadamente, lo cual es suficiente para dañar a los receptores del ALMA situados en la superficie si sus antenas y las del radar en órbita se enfocan directamente entre sí. Aunque la probabilidad de que esto suceda es muy pequeña, el ALMA debe tomar algunas precauciones operativas para evitar que se produzcan daños y que se presenten datos contaminados por la interferencia del radar.

La instalación de radioastronomía ALMA

ALMA es un radiotelescopio internacional que funciona en las longitudes de onda milimétricas y submilimétricas instalado conjuntamente por Europa, América del Norte y Japón, en cooperación con la República de Chile.

Las características más importantes del observatorio ALMA son las siguientes:

- Hasta 64 antenas de 12 m de diámetro situadas a una altura de 5 000 m en el Llano de Chajnantor, Chile.
- Instrumento de presentación de imágenes en todas las ventanas atmosféricas entre 10 mm y 350 micras (31,3 GHz a 950 GHz).
- Configuraciones de sistemas de antenas con diámetros desde aproximadamente 150 m hasta 10 km.
- Resolución espacial de 10 miliarcos, 10 veces mejor que el telescopio espacial Hubble.
- Capacidad de presentar imágenes de fuentes de radiación de minutos de arco a grados, con una resolución de 1 segundo de arco.
- Velocidad de resolución por debajo de 0,05 km/s.
- Instrumento de presentación de imágenes rápido y flexible.
- Se trata del instrumento mayor y más sensible del mundo en longitudes de ondas milimétricas y submilimétricas.

La misión del radar de cartografía de nubes

CloudSat es el primer radar a bordo de un vehículo espacial que hace uso de la asignación de 94 GHz. Forma parte de la constelación «A-Train» que consta de cinco satélites, la mayoría de los cuales (aparte del CloudSat) son satélites de teledetección pasiva. En orden de formación orbital los satélites

son Aqua, Cloud Mapping Radar, Calipso, Parasol y Aura. Parasol, Aqua y Aura ya están en órbita y el propio CloudSat será lanzado en 2005. Todos los satélites tendrán órbitas similares dispuestas específicamente para que sus trazas en el suelo sean idénticas y estén separadas únicamente unos cuantos segundos de tiempo. Los detalles concretos de la misión científica son los siguientes:

CloudSat es un satélite experimental diseñado para medir la estructura vertical de las nubes desde el espacio. Una vez lanzado, el CloudSat seguirá una órbita en formación como parte de una constelación de satélites (la A-Train) que incluye a los satélites Aqua y Aura de la NASA, a un satélite de detección y localización por ondas luminosas (LIDAR) de la NASA-CNES (CALIPSO) y a un satélite CNES que incorpora un polarímetro (PARASOL). Una característica única que aporta el CloudSat a esta constelación es la capacidad de volar en una órbita muy precisa permitiendo que los campos de visión del radar CloudSat se superpongan con la huella del lidar CALIPSO y las otras mediciones de la constelación. La precisión y casi simultaneidad de esta superposición crea un sistema de observación multisatélite único para estudiar procesos atmosféricos fundamentales en el ciclo hidrológico.

Los perfiles verticales de las propiedades de las nubes proporcionados por el CloudSat a escala mundial llenan un vacío crítico que existía en la investigación de los mecanismos de interacción que vinculan a las nubes con el clima. La medición de estos perfiles requiere una combinación de instrumentos activos y pasivos que se logrará combinando los datos del radar del CloudSat con los datos procedentes de otros sensores activos y pasivos de la constelación.

Detalles técnicos del CloudSat

El radar del CloudSat funciona a 94,05 GHz desde una órbita polar heliosíncrona de una altura de 705 km. Las trazas en el suelo de la órbita (véase más adelante) se repiten con precisión cada 16 días. La potencia de cresta del transmisor del radar es de 1 800 W y se degrada hasta 1 500 W al final de su vida útil; se transmite a través de una antena con una ganancia de 63 dBi lo que produce aproximadamente una potencia radiar a efectiva (PIRE) de 4×10^9 W. La polarización es lineal. El radar apunta a lo largo del nadir geodésico con una precisión de $\pm 0,07^\circ$. La huella nominal del haz del radar en el suelo tiene $\sim 1,4$ km de diámetro, pero la distancia de la huella al primer nulo del diagrama es de 3 km. La precisión de puntería es de $0,053^\circ$ y el control de puntería en torno a 1 km. El observatorio ALMA, con un diámetro de 14 km, subtiende un ángulo de $1,14^\circ$ visto desde el satélite. La traza en el suelo real puede tener un error de seguimiento de ± 10 km causado por una componente impredecible de la resistencia atmosférica que perturbe la órbita. La longitud del impulso del radar es de unos 3,3 μ s y la frecuencia de repetición de impulsos (PRF) varía de 3 700 a 4 300 Hz, con lo que se obtiene una potencia media del transmisor del radar de unos 25 W.

La antena del CloudSat es una parábola con alimentación descentrada, una anchura de haz de $0,108^\circ$ y una ganancia en el eje de puntería de 63 dBi. La distancia al primer nulo en el diagrama es de $\pm 0,125^\circ$. El primer lóbulo lateral mayor, a $0,2^\circ$ del eje de puntería, tiene una ganancia de 47 dBi. La ganancia de la antena alcanza el valor de 0 dBi a unos $\pm 6,4^\circ$, y más allá de $\pm 11^\circ$, aproximadamente, la respuesta de la antena no es mayor de unos -12 dBi.

Como el haz del radar siempre está dirigido hacia abajo, a lo largo del vector gravitacional local, la única posibilidad de que las antenas del observatorio ALMA se orienten directamente hacia el haz del radar es que estén apuntadas hacia el cénit mientras el radar vuela directamente sobre el emplazamiento. Se trata de una situación muy improbable. El haz del CloudSat estará dirigido ocasionalmente lejos del nadir, a efectos de calibración, pero esta medición se llevará a cabo siempre sobre el océano por lo que no constituirá un problema para el observatorio ALMA.

Órbita del CloudSat

Debido a que el haz del radar apunta al nadir, únicamente el suelo situado directamente debajo del satélite, el punto subsatelital, resulta iluminado directamente. El periodo orbital es de 98,8 min, lo

que supone ~ 15 órbitas al día, y la inclinación de la órbita es de $98,2^\circ$; se trata de una órbita heliosíncrona dispuesta de tal manera que las trazas en el suelo se repiten exactamente cada 16 días. En el observatorio ALMA habrá 5 ó 6 órbitas por día que se eleven por encima del horizonte. Durante el periodo de 16 días, se habrán producido 233 órbitas cuyas pistas sobre el suelo habrán cubierto la Tierra regularmente cada 170 km (en el ecuador) con, evidentemente, un número igual de pases ascendentes y descendentes.

CloudSat tendrá una órbita similar al satélite principal del sistema A-Train, AQUA, que ya está en órbita. En lo que sigue se han utilizado los parámetros orbitales del satélite AQUA como representativos del futuro CloudSat. Estos elementos de AQUA probablemente seguirán siendo representativos pero puede que no correspondan a la órbita precisa del CloudSat.

Los elementos orbitales de AQUA (26 de julio de 2004) utilizados en las simulaciones descritas son:

```
1 27424U 02022A 04207,86676596 0,00000493 00000-0 11941-3 0 7961
```

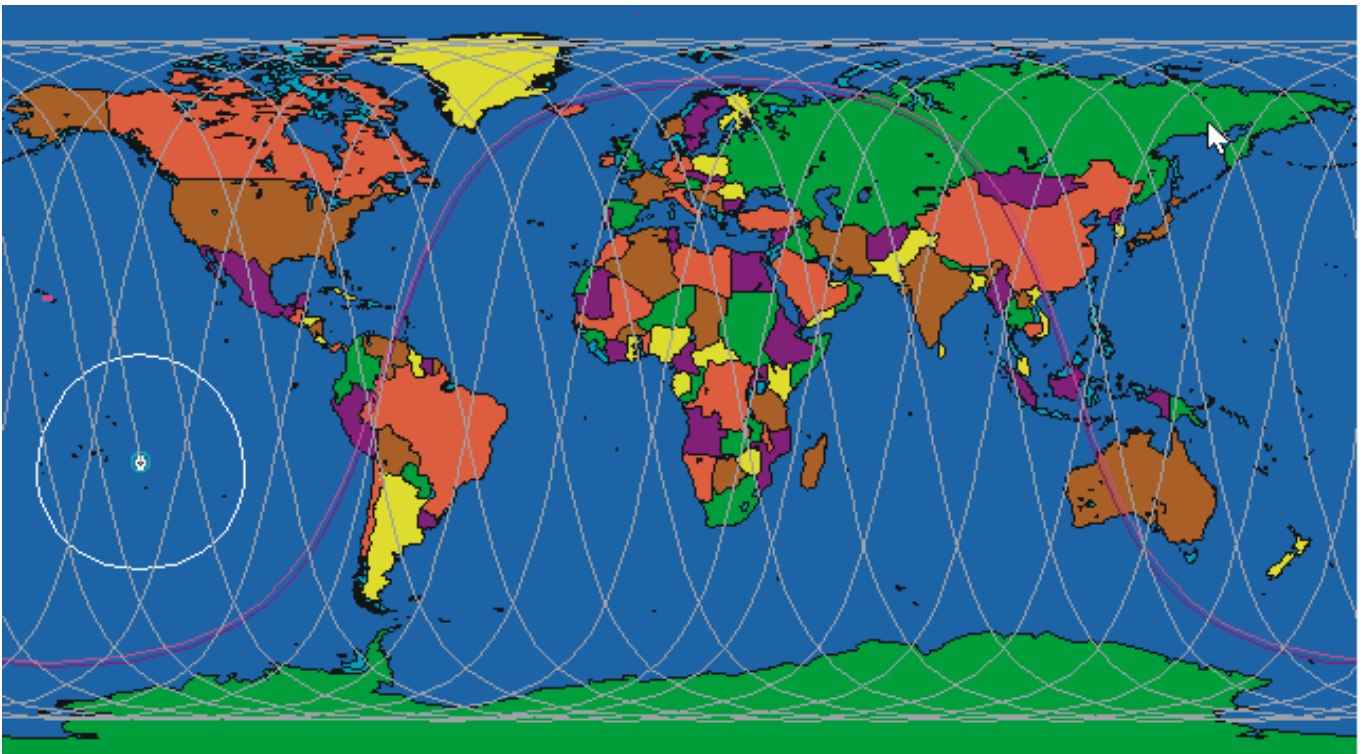
```
2 27424 98,2212 147,2739 0001153 89,3378 270,7995 14,57121862118484
```

La mayoría de los programas de seguimiento de satélites normalizados presentan este formato. A partir del mismo, el periodo orbital de AQUA es actualmente de 98,83 min y la inclinación de la órbita de $98,221^\circ$. La altura por encima del suelo es de unos 705 km.

Los siguientes análisis orbitales utilizan una variedad de software distintos. La Fig. 1 muestra un mapa del mundo con las trazas sobre el suelo del satélite Aqua dibujadas tras un periodo orbital de 24 horas. Obsérvese que debido a la inclinación de la órbita ($98,2^\circ$), ninguna traza sobre el suelo llega más allá de la latitud $\pm 81,8^\circ$. Se muestran las trazas orbitales ascendente y descendente.

FIGURA 1

Trazas del Aqua a lo largo de 24 horas

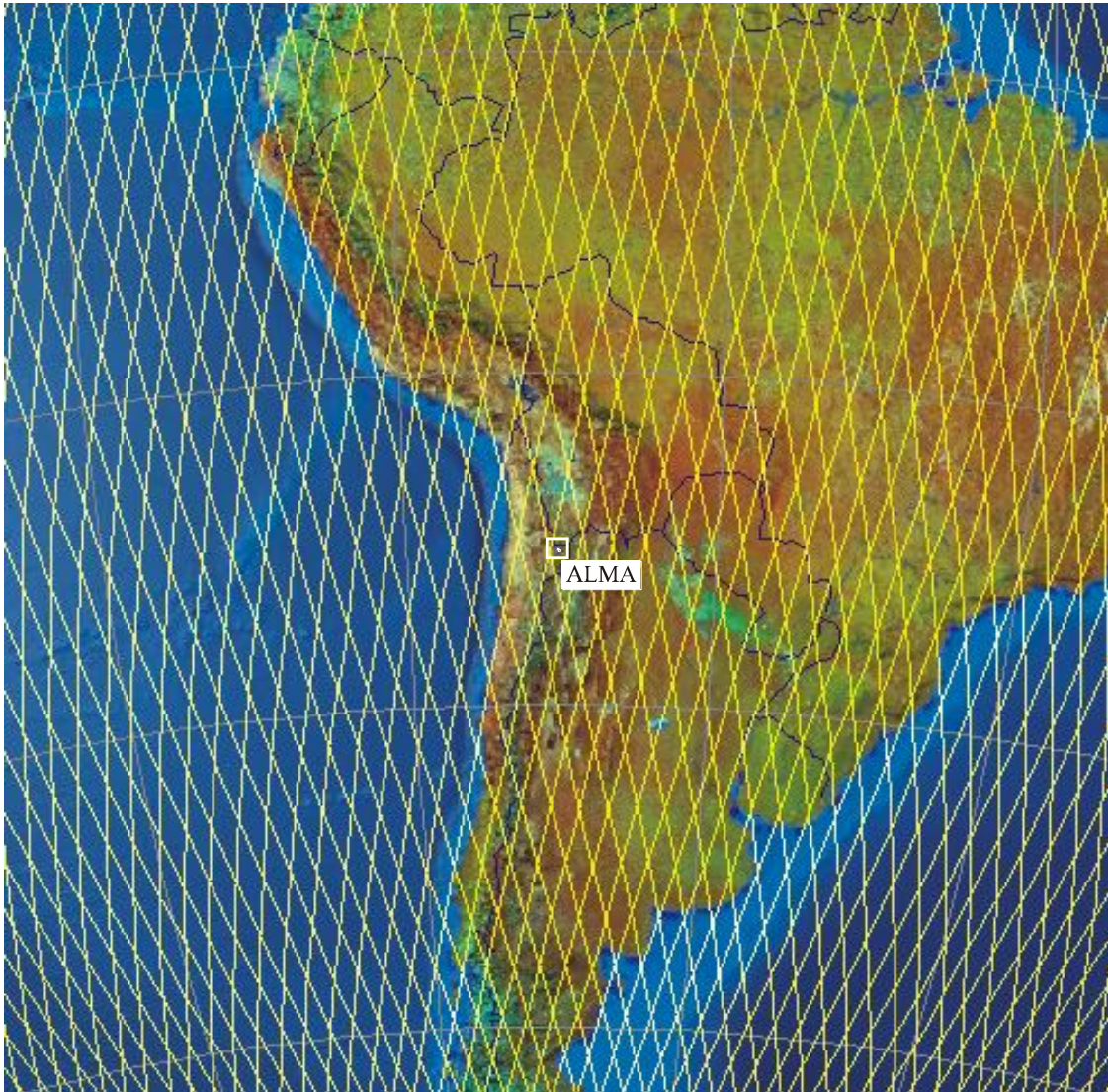


El círculo de luz marca la amplitud típica del horizonte terrenal visible desde el satélite Aqua.

La Fig. 2 muestra una vista de América del Sur, señalando las coordenadas del observatorio ALMA, y representa todo el conjunto de trazas del satélite a lo largo de los 16 días. Para estos parámetros orbitales, se trata de todas las trazas sobre el suelo establecidas por el satélite; las trazas se repiten con precisión cada 16 días. Como sucede con las Figs. 1 y 3 las órbitas ascendentes (S-N) aparecen inclinadas de abajo a arriba y de derecha a izquierda y las órbitas descendentes (N-S) están inclinadas de arriba a abajo y de derecha a izquierda.

FIGURA 2

Trazas sobre el suelo del satélite Aqua en un periodo de 16 días. La posición del observatorio ALMA aparece señalada sobre le mapa de América del Sur



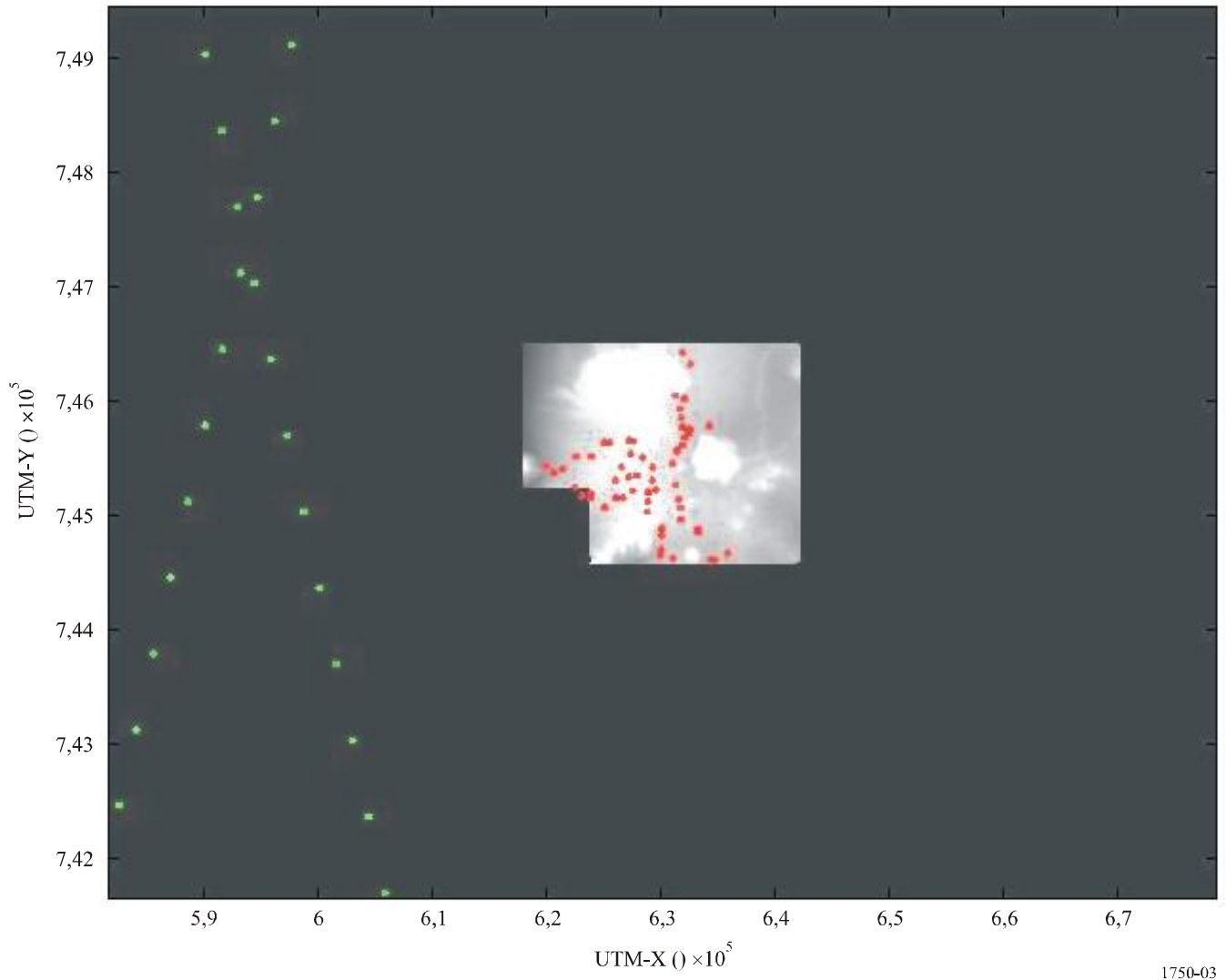
1750-02

Las trazas se repiten con precisión cada 16 días. Las trazas sobre el suelo del CloudSat serán similares, pero no idénticas.

La Fig. 3 representa con más detalle las trazas en el suelo que pasan cerca del observatorio ALMA a lo largo de cualquier periodo de 16 días.

FIGURA 3

Trazas en el suelo del satélite Aqua: los puntos verdes a la izquierda indican la mayor aproximación de las trazas en el suelo del Aqua al observatorio ALMA; estas marcas están separadas por un segundo de tiempo a lo largo de la órbita del Aqua, aunque la transmisión del radar es evidentemente continua

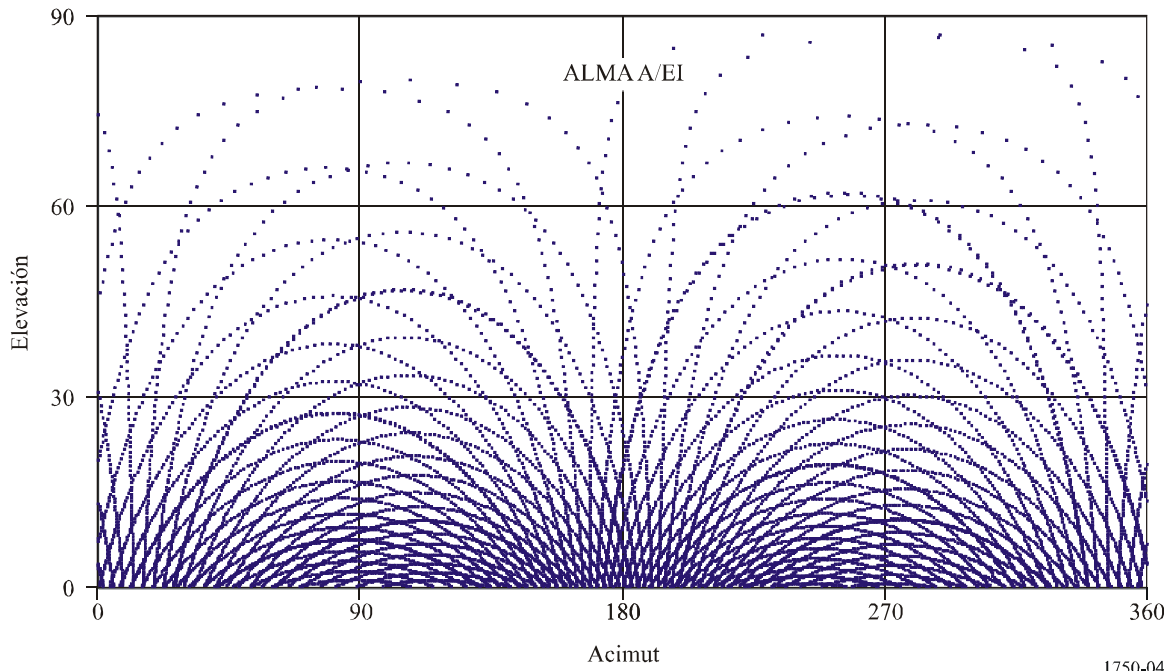


Los puntos rojos centrales señalan las posiciones de la antena en la configuración ampliada del observatorio ALMA. Las marcas de los ejes muestran las coordenadas UTM y están separadas 10 km. La traza sobre el suelo del Aqua se aproxima unos 30 km al centro del observatorio ALMA. De las dos trazas sobre el suelo mostradas, una es ascendente (S-N) y la otra descendente (N-S). Estas dos trazas están separadas en el tiempo por unos 8 días pero ambas se repiten cada 16 días.

Estas trazas orbitales deben considerarse representativas; la traza definitiva sobre el suelo establecida por la órbita del CloudSat podría estar más próxima o más alejada del observatorio ALMA.

La Fig. 4 representa el acimut y la elevación de todas las trazas de satélite vistas desde ALMA, a lo largo de un periodo de 16 días.

FIGURA 4
Trazas de acimut-elevación del Aqua vistas desde el observatorio ALMA en un periodo de 16 días



El acimut y la elevación del satélite se marcan cada 5 segundos de cada paso del satélite. La máxima elevación es inferior a 3° desde el cénit al centro del observatorio ALMA. Aunque esta órbita del Aqua puede que no corresponda exactamente a la órbita final del CloudSat, las estadísticas de las posiciones del satélite serán muy similares.

Potencia recibida por una antena del observatorio ALMA y sus implicaciones para la supervivencia del receptor

Existen cuatro clases de acoplamiento entre el radar CloudSat y los haces de antena del observatorio ALMA:

- Clase 1: Interacción entre el lóbulo lateral de antena lejano y el lóbulo lateral lejano. Suponiendo unos lóbulos laterales de 0 dBi para las antenas del radar y del observatorio ALMA, una separación de 705 km (la altura orbital del CloudSat) y una frecuencia de 94 GHz, las pérdidas de propagación (entre antenas isotropas) son de 188,9 dB. Para una potencia (de cresta) del transmisor de $1,8 \text{ kW} = 32,5 \text{ dBW}$, la potencia recogida en la antena de recepción es de $32,5 - 188,9 = -156,4 \text{ dBW}$. Puede compararse este valor con la potencia de ruido del sistema que aparece en un receptor de anchura de banda de 4 GHz y $T_{\text{sys}} = 20 \text{ K}$, que es $k.T.B = 1,38 \times 10^{-23} \times 20 \times 4 \times 10^9 = 1,10 \times 10^{-12} \text{ W} = -119,6 \text{ dBW}$. Por consiguiente, las relaciones de la señal de cresta de lóbulo lateral a lóbulo lateral es unos 37 dB inferior al ruido del sistema en 4 GHz. En consecuencia, no se produce sobrecarga del receptor, incluso en el caso de lóbulos laterales algo por encima de 0 dBi. Aun a la propia la frecuencia del radar, el observatorio ALMA apenas detectaría la señal en esta anchura de banda.
- Clase 2: Interacción entre el haz principal del radar y los lóbulos laterales lejanos de las antenas del observatorio ALMA. La ganancia del haz principal de la antena del radar es de 63 dB. La potencia recogida en la antena de recepción es:
 $(-188,9 + 32,5) + 63 = -93,4 \text{ dBW} = -63,4 \text{ dBm}$.

Clase 3: Interacción entre los lóbulos laterales de radar y el haz principal de la antena del observatorio ALMA:

La ganancia del haz principal de una antena de 12 m a 94 GHz, suponiendo una eficacia de la apertura del 70%, es 80 dBi. La potencia recogida por esta antena apuntando a los lóbulos laterales de 0 dBi con una potencia del transmisor del radar de 32,5 dBW es: $(-188,9 + 32,5) + 80 = -76,4 \text{ dBW} = -48,4 \text{ dBm}$.

Pueden compararse estas cifras de acoplamiento de haz principal a lóbulo lateral y de lóbulo lateral a haz principal calculadas en Clase 2 y Clase 3 con el ruido térmico equivalente en una banda del receptor de 4 GHz, a la entrada del receptor, de $-119,6 \text{ dBW}$, calculada en Clase 1. En ambos casos, la potencia recibida por el radar es unas decenas de dB mayor que el ruido del sistema. Ello provocará casi con toda seguridad saturación en el receptor del observatorio ALMA en Banda 3, lo que significa que será imposible realizar observaciones útiles pero no se producirán daños físicos. Debido al movimiento del satélite (con una velocidad de la huella de aproximadamente 7 km/s), tales interacciones durarían menos de 1 s para una sola antena o unos 2 s si se considera la distribución de 14 km de diámetro de la configuración del observatorio ALMA de gran tamaño.

Clase 4: Interacción de haz principal a haz principal. De las cifras anteriores se deduce que la potencia recibida es (ajustando al dB más próximo) $(-188,9 + 32,5) + 63 + 80 = -13 \text{ dBW} = 17 \text{ dBm} = 50 \text{ mW}$. Se trata de un nivel perjudicial para el receptor.

El valor de densidad de potencia a la que se funde un mezclador SIS es 1 mW por μm^2 en el área de unión. Se trata de potencia de CC y dicho valor se ha deducido a partir de pruebas que se llevaron a cabo hace unos pocos años. Teniendo en cuenta las características del mezclador de 90 GHz, se ha calculado que una entrada de 60 mW produce 2 mW por μm^2 ; es decir, un simple factor de dos por encima del valor de fusión. El nivel de fusión para la potencia impulsiva dependerá de la constante de tiempo térmica de la unión, cuyo valor se desconoce. Podría medirse el nivel para los impulsos de 3,3 μs pero no sería fácil ya que se precisaría un dispositivo Dewar especial que permitiese la inyección de impulsos de CC. También se determinó que por encima de unos 160 GHz, la frecuencia de corte del guíaondas en la boca de la bocina de alimentación debe proporcionar una protección contra las señales a 94 GHz.

Separación angular necesaria entre el CloudSat y el observatorio ALMA

1 Daños en el receptor

Debe evitarse que las antenas del observatorio ALMA apunten al cénit cuando el CloudSat está volando por encima. Desde el punto de vista de supervivencia del receptor cabe preguntarse qué distancia sería necesaria entre las antenas del observatorio ALMA y el haz de la antena del CloudSat y cuál es la máxima proximidad al cénit que puede considerarse segura.

Como se ha indicado anteriormente, la potencia recibida por una antena del observatorio ALMA con un acoplamiento perfecto de haz principal a haz principal es aproximadamente el doble del valor umbral que probablemente producirá daños en el receptor. Un objetivo ligeramente conservador sería evitar recibir valores superiores al 10%, aproximadamente, de este umbral. Suponiendo el caso más desfavorable consistente en que el CloudSat vuela directamente por encima del observatorio ALMA, ello significa que las antenas del citado observatorio deben apuntarse fuera del cénit para tener al menos una atenuación de 13 dB con respecto a su haz principal. Se supone que los lóbulos laterales son inferiores a -13 dB .

- A 94,05 GHz una parábola de 12 m de diámetro presenta una anchura de haz a 3 dB (anchura total a potencia a mitad) de unos $0,019^\circ$, es decir: $\pm 0,0093^\circ$. Suponiendo una forma de haz Gaussiano, el punto a -13 dB estará a $\pm 0,0193^\circ$.

- La incertidumbre de puntería del observatorio ALMA, o definición del «cénit», debe ser inferior a $0,003^\circ$.
- Se produce una mayor incertidumbre en el posible error de puntería del CloudSat; el haz del radar puede desviarse del vector gravitacional local hasta un valor de $0,07^\circ$, con un posible error de puntería adicional de $0,053^\circ$. Ello da un margen adicional de evitación del cénit de $0,053 + 0,07 = 0,123^\circ$.
- La anchura de haz del radar del satélite, hasta el primer nulo, es $\pm 0,125^\circ$.
- Refracción anómala: en principio, unas condiciones atmosféricas anómalas podrían desviar la dirección de llegada esperada de la señal del radar de 94 GHz hasta un valor de $0,01^\circ$.
- Los receptores del observatorio ALMA para distintas bandas se encuentran todos en el mismo plano focal con una dispersión del ángulo de puntería de campo lejano de casi $0,4^\circ$.
- Algunas antenas pueden tener un subreflector con nutación que puede desplazar el haz hasta unos $0,05^\circ$, aproximadamente.
- El propio observatorio ALMA se extiende a lo largo de una banda de $\pm 0,065^\circ$ en longitud y latitud, con lo que se produce la ambigüedad de saber si cada ángulo cenital de la antena local está alineado con su propio vector de gravedad local; para garantizar la seguridad debe de añadirse esta incertidumbre al margen de seguridad.

Sumando todos estos márgenes (se utiliza una adición directa y no una adición cuadrática) se obtiene un margen de seguridad combinado de $\sim \pm 0,8^\circ$. Por consiguiente, incluso en el caso más desfavorable de que el CloudSat pase directamente por encima del observatorio ALMA, siempre que ninguna de las antenas está apuntada a $0,8^\circ$ del cénit, el observatorio debe estar seguro contra cualquier daño en el receptor.

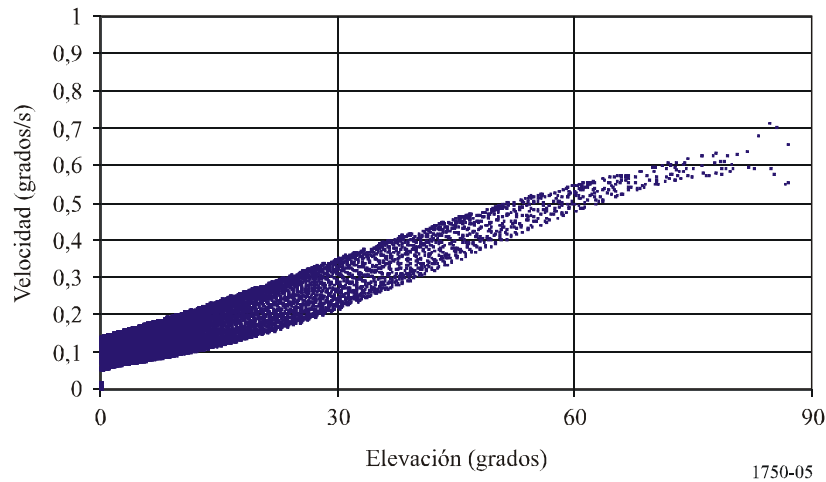
2 Interferencia

Las antenas del observatorio ALMA deben evitar apuntar al CloudSat en cualquier instante cuando se encuentre por encima del horizonte, a fin de impedir la aparición de un valor excesivo de interferencia. Se plantea la cuestión de saber a qué distancia del CloudSat es suficiente apuntar para reducir la interferencia a niveles tolerables.

En el cálculo anterior de la potencia recibida por una antena del observatorio ALMA con un haz principal de dicha antena dirigido a los lóbulos laterales del CloudSat, el valor de la citada potencia es $-76,4$ dBW, siendo la potencia térmica del receptor de $-119,6$ dBW; es decir, el CloudSat se encuentra $(119,6 - 76,4) = 43$ dB por encima del ruido térmico del receptor en la anchura de banda supuesta. Suponiendo que las observaciones no se realizan en la propia banda de frecuencias del radar, por analogía con los criterios de interferencia VLBI de la UIT, la potencia de interferencia total dentro de la banda del receptor debe mantenerse inferior al 1% del ruido térmico; es decir, por debajo de -140 dBW. Ello requiere una atenuación de $43 + 20 = 63$ dB, o que la ganancia de antena del observatorio ALMA se reduzca de 80 dBi a 17 dBi. A partir del modelo envolvente de lóbulos laterales de antena que figura en la Recomendación UIT-R SA.509, ello ocurrirá a unos 4° a partir del haz principal; sin embargo, este modelo de antena sólo está previsto utilizarlo en la gama de 1-30 GHz. En mediciones realizadas sobre un telescopio de 30 m a 39 GHz se observó que una desviación más segura para el radio de ganancia 17 dBi sería 10° . Por consiguiente, para evitar una excesiva interferencia en la banda de 90 GHz del observatorio ALMA, fuera de la frecuencia del CloudSat, las antenas del observatorio no deben apuntar a menos de $\pm 10^\circ$ al CloudSat, siempre que el radar se encuentre por encima del horizonte.

FIGURA 5

Gama de velocidades angulares del Aqua/CloudSat visto desde el observatorio ALMA, en función del ángulo de elevación del satélite



Ello permite calcular la posible duración de la interferencia. Para un ángulo de elevación de 30° , si el satélite pasa cerca del haz del observatorio ALMA, podría esperarse una interferencia de una duración de aproximadamente 70 s.

Si se están realizando observaciones en la banda de 90 GHz cuando el CloudSat pasa a menos de 10° del campo de visión del observatorio ALMA, los datos deben considerarse sospechosos. La Fig. 5 muestra la gama de velocidades angulares del satélite vista desde el observatorio ALMA, (grados/s), en función del ángulo de elevación del satélite. Ello permite calcular la probable duración de la interferencia en los casos en que el satélite pasa cerca del haz del observatorio ALMA, es decir a una distancia inferior a $\pm 10^\circ$ de dicho haz. Para un pase de satélite por la vertical, este periodo de interferencia podría durar hasta unos 30 s y si el satélite pasa cerca del haz del observatorio ALMA con una elevación de 30° , la interferencia podría durar aproximadamente 70 s y aún más para ángulos de elevación incluso más bajos.

3 Armónicos

Las amplitudes del segundo y tercer armónico (188,1 GHz y 282,15 GHz) del transmisor del CloudSat son desconocidas pero puede esperarse razonablemente que se encuentren entre 50 y 60 dB por debajo de la fundamental. La PIRE en el haz principal se desconoce: en principio la ganancia del segundo armónico en el eje de puntería de la antena podría ser 6 dB superior y la del tercer armónico 10 dB superior a la fundamental, aunque es improbable que la antena del CloudSat se encuentre iluminada de forma óptima a las frecuencias armónicas y es más probable que la energía armónica residual se distribuya en los lóbulos laterales del transmisor. Siempre que el CloudSat no se encuentre dentro del haz principal de la antena del observatorio ALMA (o a menos de $\pm 0,02^\circ$), la interferencia procedente de los armónicos del CloudSat probablemente sólo será un problema precisamente a las frecuencias específicas de los armónicos. La probabilidad de que el observatorio ALMA apunte con esa precisión al CloudSat en movimiento es extremadamente pequeña y, por consiguiente, la interferencia sólo aparecería en una sola antena durante menos de 1 segundo en un pase del satélite determinado. No obstante, el software del observatorio ALMA probablemente advertirá de esta circunstancia.

4 Influencia sobre el observatorio ALMA

A continuación se indican las medidas que debe tomar el observatorio ALMA para evitar a) daños en los receptores y b) degradación en los datos.

- La antena del observatorio ALMA nunca debe apuntarse a menos de $\pm 0,8^\circ$ del cénit. Si alguna vez ello es necesario, por ejemplo para tareas de mantenimiento o para transporte, deben protegerse los alimentadores del receptor con una cubierta protectora o con el atenuador solar. Si es preciso realizar observaciones a menos de $0,8^\circ$ del cénit, el software de control debe verificar la posición del CloudSat antes de permitir la realización de un seguimiento tan próximo al cénit.
- Siempre que las antenas del observatorio ALMA se apunten a menos de 10° del satélite CloudSat, todo dato tomado, al menos en la banda de 90 GHz, debe considerarse automáticamente de un valor cuestionable. Puede aparecer una interferencia en los armónicos si el CloudSat pasa a menos de $0,02^\circ$ del campo de visión del ALMA.
- Las observaciones en la banda de frecuencias 94,0-94,1 GHz deben restringirse preferiblemente a los instantes en que el CloudSat se encuentra por debajo del horizonte.

Conclusiones

El CloudSat es el primero de una serie de radares en la banda de ondas milimétricas que pueden tener repercusiones sobre el observatorio ALMA. Existe una cierta posibilidad de que se causen daños a los receptores del observatorio ALMA y ello puede suceder si el haz del radar y una antena del observatorio se enfocan directamente entre sí con un acoplamiento de haz principal a haz principal. Sin embargo, esta circunstancia es bastante rara y unas sencillas precauciones pueden evitar totalmente el peligro, en particular si las antenas del observatorio ALMA nunca se apuntan a menos de $0,8^\circ$ de su cénit sin haber protegido previamente el receptor o sin que el software de control haya verificado antes si una traza sobre el suelo del CloudSat pasará probablemente cerca del observatorio ALMA.

Aparecerá interferencia en los lóbulos laterales lejanos del radar en la banda de 90 GHz siempre que la antena del observatorio ALMA apunte a menos de 10° del satélite; el software del observatorio ALMA debe ser capaz de señalar tales circunstancias.

Durante todo el periodo de vida útil del CloudSat, el observatorio ALMA requerirá una actualización de los elementos orbitales a fin de predecir con precisión las coordenadas del satélite de manera que puedan ser utilizadas por el software de programación, control y adquisición de datos del radiotelescopio.

Una pronta y continua colaboración muy estrecha entre el organismo que explota el satélite y el SRA es esencial en este caso y será vital para cualquier situación similar en el futuro.
