

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1586

Cálculo de los niveles de emisión no deseada producidos por un sistema del servicio fijo por satélite no geostacionario en localizaciones de radioastronomía

(Cuestión UIT-R 236/4)

(2002)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que, en algunos casos, el servicio de radioastronomía y los servicios espaciales (espacio-Tierra) han tenido atribuciones en bandas de frecuencias adyacentes o próximas;
- b) que el servicio de radioastronomía está basado en la recepción de emisiones que tienen niveles de potencia mucho más bajos que los niveles de las emisiones habituales de otros servicios de radiocomunicación;
- c) que, debido a estos bajos niveles de energía en recepción, el servicio de radioastronomía es generalmente más sensible que otros servicios a la interferencia de las emisiones no deseadas;
- d) que la Recomendación 66 (Rev.CMR-2000) solicita, en el *recomienda al UIT-R 5* «que estudie las bandas de frecuencias y los casos en los cuales, por razones técnicas u operacionales, se pueden necesitar límites más estrictos para las emisiones no esenciales que los límites generales consignados en el Apéndice 3, para proteger a los servicios de seguridad y los servicios pasivos, tales como el de radioastronomía, y las consecuencias de la aplicación o falta de aplicación de esos límites sobre todos los servicios interesados;»;
- e) que la Recomendación 66 (Rev.CMR-2000) solicita, en el *recomienda al UIT-R 6* «que estudie las bandas de frecuencias y los casos en los cuales, por razones técnicas u operacionales, se pueden necesitar límites de las emisiones fuera de banda para proteger a los servicios de seguridad y los servicios pasivos, tales como el de radioastronomía, y el impacto de la aplicación o falta de aplicación de esos límites sobre todos los servicios interesados;»;
- f) que varias notas del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) (como los números 5.149, 5.443B, 5.511A y 5.551G) subrayan la necesidad de proteger el servicio de radioastronomía, en particular contra la interferencia de los transmisores espaciales;
- g) que, debido a las características de los sistemas de satélite no geostacionario (no OSG), en particular la de variación temporal de la interferencia, el nivel de la interferencia procedente de estos satélites en los radiotelescopios no puede evaluarse de la misma manera que en el caso de los satélites OSG,

recomienda

- 1 que las administraciones calculen los niveles de emisiones no deseadas producidas por un sistema de satélites del servicio fijo por satélite (SFS) no OSG en las estaciones de radioastronomía, utilizando el método descrito en el Anexo 1;
- 2 que, al efectuar estos cálculos, se utilice el diagrama de antena descrito en el Anexo 2 como modelo de las antenas de radioastronomía;
- 3 que el porcentaje de tiempo durante el cual se sobrepasa un determinado nivel de densidad de flujo de potencia (dfpe) (definido suponiendo una ganancia de antena de recepción de 0 dBi en la dirección de la interferencia y un determinado tiempo de integración) se calcule según el método descrito en el Anexo 3.

ANEXO 1

Cálculo de los niveles de emisión no deseada producidos por un sistema del SFS no OSG en localizaciones de radioastronomía

La metodología aquí descrita, basada en el concepto de densidad de flujo de potencia equivalente (dfpe) definido en el número 22.5C del Artículo 22 del RR, sirve para calcular los niveles de la dfp producidos por las emisiones no deseadas de un sistema de satélite del SFS no OSG en los radiotelescopios, teniendo en cuenta tanto las características del sistema de satélite como las características de la antena del radiotelescopio. El valor de la dfpe es la combinación de las contribuciones de todas las emisiones de los satélites, expresadas como la dfp de una sola fuente equivalente en el eje de puntería (punto máximo de haz principal) del radiotelescopio.

1 Parámetros necesarios

Debido a las características particulares de los sistemas de satélite no OSG, es evidente que el nivel de la interferencia procedente de estos satélites en un radiotelescopio no se puede evaluar como se hace para los satélites OSG. Es necesario un tratamiento estadístico que tenga en cuenta el aspecto dinámico de los satélites no OSG.

La evaluación de la interferencia provocada por los satélites en el radiotelescopio durante el tiempo de integración (2000 s) debe basarse en cálculos estadísticos y tener en cuenta tanto los parámetros de los satélites como los parámetros del radiotelescopio.

Parámetros del sistema de satélites no OSG:

- el número de satélites visibles en el cielo desde la estación de radioastronomía;
- la dfp en el radiotelescopio dentro de la banda de radioastronomía considerada, calculada con un contorno dBsd o dBc;
- las distancias entre los satélites y la estación de radioastronomía;
- las características orbitales detalladas de los satélites.

Parámetros del radiotelescopio:

- la posición de la antena;
- el diagrama de antena y la ganancia de antena;
- la gama práctica de direcciones de puntería;
- la dirección del eje de puntería;
- los ángulos fuera del eje, entre el eje de puntería de la antena de la estación de radioastronomía y las direcciones de los satélites transmisores;
- el tiempo de integración (2 000 s).

2 Cálculo de los niveles de dfpe en las antenas de radioastronomía

La ganancia de recepción de un radiotelescopio en la dirección de un satélite no OSG (a diferencia de un satélite OSG) varía con el tiempo debido principalmente al movimiento del satélite y a la estructura angular fina del diagrama del lóbulo lateral del radiotelescopio. La ganancia del telescopio en la dirección de un satélite es unas veces muy superior a 0 dBi, y otras veces es inferior. Además, en el caso de un sistema no OSG con varios satélites, es necesario incluir todas sus contribuciones y tenerlas en cuenta adecuadamente.

Esto puede hacerse utilizando el concepto de dfpe definido inicialmente para evaluar las condiciones de una posible compartición entre sistemas OSG y no OSG. En el punto siguiente se desarrolla este concepto para el caso de una estación de radioastronomía sometida a la interferencia de satélites no OSG. La definición se basa en el número 22.5C adoptado por la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (Estambul, 2000) (CMR-2000).

2.1 Definición de dfpe

Cuando una antena recibe potencia dentro de su anchura de banda de referencia, simultáneamente de transmisores situados a distintas distancias, en distintas direcciones y con distintos niveles de dfp incidente, la dfpe es la dfp que, si fuera recibida de un solo transmisor en el campo lejano de la antena en la dirección de ganancia máxima, produciría una potencia a la entrada del receptor igual a la que recibe por combinación de los distintos transmisores.

La dfpe instantánea se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$dfpe = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_t(\theta_i)}{4\pi d_i^2} \cdot \frac{G_r(\phi_i)}{G_{r,máx}} \right] \quad (1)$$

siendo:

- N_a : número de estaciones espaciales del sistema no OSG que son visibles desde el radiotelescopio
- i : índice de la estación espacial considerada del sistema no OSG
- P_i : potencia de radiofrecuencia de la emisión no deseada a la entrada de la antena (o la potencia de radiofrecuencia radiada si se trata de una antena activa) de la estación espacial transmisora considerada en el sistema no OSG, en la anchura de banda de referencia (dBW)
- θ_i : ángulo fuera del eje, entre el eje de puntería de la estación espacial transmisora considerada del sistema no OSG y la dirección del radiotelescopio

- $G_t(\theta_i)$: ganancia (expresada como relación) de la antena de transmisión de la estación espacial transmisora considerada del sistema no OSG, en la dirección del radiotelescopio
- d_i : distancia (m) entre la estación transmisora considerada del sistema no OSG y el radiotelescopio
- φ_i : ángulo fuera del eje, entre la dirección de puntería del radiotelescopio y la dirección de la estación espacial transmisora considerada del sistema no OSG
- $G_r(\varphi_i)$: ganancia (expresada como relación) de la antena de recepción del radiotelescopio, en la dirección de la estación espacial considerada del sistema no OSG (véase el Anexo 2)
- $G_{r,máx}$: ganancia máxima (expresada como relación) del radiotelescopio
- $dfpe$: dfpe instantánea en la anchura de banda de referencia en el radiotelescopio (dB(W/m²)).

Para el cálculo de la dfpe en la ecuación (1) se supone que la dfp producida por todas las fuentes interferentes está dirigida al eje de puntería de la antena de recepción, donde la ganancia de la antena es máxima. Sin embargo, los criterios de protección de la radioastronomía se basan en un contorno de 0 dBi de la antena de radioastronomía. Aplicando los principios de la ecuación (1), se puede determinar así la dfp producida por todas las fuentes interferentes dirigidas al punto de ganancia de 0 dBi de la antena de recepción:

$$dfpe_{G_r = 0 \text{ dBi}} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_t(\theta_i)}{4\pi d_i^2} \cdot G_r(\varphi_i) \right] \quad (2)$$

Los valores de la $dfpe_{G_r = 0 \text{ dBi}}$ obtenidos de la ecuación (2), promediados para un tiempo de integración de 2000 s, se pueden comparar con los niveles de la dfp (definidos suponiendo una ganancia de antena de recepción de 0 dBi en la dirección de la interferencia y para este tiempo de integración).

NOTA 1 – Se supone que todos los transmisores están situados en el campo lejano del radiotelescopio (es decir, a más de $2D^2/\lambda$ de distancia, siendo D el diámetro eficaz del radiotelescopio y λ la longitud de onda de observación). Aunque esto no siempre se puede cumplir, se considera una aproximación adecuada.

NOTA 2 – Para algunos telescopios, la dirección de la ganancia máxima (dirección del eje de puntería) tal vez no coincida siempre con el eje geométrico del radiotelescopio.

NOTA 3 – En el caso de las antenas activas, P_i debe considerarse como la potencia de radiofrecuencia radiada, y no como la potencia a la entrada de la antena.

NOTA 4 – La ganancia de antena de la estación de transmisión, $G_t(\theta_i)$, se determina a la frecuencia de la banda de radioastronomía considerada. Podría diferir de la ganancia a las frecuencias de las transmisiones previstas.

ANEXO 2

Modelo del diagrama de antena del radiotelescopio

Los diagramas de antena como el descrito en la Recomendación UIT-R SA.509, no son apropiados para entornos dinámicos. En un entorno dinámico se utiliza el modelo descrito en la Recomendación UIT-R S.1428 para las antenas del SFS. Es necesario seguir trabajando en la definición de diagramas de antena de radioastronomía. Entretanto, y a falta de diagramas medidos, se puede considerar que los diagramas de la Recomendación UIT-R S.1428 son representativos de las antenas de radioastronomía, tanto para el haz principal como para las zonas de los lóbulos laterales. El siguiente ejemplo se tomó de la Recomendación UIT-R S.1428 para diagramas de reflectores de más de 100λ de diámetro:

$$\begin{array}{llll}
 G(\varphi) = G_{m\acute{a}x} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 & \text{dBi} & \text{para} & 0^\circ \leq \varphi < \varphi_m \\
 G(\varphi) = G_1 & \text{dBi} & \text{para} & \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\
 G(\varphi) = 29 - 25 \log \varphi & \text{dBi} & \text{para} & \varphi_r \leq \varphi < 10^\circ \\
 G(\varphi) = 34 - 30 \log \varphi & \text{dBi} & \text{para} & 10^\circ \leq \varphi < 34,1^\circ \\
 G(\varphi) = -12 & \text{dBi} & \text{para} & 34,1^\circ \leq \varphi < 80^\circ \\
 G(\varphi) = -7 & \text{dBi} & \text{para} & 80^\circ \leq \varphi < 120^\circ \\
 G(\varphi) = -12 & \text{dBi} & \text{para} & 120^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ
 \end{array}$$

donde:

$$\begin{array}{ll}
 G_{m\acute{a}x} = 20 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) + 8,4 & \text{dBi} \\
 G_1 = -1 + 15 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) & \text{dBi} \\
 \varphi_m = \left(\frac{20 \lambda}{D} \right) \sqrt{(G_{m\acute{a}x} - G_1)} & \text{grados} \\
 \varphi_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} & \text{grados}
 \end{array}$$

Como alternativa, a continuación se indica una representación posiblemente más precisa del sector interior de un grado del diagrama, que podría emplearse para esta parte del diagrama de antena.

1 Modelo del haz principal

Es realista utilizar el siguiente modelo para el haz principal de una antena circular:¹

$$G_r(\varphi) = G_{r,m\acute{a}x} \left[\frac{J_1(2\pi x)}{\pi x} \right]^2 \tag{3}$$

¹ Las ecuaciones (3) y (4) se expresan como una relación y no en dB.

donde:

$$G_{r,m\acute{a}x} = \left[\frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} \right]: \text{ ganancia m\acute{a}xima (expresada como relaci3n)}$$

donde:

$$A_{eff} = \pi(D/2)^2: \text{ superficie de la apertura del telescopio (m}^2\text{)}$$

D : di\ameetro efectivo del telescopio (m)

λ : longitud de onda (m)

$$x = \frac{\pi D \varphi}{360 \lambda}, \text{ siendo } \varphi \text{ el \acute{a}ngulo fuera del eje de punter\acute{a} (grados)}$$

$J_1(x)$: funci3n de Bessel de primer grad.

El primer cero de este diagrama de antena se encuentra en:

$$\varphi_0 = 69,88/(D/\lambda) \quad \text{grados (fuera del eje de punter\acute{a})}$$

Por ejemplo, si $D = 100$ m y $\lambda = 3$ cm, $G_{r,m\acute{a}x} = 1,09 \times 10^8$ (equivalente a +80,4 dBi) y:

$$\varphi_0 = 0,0209 \quad \text{grados}$$

2 Modelo de los l3bulos laterales pr3ximos hasta 1° del eje de punter\acute{a}

Se sugiere emplear el siguiente modelo para los l3bulos laterales pr3ximos en la regi3n $\varphi_0 \leq \varphi \leq 1^\circ$:

$$G_r(\varphi) = B \left[\frac{\cos(2\pi x - (3\pi/4) + 0,0953)}{\pi x} \right]^2 \quad (4)$$

donde:

$$x = \frac{\pi D \varphi}{360 \lambda}, \text{ siendo } \varphi \text{ el \acute{a}ngulo fuera del eje de punter\acute{a} (grados)}$$

D : di\ameetro efectivo del radiotelescopio (m)

λ : longitud de onda de funcionamiento (m)

y

$$B = 10^{3,2} \pi^2 ((\pi D/2)/(180 \lambda))^2.$$

² Las ecuaciones (3) y (4) se expresan como una relaci3n y no en dB.

ANEXO 3

Distribución de los niveles de la dfpe

En este Anexo se explica una forma de obtener las estadísticas de la dfpe para todo el cielo.

1 División del cielo en células que tienen aproximadamente el mismo ángulo sólido

El primer paso de este método consiste en dividir el cielo en M anillos paralelos al horizonte, repartidos uniformemente en ángulo de elevación, entre 0° y 90° . El ancho de cada anillo es $90^\circ/M$. El siguiente paso es dividir estos anillos en células con un ancho de acimut que permite obtener un número entero de células por anillo y que es aproximadamente igual a:

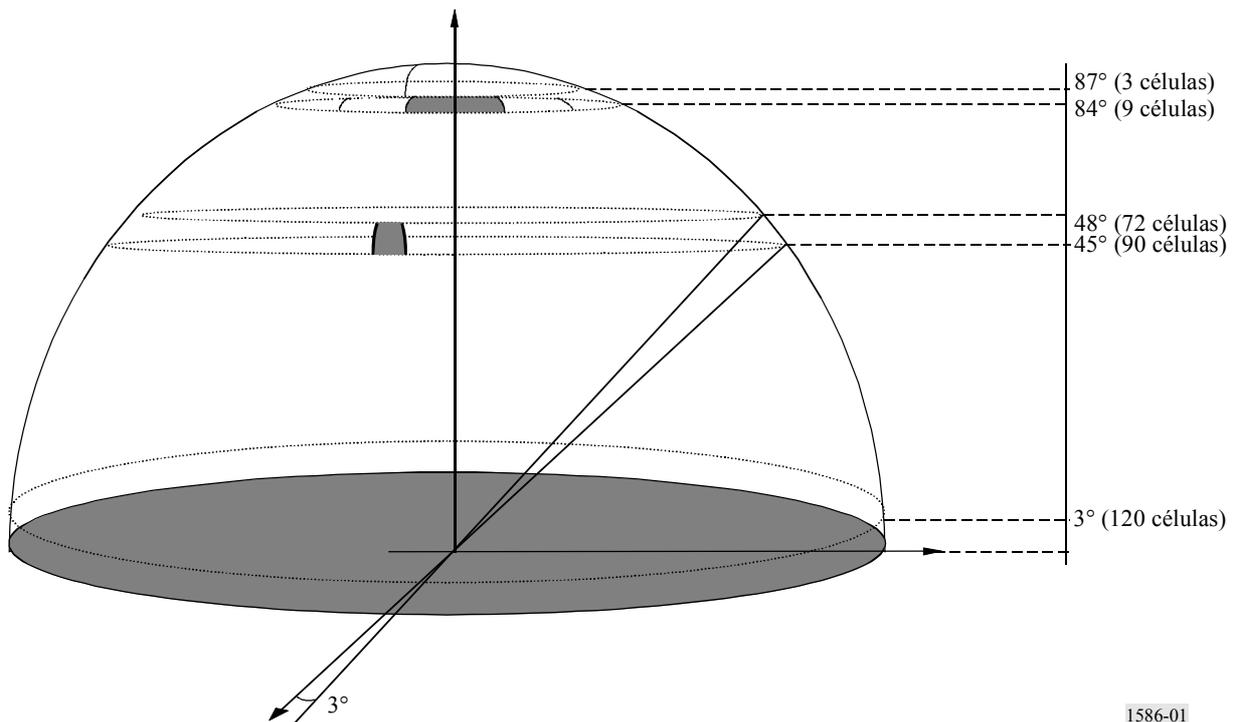
$$\frac{90/M}{\cos(\text{elevación})} \quad \text{grados}$$

La Fig. 1 es un ejemplo de esta división basada en incrementos de 3° de ancho en elevación, lo que resulta en una división del cielo en 30 anillos con un ángulo de elevación de 3° . Por tanto, el ancho en acimut es, aproximadamente:

$$\frac{90/30}{\cos(\text{elevación})} \quad \text{grados}$$

Se trata de la elevación media en un determinado anillo.

FIGURA 1
Ejemplo de división del cielo en células que tienen un ángulo sólido de 9 grados cuadrados aproximadamente



De esta forma se divide el cielo en 2334 células, cada una con un ángulo sólido de 9 grados cuadrados aproximadamente. En el Cuadro 1 se indica el número de células de cada anillo en este ejemplo.

CUADRO 1

Ejemplo de división del cielo en células cuadradas con un ángulo sólido de 9 grados cuadrados aproximadamente

Elevación inferior del anillo (grados)	Ángulo sólido del anillo (grados cuadrados)	Ángulo sólido acumulado (grados cuadrados)	Incremento de acimut (grados)	Número de células del anillo	Ángulo sólido de la célula (grados cuadrados)	Número acumulado de células	Porcentaje de ángulo sólido (%)	Ángulo sólido acumulado (%)
0	1 079,51	1 079,51	3	120	9	120	5,23	5,23
3	1 076,55	2 156,05	3	120	8,97	240	5,22	10,45
6	1 070,64	3 226,69	3	120	8,92	360	5,19	15,64
9	1 061,79	4 288,49	3	120	8,85	480	5,15	20,79
12	1 050,04	5 338,53	3	120	8,75	600	5,09	25,88
15	1 035,41	6 373,93	3	120	8,63	720	5,02	30,90
18	1 017,94	7 391,87	3	120	8,48	840	4,94	35,84
21	997,68	8 389,55	3	120	8,31	960	4,84	40,67
24	974,68	9 364,23	3	120	8,12	1 080	4,73	45,40
27	949,01	10 313,24	3	120	7,91	1 200	4,60	50
30	920,75	11 233,99	4	90	10,23	1 290	4,46	54,46
33	889,95	12 123,94	4	90	9,89	1 380	4,31	58,78
36	856,72	12 980,66	4	90	9,52	1 470	4,15	62,93
39	821,14	13 801,81	4	90	9,12	1 560	3,98	66,91
42	783,31	14 585,12	4	90	8,70	1 650	3,80	70,71
45	743,34	15 328,46	4	90	8,26	1 740	3,60	74,31
48	701,32	16 029,79	5	72	9,74	1 812	3,40	77,71
51	657,39	16 687,17	5	72	9,13	1 884	3,19	80,90
54	611,65	17 298,82	5	72	8,50	1 956	2,97	83,87
57	564,23	17 863,06	6	60	9,40	2 016	2,74	86,60
60	515,27	18 378,33	6	60	8,59	2 076	2,50	89,10
63	464,90	18 843,23	6	60	7,75	2 136	2,25	91,35
66	413,25	19 256,48	8	45	9,18	2 181	2,00	93,36
69	360,47	19 616,95	9	40	9,01	2 221	1,75	95,11
72	306,70	19 923,65	10	36	8,52	2 257	1,49	96,59
75	252,09	20 175,74	12	30	8,40	2 287	1,22	97,81
78	196,79	20 372,53	18	20	9,84	2 307	0,95	98,77
81	140,95	20 513,49	24	15	9,40	2 322	0,68	99,45
84	84,73	20 598,21	40	9	9,41	2 331	0,41	99,86
87	28,27	20 626,48	120	3	9,42	2 334	0,14	100

2 Distribución de la dfpe en una célula

Primero se selecciona aleatoriamente la dirección de puntería de la antena del satélite de radioastronomía, que caerá en una de las células del cielo descritas en el punto anterior. Luego se selecciona aleatoriamente el momento inicial de la constelación y se calcula la dfpe para cada muestra de tiempo a lo largo de un tiempo de integración de 2000 s. Se calcula a continuación la dfpe media correspondiente a esta prueba, para las condiciones elegidas de dirección de puntería y momento inicial de la constelación.

Esta operación se repite para obtener una distribución estadística de la dfpe en la célula considerada. La metodología está basada en la realización de varias pruebas, en cada una de las cuales se calcula la dfpe media a lo largo de un intervalo de integración de 2000 s. La distribución será más precisa cuanto mayor sea el número de pruebas. Debe hacerse un número suficiente de pruebas para lograr resultados con el nivel de fiabilidad necesario. En particular, el número de pruebas multiplicado por el tiempo de integración de 2000 s debe ser significativamente mayor que el periodo de la constelación. También es necesario hacer un muestreo estadístico adecuado durante el periodo completo de la constelación. Cuando ya no se observen cambios significativos en la distribución, se podrá concluir que el número de pruebas realizadas es suficiente. Esta verificación se puede realizar automáticamente, formando parte integrante de la simulación, o manualmente, deteniendo la simulación a intervalos regulares.

3 Distribución de la dfpe en las direcciones de puntería más desfavorables (se aplica sólo si los niveles de la dfp de los satélites son constantes para un determinado ángulo de elevación de la antena del satélite de radioastronomía)

La evaluación de las distribuciones de dfpe en las células del cielo se puede simplificar evaluando primero la distribución de la dfpe en las direcciones de puntería más desfavorables. Se puede considerar que estas direcciones de puntería más desfavorables son las direcciones de puntería con la mayor probabilidad de visibilidad de los satélites. Estas direcciones de puntería pueden determinarse según la Recomendación UIT-R S.1257 – Método analítico para calcular las estadísticas de visibilidad y de interferencia a corto plazo de los satélites no geoestacionarios vistos desde un punto situado en la superficie de la Tierra, (ecuaciones (28) y (29)). Para un determinado ángulo de elevación y una determinada constelación de satélites no OSG, esta Recomendación permite calcular el acimut más desfavorable (generalmente hay dos acimuts más desfavorables para una determinada elevación).

Para las células que corresponden a estas direcciones de puntería más desfavorables, se puede calcular la distribución de la dfpe, con un número suficiente de tiempos de integración de 2 000 s. Después se puede comparar esta distribución de la dfpe con un nivel umbral de la dfp (definido suponiendo una ganancia de antena de recepción de 0 dBi en la dirección de interferencia y un tiempo de integración de 2 000 s).

Para una célula, el porcentaje de tiempo durante el cual se excede un nivel umbral de la dfp puede calcularse como el porcentaje de los periodos de integración de 2 000 s en el que la media de la dfp en el radiotelescopio rebasa este nivel umbral de la dfp.

Una comparación entre la distribución de la *dfpe* y el nivel umbral de la *dfp* para las células correspondientes a estas direcciones de puntería más desfavorables permite sacar las siguientes conclusiones:

- Si, en todos los *M* anillos, el umbral de la *dfp* se cumple en las direcciones de puntería más desfavorables durante un porcentaje de tiempo superior al criterio del porcentaje de tiempo, los criterios se cumplirán en todo el cielo.
- Si, en un anillo definido para un determinado ángulo de elevación, el umbral de la *dfp* se alcanza en las direcciones de puntería más desfavorables durante un porcentaje de tiempo superior al criterio del porcentaje de tiempo, los criterios siempre se cumplirán en todo el anillo correspondiente.
- Si los criterios de interferencia no se cumplen, es necesario hacer una investigación adicional.

La consideración de estas direcciones de puntería más desfavorables proporciona información sobre la posición de las células de caso más desfavorable.

4 Resultados de la distribución de la *dfpe*

El cálculo de la *dfpe* descrito en el § 2 proporciona una distribución de los niveles de *dfpe* para cada célula del cielo, como puede verse en la Fig. 2.

