

RECOMENDACIÓN UIT-R M.1583*

Cálculo de la interferencia entre los sistemas no geoestacionarios del servicio móvil por satélite o del servicio de radionavegación por satélite y los emplazamientos de los telescopios de radioastronomía

(2002)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que, en algunos casos, el servicio de radioastronomía y los servicios espaciales (espacio-Tierra) tienen atribuidas bandas de frecuencias adyacentes o cercanas;
- b) que el servicio de radioastronomía está basado en la recepción de emisiones con niveles de potencia muy inferiores a los que se utilizan generalmente en otros servicios de radiocomunicaciones;
- c) que, debido a que los niveles de potencia de recepción son bajos, el servicio de radioastronomía generalmente es más sensible que otros servicios a la interferencia procedente de emisiones no deseadas;
- d) que en varias notas del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) (tales como los números 5.149, 5.340, 5.372 y 5.443B) se subraya la importancia de proteger el servicio de radioastronomía, especialmente contra los transmisores a bordo de vehículos espaciales;
- e) que, debido a las características de los sistemas de satélites no geoestacionarios (no OSG), y en particular al hecho de que la interferencia es variable en el tiempo, el nivel de interferencia provocada por estos satélites en los radiotelescopios no se puede calcular de la misma forma que en el caso de satélites OSG,

recomienda

- 1** que las administraciones utilicen el método descrito en el Anexo 1 para calcular los niveles de emisiones no deseadas producidos por los sistemas de satélite no OSG del servicio de radionavegación por satélite (SRNS) o del servicio móvil por satélite (SMS) en los emplazamientos de radioastronomía;
- 2** que en estos cálculos se utilice el diagrama de antena descrito en el Anexo 2, para representar el modelo de las antenas de radioastronomía;
- 3** que se utilice el método descrito en el Anexo 3 para calcular el porcentaje de tiempo durante el cual se rebasa el nivel de la densidad de flujo de potencia equivalente (dfpe) (definido suponiendo una ganancia de la antena receptora de 0 dBi en la dirección de la interferencia y un determinado tiempo de integración).

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones.

ANEXO 1

Cálculo de los niveles de emisiones no deseadas producidas por sistemas de satélites no OSG del SRNS o del SMS en los emplazamientos de radioastronomía

El método aquí descrito, que está basado en el concepto de «densidad de flujo de potencia equivalente» (dfpe) definido en el número 22.5C del RR, se utiliza para calcular los niveles de densidad de flujo de potencia (dfp) producidos por emisiones no deseadas de un sistema de satélites no OSG en los radiotelescopios, teniendo en cuenta las características tanto del sistema de satélites como de la antena del radiotelescopio. El valor de la dfpe es la combinación de las contribuciones de todas las emisiones de satélites expresada como la dfp de una sola fuente equivalente en el eje de puntería (valor de cresta del haz principal) del radiotelescopio.

1 Parámetros necesarios

Debido a las características particulares de los sistemas de los satélites no OSG, es evidente que el nivel de interferencia causada por estos satélites en un radiotelescopio no se puede calcular como se hace en el caso de los satélites OSG. Es necesario un proceso estadístico que tenga en cuenta el aspecto dinámico de los satélites no OSG.

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

Parámetros del sistema de satélites no OSG:

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

Parámetros del radiotelescopio:

- emplazamiento de la antena;
- diagrama y ganancia de antena;
- gama de las direcciones de puntería utilizadas en la práctica;
- dirección del eje de puntería;
- ángulo fuera del eje entre el eje de puntería de la antena de la estación de radioastronomía y las direcciones de los satélites transmisores;
- tiempo de integración (2000 s).

2 Cálculo de los niveles de dfpe en los emplazamientos de radioastronomía

La ganancia de recepción de un radiotelescopio en dirección de un satélite no OSG (a diferencia de los satélites OSG) varía con el tiempo, debido principalmente al movimiento del satélite y la estructura angular fina del diagrama de lóbulos laterales del radiotelescopio. En algunos casos, la

ganancia del radiotelescopio en dirección de un satélite será muy superior a 0 dBi, y en otros casos será inferior. Además, en el caso de un sistema de múltiples satélites no OSG, es necesario incluir y tener debidamente en cuenta las contribuciones de todos los satélites.

Esto se podría hacer utilizando el concepto de la dfpe definido inicialmente para determinar las posibles condiciones de compartición entre los sistemas OSG y no OSG. En el siguiente punto se amplía este concepto para el caso de una estación de radioastronomía sometida a la interferencia de satélites no OSG. La definición está basada en el número 22.5C del RR adoptado por la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (Estambul, 2000) (CMR-2000).

2.1 Definición de dfpe

Si una antena, dentro de una anchura de banda de referencia, recibe potencia simultáneamente de varios transmisores situados a distancias diferentes, en direcciones distintas y con diversos niveles de dfp incidente, la dfpe es igual a la dfp que, recibida de un solo transmisor en el campo lejano de la antena en la dirección de máxima ganancia produciría una potencia a la entrada del receptor igual a la que recibe realmente combinando los distintos transmisores.

Para calcular la dfpe se utiliza la siguiente fórmula:

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

donde:

- N_a : número de estaciones espaciales no OSG que son visibles desde el radiotelescopio
- i : índice de la estación espacial no OSG considerada
- P_i : potencia de RF de la emisión no deseada a la entrada de la antena (o la potencia radiada de RF si se trata de una antena activa) de la estación espacial transmisora considerada en el sistema no OSG, (dBW) en la anchura de banda de referencia
- θ_i : ángulo (grados), entre el eje de puntería de la estación espacial transmisora considerada en el sistema no OSG y la dirección del radiotelescopio
- $G_t(\theta_i)$: ganancia de la antena transmisora (expresada como una relación) de la estación espacial considerada en el 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 (grados), entre la dirección de puntería del radiotelescopio y la dirección de la estación espacial transmisora considerada en el sistema no OSG
- $G_r(\phi_i)$: ganancia de la antena receptora (expresada como una relación) del radiotelescopio, en la dirección de la estación espacial transmisora considerada del sistema no OSG (véase el Anexo 2)
- $G_{r,m\acute{a}x}$: dfpe máxima ganancia (expresada como una relación) del radiotelescopio
- $dfpe$: dfpe instantánea (dB(W/m²)), en la anchura de banda de referencia en el radiotelescopio.

Para calcular la $dfpe$ en la ecuación (1) se supone que la dfp resultante de todas las fuentes interferentes está dirigida al eje de puntería de la antena receptora, donde la ganancia de antena es máxima. Sin embargo, los criterios de protección de sistemas de radioastronomía utilizan como referencia un contorno de 0 dBi para la antena de radioastronomía. Utilizando el método de la ecuación (1), la dfp provocada por todas las fuentes interferentes dirigidas a la ganancia 0 dBi de la antena receptora se puede calcular de esta forma:

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

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

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

NOTA 2 – Para algunos radiotelescopios, la dirección de máxima ganancia (dirección del eje de puntería) no coincide siempre necesariamente con el eje geométrico del radiotelescopio.

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

NOTA 4 – La ganancia de antena de la estación transmisora, $G_t(\theta_i)$ se determina a la frecuencia de la banda de radioastronomía considerada. Podría ser diferente 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 un entorno dinámico, en el que se utiliza el modelo descrito en la Recomendación UIT-R S.1428 para antenas del servicio fijo por satélite. Es necesario hacer otros estudios para definir los diagramas de antena de radioastronomía. Entre tanto, y a falta de diagramas medidos, los de la Recomendación UIT-R S.1428 pueden considerarse representativos de las antenas de radioastronomía, tanto para el haz principal como para las regiones del lóbulo lateral. El siguiente es un

ejemplo tomado de la Recomendación UIT-R S.1428 para el diagrama con reflectores de más de 100λ de diámetro:

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

donde:

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

La siguiente representación, posiblemente mas precisa, es otra opción para el primer sector interno de un grado de separación respecto al eje de puntería y se podrá utilizar para esta parte del diagrama de antena.

1 Modelo del haz principal

Una opción realista es utilizar el siguiente modelo para el haz principal de una antena circular (véase la Nota 1):

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

donde:

$$G_{r,m\acute{a}x} = \left[\frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} \right] \text{ es la máxima ganancia (expresada como una relación)}$$

donde:

$$A_{eff} = \pi(D/2)^2 \text{ es el área de apertura del telescopio (m}^2\text{)}$$

D : diámetro efectivo del telescopio (m)

λ : longitud de onda (m)

$$x = \frac{\pi \cdot D \cdot \varphi}{360 \cdot \lambda} \text{ siendo } \varphi \text{ el ángulo fuera del eje de puntería (grados)}$$

y

$J_1(x)$: función de Bessel de primer grado.

El primer cero en este diagrama de antena corresponde a la siguiente posición:

$$\varphi_0 = 69,88/(D/\lambda) \text{ grados con respecto al eje de puntería}$$

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

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

Este modelo del haz principal corresponde al caso ideal de una eficiencia de apertura del 100%.

NOTA 1 – Las ecuaciones (3) y (4) están expresadas como una relación.

2 Modelo de los lóbulos laterales cercanos separados hasta 1° del eje de puntería

Se propone el siguiente modelo para los lóbulos laterales cercanos en la región ($\varphi_0 \leq \varphi \leq 1^\circ$) (véase la Nota 1):

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

donde:

$$x = \frac{\pi \cdot D \cdot \varphi}{360 \cdot \lambda} \text{ siendo } \varphi \text{ el ángulo con respecto al eje de puntería (grados)}$$

D : diámetro efectivo del radiotelescopio

λ : longitud de onda de funcionamiento

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

NOTA 1 – Las ecuaciones (3) y (4) están expresadas como una relación.

ANEXO 3

Distribución de los niveles de dfpe

En este Anexo se describe un método para calcular las estadísticas de la dfpe en todo el cielo.

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

En este método, la primera operación consiste en dividir el cielo en M anillos paralelos al horizonte, igualmente repartidos por lo que respecta al ángulo de elevación entre 0° y 90° . La anchura de cada anillo es $90/M^\circ$. La siguiente operación consiste en dividir estos anillos en células, cuya anchura

acimutal se elige de forma que haya un número entero de células en cada anillo, y es aproximadamente igual a:

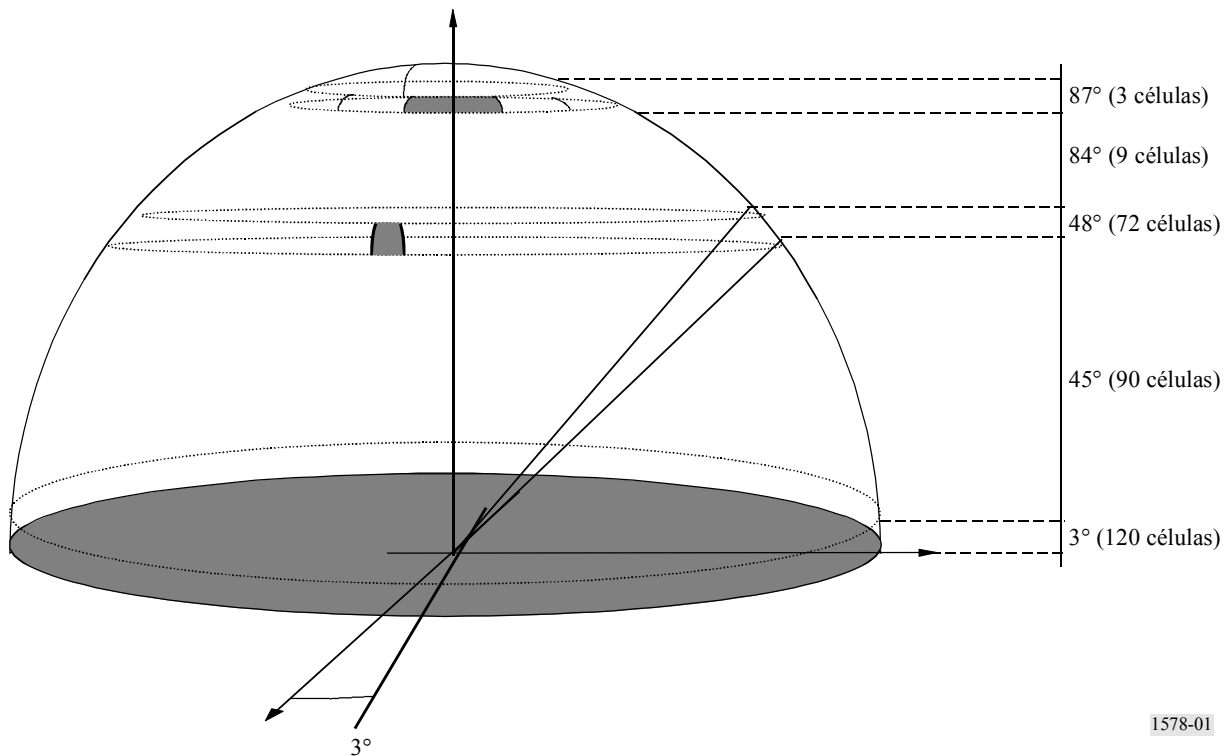
$$\frac{90 / M}{\cos(\text{elevación})} \quad \text{grados}$$

La Fig. 1 es un ejemplo de división con escalones de 3° de anchura en elevación, dividiendo el cielo en 30 anillos que tienen un ángulo de elevación de 3°. En estas condiciones, la anchura en el eje acimutal es aproximadamente:

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

La elevación es el valor medio en un anillo determinado.

FIGURA 1
Ejemplo de división del cielo en células con un ángulo sólido de unos 9 grados cuadrados



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

CUADRO 1

Ejemplo de división del cielo en células cuadradas con ángulo sólido de unos 9° cuadrados

Elevación del límite inferior del anillo (grados)	Ángulo sólido del anillo (grados cuadrados)	Ángulo sólido acumulativo (grados cuadrados)	Escalón de acimut (grados)	Número de células del anillo	Ángulo sólido de una célula (grados cuadrados)	Número de células acumulativo	Porcentaje de ángulo sólido (%)	Ángulo sólido acumulativo (%)
0	1 079,51	1 079,51	3	120	9,00	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	50,00
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	100,00

2 Distribución de la dfpe en una célula

Para empezar se elige aleatoriamente la dirección de puntería de la antena del servicio de radioastronomía correspondiente a una determinada célula del cielo según la división descrita en el punto anterior. Después se elige también aleatoriamente la hora de comienzo de la constelación. Entonces se puede calcular la dfpe para cada instante de un tiempo de integración de 2000 s. A continuación, se calcula el valor medio de dfpe en esta prueba para la dirección de puntería y la hora de comienzo de la constelación elegidos.

Esta operación se repite para obtener una distribución estadística de dfpe en la célula considerada. El método está basado en varias pruebas, calculando en cada una el valor medio de dfpe en un intervalo de integración de 2000 s. Cuanto mayor sea el número de pruebas, más precisa será la distribución. Es necesario hacer un número adecuado de pruebas para lograr resultados suficientemente fiables. En particular, el resultado de multiplicar el número de pruebas por el tiempo de integración de 2000 s debe ser considerablemente superior al periodo de la constelación. También es necesario hacer un muestreo estadístico apropiado para todo el periodo de la constelación. Cuando ya no se obtengan variaciones significativas en la distribución, se podrá afirmar que el número de pruebas realizadas es suficiente. Esta verificación podría hacerse de forma automática, como una parte de la simulación, o manualmente, deteniendo la simulación a intervalos regulares.

3 Distribución de la dfpe en las direcciones de puntería más desfavorables (a considerar únicamente si los niveles de dfp de los satélites son constantes para un determinado ángulo de elevación de la antena del servicio de radioastronomía)

Se puede simplificar la evaluación de distribuciones de la dfpe en células del cielo, determinando en primer lugar la distribución de dfpe en las direcciones de puntería que constituyen los casos más desfavorables. Puede considerarse que las direcciones de puntería más desfavorables son aquellas en las que la probabilidad de visibilidad de los satélites es más elevada. Estas direcciones de puntería se pueden determinar de acuerdo con 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 los acimutes de caso más desfavorable (generalmente hay dos acimutes de caso más desfavorable para cada elevación).

En las células correspondientes a estas direcciones de puntería más desfavorables, la distribución de dfpe se puede calcular para un número suficiente de tiempos de integración de 2000 s. Después se podrá comparar esta distribución de dfpe con un nivel umbral de dfp (definido para una ganancia de antena de recepción de 0 dBi en la dirección de la interferencia y un tiempo de integración de 2000 s).

Se puede calcular el porcentaje de tiempo durante el cual se sobrepasa el nivel de umbral dfp en una célula como el porcentaje de periodos de integración de 2000 s durante el cual el valor medio de la dfp en el radiotelescopio rebasa este nivel umbral de dfp.

Comparando la distribución de dfpe y el nivel umbral de dfp para las células correspondientes a estas direcciones de puntería más desfavorables, pueden sacarse las siguientes conclusiones:

- Si en todos los M anillos se alcanza el umbral de dfp en las direcciones de puntería más desfavorables durante un porcentaje de tiempo superior al porcentaje de tiempo adoptado como criterio, se puede afirmar que los criterios se satisfacen en todo el cielo.
- Sí en un anillo definido con un determinado ángulo de elevación en las direcciones de puntería de caso más desfavorable se alcanza el umbral de dfp, durante un porcentaje de tiempo superior al porcentaje de tiempo adoptado como criterio, se puede decir que los criterios se cumplirán siempre en todo este anillo.
- Si no se satisfacen los criterios de interferencia, será necesario hacer otros estudios.

El análisis de estas direcciones de puntería más desfavorables proporciona información sobre la posición más desfavorable de las células.

4 Resultado en términos de distribución de la dfpe

Los cálculos de dfpe descritos en el § 2 permiten obtener una distribución de niveles de dfpe para cada célula del cielo, como se puede ver en la Fig. 2.

