

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R S.1586

**Расчет уровней нежелательных излучений, создаваемых негеостационарной системой фиксированной спутниковой службы в местах расположения радиоастрономических станций**

(Вопрос МСЭ-R 236/4)

(2002)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что в некоторых случаях радиоастрономическая служба и космические службы (космос–Земля) имеют распределения в смежных или в близко расположенных полосах частот;
- b) что радиоастрономическая служба основывается на приеме излучений со значительно меньшими уровнями мощности, чем обычно используемые в других службах радиосвязи;
- c) что вследствие столь низких уровней мощности принимаемых сигналов радиоастрономическая служба обычно более восприимчива к помехам от нежелательных излучений, чем другие службы;
- d) что Рекомендация 66 (Пересм. ВКР-2000) предлагает в п. 5 раздела *рекомендует МСЭ-R* "провести исследования тех полос частот и ситуаций, где по техническим или эксплуатационным причинам могут потребоваться более жесткие пределы побочных излучений, чем общие пределы, указанные в Приложении 3, для защиты служб безопасности и пассивных служб, как, например, радиоастрономии, а также влияния применения или неприменения таких пределов на все затрагиваемые службы;";
- e) что Рекомендация 66 (Пересм. ВКР-2000) предлагает в п. 6 раздела *рекомендует МСЭ-R* "провести исследования тех полос частот и ситуаций, где по техническим или эксплуатационным причинам может потребоваться установить пределы внеполосных излучений для защиты служб безопасности и пассивных служб, как, например, радиоастрономии, а также влияния применения или неприменения таких пределов на все затрагиваемые службы;";
- f) что некоторые примечания к Регламенту радиосвязи (РР) (такие как пп. 5.149, 5.443В, 5.511А и 5.551G) обращают внимание на защиту радиоастрономической службы, в частности, от космических передатчиков;
- g) что вследствие характеристик негеостационарных (НГСО) спутниковых систем и, в частности, изменяющегося во времени характера помех, уровень помех радиотелескопам, создаваемых такими спутниками, нельзя оценивать тем же способом, что и для помех от спутников ГСО,

*рекомендует,*

- 1 чтобы расчеты уровней нежелательных излучений, создаваемых негеостационарной системой фиксированной спутниковой службы (ФСС) в местах расположения радиоастрономических станций, могли проводиться администрациями с использованием метода, приведенного в Приложении 1;
- 2 чтобы при выполнении таких расчетов для моделирования радиоастрономических антенн могла использоваться диаграмма направленности антенны, приведенная в Приложении 2;
- 3 чтобы процент времени, в течение которого превышает уровень эквивалентной плотности потока мощности (э.п.п.м.) (определенной из предположения, что усиление приемной антенны в направлении помехи равно 0 дБи, и с учетом заданного времени интеграции), можно было рассчитывать в соответствии с методом, приведенным в Приложении 3.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### **Расчет уровней нежелательных излучений, создаваемых системой НГСО ФСС в местах расположения радиоастрономических станций**

Описанная здесь методика, основанная на концепции э.п.п.м., изложенной в п. 22.5С Статьи 22 РР, предназначена для использования при расчетах уровней плотности потока мощности (п.п.м.), создаваемых радиотелескопам от нежелательных излучений спутниковой системы НГСО ФСС, с учетом характеристик как спутниковой системы, так и антенны радиотелескопа. Величина э.п.п.м. равна сумме составляющих от всех излучений спутников, выраженных в виде п.п.м. единичного эквивалентного источника в направлении прицеливания (пик основного лепестка) радиотелескопа.

#### **1 Требуемые параметры**

Вследствие особых характеристик спутниковых систем НГСО очевидно, что уровень помех радиотелескопу от таких спутников нельзя вычислять тем же способом, что и для спутников ГСО. Необходим статистический подход, при котором учитывается динамический аспект спутников НГСО.

Оценку помех, создаваемых радиотелескопу от спутников при заданном времени интеграции (2000 с), следует основывать на статистических расчетах с учетом параметров как спутников, так и радиотелескопа.

Параметры спутниковой системы НГСО:

- число спутников, видимых одновременно на радиоастрономической станции;
- уровень п.п.м. в месте расположения радиотелескопа в рассматриваемой полосе частот радиоастрономической службы, вычисленный с использованием маски дБsd или дБн;
- расстояния между спутниками и радиоастрономической станцией;
- детальные характеристики орбит спутников.

Параметры радиотелескопа:

- расположение антенны;
- диаграмма направленности и коэффициент усиления антенны;
- практический сектор направлений наведения антенны;
- опорное направление наведения;
- внеосевые углы между опорным направлением наведения антенны радиоастрономической станции и направлениями на передающие спутники;
- время интеграции (2000 с).

## 2 Расчет уровней э.п.п.м. в местах расположения радиоастрономических станций

Усиление приемной антенны радиотелескопа в направлении на спутник НГСО (в отличие от спутника ГСО) изменяется во времени в основном из-за движения спутника и тонкой угловой структуры боковых лепестков диаграммы направленности антенны радиотелескопа. Будут иметь место периоды времени, когда коэффициент усиления телескопа в направлении на спутник будет значительно выше 0 дБи, а также периоды, когда он будет ниже данной величины. Кроме того, при наличии нескольких спутников в системе НГСО следует суммировать и правильно учитывать вклады всех этих спутников.

Это можно сделать с применением концепции э.п.п.м., первоначально разработанной для оценки условий возможного совместного использования частот системами НГСО и ГСО. Далее в этом разделе данная концепция приспособлена для случая воздействия помех от спутников НГСО на радиоастрономическую станцию. Определение э.п.п.м. основано на п. 22.5С РР, принятом на Всемирной конференции радиосвязи (Стамбул, 2000 г.) (ВКР-2000).

### 2.1 Определение э.п.п.м.

Когда на антенну в пределах ее эталонной ширины полосы частот поступают сигналы одновременно от нескольких находящихся на разных расстояниях передатчиков по различным направлениям и с разными уровнями приходящей п.п.м., то эквивалентная п.п.м. равна такой п.п.м., которая при приеме сигнала от единичного передатчика, находящегося в дальнем поле антенны в направлении ее максимального усиления, создает на входе приемника такую же величину мощности, что и та, которая реально принимается от совокупности различных передатчиков.

Мгновенная э.п.п.м. рассчитывается по следующей формуле:

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

где:

- $N_a$ : число негеостационарных космических станций, видимых из места расположения радиотелескопа
- $i$ : номер рассматриваемой космической станции НГСО
- $P_i$ : РЧ мощность нежелательного излучения на входе антенны (или РЧ излучаемая мощность в случае активной антенны) рассматриваемой передающей космической станции в системе НГСО в эталонной ширине полосы частот (дБВт)
- $\theta_i$ : внеосевой угол между опорным направлением рассматриваемой передающей космической станции системы НГСО и направлением на радиотелескоп

- $G_t(\theta_i)$ : усиление передающей антенны (в виде отношения) рассматриваемой космической станции системы НГСО в направлении на радиотелескоп
- $d_i$ : расстояние (м) между рассматриваемой передающей станцией системы НГСО и радиотелескопом
- $\varphi_i$ : внеосевой угол между направлением наведения радиотелескопа и направлением на рассматриваемую передающую космическую станцию системы НГСО
- $G_r(\varphi_i)$ : усиление приемной антенны (в виде отношения) радиотелескопа в направлении рассматриваемой передающей космической станции системы НГСО (см. Приложение 2)
- $G_{r,max}$ : максимальное усиление (в виде отношения) антенны радиотелескопа
- $epfd$ : мгновенная э.п.п.м. в эталонной ширине полосы частот в месте расположения радиотелескопа (дБ(Вт/м<sup>2</sup>)).

При вычислении э.п.п.м. по формуле (1) предполагается, что п.п.м., создаваемая всеми источниками помех, приходит по опорному направлению приемной антенны, у которой коэффициент усиления максимален. Однако критерии защиты радиоастрономии основаны на уровне 0 дБи огибающей диаграммы направленности радиоастрономической антенны. Используя подход в уравнении (1), п.п.м., создаваемую всеми источниками помех в направлении усиления приемной антенны на уровне 0 дБи, можно определить следующим образом:

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

Величины  $epfd_{G_r=0 \text{ дБи}}$ , полученные из уравнения (2) и усредненные по времени интеграции 2000 с, можно сравнивать с уровнями п.п.м. (определенными в предположении, что коэффициент усиления приемной антенны в направлении помех при данном времени интеграции равен 0 дБи).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Предполагается, что каждый передатчик расположен в дальнем поле радиотелескопа (т. е. на расстоянии более  $2D^2/\lambda$ , где  $D$  – эффективный диаметр радиотелескопа, а  $\lambda$  – рассматриваемая длина волны). Хотя этот подход не всегда может быть удовлетворительным, однако считается достаточной аппроксимацией.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Для некоторых телескопов направление максимального усиления (опорное направление) может не всегда совпадать с геометрической осью радиотелескопа.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – В случае активных антенн  $P_i$  следует считать излучаемой РЧ мощностью, а не мощностью на входе антенны.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Усиление антенны передающей станции,  $G_t(\theta_i)$ , берется на частоте рассматриваемой полосы радиоастрономической службы. Оно может отличаться от усиления на частотах передачи.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**Модель диаграммы направленности антенны радиотелескопа**

Диаграммы направленности (ДН) антенн, такие как приведенные в Рекомендации МСЭ-R SA.509, не подходят для использования в динамических условиях. В таких условиях для антенн ФСС используется модель, приведенная в Рекомендации МСЭ-R S.1428. Необходимо продолжить работы по определению ДН радиоастрономических антенн. Пока же, при отсутствии данных по измерениям ДН, в качестве типичных для радиоастрономических антенн по зонам как основного, так и боковых лепестков, можно считать диаграммы направленности в Рекомендации МСЭ-R S.1428. Ниже приведен взятый из Рекомендации МСЭ-R S.1428 пример диаграммы направленности для отражателей диаметром более  $100 \lambda$ :

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

где:

$$\begin{array}{ll}
 G_{max} = 20 \log \left( \frac{D}{\lambda} \right) + 8,4 & \text{дБи} \\
 G_1 = -1 + 15 \log \left( \frac{D}{\lambda} \right) & \text{дБи} \\
 \varphi_m = \left( \frac{20 \lambda}{D} \right) \sqrt{(G_{max} - G_1)} & \text{градусов} \\
 \varphi_r = 15,85 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} & \text{градусов.}
 \end{array}$$

Кроме того, ниже приведено возможно более точное представление сектора ДН для внеосевых углов от  $0$  до  $1^\circ$ , которое можно использовать для этой части ДН антенны.

**1 Модель основного лепестка**

Реалистичным подходом является использование следующей модели основного лепестка круговой антенны:<sup>1</sup>

$$G_r(\varphi) = G_{r,max} \left[ \frac{J_1(2\pi x)}{\pi x} \right]^2, \quad (3)$$

<sup>1</sup> Уравнения (3) и (4) выражены в виде отношений, а не дБ.

где:

$$G_{r,max} = \left[ \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} \right]: \text{ максимальное усиление (выраженное в виде отношения),}$$

где:

$$A_{eff} = \pi(D/2)^2: \text{ площадь апертуры телескопа (м}^2\text{)}$$

$$D: \text{ эффективный диаметр телескопа (м)}$$

$$\lambda: \text{ длина волны (м)}$$

$$x = \frac{\pi D \varphi}{360 \lambda}, \text{ где } \varphi \text{ – угол отклонения от опорного направления (градусы)}$$

$J_1(x)$ : функция Бесселя 1-го порядка.

Первый нуль ДН такой антенны:

$$\varphi_0 = 69,88/(D/\lambda) \quad \text{градусов отклонения от опорного направления.}$$

Например, если  $D = 100$  м, а  $\lambda = 3$  см, то  $G_{r,max} = 1,09 \times 10^8$  (эквивалентно +80,4 дБи), и:

$$\varphi_0 = 0,0209 \quad \text{градусов.}$$

## 2 Модель ближних боковых лепестков в пределах $1^\circ$ от опорного направления

Для ближних боковых лепестков в пределах угла  $\varphi_0 \leq \varphi \leq 1^\circ$  предлагается следующая модель:<sup>2</sup>

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

где:

$$x = \frac{\pi D \varphi}{360 \lambda}, \text{ где } \varphi \text{ – угол отклонения от опорного направления (градусы)}$$

$$D: \text{ эффективный диаметр радиотелескопа (м)}$$

$$\lambda: \text{ рабочая длина волны (м)}$$

и

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

<sup>2</sup> Уравнения (3) и (4) выражены в виде отношений, а не дБ.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Распределение уровней э.п.п.м.

В данном Приложении описан способ получения статистических данных относительно э.п.п.м. по всей небесной сфере.

### 1 Деление небесной сферы на ячейки с примерно одинаковым телесным углом

Первым шагом в данном подходе является разделение небесной сферы на  $M$  колец, параллельных горизонту и равномерно разнесенных по углу места в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Ширина каждого кольца будет равна  $90^\circ/M$ . Следующим шагом будет разделение этих кругов на соты, ширина которых по азимуту выбирается с расчетом получения целого числа сот на каждое кольцо и примерно равна:

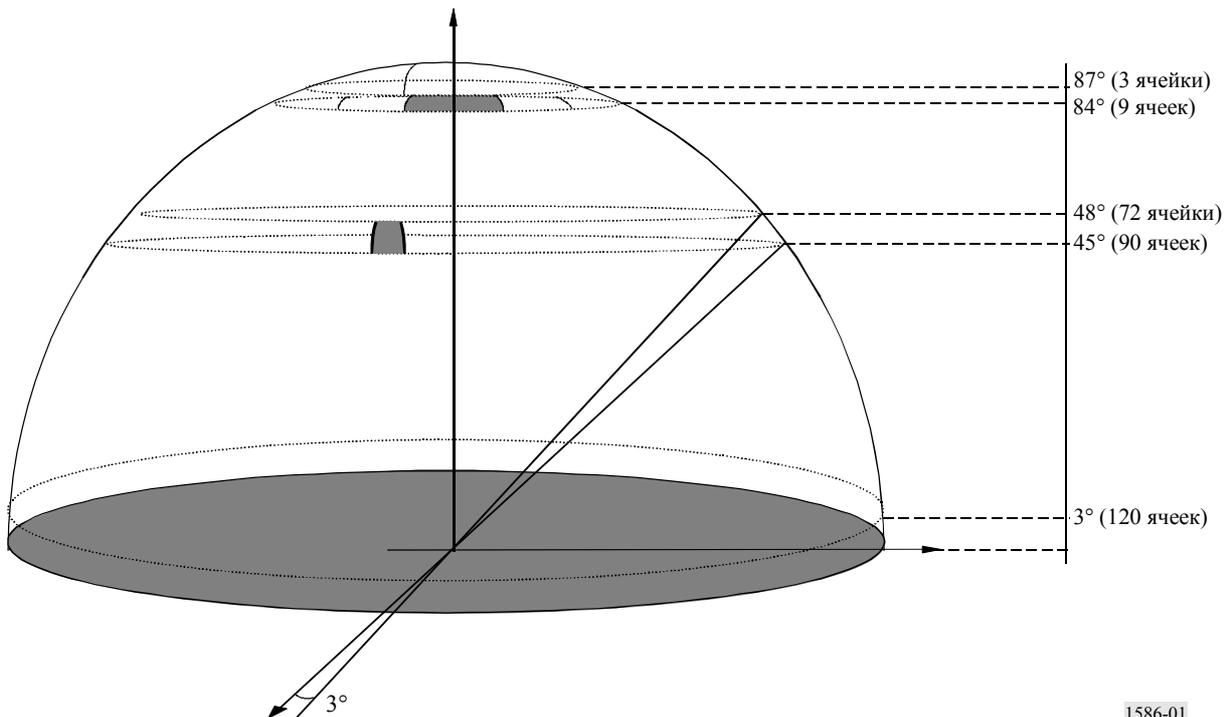
$$\frac{90/M}{\cos(\text{угол места})} \quad \text{градусов.}$$

На рисунке 1 приведен пример разделения при шаге шириной  $3^\circ$  по углу места. При этом небесная сфера делится на 30 колец с размером по углу места, равным  $3^\circ$ :

$$\frac{90/30}{\cos(\text{угол места})} \quad \text{градусов.}$$

Угол места означает средний угол места для данного кольца.

РИСУНОК 1  
Пример разделения небесной сферы на ячейки размером приблизительно 9 кв. градусов телесного угла



1586-01

Это приводит к разделению небесной сферы на 2334 ячейки размером примерно 9 кв. градусов телесного угла. В таблице 1 приведено число ячеек для каждого кольца в соответствии с данным примером.

ТАБЛИЦА 1

**Пример деления небесной сферы на ячейки размером около 9 кв. градусов телесного угла**

Угол места нижней границы кольца (градусы)	Телесный угол кольца (кв. градусы)	Суммарный телесный угол (кв. градусы)	Шаг азимута (градусы)	Число ячеек в кольце	Телесный угол ячейки (кв. градусы)	Суммарное число ячеек	Процент телесного угла (%)	Суммарный телесный угол (%)
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      Распределение э.п.п.м. по ячейкам**

Сначала произвольно выбирается направление наведения антенны радиоастрономической службы, которое соответствует какой-либо конкретной ячейке на небесной сфере, определенной в параграфе, выше. Затем произвольно выбирается начальное время для группировки спутников. Далее вычисляется э.п.п.м. для каждой временной выборки в пределах времени интеграции 2000 с. После этого вычисляется средняя э.п.п.м. по данному пробному измерению для выбранного направления наведения и начального времени группировки.

Такая операция повторяется для получения статистического распределения значений э.п.п.м. в рассматриваемой ячейке. В данной методике проводится ряд проб, в каждой из которых вычисляется средний уровень э.п.п.м. в пределах времени интеграции 2000 с. Чем большее число таких проб, тем точнее будет определено искомое распределение. Для достижения требуемого уровня достоверности результатов требуется достаточное большое число проб. В частности, число проб, помноженное на время интеграции 2000 с, должно быть значительно больше периода обращения группировки. Необходимо также обеспечить достаточную статистическую выборку по всему периоду обращения группировки. Как только будет установлено, что в искомом распределении не произойдет более значительных изменений, то можно заключить, что выполнено достаточное число проб. Такую проверку можно провести либо автоматически как составную часть моделирования, либо вручную путем остановки моделирования через регулярные интервалы.

## **3      Распределение э.п.п.м. для наихудших случаев направлений наведения (применяется, если уровни п.п.м. со спутников постоянны для данного угла места наведения антенны радиоастрономической службы)**

Оценку распределений э.п.п.м. в ячейках небесной сферы можно упростить, если сначала вычислить распределение э.п.п.м. по направлениям наведения, соответствующим направлениям наихудшего случая. К таким направлениям можно отнести направления наведения, при которых будет иметься наибольшая вероятность видимости спутников. Эти направления наведения можно определить по методу, приведенному в Рекомендации МСЭ-R S.1257 "Аналитический метод вычисления статистических характеристик кратковременной видимости и помех от спутников на негеостационарной орбите, видимых из точки на поверхности Земли" (уравнения (28) и (29)). Для данного угла места и данной группировки спутников НГСО эта Рекомендация позволяет вычислить азимуты для наихудшего случая (при заданном угле места обычно имеются два азимута для наихудшего случая).

Для ячеек, которые соответствуют таким направлениям наведения наихудшего случая, распределение э.п.п.м. можно вычислить для достаточного числа проб при времени интеграции 2000 с. Затем такое распределение э.п.п.м. можно сравнить с пороговым уровнем п.п.м. (вычисленным в предположении усиления приемной антенны в направлении помех, равном 0 дБи, и при заданном времени интеграции 2000 с).

Для любой ячейки процент времени, в течение которого превышает пороговый уровень п.п.м., можно вычислить в виде процента периодов интеграции в 2000 с, в течение которых средняя п.п.м. в месте расположения радиотелескопа превышает заданный пороговый уровень п.п.м.

При сравнении такого распределения э.п.п.м. с пороговым уровнем п.п.м. для ячеек, соответствующих данным направлениям наведения наихудшего случая, можно прийти к следующим заключениям:

- Если во всех  $M$  кольцах уровень п.п.м. для направлений наведения наихудшего случая оказывается ниже пороговой величины в течение времени, превышающего критерий процента времени, то это означает, что данные критерии будут выполняться по всей небесной сфере.
- Если в кольце, определенном для данного угла места уровень п.п.м. для направлений наведения наихудшего случая оказывается ниже пороговой величины в течение времени, превышающего критерий процента времени, то это означает, что данные критерии всегда будут выполняться для всего соответствующего кольца.
- Если критерии помех не выполняются, необходимы дополнительные исследования.

Рассмотрение таких направлений наведения наихудшего случая дает информацию о расположении ячеек для такого наихудшего случая.

#### 4 Выходные данные по распределению э.п.п.м.

Расчет э.п.п.м., описанный в § 2, дает распределение уровней э.п.п.м. для каждой ячейки небесной сферы, как показано на рисунке 2.

РИСУНОК 2

Пример суммарного распределения э.п.п.м. для ячейки

