

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R M.1583*

Расчет помех между негеостационарными системами подвижной спутниковой или радионавигационной спутниковой служб и местами расположения радиоастрономических телескопов

(2002)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что в некоторых случаях радиоастрономическая служба и космические службы (космос-Земля) располагаются в соседних или близлежащих полосах частот;
- b) что радиоастрономическая служба основана на приеме излучений с уровнями мощности гораздо ниже тех, которые, в основном, используются в других радиослужбах;
- c) что вследствие этих низких уровней принимаемой мощности, радиоастрономическая служба, в основном, более восприимчива к помехам от нежелательных излучений, чем другие службы;
- d) что в некоторых примечаниях к Регламенту радиосвязи (РР) (например, пп. 5.149, 5.340, 5.372 и 5.443В) обращается внимание на защиту радиоастрономической службы, в частности, от бортовых передатчиков;
- e) что вследствие характеристик негеостационарных (НГСО) спутниковых систем, и, в частности, из-за изменяющегося во времени характера помех, уровень помехи радиотелескопам от таких спутников нельзя оценить таким же способом, как в случае спутников ГСО,

рекомендует,

- 1 чтобы администрации осуществляли расчет уровней нежелательных излучений, создаваемых системами НГСО радионавигационной спутниковой службы (РНСС) или подвижной спутниковой службы (ПСС) в местах расположения радиоастрономических станций, на основе методики, описанной в Приложении 1;
- 2 чтобы при выполнении этих расчетов для построения моделей радиоастрономических антенн использовалась диаграмма направленности антенны, описанная в Приложении 2;
- 3 чтобы процент времени, в течение которого превышает пороговый уровень эквивалентной плотности потока мощности (э.п.п.м.) (определенный исходя из предположения об усилении приемной антенны 0 дБи в направлении помехи и при данном времени интеграции), также определялся в соответствии с методикой, описанной в Приложении 3.

* Настоящая Рекомендация должна быть доведена до сведения 7-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

Приложение 1

Расчет уровней нежелательных излучений, создаваемых системой НГСО РНСС или МСС в местах расположения радиоастрономических станций

Описанная в настоящем Приложении методика на основе метода "эквивалентной плотности потока мощности" (э.п.п.м.), определенного в п. 22.5С РР, предназначена для использования при расчете уровней плотности потока мощности (п.п.м.), создаваемой на входе радиотелескопа нежелательными излучениями спутниковой системы НГСО, и учитывает характеристики спутниковой системы и антенны радиотелескопа. Значение э.п.п.м. является суммой составляющих, создаваемых всеми излучениями от спутников, которая выражается в виде п.п.м. одного эквивалентного источника, расположенного в направлении прицеливания (пиковый уровень главного луча) радиотелескопа.

1 Требуемые параметры

Вследствие определенных характеристик спутниковых систем НГСО очевидно, что уровень помехи радиотелескопу от таких спутников нельзя оценить таким же способом, как в случае спутников ГСО. Необходим статистический метод, который учитывает динамический фактор спутников НГСО.

Оценка помех, создаваемых этими спутниками радиотелескопу за время интеграции (2000 с), должна проводиться на основе статистических расчетов и должна учитывать параметры спутников и радиотелескопа.

Параметры спутниковой системы НГСО:

- число спутников, видимых на небесной сфере радиоастрономической станции;
- п.п.м., излучаемой каждым спутником, на входе радиотелескопа в рассматриваемой полосе радиоастрономической службы, которая оценивается с использованием маски дБсп или дБн;
- расстояния между спутниками и радиоастрономической станцией;
- подробные орбитальные характеристики спутников.

Параметры радиотелескопа:

- расположение антенны;
- диаграмма направленности антенны и усиление антенны;
- практический диапазон направлений наведения;
- направление прицеливания;
- внеосевые углы между направлением прицеливания антенны радиоастрономической станции и направлениями на передающие спутники;
- время интеграции (2000 с).

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

Усиление приемной антенны радиотелескопа в направлении спутника НГСО (в отличие от ГСО) изменяется во времени главным образом из-за движения спутника и слабой угловой структуры бокового лепестка диаграммы направленности радиотелескопа. В одно время усиление телескопа в направлении спутника будет гораздо больше 0 дБи, а в другое время будет гораздо меньше. Кроме того, в случае многих спутников системы НГСО, все их составляющие должны быть включены и надлежащим образом учтены.

Это возможно с использованием метода э.п.п.м., который первоначально предназначался для оценки условий возможного совместного использования частот системами ГСО и НГСО. В разделе, ниже, этот метод распространяется на случай радиоастрономической станции, испытывающей помехи от спутников НГСО. Определение основывается на п. 22.5С РР, принятом Всемирной конференцией радиосвязи (Стамбул, 2000 г.) (ВКР-2000).

2.1 Определение э.п.п.м.

Если антенна принимает мощность в пределах ее эталонной ширины полосы одновременно от передающих станций на различных расстояниях, в различных направлениях и с различными уровнями падающей п.п.м., то э.п.п.м. – это п.п.м., которая при получении от одного передатчика в дальней зоне антенны в направлении максимального усиления создаст такую же мощность на входе приемника, как и фактически получаемую от всех различных передатчиков.

Мгновенная э.п.п.м. вычисляется 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 космических станций системы НГСО, видимых с радиотелескопа;
- i : индекс рассматриваемой космической станции системы НГСО;
- P_i : РЧ мощность нежелательного излучения рассматриваемой передающей космической станции системы НГСО (дБВт) в эталонной ширине полосы на входе антенны (РЧ излучаемая мощность в случае активной антенны);
- θ_i : внеосевой угол (в градусах) между направлением прицеливания рассматриваемой передающей космической станции системы НГСО и направлением на радиотелескоп;
- $G_t(\theta_i)$: усиление передающей антенны (как отношение) рассматриваемой космической станции системы НГСО в направлении на радиотелескоп;
- d_i : расстояние (в метрах) между рассматриваемой передающей станцией системы НГСО и радиотелескопом;
- φ_i : внеосевой угол (в градусах) между направлением наведения радиотелескопа и направлением на рассматриваемую передающую космическую станцию системы НГСО;
- $G_r(\varphi_i)$: усиление приемной антенны (как отношение) радиотелескопа в направлении на рассматриваемую передающую космическую станцию системы НГСО;
- $G_{r,max}$: максимальное усиление (как отношение) радиотелескопа;
- $epfd$: мгновенное значение плотности потока мощности (дБ(Вт/м²)) в эталонной ширине полосы на входе радиотелескопа.

При расчете э.п.п.м. в уравнении (1) предполагается, что направление п.п.м. от всех источников помех совпадает с направлением прицеливания приемной антенны, при котором усиление антенны максимально. Однако критерии защиты радиоастрономической службы основаны на контуре 0 дБи радиоастрономической антенны. Используя метод из уравнения (1), можно определить п.п.м. от всех источников помех в направлении усиления приемной антенны 0 дБи следующим образом:

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

Получающиеся из уравнения (2) значения $epfd_{G_r=0 \text{ дБи}}$, усредненные за время интеграции 2000 с, можно сравнить с уровнями п.п.м. (определенными исходя из предположения об усилении приемной антенны 0 дБи в направлении помехи и при данном времени интеграции).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Предполагается, что каждый передатчик расположен в дальней зоне радиотелескопа (т. е. на расстоянии более $2D^2/\lambda$, где D – эффективный диаметр радиотелескопа, а λ – наблюдаемая длина волны). Несмотря на то что это требование не всегда может быть удовлетворено, данная аппроксимация считается достаточной.

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

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – В случае активных антенн в качестве P_i следует брать излучаемую РЧ мощность, а не мощность на входе антенны.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Усиление антенны передающей станции, $G_t(\theta_i)$ берется на частоте, принадлежащей рассматриваемой полосе частот радиоастрономической службы. Это усиление может отличаться от усиления на частотах, предназначенных для передач.

Приложение 2

Модель диаграммы направленности антенны радиотелескопа

Диаграммы направленности антенн, как та, которая описана в Рекомендации МСЭ-R SA.509, не подходят для использования в изменяющейся обстановке. В таких условиях применяется модель для антенн фиксированной спутниковой службы, описанная в Рекомендации МСЭ-R S.1428. Необходима дальнейшая работа по определению диаграмм направленности антенн радиоастрономических станций. Между тем, в отсутствие измеренных диаграмм направленности, типовыми для антенн радиоастрономических станций, включая области главных и боковых лепестков, могут считаться диаграммы направленности, приведенные в Рекомендации МСЭ-R S.1428. Приведенный ниже пример взят из Рекомендации МСЭ-R S.1428 для диаграммы направленности рефлекторных антенн, диаметр которых превышает 100λ :

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

где:

$$G_{max} = 20 \log (D/\lambda) + 8,4 \quad \text{дБи}$$

$$G_1 = -1 + 15 \log (D/\lambda) \quad \text{дБи}$$

$$\varphi_m = 20 (\lambda/D) \sqrt{(G_{max} - G_1)} \quad \text{градусов}$$

$$\varphi_r = 15,85 (D/\lambda)^{-0,6} \quad \text{градусов.}$$

С другой стороны, ниже приводится, вероятно, более точное представление диаграммы направленности в пределах одного градуса, которое может использоваться для этой части диаграммы направленности антенны.

1 Модель главного луча

Реалистичный подход заключается в использовании следующей модели для главного луча круговой антенны (см. Примечание 1):

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

где:

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

где:

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

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

$$\lambda: \text{ длина волны (м)}$$

$$x = \frac{\pi \cdot D \cdot \varphi}{360 \cdot \lambda}, \text{ где } \varphi - \text{ угол относительно направления прицеливания (градусы)}$$

и

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

Первый нуль диаграммы направленности антенны:

$$\varphi_0 = 69,88/(D/\lambda) \text{ градусов от направления прицеливания}$$

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

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

Данная модель главного луча соответствует идеальному случаю, при котором эффективность апертуры равна 100%.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Уравнения (3) и (4) выражены в виде отношений.

2 Модель ближних боковых лепестков в интервале до 1° от направления прицеливания

Для ближайших боковых лепестков в интервале $\varphi_0 \leq \varphi \leq 1^\circ$ предлагается следующая модель (см. Примечание 1):

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

где:

$$x = \frac{\pi \cdot D \cdot \varphi}{360 \cdot \lambda}, \text{ где } \varphi \text{ – угол относительно направления прицеливания в градусах}$$

D : эффективный диаметр антенны радиотелескопа

λ : рабочая длина волны

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

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Уравнения (3) и (4) выражены в виде отношений.

Приложение 3

Распределение уровней э.п.п.м.

В настоящем Приложении описывается способ получения статистических данных об э.п.п.м. по всей небесной сфере.

1 Разделение небесной сферы на ячейки с приблизительно равными пространственными углами

Первый шаг данного метода заключается в разделении небесной сферы на M колец, параллельных горизонту и равномерно распределенных с точки зрения угла места от 0° до 90° . Ширина каждого кольца равна $90/M^\circ$. Следующий шаг состоит в делении этих колец на ячейки, ширина азимута которых выбирается таким образом, чтобы получить целое число ячеек в кольце, и приблизительно равна:

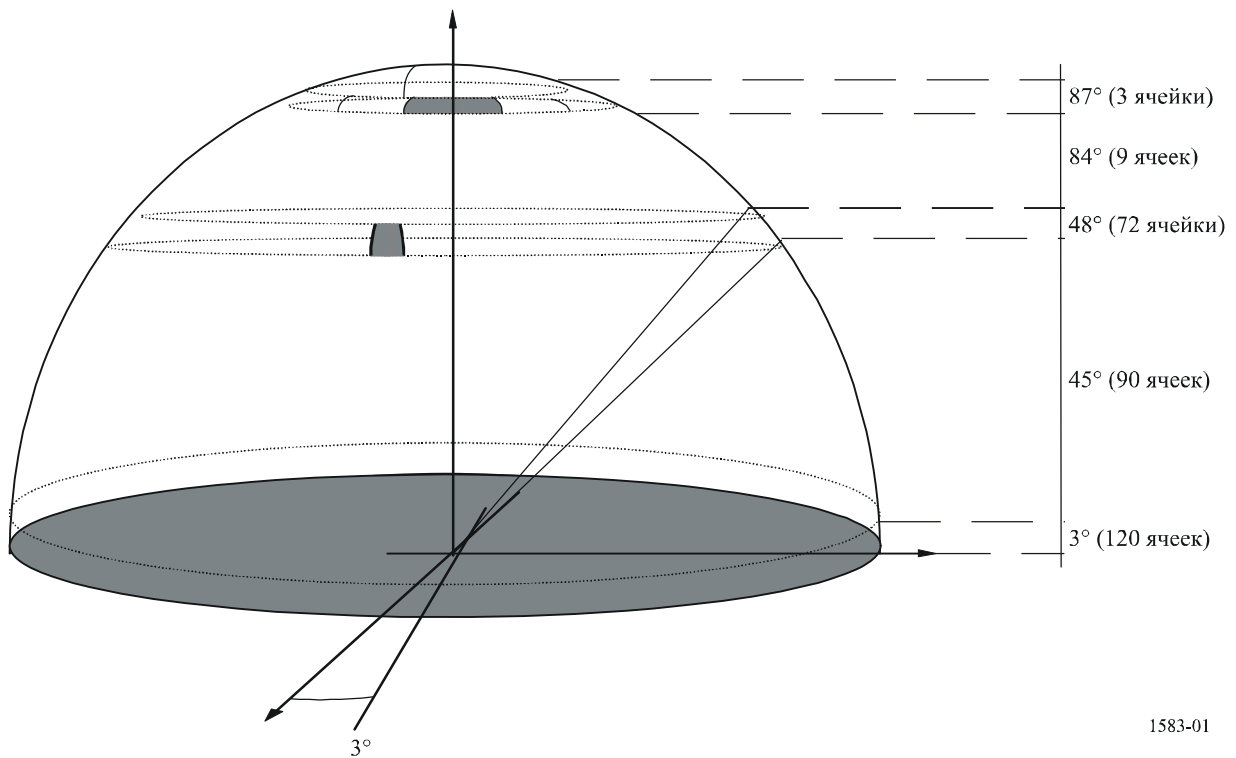
$$\frac{90/M}{\cos(elevation)} \quad \text{градусов.}$$

На рисунке 1 приводится пример разделения с использованием ширины шага угла места 3° , при котором небесная сфера делится на 30 колец с углом места 3° . Тогда ширина азимута приблизительно равна:

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

Угол места является средним значением угла места в данном кольце.

РИСУНОК 1
Пример разделения небесной сферы на ячейки с пространственным углом приблизительно 9 квадратных градусов



1583-01

При этом небесная сфера будет разделена на 2334 ячейки с пространственным углом приблизительно 9 квадратных градусов каждый. В таблице 1 представлен ряд ячеек каждого кольца в соответствии с данным примером.

ТАБЛИЦА 1

Пример разделения небесной сферы на квадратные ячейки с пространственным углом около 9 квадратных градусов

Нижний угол места кольца (градусы)	Пространственный угол кольца (квадратные градусы)	Накопленный пространственный угол (квадратные градусы)	Шаг азимута (градусы)	Число ячеек в кольце	Пространственный угол ячейки (квадратные градусы)	Накопленное число ячеек	Процентная доля пространственного угла (%)	Накопленный пространственный угол (%)
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 Распределение э.п.п.м. для ячейки

Вначале осуществляется случайный выбор направления наведения антенны станции радиоастрономической службы, которое будет лежать в пределах конкретной ячейки небесной сферы, определенной в п. 1. Затем случайным образом выбирается время начала передачи группировки. Далее для каждой временной выборки оценивается э.п.п.м. за время интеграции 2000 с. И затем рассчитывается средняя э.п.п.м., соответствующая данному испытанию, при выбранном направлении наведения и времени начала передачи группировки.

Данная операция повторяется для получения статистического распределения э.п.п.м. в рассматриваемой ячейке. В этом методе используется ряд испытаний, в каждом из которых рассчитывается усредненный уровень э.п.п.м. за интервал времени интеграции 2000 с. Чем больше число испытаний, тем более точным будет данное распределение. Для получения требуемого уровня значимости результатов необходимо достаточное число испытаний. В частности, число испытаний, помноженное на время интеграции 2000 с, должно быть значительно выше периода передачи группировки. Также необходимо обеспечить достаточную статистическую выборку за весь период передачи группировки. Как только обнаружится, что в этом распределении больше не происходит никаких существенных изменений, можно сделать вывод, что выполнено достаточное число испытаний. Такая проверка может выполняться либо автоматически, как составная часть процедуры моделирования, либо вручную, путем приостановки процедуры моделирования через равные промежутки времени.

3 Распределение э.п.п.м. для наихудших случаев направлений наведения (применяется, если уровни п.п.м. со спутников постоянны для данного угла места 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 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 наихудшим случаям направлений наведения, 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. (определенным исходя из предположения об усилении приемной антенны 0 дБи в направлении помехи и при данном 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 наихудшим случаям направлений наведения, можно прийти к следующим заключениям:

- Если во всех M кольцах пороговое значение п.п.м. для наихудших случаев направлений наведения удовлетворяется в течение процента времени, превышающего процент времени критерия, то это означает, что данные критерии будут выполняться по всей небесной сфере.

- Если в кольце, определенном для данного угла места, пороговое значение п.п.м. для наихудших случаев направлений наведения удовлетворяется в течение процента времени, превышающего процент времени критерия, то это означает, что данные критерии предотвращения вредных помех будут выполняться для всего соответствующего кольца.
- Если критерии помех не выполняются, необходимы дополнительные исследования.

Рассмотрение таких наихудших случаев направлений наведения дает информацию о наихудших случаях расположения ячеек.

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

Расчет э.п.п.м., описанный в п. 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

