

Рекомендация МСЭ-R М.1851-2 (12/2023)

Серия М: Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы

Математические модели диаграмм направленности антенн радиолокационных систем службы радиоопределения и систем воздушной подвижной службы для использования при анализе помех

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу <https://www.itu.int/publ/R-REC/ru>)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2025 г.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R М.1851-2

Математические модели диаграмм направленности антенн радиолокационных систем службы радиоопределения и систем воздушной подвижной службы для использования при анализе помех

(2009-2018-2023)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описываются математические модели диаграмм направленности антенн радиолокационных систем службы радиоопределения и систем воздушной подвижной службы, которые следует использовать для анализа единичных и совокупных помех. В зависимости от ширины луча антенны по уровню 3 дБ и пикового уровня первого бокового лепестка можно выбрать верное множество уравнений как для диаграммы направленности по азимуту, так и для диаграммы направленности по углу места. Определяются как пиковая диаграмма направленности – для единичного источника помех, так и усредненная диаграмма направленности – для нескольких источников помех.

Ключевые слова

Диаграммы направленности антенн, распределение тока, поле облучения, уравнения для диаграммы пиковой и усредненной маски

Сокращения/гlossарий

3-D	Three dimensional	Трехмерный
ADP	Antenna directivity pattern	ДНА Диаграмма направленности антенны
CSC ²	Cosecant squared	Косеканс-квадрат
SLL	Sidelobe level	Уровень боковых лепестков

Соответствующие Рекомендации МСЭ-R

Рекомендация МСЭ-R F.699 – Эталонные диаграммы направленности антенн фиксированных беспроводных систем для использования при изучении вопросов координации и оценке помех в диапазоне частот от 100 МГц до 86 ГГц

Рекомендация МСЭ-R F.1245 – Математическая модель усредненных и родственных диаграмм направленности излучения антенн систем фиксированной беспроводной связи для связи пункта с пунктом, предназначенная для использования при оценке помех в диапазоне частот от 1 ГГц до 86 ГГц

Рекомендация МСЭ-R M.1638 – Характеристики и критерии защиты для исследований возможности совместного использования частот радарными радиолокационной (за исключением наземных метеорологических радаров) и воздушной радионавигационной служб, работающими в полосах частот между 5250 и 5850 МГц

Рекомендация МСЭ-R M.1652 – Динамическая частотная селекция в системах беспроводного доступа, включая локальные радиосети в целях защиты службы радиоопределения в диапазоне 5 ГГц

Рекомендация МСЭ-R M.1849 – Технические и эксплуатационные аспекты наземных метеорологических радаров

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

что необходима математическая модель обобщенных диаграмм направленности антенн в целях проведения анализа помех для случая отсутствия конкретной диаграммы направленности радиолокационных систем службы радиоопределения и систем воздушной подвижной службы,

признавая,

что эти математические модели могут быть неприменимы для некоторых систем службы радиоопределения и воздушной подвижной службы, например для расчета диаграмм направленности некоторых антенн воздушной подвижной службы телеметрии,

рекомендует,

- 1) в случае наличия в других Рекомендациях или Отчетах МСЭ-R измеренных диаграмм направленности антенны и/или уравнений диаграммы направленности, применимых к радиолокационным системам службы радиоопределения и системам воздушной подвижной службы, использовать при анализе помех эти диаграммы направленности и/или уравнения;
- 2) в случае отсутствия информации относительно диаграмм направленности антенн рассматриваемой радиолокационной системы службы радиоопределения или системы воздушной подвижной службы, для целей анализа помех использовать одну из математических моделей эталонной антенны, представленных в Приложении 1;
- 3) для фазированных антенных решеток, в случае наличия информации, касающейся их физической конструкции (геометрия, количество излучающих элементов, расстояние между излучающими элементами, диаграмма направленности отдельного элемента и усиление), использовать диаграммы направленности для моделей фазированных антенных решеток, представленных в Приложении 1;
- 4) для фазированных антенных решеток, в случае отсутствия информации, касающейся их физической конструкции, использовать при анализе помех диаграммы направленности антенн с прямоугольной апертурой или линейных антенн с линейным расположением источников, представленных в Приложении 1;
- 5) при проведении анализа помех отдавать предпочтение в случае их наличия измеренным диаграммам направленности антенн, репрезентативных для задействованных антенн, в радиолокационных системах службы радиоопределения или системах воздушной подвижной службы.

Приложение 1

Математические модели диаграмм направленности антенн радиолокационных систем службы радиоопределения и систем воздушной подвижной службы для использования при анализе помех

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1	Введение.....	4
2	Математические формулы.....	5
2.1	Антенна с прямоугольной апертурой	5
2.1.1	Базовая информация.....	5
2.1.2	Теоретические уравнения для антенны	6
2.1.3	Процедура определения маски	11
2.2	Антенна с косекансно-квадратичной угломестной диаграммой направленности.....	14
2.3	Теоретические диаграммы и маски для различных диаграмм направленности антенны.....	18
2.4	Выбор диаграммы направленности антенны для моделей без основания.....	21
3	Сравнение диаграмм направленности антенны	21
4	Антенна с круговой параболической конической апертурой.....	22
4.1	Назначение и описание диаграммы направленности параболической антенны.....	22
4.2	Процедура расчета огибающей боковых лепестков	25
4.3	Выбор диаграммы направленности антенны для моделей без основания.....	28
5	Аппроксимация трехмерных (3D) диаграмм направленности	29
6	Диаграммы направленности для фазированных антенных решеток.....	32
6.1	Линейная фазированная антенная решетка	32
6.2	Плоская фазированная антенная решетка.....	35
7	Эффективность антенны.....	37
8	Примеры измеренных диаграмм направленности	38

1 Введение

Обобщенная математическая модель диаграмм направленности антенн радиолокационных систем службы радиоопределения и систем воздушной подвижной службы необходима в случае, если такие диаграммы направленности не определены в Рекомендациях МСЭ-R, применимых к анализируемым радиолокационным системам службы радиоопределения и системам воздушной подвижной службы. Обобщенные модели диаграмм направленности антенн могут использоваться при анализе одиночной и множественных помех, таких как создаваемые другими радиолокационными системами и системами связи.

В настоящем Приложении описываются диаграммы направленности антенн радиолокационных систем радиоопределения, которые следует использовать для анализа единичных и совокупных помех. При наличии сведений о ширине луча антенны и пиковом уровне первого бокового лепестка можно выбрать верное множество уравнений как для диаграммы направленности по азимуту, так и для диаграммы направленности по углу места.

В таблице 1 представлены диапазоны параметров типичных антенн, полученные из Рекомендаций МСЭ-R.

ТАБЛИЦА 1

Предельные значения параметров типичных антенн радиолокационных систем радиоопределения

Параметр антенны	Единица измерения	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение
Частоты передачи и приема	МГц		420	33 400
Тип поляризации антенны		Горизонтальная, вертикальная, круговая		
Тип антенны		Директорная антенна, параболический отражатель, фазированная решетка		
Тип луча – наиболее распространенный		Веерный, иглообразный, косеканс-квадрат		
Усиление передающей и приемной антенны	дБи		25,6	54
Ширина луча по углу места (–3дБ)	Градусы	Иглообразный луч	0,25	5,75
		Косеканс-квадрат (CSC^2) (уравнения (22), (23) и таблицы 7, 8)	3,6 (θ_3) 20 (θ_{Max})	3,6 (θ_3) 44 (θ_{Max})
Ширина луча по азимуту (–3дБ)	Градусы	Иглообразный луч	0,4	5,75
Пределы сканирования по углу места	Градусы		–60	+90
Пределы сканирования по азимуту	Градусы		Сектор 30	360
Уровень первого бокового лепестка ниже пикового уровня главного лепестка	дБ		–35	–15,6

Таблица 1 использовалась в качестве основы при построении предлагаемых типов и диаграмм направленности антенн.

2 Математические формулы

2.1 Антенна с прямоугольной апертурой

2.1.1 Базовая информация

В случае доступности информации о форме распределения тока или поле облучения апертуры антенны можно использовать более точную модель диаграммы направленности антенны.

В целях упрощения анализа распределение тока в антенне рассматривается как функция координат либо по углу места, либо по азимуту. Диаграмма направленности $F(\mu)$ данного распределения определяется с помощью преобразования Фурье конечной длины следующим образом:

$$F(\mu) = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} f(x) \cdot e^{j\mu x} dx, \quad (1)$$

где:

$f(x)$: относительная форма распределения поля, см. таблицы 2 и 4 и рисунок 1;

μ : содержится в нижеследующей таблице $= \pi \left(\frac{l}{\lambda} \right) \sin(\alpha)$;

l : общая длина апертуры;

λ : длина волны;

ω : угол ориентации (сканирования) луча в вертикальной или горизонтальной плоскости относительно нормали апертуры;

θ : угол между направлением на рассматриваемую точку и нормалью апертуры;

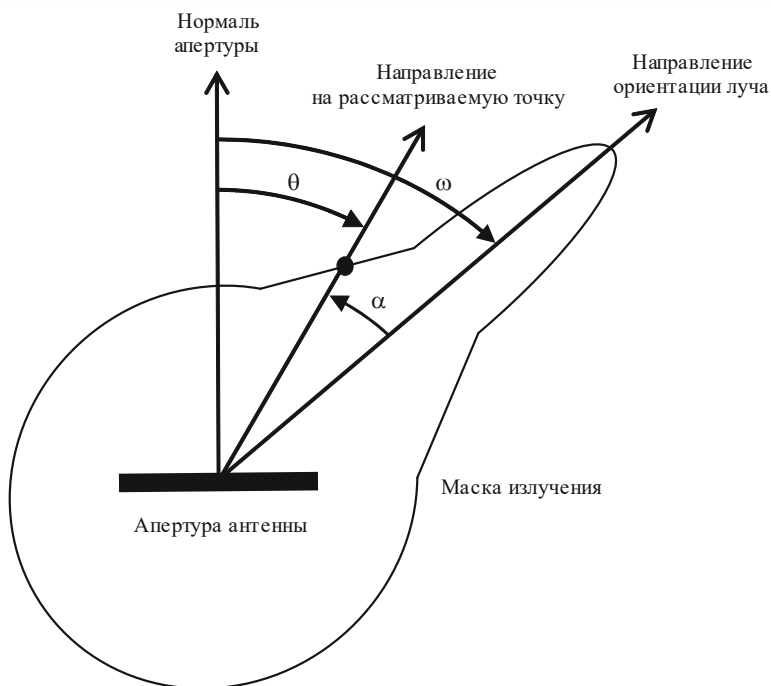
α : угол между направлением на рассматриваемую точку и направлением угла ориентации ($\alpha = \theta - \omega$);

x : нормализованное расстояние вдоль апертуры $-1 \leq x \leq 1$;

j : обозначение комплексного числа.

РИСУНОК 1

Маска полярной диаграммы направленности антенны



М.1851-01

Предлагаемые теоретические диаграммы направленности для антенн с равномерным фазовым распределением излучения представлены в таблицах 2 и 4.

Параметры и формулы для определения диаграмм направленности антенны (ДНА) представлены в таблицах 2 и 4 (и, следовательно, в связанных с ней таблицах и рисунках) с учетом того, что амплитуда поля на ребре апертуры антенны обычно не равна нулю.

Для исследований совместного использования частот и совместимости с другими радиолокационными системами и системами воздушной подвижной службы рекомендуется использовать пиковые или усредненные маски для одиночного источника помех или нескольких источников помех соответственно. Маска отклоняется в точке разрыва от теоретической диаграммы и снижается к боковым лепесткам к минимальному уровню маски, с тем чтобы отобразить дальние боковые лепестки и задние лепестки антенны.

В случае наличия реальных диаграмм направленности антенн радиолокационных систем эти диаграммы следует перевести в цифровую форму и использовать их.

2.1.2 Теоретические уравнения для антенны

Уравнения нормализованных (нормированных) диаграмм направленности и соответствующие параметры приведены в таблицах 2 и 3 для различных функций косинусоидального распределения поля в апертуре антенны с учетом уровня основания C . Основание – это уровень по краям антенны при нормализованном распределении амплитуд. Угол сканирования обозначен буквой ω . θ_3 – это ширина луча антенны (в градусах) по уровню половинной мощности 3 дБ. SLL – уровень первого бокового лепестка ниже главного луча в децибелах. Диапазоны уровней боковых лепестков для каждого распределения амплитуды ($n = 0, 1$ или 2) указаны в столбце "Диапазон максимального уровня боковых лепестков ниже нормализованного пикового значения главного лепестка (дБ)" таблицы 2 для модели с использованием основания. Нормализованные диаграммы направленности и соответствующие параметры для модели без основания приведены в таблице 4.

Разница между этими двумя моделями заключается в том, что первая из них (таблицы 2 и 3) может давать любой уровень боковых лепестков в диапазоне от $-13,2$ дБ до -40 дБ, а вторая дает дискретные значения уровней боковых лепестков $-13,2$ дБ, -23 дБ, -32 дБ, -40 дБ и -47 дБ. Вторая модель также дает гораздо более крутую нисходящую огибающую боковых лепестков по сравнению с первой.

ТАБЛИЦА 2

Теоретические параметры направленности антенны с прямоугольной апертурой

Относительная форма распределения поля $f(x)$ с основанием C , где $-1 \leq x \leq 1$	Диаграмма направленности $F(\mu)$ (μ в радианах)	Коэффициент K (°)	Ширина луча по уровню половинной мощности θ_3 (градусы)	μ (в радианах) как функция θ_3 (в градусах)	Диапазон уровней первого бокового лепестка ниже пикового значения главного лепестка (дБ)	Номер уравнения
Равномерное распределение	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}$	50,8	$K\left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi \cdot K \cdot \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-13,2	(2)
$C + (1 - C) \cos\left(\frac{\pi x}{2}\right)$ (C из уравнения (5))	$\frac{C \frac{\sin \mu}{\mu} + (1 - C) \frac{2}{\pi} \frac{\cos \mu}{1 - \left(\frac{2\mu}{\pi}\right)^2}}{C + (1 - C) \frac{2}{\pi}}$	Уравнение (6)	$K\left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi \cdot K \cdot \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	От -22,7 до -13,2	(3)
$C + (1 - C) \cos^2\left(\frac{\pi x}{2}\right)$ (C из уравнения (7))	$\frac{C \frac{\sin \mu}{\mu} + \frac{(1 - C)}{2\mu} \frac{\sin \mu}{1 - \left(\frac{\mu}{\pi}\right)^2}}{C + \frac{(1 - C)}{2}}$	Уравнение (8)	$K\left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi \cdot K \cdot \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	От -40 до -22,7	(4)

ТАБЛИЦА 3

Таблица для выбора параметров антенны с прямоугольной апертурой (косинусоидальный конус)

Косинусоидальное распределение в степени n	Диапазон максимального уровня боковых лепестков ниже нормализованного пикового значения главного лепестка (дБ)	Основание C	Коэффициент ширины луча K (°)
0	-13,2	—	50,8
1	От -22,7 до -13,2	$C = 0,0007(SLL + 22,7)^3 - 0,006(SLL + 22,7)^2 + 0,09(SLL + 22,7) + 0,1$ (5)	$K = -0,0117(SLL + 22,7)^3 + 0,217(SLL + 22,7)^2 - 2,46(SLL + 22,7) + 64,2$ (6)
2	-40 ... -22,7	$C = 0,0056(SLL + 40)^3 - 0,04(SLL + 40)^2 + 1,1(SLL + 40) + 9,9)/100$ (7)	$K = -0,0013(SLL + 40)^3 + 0,018(SLL + 40)^2 - 0,79(SLL + 40) + 73$ (8)

ТАБЛИЦА 4

Теоретические параметры направленности антенны для антенны с прямоугольной апертурой или линейной антенны с линейным расположением источников без основания

Относительная форма распределения поля $f(x)$ с основанием C , где $-1 \leq x \leq 1$	Диаграмма направленности $F(\mu)$ (μ в радианах)	Ширина луча по уровню половинной мощности θ_3 (градусы)	μ (в радианах) как функция θ_3 (в градусах)	Диапазон уровней первого бокового лепестка ниже пикового значения главного лепестка (дБ)	Номер уравнения
Равномерное распределение	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}$	$50,8 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \times 50,8 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-13,2	(9)
$\cos\left(\frac{\pi x}{2}\right)$	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$68,8 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \times 68,8 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-23	(10)
$\cos^2\left(\frac{\pi x}{2}\right)$	$\frac{\pi^2}{2, \mu} \left[\frac{\sin(\mu)}{(\pi^2 - \mu^2)} \right]$	$83,2 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \times 83,2 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-32	(11)
$\cos^3(\pi x/2)$	$\frac{3\pi \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$95 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \times 95 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-40	(12)
$\cos^4(\pi x/2)$	$\frac{3\pi^4 \sin(\mu)}{2\mu(\mu^2 - \pi^2)(\mu^2 - 4\pi^2)}$	$106 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \times 106 \times \sin(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-47	(13)

Трёхмерную (3D) диаграмму направленности можно получить следующим образом:

в линейных единицах:

$$G_{3D} = G_1(\theta_1) \times G_2(\theta_2) \quad (14)$$

или в децибелах:

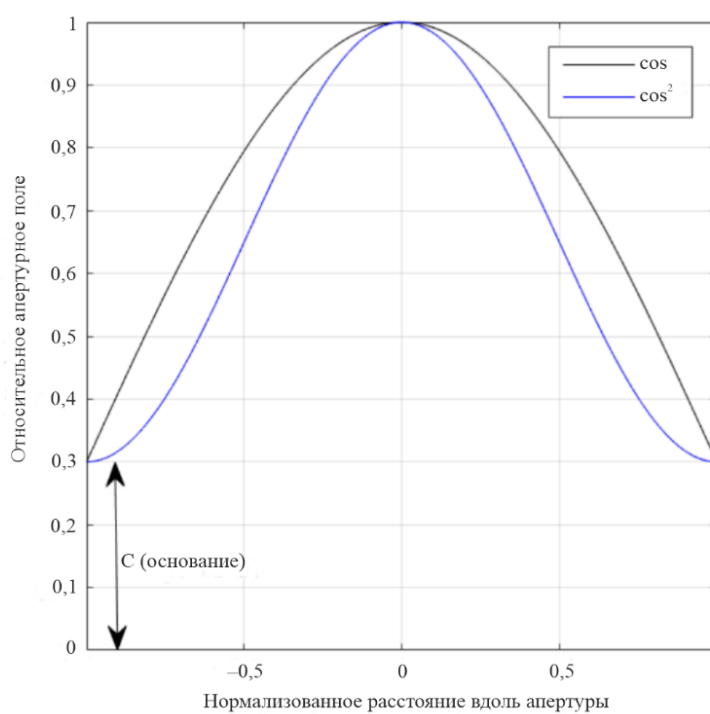
$$G_{3D,dB} = G_{1,dB}(\theta_1) + G_{2,dB}(\theta_2), \quad (15)$$

где G_{3D} , G_1 , G_2 нормализованы, G_1 и G_2 – диаграммы направленности антенны в плоскостях E и H , θ_1 и θ_2 – углы места в этих плоскостях.

Относительные формы различных функций косинусоидального распределения поля $f(x)$ с основанием, как указано в таблице 2, и без основания, как указано в таблице 4, схематически изображены соответственно на рисунках 2 и 3.

РИСУНОК 2

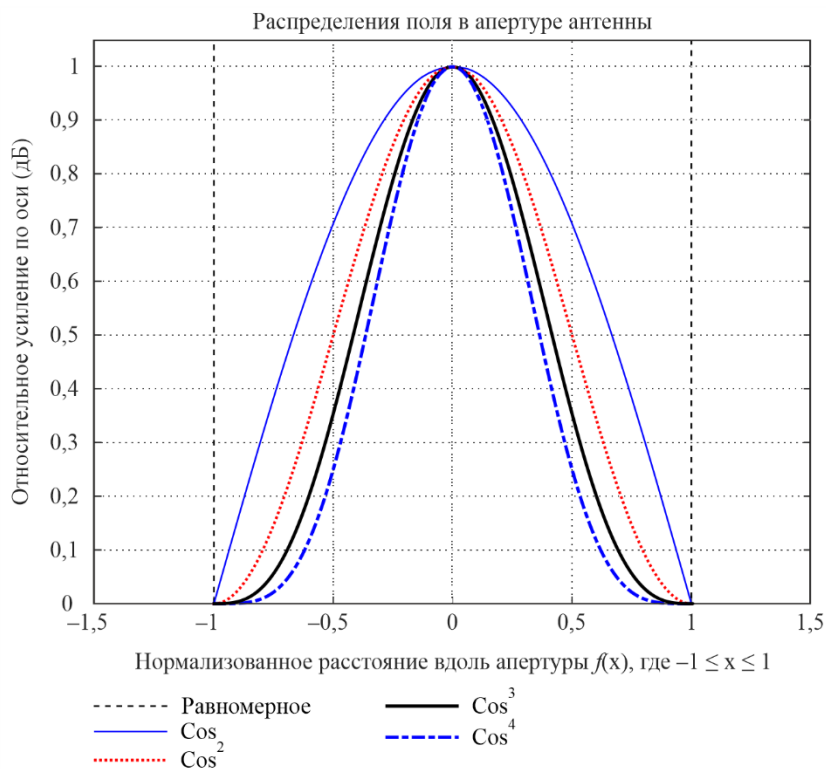
Распределение поля в апертуре антенны с основанием



М.1851-02

РИСУНОК 3

Распределение поля в апертуре антенны без основания



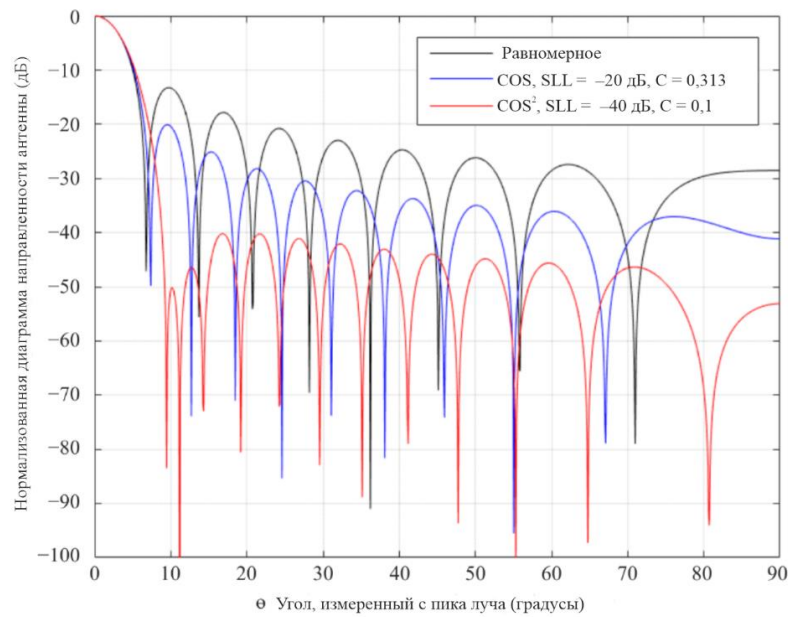
М.1851-03

При условии, что известна ширина луча по уровню половинной мощности θ_3 значение μ может быть переопределено как функция ширины луча антенны по уровню половинной мощности. Это выполняется путем замены количественного значения $\left(\frac{l}{\lambda}\right)$ в выражении $\mu = \pi \left(\frac{l}{\lambda}\right) \sin(\theta)$ постоянным значением (коэффициент ширины луча), которое определяется относительной формой распределения поля, деленным на значение ширины луча по уровню половинной мощности θ_3 , согласно таблице 2. Аппроксимированные значения коэффициента ширины луча приведены в таблицах 2 и 4; эти значения можно получить, если приравнять уравнение для $F(\mu)$ к -3 дБ и найти решение для угла θ .

На рисунке 4 показаны диаграммы направленности антенн с прямоугольной апертурой для функции равномерного распределения поля, а также распределения поля типа косинус (COS) и косинус-квадрат (COS^2) с основанием. На рисунке 5 показаны диаграммы направленности антенн с прямоугольной апертурой для функции равномерного распределения поля, а также распределения поля типа косинус (COS), косинус-квадрат (COS^2), косинус-куб (COS^3) и косинус в четвертой степени (COS^4) без основания. Поскольку диаграммы являются математически симметричными, они были частично отражены на рисунке. Для сравнения: ширина луча по уровню 3 дБ для всех диаграмм составляет $6,0^\circ$, что означает различные соотношения λ/l .

РИСУНОК 4

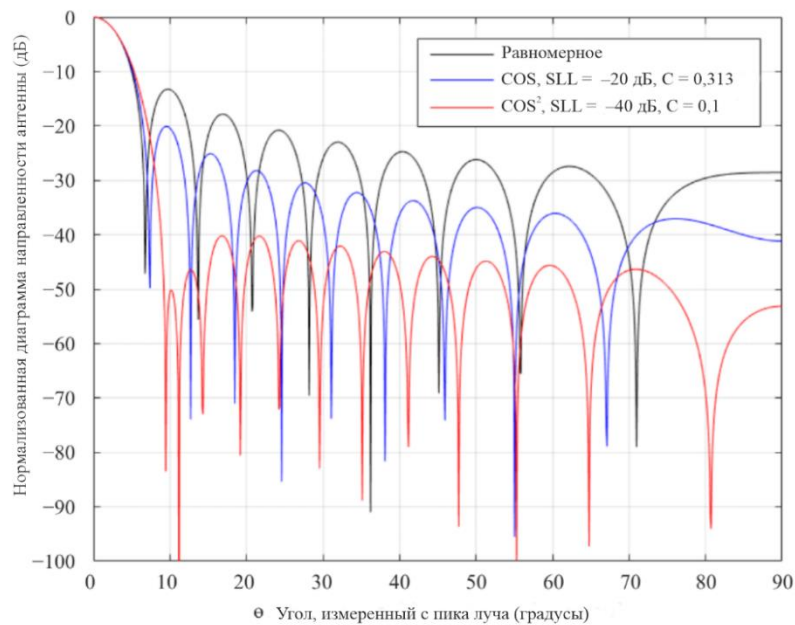
Сравнение диаграмм направленности антенн для различных распределений поля в прямоугольной апертуре с основанием, ширина луча по уровню 3 дБ составляет $6,0^\circ$ (диаграмма симметрична)



М.1851-04

РИСУНОК 5

Сравнение диаграмм направленности антенн для различных распределений поля в прямоугольной апертуре без основания, ширина луча по уровню 3 дБ составляет $6,0^\circ$ (диаграмма симметрична)



М.1851-05

2.1.3 Процедура определения маски

На основе рисунков 4 и 5, выше, уравнения маски выводятся с использованием кривой, соответствующей пиковым уровням боковых лепестков антенны. По результатам сравнения интегралов теоретических и предлагаемых диаграмм маски было выявлено, что разница между пиковой и усредненной мощностью в срезе одной главной плоскости составляет примерно 4 дБ. Применяются следующие определения:

- преобразовать уравнения (2) – (13) в дБ, используя $20 \times \log_{10}$ (нормализованная диаграмма направленности);
- нормализовать коэффициенты усиления диаграмм направленности для метода без основания из таблицы 4. Равномерное распределение поля не требует нормализации, для распределения поля типа косинус вычитается $-3,92$ дБ, для распределения поля типа косинус-квадрат вычитается $-6,02$ дБ, для распределения поля типа косинус-куб вычитается $-7,44$ дБ и для распределения поля типа косинус в четвертой степени вычитается $-8,52$ дБ (см. таблицу 6); для метода из таблицы 2 нормализация не требуется;
- для построения маски используется теоретическая диаграмма направленности из таблицы 2 для моделей с основанием и из таблицы 4 для моделей без основания, как указано в первых двух шагах, вплоть до точки разрыва, определяемой либо пиковой, либо усредненной диаграммой направленности, в соответствии с требованием. После точки разрыва применяется диаграмма маски, указанная в таблице 5 для моделей с основанием и таблице 6 для моделей без основания;
- маска пиковой диаграммы – это диаграмма направленности антенны, которая обходит боковые лепестки. Она используется в случае источника одиночной помехи;
- маска усредненной диаграммы – это диаграмма направленности антенны, которая аппроксимируется интегралом теоретической диаграммы направленности. Она используется в случае источников совокупной множественной помехи;
- точка разрыва маски пиковой диаграммы – это точка на амплитуде диаграммы (дБ) ниже максимального значения коэффициента усиления, в которой форма диаграммы отклоняется от теоретической в диаграмму пиковой маски, как показано на рисунке 6;
- точка разрыва маски усредненной диаграммы – это точка на амплитуде диаграммы (дБ) ниже максимального значения коэффициента усиления, в которой форма диаграммы отклоняется от теоретической в диаграмму усредненной маски, как показано на рисунке 6;
- θ_3 – это ширина луча антенны по уровню 3 дБ (градусы);
- θ – это угол (градусы) в срезе любой главной плоскости – либо по углу места (вертикальная плоскость), либо по азимуту (горизонтальная плоскость);
- усредненная маска – это пиковая маска минус 4 дБ. Следует отметить, что точки разрыва пиковой диаграммы отличаются от точек разрыва усредненной диаграммы;
- трехмерную (3D) диаграмму направленности можно получить по формуле $G_{3D} = G_1(\theta_1) + G_2(\theta_2)$, где G_{3D} , G_1 , G_2 – нормализованные значения в децибелах, G_1 и G_2 – диаграммы направленности антенны в плоскостях E и H , θ_1 и θ_2 – углы в этих плоскостях.

В таблицах 5 и 6 приведены уравнения, которые следует использовать для расчетов.

ТАБЛИЦА 5

Уравнение (16). Уравнения диаграммы нормализованной теоретической пиковой и усредненной маски для косинусоидального конуса с основанием

Распреде- ление поля	Уравнение маски за точкой разрыва диаграммы, в которой маска отклоняется от теоретической диаграммы (дБ)	A	B	Минима- льный уровень маски (дБ)
Равномерное	$-A \ln \frac{B \theta }{\theta_3}$	8,584	2,876	-30
COS		$-0,000473(SLL + 13,2)^5$ $- 0,008667(SLL + 13,2)^4$ $- 0,0581(SLL + 13,2)^3$ $- 0,1455(SLL + 13,2)^2$ $- 0,1342(SLL + 13,2)$ $+ 8,2489$	Если $SLL \geq -22,7$ и $SLL \leq -18$: $0,03911 SLL^3 + 2,1706 SLL^2 +$ $+39,803 SLL + 246,52$ Если $SLL > -18$ и $SLL < -13,2$: $-0,461 SLL - 3,058$	-50
COS ²		$0,000119 SLL^3$ $+ 0,00869 SLL^2$ $+ 0,2488 SLL + 10,37$	$\exp(-0,00027 SLL^3 -$ $- 0,02255 SLL^2$ $-0,751 SLL -$ $- 6,6)$	-60

ТАБЛИЦА 6

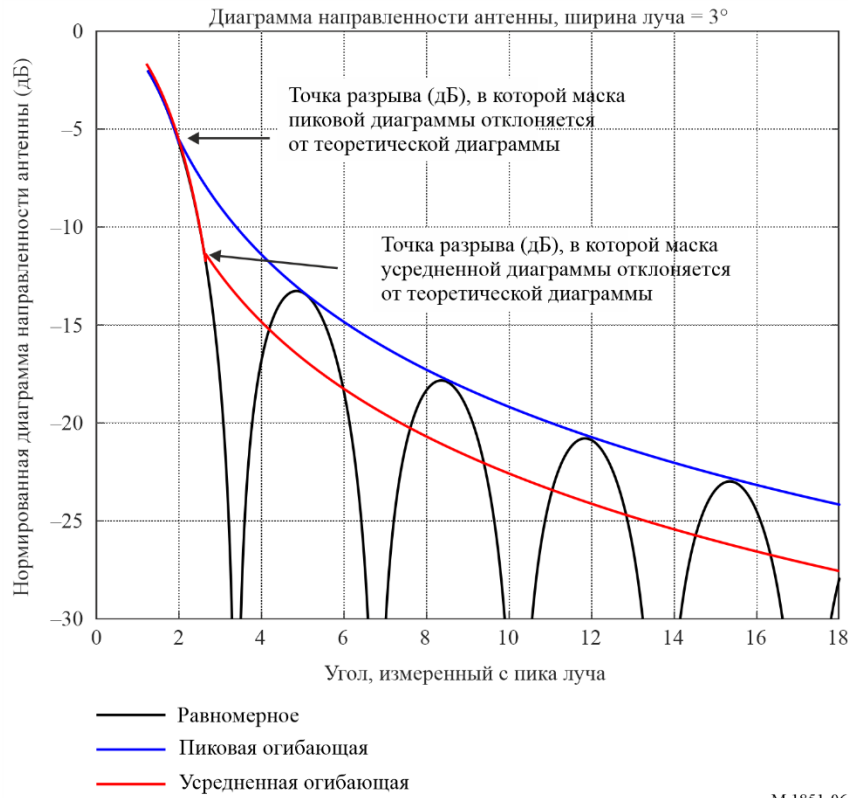
Уравнения для диаграммы теоретической пиковой и усредненной маски

Распреде- ление поля	Нормали- зация	Уравнение маски за точкой разрыва диаграммы, в которой маска отклоняется от теоретической диаграммы (дБ)	Точка разрыва пиковой диаграммы, в которой маска отклоняется от теорети- ческой диаграммы (дБ)	Точка разрыва усредненной диаграммы, в которой маска отклоняется от теорети- ческой диаграммы (дБ)	Постоянная величина, добавляемая к пиковой диаграмме для преобразо- вания ее в усредненную маску (дБ)	Мини- мальный уровень маски (дБ)	Номер уравне- ния
Равномерное	0	$-8,584 \cdot \ln \left(2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	-30	(17)
COS	-3,92	$-17,51 \cdot \ln \left(2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	-50	(18)
COS ²	-6,02	$-26,882 \cdot \ln \left(1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	-60	(19)
COS ³	-7,44	$-35,84 \cdot \ln \left(1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	-70	(20)
COS ⁴	-8,52	$-45,88 \cdot \ln \left(1,56 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-39,4	-42,5	-2,61	-80	(21)

Функция $\ln()$ – это функция натурального логарифма. Пример точки разрыва представлен на рисунке 6.

РИСУНОК 6

Пример точки разрыва



М.1851-06

2.2 Антенна с косекансно-квадратичной угломестной диаграммой направленности

Косекансно-квадратичная диаграмма направленности (диаграмма направленности типа косеканс-квадрат (CSC^2)) представляет собой особую форму, которая обеспечивает приемнику радара практически постоянную силу отраженных сигналов независимо от дальности по горизонтали для самолетов, летящих на постоянной высоте. На рисунке 7 представлена типичная диаграмма дальности радиолокационного обнаружения (км).

Для наземных радаров нормализованная косекансно-квадратичная диаграмма направленности по мощности (в дБ) определяется кусочно-линейным методом следующим образом:

$$G_{Ground}(\theta) = \begin{cases} G_{unif}(\theta) & \text{if } \theta \in [\theta_{Null}; \theta_{Start}]; \\ G_{csc^2}(\theta) & \text{if } \theta \in [\theta_{Start}; \theta_{End}]; \\ G_0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (22)$$

Для бортовых радаров нормализованная косекансно-квадратичная диаграмма направленности по мощности определяется следующим образом:

$$G_{Airborne}(\theta) = \begin{cases} G_{unif}(\theta) & \text{if } \theta \in [\theta_{Start}; \theta_{Null}]; \\ G_{csc^2}(\theta) & \text{if } \theta \in [\theta_{End}; \theta_{Start}]; \\ G_0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (23)$$

где:

$G_{unif}(\theta)$: нормализованная диаграмма направленности по мощности, соответствующая равномерному распределению поля (как определено в таблицах 7 и 8, ниже) в дБ;

$G_{csc^2}(\theta)$: нормализованная диаграмма направленности по мощности, соответствующая косекансно-квадратичной части диаграммы направленности (как определено в таблицах 7 и 8, ниже), в дБ;

G_0 : нормализованный минимальный уровень направленности, в дБ;

- θ_{Start} : возвышение (или понижение) точки уровня половинной мощности на главном лепестке, где начинается косекансно-квадратичная диаграмма направленности (подробную информацию см. ниже), в градусах;
- θ_{Null} : ширина луча по уровню половинной мощности антенны $\frac{\sin(x)}{x}$ от нуля до нуля, определяемая как $\frac{\theta_3}{0,88}$, в градусах. При использовании угла направленности луча антенны значение θ_{Null} , в градусах, равно $\theta_{Tilt} - \frac{\theta_3}{0,88}$ для наземного радара и $\theta_{Tilt} + \frac{\theta_3}{0,88}$ для бортового радара. Это дает наименьшее значение диаграммы направленности при равномерном распределении поля при самом низком значении коэффициента обратного излучения;
- θ_{End} : максимальный угол, при котором заканчивается косекансно-квадратичная диаграмма направленности;
- θ : угол для оценки диаграммы направленности антенны, в градусах;
- θ_3 : ширина луча антенны по уровню половинной мощности, в градусах;
- θ_{Tilt} : угол наклона луча антенны или угол направления луча, в градусах.

Если указаны максимальные рабочие значения дальности и высоты радиолокационной системы в километрах, то угол, где начинается CSC², определяется следующим образом¹:

$$\theta_{Start} = \sin^{-1} \left[\frac{Maximum_Height}{Maximum_Range} - \frac{Maximum_Range}{2 * \left(\frac{4}{3}\right) Re} \right], \quad (24)$$

где R_e – радиус Земли, равный 6378 км. Однако если рабочие параметры не указаны, то угол начала CSC² θ_{Start} определяется следующими уравнениями:

$$\theta_{Start} = \frac{\theta_3}{2} + \theta_{Tilt} \text{ для наземного радара и } \theta_{Start} = \frac{-\theta_3}{2} + \theta_{Tilt} \text{ для бортового радара.}$$

Применяется диаграмма направленности типа косеканс, как показано в таблицах 7 и 8.

ТАБЛИЦА 7

Нормализованные уравнения диаграммы направленности типа косеканс-квадрат для наземных радаров

Уравнение диаграммы типа косеканс-квадрат	Комментарий	Номер уравнения
Минимальный уровень косеканса G_0 (пример = -55 дБ)	При углах меньше θ_{Null} или больше θ_{End} используется коэффициент обратного излучения -55 дБ. Отметим, что $\theta_{Null} = \theta_{Tilt} - \frac{\theta_3}{0,88}$	(25)
$G_{unif}(\theta) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sin(\mu)}{\mu} \right)$ $\mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta - \theta_{Tilt})) / \theta_3$	Используется $\frac{\sin(x)}{x}$ от минимального значения ширины луча по уровню половинной мощности антенны от нуля до нуля до начала диаграммы направленности CSC ² при θ_3 или θ_{Start} в зависимости от того, что дано	(26)
$G_{csc^2}(\theta)$ $= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{CSC(\theta)}{CSC(\theta_{Start})} \right)$ $+ 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_{Start} - \theta_{Tilt})}{\theta_3} \right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_{Start} - \theta_{Tilt})}{\theta_3}} \right) \circ$	Начало диаграммы направленности CSC ² до максимального угла CSC ² . Усиление при θ_{Start} равно усилению диаграммы направленности $\frac{\sin(x)}{x}$ при θ_{Start} . Усиление диаграммы направленности меньше максимального усиления антенны на 3 дБ при θ_{Start}	(27)

¹ См.: Barton, David K., *Radar Equations for Modern Radar*, Chapter 2, Artech House Radar Library, 2013.

ТАБЛИЦА 8
Нормализованные уравнения диаграммы направленности типа косеканс-квадрат для бортовых радаров

Уравнение диаграммы типа косеканс-квадрат	Комментарий	Номер уравнения
Минимальный уровень косеканса G_0 (пример = -55 дБ)	При углах меньше θ_{Null} или больше θ_{End} используется коэффициент обратного излучения -55 дБ. Отметим, что $\theta_{Null} = \theta_{Tilt} + \frac{\theta_3}{0,88}$	(28)
$G_{unif}(\theta) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sin(\mu)}{\mu} \right)$ $\mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta - \theta_{Tilt})) / \theta_3$	Используется $\frac{\sin(x)}{x}$ от минимального значения ширины луча по уровню половинной мощности антенны от нуля до начала диаграммы направленности CSC^2 при θ_3 или θ_{Start} в зависимости от того, что дано	(29)
$G_{csc^2}(\theta)$ $= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{CSC(\theta)}{CSC(\theta_{Start})} \right)$ $+ 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_{Start} - \theta_{Tilt})}{\theta_3} \right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_{Start} - \theta_{Tilt})}{\theta_3}} \right)^\circ$	Начало диаграммы направленности CSC^2 до максимального угла CSC^2 . Усиление при θ_{Start} равно усилению диаграммы направленности $\frac{\sin(x)}{x}$ при θ_{Start} . Усиление диаграммы направленности меньше максимального усиления антенны на 3 дБ при θ_{Start}	(30)

Графическое описание диаграмм направленности приведено на нижеследующих рисунках.

РИСУНОК 7
Зона действия квадратично-косекансного луча для поискового радара

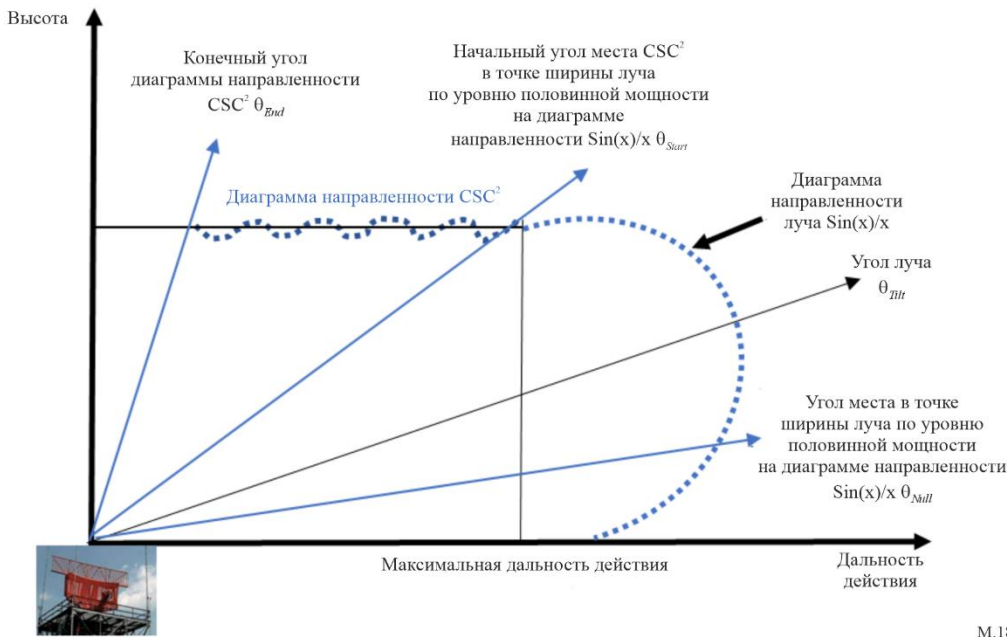
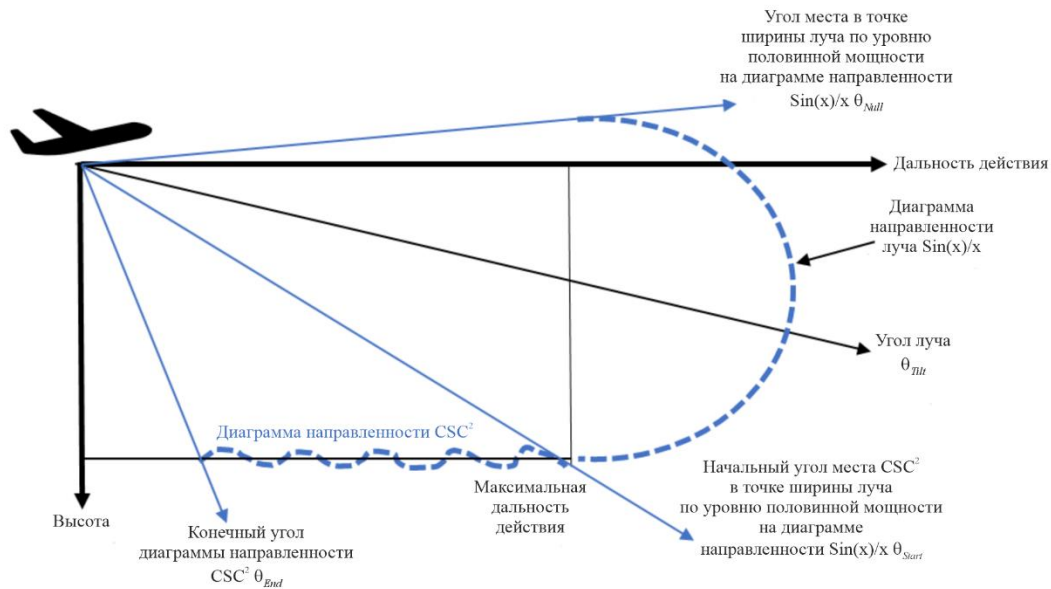


РИСУНОК 8

Зона действия квадратично-косекансного луча для бортового радара

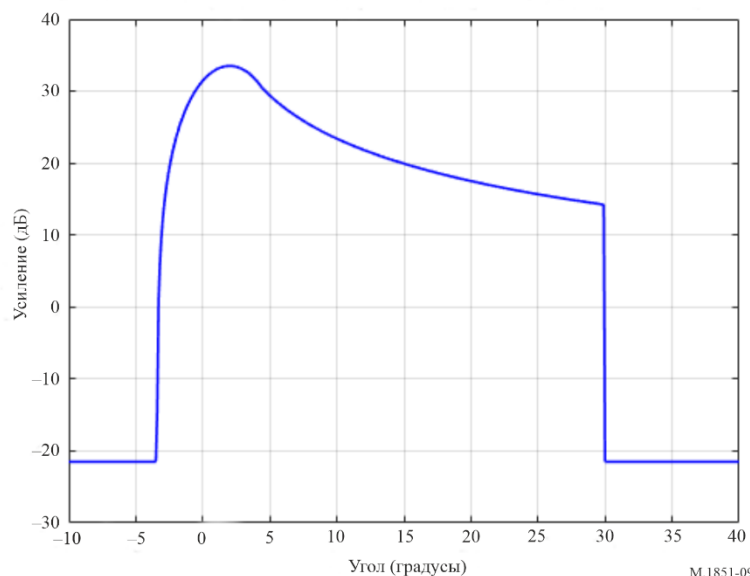


М.1851-08

В примере использования вышеописанной процедуры показана диаграмма направленности антенны для параметров радара С (из Рекомендации МСЭ-R М.1462-2; сам рисунок в М.1462-2 отсутствует).

РИСУНОК 9

Пример наземного радара – теоретическая диаграмма направленности антенны типа косеканс-квадрат
 Усиление = 33,5 дБи, $\theta_{3dB} = 4,8^\circ$, $\theta_{Start} = 4,4^\circ$, $\theta_{End} = 30,0^\circ$, $\theta_{Null} = -3,5^\circ$, $\theta_{Tilt} = 2,0^\circ$

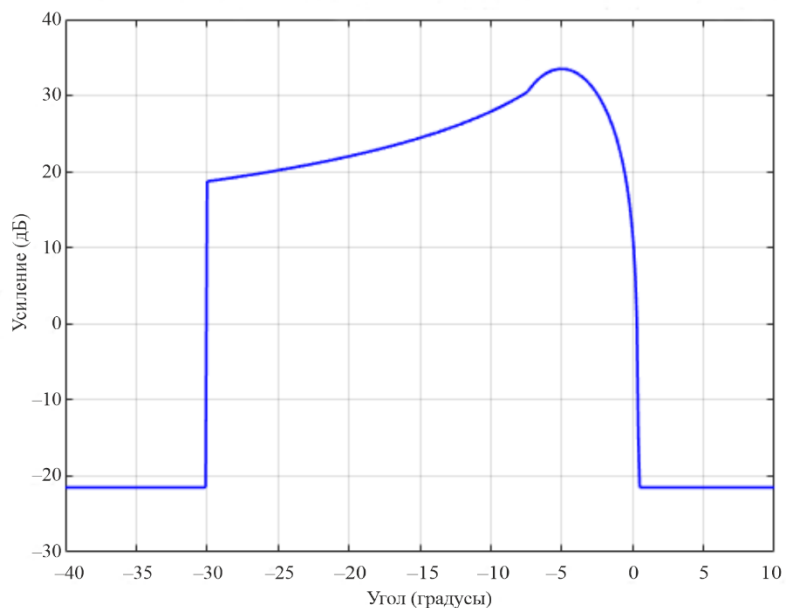


М.1851-09

Для бортового радара показана инвертированная диаграмма направленности антенны CSC^2 .

РИСУНОК 10

Пример бортового радар – теоретическая диаграмма направленности антенны типа косеканс-квадрат
 Усиление = 33,5 дБн, $\theta_{3dB} = 4,8^\circ$, $\theta_{Start} = -7,4^\circ$, $\theta_{End} = -30,0^\circ$, $\theta_{Null} = 0,5^\circ$, $\theta_{Tilt} = -5,0^\circ$

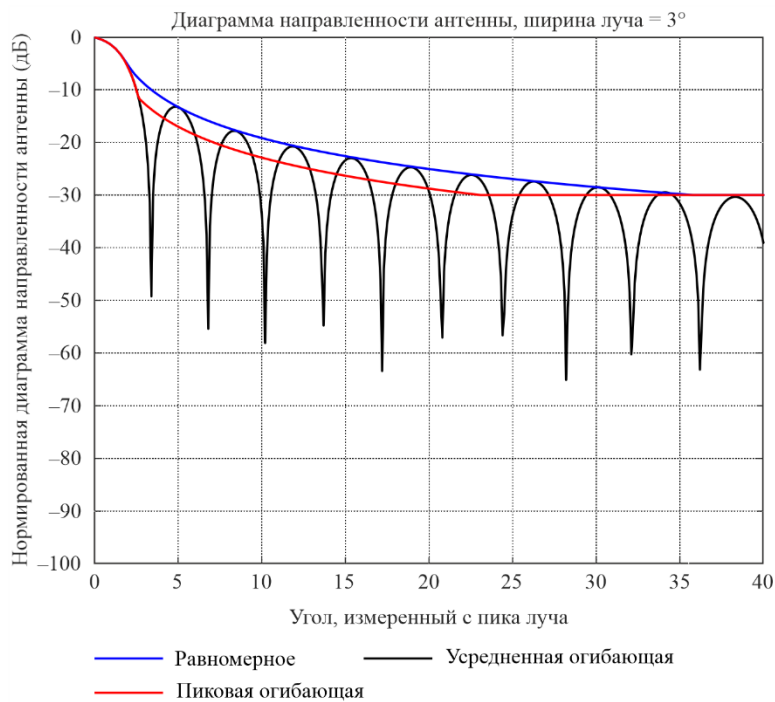


М.1851-10

2.3 Теоретические диаграммы и маски для различных диаграмм направленности антенны

РИСУНОК 11

Нормализованная диаграмма направленности антенны, пиковая и усредненная огибающие для равномерного распределения поля



М.1851-11

РИСУНОК 12

Пример нормализованной полярной диаграммы направленности антенны, пиковая (градусы) и усредненная огибающие для равномерного распределения поля

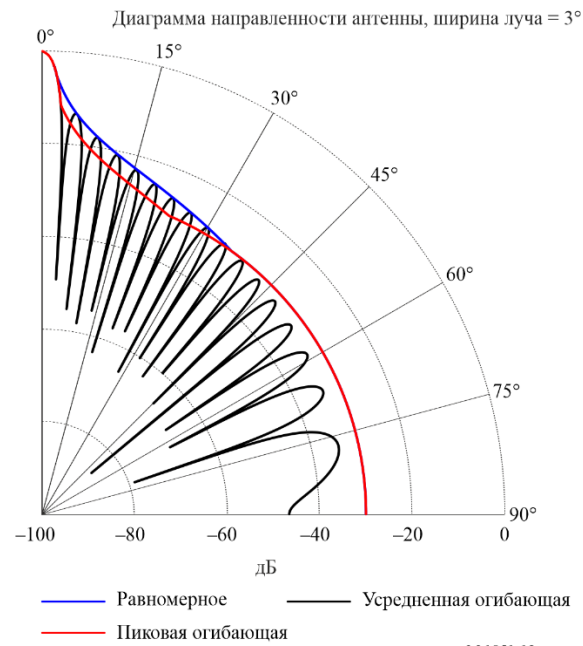


РИСУНОК 13

Диаграмма направленности антенны, пиковая и усредненная огибающие для косинусоидального распределения поля

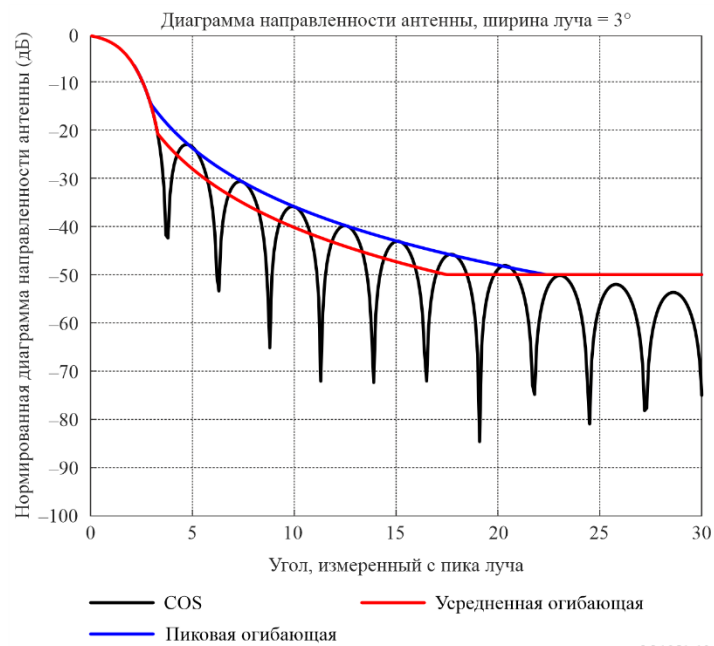


РИСУНОК 14

Нормализованная диаграмма направленности антенны (градусы), пиковая и усредненная огибающие для распределения поля типа косинус-квадрат

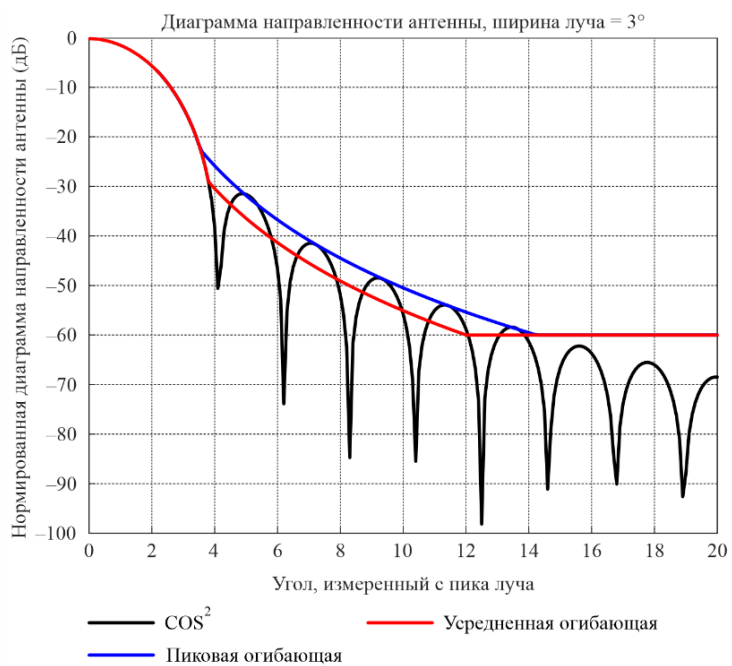


РИСУНОК 15

Нормализованная диаграмма направленности антенны (градусы), пиковая и усредненная огибающие для распределения поля типа косинус-куб

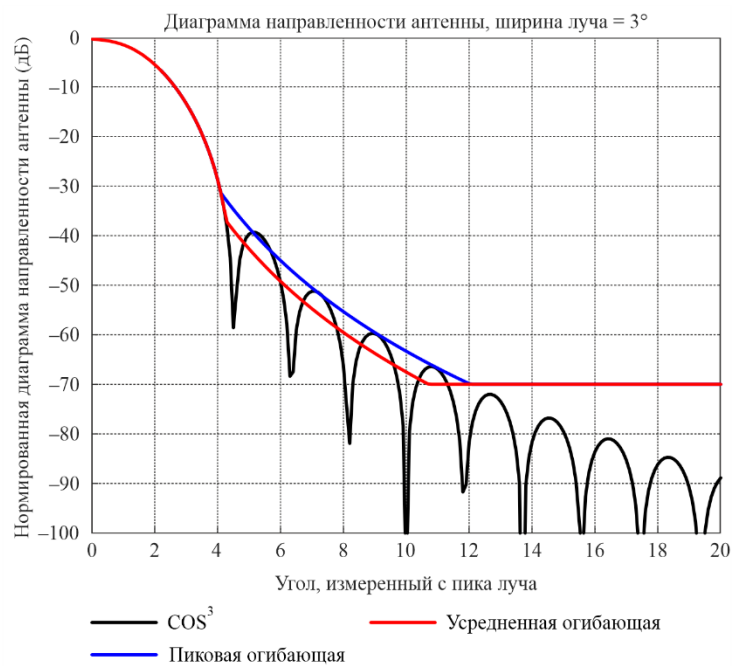
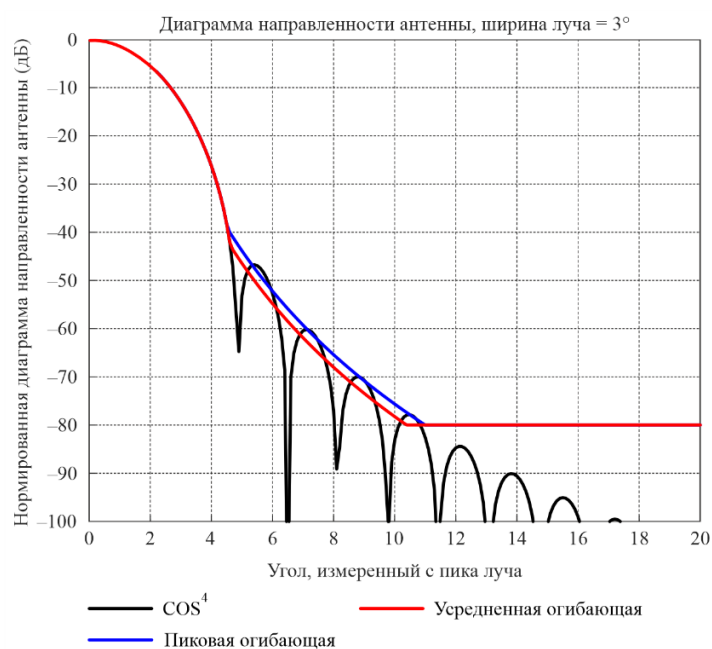


РИСУНОК 16

Нормализованная диаграмма направленности антенны (градусы), пиковая и усредненная огибающие для распределения поля типа косинус в четвертой степени



М.1851-16

2.4 Выбор диаграммы направленности антенны для моделей без основания

Предлагаемый метод выбора диаграммы направленности антенны основывается на информации о ширине луча по уровню половинной мощности и пиковом уровне боковых лепестков. Такой порядок выбора определен в таблице 9 с учетом информации о ширине луча по уровню половинной мощности. Эта модель дает дискретные значения уровней боковых лепестков $-13,2$ дБ, -23 дБ, -32 дБ, -40 дБ и -47 дБ.

ТАБЛИЦА 9

Таблица выбора диаграммы направленности

Диапазон уровня первого бокового лепестка ниже нормализованного пикового значения главного лепестка (дБ)	Возможный тип распределения поля антенны и косинус, возведенный в степень n	Номер уравнения для теоретической диаграммы	Номер уравнения для маски
От $13,2$ до < 20	Равномерное	(2)	(7)
От 20 до < 30	$n = 1$	(3)	(8)
От 30 до < 39	$n = 2$	(4)	(9)
От 39 до < 45	$n = 3$	(5)	(10)
≥ 45	$n = 4$	(6)	(11)

3 Сравнение диаграмм направленности антенны

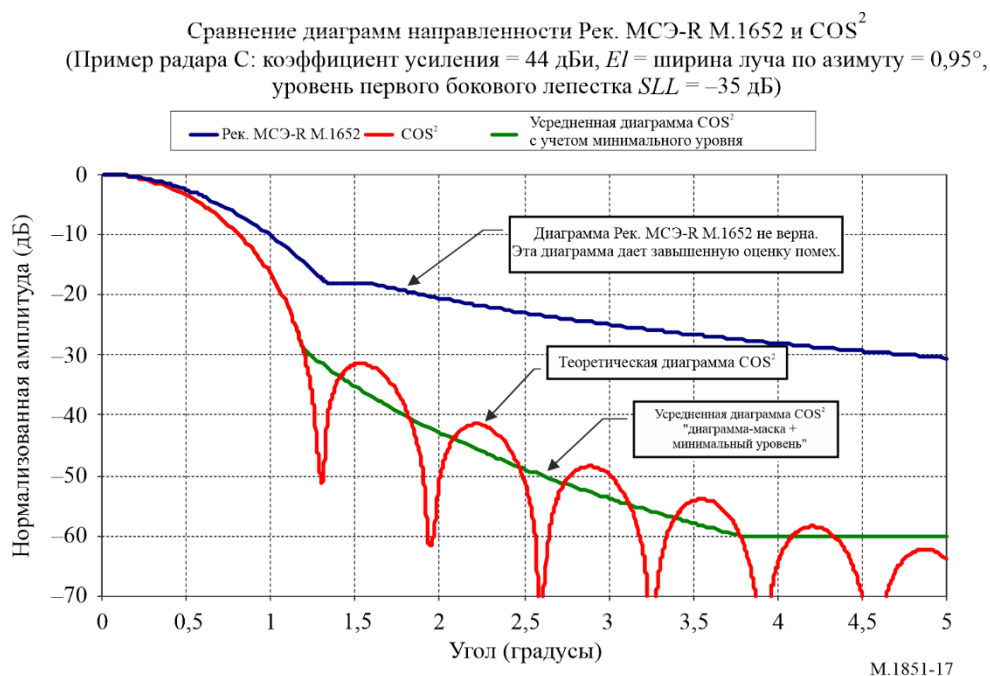
Одна из математических моделей для диаграммы направленности антенны радиолокационной системы службы радиоопределения, которая использовалась при анализе помех, представлена в Рекомендации МСЭ-R М.1652. Она содержит уравнения для нескольких диаграмм как функции коэффициента

усиления антенны. Сравнение моделей, представленных в этой Рекомендации, и диаграмм для радара С, представленных в Рекомендации МСЭ-R М.1638-0, показывает, что диаграмма Рекомендации МСЭ-R М.1652 не является оптимальной. Как показано на рисунке 17, диаграмма направленности Рекомендации МСЭ-R М.1652 дает значительно завышенные оценки коэффициента усиления за пределами линии прицеливания антенны (0°).

Следует также отметить, что уравнения, определенные в Рекомендации МСЭ-R F.699, завышают уровни боковых лепестков для некоторых радиолокационных систем; эти уравнения не были предназначены для радиолокационных систем.

РИСУНОК 17

Сравнение диаграмм направленности антенны



4 Антенна с круговой параболической конической апертурой

В данном разделе описывается диаграмма направленности антенны с параболической конической апертурой, а также пиковые и усредненные огибающие диаграммы направленности для использования при анализе помех. При наличии информации о ширине луча антенны по уровню половинной мощности и о пиковом уровне боковых лепестков можно выбрать подходящий набор уравнений для пиковых и усредненных диаграмм направленности. Пиковые диаграммы направленности боковых лепестков используются при одиночном источнике помех, а усредненные – при нескольких источниках помех.

4.1 Назначение и описание диаграммы направленности параболической антенны

Параболическая антенна – это антенна, в которой для направления радиоволн используется параболический отражатель – изогнутая поверхность с поперечным сечением в форме параболы. Наиболее распространенные отражательные антенны – это уголкового зеркала антенна, параболическая антенна, параболоидальная антенна и антенна Кассегрена. Параболические антенны могут иметь одно из самых высоких усиления и самую узкую ширину луча среди всех типов антенн. Для обеспечения узкого луча диаметр параболического отражателя должен значительно превышать длину волны используемого радиосигнала.

Параболические антенны используются в радарах слежения (за морскими и воздушными судами, облаками и т. п.), для связи пункта с пунктом, передачи данных по линиям беспроводной связи, спутниковой связи и связи с космическими аппаратами. Они также используются в радиотелескопах.

Сектор МСЭ-R разработал много Рекомендаций для этих применений, например Рекомендацию МСЭ-R F.699, в пункте 4 раздела *рекомендует* которой указано, что когда известны только ширина луча антенны θ ,

отношение D/λ (выраженное в одних и тех же единицах) можно приблизительно оценить с помощью следующего выражения: $\frac{D}{\lambda} \approx \frac{70}{\theta}$ (град.), где θ – ширина луча (–3 дБ);

при заданном значении θ можно приближенно оценить $G_{\max}$: $G_{\max}$ (дБи) $\approx 44,5 - 20 \log \theta$.

Здесь основное внимание уделяется использованию параболических антенн в радиолокационных системах, когда для обнаружения и отслеживания объектов требуется излучать узкий пучок радиоволн. Для анализа помех необходимо рассчитать пиковую и усредненную огибающие боковых лепестков диаграммы направленности антенны, которые зависят только от ширины луча антенны по уровню половинной мощности и пикового уровня боковых лепестков. Используемый подход аналогичен подходу для линейной апертуры.

Из справочных документов [1] и [3] следует, что нормализованная функция диаграммы направленности для параболического распределения $F(\theta, n)$ для различных конусов на основании C определяется следующим уравнением:

$$F(\theta, n) = \frac{\frac{2J_1(\beta a \sin(\theta))}{\beta a \sin(\theta)} + \frac{(1-C)2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\beta a \sin(\theta))}{n+1} \frac{(\beta a \sin(\theta))^{n+1}}{C + \frac{(1-C)}{n+1}}}{C + \frac{(1-C)}{n+1}}; \quad (31)$$

для моделей без основания:

$$F(\theta, n) = \frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\beta a \sin(\theta))}{(\beta a \sin(\theta))^{n+1}}, \quad (32)$$

где:

- β : постоянная свободного пространства $\frac{2\pi}{\lambda}$, где λ измеряется в метрах;
- a : радиус антенны в метрах;
- D : диаметр антенны в метрах;
- θ_3 : ширина луча антенны по уровню половинной мощности 3 дБ в градусах;
- J_n : функция Бесселя (ее можно рассчитать с помощью различных программных инструментов);
- λ : длина волны;
- n : числовое значение степени параболического конуса.

В уравнениях (31) и (32) $\beta a = \frac{\pi K}{\theta_3}$ для антенны на основе математической модели $\theta_3 = D/\lambda$ (в радианах).

Для модели с основанием в таблице 10 приведены значения K , где $K = \frac{2a \theta_3}{\lambda}$ в градусах; SLL – уровень первого бокового лепестка в дБ. Уравнение (31) можно записать в виде

$$F(\theta, n) = \frac{\frac{2J_1\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi K}{\theta_3} \sin(\theta)} + \frac{(1-C)2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \sin(\theta)\right)}{n+1} \frac{\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \sin(\theta)\right)^{n+1}}{C + \frac{(1-C)}{n+1}}}{C + \frac{(1-C)}{n+1}}. \quad (33)$$

Для моделей без основания уравнение (32) можно записать в виде

$$F(\theta, n) = \frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\pi K/\theta_3 \sin(\theta))}{(\pi K/\theta_3 \sin(\theta))^{n+1}}. \quad (34)$$

Трехмерную (3D) диаграмму направленности можно получить путем вращения диаграммы направленности из уравнений (33) и (34) вокруг перпендикуляра к апертуре.

В таблице 10 показано соотношение между уровнем боковых лепестков, основанием C и коэффициентом ширины луча. Модель с основанием может дать любой уровень боковых лепестков в диапазоне от –17,66 дБ до –44,72 дБ. Диапазоны уровней боковых лепестков для каждого

распределения амплитуды ($n = 0, 1, 2$ или 3) указаны в столбце "Диапазон максимального уровня боковых лепестков ниже нормализованного пикового значения главного лепестка (дБ)" таблицы 10.

Параметры модели без основания приведены в таблице 11. Эта модель дает дискретные значения уровней боковых лепестков $-17,66$ дБ, $-24,64$ дБ, $-30,61$ дБ, $-35,96$ дБ и -40 дБ. Она также дает гораздо более крутую нисходящую огибающую боковых лепестков по сравнению с моделью, основанной на уравнении (33).

ТАБЛИЦА 10

Таблица для выбора параметров антенны с круговой апертурой с основанием

Степень кривой распределения поля параболлической антенны, n	Диапазон максимального уровня боковых лепестков ниже нормализованного пикового значения главного лепестка (дБ)	Основание C	Коэффициент ширины луча K (°)
0	$-17,66$	–	58,2125
1	От $-24,2$ до $-17,66$	$C = 0,0016(SLL + 24,265)^3 - 0,009(SLL + 24,265)^2 + 0,12(SLL + 24,265) + 0,1$ (35)	$K = 0,0051(SLL + 24,265)^4 - 0,089(SLL + 24,265)^3 + 0,599(SLL + 24,265)^2 - 3,11(SLL + 24,265) + 69,43$ (36)
2	От $-24,2$ до $-34,7$	$C = (0,0022(SLL + 34,7)^3 - 0,032(SLL + 34,7)^2 + 0,38(SLL + 34,7) + 1,1)/10$ (37)	$K = 0,0019(SLL + 34,7)^4 - 0,052(SLL + 34,7)^3 + 0,492(SLL + 34,7)^2 - 2,63(SLL + 34,7) + 74,9$ (38)
3	От $-44,72$ до $-34,7$	$C = 0,01008 SLL + 0,4959$ (39)	$K = 0,0057 SLL^3 + 0,7079 SLL^2 + 28,061 SLL + 433,7618$ (40)

ТАБЛИЦА 11

Таблица для выбора параметров антенны с круговой апертурой без основания

Степень кривой распределения поля параболлической антенны, n	Пиковый уровень боковых лепестков (дБ)	Коэффициент ширины луча K (°)
0	$-17,66$	58,2125
1	$-24,64$	72,5938
2	$-30,61$	84,0529
3	$-35,96$	96,3142
4	$-40,0$	108,2317

4.2 Процедура расчета огибающей боковых лепестков

Используя уравнение (33) и таблицу 12 для моделей с основанием или уравнение (34) и таблицу 13 для моделей без основания, можно составить уравнения маски. Эти маски выводятся с помощью кривых, подходящих к пиковым уровням боковых лепестков антенны за пределами первого нулевого положения диаграммы направленности антенны. По результатам сравнения интегралов теоретической и предлагаемой масок было выявлено, что разница между пиковыми и усредненными огибающими в одном главном сечении плоскости составляет 4 дБ. Для расчета пиковых и усредненных значений используется следующая процедура:

- 1) вычислить уравнение (33) для моделей с основанием или (34) для моделей без основания для разных значений n , используя значение K из таблицы 10 или 11, затем нормализовать диаграмму направленности и перевести в децибелы, используя выражение $20 \times \log_{10} \times (| \text{нормализованная диаграмма направленности} |)$;
- 2) построить маску, используя теоретическую диаграмму направленности из уравнения (33) для моделей с основанием или (34) для моделей без основания до точки разрыва, определяемой либо пиковой, либо усредненной диаграммой направленности в соответствии с требованием. После точки разрыва применить диаграмму маски, как указано в таблице 12 для моделей с основанием или 13 для моделей без основания;
- 3) маска пиковой диаграммы – это диаграмма направленности антенны, которая обходит пики боковых лепестков. Ее используют в случае одиночного источника помехи;
- 4) маска усредненной диаграммы – это диаграмма направленности антенны, которая аппроксимируется интегралом теоретической диаграммы направленности. Ее используют в случае совокупных помех от нескольких источников;
- 5) точка разрыва маски усредненной диаграммы – это точка на кривой амплитуде диаграммы (дБ) ниже максимального значения коэффициента усиления, в которой форма диаграммы отклоняется от теоретической в диаграмму усредненной маски;
- 6) точка разрыва маски пиковой диаграммы – это точка на амплитуде диаграммы (дБ) ниже максимального значения коэффициента усиления, в которой форма диаграммы отклоняется от теоретической в диаграмму пиковой маски;
- 7) θ_3 – это ширина луча антенны по уровню 3 дБ (градусы);
- 8) θ – это угол (градусы) в срезе главной плоскости – либо по углу места (вертикальная плоскость), либо по азимуту (горизонтальная плоскость);
- 9) усредненная маска вычисляется путем вычитания 4 дБ из пиковой маски. Отметим, что точки разрыва пиковой и усредненной диаграмм направленности различаются;
- 10) трехмерную (3D) диаграмму направленности можно получить путем вращения огибающей диаграммы направленности из таблицы 12 для моделей с основанием или таблицы 13 для моделей без основания вокруг перпендикуляра к апертуре.

Уравнения, которые следует использовать при расчетах усредненной и пиковой масок антенны, приведены в таблицах 12 и 13.

ТАБЛИЦА 12

Уравнение (41). Уравнения нормализованной теоретической диаграммы пиковой и усредненной масок для параболического конуса с основанием

Степень кривой распределения поля параболической антенны, n	Уравнение маски за точкой разрыва диаграммы, в которой маска отклоняется от теоретической диаграммы (дБ)	A	B	Нижний уровень маски (дБ)
0	$-A \ln \frac{B \theta }{\theta_3}$	12,55	2,394	-35
1		$A = -0,00227(SLL + 17,66)^5$ $- 0,02745(SLL + 17,66)^4$ $- 0,1224(SLL + 17,66)^3$ $- 0,204(SLL + 17,66)^2$ $- 0,1727(SLL + 17,66)$ $+ 12,2586$	Если $SLL \geq -24,2$ и $SLL \leq -21,55$: $B = 0,083177 SLL^3$ $+ 5,4731 SLL^2$ $+ 119,8649 SLL + 877,4646$ Если $SLL \geq -21,55$ и $SLL \leq -17,66$: $B = -0,2471 SLL - 1,6534$	-50
2		Если $SLL \geq -34,7$ и $SLL \leq -31,55$: $A = -0,06419753 SLL^3 - 6,17611 SLL^2$ $- 198,013 SLL - 2105,5$ Если $SLL \geq -31,55$ и $SLL \leq -24,2$: $A = 0,0053 SLL^2 + 0,4366 SLL + 18,714$	Если $SLL \geq -34,7$ и $SLL \leq -32,6$: $B = -1,5961 SLL^2$ $- 106,45 SLL - 1758,7$ Если $SLL \geq -32,6$ и $SLL \leq -24,2$: $B = 0,0656 SLL^2$ $+ 2,574 SLL + 29,4$	-60
3		$A = 0,0005(SLL + 34,7)^3$ $+ 0,0022(SLL + 34,7)^2$ $+ 0,0324(SLL + 34,7)$ $+ 11,7177$	$B = -0,0219(SLL + 34,7)^3 -$ $0,148(SLL + 34,7)^2 -$ $0,856(SLL + 34,7) + 7,64$	-70

ТАБЛИЦА 13

Уравнения нормализованной теоретической диаграммы пиковой и усредненной масок без основания

Уравнение распределения поля (22)	Уравнение маски за точкой разрыва диаграммы, в которой маска отклоняется от теоретической диаграммы (дБ)	Точка разрыва пиковой диаграммы, в которой маска отклоняется от теоретической диаграммы (дБ)	Точка разрыва усредненной диаграммы, в которой маска отклоняется от теоретической диаграммы (дБ)	Минимальный уровень маски (дБ)	Номер уравнения
$n = 0$	$-28,9 \times \log_{10} \left(\frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 11,9$	$0,8537 \times \theta_3$	$1,051 \times \theta_3$	-35	(42)
$n = 1$	$-49,0 \times \log_{10} \left(\frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 14,4$	$0,9893 \times \theta_3$	$1,161 \times \theta_3$	-50	(43)
$n = 2$	$-69,13 \times \log_{10} \left(\frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 15,46$	$1,13 \times$	$1,273 \times \theta_3$	-60	(44)
$n = 3$	$-89,0 \times \log_{10} \left(\frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 16,12$	$1,2165 \times \theta_3$	$1,339 \times \theta_3$	-70	(45)
$n = 4$	$-108,8 \times \log_{10} \left(\frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 16,27$	$1,2835 \times$	$1,3906 \times$	-80	(46)

Этот подход иллюстрируется на рисунке 18.

РИСУНОК 18
Пример точки разрыва

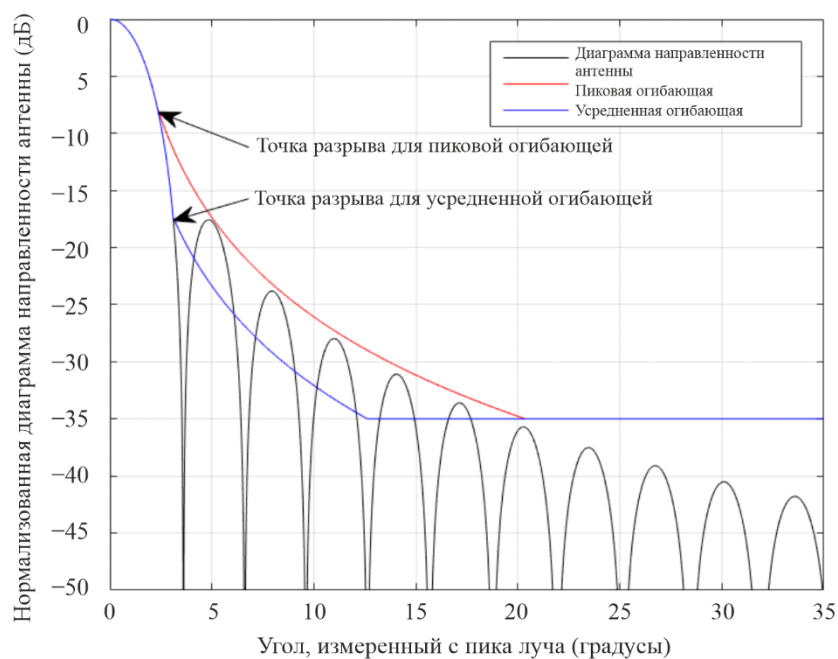
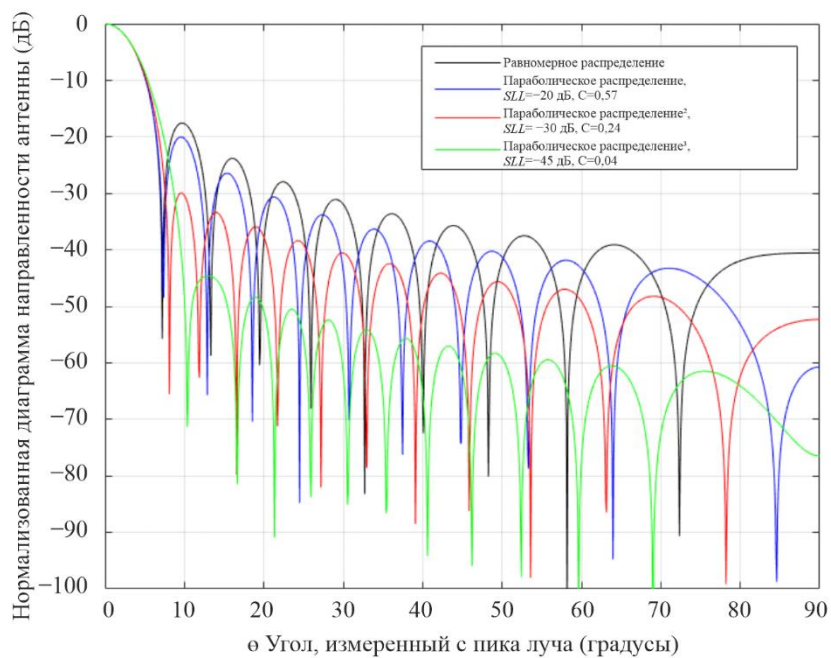


РИСУНОК 19

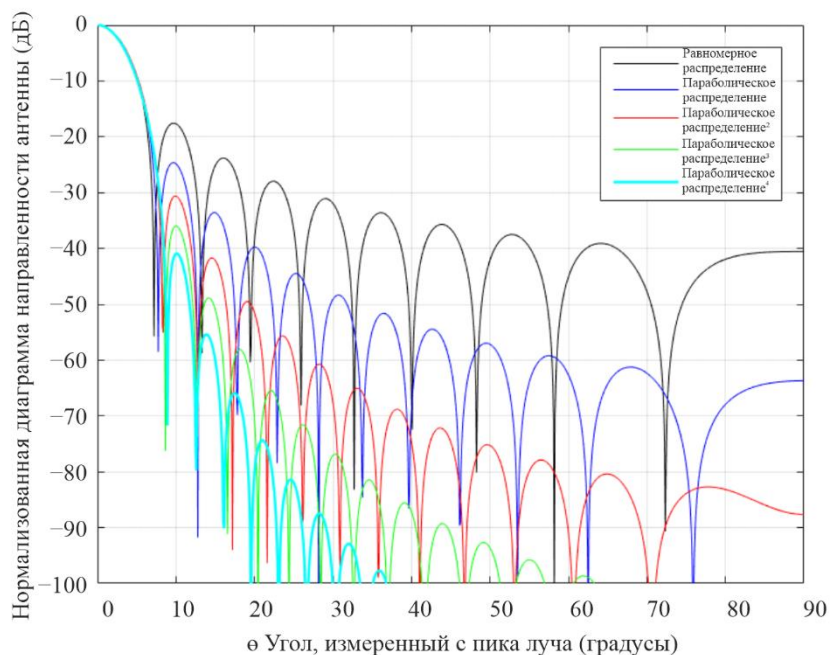
Сравнение диаграмм направленности антенны для различных распределений поля в апертуре в форме кругового параболического конуса с основанием, ширина луча по уровню 3 дБ составляет $6,0^\circ$ (диаграмма симметрична)



М.1851-19

РИСУНОК 20

Сравнение диаграмм направленности антенны для различных распределений поля в апертуре в форме кругового параболического конуса без основания, ширина луча по уровню 3 дБ составляет $6,0^\circ$ (диаграмма симметрична)



М.1851-20

4.3 Выбор диаграммы направленности антенны для моделей без основания

В таблице 14 приведены рекомендации по выбору диаграммы направленности антенны на основе информации о пиковом уровне боковых лепестков. Эта модель дает дискретные значения уровней боковых лепестков $-17,66$ дБ, $-24,64$ дБ, $-30,61$ дБ, $-35,96$ дБ и -40 дБ.

ТАБЛИЦА 14

Параболическая конусность как функция пикового уровня боковых лепестков

Диапазон нормализованного пикового уровня боковых лепестков (дБ)	Степень функции распределения параболической антенны, n
От -15 до -20	$n = 0$
От -20 до -27	$n = 1$
От -27 до -33	$n = 2$
От -33 до -38	$n = 3$
Менее чем -38	$n = 4$

Справочные документы

- [1] Barton, David K., and Ward, Harold R., *Handbook of Radar Measurement*, Artech House, 1984, Table A.15, page 264.
- [2] Chang, Kai, editor-in-chief, et al., *Encyclopaedia of RF and microwave engineering*, 6 Volume set. Koazkoff, Dennis, *Aperture Antennas*, DeVry University, Alpharetta, Georgia, page 365. The *Encyclopaedia of RF and Microwave Engineering*. Доступно онлайн по адресу <http://www.mrw.interscience.wiley.com/erfme>.
- [3] Stutzman, Warren L. and Thiele, Gary A., *Antenna theory and design*, 3rd ed. 2013. Table 9-2, page 389.

5 Аппроксимация трехмерных (3D) диаграмм направленности

В некоторых случаях методы моделирования и прогнозирования требуют использования трехмерной диаграммы направленности антенны. Большинство производителей антенн предоставляют информацию только о двух основных плоскостях среза диаграммы направленности антенны, используемой при моделировании (азимут/угол места, см. систему координат на рисунке 29). Поскольку может потребоваться трехмерная диаграмма направленности, обеспечивается более точная оценка трехмерного излучения с использованием срезов по азимуту и углу места.

В общем случае самый простой способ аппроксимации трехмерной диаграммы направленности по двум ее основным срезам (азимуту и углу места) – это суммирование значений (выраженных в дБ) имеющихся выборок для каждого значения азимута и угла места. Этот классический метод широко применяется во многих инструментах моделирования, когда требуются возможности трехмерной графики.

В случае направленных антенн применяются несколько методов. Некоторые можно найти в справочных документах, указанных в приведенном списке. Были выбраны два простых метода из [3]. Это метод объединения и метод взвешенного суммирования. Эти методы сравниваются с методом суммирования.

Метод суммирования заключается в сложении значений в дБ имеющихся выборок для горизонтальной и вертикальной плоскостей. Данный метод особенно хорошо подходит для всенаправленных по азимуту антенн и может использоваться, когда известны основные срезы по азимуту и углу места:

$$G_{sum} = G_{az}(\varphi) + G_{el}(\theta).$$

При использовании метода взвешенного суммирования, описанного в справочном документе [3], уравнения зависят от горизонтального среза G_{az} (дБ), определяемого в диапазоне от -180° до 180° , и вертикального среза G_{el} (дБ), определяемого в диапазоне от -90° до 90° . Используется только фронтальная диаграмма направленности. Диаграмма направленности антенны по углу места в данной методике не используется:

$$G_{az}(\varphi) = 10 \log_{10}(g_{az}(\varphi));$$

$$G_{el}(\theta) = 10 \log_{10}(g_{el}(\theta)).$$

В точке (θ, φ) взвешенный коэффициент усиления GW аппроксимируется по методу [3]:

$$GW(\theta, \varphi) = \frac{G_{az}(\varphi) \times w_1 + G_{el}(\theta) \times w_2}{\sqrt[k]{w_1^k + w_2^k}},$$

где w_1 и w_2 определяются следующим образом:

$$w_1(\theta, \varphi) = g_{el}(\theta) \times (1 - g_{az}(\varphi));$$

$$w_2(\theta, \varphi) = g_{az}(\varphi) \times (1 - g_{el}(\theta)).$$

В [3] говорится, что концепция, лежащая в основе этого метода, заключается в том, что процесс оценки выборки для мощности излучения включает в себя фактические данные других основных диаграмм направленности по углу места и азимуту как функцию углового расстояния между целевой точкой и точкой измерения в виде перекрестного взвешивания между двумя основными срезами.

При таком подходе средства для надлежащего взвешивания углового расстояния дает весовая функция.

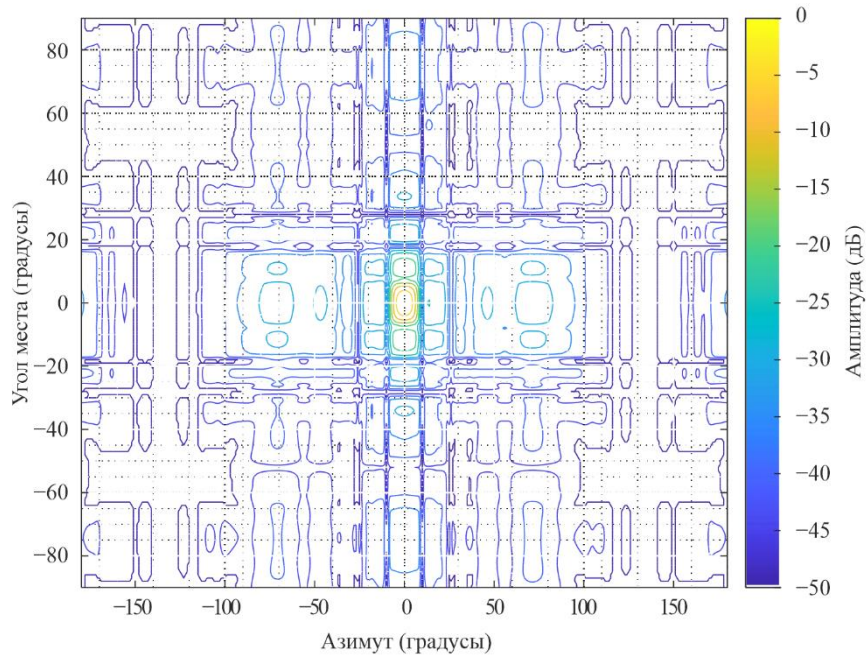
Было установлено, что для направленных антенн подходит значение $k = 2$, но можно рассмотреть и другие приближения.

При использовании антенны из пункта 2.1 (антенна с прямоугольной апертурой) трехмерные диаграммы направленности или огибающие можно получить с помощью уравнения (14). Что касается антенн, описанных в разделе 4 (антенна с круговой апертурой), то трехмерные диаграммы направленности или огибающие можно получить путем вращения двухмерной диаграммы. При наличии измеренных диаграмм направленности антенны те же методы могут быть использованы в зависимости от типа рассматриваемой антенны.

На рисунках 21 и 22 показан пример трехмерной диаграммы направленности, полученной с помощью двухмерных плоскостных срезов, представленных на рисунке 23.

РИСУНОК 21

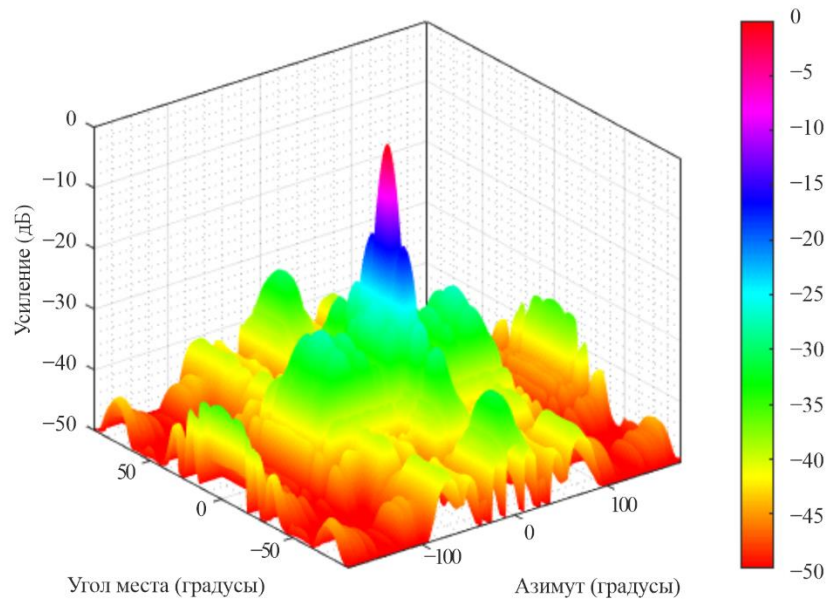
Пример контурной нормализованной (дБ) диаграммы направленности антенны, рассчитанной по плоскостным срезам, показанным на рисунке 23



М.1851-21

РИСУНОК 22

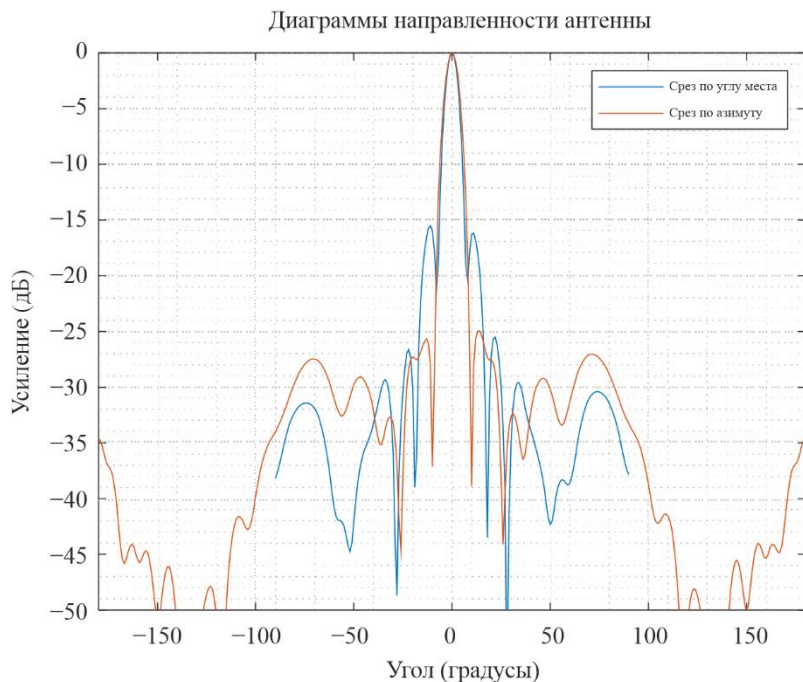
Пример трехмерного графика для азимута и угла места антенны, рассчитанного по плоскостным срезам, показанным на рисунке 23



М.1851-22

РИСУНОК 23

Плоскостные срезы диаграммы направленности антенны, используемые в качестве примера для вычисления трехмерных диаграмм²



6 Диаграммы направленности для фазированных антенных решеток

6.1 Линейная фазированная антенная решетка

Для расчета нормированной диаграммы направленности для линейной эквидистантной фазированной антенной решетки можно воспользоваться следующим уравнением:

$$g(\theta) = f(\theta) \cdot \frac{1}{N} |AF(\theta)|^2, \quad (47)$$

где:

$g(\theta)$: нормализованная диаграмма направленности для линейной эквидистантной антенной решетки;

$f(\theta)$: нормализованная парциальная диаграмма направленности для базовых излучающих элементов линейной эквидистантной антенной решетки;

N : число базовых излучающих элементов;

$AF(\theta)$: множитель линейной эквидистантной антенной решетки:

$$AF(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N\Psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \quad (48)$$

при

$$\Psi(\theta) = 2\pi(d/\lambda)(\sin(\theta) - \sin(\omega)), \quad (49)$$

где:

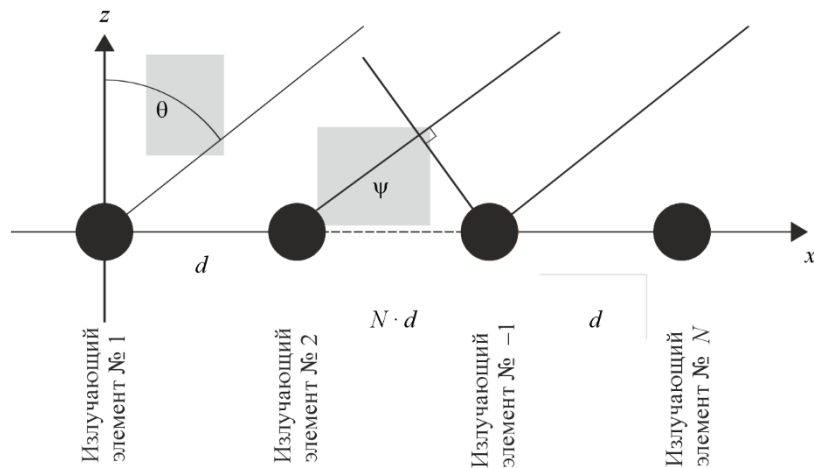
d : равное расстояние между соседними единообразными базовыми излучающими элементами;

λ : длина волны на рассматриваемой частоте;

² Измерения выполнены с антенной RF Elements UltraDish™ TP 27.

- ω : угол электронного управления лучом;
 θ : внеосевой угол;
 N : число базовых излучающих элементов.

РИСУНОК 24

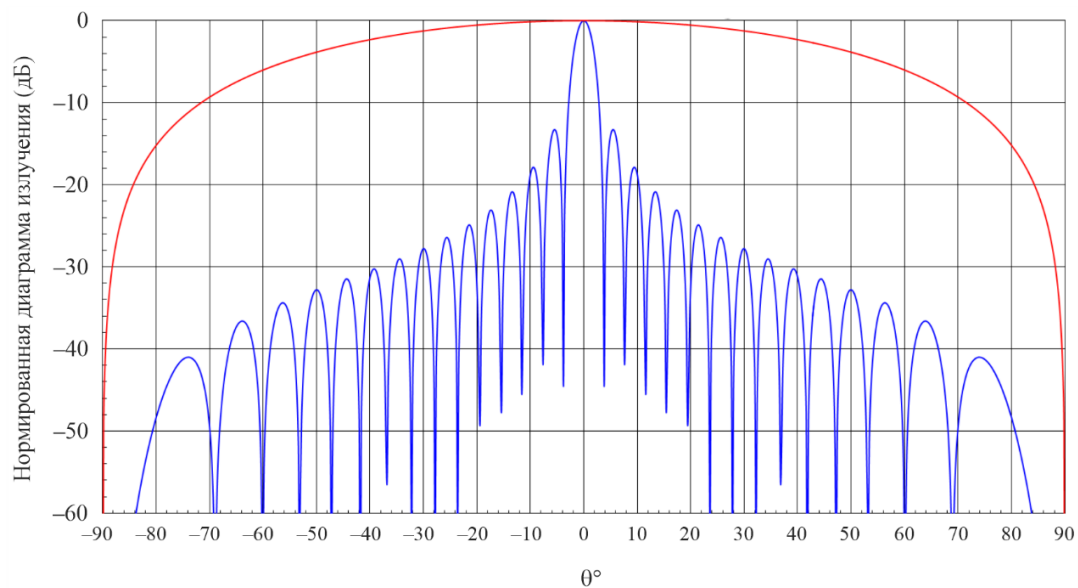


М.1851-24

Благодаря специфике фазированных антенных решеток имеется возможность электронного управления диапазоном главного лепестка диаграммы направленности антенны от опорного направления механической антенны. При больших углах сканирования ω следует учитывать конкретное влияние боковых лепестков в диаграммах направленности антенн, выражающееся в существенном увеличении главного лепестка и нарушении симметрии (см. рисунок 25). На самом деле максимальное значение главного лепестка уменьшается сообразно $\cos(\omega)$ и далее сообразно парциальной диаграмме направленности излучающих элементов решетки. Это приводит к расширению основного луча, потерям максимального усиления и, следовательно, к росту дальних боковых лепестков. При значениях ω в диапазоне между $\pm 60^\circ$ и $\pm 90^\circ$ от опорного направления механической антенны искажения диаграммы направленности столь велики, что ее использование не представляется возможным (см. рисунок 26). Практические значения ω находятся в диапазоне от 0° до $\pm 60^\circ$ от опорного направления механической антенны. Кроме того, если расстояние между базовыми излучающими элементами решетки больше $\lambda/2$, то даже при значениях ω в диапазоне менее $\pm 60^\circ$ от опорного направления механической антенны могут появиться побочные дифракционные максимумы (см. рисунок 27). И даже если расстояние между базовыми излучающими элементами решетки равно $\lambda/2$, боковые лепестки побочных дифракционных максимумов главного лепестка, расположенные на -90° и $+90^\circ$ от опорного направления механической антенны, искажают диаграмму направленности решетки (см. рисунок 28), а также приводят к существенному расширению главного лепестка и нарушению симметрии.

РИСУНОК 25

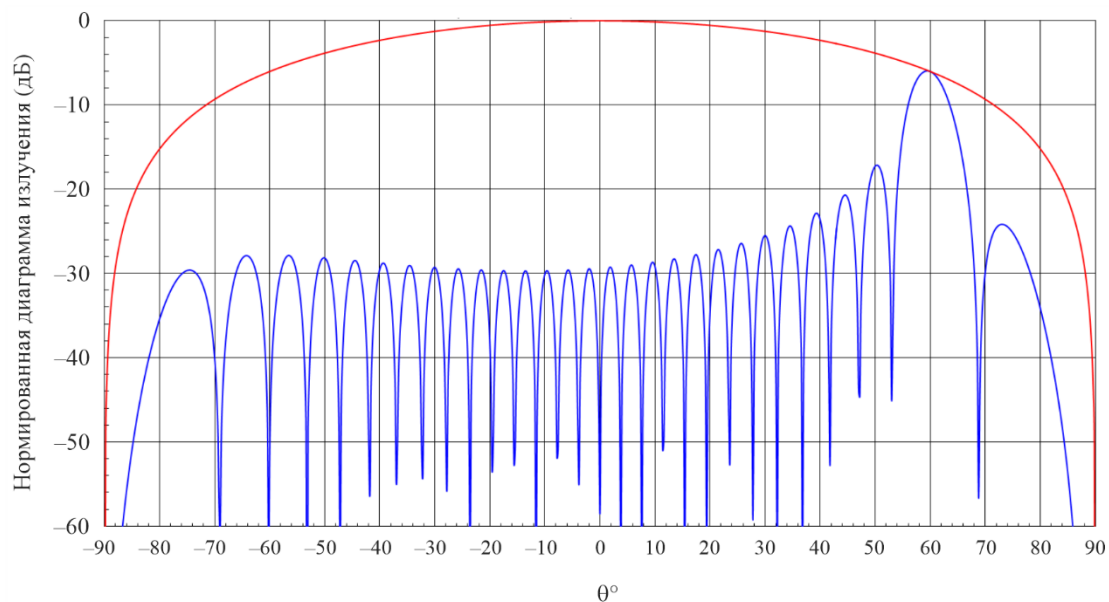
Теоретическая нормализованная диаграмма направленности линейной эквидистантной антенной решетки из 30 излучающих элементов с расстоянием между излучателями, равным $\lambda/2$, ориентированной по опорному направлению (синяя кривая), и диаграммой излучения излучающих элементов типа косинус-квадрат (красная кривая)



М.1851-25

РИСУНОК 26

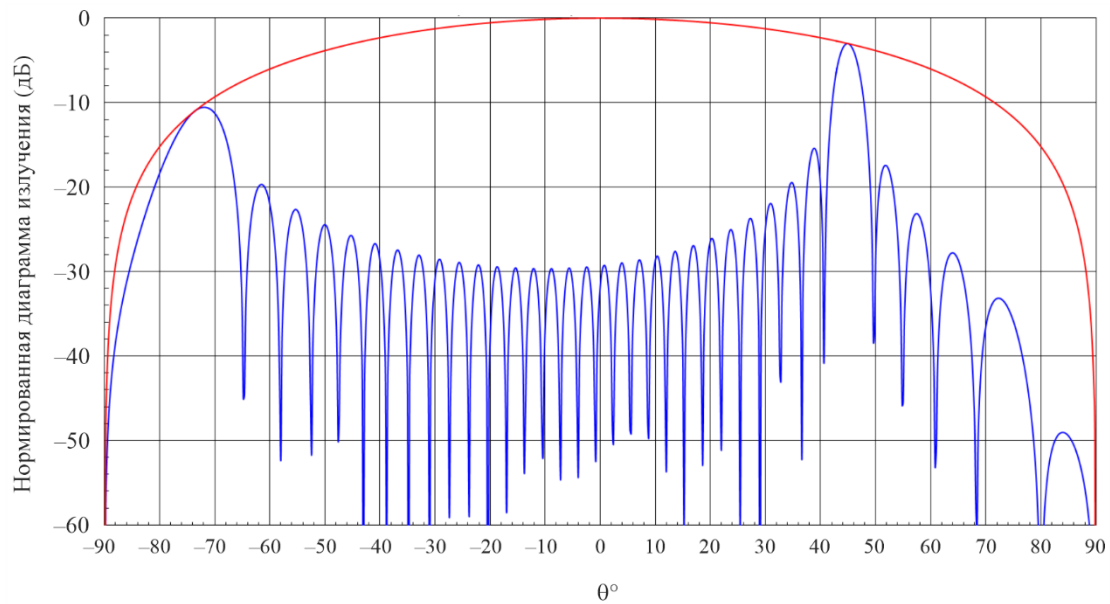
Теоретическая диаграмма направленности линейной эквидистантной антенной решетки из 30 излучающих элементов с расстоянием между излучателями, равным $\lambda/2$, ориентированной на 60° (синяя кривая), и диаграммой излучения излучающих элементов типа косинус-квадрат (красная кривая)



М.1851-26

РИСУНОК 27

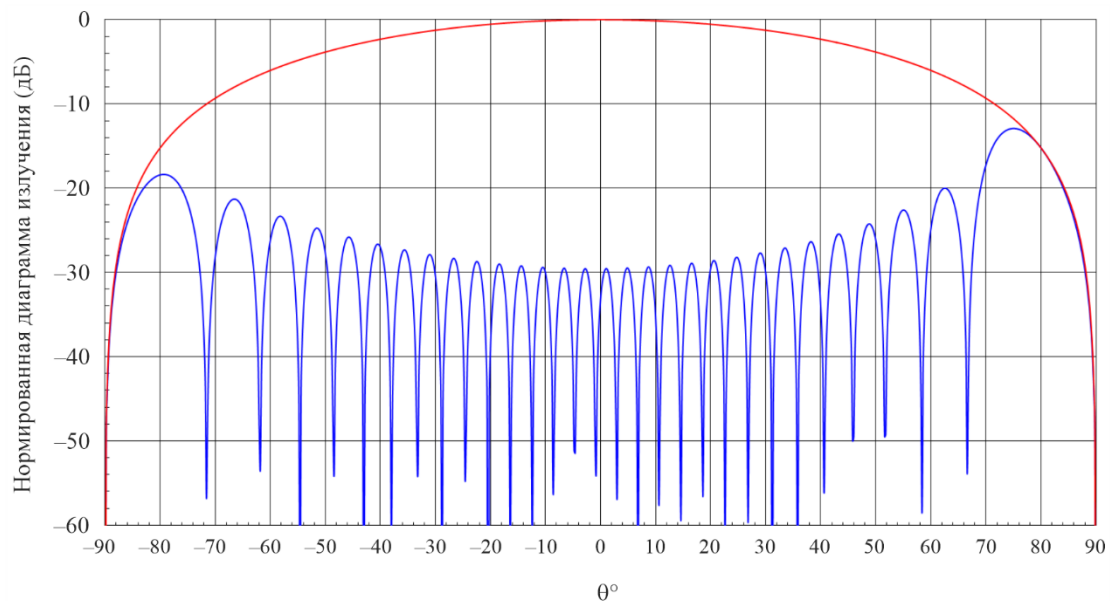
Теоретическая диаграмма направленности линейной эквидистантной антенной решетки из 30 излучающих элементов с расстоянием между излучателями, равным $0,6\lambda$, ориентированной на 45° (синяя кривая), и диаграммой излучения излучающих элементов типа косинус-квадрат (красная кривая)



М.1851-27

РИСУНОК 28

Теоретическая диаграмма направленности линейной эквидистантной антенной решетки из 30 излучающих элементов с расстоянием между излучателями, равным $\lambda/2$, ориентированной на 80° (синяя кривая), и диаграммой излучения излучающих элементов типа косинус-квадрат (красная кривая)



М.1851-28

6.2 Плоская фазированная антенная решетка

Плоские решетки обычно представляют собой набор отдельных идентичных излучающих элементов (монополей, диполей, микрополосков и т. д.) на плоскости. Они, как правило, упорядочены/разнесены, образуя регулярную структуру с типичной геометрией, такой как прямоугольник, шестиугольник, круг и т. д. Плоские решетки позволяют смещать главный луч в любом направлении трехмерного пространства по осям θ (угол места) и ϕ (азимут).

Таким образом, трехмерную диаграмму направленности плоской решетки можно выразить с помощью двух элементов:

- направленности **отдельного элемента** $D_e(\theta, \varphi)$ в каждом угловом направлении (θ, φ) (либо по диаграмме направленности, либо по физическим характеристикам, таким как высота, ширина, длина, диэлектрическая проницаемость ε_r элемента и т. д.); и
- коэффициента антенной решетки** $AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta, \varphi)$ как функции ориентации управляемого луча $(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$ и углового направления (θ, φ) (зависящей от геометрии решетки, количества элементов, расстояния между элементами и весовых коэффициентов элементов фазированной решетки – эквидистантной или нет).

Зная эти два элемента, направленность плоской решетки $D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$ можно выразить следующим образом:

$$D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan}) = 4\pi \frac{D_e(\theta, \varphi) \cdot |AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta, \varphi)|^2}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} D_e(\theta', \varphi') \cdot |AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta', \varphi')|^2 \sin \theta' d\theta' d\varphi'}.$$

Применяя коэффициент эффективности η плоской решетки, можно установить диаграмму зависимости усиления $G_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$ от ориентации управляемого луча $(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$ и углового направления (θ, φ) :

$$G_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan}) = \eta \cdot D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan}).$$

Следующее уравнение характеризует направленность для случая прямоугольной плоской антенной решетки следующим образом:

$$D_a(\theta, \varphi) = D_e(\theta, \varphi) \cdot \frac{1}{N} \cdot |AF(\theta, \varphi)|^2, \quad (50)$$

где:

- θ : угол места (радианы);
- φ : азимутальный угол (радианы);
- $D_a(\theta, \varphi)$: диаграмма направленности плоской эквидистантной антенной решетки;
- $D_e(\theta, \varphi)$: диаграмма направленности отдельных излучающих элементов, установленных на плоской эквидистантной антенной решетке;
- N_x : число отдельных излучающих элементов по оси x ;
- N_y : число отдельных излучающих элементов по оси y ;
- $N = N_x \cdot N_y$: общее число отдельных излучающих элементов;
- AF : коэффициент равномерной плоской эквидистантной антенной решетки:

$$AF(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N_x \psi_x(\theta, \varphi)}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta, \varphi)}{2}\right)} \times \frac{\sin\left(\frac{N_y \psi_y(\theta, \varphi)}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta, \varphi)}{2}\right)}, \quad (51)$$

где:

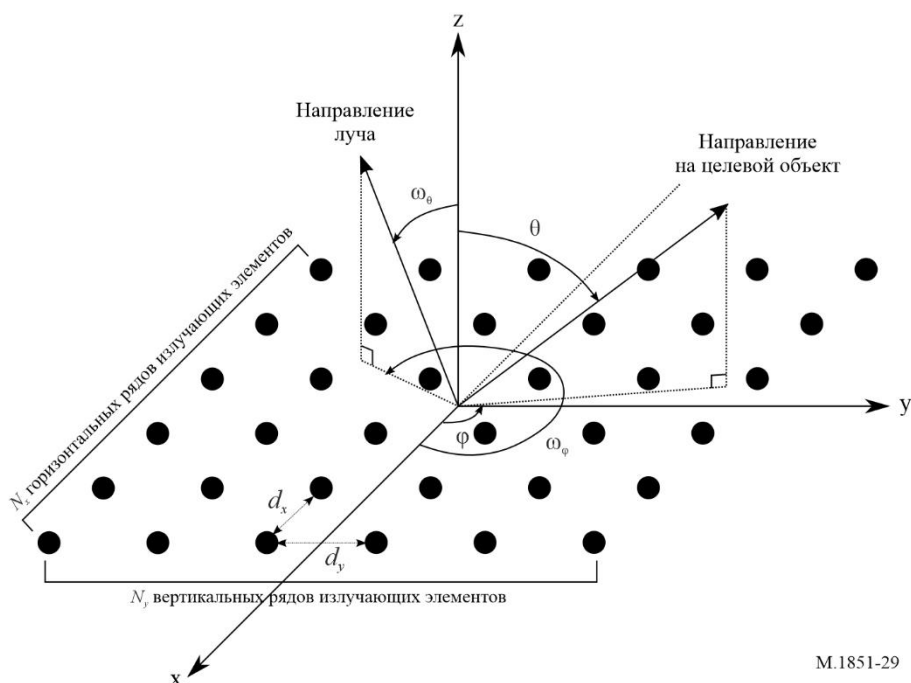
$$\psi_x(\theta, \varphi) = 2\pi \times \frac{d_x}{\lambda} \times (\sin(\theta) \times \cos(\varphi) - \sin(\omega_\theta) \times \cos(\omega_\varphi)); \quad (52)$$

$$\psi_y(\theta, \varphi) = 2\pi \times \frac{d_y}{\lambda} \times (\sin(\theta) \times \sin(\varphi) - \sin(\omega_\theta) \times \sin(\omega_\varphi)), \quad (53)$$

где:

- d_x : регулярный промежуток между равномерно распределенными излучающими элементами вдоль оси x (м);
- d_y : регулярный промежуток между равномерно распределенными излучающими элементами вдоль оси y (м);
- λ : длина волны на рассматриваемой частоте (м);
- ω_θ : угол наклона электронного луча (радиан);
- ω_φ : угол поворота электронного луча по азимуту (радиан).

РИСУНОК 29



M.1851-29

Подобно линейной фазированной антенной решетке, плоская антенная фазированная решетка позволяет электронным способом направлять главный лепесток антенны в любом направлении в сферических координатах. Однако большие углы наклона антенны по азимуту и углу места приводят к появлению специфических эффектов боковых лепестков на диаграмме направленности антенны, а также к значительному расширению и нарушению симметрии главного лепестка. Лепестки решетки те же, что описаны в пункте 6.1.

Для модели, описанной в данном разделе, необходимо знать количество элементов (N_x , N_y), расстояние между элементами (d_x , d_y), диаграмму направленности отдельного элемента и соответствующий коэффициент усиления элемента. Если какие-либо из этих входных параметров неизвестны, следует использовать пиковые или усредненные маски, как описано в пункте 2.1.1.

7 Эффективность антенны

Эффективность антенны количественно характеризует часть подаваемой на антенну мощности, которая фактически излучается, и определяется как отношение (в линейных единицах мощности) между двумя этими величинами, которое должно быть строго меньше 1 (или 0 дБ, что эквивалентно). Вследствие этого необходимо проявлять определенную осторожность при использовании одной из моделей, описанных в настоящей Рекомендации, чтобы гарантировать, что построенная диаграмма усиления антенны соответствует этому ограничению на эффективность антенны.

При наличии трехмерной диаграммы направленности антенны возможен расчет общего интегрального усиления (TIG). В тех случаях, когда используются пиковые или усредненные маски антенны, значение TIG может оказаться завышенным. TIG определяется в линейных единицах следующим образом:

$$\text{TIG} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} G(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi,$$

где:

θ : угол места (радианы);

φ : азимутальный угол (радианы);

$G(\theta, \varphi)$: усиление антенны по отношению к изотропной антенне (линейное).

8 Примеры измеренных диаграмм направленности

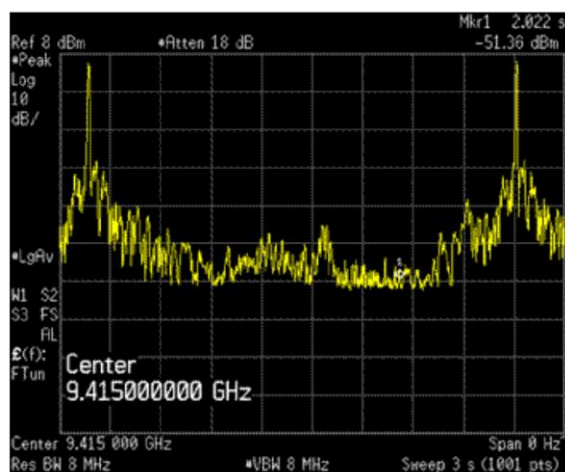
На рисунках 30 и 31 показаны примеры измеренных диаграмм направленности радиолокационных антенн в диапазоне частот 9 ГГц. По оси X отложены значения азимутального угла, охватывающего более 360° , а по оси Y – уровень мощности, полученный при каждом значении азимутального угла. Диаграмма направленности антенны нормализуется по отношению к своему максимуму или к изотропной антенне и считается нормализованной диаграммой направленности антенны.

Первый анализ таких измеренных диаграмм направленности антенны показывает, что первые боковые лепестки появляются вблизи -30 дБн с заметным наклоном, что позволяет приблизительно оценить, что использовался закон распределения поля в апертуре $\cos^2$. Теоретический минимальный уровень маски -60 дБн по модели $\cos^2$ в этом случае представляется чересчур низким из-за наличия в этой диаграмме направленности антенны заднего лепестка и задних дифракционных лепестков, поэтому при необходимости следует по возможности использовать реальные диаграммы направленности антенны вместо теоретических.

На рисунке 30 показан пример измеренных диаграмм направленности антенны типа косеканс-квадрат. Лучи радара сформированы зеркальной антенной, питаемой двумя рупорными облучателями, которые создают два луча, наклоненных под разными углами места.

РИСУНОК 30

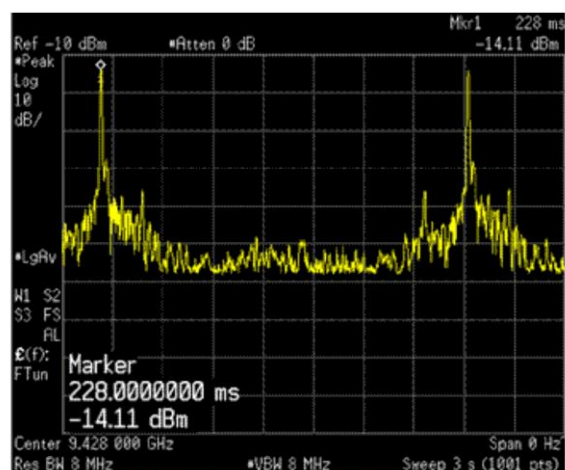
Пример графика по измеренным параметрам антенны



M.1851-30

РИСУНОК 31

Пример графика по измеренным параметрам антенны

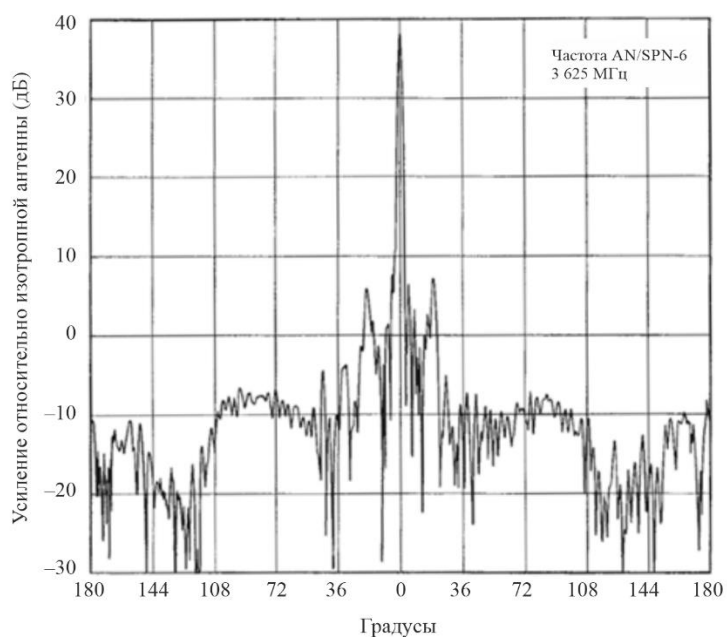


M.1851-31

Два других примера показаны на рисунках 32 и 33.

РИСУНОК 32

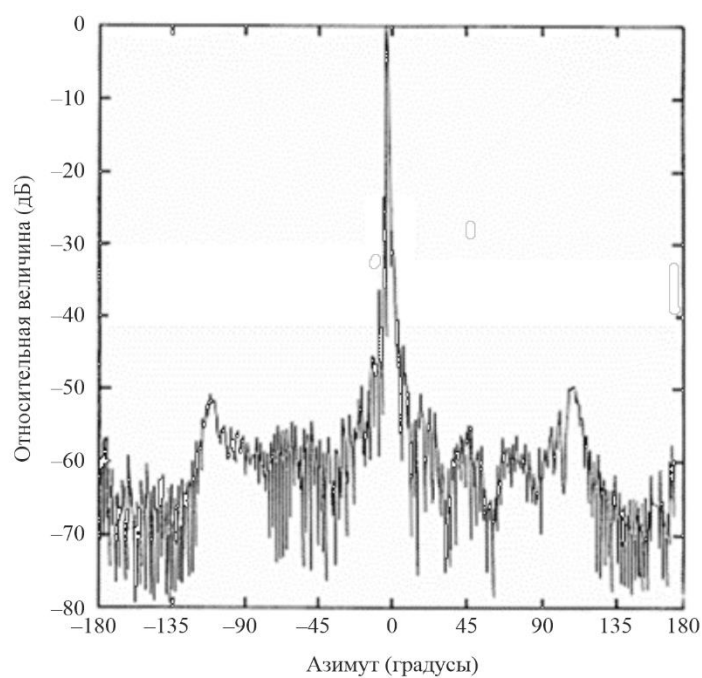
Измерения с использованием антенны радара AN/SPN-6 на частоте 3,6 ГГц при усилении 38 дБи



М.1851-32

РИСУНОК 33

Диаграмма направленности антенны доплеровского метеорологического радара с уровнем первого бокового лепестка 25 дБ и коэффициентом обратного излучения 60 дБ

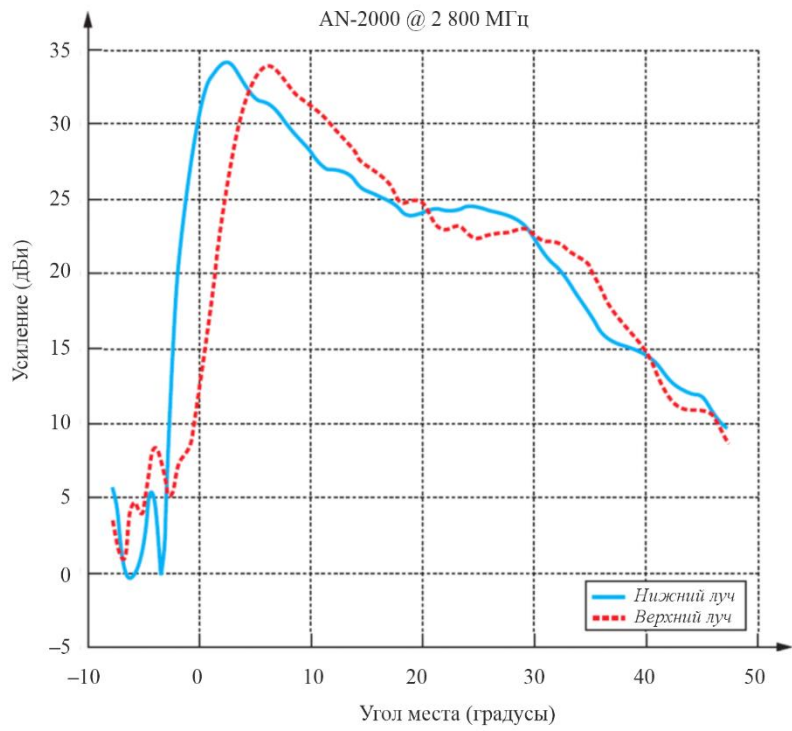


М.1851-33

Рисунок 34 можно сравнить с теоретической диаграммой направленности антенны типа косеканс-квадрат, заданной уравнениями (22) и (23).

РИСУНОК 34

Измерение радара управления воздушным движением (УВД) STAR2000 на частоте 2,8 ГГц



М.1851-34