

**МСЭ-R**  
Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R М.1851-1**  
(01/2018)

**Математические модели диаграмм  
направленности антенн  
радиолокационных систем  
радиоопределения для использования  
при анализе помех**

**Серия М**

**Подвижные службы, служба радиоопределения,  
любительская служба и относящиеся к ним  
спутниковые службы**



## 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 Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://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: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

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
<b>M</b>	<b>Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы</b>
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, 2018 г.

© ITU 2018

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.



## Приложение 1

### Математические модели диаграмм направленности антенн радиолокационных систем радиоопределения для использования при анализе помех

#### 1 Введение

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

В настоящей Рекомендации 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 исследуемых антенн, полученные из Рекомендаций МСЭ-R.

ТАБЛИЦА 1

#### Предельные значения параметров изучаемых антенн

Параметр антенны	Единица измерения	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение
Частоты передачи и приема	МГц		420	33 400
Тип антенны		Всенаправленная антенна, 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 ( $CSC^2$ ) (уравнение (12) и таблица 4)	3,6 ( $\theta_3$ ) 20 ( $\theta_{Max}$ )	3,6 ( $\theta_3$ ) 44 ( $\theta_{Max}$ )
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 антенны.



## 2 Математические формулы

### 2.1 Радиолокационная антенна с узким лучом

#### 2.1.1 Базовая информация

В отсутствие конкретной информации о ширине луча по уровню 3 дБ, форме распределения тока или поле облучения апертуры антенны, но при наличии данных о размере антенны, ширина луча антенны по половинной мощности  $\theta_3$  (градусы) приближенно описывается соотношением  $70 \lambda/D$ , где длина волны  $\lambda$  и диаметр антенны  $D$  выражены в одних и тех же единицах; см. Рекомендацию МСЭ-R F.699, пункт 4.1 раздела *рекомендует*.

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. таблицу 2 и рисунок 1;

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

$l$ : общая длина апертуры;

$\lambda$ : длина волны;

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

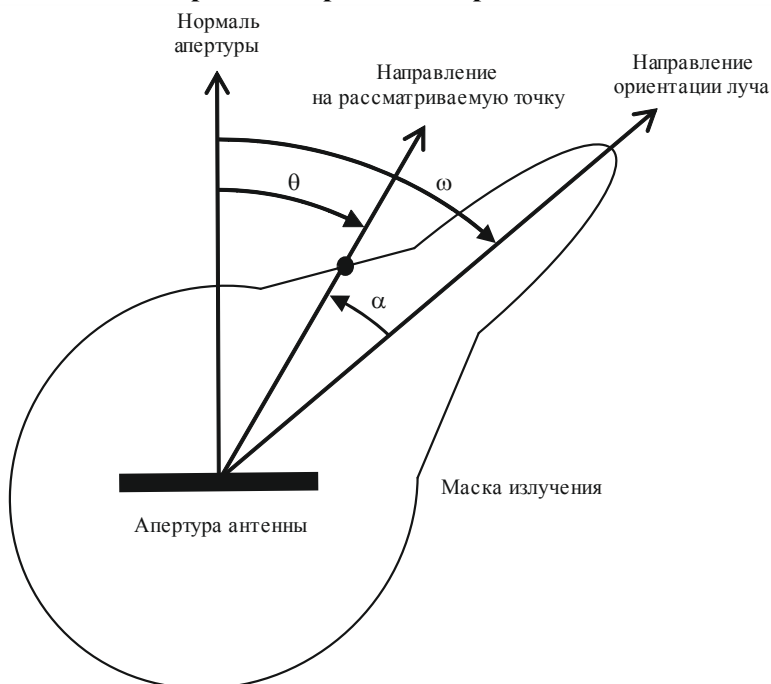
$\theta$ : угол между направлением на рассматриваемую точку и нормалью апертуры;

$\alpha$ : 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.185101

Предлагаемые теоретические диаграммы направленности для антенн с равномерным фазовым распределением излучения представлены в таблице 2.

Предлагаемые теоретические диаграммы направленности для фазированных антенных решеток представлены в пункте 7 с учетом конкретного влияния боковых лепестков, появляющегося при больших углах сканирования  $\omega$ .

Параметры и формулы для определения диаграмм направленности антенны (ДНА), представленные в таблице 2 (и, следовательно, в связанных с ней таблице 3 и рисунках), верны только для случая, когда амплитуда поля на ребре апертуры антенны равна нулю и находится в пределах границ главного лепестка и первых двух боковых лепестков ДНА.

При других значениях амплитуды поля на ребре апертуры антенны форма ДНА и ее параметры могут существенно отличаться от теоретических, представленных в настоящей Рекомендации.

В отсутствие любой иной информации можно рассмотреть возможность использования упрощенной диаграммы направленности антенны, согласующейся с теоретическим главным лепестком и маской в других направлениях, для исследований совместного использования частот и совместимости с другими радиолокационными системами. Для проведения таких исследований рекомендуется использовать пиковые или усредненные маски соответственно для единичного источника помех или нескольких источников помех. 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, как описано в пункте 2.1.3.

В случае наличия реальных диаграмм направленности антенны следует перевести в цифровую форму и использовать эти диаграммы.

### 2.1.2 Теоретические уравнения для антенны

Уравнения диаграмм направленности и соответствующих параметров антенны для различных форм распределения поля апертуры антенны представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

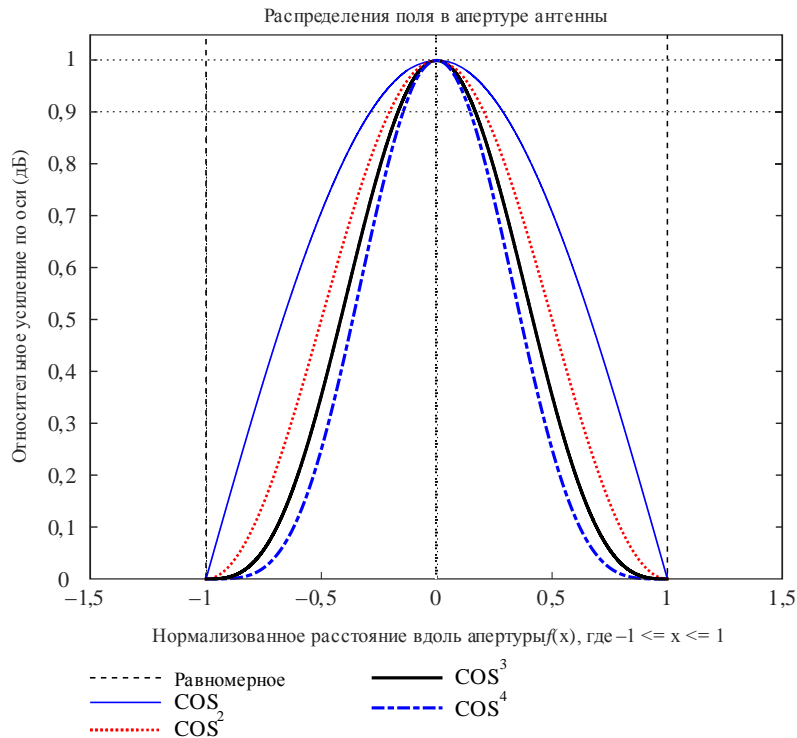
Теоретические параметры направленности антенны

Относительная форма распределения поля $f(x)$ , где $-1 \leq x \leq 1$	Диаграмма направленности $F(\mu)$	Ширина луча по уровню половинной мощности $\theta_3$ (градусы)	$\mu$ как функция $\theta_3$	Уровень первого бокового лепестка ниже пикового значения главного лепестка (дБ)	Номер уравнения
Равномерное значение 1	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}$	$50,8 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-13,2	(2)
$\cos(\pi \cdot x/2)$	$\frac{\pi}{2} \left[ \frac{\cos(\mu)}{\left( \frac{\pi}{2} \right)^2 - \mu^2} \right]$	$68,8 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 68,8 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-23	(3)
$\cos^2(\pi \cdot x/2)$	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[ \frac{\sin(\mu)}{\pi^2 - \mu^2} \right]$	$83,2 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 83,2 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-32	(4)
$\cos^3(\pi \cdot x/2)$	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[ \frac{1}{\left( \frac{\pi}{2} \right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left( \frac{3 \cdot \pi}{2} \right)^2 - \mu^2} \right]$	$95 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 95 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-40	(5)
$\cos^4(\pi \cdot x/2)$	$\frac{3\pi^4 \sin(\mu)}{2\mu(\mu^2 - \pi^2)(\mu^2 - 4\pi^2)}$	$106 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 106 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-47	(6)

$\theta_3$  – ширина луча по уровню половинной мощности антенны (градусы) 3 дБ. Относительные формы функций распределения поля  $f(x)$ , определенные в таблице 2, графически отображены на рисунке 2.

РИСУНОК 2

## Распределения поля в апертуре антенны



М.1851.02

При условии что известна ширина луча по уровню половинной мощности  $\theta_3$ , значение  $\mu$  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

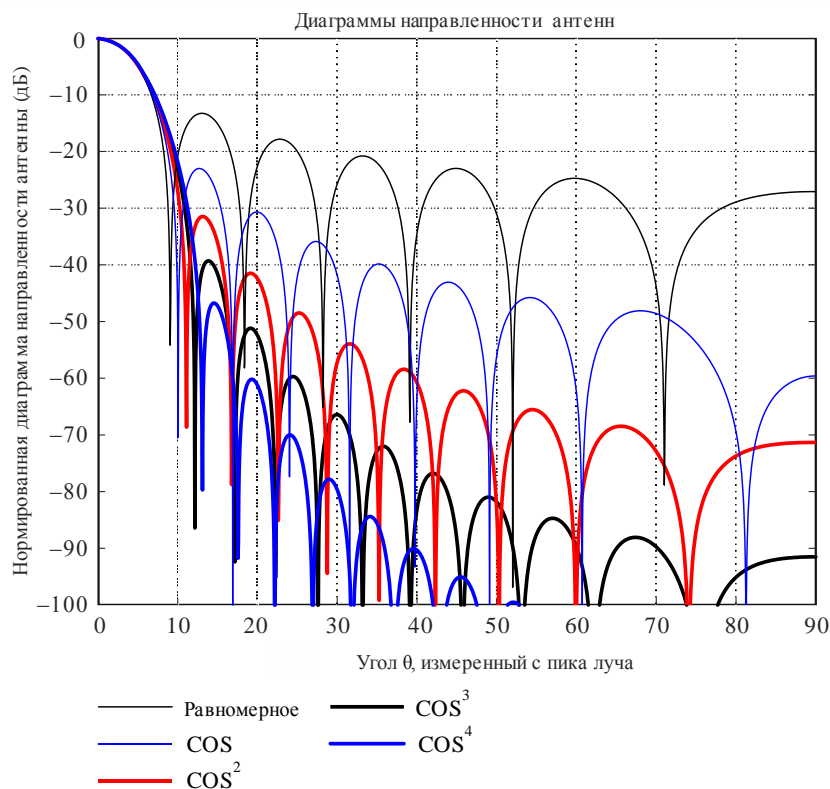
значением, которое определяется относительной формой распределения поля, деленным на значение ширины луча по уровню половинной мощности  $\theta_3$ , согласно таблице 2. Эти постоянные значения, равные 50,8; 68,8; 83,2, 95 и 106 и показанные в таблице 2, могут быть выведены, если приравнять уравнение для  $F(\mu)$  к  $-3$  дБ и найти решение для угла  $\theta$ .

На рисунке 3 показаны диаграммы направленности антенн различной линейной апертурой для функций равномерного распределения поля, а также распределения поля типа косинус (COS), косинус-квадрат ( $\text{COS}^2$ ), косинус-куб ( $\text{COS}^3$ ) и косинус в четвертой степени ( $\text{COS}^4$ ). 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  $\lambda/l$ .



РИСУНОК 3

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



M.1851-03

### 2.1.3 Процедура определения маски

На основе рисунка 3, 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)–(6) в дБ, используя  $20 \cdot \log_{10}$  (абсолютное значение (диаграмма направленности по полю));
- нормализовать коэффициенты усиления диаграмм направленности. 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;
- для построения маски используется теоретическая диаграмма направленности из таблицы 2, 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 3;
- 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 в таблице 3;

- 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 в таблице 3;
- $\theta_3$  – это ширина луча антенны по уровню 3 дБ (градусы);
- $\theta$  – 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 примерно 4 дБ. Следует отметить, что точки разрыва пиковой диаграммы отличаются от точек разрыва усредненной диаграммы.

В таблице 3 показаны уравнения, которые следует использовать для расчетов.

ТАБЛИЦА 3

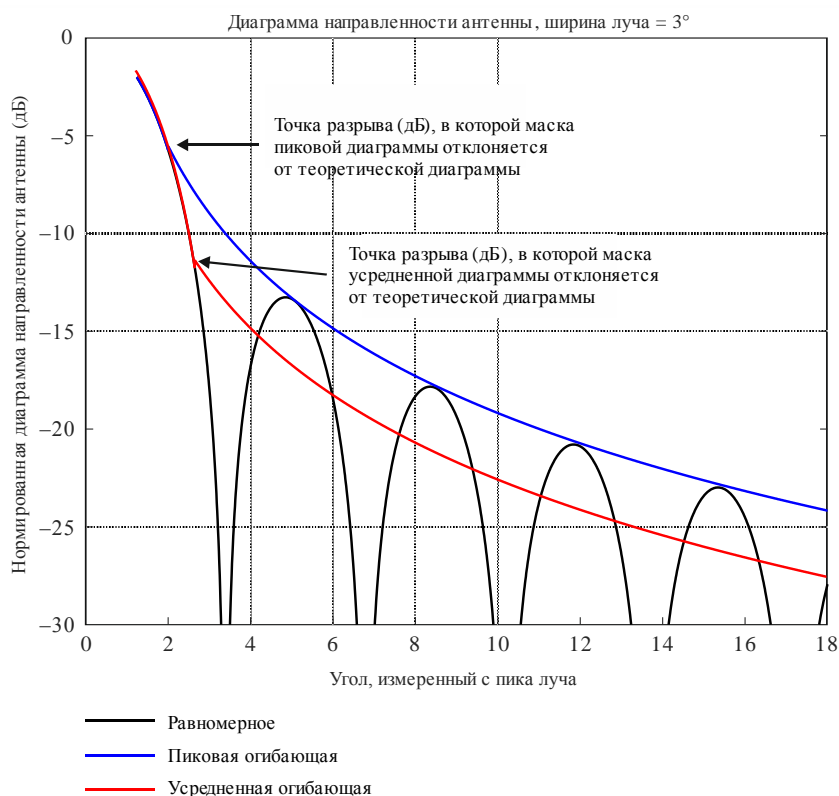
## Уравнения для диаграммы теоретической пиковой и усредненной маски

Распределение поля	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)	Постоянная величина, добавляемая к пиковой диаграмме для преобразования ее в усредненную маску (дБ)	Минимальный уровень маски (дБ)	Номер уравнения
Равномерное	$-8,584 \cdot \ln \left( 2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	-30	(7)
COS	$-17,51 \cdot \ln \left( 2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	-50	(8)
COS <sup>2</sup>	$-26,882 \cdot \ln \left( 1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	-60	(9)
COS <sup>3</sup>	$-35,84 \cdot \ln \left( 1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	-70	(10)
COS <sup>4</sup>	$-45,88 \cdot \ln \left( 1,56 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-39,4	-42,5	-2,61	-80	(11)

Функция  $\ln()$  – это функция натурального логарифма. Пример точки разрыва представлен на рисунке 4.

РИСУНОК 4

## Пример точки разрыва



М.185104

## 2.2 Радиолокационная антенна с косекансно-квадратичной угломестной диаграммой направленности

Диаграмма типа косеканс-квадрат является частным случаем. Мощность (не напряженность поля) описывается следующим уравнением:

$$G(\theta) = G(\theta_1) \cdot \left( \frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2, \quad (12)$$

где:

- $G(\theta)$  : диаграмма типа косеканс-квадрат между углами  $\theta_1$  и  $\theta_{\text{Max}}$ ;
- $G(\theta_1)$  : коэффициент усиления диаграммы в  $\theta_1$ ;
- $\theta_1$  : ширина луча антенны по уровню половинной мощности в точке начала диаграммы типа косеканс-квадрат =  $\theta_3$ ;
- $\theta_{\text{Max}}$  : максимальный угол, при котором заканчивается диаграмма типа косеканс-квадрат;
- $\theta$  : угол места (градусы);
- $\theta_3$  : ширина луча антенны по уровню половинной мощности (градусы).

Коэффициент усиления усредненной диаграммы направленности антенны для диаграммы типа косеканс-квадрат не учитывается. Он должен использоваться для случая одного или нескольких источников помех. Косекансная диаграмма направленности применяется так, как показано в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

## Уравнения диаграммы направленности типа косеканс-квадрат

Уравнение диаграммы типа косеканс-квадрат	Условие	Номер уравнения
$\frac{\sin(\mu)}{\mu}; \mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$\frac{-\theta_3}{0,88} \leq \theta \leq +\theta_3$	(13)
$G(\theta_1) \cdot \left( \frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2$	$+\theta_3 \leq \theta \leq \theta_{\text{Max}}$	(14)
Минимальный уровень косекансной диаграммы (пример = -55 дБ)	$\theta_{\text{Max}} \leq \theta \leq \theta_{90}$	(15)
$G(\theta_1) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}\right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}}$	$\theta_1 = \theta_3$	(16)

Следует отметить, что  $G(\theta_1) \cdot \left( \frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2$  относится к амплитуде диаграммы направленности по

мощности, а  $\frac{\sin(\mu)}{\mu}$  и  $G(\theta_1) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}\right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}}$  относятся к "диаграмме направленности  $F(\mu)$ ",

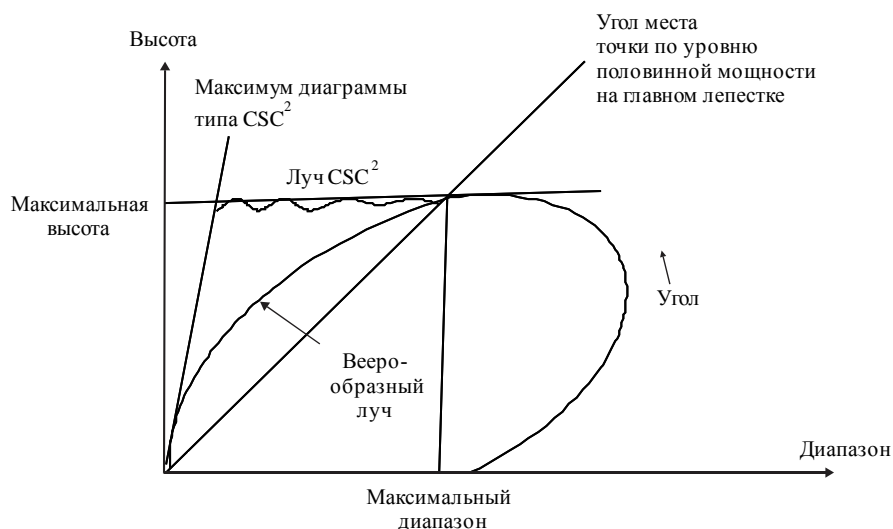
амплитуде поля, являющейся квадратом амплитуды мощности. Решением может быть запись

выражений в виде  $\left( \frac{\sin(\mu)}{\mu} \right)^2$  и  $G(\theta_1) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}\right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}}$ .

Графическое описание диаграмм направленности приведено на нижеследующих рисунках.

РИСУНОК 5

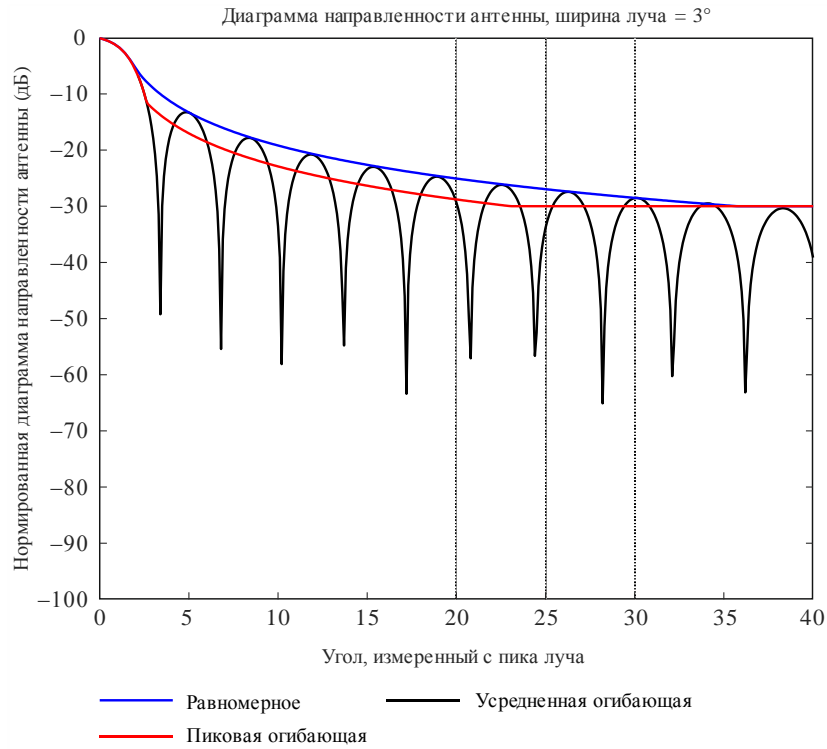
## Зона действия квадратично-косекансного луча для поискового радара



### 2.3 Теоретические диаграммы и маски для различных диаграмм направленности антенны

РИСУНОК 6

Диаграмма направленности антенны, пиковая огибающая  $\left(\frac{\sin \theta}{\theta}\right)^2$  в радианах или  $\left(\frac{\sin \theta}{\theta} \cdot \frac{180}{\pi}\right)^2 \approx \left(\frac{\sin \theta}{\theta} \cdot 57,3\right)^2$  в градусах и усредненная огибающая для равномерного распределения поля



М.1851-06

РИСУНОК 7

Пример полярной диаграммы направленности антенны, пиковая и усредненная огибающая для равномерного распределения поля

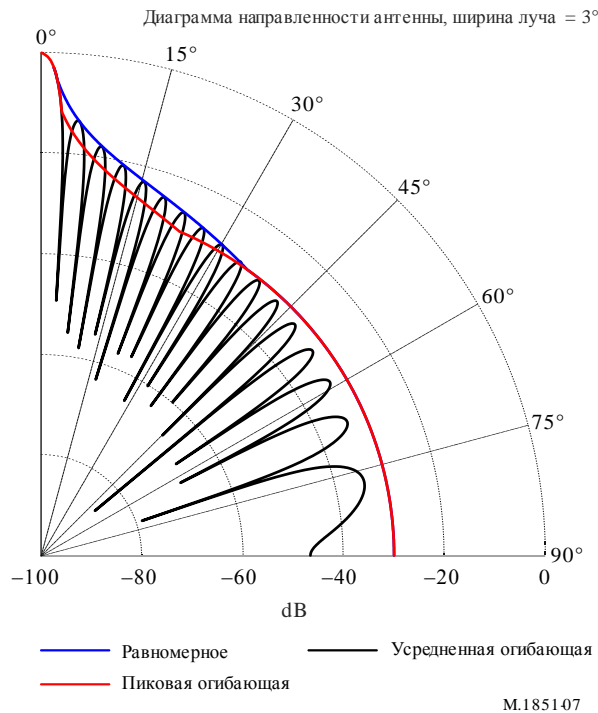


РИСУНОК 8

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

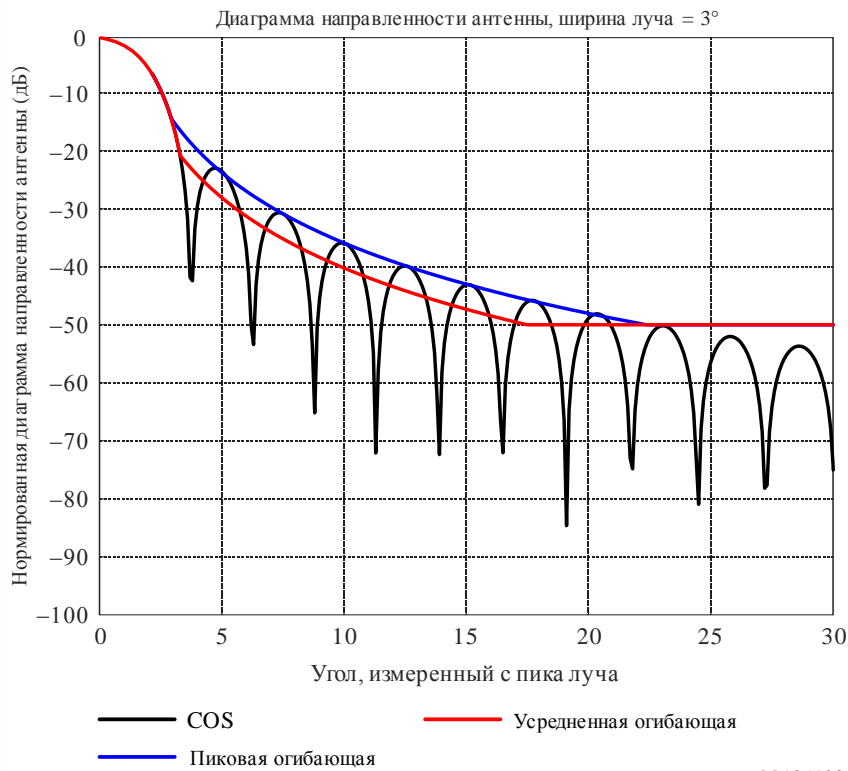




РИСУНОК 9

Диаграмма направленности антенны, пиковая и усредненная огибающая для распределения поля типа косинус-квадрат

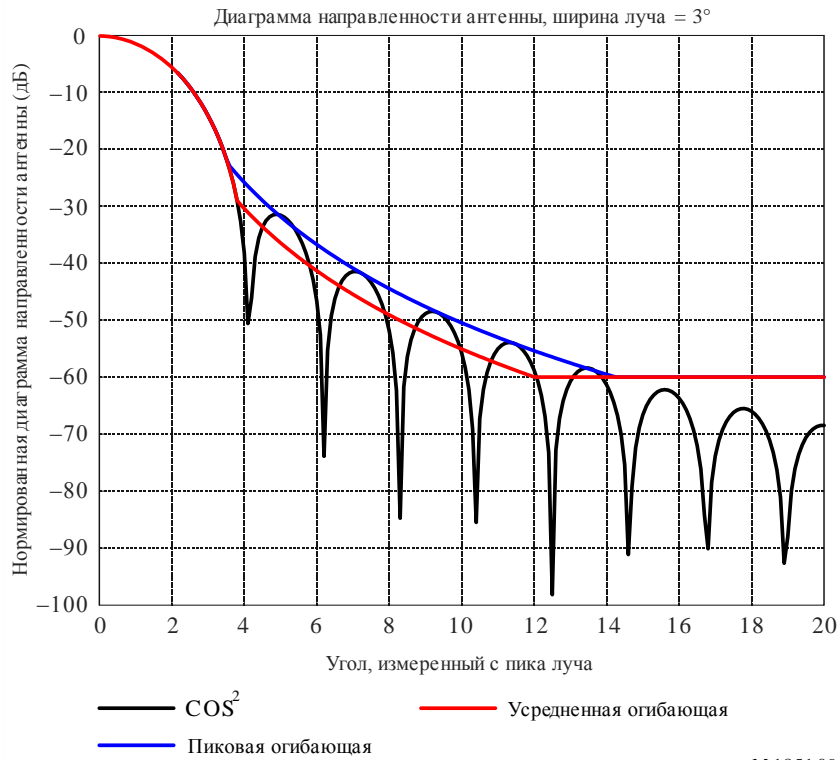


РИСУНОК 10

Диаграмма направленности антенны, пиковая и усредненная огибающая для распределения поля типа косинус-куб

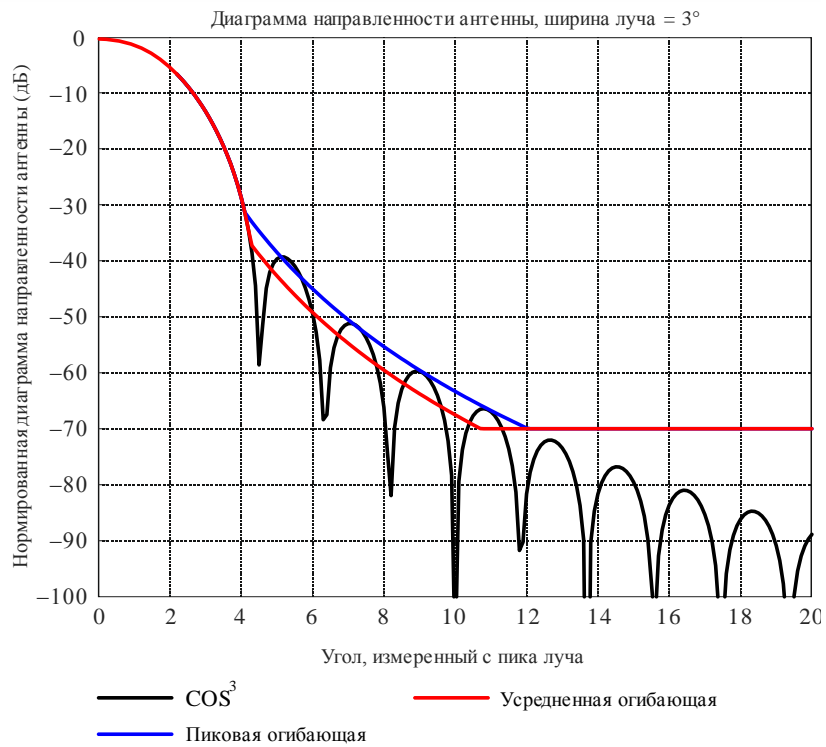


РИСУНОК 11

Диаграмма направленности антенны, пиковая и усредненная огибающая для распределения мощности типа косинус в четвертой степени

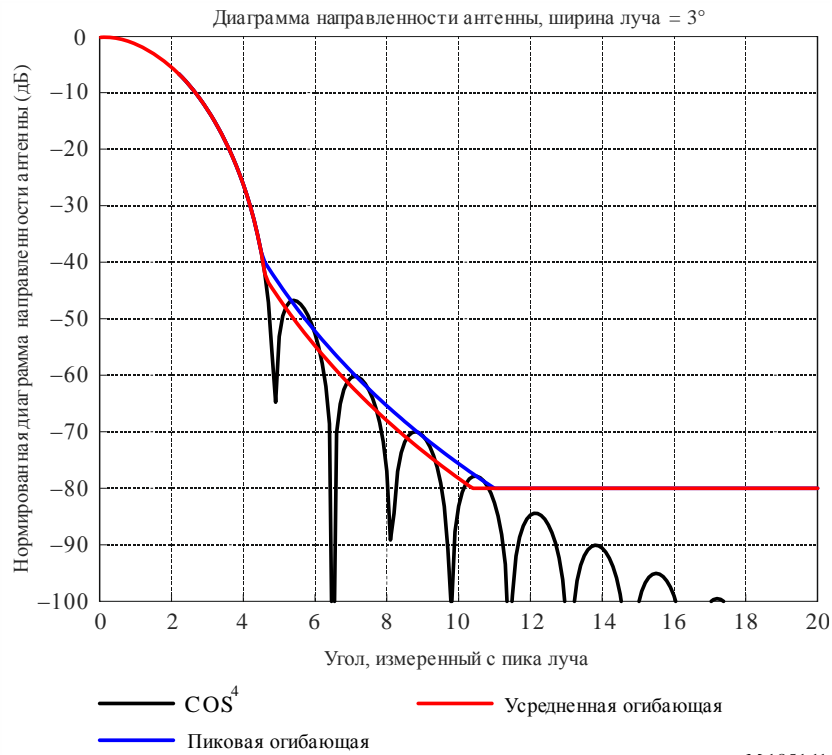
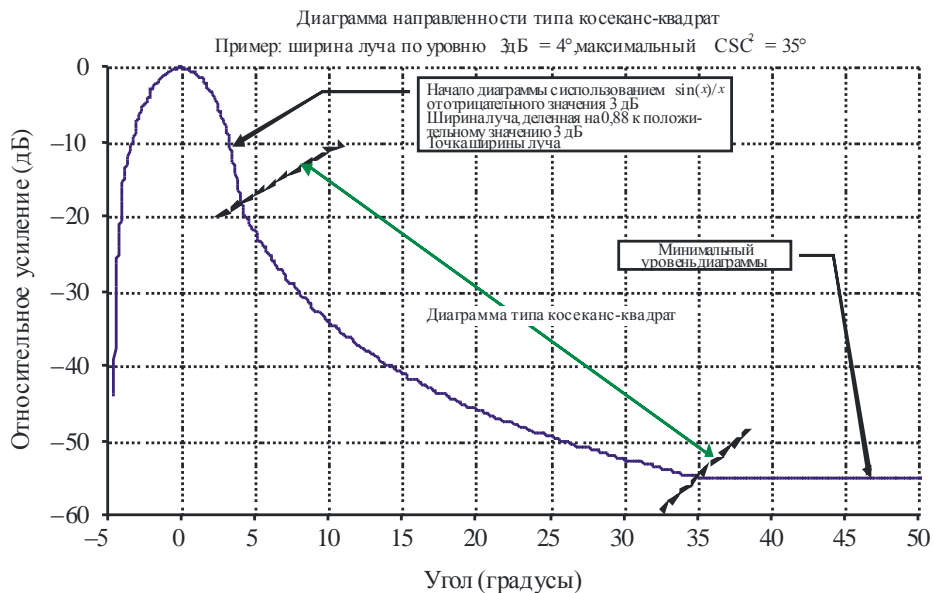


РИСУНОК 12

Огибающая диаграмма направленности антенны типа  $\text{CSC}^2$



### 3 Выбор диаграммы направленности антенны

Предлагаемый метод выбора диаграммы направленности антенны основывается на информации о ширине луча по половинному уровню мощности и пиковом уровне боковых лепестков. Такой порядок выбора определен в таблице 5 с учетом информации о половинном уровне мощности.

ТАБЛИЦА 5

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)
$\geq 45$	$n = 4$	(6)	(11)

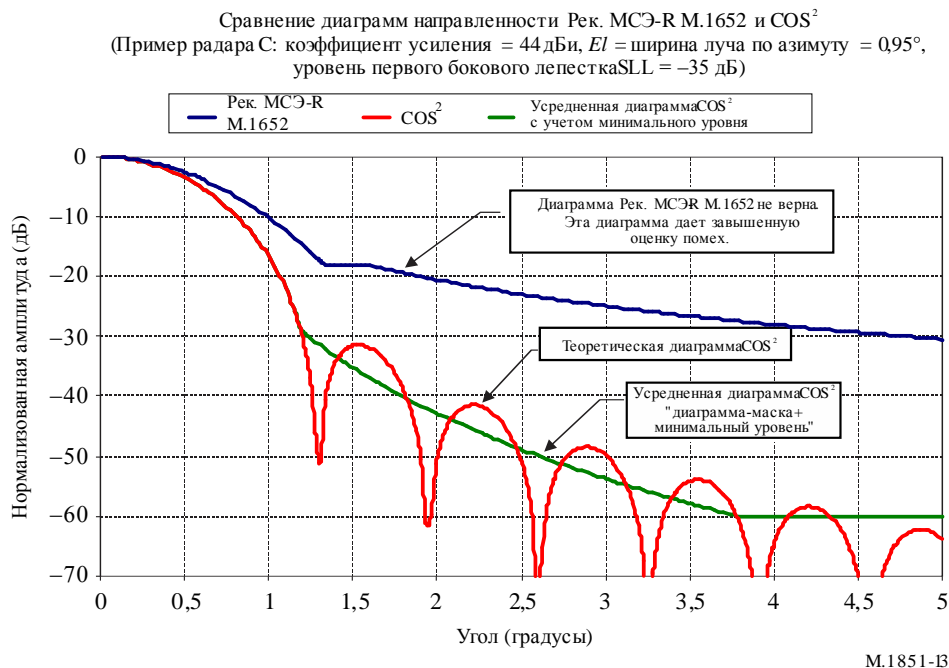
#### 4 Сравнение диаграмм направленности антенны

Одна из математических моделей для диаграммы направленности антенны радиолокационной системы 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 13, диаграмма направленности Рекомендации МСЭ-R М.1652 дает значительно завышенные оценки коэффициента усиления за пределами линии прицеливания антенны ( $0^\circ$ ).

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 13

## Сравнение диаграмм направленности антенны



## 5 Аппроксимирование трехмерных (3D) диаграмм направленности

В качестве инструментов анализа методом моделирования могут использоваться контурные графики. Трехмерная (3D) диаграмма направленности антенны может быть легко аппроксимирована. Это осуществляется путем умножения срезов напряжения в горизонтальной и вертикальной главных плоскостях. Для этого диаграмма направленности в вертикальной главной плоскости помещается в центральную колонку квадратной матрицы, и все остальные элементы приравняются к нулю. Диаграмма в горизонтальной главной плоскости помещается в центральный ряд квадратной матрицы, и все остальные элементы приравняются к нулю. Выполняется взаимное умножение матриц и после этого — построение графика. Следует обратить внимание на то, что все диаграммы направленности должны быть нормализованы.

Уравнение для расчета трехмерной диаграммы направленности задается следующим образом:

$$P_{i,h} = 20 \log \left[ \sum_{k=0}^N |H_{k,i} V_{h,k}| \right], \quad (17)$$

где матрицы для вертикальной и горизонтальной плоскости, в вольтах, определяются уравнениями (18) и (19).

Диаграмма направленности в вертикальной плоскости определяется следующим образом:

$$\text{Вертикальная матрица } (V_{h,k}) = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & El_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & El_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 0 & El_3 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & El_{N-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & El_N & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости определяется следующим образом:

$$\text{Горизонтальная матрица } (H_{k,i}) = \begin{pmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ Az_1 & Az_2 & & & Az_{N-1} & Az_N \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

На рисунках 14 и 15 представлен пример трехмерной диаграммы направленности антенны.

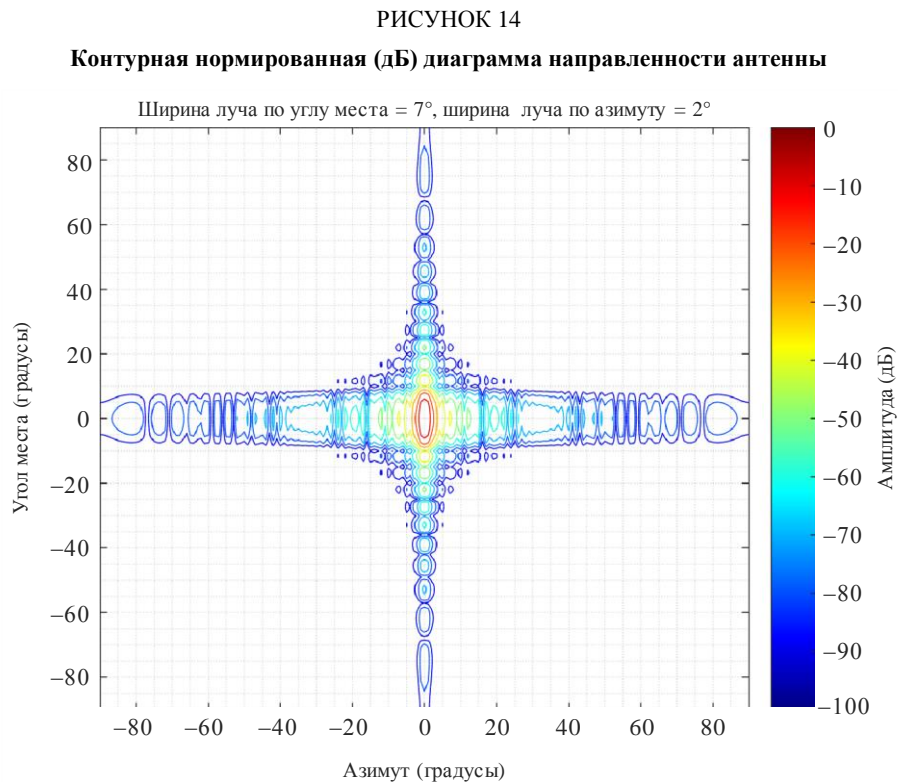
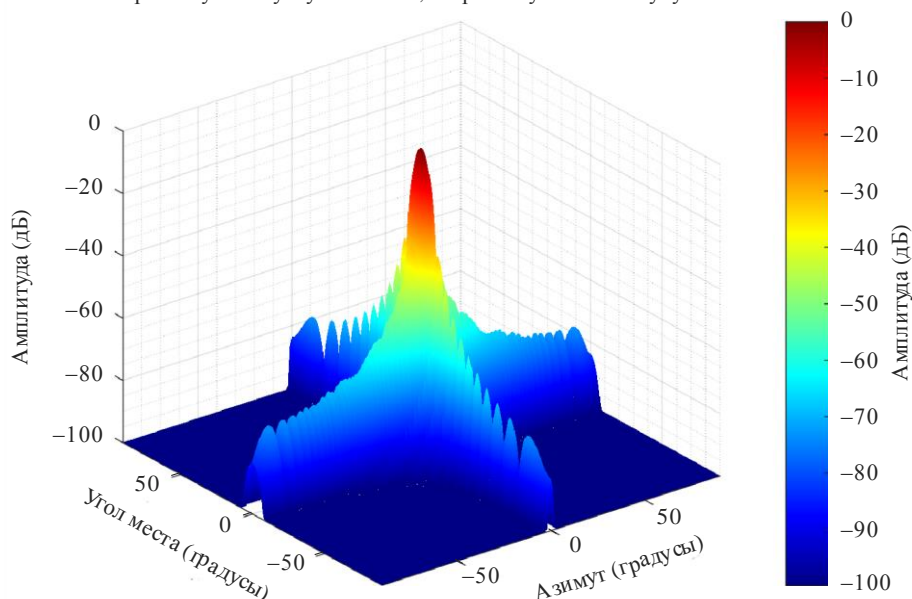


РИСУНОК 15

Пример трехмерного графика относительного изменения азимута и угла места диаграммы антенны, равномерное распределение поля в прямоугольной апертуре, ослабление (дБ) в зависимости от внеосевого угла;  $\theta$  (угол места, градусы) и  $\phi$  (азимут, градусы)

Ширина луча по углу места=  $7^\circ$ , ширина луча по азимуту=  $2^\circ$



М.1851-Б

## 6 Примеры измеренных диаграмм направленности

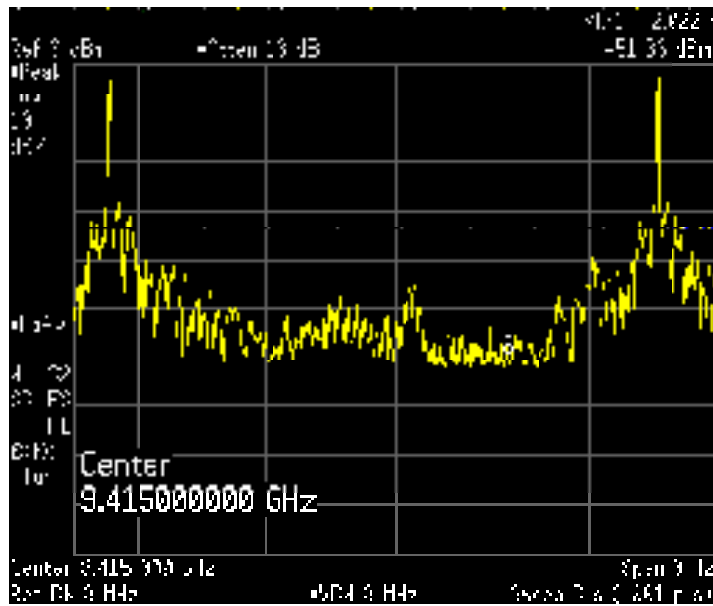
На рисунках 16 и 17 показаны примеры измеренных диаграмм направленности радиолокационных антенн (антенн радара) в диапазоне частот 9 ГГц. На оси  $X$  представлен азимутальный угол, охватывающий более  $360^\circ$ , а на оси  $Y$  – уровень мощности, достигнутый при каждом азимутальном угле. Эта диаграмма мощности должна быть нормирована по отношению к своему максимальному значению или к изотропной антенне, для того чтобы рассматриваться в качестве диаграммы направленности антенны.

Первый анализ таких измеренных диаграмм направленности антенн показывает, что первые боковые лепестки появляются вблизи  $-30$  дБн с заметным наклоном боковых лепестков – это позволяет приблизительно определить, что использовался закон распределения поля в апертуре  $\text{COS}^2$ . Теоретический минимальный уровень маски по модели  $\text{COS}^2$  ( $-60$  дБн) представляется в данном случае чересчур низким из-за наличия в этой диаграмме направленности антенны заднего лепестка и задних дифракционных лепестков; соответственно, если это необходимо, рекомендуется по возможности использовать реальные диаграммы направленности антенн вместо теоретических.



РИСУНОК 16

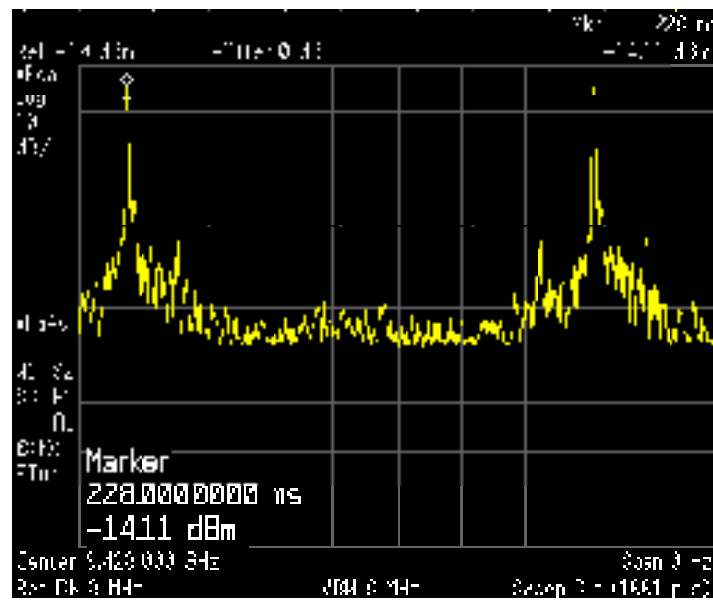
Пример графика по измеренным параметрам антенны



M.1851-16

РИСУНОК 17

Пример графика по измеренным параметрам антенны

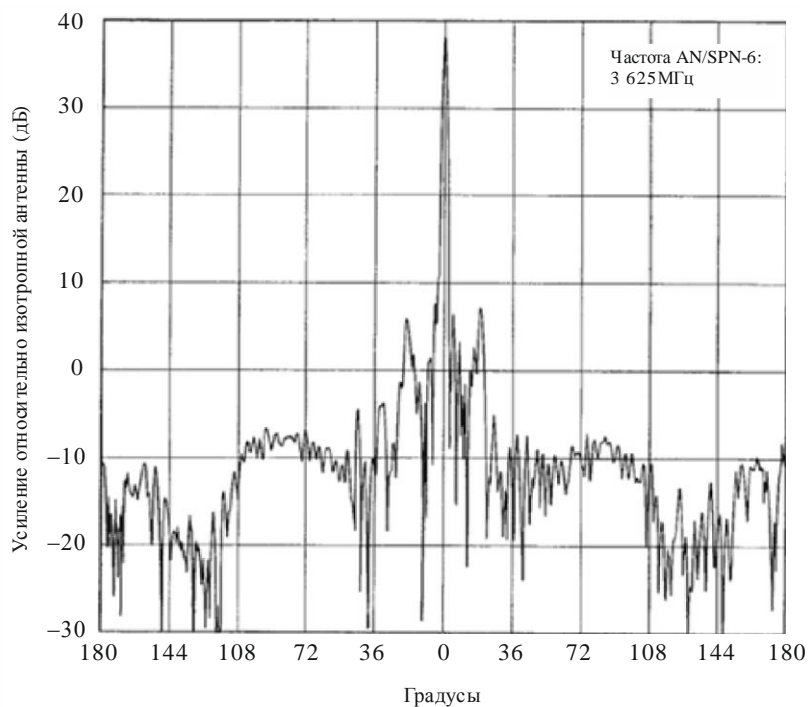


M.1851-17

На рисунках 18 и 19 представлены еще два примера.

РИСУНОК 18

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

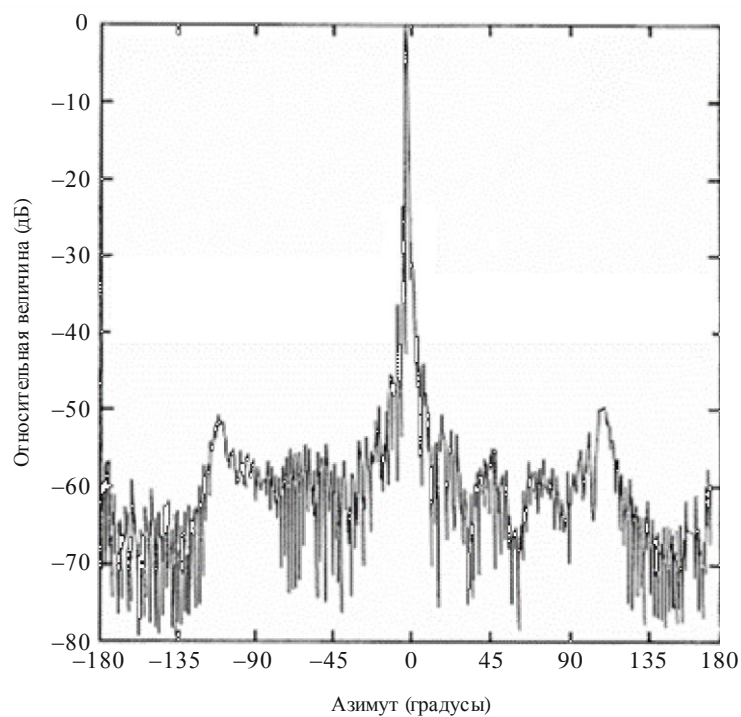


М.1851-18

Источник: Statistical Characteristics of Gain and Mutual Gain of Radar Antennas, Project No. SF 010 204, Task 5727, Department of the Navy 15 September, 1963

РИСУНОК 19

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



М.1851-19

Источник: USA Federal Meteorological Handbook No. 11, December 2005 Part B, FCM-H11B-2005

## 7 Диаграммы направленности для фазированных антенных решеток

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

$$g(\theta) = f(\theta) \cdot \frac{1}{N} |AF(\theta)|^2, \quad (20)$$

где:

$g$ : нормированная диаграмма направленности для линейной эквидистантной антенной решетки;

$f$ : нормированная парциальная диаграмма направленности для базовых излучающих элементов линейной эквидистантной антенной решетки;

$N$ : количество базовых излучающих элементов;

$AF$ : множитель линейной эквидистантной антенной решетки;  $\Psi$  (радианы):

$$AF(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N\Psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \quad (21)$$

при

$$\Psi = 2\pi(d/\lambda)(\sin(\theta) - \sin(\omega)), \quad (22)$$

где:

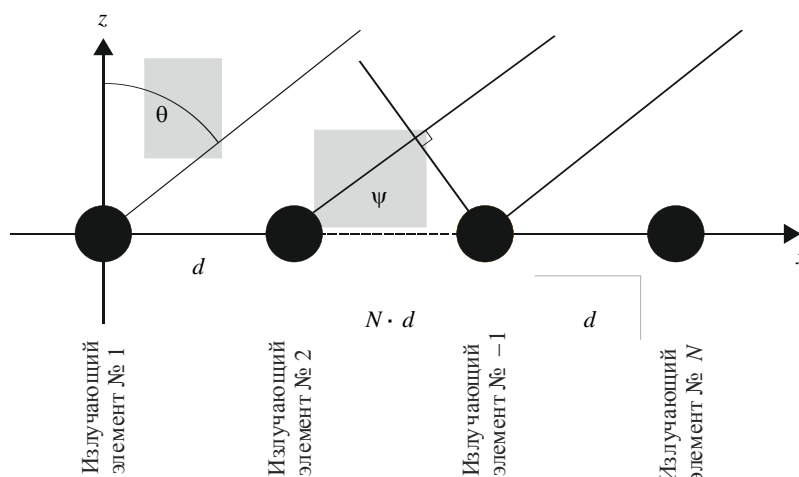
$d$ : равное расстояние между соседними единообразными базовыми излучающими элементами;

$\lambda$ : длина волны на рассматриваемой частоте;

$\omega$ : угол электронного управления лучом;

$\theta$ : внеосевой угол.

РИСУНОК 20



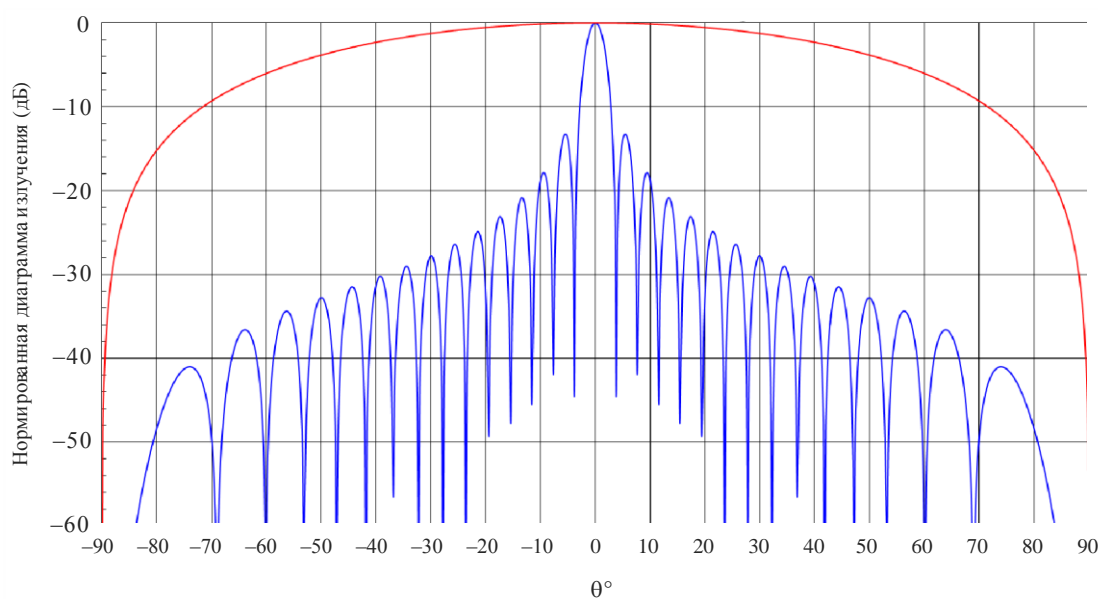
M.1851-20

Благодаря специфике фазированных антенных решеток имеется возможность электронного управления главным лепестком диаграммы направленности антенны в диапазоне  $\pm 90^\circ$  от опорного направления механической антенны. При больших углах сканирования  $\omega$  следует учитывать конкретное влияние боковых лепестков в диаграммах направленности антенн, выражающееся в существенном увеличении главного лепестка и нарушении симметрии (см. рисунок 22). На самом деле максимальное значение главного лепестка уменьшается согласно  $\cos(\omega)$  и далее согласно парциальной диаграмме направленности излучающих элементов решетки. Это приводит к расширению основного луча, потерям максимального усиления и, следовательно, к росту дальних боковых лепестков. При значениях  $\omega$  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 24). Практические значения  $\omega$  находятся в диапазоне от  $0^\circ$  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  $\omega$  в диапазоне менее  $\pm 60^\circ$  от опорного направления механической антенны могут появиться побочные дифракционные максимумы (см. рисунок 23). И даже если расстояние между базовыми излучающими элементами решетки равно  $\lambda/2$ , боковые лепестки побочных дифракционных максимумов главного лепестка, расположенные на  $-90^\circ$  и  $+90^\circ$  от опорного направления механической антенны, искажают диаграмму направленности решетки (см. рисунок 24).

РИСУНОК 21

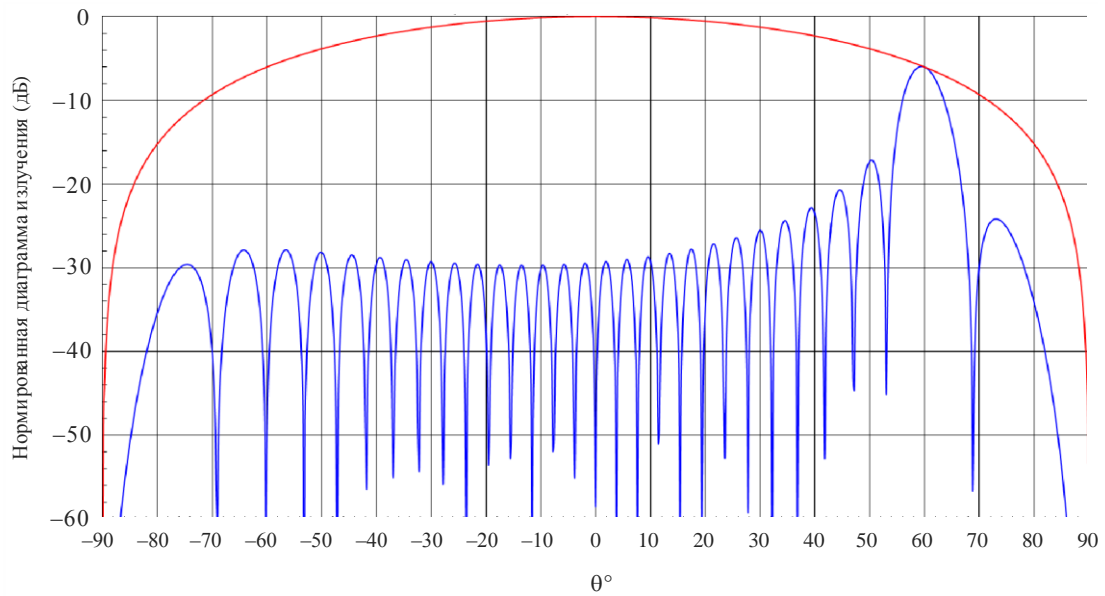
**Теоретическая диаграмма направленности линейной эквидистантной антенной решетки из 30 излучающих элементов с расстоянием между излучателями, равным  $\lambda/2$  (синяя кривая), и диаграммой излучения типа косинус-квадрат (красная кривая), ориентированной по опорному направлению**



М.1851-21

РИСУНОК 22

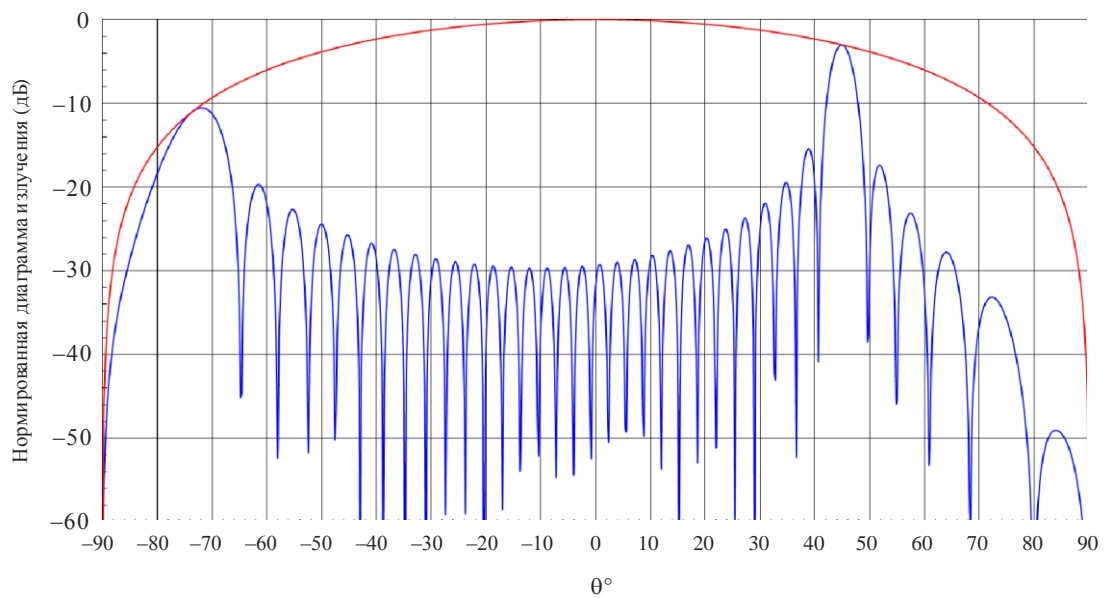
Теоретическая диаграмма направленности линейной эквидистантной антенной решетки из 30 излучающих элементов с расстоянием между излучателями, равным  $\lambda/2$  (синяя кривая), и диаграммой излучения типа косинус-квадрат (красная кривая), ориентированной на  $60^\circ$



M.1851-22

РИСУНОК 23

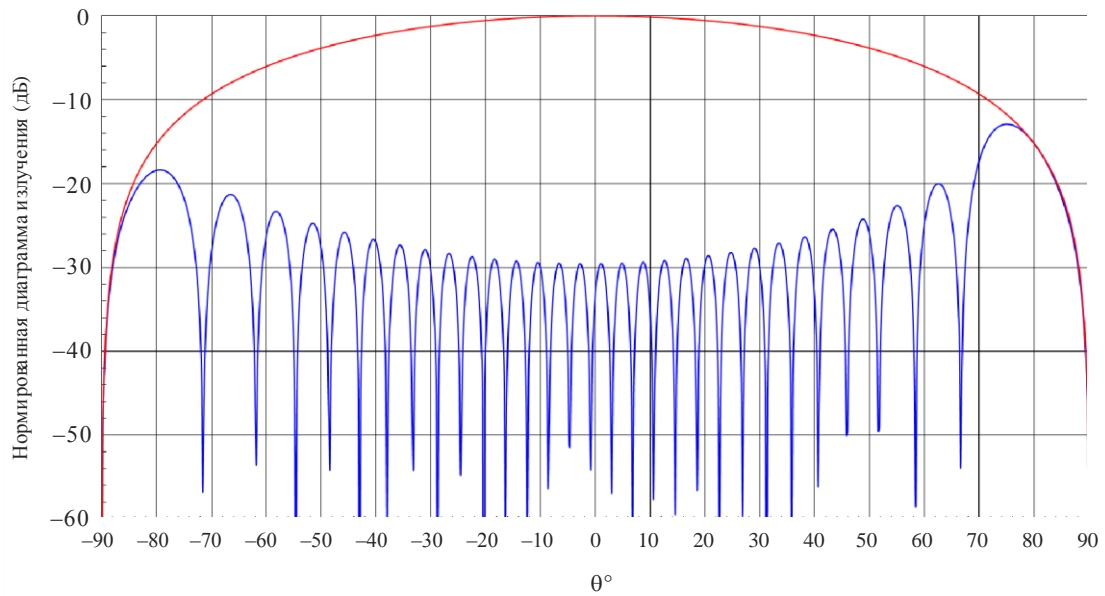
Теоретическая диаграмма направленности линейной эквидистантной антенной решетки из 30 излучающих элементов с расстоянием между излучателями, равным  $0,6\lambda$  (синяя кривая), и диаграммой излучения типа косинус-квадрат (красная кривая), ориентированной на  $45^\circ$



M.1851-23

РИСУНОК 24

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



М.1851-24