

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R М.1851

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

(2009)

Сфера применения

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 по уровню 3 дБ 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. Определяются как пиковая диаграмма направленности – для единичного источника помех, так и усредненная диаграмма направленности – для нескольких источников помех.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- а) что в Рекомендациях МСЭ-R не определены уравнения для расчета диаграмм направленности антенн для радиолокационных систем радиоопределения, которые должны использоваться для оценки помех;
- б) что необходима математическая модель обобщенных диаграмм направленности антенн в целях проведения анализа помех для случая отсутствия конкретной диаграммы направленности радиолокационных систем радиоопределения,

рекомендует,

1 в случае наличия диаграмм направленности антенны и/или уравнений диаграммы направленности, применимых к исследуемой(ым) радиолокационной(ым) системе(ам) в других Рекомендациях МСЭ-R, касающихся характеристик радиолокационных систем радиоопределения, применять эти диаграммы направленности и/или уравнения диаграмм направленности антенн;

2 в случае отсутствия конкретной информации относительно диаграмм направленности антенн рассматриваемой радиолокационной системы радиоопределения, для целей анализа помех использовать одну из математических моделей эталонной антенны, представленных в Приложении 1.

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	Описание	Минимальное значение	Максимальное значение
Частоты передачи и приема (МГц)		420	33 400
Тип поляризации антенны	Горизонтальная, вертикальная, круговая		
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 (градусы)	Иглообразный луч	0,25	5,75
	Косеканс-квадрат(CSC^2)	3,6 CSC^2 до 20	3,6 CSC^2 до 44
Ширина луча по азимуту (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 Предлагаемые формулы

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:

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

где:

- $f(x)$: относительная форма распределения поля, см. таблицу 2 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;
- α : угол относительно нормали апертуры;
- θ : $(\alpha - \omega)$ угол относительно нормали апертуры и угла ориентации;
- x : нормализованное расстояние вдоль апертуры $-1 \leq x \leq 1$;
- j : обозначение комплексного числа.

Предлагаемые теоретические диаграммы направленности антенны представлены в таблице 2. Диаграммы направленности действительны для $\pm 90^\circ$ в пределах угла сканирования луча относительно направления прицеливания антенны. Значения в пределах этого угла, превышающие $\pm 90^\circ$, считаются относящимися к заднему лепестку, где будет применяться минимальный уровень маски антенны. 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 случае наличия реальных диаграмм направленности антенны следует перевести в цифровую форму и использовать эти диаграммы.

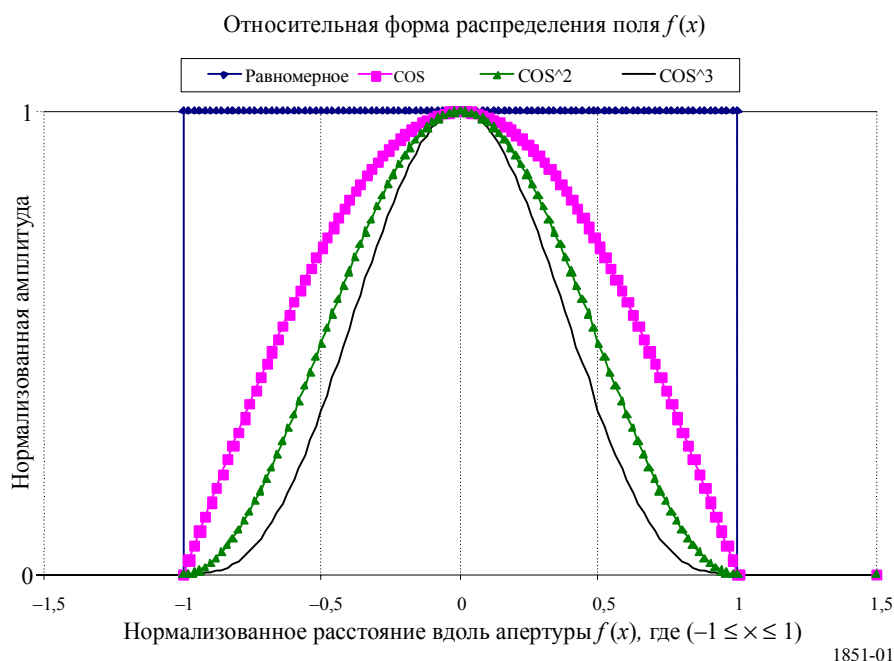
ТАБЛИЦА 2

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, θ_3 (градусы)	μ как функция θ_3	Уровень первого бокового лепестка ниже пикового значения главного лепестка (дБ)	Предлагаемый минимальный уровень маски (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	-30	(1)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)$	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$68,8 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 68,8 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-23	-50	(2)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)^2$	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[\frac{\sin(\mu)}{\left(\pi^2 - \mu^2\right)} \right]$	$83,2 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 83,2 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-32	-60	(3)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)^3$	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$95 \left(\frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 95 \cdot \sin(\theta)}{\theta_3}$	-40	-70	(4)

где θ_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 1.

РИСУНОК 1



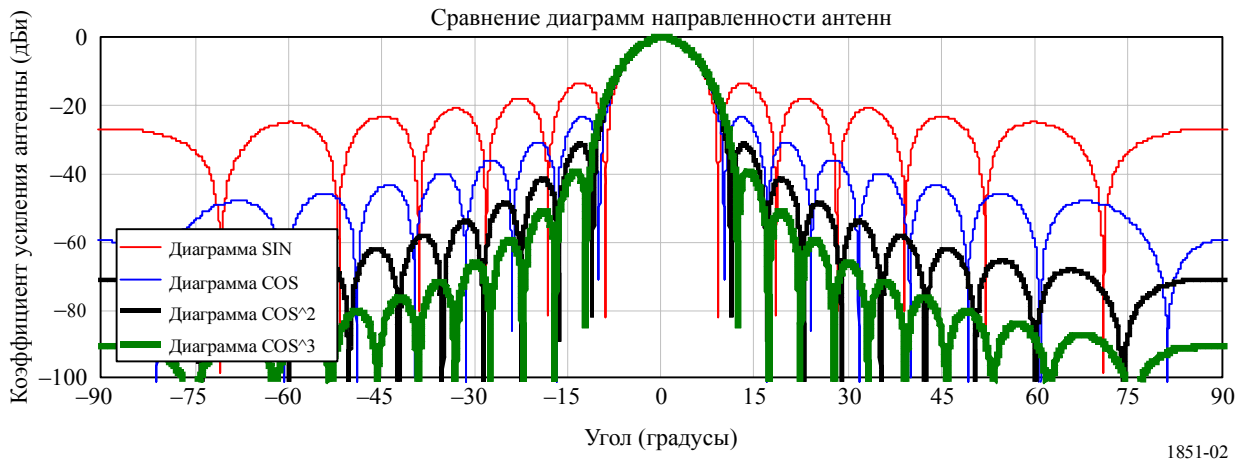
При условии, что известна ширина луча по уровню половинной мощности, θ_3 , значение μ может быть переопределено как функция ширины луча антенны по уровню половинной мощности. Это выполняется путем замены количественного значения $\left(\frac{l}{\lambda}\right)$ в выражении $\mu = \pi \left(\frac{l}{\lambda}\right) \sin(\alpha)$

постоянным значением, которое определяется относительной формой распределения поля, деленным на значение ширины луча по уровню половинной мощности, θ_3 , согласно таблице 2. Эти постоянные значения, равные 50,8; 68,8; 83,2 и 95 и показанные в таблице 2, могут быть выведены, если приравнять уравнение для $F(\mu)$ к -3 дБ и найти решение для угла θ .

На рисунке 2 показаны диаграммы направленности антенны для функций распределения типа косинус (COS), косинус-квадрат (COS²) и косинус-куб (COS³).

РИСУНОК 2

Сравнение диаграмм направленности антенн, ширина луча по уровню 3 дБ составляет 8,0°



Используя рисунок 2, 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 (1)–(4) в дБ, используя $20 \cdot \log(\text{abs}(\text{ДНА}))$;
- нормализовать коэффициенты усиления диаграмм направленности. Равномерная ДНА не требует нормализации, для косинусоидальной ДНА вычитается $-3,92$ дБ, для ДНА типа косинус-квадрат вычитается $-6,02$ дБ, для ДНА типа косинус-куб вычитается $-7,44$ 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 прерывания 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 прерывания 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;
- 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 примерно 4 дБ. Следует отметить, что точки прерывания пиковой диаграммы отличаются от точек прерывания усредненной диаграммы.

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

ТАБЛИЦА 3

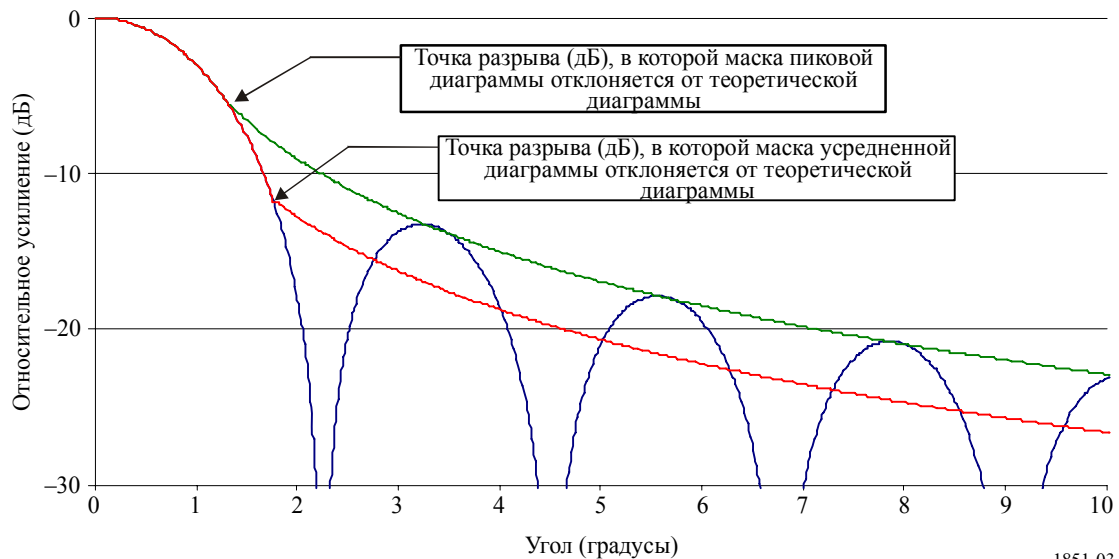
Уравнения для диаграммы пиковой и усредненной маски

Тип диаграммы	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)	Номер уравнения
SIN	$-8,584 \cdot \ln \left(2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	(5)
COS	$-17,51 \cdot \ln \left(2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	(6)
COS ²	$-26,882 \cdot \ln \left(1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	(7)
COS ³	$-35,84 \cdot \ln \left(1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	(8)

Функция $\ln()$ – это функция натурального логарифма. Пример точки разрыва представлен на рисунке 3.

РИСУНОК 3

Пример точки разрыва



1851-03

Диаграмма типа косеканс-квадрат является частным случаем и описывается следующим уравнением:

$$G(\theta) = G(\theta_1) \cdot \left(\frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2, \quad (9)$$

где:

- $G(\theta)$: диаграмма типа косеканс-квадрат между углами θ_1 и θ_{Max} ;
- $G(\theta_1)$: коэффициент усиления диаграммы в θ_1 ;
- θ_1 : ширина луча антенны по уровню половинной мощности в точке начала диаграммы типа косеканс-квадрат = θ_3 ;
- θ_{Max} : максимальный угол, при котором заканчивается диаграмма типа косеканс-квадрат;
- θ : угол места;
- θ_3 : ширина луча антенны по уровню половинной мощности.

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 следующим образом:

ТАБЛИЦА 4

Уравнения диаграммы направленности типа косеканс-квадрат

Уравнение диаграммы типа косеканс-квадрат	Условие	Номер уравнения
$\frac{\sin(\mu)}{\mu}; \mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$\frac{-\theta_3}{0,88} \leq \theta \leq +\theta_3$	(10)
$G(\theta_1) \cdot \left(\frac{CSC(\theta)}{CSC(\theta_1)} \right)^2$	$+\theta_3 \leq \theta \leq \theta_{Max}$	(11)
Минимальный уровень косекансной диаграммы (пример = -55 дБ)	$\theta_{Max} \leq \theta \leq \theta_{90}$	(12)
$G(\theta_1) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}\right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta_1)}{\theta_3}}$	$\theta_1 = \theta_3$	(12a)

Графическое описание диаграмм направленности приведено на нижеследующих рисунках.

РИСУНОК 4

Зона действия квадратично-косекансного луча для поискового радара

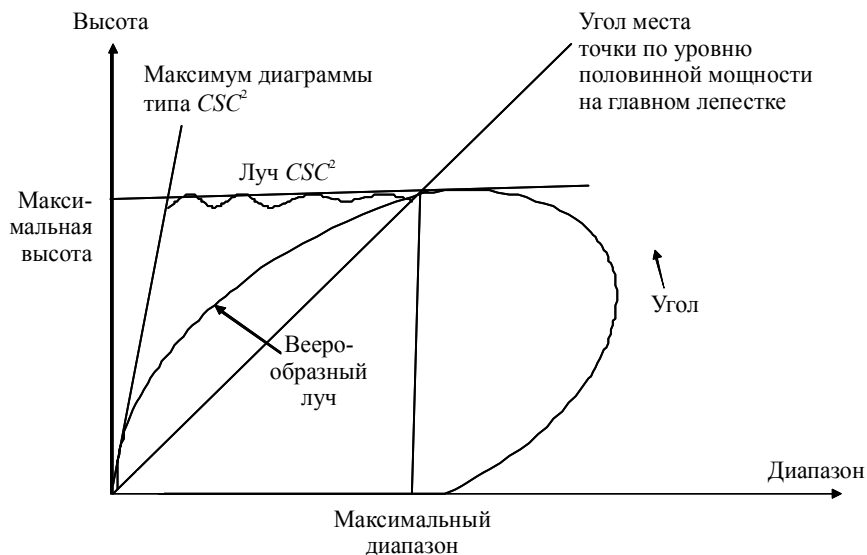
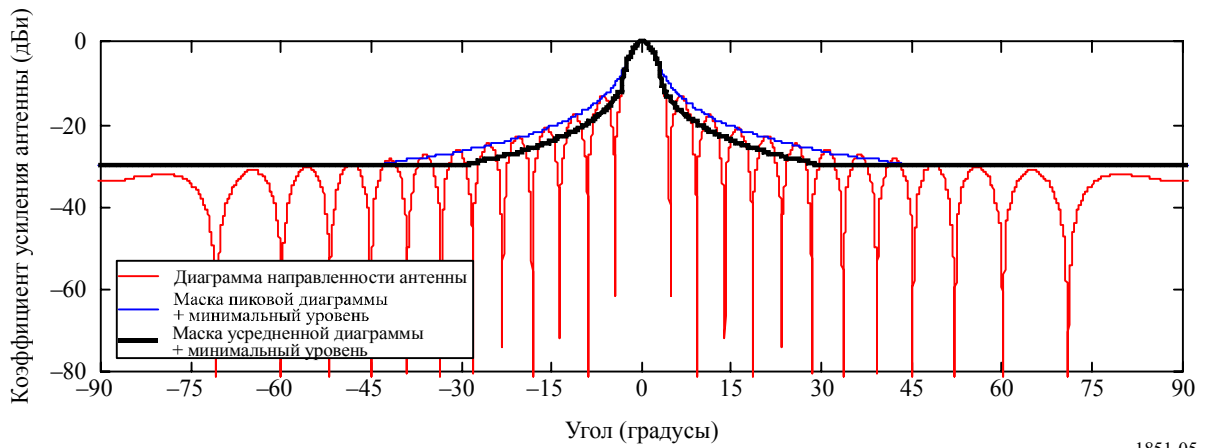


РИСУНОК 5

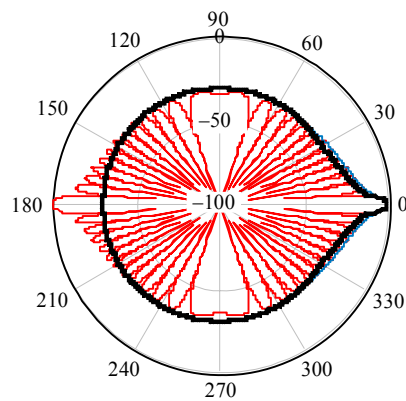
Синусоидальная диаграмма направленности антенны, пиковая и усредненная огибающая



1851-05

РИСУНОК 6

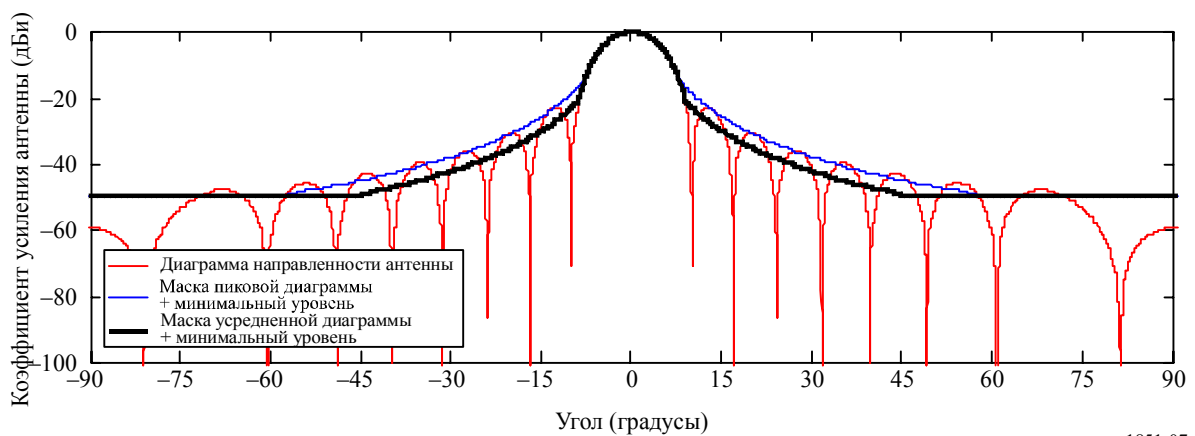
Синусоидальная полярная диаграмма направленности антенны, пиковая и усредненная огибающая



1851-06

РИСУНОК 7

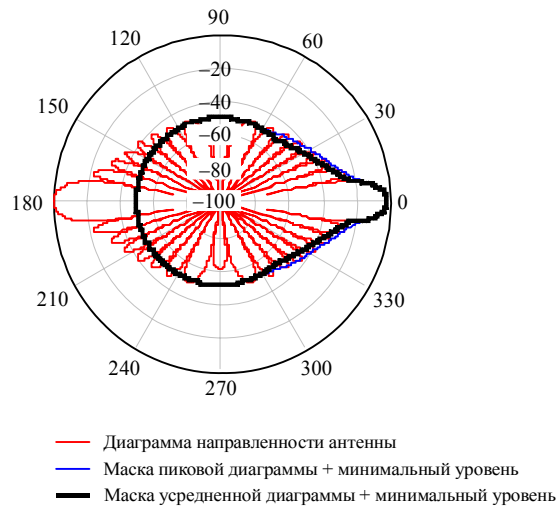
Диаграмма направленности антенны типа COS, пиковая и усредненная огибающая



1851-07

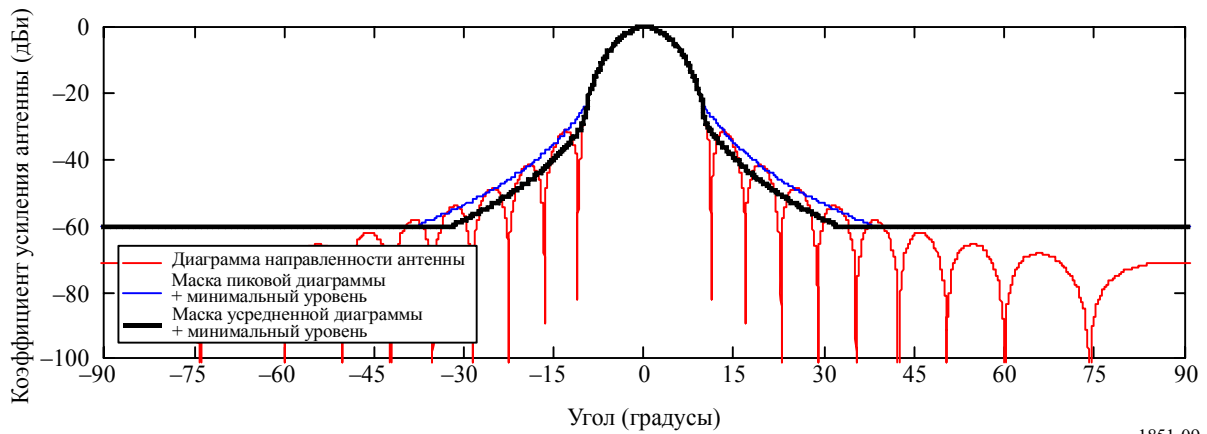
РИСУНОК 8

Полярная диаграмма направленности антенны типа COS, пиковая и усредненная огибающая



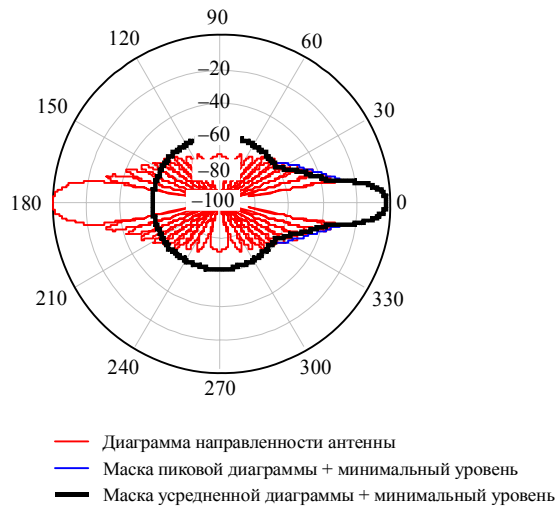
1851-08

РИСУНОК 9

Диаграмма направленности антенны типа COS^2 , пиковая и усредненная огибающая

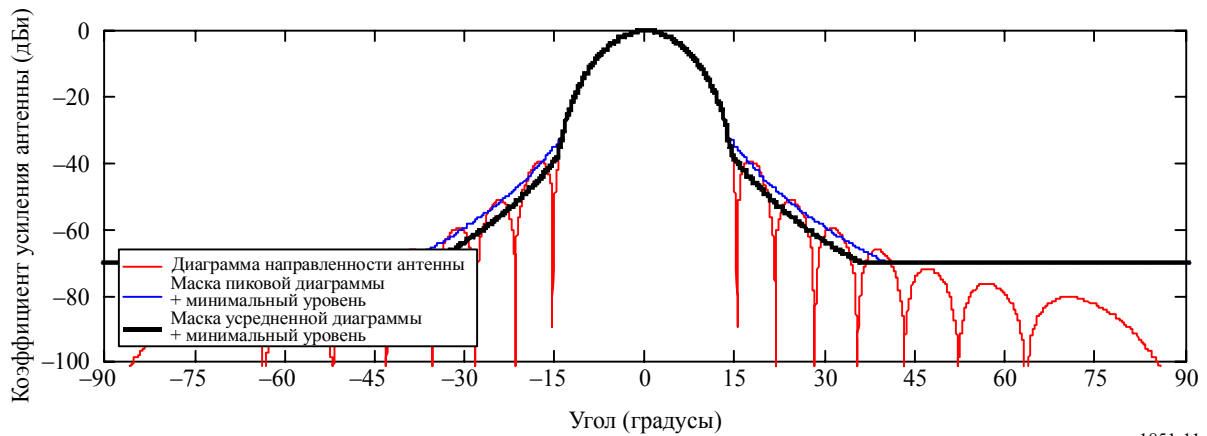
1851-09

РИСУНОК 10

Полярная диаграмма направленности антенны типа COS^2 , пиковая и усредненная огибающая

1851-10

РИСУНОК 11

Диаграмма направленности антенны типа COS^3 , пиковая и усредненная огибающая

1851-11

РИСУНОК 12

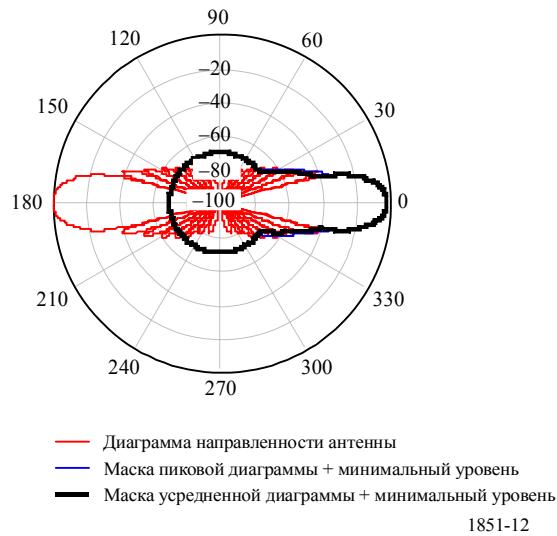
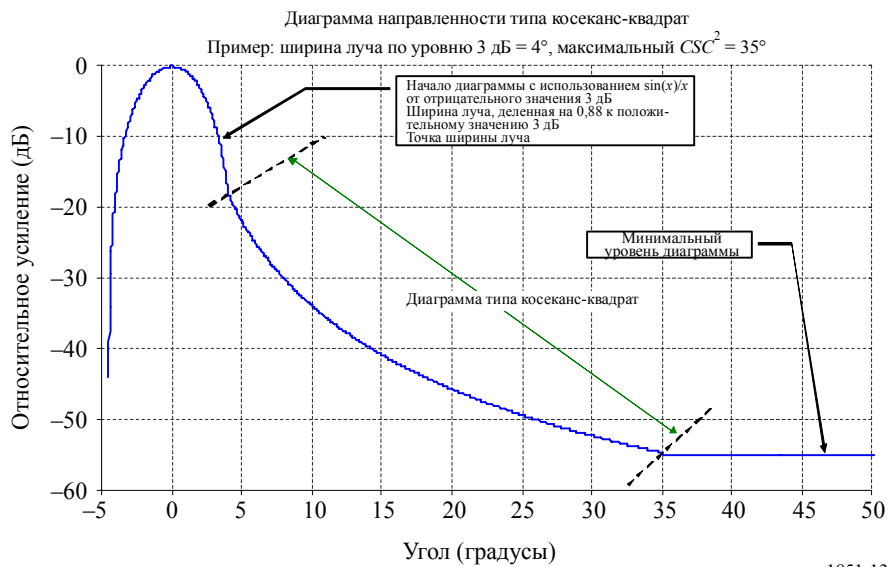
Полярная диаграмма направленности антенны типа COS^3 , пиковая и усредненная огибающая

РИСУНОК 13

Огибающая диаграммы направленности антенны типа 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.

ТАБЛИЦА 5

Таблица выбора диаграммы направленности

Диапазон уровня первого бокового лепестка ниже нормализованного пикового значения главного лепестка (дБ)	Возможный тип распределения антенны	Диаграмма направленности $F(\mu)$	Уравнение маски после точки разрыва диаграммы, в которой маска начинает отличаться от теоретической диаграммы (дБ)	Точка разрыва пиковой диаграммы, в которой маска начинает отличаться от теоретической диаграммы (дБ)	Точка разрыва усредненной диаграммы, в которой маска начинает отличаться от теоретической диаграммы (дБ)	Постоянное значение, добавляемое к пиковой диаграмме для преобразования ее в усредненную маску (дБ)	Предлагаемый минимальный уровень маски (дБ)	Номер уравнения
От -13,2 до -20 дБ	Равномерное	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}; \mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-8,584 \cdot \ln \left(2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	-30	(13)
От -20 до -30 дБ	COS	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 68,8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-17,51 \cdot \ln \left(2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	-50	(14)
От -30 до -39 дБ	COS ²	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[\frac{\sin(\mu)}{\left(\pi^2 - \mu^2\right)} \right]; \mu = (\pi \cdot 83,2 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-26,882 \cdot \ln \left(1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	-60	(15)
От -39 дБ и выше	COS ³	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 95 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-35,84 \cdot \ln \left(1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	-70	(16)

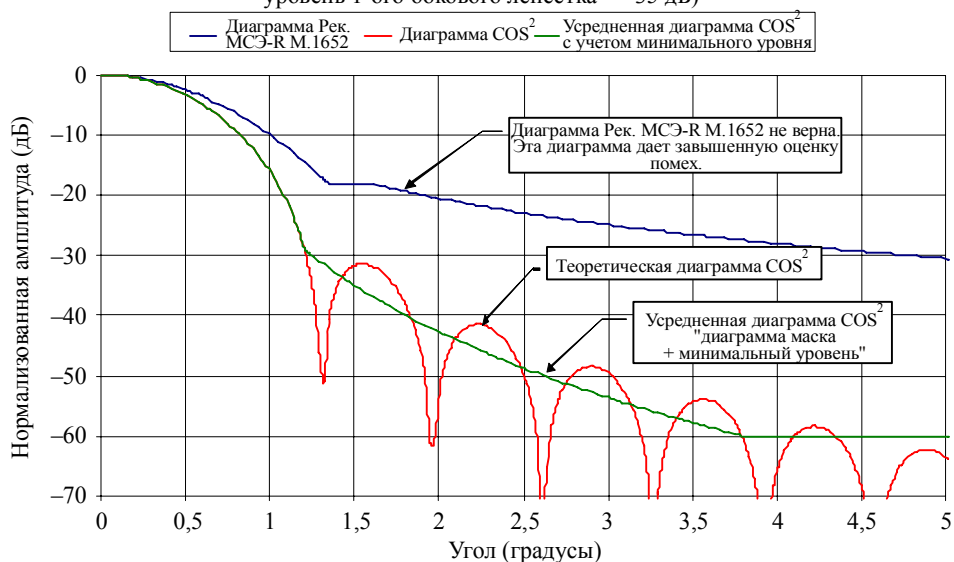
4 Сравнение диаграмм направленности антенны

Одна из представленных в Рекомендации МСЭ-R М.1652 математических моделей для диаграмм направленности антенны радиолокационной системы радиоопределения, которые использовались при анализе помех, 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, показывает, что диаграмма Рекомендации МСЭ-R М.1652 не является оптимальной. Как показано на рисунке 14, диаграмма направленности Рекомендации МСЭ-R М.1652 дает значительно завышенные оценки коэффициента усиления за пределами линии прицеливания антенны (0°).

РИСУНОК 14

Сравнение диаграмм направленности антенны

Сравнение диаграмм направленности – Рек. МСЭ-R М.1652 и COS^2
 (Пример радара С: коэффициент усиления = 44 дБи, E_1 = ширина луча по азимуту = $0,95^\circ$,
 уровень 1-ого бокового лепестка = -35 дБ)



5 Аппроксимирование трехмерных (3-D) диаграмм направленности

В качестве инструментов анализа методом моделирования могут использоваться контурные графики. Трехмерная (3-D) 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 горизонтальной 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 рисунке 17 представлен пример трехмерной диаграммы направленности антенны.

РИСУНОК 15

Контурная диаграмма антенны при $BW_H = 1,2^\circ$ и $BW_V = 6^\circ$

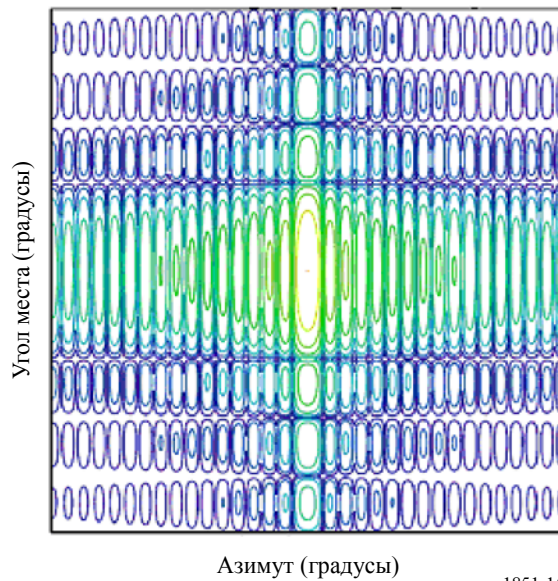
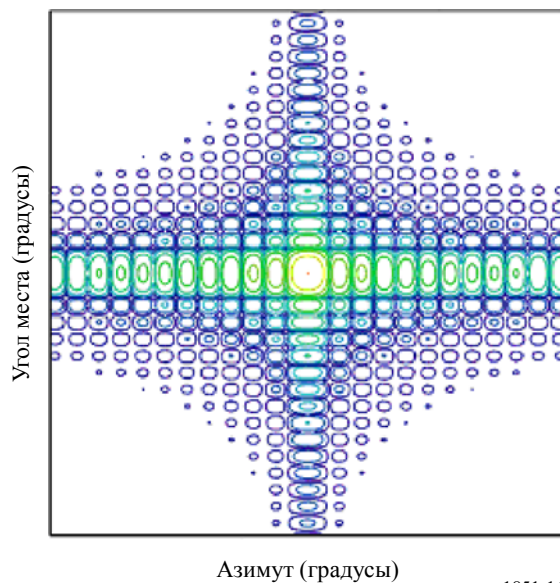


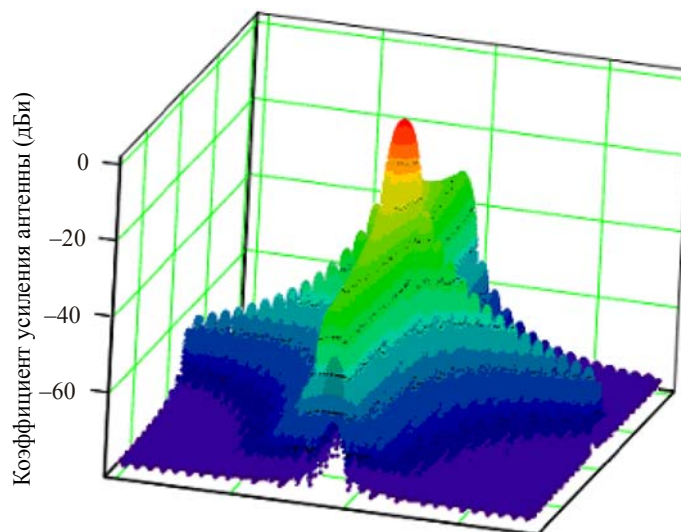
РИСУНОК 16

Контурная диаграмма антенны при $BW_H = BW_V = 1,7^\circ$ 

1851-16

РИСУНОК 17

Пример трехмерного графика диаграммы антенны



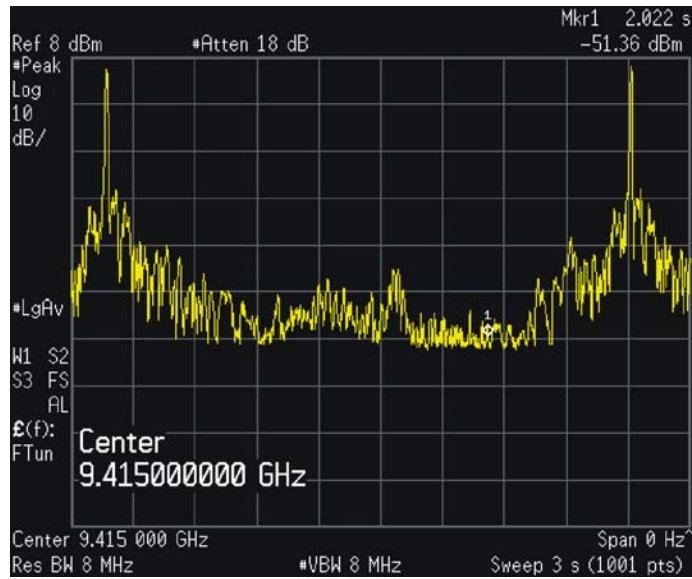
1851-17

6 Пример измеренной диаграммы направленности

Ниже приведены примеры измеренных данных диаграммы направленности антенны радара в полосе частот 9 ГГц, которые показывают аппроксимированный пиковый уровень боковых лепестков и минимальный уровень диаграммы.

РИСУНОК 18

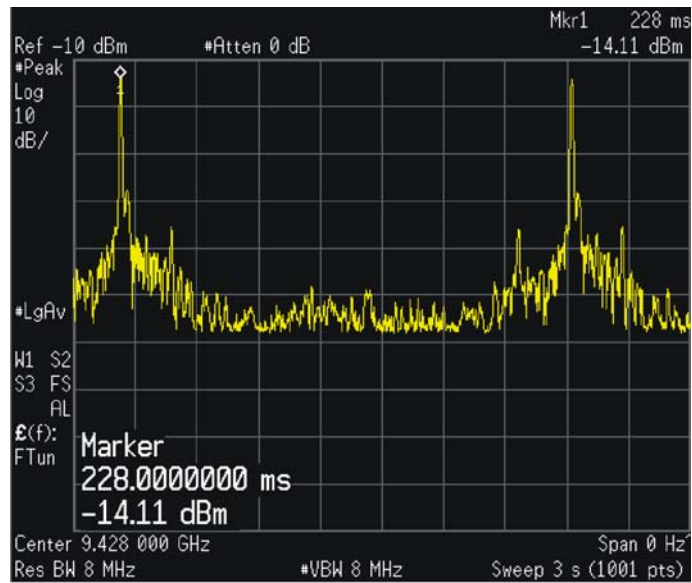
Пример графика по измеренным параметрам антенны



1851-18

РИСУНОК 19

Пример графика по измеренным параметрам антенны



1851-19