

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R BS.1195-1
(01/2013)

Характеристики передающих антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ

Серия BS
Радиовещательная служба
(звуковая)



Международный
союз
электросвязи

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
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая 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, 2013 г.

© ITU 2013

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.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R BS.1195-1

Характеристики передающих антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ

(Вопрос МСЭ-R 30/6)

(1995-2013)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что в соответствии с Резолюцией 76-1 бывшего МККР решено, что результаты исследований, проведенных 10-й Исследовательской комиссией радиосвязи, и соответствующие диаграммы направленности антенн, должны содержаться в отдельно публикуемых Рекомендациях МСЭ-R;
- b) что для частотного планирования необходима исчерпывающая информация о характеристиках систем передающих и приемных антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ;
- c) что для получения, в стандартном виде, коэффициента усиления и диаграмм направленности систем передающих и приемных антенн требуются процедуры, основанные на использовании компьютера;
- d) что необходимо проверить при помощи измерений как диаграмму направленности отдельных элементов антенной системы, так и общую диаграмму направленности антенной системы;
- e) что для проверки диаграмм направленности, упомянутых в п. d) раздела *учитывая*, требуются стандартизованные методы измерений;
- f) что ожидаются некоторые различия между теоретическими и измеренными характеристиками из-за практических аспектов использования антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ,

рекомендует,

1 чтобы для оценки характеристик антенных систем в диапазонах ОВЧ и УВЧ для целей планирования использовались формулы, содержащиеся в части 1 Приложения 1 и соответствующие компьютерные программы, описанные в части 3 Приложения 1;

2 чтобы для проверки реальных характеристик элементов антенной системы и антенной системы в целом использовались методы измерений, содержащиеся в части 2 Приложения 1.

Приложение 1

Часть 1

Расчет диаграмм направленности передающих антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ

Содержание

	<i>Стр.</i>
1 Введение.....	4
1.1 Системы отсчета.....	4
2 Геометрическое представление диаграмм направленности антенн.....	5
3 Расчет диаграмм направленности и коэффициента усиления.....	6
4 Излучающие элементы.....	7
4.1 Точечные источники.....	7
4.2 Антенные решетки из точечных источников.....	9
4.2.1 Умножение диаграмм направленности.....	9
4.2.2 Векторное сложение диаграмм направленности.....	9
4.3 Элементарные излучатели в диапазонах ОВЧ и УВЧ.....	10
5 Поляризация.....	11
5.1 Эллиптическая поляризация.....	11
5.2 Горизонтальная и вертикальная поляризация.....	12
5.3 Наклонная линейная поляризация.....	12
5.4 Круговая поляризация.....	12
6 Антенные решетки.....	13
6.1 Антенные решетки поперечного излучения.....	13
6.1.1 Линейные антенные решетки с пассивными элементами.....	16
6.2 Амплитудные и фазовые диаграммы направленности.....	18
6.3 Расчет диаграммы направленности антенных решеток.....	20
6.4 Антенные решетки в диапазонах ОВЧ и УВЧ.....	21
6.4.1 Антенны панельного типа.....	21
6.4.2 Директорные антенны.....	24
6.4.3 Другие типы антенных решеток.....	24

Стр.

7	Антенные системы	24
7.1	Диаграммы направленности антенной системы.....	25
7.1.1	Заполнение нашей диаграммы направленности.....	25
7.1.2	Наклон волнового фронта луча.....	28
7.2	Диаграммы направленности антенных систем.....	29
7.3	Примеры диаграмм направленности антенных систем	32
7.3.1	Антенные системы из диполей	32
7.3.2	Системы директорных антенн.....	33
7.3.3	Системы панельных антенн.....	34

Часть 1

Приложения 1

Расчет диаграмм направленности передающих антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ

1 Введение

В данной части Приложения кратко изложены основные теоретические принципы работы антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ и общие характеристики антенных систем, представленных несколькими индивидуальными излучателями.

Кроме того, приведены некоторые примеры антенных систем, с тем чтобы показать их характеристики и ориентировать пользователя в выборе конфигурации, которая лучше всего удовлетворит требованиям.

В частности, в п. 6.4 и п. 7.2 приведена аналитическая процедура для расчета общей диаграммы направленности антенной системы. Целью этого раздела является выработка рекомендованного единого подхода к оценке характеристик антенной системы в идеальных условиях.

Однако необходимо помнить, что на практике могут возникнуть отклонения от диаграмм направленности, рассчитанных в соответствии с упомянутой выше процедурой, как описано в части 2 Приложения.

1.1 Системы отсчета

В Регламенте радиосвязи горизонтальный угол "луча" антенны ("угол наклона луча") указывается в градусах относительно горизонтальной поверхности; наклон вниз соответствует отрицательному углу. Азимут луча указывается в градусах, измеренных по часовой стрелке от географического севера. Для регламентарных целей важно, чтобы использовалась общая система отсчета, например, изложенная в данных определениях, чтобы обеспечить надлежащий учет влияния луча одной антенны применительно к зоне обслуживания другой антенны. Вместе с тем настоящая Рекомендация касается свойств самой антенны, и математические формулы получаются более простыми и менее громоздкими, если:

- используется система отсчета, связанная с самой антенной; и
- все углы заданы в радианах, а не в градусах.

По всему тексту Рекомендации, в зависимости от случая, используются как полярные, так и прямоугольные координаты. В полярных координатах используются:

r – расстояние от источника, θ – угол места; и ϕ – угол азимута.

В прямоугольных координатах используются:

x – произвольно выбранная горизонтальная ось, y – произвольно выбранная горизонтальная ось (ортогональная к x), и z – вертикальная ось.

Осью "x" часто является ось главного луча антенны. При наложении этих систем координат за общее начало отсчета ($r, \theta = 0, \phi = 0$) берется ось x .

Важно отметить, что при рассмотрении зоны обслуживания антенны и потенциального воздействия на зону обслуживания других антенн, направление луча должно отсчитываться от географического севера.

2 Геометрическое представление диаграмм направленности антенн

Антенна может представлять собой одиночный элемент или решетку излучающих элементов. Пространственное распределение излучения, или диаграмма направленности антенны, может быть представлено в виде трехмерного геометрического места точек, где каждая точка имеет волноводящую силу (в.д.с.)^{*}, основанную на сфере, центром которой является электрический центр антенны и которая имеет большой радиус по сравнению с физическими и электрическими размерами антенны.

Значение в.д.с. на точке сферы указывается в дБ ниже максимального значения в.д.с., которое приравнено к 0 дБ.

Трехмерная диаграмма направленности основана на эталонной системе координат, приведенной на рисунке 1.

Определены следующие параметры:

- θ : угол места относительно горизонта ($-\pi/2 < \theta < \pi/2$), отрицательные углы соответствуют наклону луча вниз;
- φ : угол азимута относительно оси x ($0 < \varphi < 2\pi$);
- r : расстояние между точкой начала координат и точкой наблюдения;
- Q : точка наблюдения.

Оси x , y и z – это совокупность ортогональных прямоугольных координат, поверх которых иногда накладываются полярные координаты в целях облегчения математического представления определенных свойств антенны. Ось "z" всегда вертикальная, а оси "x" и "y" выбираются так, чтобы обеспечить наилучшее представление антенны и ее характеристик.

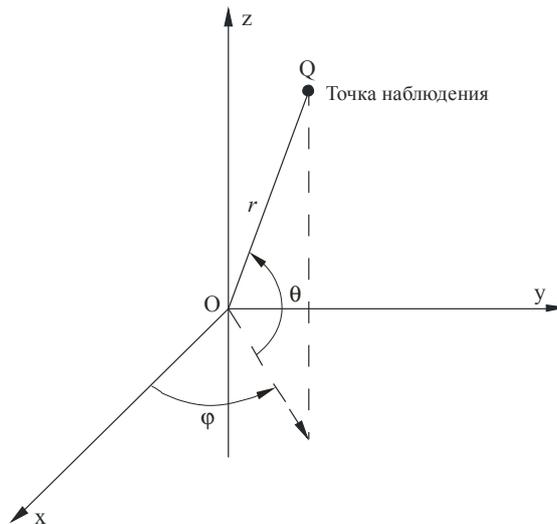
* Определение волноводящей силы и удельной волноводящей силы (см. Рекомендацию МСЭ-R BS.561).

Волноводящая сила в данной точке пространства есть произведение напряженности электрического поля, создаваемого антенной в данной точке, и расстояния между этой точкой и антенной. Это расстояние должно быть достаточно велико, чтобы можно было пренебречь реактивными составляющими поля.

Численно в.д.с. (В) равна напряженности электрического поля (мВ/м) на расстоянии 1 км.

Удельная волноводящая сила в какой-либо точке пространства равна в.д.с. в этой точке при излучаемой мощности антенны, равной 1 кВт.

РИСУНОК 1
Эталонная система координат



BS.1195-01

3 Расчет диаграмм направленности и коэффициента усиления

В эталонной системе координат, представленной на рисунке 1, величина электрического поля, создаваемого антенной, задается следующим выражением:

$$|E(\theta, \varphi)| = k |f(\theta, \varphi)|, \quad (1)$$

где:

$|E(\theta, \varphi)|$: величина электрического поля;

$|f(\theta, \varphi)|$: функция диаграммы направленности;

k : нормирующий коэффициент для установки $|E(\theta, \varphi)|_{max} = 1$, т. е. 0 дБ.

Выражая общее электрическое поле в виде его составляющих в сферической системе координат, получаем:

$$|E(\theta, \varphi)| = \left[|E_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Направленность, D , излучающего источника определяется как отношение его максимальной интенсивности излучения (или плотности потока мощности) к интенсивности излучения изотропного источника, излучающего такую же полную мощность. Она может быть выражена как:

$$D = \frac{4\pi |E(\theta, \varphi)|_{max}^2}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |E(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (3)$$

При применении уравнения (1) D может быть выражена в виде нормированной функции диаграммы направленности $|f(\theta, \varphi)|$:

$$D = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|_{max}^2}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |f(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (4)$$

Представленное выше определение направленности является функцией только формы диаграммы направленности источника.

Для учета КПД антенны необходимо определить ее коэффициент усиления, G , выраженный в виде отношения ее максимальной интенсивности излучения к максимальной интенсивности излучения эталонной антенны с одинаковой мощностью на входе.

Если в качестве рекомендуемой эталонной антенны выступает изотропная антенна без потерь, то коэффициент усиления антенны, G_i , определяется следующим выражением:

$$G_i = 10 \log_{10} D \quad \text{дБ.} \quad (5)$$

Другим выражением, используемым на практике, является коэффициент усиления относительно полуволнового диполя, G_d , который представляет собой:

$$G_d = G_i - 2,15 \quad \text{дБ.} \quad (6)$$

4 Излучающие элементы

4.1 Точечные источники

Если антенна излучает в условиях дальнего поля (зона Фраунгофера), т. е. если расстояние от антенны таково, что ее электромагнитные поля могут рассматриваться как ортогональные к направлению распространения волн, антенна может рассматриваться как точечный источник.

В диапазонах ОВЧ и УВЧ это расстояние обычно настолько мало, что любой излучающий элемент, особенно в зоне обслуживания, может рассматриваться как точечный источник, независимо от его размера и сложности.

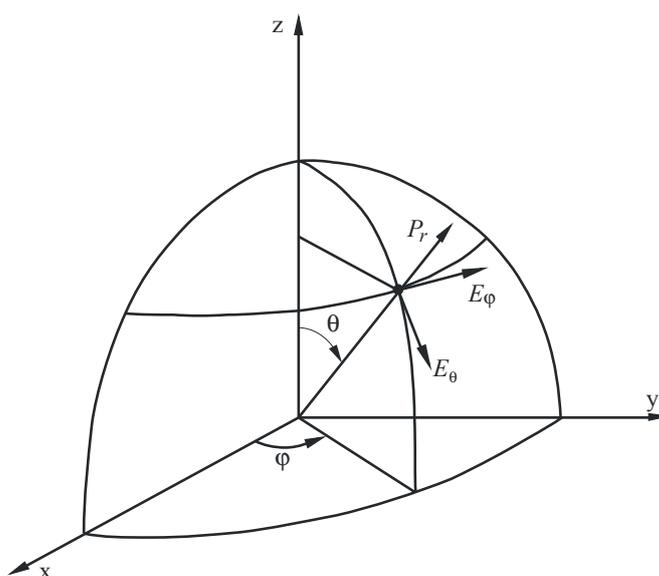
Кроме того, диаграмма излучения таких точечных источников, используемых в качестве аппроксимации типичных излучающих элементов в диапазонах ОВЧ и УВЧ, обычно является направленной.

В условиях дальнего поля поток мощности от точечного источника всегда является радиальным.

Следовательно, на вектор Пойнтинга влияют только две поперечные составляющие электрического поля, E_θ и E_ϕ , как показано на рисунке 2.

РИСУНОК 2

Соотношение вектора Пойнтинга и электрических составляющих дальнего поля



Если фронт сферической волны находится на достаточно большом расстоянии, так что он может рассматриваться как плоскость, средний вектор Пойнтинга (только радиальная составляющая) P_r задается выражением:

$$P_r = \frac{E_2}{2Z_0}, \quad (7)$$

где:

$$E^2 = E_\theta^2 + E_\phi^2 \quad (8)$$

и

Z_0 : волновое сопротивление свободного пространства;

E : напряженность полного электрического поля.

Учитывая изменение напряженности полного электрического поля при постоянном радиусе, результирующая диаграмма направленности будет функцией θ и ϕ . Диаграмма, полученная в результате нормирования уровней диаграммы направленности относительно ее максимального уровня (в направлении максимального излучения), называется относительной амплитудной диаграммой направленности.

Напряженность электрического поля E , создаваемая на расстоянии r изотропным источником, излучающим мощность P_{is} , задается следующим выражением (см. также Рекомендацию МСЭ-R P.525):

$$E = \left[30 P_{is} / r^2 \right]^{1/2} \quad \text{В/м.} \quad (9)$$

где:

P_{is} : изотропная мощность (Вт);

r : расстояние (м).

Вышеуказанное соотношение известно также как условие распространения в свободном пространстве.

Если отнести изотропно излучаемую мощность P_{is} к мощности, излучаемой полуволновым диполем, P , т. е. $P_{is} = 1,64 P$, выражение напряженности электрического поля принимает вид:

$$E = 7,014 \sqrt{P} / r \quad \text{В/м.} \quad (10)$$

Выражая E в В/м, а r в м, получим:

$$E = 7,014 \times 10^3 \sqrt{P} / r \quad \text{В/м.} \quad (11)$$

или, выражая E в дБ(мкВ/м), получим:

$$E = 20 \log_{10} \left(\sqrt{P} / r \right) + 136,9 \quad \text{дБ(мкВ/м).} \quad (12)$$

В отношении неизотропного точечного источника на напряженность электрического поля E_{ni} , излучаемую таким источником в различных направлениях, будет влиять диаграмма направленности, так что:

$$E_{ni} = f(\theta, \phi) \cdot E_{is}, \quad (13)$$

где:

E_{ni} : напряженность электрического поля, создаваемого в точке наблюдения $Q(r, \theta, \phi)$ неизотропным точечным источником, излучающим мощность P ;

$f(\theta, \phi)$: функция относительной амплитудной диаграммы направленности неизотропного точечного источника;

E_{is} : напряженность электрического поля, создаваемого в точке наблюдения Q изотропным точечным источником, излучающим такую же мощность P .

4.2 Антенные решетки из точечных источников

При рассмотрении антенных решеток из точечных источников, как, например, те, что обычно встречаются в диапазоне ОВЧ и УВЧ, где часто требуются сложные антенные системы, непосредственный интерес представляют два следующих случая:

- a) решетки из неизотропных, одинаковых точечных источников;
- b) решетки из неизотропных и неодинаковых точечных источников излучения.

Случай a) относится к антенным решеткам, элементы которых имеют равные относительные амплитудные диаграммы направленности (одинаковой формы), ориентированные в одном направлении. Обычно это – решетка вертикальных многоярусных панельных антенн (см. п. 6.4.1), излучающих в одном направлении.

Случай b) относится к наиболее общему случаю, когда отсутствует корреляция между амплитудными диаграммами направленности источников антенной решетки, которые могут быть произвольно ориентированы.

4.2.1 Умножение диаграмм направленности

Для решеток из неизотропных, но одинаковых точечных источников (случай a) п. 4.2), применяется принцип умножения диаграмм. В соответствии с этим принципом относительные амплитуды диаграммы направленности решетки из неизотропных, но одинаковых точечных источников есть произведение амплитудных диаграмм направленности индивидуального источника и решетки из изотропных точечных источников, в то время как полная фазовая диаграмма является результатом сложения фазовых диаграмм индивидуального источника и решетки из изотропных точечных источников.

Это можно выразить следующим образом:

$$E(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \cdot F(\theta, \varphi) \quad \angle \left(f_p(\theta, \varphi) + F_p(\theta, \varphi) \right), \quad (14)$$

где, в соответствии с системой координат, приведенной на рисунке 1:

- E : вектор напряженности электрического поля;
- $f(\theta, \varphi)$: функция относительной амплитудной диаграммы направленности индивидуального источника;
- $f_p(\theta, \varphi)$: функция фазовой диаграммы направленности индивидуального источника;
- $F(\theta, \varphi)$: функция относительной амплитудной диаграммы направленности решетки из изотропных источников (также называется множителем решетки);
- $F_p(\theta, \varphi)$: функция фазовой диаграммы направленности решетки из изотропных источников.

4.2.2 Векторное сложение диаграмм направленности

При рассмотрении более общего случая антенной решетки из неодинаковых неизотропных точечных источников (т. е. для неизотропных источников, имеющих разные диаграммы направленности и/или разную ориентацию направлений максимального излучения, случай b) п. 4.2), принцип умножения диаграмм направленности уже не может применяться.

Это – типичная ситуация для антенных систем в диапазонах ОВЧ и УВЧ, где излучающие элементы (панели, директорные антенны и т. д.) рассматриваются как точечные источники с одинаковыми или разными диаграммами излучения, ориентированными в различных направлениях.

В этом случае результирующая диаграмма направленности $E(\theta, \varphi)$ рассчитывается при помощи векторного сложения диаграмм излучения (амплитуда и фаза) каждого индивидуального точечного источника при любом заданном угле по следующей формуле:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n E_i(\theta, \varphi), \quad (15)$$

где:

$E_i(\theta, \varphi)$: излучаемое электрическое поле i -го источника;

$E(\theta, \varphi)$: результирующая напряженность поля.

4.3 Элементарные излучатели в диапазонах ОВЧ и УВЧ

Хотя в ОВЧ и УВЧ радиовещании элементарные излучатели редко применяются отдельно, ниже дан краткий обзор наиболее распространенных элементарных излучателей, которые используются для формирования большинства антенных систем в диапазонах ОВЧ и УВЧ.

К числу основных излучателей относятся: диполь, контур, щелевая антенна и спиральная антенна.

Диполь наиболее широко используется в качестве элементарного излучателя в диапазонах ОВЧ и УВЧ.

В системе координат, показанной на рисунке 3, составляющими поля E_θ и E_φ , создаваемыми диполем длиной l с синусоидальным распределением тока являются:

$$E_\theta = -60 j I_0 \frac{e^{-j r \beta}}{r} \cdot \frac{\cos(\beta l \sin \varphi \cos \theta) / 2 - \cos \beta l / 2}{1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \theta} \cdot \sin \varphi \sin \theta$$

$$E_\varphi = 60 j I_0 \frac{e^{-j r \beta}}{r} \cdot \frac{\cos(\beta l \sin \varphi \cos \theta) / 2 - \cos \beta l / 2}{1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \theta} \cdot \cos \varphi, \quad (16)$$

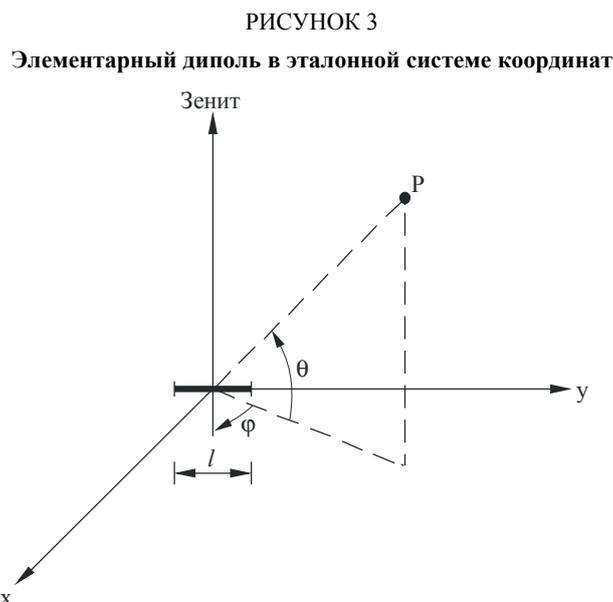
где:

I_0 : ток питания;

$\beta = 2 \pi / \lambda$;

r : расстояние до расчетной точки Q.

Представленное выше выражение упрощается для $l = 0,5 \lambda$ (см. также "Диаграммы антенн МККР", издание 1984 г.).



BS.1195-03

В этом случае диполь обладает активным сопротивлением 72 Ом на резонансной частоте и может считаться эквивалентным последовательному резонансному контуру.

Увеличение диаметра проводника, образующего плечи диполя, приводит к увеличению емкости и уменьшению индуктивности в эквивалентном последовательном резонансном контуре. Поскольку в результате Q контура уменьшается, диполь может работать в широком диапазоне частот.

5 Поляризация

Обычно горизонтальная поляризация используется для ЧМ радиовещания, а горизонтальная или вертикальная поляризация – для телевизионного вещания.

В последние годы широкое распространение ЧМ приемников с встроенными антеннами и автомобильных ЧМ приемников привело к использованию других форм поляризации, например круговой и наклонной.

Этот метод сейчас также вводится для телевизионной передачи, особенно в диапазоне УВЧ, где, как представляется, в результате использования круговой поляризации улучшаются характеристики за счет снижения вероятности повторных изображений в городских зонах.

В Отчете МСЭ-R BS.464 даны необходимые сведения для выбора наиболее подходящей поляризации для использования в любой новой службе ЧМ в соответствии с конкретными условиями.

Для того чтобы можно было лучше оценить различия разных форм поляризации, ниже приводится их краткое описание.

5.1 Эллиптическая поляризация

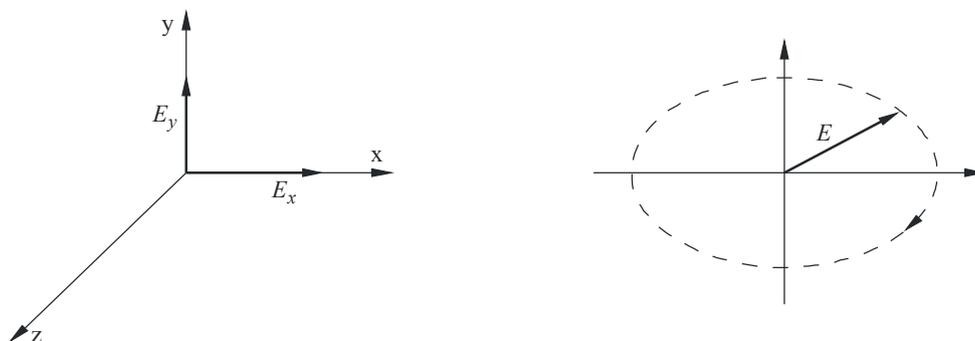
Различные формы поляризации волн могут рассматриваться как частные случаи более общего случая эллиптической поляризации.

В соответствии с рисунком 4 эллиптически поляризованная волна может быть представлена двумя взаимно перпендикулярными линейными волнами, распространяющимися по оси z и имеющими относительные электрические поля, определяемые следующими выражениями:

$$\begin{aligned} E_x &= E_1 \sin \omega t \\ E_y &= E_2 \sin (\omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (17)$$

где φ – разность фаз между двумя волнами. Поскольку эллиптически поляризованная волна распространяется вдоль оси z , результирующий вектор E описывает эллипс, полуосями которого являются E_1 и E_2 .

РИСУНОК 4
Эллиптическая поляризация



5.2 Горизонтальная и вертикальная поляризация

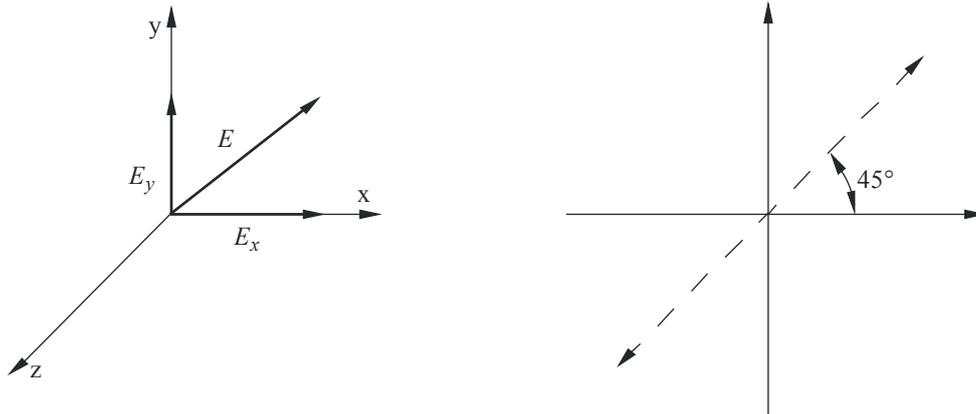
Эти два случая имеют место, если в уравнении (17) либо $E_y = 0$ (горизонтальная поляризация), либо $E_x = 0$ (вертикальная поляризация).

5.3 Наклонная линейная поляризация

Если в уравнении (17) $E_1 = E_2$ и $\varphi = 0$, то возникает поляризация с наклоном 45° .

РИСУНОК 5

Наклонная поляризация



BS.1195-05

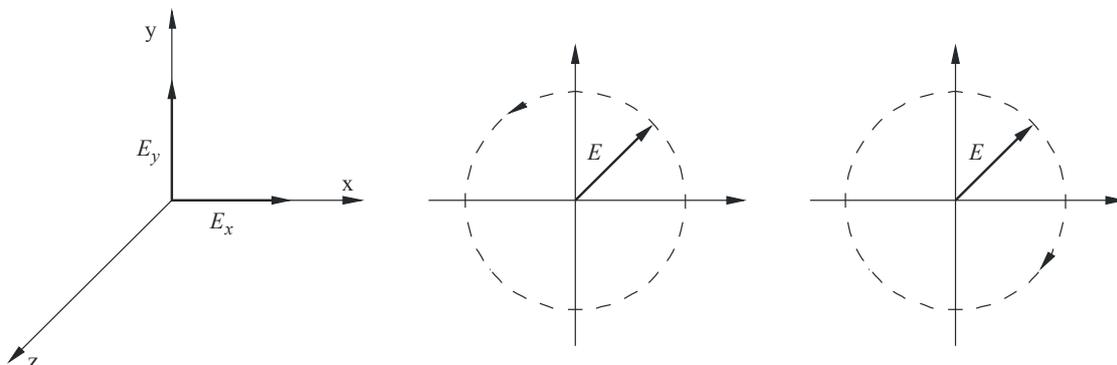
5.4 Круговая поляризация

Круговая поляризация возникает, когда в уравнении (17) $E_y = E \sin \omega t$ и $E_x = \pm E \cos \omega t$. При положительном знаке волна вращается по часовой стрелке в положительном направлении оси z (правосторонняя круговая поляризация).

При отрицательном знаке возникает левосторонняя круговая поляризация.

РИСУНОК 6

Круговая поляризация



BS.1195-06

Круговая или наклонная поляризация может быть получена путем использования двух линейно-поляризованных антенн, излучающих соответственно вертикальную и горизонтальную поляризацию в соответствующем фазовом соотношении, как приведено выше.

6 Антенные решетки

Как отмечено в п. 4.3, элементарные излучатели в диапазонах УВЧ и ОВЧ очень редко применяются отдельно и обычно объединяются в решетки для достижения:

- более высокого коэффициента усиления;
- односторонней диаграммы направленности.

Наиболее часто используются линейные антенные решетки из элементарных излучателей. Эти решетки, собранные производителем, поступают к инженерам-разработчикам в различных формах, например в виде диполей, директорных антенн, панельных антенн и т. д. Затем они используются для формирования более сложных антенных систем (т. е. решеток из решеток).

В большинстве случаев эти антенные решетки имеют односторонние диаграммы направленности, полученные при использовании рефлектора, который в зависимости от конкретного случая может быть отражающей металлической поверхностью или соответствующим пассивным или активным элементом.

В следующих разделах приведены некоторые основные особенности конкретных линейных антенных решеток, которые непосредственно используются разработчиками антенных систем, например антенные решетки поперечного излучения и коллинеарные антенные решетки, а также линейные решетки с пассивными элементами.

6.1 Антенные решетки поперечного излучения

Антенные решетки поперечного излучения легко выполняются путем питания элементов линейных решеток токами, имеющими одинаковую амплитуду и фазу. Результирующая диаграмма направленности имеет максимум (или максимумы, при отсутствии рефлектора), ориентированный перпендикулярно к линии решетки (или к плоскости, содержащей источники излучения).

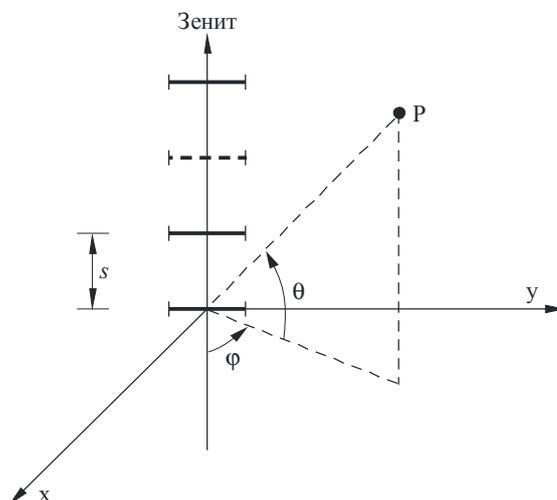
В диапазонах ОВЧ и УВЧ существует два типа антенных решеток поперечного излучения, которые представляют непосредственный интерес для разработчика: вертикальная антенная решетка из горизонтальных диполей и ненаправленная коллинеарная решетка из вертикальных диполей.

Вертикальные антенные решетки из горизонтальных диполей

Вертикальные антенные решетки из горизонтальных диполей имеют повторяющуюся структуру (см. рисунок 7), состоящую из вертикальных ярусов разнесенных на одинаковое расстояние горизонтальных диполей (обычно $0,5 \lambda$), питаемых токами, имеющими одинаковую амплитуду и фазу.

РИСУНОК 7

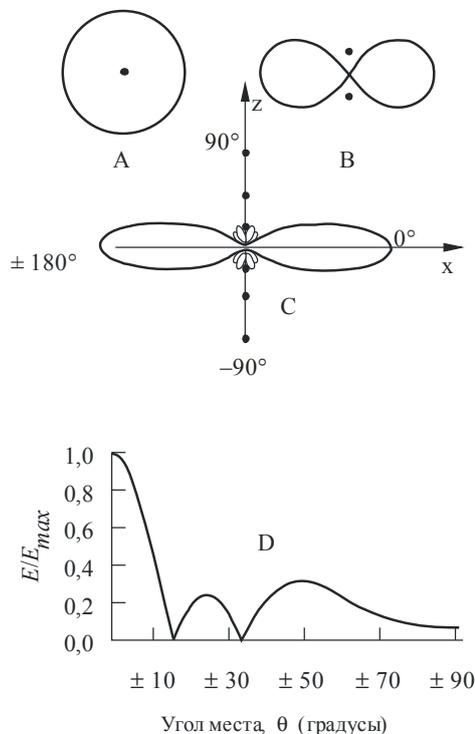
Вертикальная антенная решетка из горизонтальных диполей



Типичные диаграммы направленности решетки этого типа (в плоскости x - z) представлены на рисунке 8.

РИСУНОК 8

Влияние группирования в ярусы нескольких точечных источников, имеющих равные токи и фазы



- A: вертикальная диаграмма направленности единичного источника
 B: диаграмма направленности двух источников
 C: диаграмма направленности шести источников
 D: вертикальная диаграмма излучения C в прямоугольных координатах

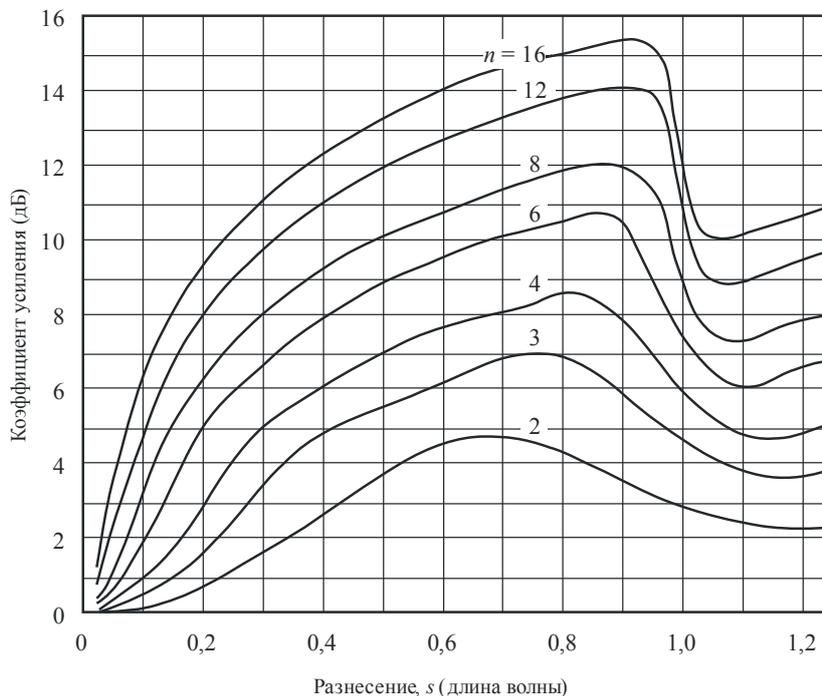
BS.1195-08

Важно отметить, что коэффициент усиления антенной решетки зависит от числа элементов и их разнесения (и, следовательно, от длины решетки).

Эти соотношения представлены на рисунке 9, и из этого рисунка видно, что в зависимости от значения n оптимальное разнесение находится в диапазоне $0,65-0,95 \lambda$. Следует подчеркнуть, что такое оптимальное разнесение зависит от частоты и что, если антенная система разработана для работы в широкой полосе (или в соседних каналах), необходимо использовать защитный запас, чтобы избежать чрезмерного снижения коэффициента усиления, которое происходит при значениях разнесения, превышающих оптимальные. Обычно значения разнесения для антенной решетки такого типа для отдельных панельных антенн с числом элементов n не менее 4 составляют примерно $0,5 \lambda$.

РИСУНОК 9

Коэффициенты усиления вертикальной антенной решетки из горизонтальных диполей (без рефлектора) в зависимости от числа элементов n и их разнесения s . Коэффициент усиления относится к единичному элементу



BS.1195-09

Однако при объединении отдельных излучателей (диполей) в антенную решетку, разработчик может выбрать значения, ближе к оптимальным.

Ненаправленные коллинеарные антенные решетки

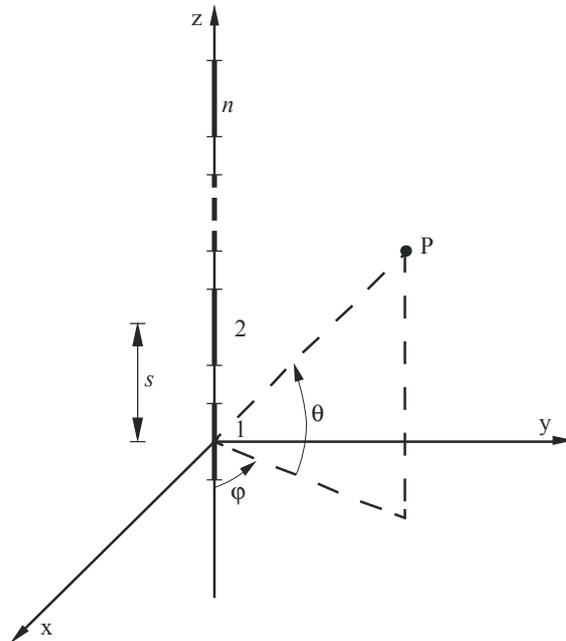
Ненаправленные коллинеарные антенные решетки состоят из вертикальных ярусов разнесенных на равное расстояние вертикальных диполей, питаемых токами, имеющими одинаковую амплитуду и фазу (см. рисунок 10).

Такая конфигурация предполагает ненаправленную азимутальную диаграмму излучения и направленную диаграмму излучения в вертикальной плоскости. Общий коэффициент усиления зависит от числа элементов n и их разнесения s , как показано на рисунке 11.

Такой тип структуры излучения широко используется в диапазоне ОВЧ, особенно для ненаправленных антенных систем в ЧМ радиовещании (см. также п. 7.3.1). Она обычно разрабатывается путем объединения отдельных источников (очень часто петлевые симметричные вибраторы), и следует осторожно выбирать оптимальное разнесение. Для случая многоканальной работы необходимо предусмотреть соответствующий запас.

РИСУНОК 10

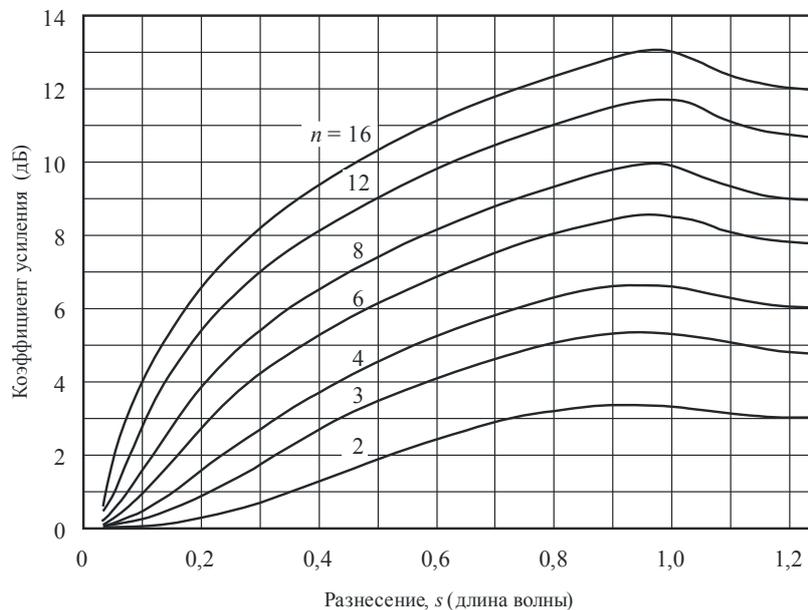
Ненаправленные коллинеарные антенные решетки



BS.1195-10

РИСУНОК 11

Коэффициент усиления вертикальной коллинеарной решетки в зависимости от числа элементов n и их разнесения s . Коэффициент усиления относится к единичному элементу



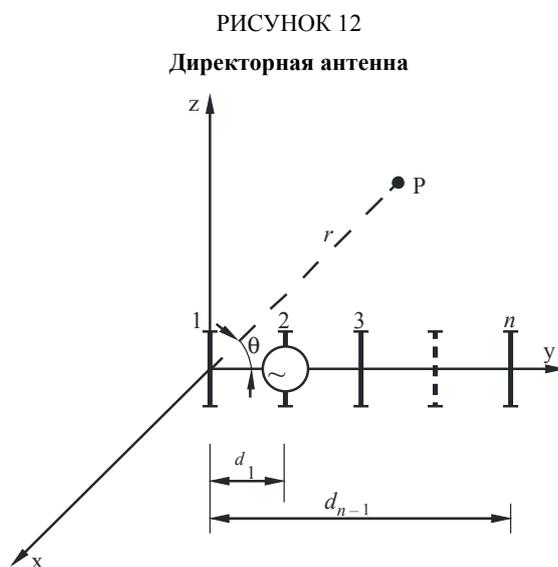
BS.1195-11

6.1.1 Линейные антенные решетки с пассивными элементами

В линейных антенных решетках с пассивными элементами электромагнитное поле, излучаемое возбуждаемым элементом, создается токами, протекающими в пассивных элементах.

В ОВЧ и УВЧ диапазонах наиболее важным применением антенной решетки с пассивными элементами является применение, которое представлено директорной антенной, схематически показанной на рисунке 12.

Директорная антенна состоит из возбуждаемого элемента, рефлектора и одного или нескольких директоров. Общий коэффициент усиления возрастает при увеличении числа используемых директоров.



BS.1195-12

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Численный расчет диаграммы направленности может производиться с учетом того, что функция диаграммы направленности i -го элемента вертикально поляризованной директорной антенны, показанная на рисунке 12 в вертикальной плоскости y - z , равна:

$$f_i = \frac{\cos(\beta h_i \cos \theta) - \cos(\beta h_i)}{\sin \theta}, \quad (18)$$

где:

θ : угол места;

h_i : половина длины i -го элемента;

$\beta = 2\pi/\lambda$.

Поскольку диаграммы направленности каждого элемента директорной антенны различны, принцип умножения диаграмм (см. п. 4.2.1) использовать нельзя, и необходимо произвести векторное сложение (см. также п. 4.2.2).

Диаграмма направленности будет представлена как:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot f_i(\theta) \cdot e^{j\beta d_{i-1} \cos \theta}, \quad (19)$$

где:

n : общее число диполей;

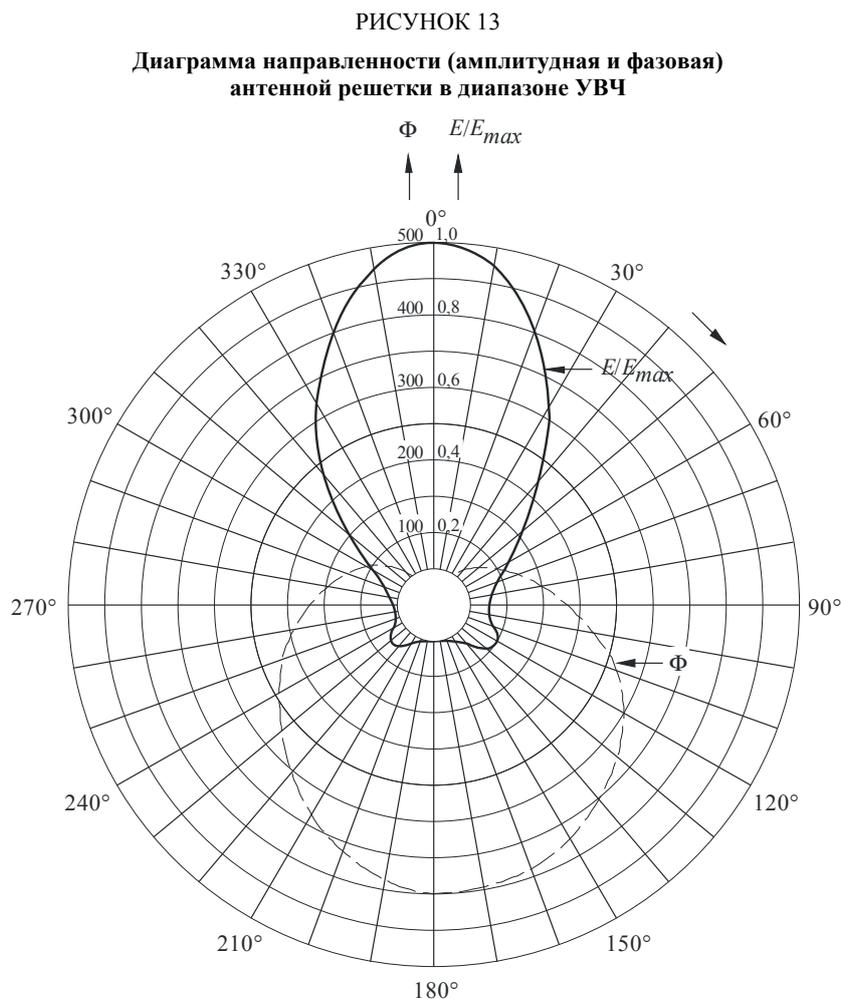
I_i : ток i -го элемента;

d_{i-1} : расстояние i -го элемента от рефлектора ($d_0 = 0$).

6.2 Амплитудные и фазовые диаграммы направленности

При рассмотрении единичного точечного источника пространственное распределение принимаемого сигнала полностью определяется относительной амплитудной диаграммой направленности, т. е. соответствующая фазовая диаграмма направленности не предоставляет никакой дополнительной полезной информации.

В случае использования в антенной решетке неизотропных источников ограниченного размера результирующая диаграмма направленности должна определяться относительной амплитудной диаграммой направленности и соответствующей фазовой диаграммой (см. рисунок 13).



E/E_{max} : относительная амплитудная диаграмма направленности
 Φ : фазовая диаграмма (градусы)

BS.1195-13

Как указывалось, и амплитудная и фазовая диаграммы направленности в направлении максимального излучения необходимы для того, чтобы оценить общую диаграмму направленности антенны. Такие диаграммы обычно предоставляются производителем или измеряются пользователем в соответствии с процедурами, определенными в части 2 Приложения 1, и должны использоваться, как определено в п. 7.2 для расчета диаграммы направленности антенной системы.

Однако в некоторых случаях, когда существующая система, использующая отдельные антенны без достаточных технических спецификаций, должна быть перепроектирована, или в общем случае, когда известна только относительная амплитудная диаграмма, можно придерживаться следующего, менее точного подхода.

В этом случае эталонная точка диаграммы направленности, т. е. точка начала координат относительной амплитудной диаграммы направленности, может быть соответственно перемещена в точку, называемую "фазовым центром", или "электрическим центром", где фазовая диаграмма показывает наименьшее изменение в наиболее широком угловом секторе, т. е. реальном геометрическом центре излучаемого волнового фронта.

В этом угловом секторе антенная решетка может рассматриваться как неизотропный точечный источник, расположенный в фазовом центре, диаграмма направленности которого снова может быть полностью определена путем использования только амплитудной диаграммы направленности.

В решетках, использующих диполи и рефлекторы, фазовый центр обычно находится в зоне между входными клеммами диполя и отражающим экраном и, как правило, расположен ближе к клеммам диполя.

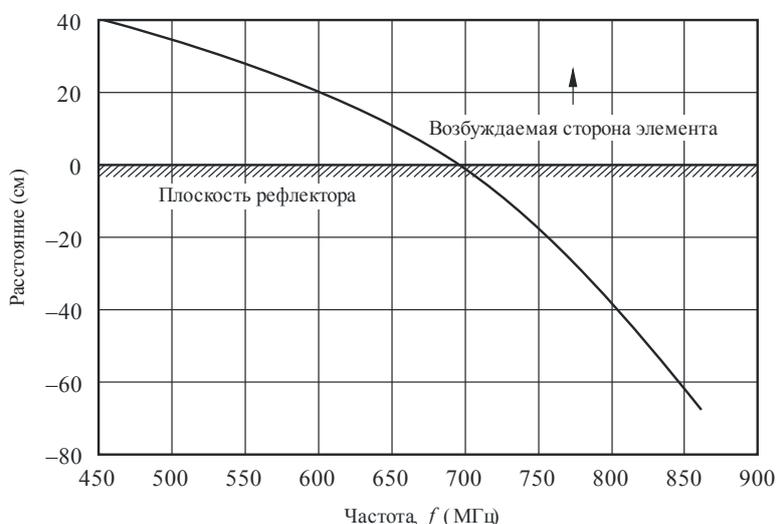
Для случая панельной антенной решетки (см. п. 6.4.1) точное расположение фазового центра, основанное на измерениях, обычно определяется производителем.

Поскольку в диапазонах ОВЧ и УВЧ большинство отдельных антенн может работать в относительно широких полосах частот (см. п. 6.4.1), производитель проводит измерения и определяет положение фазового центра для различных частот в рабочей полосе. В результате таких измерений получается кривая, показывающая зависимость изменения геометрического расположения фазового центра от частоты (см. рисунок 14).

Из рисунка 14 также видны ограничения, присущие подходу с использованием фазового центра при расчете диаграммы излучения в направлениях, где предполагаются большие изменения геометрического расположения фазового центра. Учет такой неточности особенно важен в тех точках, где необходимо рассчитать влияние комбинированной диаграммы направленности большего числа антенн и в которых результирующая диаграмма направленности может значительно измениться при учете минимумов и боковых лепестков.

РИСУНОК 14

Расположение фазового центра широкополосной УВЧ панельной антенны



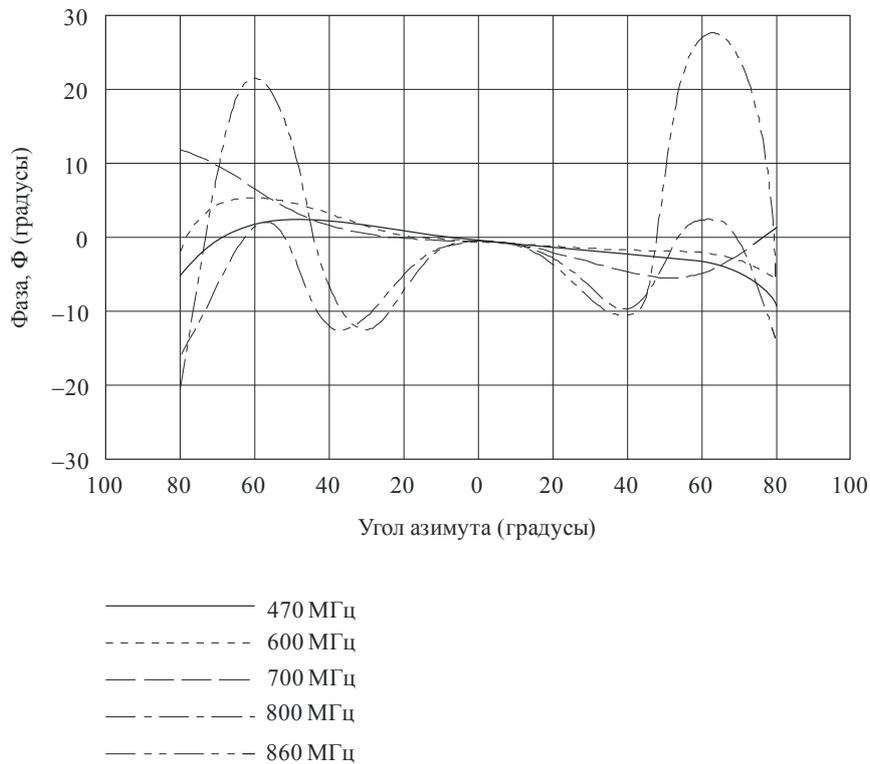
BS.1195-14

Производителем также часто предоставляется семейство кривых с фазовыми диаграммами, полученными на различных частотах. Эти кривые полезны для оценки обоснованности предположения, что фазовый центр можно использовать в качестве места расположения точечного источника в рассматриваемой полосе (см. рисунок 15).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В тех случаях, когда местоположение фазового центра неизвестно, например, если старая антенная система перестраивается для работы на частотах, отличных от частот первоначального проекта, или если рефлекторы недостаточно определены и т. д., то при проектировании антенных систем часто используется эмпирическое правило, состоящее в том, что фазовый центр располагают на клеммах питания излучающих диполей. Такое предположение дает более осторожный результат в отношении общей диаграммы излучения. Этот принцип также может применяться к излучающим элементам другого типа, например к директорным антеннам.

РИСУНОК 15

**Фазовые диаграммы широкополосной УВЧ панельной антенны
на различных рабочих частотах**



BS.1195-15

6.3 Расчет диаграммы направленности антенных решеток

При проектировании антенных систем, излучатели которых были поставлены производителем (простые диполи, панельные или директорные антенны и т. д.), диаграммы направленности, предоставляемые производителем, обычно являются вертикальной или горизонтальной секцией трехмерной амплитудной и/или фазовой диаграммы, содержащей направление максимального излучения. Допуская, что $f_A(\theta, \varphi)$ – функция амплитудной диаграммы излучателя, диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях могут быть, соответственно, выражены как:

$$f_{AH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} \quad \text{и} \quad f_{AV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}}, \quad (20)$$

где θ_{max} и φ_{max} – соответственно угол места и угол азимута, при которых наблюдается максимальное излучение.

Для практических целей в перечне данных производителя углы θ_{max} и φ_{max} обычно устанавливаются на нуль. Реальные значения амплитудной диаграммы направленности для углов $\theta \neq \theta_{max}$ и $\varphi \neq \varphi_{max}$ можно найти из соотношения:

$$f_A(\theta, \varphi) = f_{AH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} \cdot f_{AV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}}. \quad (21)$$

Таким же образом функция фазовой диаграммы $f_P(\theta, \varphi)$ может быть выражена как:

$$f_P(\theta, \varphi) = f_{PH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} + f_{PV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}}, \quad (22)$$

где $f_{PH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}}$ и $f_{PV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}}$ – соответственно функция горизонтальной и вертикальной фазовой диаграмм излучателя.

Это выражение основано на предположении, проверенном на практике, что любая другая вертикальная или горизонтальная секция диаграммы будет иметь форму, похожую на вертикальную или горизонтальную секцию, содержащую направление максимального излучения.

6.4 Антенные решетки в диапазонах ОВЧ и УВЧ

6.4.1 Антенны панельного типа

В диапазоне ОВЧ, и особенно в УВЧ, размеры элементарных излучателей достаточно малы для разработки полных антенных систем с использованием элементов, поставленных производителем в виде готовых изделий.

Эти элементы, называемые панелями, изготавливаются производителем путем объединения элементарных излучателей в более сложные антенные решетки. Инженер-конструктор может затем использовать эти панели в качестве "строительных кирпичей" для конструирования окончательных антенных систем.

Данный метод широко используется для разработки современных антенных систем, поскольку он позволяет улучшить управление и оптимизацию диаграммы направленности антенной системы и, следовательно, повысить эффективность использования спектра и экономичность при проектировании всей системы.

Панель может состоять из одного простого полуволнового диполя, установленного на заранее определенном расстоянии от интегральной отражающей плоскости, или для более сложных решеток – из четырех (или более) узкополосных или широкополосных элементарных излучателей с линейной или круговой поляризацией.

Производитель оптимизирует панель относительно:

- коэффициента усиления;
- диаграммы направленности;
- обратных потерь;
- полного сопротивления;
- полосы рабочих частот.

Параметрами, используемыми в оптимизации, являются:

- физическая структура элементарных излучателей;
- взаимное разнесение элементарных излучателей;
- расстояние от излучателей до рефлектора (и в некоторых случаях форма рефлектора);
- система питания.

Очень важной характеристикой проектирования современных панельных антенн является способность работать в широкой полосе частот. Часто может потребоваться, чтобы одна антенная система передавала более одной программы одновременно. Это – типичный случай для передающих станций, входящих в состав радиовещательной сети, которая должна обеспечивать двух- или трехпрограммное обслуживание данной зоны, обычно на широко разнесенных по частоте каналах.

Данное ограничение может быть не таким жестким для звукового ЧМ радиовещания в диапазоне II, где необходимая ширина полосы составляет лишь около $\pm 10\%$ от центральной частоты, но она существенно влияет на конструкцию панелей, требуемых для полного охвата диапазонов IV и V (470–960 МГц).

В этом случае необходимо тщательно спроектировать элементарный излучатель для уменьшения величины Q его эквивалентной схемы. Такое уменьшение обычно достигается использованием излучающих элементов с большой поверхностью или площадью поперечного сечения.

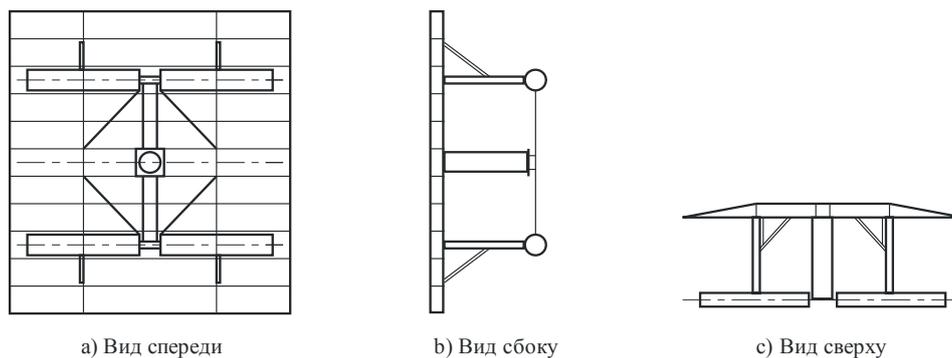
Типичный проект ОВЧ панелей показан на рисунке 16. Панель состоит из двух вертикальных ярусов волновых диполей с центральным питанием. Соответствующие диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях приведены на рисунке 17.

Типичные значения коэффициента усиления (отнесенные, как обычно, к полуволновому диполю) для панелей диапазона I находятся между 5–7 дБ, в то время как панели диапазона II имеют верхний предел порядка 8 дБ на наиболее высоких рабочих частотах. Панели диапазона III могут работать во всей полосе 174–230 МГц и имеют значение коэффициента усиления от 10 до 14 дБ с незначительным уменьшением в случае вертикальной поляризации.

В УВЧ диапазоне уменьшение размера излучающего элемента позволяет конструировать панели с более направленными диаграммами излучения. На этих частотах, несмотря на ограничения, вызванные требованием работы в широкой полосе частот, все еще широко используется метод группирования волновых диполей с центральным питанием в ярусы.

РИСУНОК 16

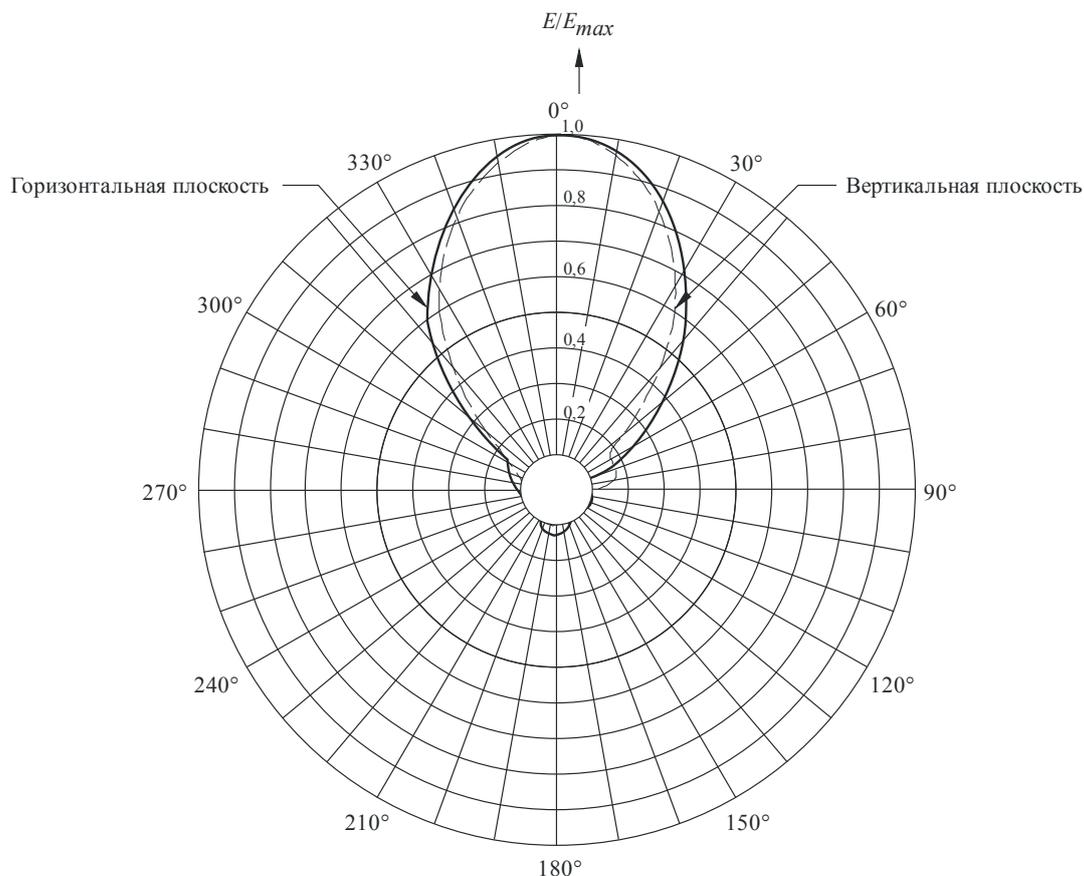
Типичная дипольная панель диапазона I или II



BS.1195-16

РИСУНОК 17

Диаграммы направленности дипольной панели, представленной на рисунке 16, в вертикальной и горизонтальной плоскостях



BS.1195-17

Требование работы в широкой полосе частот также оказывает влияние на полное сопротивление, коэффициент усиления и местоположение фазового центра панели, и изменения этих параметров в зависимости от частоты должны предоставляться производителем. Типичные значения коэффициента усиления находятся между 10 и 12 дБ при значениях коэффициента стоячей волны по напряжению на входе панели, не превышающих 1,10.

Потребность в передаче ТВ излучений с круговой поляризацией обусловила разработку соответствующих панелей с круговой поляризацией, удовлетворяющих следующим требованиям:

- использование, по возможности, диполей в качестве элементарных излучателей для упрощения конструкции;
- обеспечение одинаковых диаграмм направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях в широкой полосе частот;
- уменьшение взаимной связи между соседними панелями для упрощения проектов;
- обеспечение формы диаграммы направленности, подходящей также для реализации ненаправленных диаграмм с минимальной неравномерностью.

Предпочтительным подходом все еще является использование панели, состоящей из перекрещивающихся диполей, хотя это решение имеет некоторые ограничения из-за различия диаграмм направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

6.4.2 Директорные антенны

Передающие директорные антенны радиовещательного типа обычно состоят из возбуждаемого элемента (обычно полуволнового диполя), рефлектора для получения односторонней диаграммы направленности и одного или нескольких директоров для увеличения коэффициента усиления.

Хотя определение широкополосных антенн не совсем подходит к директорным антеннам согласно соображениям, изложенным в п. 6.4.1, они могут быть спроектированы для работы в полосе частот, лежащей вблизи проектной частоты, которая может изменяться на величину от ± 5 до $\pm 10\%$.

Используемые в настоящее время конструкции директорных антенн обеспечивают полный охват диапазона II или охват двух соседних ТВ каналов в диапазоне III одной антенной при значениях коэффициента усиления порядка 4–5 дБ, в зависимости от количества директоров (от 1 до 3).

Типичная директорная антенна для ЧМ радиовещания и ее соответствующая диаграмма направленности приведены на рисунках 18 а) и 18 б).

Еще одним преимуществом директорной антенны является то, что она может быть легко приспособлена для использования круговой поляризации путем установки перекрещивающихся элементов.

Как и панельные излучатели, директорные антенны могут использоваться в качестве излучающих элементов для формирования более сложных антенных систем. Они могут быть сгруппированы в ярусы и секции для формирования антенных решеток, общая диаграмма направленности которых может соответствовать конкретным требованиям. Результирующая диаграмма направленности может быть рассчитана в соответствии с п. 4.2, где директорные антенны в системе рассматриваются как неизотропные точечные источники, расположенные в их соответствующем фазовом центре, который обычно, как предполагается, находится на входе возбуждаемого элемента.

6.4.3 Другие типы антенных решеток

Среди антенных решеток, используемых в ОВЧ радиовещательных антенных системах, логопериодические антенны нашли также важное применение в транспонируемых системах в качестве как приемной, так и передающей антенны.

Присущие логопериодической антенне возможности работы в широкой полосе позволяют реализовать устройства, способные работать в полном радиовещательном диапазоне.

Общие характеристики типичных логопериодических антенн сравнимы с характеристиками вертикальных многоярусных двойных директорных антенн.

7 Антенные системы

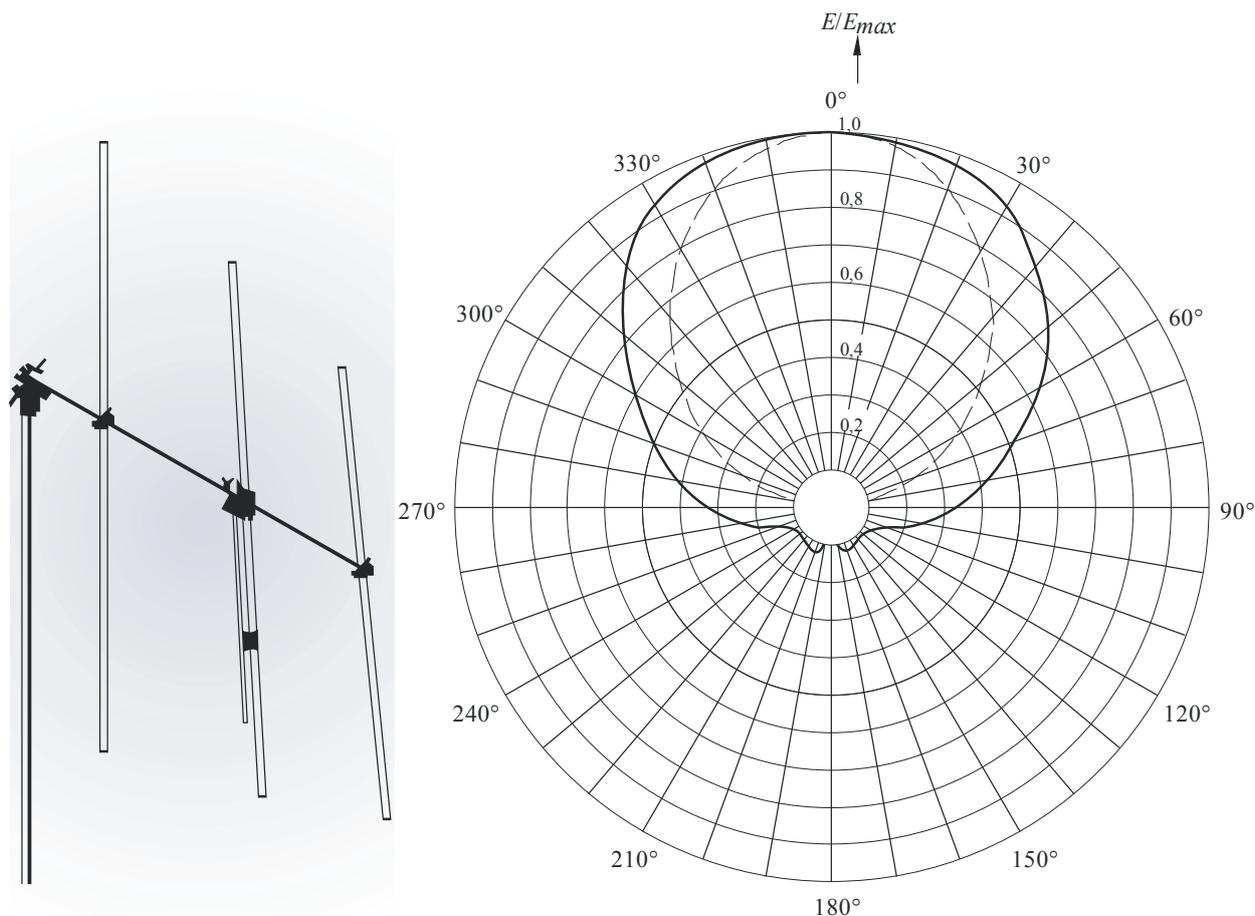
В диапазонах ОВЧ и УВЧ антенные системы разрабатываются путем использования антенных решеток из излучающих элементов для достижения оптимизированной диаграммы направленности.

Очевидно, что, поскольку сигнал, излучаемый антенной системой, распространяется в первом приближении в режиме прямой видимости, вся энергия, излучаемая выше горизонтальной плоскости, содержащей антенну, теряется. Эти потери могут быть снижены путем сужения вертикальной диаграммы направленности антенной системы и наклона вниз волнового фронта луча.

Аналогичным образом может потребоваться также управление азимутальной диаграммой направленности, поскольку она должна соответствовать требуемой зоне обслуживания и обеспечивать необходимую защиту другим передающим станциям, работающим в совмещенном или в соседних каналах.

Наиболее эффективным решением для управления обеими диаграммами направленности является установка соответствующего числа излучающих элементов, например панелей, директорных антенн и т. д., расположенных и/или ориентированных в требуемом направлении по азимуту.

РИСУНОК 18



а) Типичная директорная антенна для полного охвата диапазона II

б) Типичная диаграмма направленности

————— Диаграмма в плоскости, ортогональной диполям

----- Диаграмма в плоскости диполей

BS.1195-18

Поэтому цель следующих разделов – дать обзор методов, наиболее часто используемых в настоящее время для оптимизированных антенных систем.

Хотя будет сделана конкретная ссылка на антенные системы панельного типа, приведенные соображения, как правило, применимы к любым методам, использующим излучающие элементы, взаимное геометрическое расположение и характеристики питания, которые могут изменяться разработчиком для достижения желаемой общей диаграммы направленности.

7.1 Диаграммы направленности антенной системы

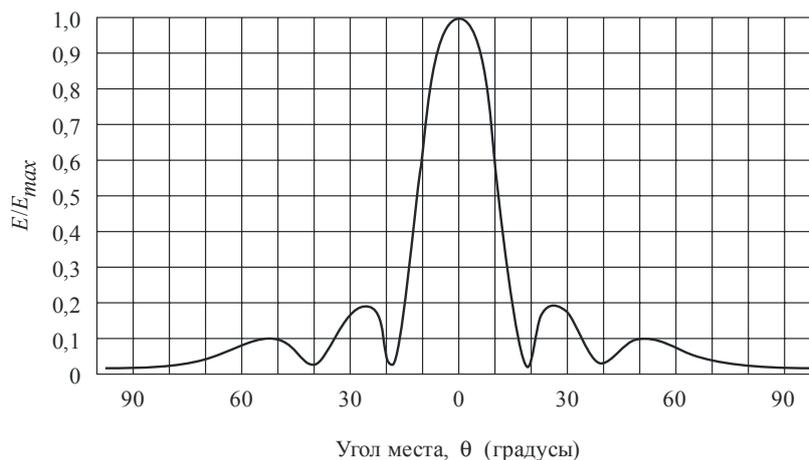
7.1.1 Заполнение нулей диаграммы направленности

В угловом секторе, соответствующем требуемой зоне обслуживания, диаграмма направленности в вертикальной плоскости не должна содержать нулей, поскольку их наличие приведет к уровню сигнала, теоретически равному нулю в местах, которые совпадают с углами, при которых возникают нули. На практике уровень принимаемого сигнала будет значительно ниже требуемого из-за неконтролируемых отражений от зоны вне нулей.

Типичная вертикальная диаграмма направленности для вертикального яруса разнесенных на равное расстояние элементов, питаемых токами одинаковой амплитуды и фазы (т. е. синфазная антенная решетка, см. п. 6.1), представлена на рисунке 19. Из рисунка видно, что нули влияют на значительную часть углового сектора, который может соответствовать требуемой зоне обслуживания.

РИСУНОК 19

Вертикальная диаграмма направленности для антенной решетки из пяти вертикально расположенных излучающих элементов, разнесенных на $0,5\lambda$ и имеющих одинаковый ток и фазу



BS.1195-19

Углы, при которых возникают нули, приблизительно задаются формулой:

$$\theta = \arctan \frac{\pm k}{n d}, \quad (23)$$

где:

- k : число нулей (1, 2, ...);
- n : число элементов в ярусе;
- d : разнесение элементов в длинах волн.

Для обеспечения вертикальной диаграммы направленности, которая приближается к идеальной форме, описанной ранее, были разработаны различные методы "заполнения нулей".

Наиболее простое и широко распространенное решение состоит в питании различных элементов в ярусах токами неодинаковой амплитуды, т. е. с соответствующим распределением мощности.

Хорошо известным методом распределения мощности является так называемое биномиальное распределение, которое устанавливает амплитуды токов питания пропорционально коэффициентам биномиального ряда.

В соответствии с законом распределения, представленным выше, для антенных решеток, состоящих из трех-шести ярусных элементов, относительные амплитуды токов питания задаются следующим образом:

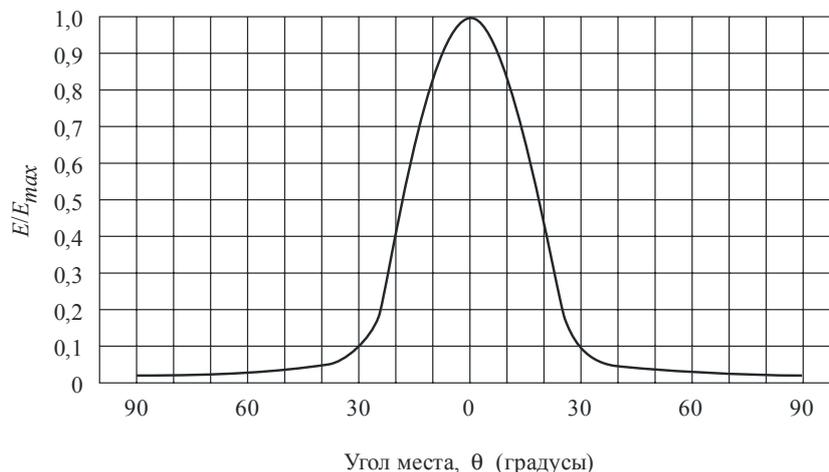
n	Относительная амплитуда
3	1, 2, 1
4	1, 3, 3, 1
5	1, 4, 6, 4, 1
6	1, 5, 10, 10, 5, 1

На рисунке 20 показана вертикальная диаграмма направленности антенной решетки, представленной на рисунке 19, при применении биномиального распределения.

Хотя нули и боковые лепестки устраняются биномиальным распределением, ширина луча антенной решетки, а следовательно, и ее направленность уменьшаются. Кроме того, изменения амплитуды токов, требуемых для больших антенных решеток, могут быть достаточно велики. Это может создать трудности в достижении и поддержании стабильности необходимых различных уровней мощности.

РИСУНОК 20

Вертикальная диаграмма направленности антенной решетки, представленной на рисунке 19, при применении биномиального распределения амплитуды



BS.1195-20

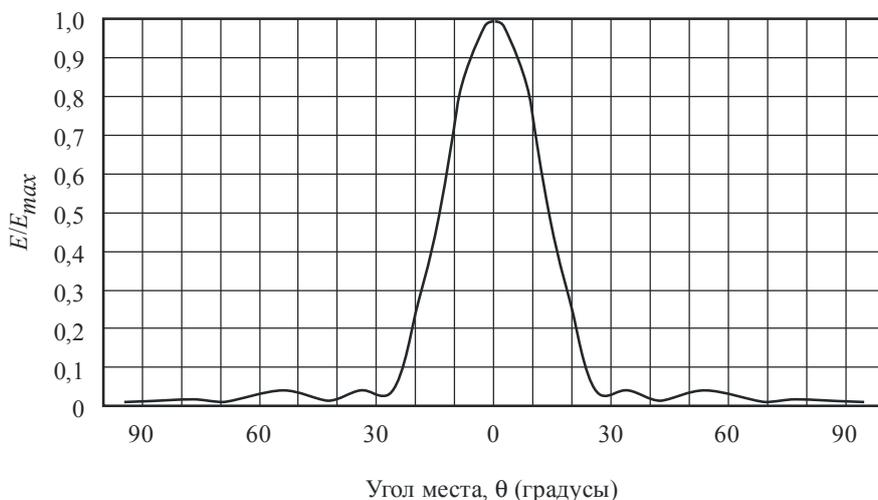
Другим методом распределения мощности для преодоления вышеуказанных недостатков является распределение Дольфа-Чебышева.

При применении этого распределения необходимо указывать либо требуемый максимальный уровень боковых лепестков, если необходимо свести к минимуму ширину луча между первыми нулями, либо, наоборот, ширину луча между первыми нулями, чтобы свести к минимуму уровни боковых лепестков.

На рисунке 21 показана вертикальная диаграмма направленности антенной решетки, представленной на рисунке 19, при применении распределения амплитуды Дольфа-Чебышева, равного 1; 1,6; 1,9; 1,6; 1, которое соответствует указанному максимальному подавлению боковых лепестков, равному 27 дБ.

РИСУНОК 21

Вертикальная диаграмма направленности антенной решетки, представленной на рисунке 19, при применении распределения амплитуды Дольфа-Чебышева



BS.1195-21

Оптимальное разнесение элементов для такой формы распределения составляет примерно $0,5 \lambda$, хотя это распределение верно и для больших разнесений.

Следует отметить, что любой используемый метод заполнения нулей приведет к снижению коэффициента усиления по сравнению со случаем равномерного распределения.

Такое снижение коэффициента усиления обычно называют "потерями на распределение".

Эти потери могут быть сведены к минимуму с помощью соответствующих методов синтеза диаграммы направленности, в которой мощность для заполнения нулей берется из части диаграммы направленности, находящейся выше уровня горизонта, или с помощью компенсации неравномерностей в главном лепестке.

В других более сложных методах заполнения нулей соответствующее распределение фаз сочетается с необходимым распределением амплитуды.

В этом более общем распределении потери коэффициента усиления по отношению к случаю распределения одинаковой мощности и равных фаз обычно называется "потери на компенсацию".

7.1.2 Наклон волнового фронта луча

Наклон волнового фронта луча необходим не только для того, чтобы снизить уровень излучаемой мощности выше плоскости горизонта, но и для того, чтобы направить максимальную мощность в сторону поверхности Земли.

Фактически из-за кривизны земной поверхности максимальное излучение антенной решетки без наклона волнового фронта луча в действительности никогда не достигнет земной поверхности.

Луч антенны, расположенной на 300 м выше уровня земли, необходимо наклонить на угол более $0,5^\circ$, чтобы дать возможность максимальному излучению достигнуть поверхности Земли.

Малые углы наклона волнового фронта луча (1° – 3°) легко обеспечиваются простым механическим наклоном плоскости излучающих элементов. Большие углы механического наклона используются нечасто из-за связанных с ними механических трудностей и трудностей, связанных с помеховой обстановкой.

Наклон волнового фронта луча может также достигаться надлежащим управлением фазой токов, питающих элементы в ярусе. Такое управление может осуществляться либо путем питания нижней половины элементов яруса токами, отстающими по фазе на фиксированную величину по отношению к токам питания верхней половины, либо путем введения постепенного сдвига фазы в токе каждого соседнего излучающего элемента.

Наибольшие углы наклона обычно достигаются соответствующей комбинацией механического и электрического наклона. Следует отметить, что введение распределения неравной фазы в излучающих элементах приведет к "компенсационным" потерям по отношению к коэффициенту усиления, если используется распределение одинаковой мощности (и одинаковой фазы).

7.2 Диаграммы направленности антенных систем

Как упоминалось в пп. 6.3 и 6.4, излучающие элементы, из которых состоит антенная система, могут рассматриваться как неанізотропные точечные источники, расположенные в их фазовом центре. В этом случае результирующая диаграмма направленности должна быть рассчитана, как указано в п. 4.2, путем векторного сложения, которое учитывает отдельные диаграммы направленности.

Векторное сложение может быть сведено к решению чисто геометрической задачи, если известны амплитуда и фаза токов питания каждого элемента.

Сначала будет использоваться случай двух изотропных излучающих источников, произвольно расположенных в трехмерном пространстве, для определения фазовой разности между излучаемыми полями в зависимости от их взаимного положения, фаз токов питания и частоты.

Затем результаты будут расширены на более общий случай неанізотропных источников. Что касается рисунка 22, в котором не задается никакой конкретной системы координат, при расчете результирующего поля в точке Р, которая соответствует конкретному направлению, источник 1 будет принят за эталон для получения разности фаз источника 2.

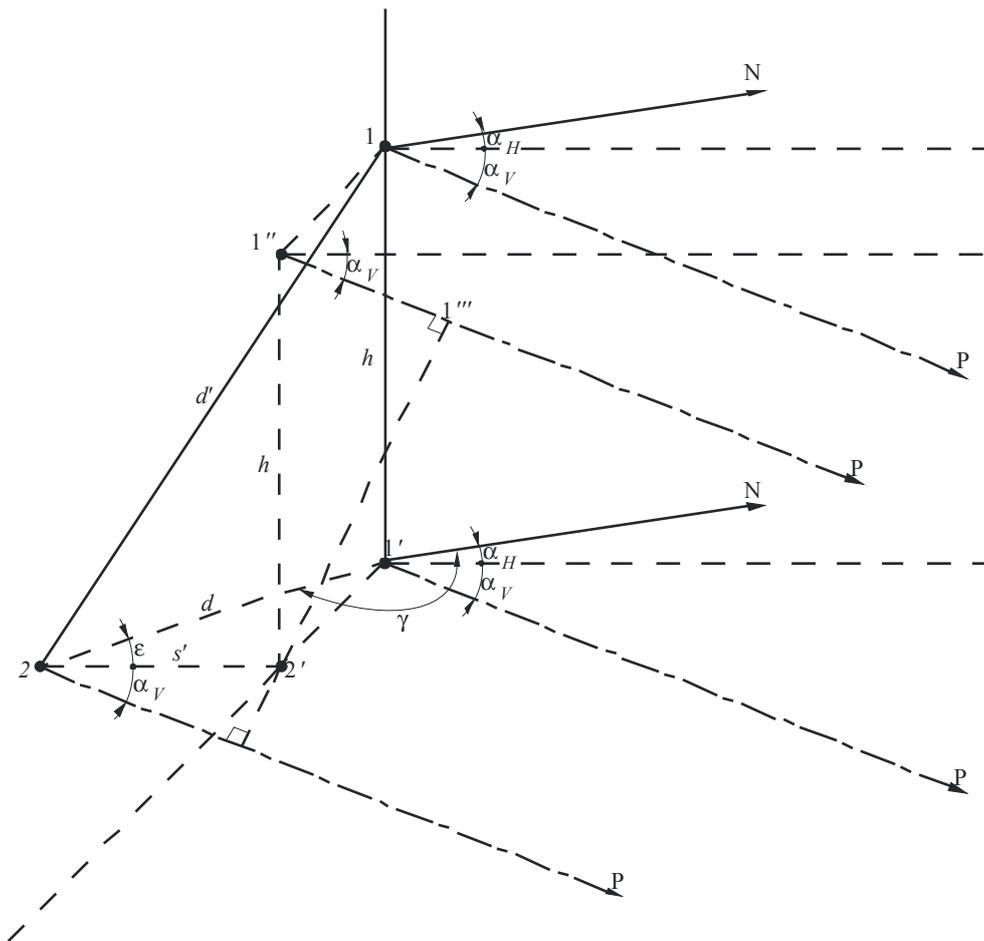
На рисунке 22 1' будет проекцией источника 1 на горизонтальную плоскость, содержащую источник 2. В этой плоскости показано направление на географический Север (N), проходящее через 1'.

На рисунке 22 используются следующие параметры:

- d : расстояние между источником 2 и проекцией 1' источника 1 на горизонтальную плоскость;
- h : расстояние по вертикали между источником 1 и его проекцией 1';
- γ : угол в горизонтальной плоскости между d и направлением на географический Север;
- α_H : угол в горизонтальной плоскости между направлением на географический Север и проекцией используемого в расчетах направления в горизонтальной плоскости;
- α_V : угол в вертикальной плоскости между используемым в расчетах направлением и его проекцией в горизонтальной плоскости.

РИСУНОК 22

Геометрия векторного сложения



BS.1195-22

Если d и h выражаются в метрах, а f – в МГц, разность фаз источника 2 в электрических градусах по отношению к источнику 1 задается следующей формулой:

$$\psi_2 = 1,2 \cdot f \cdot \left[d \cdot \cos(\gamma - \alpha_H) \cdot \cos \alpha_V + h \cdot \sin \alpha_V \right] \quad (24)$$

В предположении, что источник 2 может излучать с начальной разностью фаз β градусов по отношению к источнику 1 (например, из-за разности фаз питающих токов) и с разностью фаз $\Delta\psi_p(\theta, \varphi)$ из-за фазовой диаграммы направленности, более общее выражение (24) будет иметь следующий вид:

$$\psi_2 = 1,2 \cdot f \cdot \left[d \cdot \cos(\gamma - \alpha_H) \cdot \cos \alpha_V + h \cdot \sin \alpha_V \right] + \beta + \Delta\psi_p(\theta, \varphi), \quad (25)$$

а для i -го источника в решетке:

$$\psi_i = 1,2 \cdot f \cdot \left[d_i \cdot \cos(\gamma_i - \alpha_H) \cdot \cos \alpha_V + h_i \cdot \sin \alpha_V \right] + \beta_i + \Delta\psi_{pi}(\theta, \varphi). \quad (26)$$

В отношении антенной решетки, состоящей из n неизотропных источников, результирующая диаграмма направленности по напряженности поля в любом направлении будет задаваться векторным сложением n векторов, амплитуда которых будет задана амплитудной диаграммой направленности отдельного источника, а фаза – уравнением (26), принимая источник 1 за эталонный. Таким образом:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_i(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n K_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot e^{j\psi_i(\theta, \varphi)}, \quad (27)$$

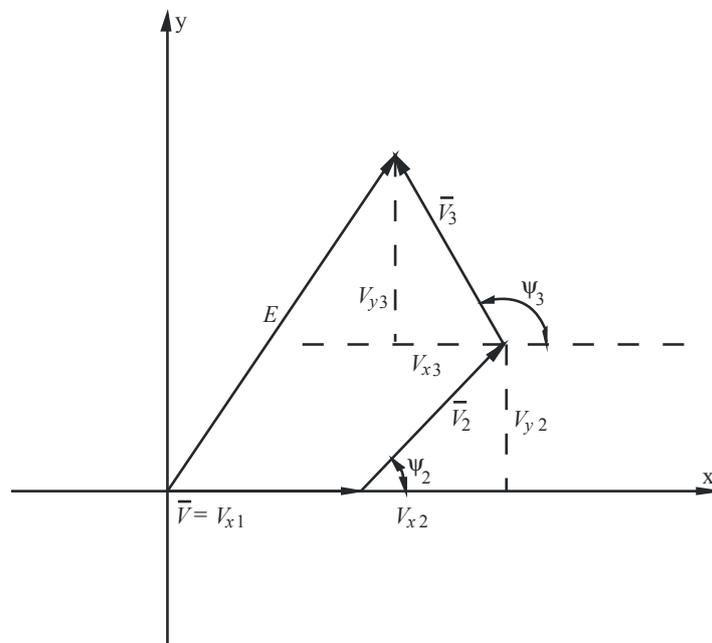
где:

- V_i : индивидуальный вектор поля;
- K_i : постоянная, учитывающая разности входных мощностей источников;
- f_i : относительная амплитудная диаграмма направленности отдельного источника;
- $\psi_i(\theta, \varphi)$: относительная разность фаз i -го источника относительно источника 1 ($\psi_1(\theta, \varphi) = \psi_{p1}(\theta, \varphi)$).

Может оказаться удобным осуществить векторное сложение в векторной плоскости x - y , как показано на рисунке 23, для $n = 3$.

РИСУНОК 23

Векторное сложение в плоскости x - y для $n = 3$



BS.1195-23

Результирующий вектор $E(\theta, \varphi)$ будет иметь составляющие:

$$E_x(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_{xi}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot \cos \psi_i; \quad (28)$$

$$E_y(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_{yi}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot \sin \psi_i. \quad (29)$$

Следовательно,

$$|E(\theta, \varphi)| = \left[|E_x(\theta, \varphi)|^2 + |E_y(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2} \quad (30)$$

и

$$\psi(\theta, \varphi) = \arctan \left[E_y(\theta, \varphi) / E_x(\theta, \varphi) \right]. \quad (31)$$

На практике $f_i(\theta, \varphi)$ рассчитывается в соответствии с п. 6.3 на основе данных, предоставляемых производителем, в то время как k_i определяется с помощью мощности, подаваемой в систему, а ψ_i рассчитывается в соответствии с геометрией антенной системы и фазовой диаграммой.

Поскольку первоначально не было выбрано никакой конкретной системы координат, обычно на практике при расчете разности фаз ψ_i все горизонтальные углы относят к направлению на Север, а все вертикальные углы – к горизонтальной плоскости.

7.3 Примеры диаграмм направленности антенных систем

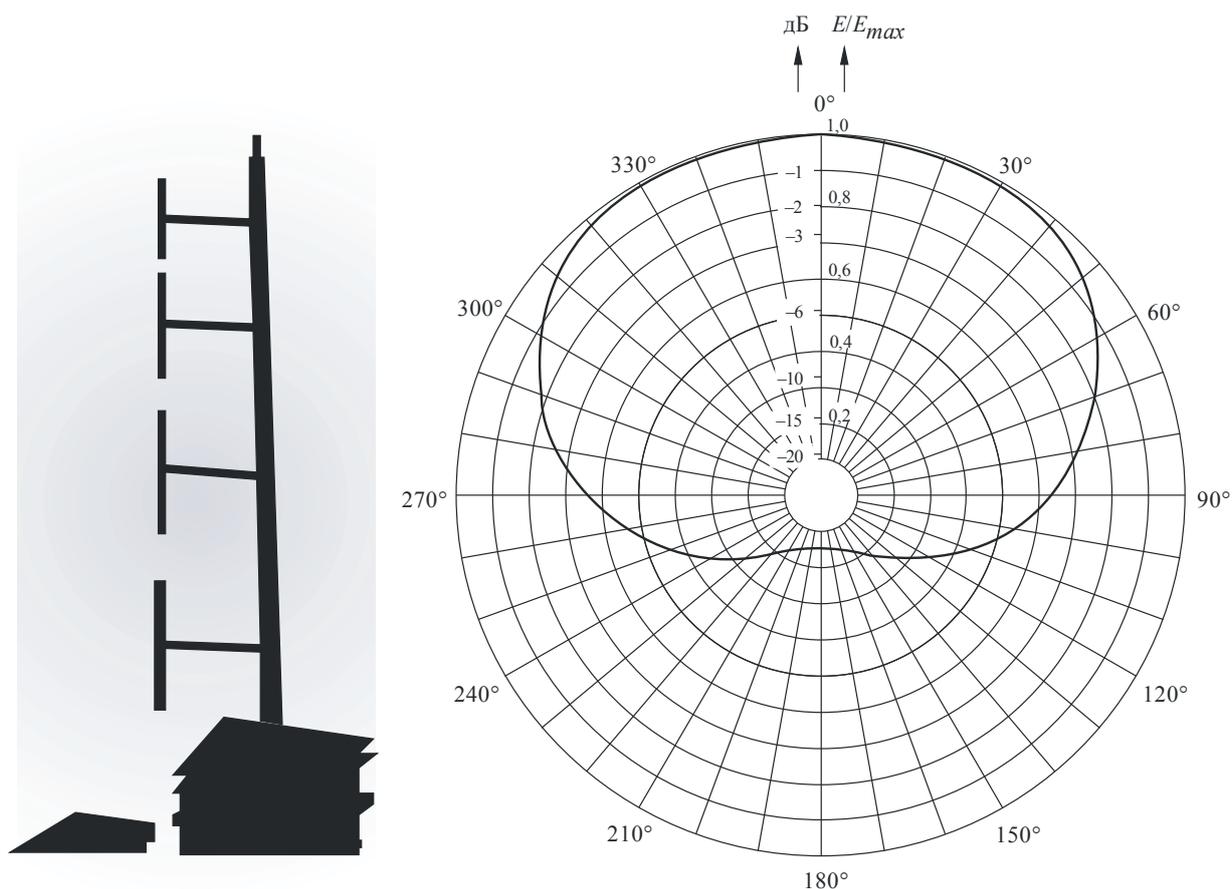
7.3.1 Антенные системы из диполей

Антенные системы из диполей широко используются для радиовещания в диапазоне II. Они обычно состоят из коллинеарных антенных решеток, выполненных в виде ярусов вертикальных диполей, разнесенных на одинаковое расстояние, токи питания которых имеют одинаковые амплитуду и фазу.

Пример вертикально поляризованной антенной системы из диполей и соответствующая горизонтальная диаграмма направленности представлены на рисунке 24.

РИСУНОК 24

Вертикально поляризованная дипольная антенна в диапазоне II



7.3.2 Системы директорных антенн

Как и панельные антенны, директорные антенны могут использоваться в качестве излучающих элементов для формирования более сложных антенных систем. Они могут быть сгруппированы в ярусы или секции для формирования антенных решеток, общая диаграмма направленности которых может соответствовать конкретным требованиям. Результирующая диаграмма направленности может быть рассчитана в соответствии с п. 4.2, где директорные антенны в системе рассматриваются как неизотропные точечные источники, расположенные в их соответствующем фазовом центре, который обычно, как предполагается, находится на входе возбуждаемого элемента.

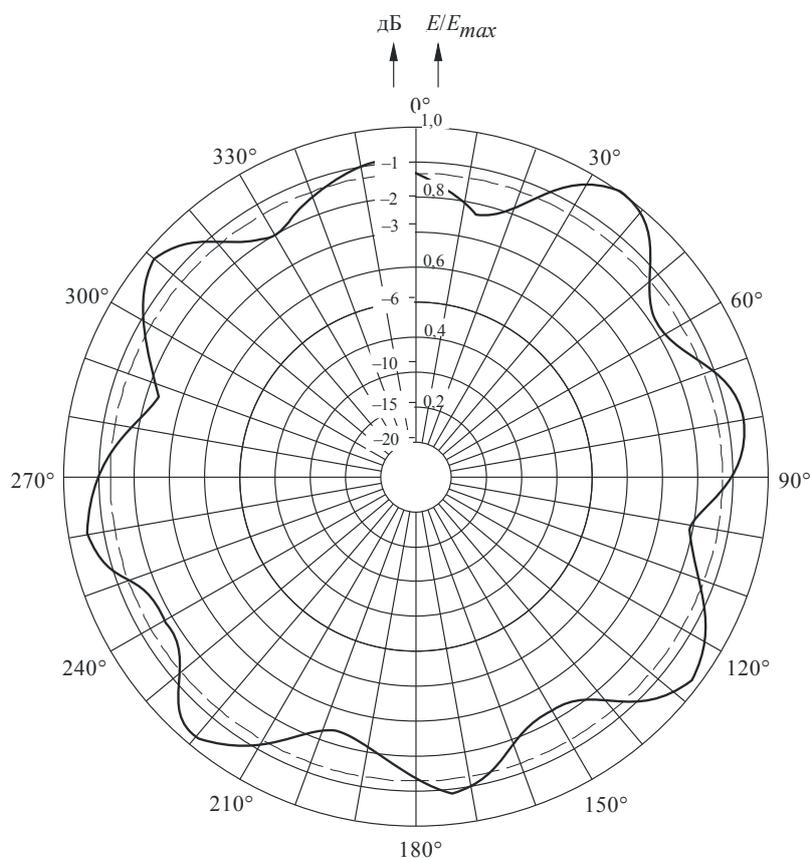
Из рисунка 18 видно, что для случая горизонтально поляризованных излучений в вертикальной плоскости достигается очень слабая направленность. Поэтому обычной практикой является использование многоярусных директорных антенн.

Антенные системы, имеющие односторонние или всенаправленные диаграммы направленности, могут быть просто реализованы путем объединения директорных антенн.

Всенаправленная азимутальная диаграмма, реализуемая с помощью системы, состоящей из четырех директорных антенн в диапазоне II, приведена на рисунке 25. В этом случае также используется соответствующий метод для компенсации минимумов диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. Этот метод состоит в добавлении к излучающей структуре четырех пассивных вертикальных элементов, соответствующим образом расположенных в поперечных направлениях (см. рисунок 26).

РИСУНОК 25

**Горизонтальная диаграмма направленности системы
всенаправленных директорных антенн в диапазоне II
(круговая поляризация)**



BS.1195-25

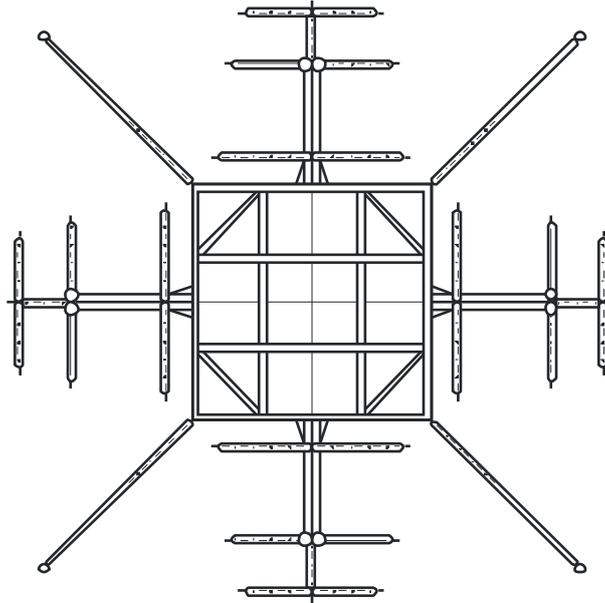
На рисунке 27 показана направленная азимутальная диаграмма системы из двух директорных антенн в диапазоне II.

7.3.3 Системы панельных антенн

Надлежащим образом спроектированные панели имеют односторонние диаграммы направленности с главным лучом, ортогональным к поверхности рефлектора. Ширина луча по уровню 6 дБ для панелей, установленных на башнях с квадратными или треугольными секциями, должна составлять, соответственно, 90° или 120° , если желательно получить всенаправленную диаграмму.

РИСУНОК 26

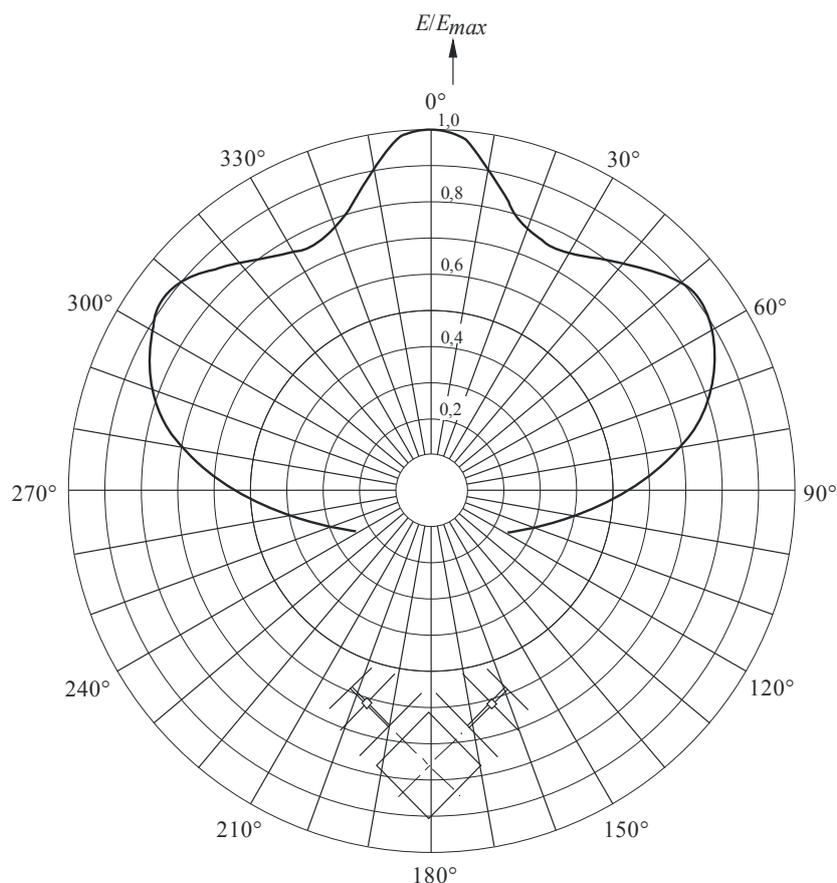
Система всенаправленных директорных антенн, обеспечивающая горизонтальную диаграмму, представленную на рисунке 25



BS.1195-26

РИСУНОК 27

Горизонтальная диаграмма направленной системы директорных антенн в диапазоне II



BS.1195-27

Таким образом, если токи питания панелей имеют одинаковую фазу в поперечных направлениях, объединенное излучение двух соседних панелей, соприкасающихся сторонами, компенсирует снижение коэффициента усиления отдельной панели.

7.3.3.1 Системы всенаправленных панельных антенн

Всенаправленные диаграммы антенных систем, следовательно, могут быть получены путем питания панелей каждой горизонтальной секции антенной решетки токами одинаковой мощности, при этом панели установлены в центре стороны башни.

Однако результирующая азимутальная диаграмма (см. рисунок 28) будет иметь "неравномерности", амплитуда которых пропорциональна длине стороны башни, выраженной в длинах волн.

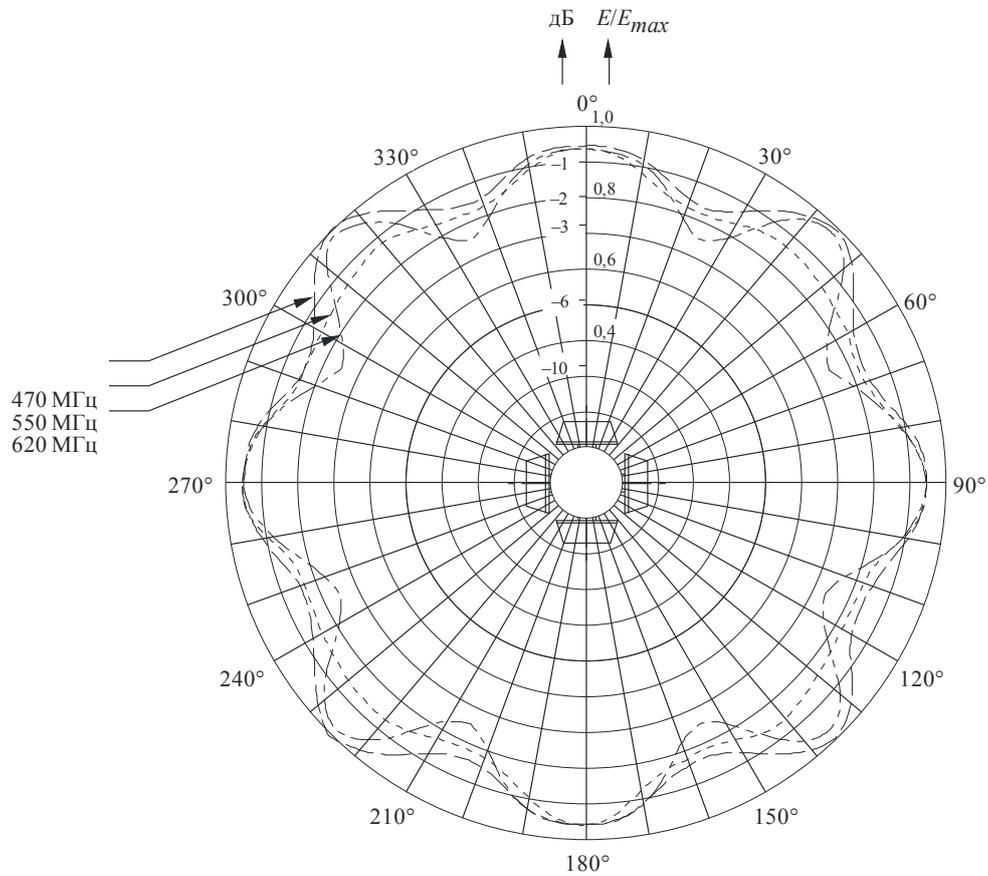
При проектировании системы панельных антенн со всенаправленной азимутальной диаграммой необходимо соблюдать два основных условия:

- неравномерности азимутальной диаграммы направленности, получающиеся в результате излучения четырех панелей (или трех в зависимости от количества секций башни), должны удерживаться в установленных пределах (например, $\pm 1,5$ дБ);
- коэффициент стоячей волны по напряжению на входе каждой панели должен быть сведен к минимуму, поскольку любое несоответствие в ответвительных фидерных соединениях приведет к неравному распределению мощности между различными панелями, и результирующая диаграмма направленности более не будет круговой.

Из рисунка 28 видно, что минимумы диаграммы направленности возникают на каждой стороне направлений пересечения, где излучения от соседних панелей имеют относительный сдвиг фазы относительно друг друга, а результирующий вектор имеет более низкую амплитуду.

РИСУНОК 28

Азимутальная диаграмма направленности широкополосной горизонтально поляризованной УВЧ антенной системы, измеренная на частотах 470, 550 и 620 МГц



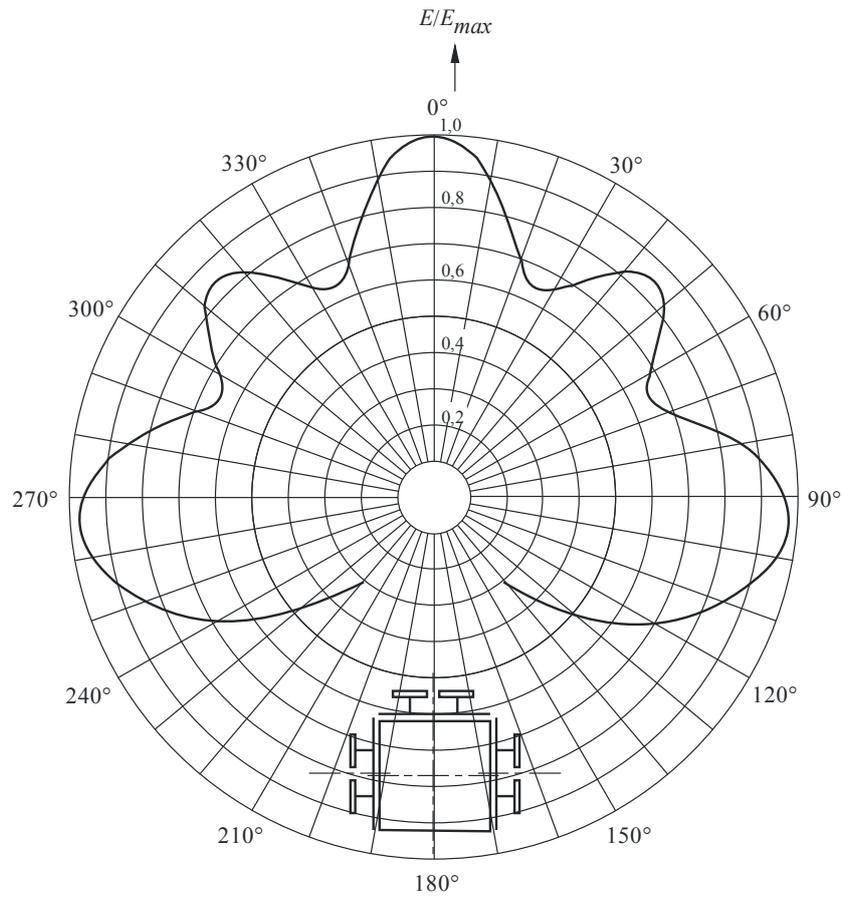
BS.1195-28

7.3.3.2 Направленные системы панельных антенн

Направленные азимутальные диаграммы получаются при изменении числа панелей на каждой стороне башни, уровней мощности, подводимой к каждой панели, взаимной ориентации панелей или путем комбинации этих методов. На рисунке 29 показана азимутальная диаграмма, реализованная посредством системы, состоящей из трех панельных антенн в ОВЧ диапазоне.

РИСУНОК 29

Направленная азимутальная диаграмма системы,
состоящей из трех панельных антенн в диапазоне III



BS.1195-29

Часть 2

Приложения 1

Практические аспекты антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ

Содержание

	<i>Стр.</i>
1 Введение.....	40
2 Измерение характеристик антенных систем	40
2.1 Место измерения	40
2.2 Измеряемые параметры	40
2.3 Methods of measurement	41
2.3.1 Метод измерения в частотной области (FDM).....	41
2.3.2 Метод измерения во временной области (TDM).....	41
2.4 Измерительное оборудование	44
2.5 Процедуры измерения.....	45
2.6 Представление данных.....	45
3 Измерения характеристик антенных систем на местах.....	46
3.1 Методы измерений	47
3.1.1 Метод вертикального зондирования	49
3.1.2 Метод измерения на борту воздушного судна	50
3.1.3 Метод эталонной антенны.....	52
3.2 Измерительное оборудование.....	53
3.2.1 Измерительное оборудование для вертикального зондирования.....	53
3.2.2 Оборудование для измерения на борту воздушного судна.....	53
3.2.3 Оборудование для измерения по методу эталонной антенны.....	53
3.3 Процедуры измерения.....	54
3.3.1 Процедура измерения по методу вертикального зондирования.....	54
3.3.2 Процедура измерения на борту воздушного судна.....	57
3.3.3 Процедура измерения по методу эталонной антенны	61
3.4 Представление данных.....	63
4 Ожидаемые на практике различия между рассчитанными и измеренными на местах характеристиками антенн диапазонов ОВЧ и УВЧ	63

	<i>Стр.</i>
4.1 Факторы, влияющие на характеристики отдельной антенны и общие характеристики антенной системы.....	63
4.1.1 Поддерживающие конструкции.....	63
4.1.2 Значительные по габаритам конструкции, расположенные вблизи антенной мачты	63
4.1.3 Климатические факторы.....	64
4.2 Сравнение рассчитанных и измеренных параметров антенны и диаграмм направленности.....	64

Часть 2

Приложения 1

Практические аспекты антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ

1 Введение

Цель данной части – дать описание современных методов измерения диаграмм направленности отдельных антенн и антенных систем. В частности, наиболее точным и результативным подходом, как представляется, является использование временного метода.

В части 2 также описываются отклонения встречающихся на практике диаграмм направленности от рассчитанных в соответствии с процедурой, представленной в части 1.

Кроме того, рассматривается, как некоторые факторы, например поддерживающие конструкции, близость других излучающих систем и т. д., влияют на общую диаграмму направленности.

2 Измерение характеристик антенных систем

Перед установкой отдельных антенн на площадке необходимо произвести измерения для оценки реальных характеристик этих антенн в противоположность проектным данным.

Кроме того, важно оценить характеристики отдельных антенн при объединении антенн с различными азимутальными направлениями в более сложные антенные системы.

2.1 Место измерения

Место измерения должно тщательно выбираться, поскольку оно влияет на точность и воспроизводимость измерений. В частности, необходимо соблюдать следующие условия:

- отсутствие источников помех;
- должно быть предусмотрено подходящее расстояние между испытуемой и эталонной антеннами, чтобы избежать индуктивной связи и, следовательно, фазовых и амплитудных искажений;
- для правильного расположения антенн должна быть предусмотрена надлежащая высота антенной мачты;
- место измерения должно иметь достаточно плоскую поверхность в целях приближения к идеальной отражающей или поглощающей поверхности;
- отсутствие препятствий, вызывающих многочисленные отражения.

2.2 Измеряемые параметры

К ним обычно относятся:

- амплитудная диаграмма направленности антенны;
- фазовая диаграмма направленности антенны;
- коэффициент усиления;
- согласование полного сопротивления.

2.3 Методы измерения

Для измерения характеристик антенн используются два основных подхода: FDM (измерение в частотной области) и TDM (измерение во временной области).

В настоящее время используется метод FDM, поскольку он не требует дорогого измерительного оборудования. Однако разработанный в последнее время метод TDM позволяет получить лучшие характеристики при возросшей стоимости оборудования.

2.3.1 Метод измерения в частотной области (FDM)

При этом методе используется передающая антенна с известными характеристиками, подключенная к соответствующему РЧ генератору. Передаваемый сигнал принимается испытываемой антенной, которая может вращаться на 360° в азимутальной плоскости. Амплитудная и фазовая диаграммы направленности (см. п. 6.2 части 1) могут быть получены путем сравнения сигналов, полученных на различных азимутальных направлениях.

Сигнал, принимаемый испытываемой антенной, состоит из одного прямого и нескольких отраженных лучей, в зависимости от характеристик места приема, частоты, местоположения эталонной антенны, боковых лепестков диаграммы направленности и т. д.

Реальные диаграммы направленности должны определяться с учетом только прямых лучей. Фактически, отраженные лучи влияют на результирующую измеренную диаграмму направленности отдельных антенн таким образом, что при их использовании для расчета более сложных антенных систем, ожидаются существенные отклонения рассчитанной диаграммы направленности антенной системы от измеренной. Эти отклонения могут быть особенно значительными при оценке минимумов и боковых лепестков.

Коэффициент усиления обычно измеряется с помощью абсолютного метода с обращением внимания на тщательный контроль за влиянием отраженных лучей.

2.3.2 Метод измерения во временной области (TDM)

Измерения амплитудной и фазовой диаграмм направленности могут производиться с определенной большей точностью при использовании метода TDM, поскольку влияние отраженных лучей может быть почти полностью исключено из процедуры измерения.

Такое усовершенствование основано на использовании прямого и обратного преобразования Фурье, связанного с аналитическим процессом выбора.

Полная блок-схема системы (включая измерительное оборудование и антенны) приведена на рисунке 30.



Поскольку отношение выхода по напряжению во временной области к импульсному напряжению на входе, по определению, является преобразованием Фурье передаточной функции системы, амплитудно-частотная характеристика системы (при наличии двух каналов распространения) может быть определена путем использования анализатора спектра или аналогичных приборов.

Произведя обратное преобразование Фурье амплитудно-частотной характеристики, можно получить временную характеристику, содержащую составляющие по прямому каналу и по каналу с отражением. Эти составляющие могут быть разделены во временной области из-за разности длины трасс. Ширину импульса на входе следует оптимизировать в соответствии с типом испытываемой отдельной антенны, имея в виду, что более короткие импульсы обеспечивают более точную избирательность.

Аналитический процесс выбора улучшает избирательность путем исключения нежелательных характеристик во временной области. Его можно применять к различным составляющим временной области для получения амплитудно-частотной характеристики составляющих прямого канала или канала с отражениями.

Поскольку характеристика канала является линейной, амплитудно-частотные характеристики составляющих двух трасс различаются только по коэффициенту ослабления для случая амплитудной характеристики и по линейному сдвигу фазы – для случая фазочастотной характеристики.

Однако отражения из-за рассогласования между передатчиком и его антенной, равно как и между приемником и его антенной, должны удерживаться на приемлемых уровнях путем использования высококачественных кабелей и разъемов. Следует избегать вращающихся сочленений.

На рисунках 31 и 32 приведены примеры амплитудных и фазовых диаграмм направленности для случаев применения или неприменения временного метода.

РИСУНОК 31

Амплитудная и фазовая диаграммы направленности в случае, если измерение во временной области не используется

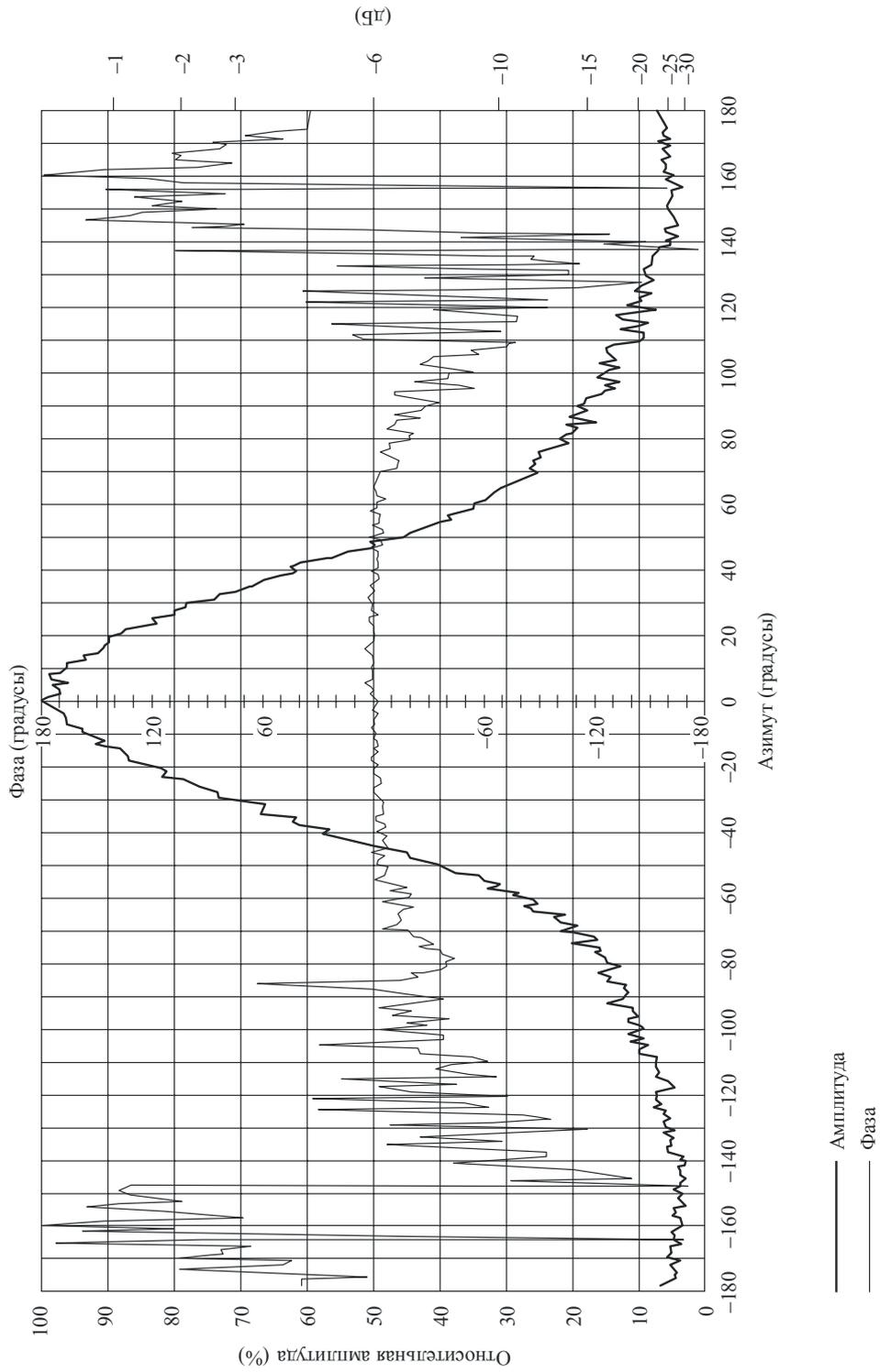
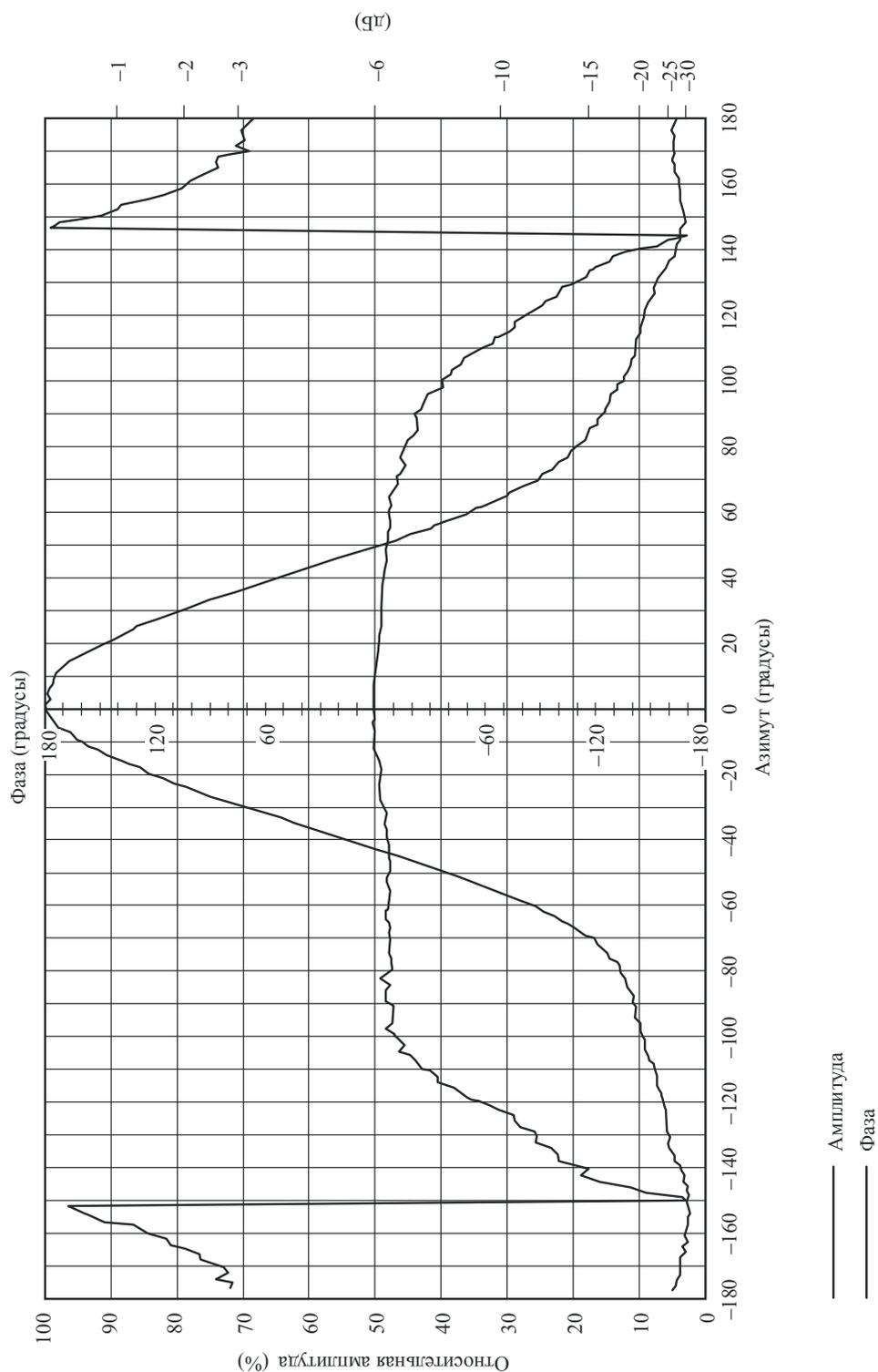


РИСУНОК 32

Амплитудная и фазовая диаграммы направленности при использовании измерения во временной области



BS.1195-32

2.4 Измерительное оборудование

Измерительная система состоит из мощного РЧ-генератора с достаточным для обеспечения соответствующего отношения S/N уровнем, измерителя напряженности поля и векторного вольтметра для определения фазового центра. Рекомендуется использовать более сложные измерительные приборы, управляемые компьютером, такие как анализатор спектра или схемный анализатор.

2.5 Процедуры измерения

Процедуры измерения могут различаться в зависимости от измеряемых параметров и имеющихся в наличии приборов. В любом случае должны соблюдаться следующие условия:

- Индуктивная связь между антеннами должна быть сведена к минимуму, т. е. расстояние R между антеннами должно превышать 10λ . Это обеспечит отношение амплитуд поля в ближней и дальней зонах, составляющее по крайней мере 36 дБ.
- Искажение фазы в плоскости падающей волны также необходимо свести к минимуму для обеспечения хорошей минимальной избирательности. Искажение фазы, следовательно, не должно превышать $\pi/8$ или $R > 2 D^2/\lambda$.
- Ширина диаграммы направленности передающей антенны должна обеспечивать изменение амплитуды излучаемого фронта волны в направлении испытываемой антенны, не превышающее 0,25 дБ.
- Высота антенны должна выбираться так, чтобы свести к минимуму пересечение главным лепестком передающей антенны поверхности земли на месте измерения. Амплитуда отраженных лучей, таким образом, может быть снижена. Рекомендуется выбирать высоту антенны так, чтобы это привело к расположению первого нуля вертикальной диаграммы направленности передающей антенны в направлении основания башни.

Если необходимо произвести измерения согласования полного сопротивления, следует надлежащим образом выбрать расположение антенны, чтобы избежать индуктивной связи и отражений от препятствий. В общем случае главный лепесток диаграммы направленности антенны должен быть направлен вверх, для того чтобы можно было упростить измерение эффективной отражаемой и передаваемой мощности.

В методе FDM используется синусоидальный тестовый сигнал, частота которого находится в пределах полосы рабочих частот антенны. Затем на приемной антенне проводится серия измерений сигнала на различных частотах с предварительно определенным угловым шагом. Измеренные значения амплитуды затем нормируются по отношению к максимуму, с тем чтобы получить относительные значения ослабления, выраженные в дБ. Измеренные значения фазы выражаются в виде разности фаз относительно эталонного угла. В методе TDM используется импульсный тестовый сигнал соответствующей длительности. Диаграмма направленности может быть получена с помощью значений амплитудно-частотной характеристики импульсного сигнала, "очищенной" во всем угловом секторе.

Для использования в расчетах диаграммы направленности обычно определяется как амплитудная, так и фазовая диаграмма направленности.

Коэффициент усиления антенны измеряется путем использования двух идентичных приборов, поскольку передающая и приемная антенны устанавливаются на одинаковой высоте и ориентированы на условия передачи максимальной мощности. В этом случае при использовании метода вертикального зондирования в режиме FDM на каждой измеряемой частоте должна выбираться соответствующая общая высота антенны для облегчения определения прямого луча.

В методе TDM две антенны также ориентируются на условия передачи максимальной мощности. Поскольку отраженный луч может быть исключен, расположение антенны не требует изменений, как в методе FDM. Согласование полного сопротивления антенны измеряется как отношение передаваемой и отраженной мощностей с помощью направленного ответвителя.

Имеющиеся в настоящее время новейшие системы измерения позволяют перевести эталонную плоскость на вход антенны и тем самым избежать ошибок из-за измерительного оборудования. Метод TDM дает возможность определить любые рассогласования, имеющиеся в измерительном оборудовании.

2.6 Представление данных

Плоскость, содержащая элементы антенны, принимается за эталонную плоскость для представления диаграммы направленности антенны.

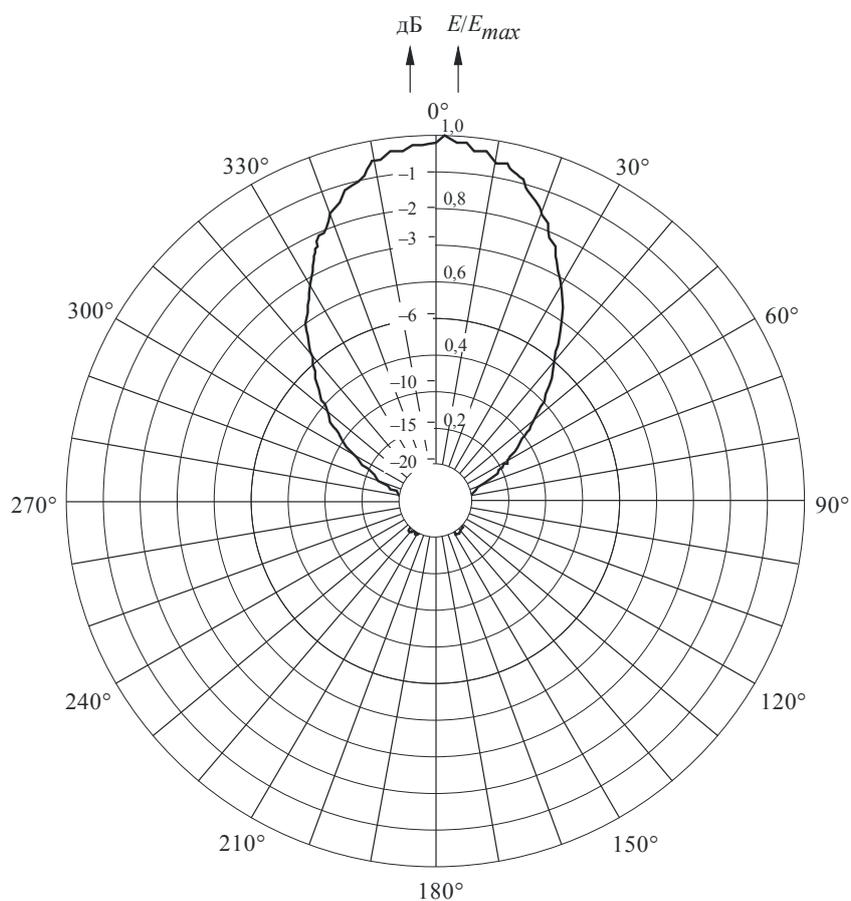
Амплитудная диаграмма направленности в эталонной и в соответствующей ортогональной плоскостях должна быть представлена в прямоугольной и полярной системах координат. Фазовая диаграмма направленности должна быть представлена только в прямоугольной системе координат.

Коэффициент усиления и данные по согласованию полного сопротивления должна представляться в прямоугольной системе координат.

На рисунках 33–38 приведены некоторые примеры результирующих амплитудных и фазовых диаграмм направленности в двух плоскостях как в прямоугольной, так и полярной системах координат.

Используется линейный масштаб; значения выражены как в процентах, так и в дБ.

РИСУНОК 33
Амплитудная диаграмма направленности (полярные координаты)
8-дипольной панельной антенны, измеренная в плоскости E



BS.1195-33

3 Измерения характеристик антенных систем на местах

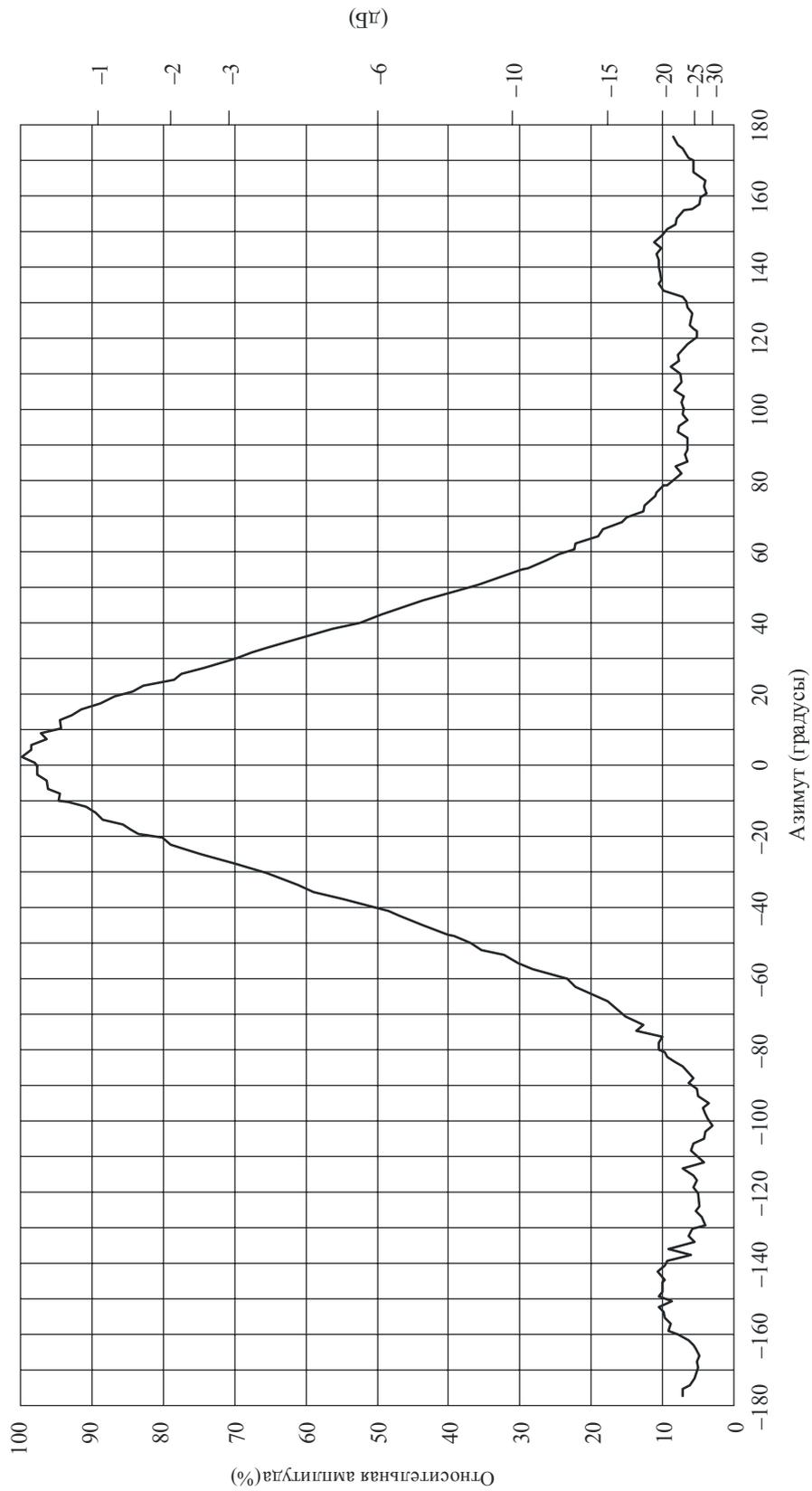
Поскольку эффективность радиосистемы зависит, главным образом, от ее антенны, диаграммы направленности и коэффициент усиления антенны должны определяться с соответствующей точностью. Если на диаграмму направленности сложной антенной системы в условиях эксплуатации влияют несколько неконтролируемых факторов, она может быть определена путем измерения на местах.

3.1 Методы измерений

Описываются три основных метода измерения характеристик антенны на местах. Хотя в принципе может использоваться любой метод, реальный выбор будет зависеть от бюджета системы, сложности установки, необходимого оборудования и времени измерения. Например, метод измерения на борту воздушного судна более дорогостоящий по сравнению с любым другим методом, однако такие измерения могут производиться за короткое время на нескольких антенных системах, расположенных на одной и той же или на соседних башнях. И наоборот, при более экономичных наземных методах обычно требуется больше времени для получения таких же результатов, а иногда из-за ограничений, обусловленных окружающей средой, надежные измерения просто невозможны.

РИСУНОК 34

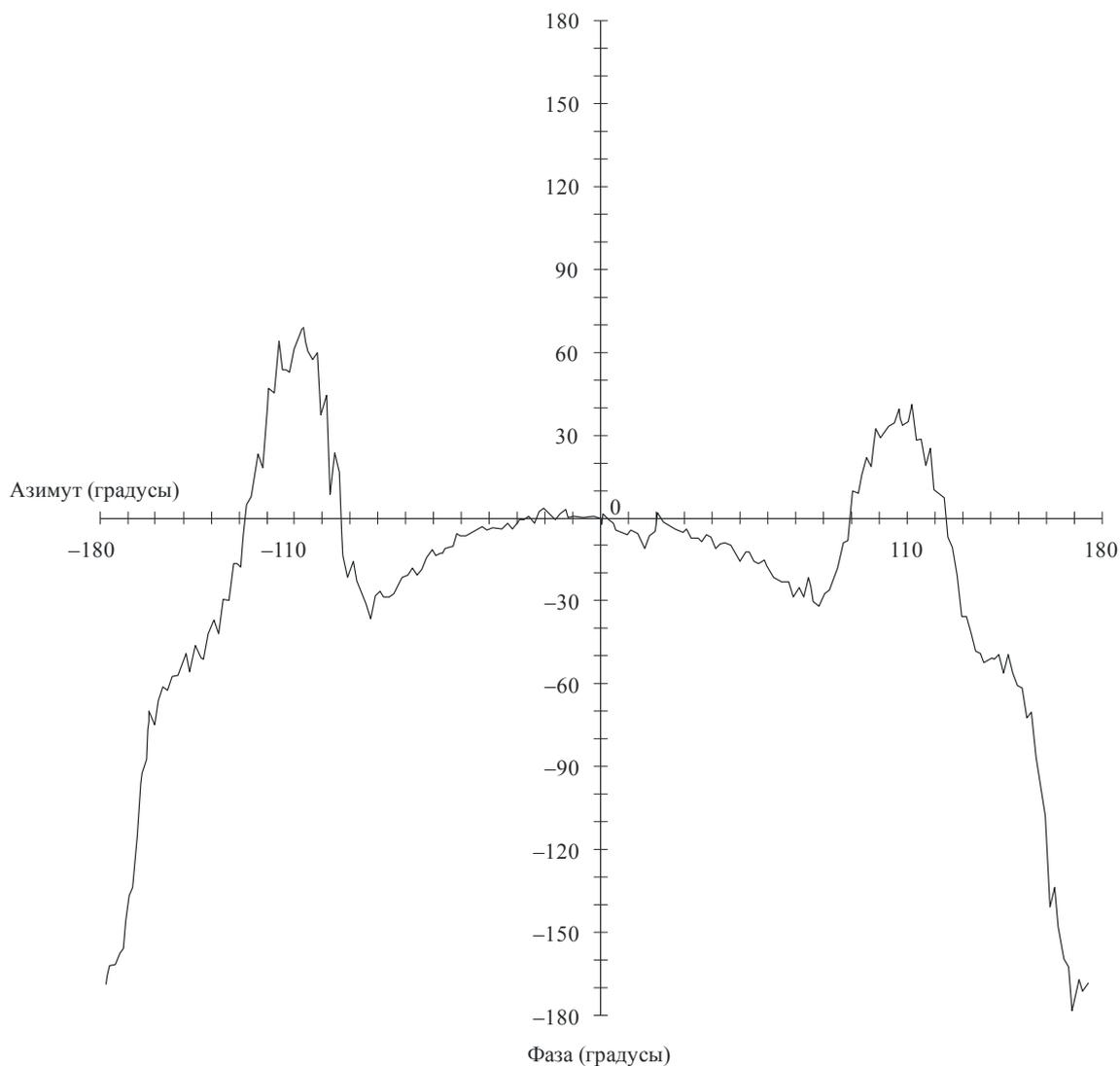
Амплитудная диаграмма направленности (в прямоугольной системе координат)
8-дипольной панельной антенны, измеренная в плоскости E



BS.1195-34

РИСУНОК 35

Фазовая диаграмма направленности (в полярной системе координат)
8-дипольной панельной антенны, измеренная в плоскости Е



BS.1195-35

3.1.1 Метод вертикального зондирования

Этот метод требует специального автофургона, оборудованного антенной на мачте, которая может вертикально подниматься в точке измерения для определения изменений электромагнитного поля в зависимости от высоты над уровнем земли.

Измерения дают интерференционную картину, которая является результатом комбинации прямых и отраженных лучей. При наличии только одного отраженного луча эта картина представляется косинусоидальной функцией, имеющей первый максимум на высоте $h = \lambda d / 4H$, где:

λ : длина волны;

d : расстояние от передатчика и приемной антенны;

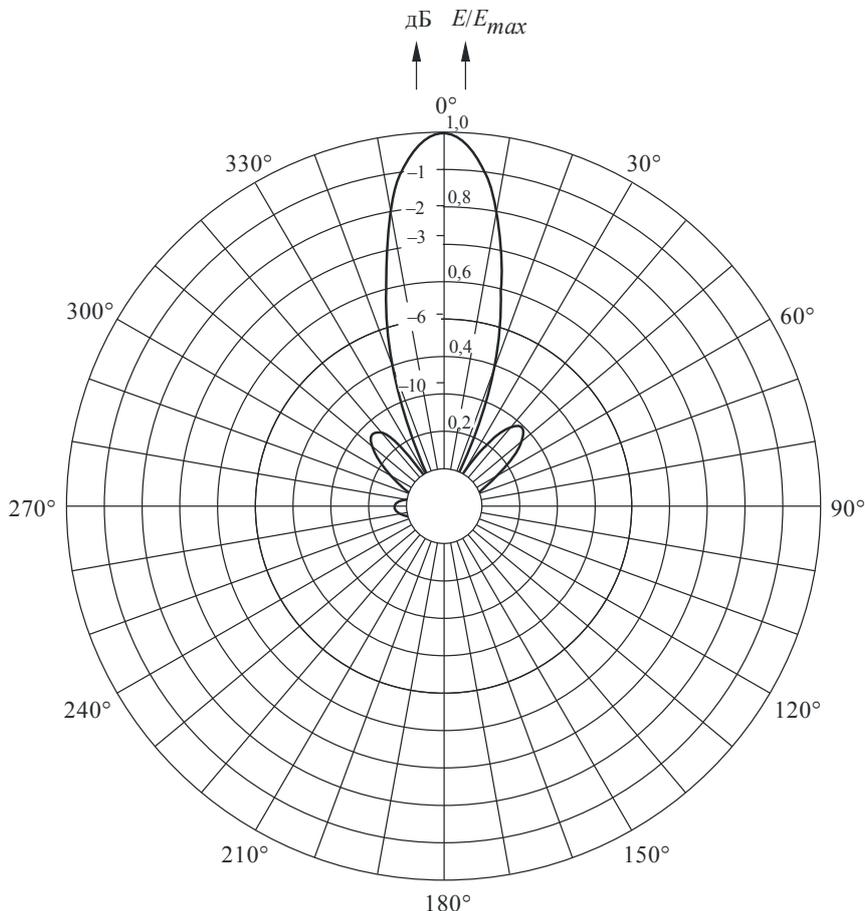
H : относительная высота передающей антенны относительно точки измерения.

В этих условиях можно без труда определить значение электромагнитного поля при распространении в свободном пространстве, а затем сравнить его с соответствующим теоретическим значением (рассчитанным в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.525) для оценки общих характеристик

антенны. В общем случае точки измерения, показывающие большие отклонения интерференционной картины относительно теоретической функции, должны быть отброшены. Однако, если нельзя установить подходящие точки измерения из-за ограничений, обусловленных окружающей средой, необходимо рассмотреть альтернативные методы.

РИСУНОК 36

Амплитудная диаграмма направленности (в полярной системе координат)
8-дипольной панельной антенны, измеренная в плоскости Н



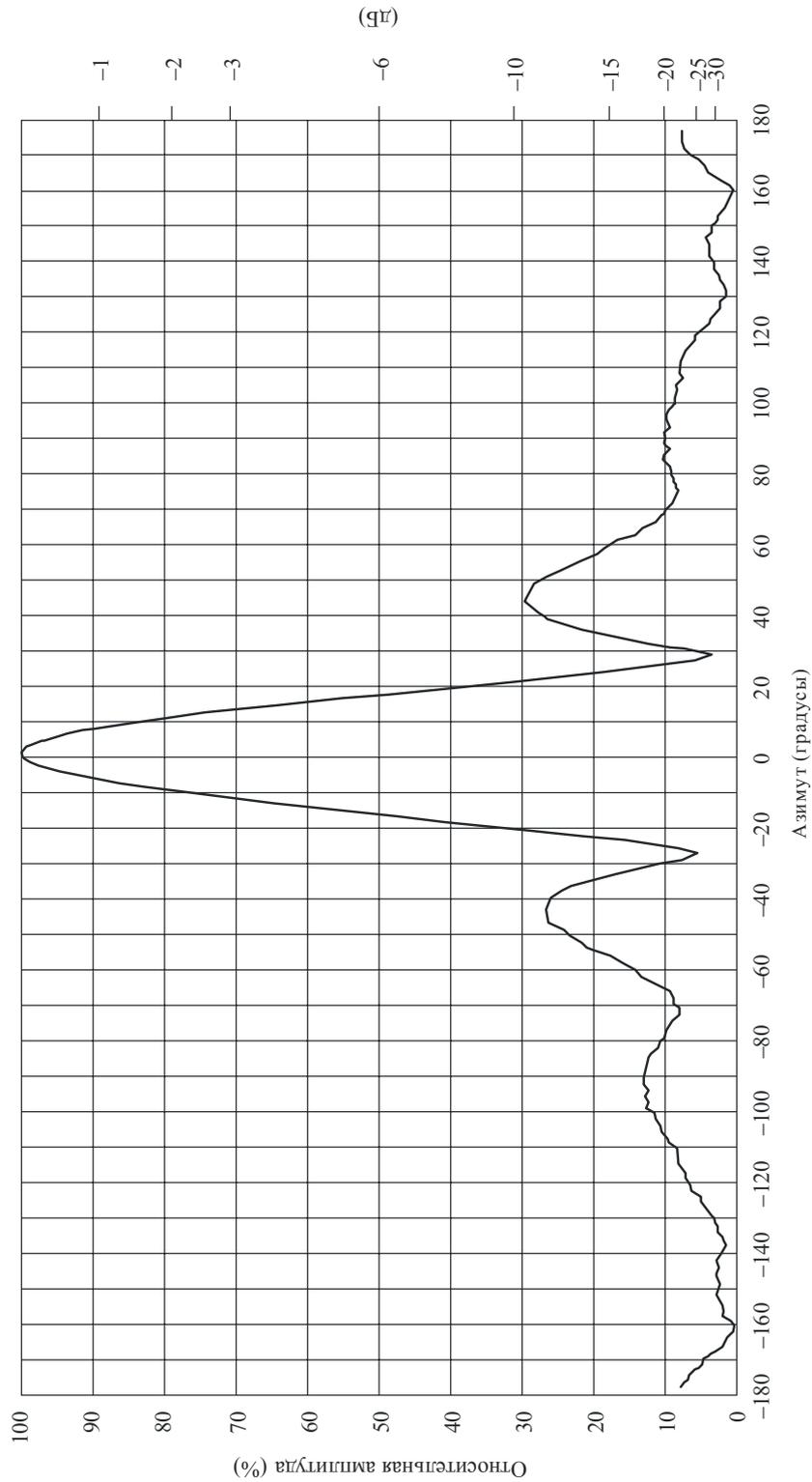
BS.1195-36

3.1.2 Метод измерения на борту воздушного судна

Считается, что этот метод, основанный на бортовом измерительном оборудовании, дает наиболее точные и надежные результаты, если необходимо определить коэффициент усиления и диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В этом случае измерительный приемник устанавливается на вертолете (предпочтительный вид воздушного судна для таких измерений), а испытуемая антенна работает в режиме передачи. В некоторых случаях, особенно в нулях измеряемой диаграммы направленности, может потребоваться довольно высокая мощность передатчика для обеспечения достаточного отношения сигнал-шум в приемнике.

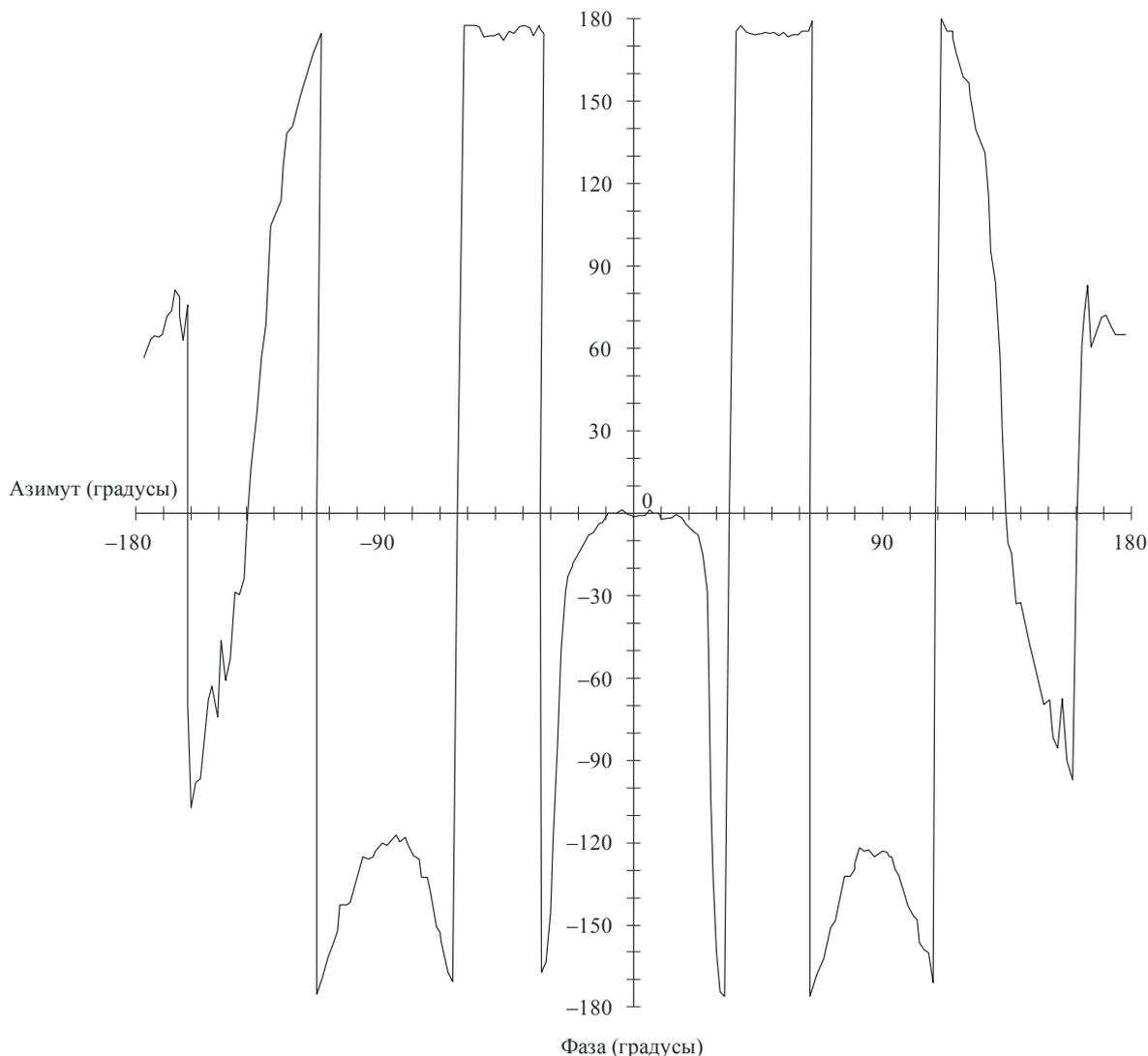
РИСУНОК 37

Амплитудная диаграмма направленности (в прямоугольной системе координат)
8-дипольной панельной антенны, измеренная в плоскости Н



BS.1195-37

РИСУНОК 38

**Фазовая диаграмма направленности (в полярной системе координат)
8-дипольной панельной антенны, измеренная в плоскости Н**

BS.1195-38

3.1.3 Метод эталонной антенны

Этот метод основан на использовании эталонной антенны с известными характеристиками. Эталонная антенна устанавливается как можно ближе к измеряемой антенне и возбуждается сигналом, имеющим по возможности такую же рабочую частоту. Сравнивая измеренные напряженности поля, создаваемые обеими антеннами в одной и той же точке, можно определить диаграмму направленности испытуемой антенны. Влияние рельефа местности на принимаемую напряженность поля, следовательно, исключается.

3.2 Измерительное оборудование

3.2.1 Измерительное оборудование для вертикального зондирования

На специально оборудованный автофургон, имеющий независимый электрический генератор, устанавливается следующее оборудование:

- втягиваемая мачта, которую можно поднять для перехвата первого максимума величины напряженности поля (см. также п. 3.3.1) и которая соединена через соответствующий интерфейс с компьютером, осуществляющим сбор данных об углах места и азимуте приемной антенны на мачте;
- соответствующий измерительный приемник, имеющий:
 - большой динамический диапазон;
 - хорошую электромагнитную совместимость;
 - устойчивость и стабильность при наличии вибрации и температурных колебаний;
- приемная антенна, которая должна быть установлена на мачте;
- система определения местоположения, такая как глобальная система определения местоположения (GPS);
- управляющий компьютер, связанный с системой определения местоположения и интерфейсом мачты, для обработки измеренных данных.

3.2.2 Оборудование для измерения на борту воздушного судна

Система измерения диаграммы направленности может состоять из следующих элементов:

- измерительный приемник (который может управляться в режиме сканирования), имеющий:
 - большой динамический диапазон;
 - хорошую электромагнитную совместимость (ЭМС);
 - высокую устойчивость и стабильность (относительно вибраций и температурных колебаний на вертолете);
- приемная антенна (измерительный зонд), установленная таким образом, чтобы влияние вертолета на диаграмму направленности приемной антенны было сведено к минимуму. Этого можно достичь с помощью мачты, которая может быть опущена по крайней мере на 3 м ниже вертолета;
- система определения местоположения, такая как GPS, использующая приемник на борту воздушного судна и приемник, расположенный на земле, а также точный высотомер;
- управляющий бортовой компьютер с периферийным оборудованием для обработки данных.

На рисунке 41 показана упрощенная блок-схема оборудования для этого метода измерения.

Наземные эталонные приемники (GPS) используются для получения дифференциальной GPS, обеспечивающей очень высокую точность. Тем не менее, хотя GPS и является наиболее совершенной системой для определения местоположения во время полета, могли бы использоваться другие системы, обеспечивающие необходимую точность.

Оборудование для обработки данных включает компьютер и периферийное устройство для графической регистрации диаграммы направленности.

На передающей стороне необходим источник сигнала, имеющий стабильный и калиброванный уровень выходной мощности. Этим источником может быть обычный передатчик.

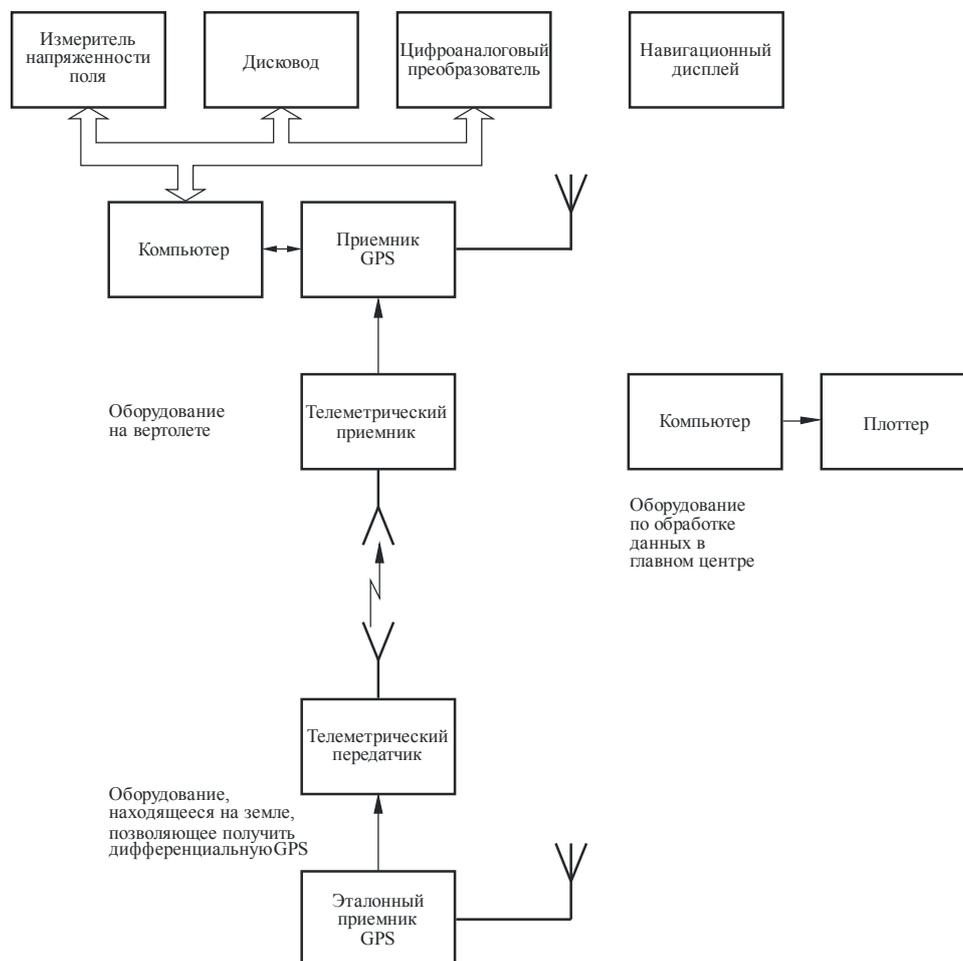
3.2.3 Оборудование для измерения по методу эталонной антенны

В состав этого оборудования могут входить следующие элементы:

- один или два измерительных приемника, в зависимости от желаемой процедуры измерения, имеющих:
 - большой динамический диапазон;
 - высокую электромагнитную совместимость (ЭМС);

- высокую устойчивость и стабильность (относительно вибраций и температурных колебаний в автофургоне);
- приемная антенна, установленная на крыше автофургона (логопериодическая или турникетная антенна в соответствии с избранной процедурой);
- управляющий компьютер и периферийное оборудование для обработки данных, установленные в фургоне;
- система определения местоположения;
- эталонная антенна с калиброванной диаграммой направленности;
- переносной измеритель напряженности поля, работающий от батареек.

РИСУНОК 39

Блок-схема измерительного оборудования

BS.1195-39

3.3 Процедуры измерения**3.3.1 Процедура измерения по методу вертикального зондирования**

До проведения фактических измерений требуется выполнить предварительную процедуру ввода данных о передающей и приемной антеннах.

Необходимо ввести следующие данные о передающей антенне:

- название и местоположение передающей станции;
- географические координаты;

- частота и поляризация излучения;
- максимальное значение э.и.м. (дБК);
- высота антенны над уровнем моря;
- теоретическая диаграмма направленности в вертикальной плоскости (возможно, должна быть скорректирована относительно измеряемой диаграммы).

Необходимо ввести следующие данные о приемной антенне:

- коэффициент усиления;
- затухание в кабеле.

После выбора подходящей для измерения точки вводятся соответствующие географические данные, такие как название места, высота над уровнем моря и соответствующие координаты (возможно, полученные системой GPS).

Представленные выше данные обрабатываются надлежащим образом для получения расстояния, азимута и углов зенита выбранной точки измерения относительно передатчика и соответствующего значения теоретической относительной амплитудной диаграммы направленности в вертикальной плоскости.

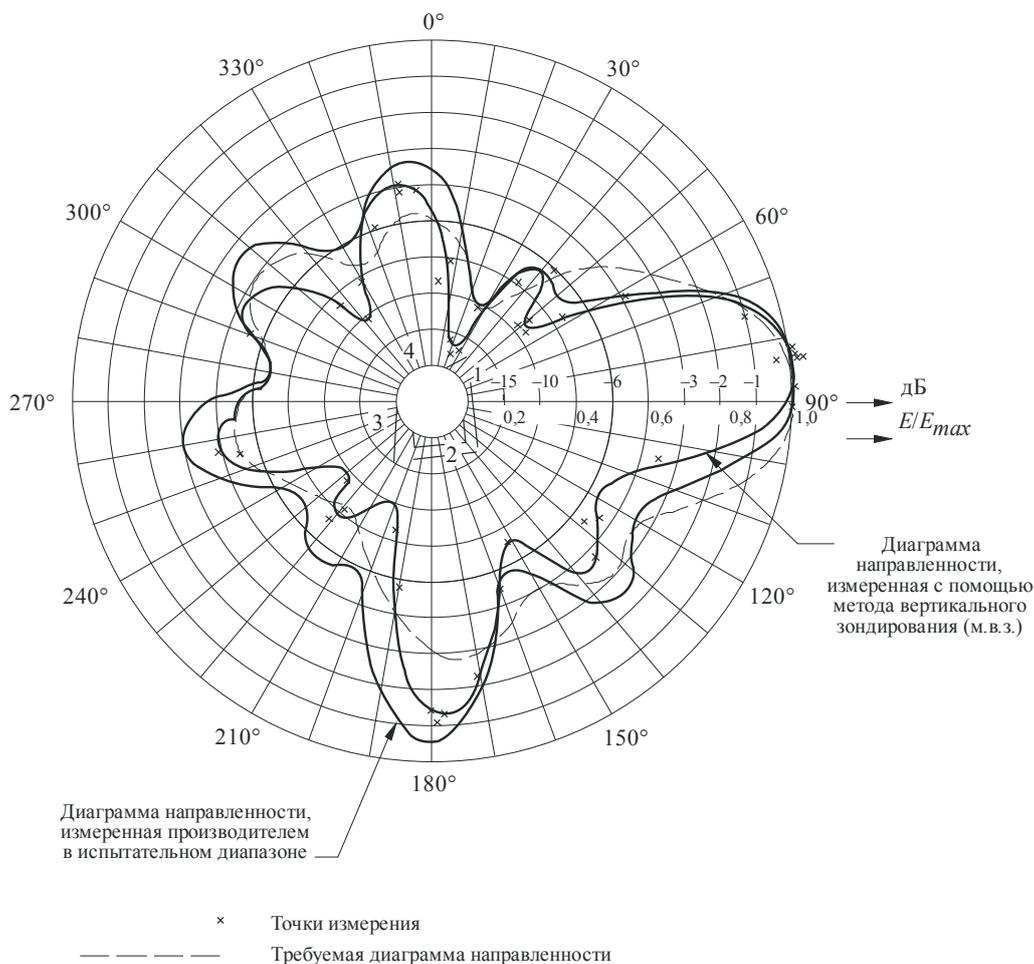
После того как приемная антенна была правильно ориентирована в направлении передатчика, мачта поднимается и берутся отсчеты принимаемого напряжения на одинаковых шагах возвышения (обычно 20 см). Все значения данных по напряжению затем соответствующим образом запоминаются и обрабатываются для получения типичной интерференционной картины. Эта картина в последующем анализируется для расчета поля прямой волны.

3.3.1.1 Обработка данных

После проведения соответствующей процедуры проверки входных данных, принятые значения подвергаются дальнейшей обработке для получения серии относительных значений E/E_{max} , где E_{max} – максимальное значение, измеренное в соответствии с главным лепестком. Эти данные затем представляются графически в виде диаграммы направленности в полярной системе координат и сравниваются с теоретической диаграммой направленности в вертикальной плоскости (см. рисунок 40).

РИСУНОК 40

Рассчитанная и измеренная диаграммы направленности в горизонтальной плоскости



BS.1195-40

3.3.1.2 Практическое применение метода вертикального зондирования

До проведения фактических измерений необходимо произвести соответствующий анализ условий вблизи испытуемой антенны, имея в виду, что все точки измерения должны быть выбраны вдоль дорог, чтобы они были доступны для испытательного фургона.

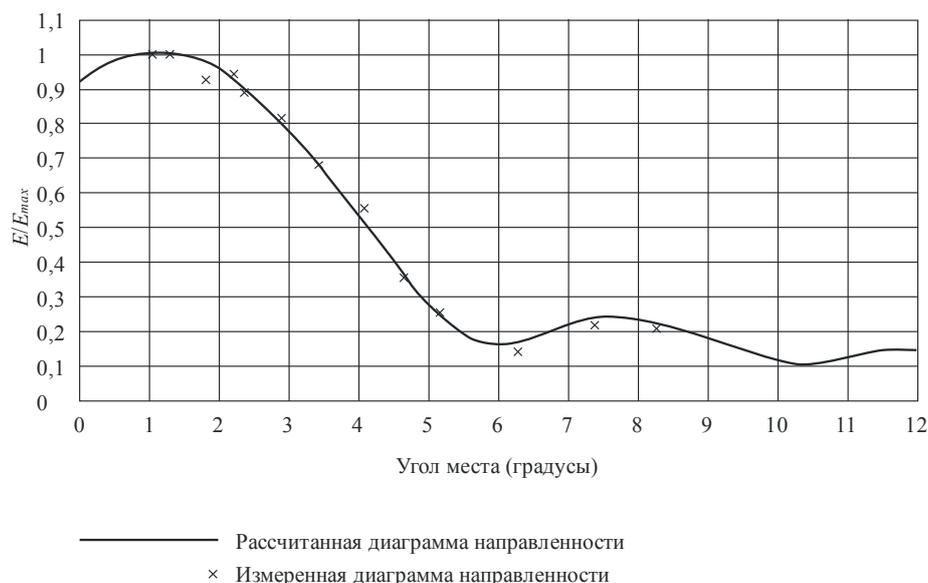
Рекомендуется цифровая карта рельефа местности (DTM) с соответствующей компьютерной программой для получения профиля рельефа местности от места расположения антенны к точке измерения. Фактически с помощью профиля рельефа местности можно легко определить условия распространения по линии прямой видимости для выбранной точки измерения относительно передающей антенны.

Поскольку измеренные значения диаграммы направленности в горизонтальной плоскости должны быть соотнесены с измеренным максимальным значением диаграммы направленности в вертикальной плоскости, вначале необходимо определить последнюю диаграмму направленности.

Типичным случаем является антенная система с поддерживающей конструкцией в форме прямоугольника с различными отдельными антеннами, установленными с каждой стороны. Такое расположение необходимо для проведения серии различных измерений в точках, выбранных в каждом угловом секторе, охватываемом отдельной антенной. В этом случае в соответствующем секторе выбирается первая подходящая точка. Для того чтобы получить диаграмму, показывающую относительное изменение электромагнитного поля по отношению к его максимальной величине, измерение диаграммы направленности в вертикальной плоскости начинается с этой точки. Диаграмма, приведенная на рисунке 41, относится к типичному случаю, когда передающая антенна установлена на вершине холма над зоной обслуживания.

РИСУНОК 41

Рассчитанная и измеренная диаграммы направленности в вертикальной плоскости



BS.1195-41

Измерение диаграммы направленности в горизонтальной плоскости производится после получения диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Поскольку на интерференционной картине высота первого максимума принимаемого поля задается выражением $h = \lambda d / 4H$ (см. п. 3.1.1), высота h убирающейся мачты должна быть тщательно выбрана. Реальное значение должно представлять собой соответствующий компромисс между его максимумом, определяемым механическими соображениями, и его минимумом, определяемым углом наклона, который может повлиять на максимальное значение, к которому относятся относительные значения диаграммы направленности в вертикальной плоскости.

В ОВЧ диапазоне получение подходящего компромиссного значения может оказаться затруднительным, поскольку изменения диаграммы направленности в вертикальной плоскости могут оказывать значительное влияние на измерения диаграммы направленности в горизонтальной плоскости.

Кроме того, в направлениях, где измеренное значение получено на основе измерения двух отдельных антенн, имеющих различные диаграммы направленности в вертикальной плоскости, так же как и в перпендикулярных направлениях, основной вклад определить непросто. В этих случаях возможным решением может быть выбор измерительной точки на расстоянии d , где угол наклона дает примерно одинаковое значение для обеих диаграмм направленности в вертикальной плоскости. В любом случае окончательная оценка прямого электромагнитного поля остается за оператором, который, изучая форму интерференционной картины, должен отбросить те измеренные значения, которые имеют большие отличия относительно теоретической функции.

3.3.2 Процедура измерения на борту воздушного судна

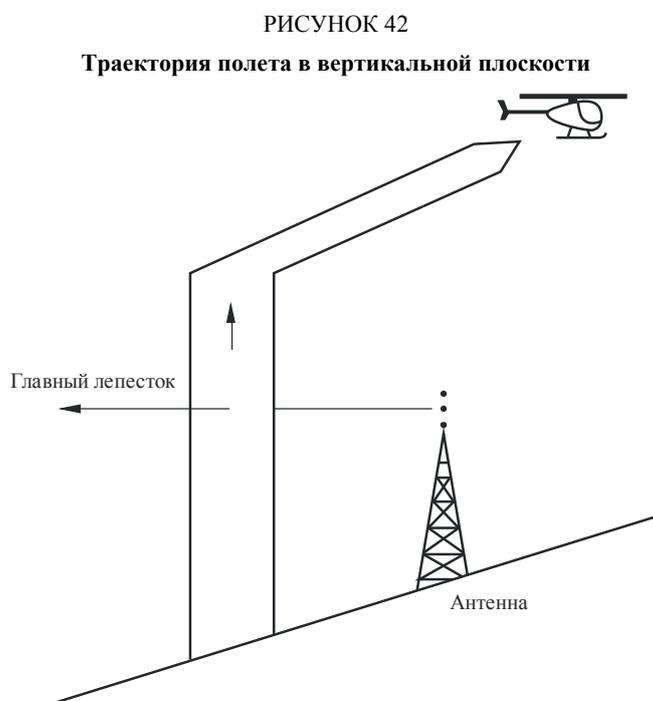
Комплект измеренных диаграмм направленности обычно состоит из одной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости (ГДН), измеренной при угле места максимального излучения, и пяти диаграмм направленности в вертикальной плоскости (ВДН), измеренных на каждой частоте в конкретных направлениях при угле места, варьирующемся в пределах от -15° до $+3^\circ$.

Прежде чем приступить к фактическим измерениям, необходимо провести тщательную подготовку. Должно быть проверено как бортовое, так и наземное оборудование для подтверждения их нормальной работы. Генератор испытательных сигналов (или обычный передатчик), питающий испытываемую антенну, должен быть установлен на калиброванное значение мощности.

После взлета воздушного судна проверяется работа оборудования определения местоположения (GPS) и, при необходимости, определяются координаты испытываемой антенны и вводятся в компьютер как начало системы координат измерения.

Во время полета, в ходе которого производятся измерения, вертолет должен следовать по предварительно определенному маршруту, как описано ниже. Фактические траектории полета записываются с использованием выходных данных GPS, которые посредством соответствующей компьютерной обработки указывают реальное местоположение вертолета относительно измеряемой антенны. Эта информация о местоположении вертолета также предоставляется пилоту в режиме реального времени, помогая ему выдерживать заданный маршрут полета.

Вертикальные измерения производятся путем комбинации полетов в режиме вертикального подъема и захода на посадку. Измерения начинаются, когда вертолет находится близко от земли на соответствующем расстоянии, зависящем от вида испытываемой антенны. Затем вертолет набирает высоту, соответствующую желаемому максимальному углу места. Если интерес представляет полная диаграмма направленности в вертикальной плоскости вплоть до зенита, то вертолет после достижения высоты, составляющей приблизительно 1000 м (20°), следует курсом захода на посадку над антенной (см. рисунок 42).



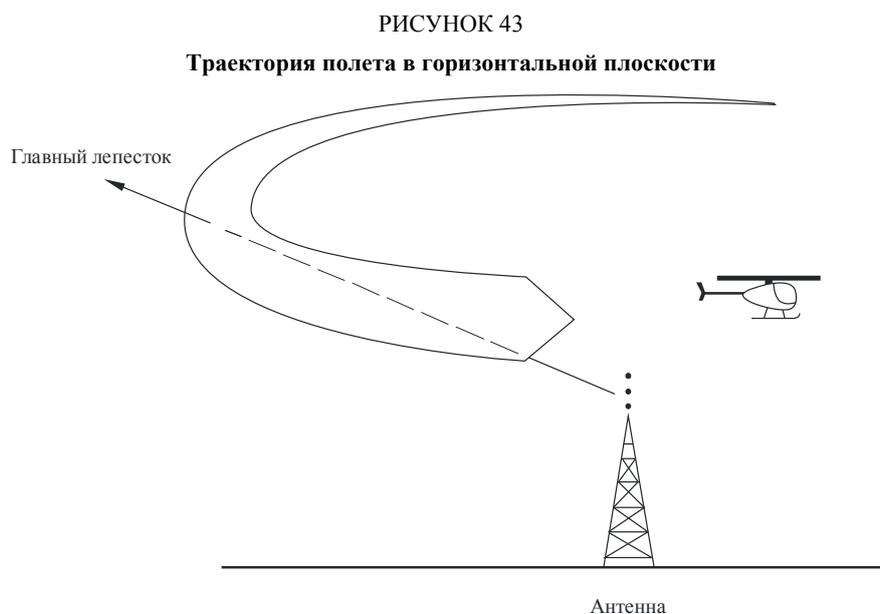
BS.1195-42

Результаты вертикальных измерений включают значение угла места в случае максимального коэффициента усиления (т. е. максимум главного лепестка), при котором необходимо измерять горизонтальную диаграмму. При этом угле места вертолет летит вокруг антенны по кругу, радиус которого зависит от вида испытываемой антенны (см. рисунок 43). При такой траектории полета весьма важно точно поддерживать заданный угол места, поскольку трудно произвести компенсацию для любого отклонения.

Расстояния для измерения как ВДН, так и ГДН должны определяться перед каждым измерением (см. п. 3.3.2.2).

Принимаемая величина напряженности поля измеряется бортовым измерительным приемником (или измерителем напряженности поля). В то же время бортовой компьютер принимает от GPS уточненные данные о местоположении антенны. Информация о местоположении затем используется для преобразования уровней измеренного входного сигнала в значения напряженности поля на нормированном расстоянии с учетом характеристик приемной антенны.

Измерительный приемник должен производить измерения в усредненном режиме, т. е. каждый отсчет уровня сигнала будет состоять из среднего значения принимаемого сигнала во временном интервале, равном 100 мс, для исключения влияния модуляции. Измерительный приемник должен быть способен работать в режиме сканирования, чтобы облегчить измерения по крайней мере на трех частотах за один маршрут полета, в ходе которого проводятся измерения. Кроме того, измерительная система должна позволять производить по крайней мере два отсчета на градус в горизонтальной плоскости и по крайней мере пять отсчетов на градус – в вертикальной. Эти отсчеты должны храниться вместе с соответствующими данными об их местоположении.



BS.1195-43

Измеренные значения отображаются на экране в виде диаграммы направленности антенны, с тем чтобы оператор на борту воздушного судна мог проверить правильность работы системы измерения во время полета.

3.3.2.1 Обработка измеренных данных

После завершения измерений на борту воздушного судна производится анализ измеренных данных, рассчитываются диаграммы направленности и вычерчиваются кривые. При таком анализе отсчеты уровня сигнала преобразуются в значения напряженности поля на нормированном расстоянии с учетом характеристик приемной антенны и информации о местоположении. Все явно ошибочные отсчеты отбрасываются.

Затем на основе напряженности поля и соответствующего ему расстояния рассчитывается значение э.и.м. в данном направлении. Обычно графически представленные диаграммы направленности выражены относительно э.и.м. в направлении максимального излучения.

Коэффициент усиления антенны рассчитывается как отношение:

$$G_d = \frac{e.r.p.}{P_{in}},$$

где P_{in} – мощность, поступающая в антенну.

3.3.2.2 Соображения по использованию метода измерения на борту воздушного судна (вертолета)

При измерении антенн в диапазонах ОВЧ/УВЧ необходимо свести к минимуму влияние поверхности земли.

На рисунке 44 показано, как выбрать расстояние измерения для минимизации отражений при данной высоте антенны. Более короткие расстояния приводят к более широким углам в точке отражения, снижающим отраженную энергию. Следовательно, выбранное расстояние должно быть как можно более коротким, но достаточным для того, чтобы обеспечивать условия приема в поле в дальней зоне. Кроме того, приемная антенна должна быть направленной и иметь управляемую диаграмму направленности, чтобы она была постоянно ориентирована на испытываемую антенну.

Формула, которая обычно используется для расчета минимального расстояния измерения с точностью, достаточной для обеспечения условий приема в поле в дальней зоне, имеет следующий вид:

$$d = \frac{2 h^2}{\lambda},$$

где:

d : расстояние измерения (м);

h : раскрыв антенны (м);

λ : длина волны (м).

На практике обычно используется типичное расстояние измерения, равное 2000–2500 м.

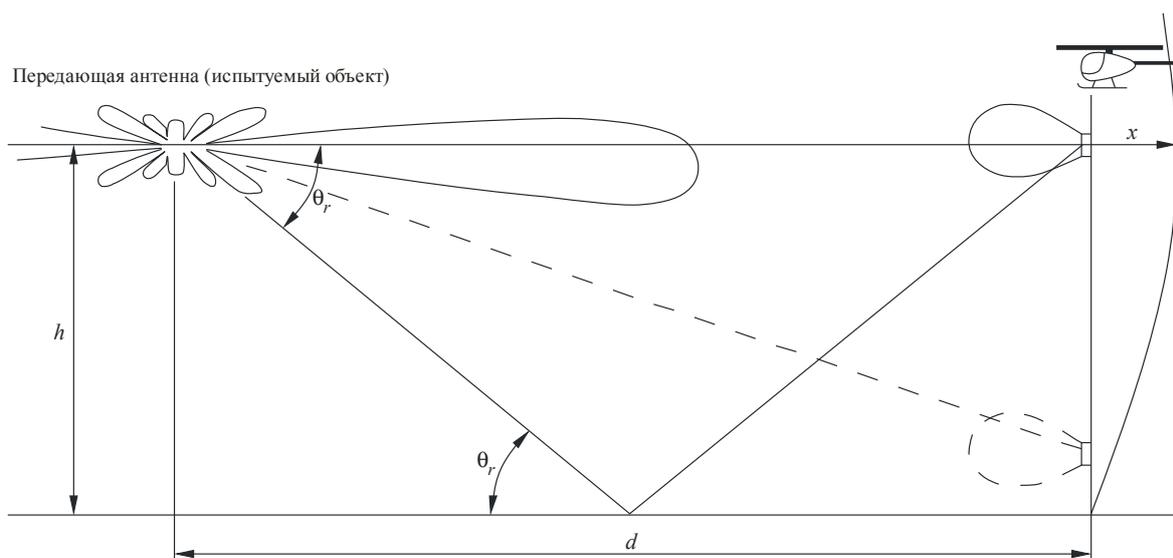
Точность результатов зависит от характеристик оборудования, используемого для измерения напряженности поля, и от местоположения. Следовательно, необходимо тщательно рассмотреть следующие факторы:

- характеристики приемной антенны и ее установка на вертолете;
- измерительный приемник (измеритель напряженности поля), включая соединительные кабели;
- система определения местоположения, используемая для получения реальных трехмерных координат и для оказания помощи пилоту.

При использовании GPS погрешность в записанном местоположении вертолета в двухмерных координатах составляет порядка 5 м. Эта погрешность приведет к ошибке местоположения, составляющей менее 0,5 дБ.

Важнейшим моментом является поддержание заданной высоты в горизонтальной траектории полета. При измерении антенны диапазона УВЧ с большим усилением вертикальное отклонение угла на $0,3^\circ$ (видимого со стороны испытываемой антенны) может привести к ошибке, равной 0,5 дБ. Следовательно, на более коротких расстояниях будет труднее поддерживать заданную высоту. Для обеспечения соответствующей надежности измерений на горизонтальной траектории полета, ГДН должна измеряться по крайней мере дважды для получения правильных результатов.

РИСУНОК 44
Представление маршрута полета



BS.1195-44

3.3.3 Процедура измерения по методу эталонной антенны

Измерение диаграммы направленности в вертикальной плоскости с помощью эталонной антенны должно начинаться с максимумов диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. Измерение диаграммы направленности в горизонтальной плоскости может начинаться только с максимума диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Некоторые факторы окружающей среды, такие как густой лес и растительность, могут повлиять на измерения, проводимые с помощью обычного измерителя напряженности поля, поскольку они приводят к временным флуктуациям измеряемой напряженности поля. Для получения значимых результатов, измеренные данные, возможно, следует объединять в интервале времени, составляющем несколько минут.

Могут применяться две различные процедуры:

- измерения напряженности поля от пункта к пункту с помощью измерителя напряженности поля и логопериодической измерительной антенны, установленной на высоте 50 см над землей;
- одновременная непрерывная запись обоих значений напряженности поля с помощью двух измерителей напряженности поля, соединенных с соответствующим записывающим устройством в испытательном автофургоне. Используется типичная измерительная турникетная антенна диаметром 0,7 м, установленная на крыше автофургона и помещенная на высоте 3,2 м над землей.

Сквозные измерения с помощью эталонной антенны с непрерывной регистрацией напряженности поля обычно дают хорошие результаты, даже если передатчик не находится на расстоянии прямой видимости.

Измерение расстояний требует определенного времени для преобразования зарегистрированных значений напряженности поля в выбранную систему координат (т. е. для определения зависимости угла места от расстояния до передатчика и высоты над уровнем моря). Кроме того, может оказаться практически невозможным поддерживать допуск, составляющий примерно $\pm 3^\circ$ в радиальном направлении от передатчика, при движении по тем дорогам, которые могут быть доступны для испытательного автофургона.

Хотя измерения сигнала от пункта к пункту являются менее сложными, результаты этих измерений сравнимы со сквозными измерениями сигнала только при условии распространения сигнала на расстояние прямой видимости и при просвете в рельефе местности. В этих условиях благодаря использованию простого переносного измерителя напряженности поля, работающего от батареек, можно свободно перемещаться по зоне измерения, независимо от имеющихся и доступных дорог.

Поскольку мощность, излучаемая при меньших углах места, не достигает поверхности земли, обычно можно выбрать расстояние до точки измерения, которое приведет к "чистой" диаграмме направленности. Хотя некоторые точки измерения должны быть отброшены из-за неблагоприятных условий рельефа (растительность или недоступная местность), расположение и глубина минимумов могут в общем случае быть определены с достаточной точностью.

3.3.3.1 Обработка измеренных данных

Формы кривых измеряемых диаграмм направленности могут быть вычислены на основе непрерывных от пункта к пункту записей напряженности поля.

Графически представленные диаграммы направленности являются абсолютными диаграммами, показывающими зависимость эффективной излучаемой мощности (э.и.м.) от угла места, если излучаемая мощность эталонного излучателя точно известна.

При использовании метода сквозного измерения сигнала при разрешающей способности по дальности примерно 200 м и трехчленном уравнении, основанном на логарифмическом усреднении, устраняются случайные флуктуации и становится очевидной реальная форма диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Благодаря большому числу измеренных значений точность при меньших углах места выше, чем при больших углах. Следовательно, при углах места $> 3^\circ$ измерения должны производиться с разрешающей способностью по дальности < 200 м, с тем чтобы можно было получить достаточное число точек измерения.

Опыт измерения сигнала из конца в конец на испытательных автофургонах показывает, что надежные измерения диаграммы направленности с помощью эталонной антенны требуют значительного количества измеренных значений для проведения соответствующих статистических оценок и обеспечения значительного сглаживания диаграммы направленности.

Если из-за сильных отражений имеют место большие изменения и нельзя найти стабильного медианного значения, то точка измерения становится бесполезной. Эти точки определяются отраженным сигналом, приходящим с разных направлений, которые не соответствуют направлению на передатчик.

Индивидуальные точки измерения при каждом угле места могут находиться на расстоянии в диапазоне от нескольких метров до даже нескольких сотен метров, в зависимости от местных условий. Поэтому важно определить угол места с допуском менее чем примерно $+0,05^\circ$ и азимутом примерно $+2,5^\circ$.

Необходимо, чтобы оценка измеренных результатов, т. е. определение медианного значения, соответствующего угла места и графическое отображение диаграммы направленности производились в месте измерения. Только в этом случае можно определить, достаточно ли измеренных значений для графического отображения диаграммы направленности или необходимы дополнительные точки измерения.

3.3.3.2 Соображения по использованию метода эталонной антенны

Рекомендуется соблюдать некоторую осторожность при определении угла места точки измерения по расстоянию до нее и ее относительной высоте. В то время как расстояние от передатчика можно точно определить из карт, высоту над уровнем моря часто нельзя определить точно, особенно в холмистой местности. На малых расстояниях от передатчика могут возникать значительные угловые ошибки. Использование барометрического высотомера может улучшить ситуацию. В случае видимости передатчика угол места может измеряться непосредственно теодолитом.

Дополнительная информация может быть получена также из результатов процедур измерения с использованием эталонной антенны, поскольку интерес представляют не только характеристики излучения в условиях свободного пространства, но и увеличение принимаемой напряженности поля при использовании направленной передающей антенны.

Такой повышенный коэффициент усиления, иногда называемый эксплуатационным коэффициентом усиления, приводит к увеличению принимаемой энергии в любой точке приема при использовании антенны, направленность которой выше, чем у эталонной антенны. Было установлено, что медианное значение эксплуатационных потерь отличается примерно на +1 дБ относительно коэффициента усиления в свободном пространстве и примерно на +2 дБ на неоднородном рельефе местности.

Эксплуатационный коэффициент усиления антенн с низкой высотой центра, установленных в горах, более чем на 2 дБ ниже коэффициента усиления в свободном пространстве.

Таким образом, измерение с помощью эталонного излучателя позволяет получить характеристики излучения системы передающей антенны с учетом характеристик рельефа местности в зоне обслуживания. В отличие от измерений с вертолета измеряется диаграмма направленности в свободном пространстве.

3.4 Представление данных

Ссылаясь на азимутальную плоскость и плоскость зенита, предлагается представить амплитудную диаграмму направленности в горизонтальной плоскости в полярных координатах, а амплитудную диаграмму направленности в вертикальной плоскости – в прямоугольных координатах.

4 Ожидаемые на практике различия между рассчитанными и измеренными на местах характеристиками антенн диапазонов ОВЧ и УВЧ

Сравнение рассчитанных и измеренных диаграмм направленности позволяет осветить влияние факторов, не принимаемых во внимание в расчетах. Некоторые важные факторы описаны ниже.

4.1 Факторы, влияющие на характеристики отдельной антенны и общие характеристики антенной системы

4.1.1 Поддерживающие конструкции

На характеристики антенной системы оказывают влияние следующие факторы:

- Взаимная связь между отдельными антеннами приводит к изменению амплитуды и фазы их токов питания. Результирующая диаграмма направленности, следовательно, будет отличаться от рассчитанной.
- Металлическая решетчатая поддерживающая конструкция, вероятно, будет действовать как пассивная щелевая антенна, особенно если ее размеры близки к резонансным.
- Боковое смещение необходимо для достижения стабильных характеристик в отношении согласования. Однако это смещение должно быть ограничено, если оно приводит к экранированию соседних отдельных антенн.
- Поскольку размер рефлектора у большинства направленных отдельных антенн ограничен, поддерживающая конструкция позади отдельной антенны в определенной степени также будет действовать как вторичный отражатель.

В случае смещения вдоль стороны поддерживающей конструкции такой вторичный отражатель будет ассиметричным относительно излучателя и диаграмма направленности будет перекошена.

Аналогичные эффекты возникают во всех случаях ассиметричной установки на башне.

- Другие антенные системы на той же башне, платформы, опоры, лестницы, плохое расположение распределительных кабелей и т. д. могут также повлиять на характеристики – обычно непредсказуемым образом.

4.1.2 Значительные по габаритам конструкции, расположенные вблизи антенной мачты

Факторы, влияющие на антенные системы, могут быть обусловлены естественной окружающей средой и промышленными конструкциями.

Окружающая среда оказывает постоянное и одинаковое влияние на форму диаграммы в соответствии с естественными характеристиками места расположения системы.

С другой стороны, конструкции, находящиеся вблизи антенной мачты, изменяют диаграмму направленности в определенных направлениях в зависимости от расстояния и от их физических характеристик. Результирующее влияние может быть очень значительным в зависимости от числа и габаритов ближайших конструкций.

Указанные выше факторы могут по-разному влиять на характеристики отдельных антенн и более сложных антенных систем. Такая разница обуславливается эффектами связи и затухания, а в общем случае комбинацией обоих факторов. В соответствии с преобладающим влиянием эффектов, указанных выше, характеристики в ОВЧ и УВЧ диапазонах могут оказаться весьма различными.

4.1.3 Климатические факторы

Нагревание на солнце приведет к изгибу поддерживающих конструкций и общему изменению наклона луча.

Директорные антенны очень чувствительны к обледенению. Это явление в экстремальных случаях может привести к инверсии отношения мощностей, излучаемых по переднему и заднему лепесткам. Во время обледенения для всех типов антенн рассогласование сопротивления увеличится.

4.2 Сравнение рассчитанных и измеренных параметров антенны и диаграмм направленности

Ожидаемое различие между рассчитанной и измеренной диаграммами направленности может составлять от нескольких десятых дБ до нескольких десятков дБ.

Это различие может быть более значительным, в частности, при близости нулей диаграммы направленности и боковых лепестков. При преобладании эффектов связи большие различия могут ожидать на ОВЧ, чем на УВЧ. И наоборот, если преобладает эффект затухания, большие различия должны ожидать на УВЧ. Кроме того, влияние таких изменений зависит от сложности антенной системы.

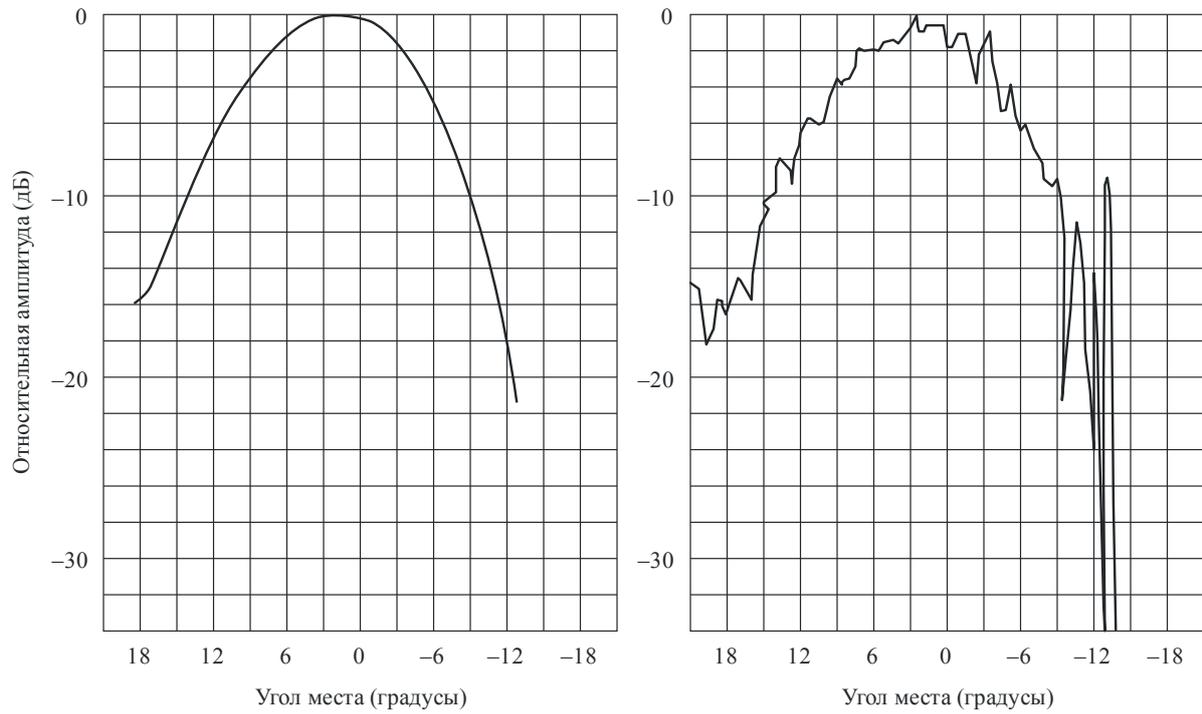
Различие между рассчитанными и измеренными характеристиками обычно меньше для отдельного элемента антенной системы из-за простоты настройки параметров как на ОВЧ, так и на УВЧ.

При наличии сложных систем различия возникают из-за комбинированного влияния механической и электрической сборки и окружающей среды в виде расположенных вблизи конструкций. Наличие зданий также может привести к существенным различиям, особенно в зоне минимальных значений, как показано на рисунке 45.

На этом рисунке представлены рассчитанная и измеренная диаграммы направленности панельной антенной системы, работающей в ОВЧ диапазоне. Различия становятся очевидными, например, при угле наклона около 10° , где расчетное значение равно 10 дБ, а фактическое измеренное значение составляет примерно 20 дБ. Отражения от поверхности земли и крыш оказывают значительное влияние на форму диаграммы.

РИСУНОК 45

Рассчитанные и измеренные диаграммы направленности



a) Рассчитанная диаграмма направленности

b) Измеренная диаграмма направленности

Часть 3

Приложения 1

Программное обеспечение для расчета радиовещательных антенн в диапазонах ОВЧ и УВЧ

1 Введение

В этой части Приложения 1 дается описание практического применения компьютерной программы, используемой для расчета диаграммы направленности антенной системы в соответствии с формулами, приведенными в п. 7.2 части 1.

Дополнение 1 к части 3 содержит перечень основных операций, используемых в пакете программного обеспечения, которые могут быть адаптированы к конкретным требованиям пользователя, т. е. для частотного планирования, разработке антенных систем и т. д.

Требования к аппаратуре будут во многом зависеть от применения программного обеспечения и могут по-разному влиять на минимальное использование аппаратуры, которое может варьироваться от применения простых программируемых карманных калькуляторов до применения универсальных ЭВМ по управлению радиочастотным спектром.

2 Архитектура программы

Применение приведенных в п. 7.2 части 1 формул для расчета диаграммы направленности антенной системы требует наличия нескольких входных параметров для соответствующего определения условий расчета. К ним могут относиться параметры общего характера, такие как:

- несущая частота изображения (ТВ) или частота канала (ЧМ);
- присвоенная рабочая частота антенной системы;
- число и типы отдельных антенн, входящих в состав антенной системы;
- площадь поперечного сечения башни и длина стороны;

а также параметры, конкретно относящиеся к каждой отдельной антенне, такие как:

- процентное соотношение поступающей в антенну мощности передатчика;
- фаза напряжения питания;
- угол наклона;
- смещение вдоль стороны башни;
- вертикальное разнесение между элементами.

После того как будет установлен тип отдельных антенн, выбранных для объединения в антенную систему, могут быть определены их амплитудные и фазовые диаграммы направленности.

Эти диаграммы направленности должны быть предварительно введены в память с помощью специальной программы ввода из пакета программ, задачей которой является формирование подходящего файла, содержащего представленные в цифровом виде амплитудные и фазовые диаграммы направленности выбранных отдельных антенн. Эта простая программа должна позволять вводить значения амплитуды и фазы диаграмм направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях (при максимальном коэффициенте усиления, см. п. 6.3), представленные производителем, с желаемой угловой разрешающей способностью. В дальнейшем будет использована соответствующая интерполяция для получения значений диаграммы в направлениях, не совпадающих с теми, которые использовались в процессе взятия отсчетов.

С помощью соответствующего преобразования все вышеуказанные параметры могут определить входные данные, необходимые для основных программ расчета диаграммы направленности, перечисленных в Дополнении 1. Выходными данными этих расчетных программ является значение э.и.м. в желаемом угловом направлении, определенное в виде азимутальных углов и углов места.

Дополнение 1

к Части 3

Основная подпрограмма для расчета диаграммы направленности антенны

1 Введение

Одна из имеющихся функций в процедуре позволяет рассчитывать диаграмму направленности антенной системы, состоящей из элементарных излучающих источников, произвольно расположенных в трехмерном пространстве.

В настоящем разделе анализируются как теоретические аспекты, так и способы реализации упомянутой выше функции.

Необходимые входные данные включают:

- диаграмму направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях каждого элементарного источника, используемого в антенной системе;
- геометрическое описание антенной системы, т. е. расположение и опорное направление каждого элементарного источника;
- указание мощности, подводимой к каждому источнику.

Выходные данные, которые могут быть получены, включают:

- диаграмму направленности в горизонтальной плоскости при любом угле места;
- диаграмму направленности в вертикальной плоскости при любом азимуте;
- коэффициент усиления антенной системы.

Кроме того, с помощью графического представления можно наложить некоторые участки диаграммы направленности в трехмерном пространстве для непосредственного сравнения диаграмм в различных направлениях пространства.

Ниже дается описание теоретических основ для расчета диаграмм направленности, а также перевод на язык программирования высокого уровня.

2 Теоретические основы

Предположим, что имеется N излучающих источников в прямоугольной системе координат x - y - z (см. рисунок 46) где:

- плоскость x - y представляет собой горизонтальную плоскость;
- ось y – направление на север в горизонтальной плоскости;
- ось z – местная вертикаль.

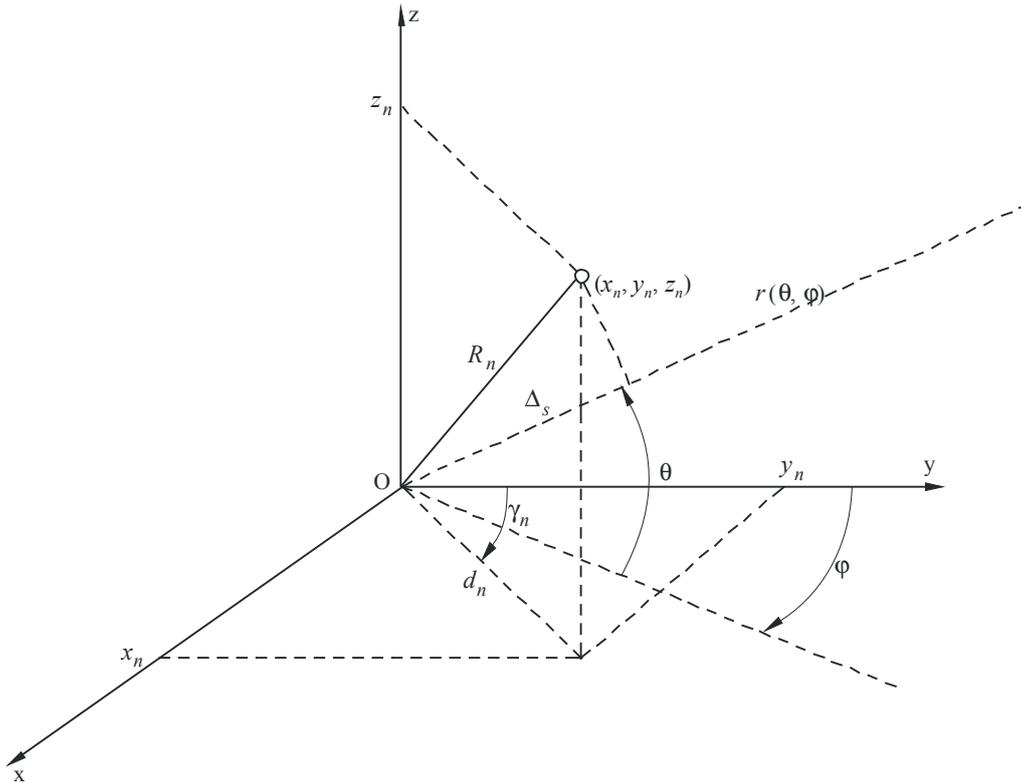
Местоположение n -го излучающего источника задается в прямоугольных координатах (x_n, y_n, z_n) или аналогичным образом с помощью вектора положения:

$$\mathbf{R}_n = x_n \mathbf{x}_0 + y_n \mathbf{y}_0 + z_n \mathbf{z}_0. \quad (32)$$

Местоположение n -го источника может быть выражено также в цилиндрических координатах (d_n, γ_n, h_n) , связанных с соответствующими прямоугольными координатами (x_n, y_n, z_n) через следующие соотношения (см. рисунок 46):

$$\begin{aligned} x_n &= d_n \sin \gamma_n \\ y_n &= d_n \cos \gamma_n \\ z_n &= h_n \end{aligned} \quad (33)$$

РИСУНОК 46



BS.1195-46

Коэффициент усиления по напряжению, полученный на основе суммирования электромагнитных полей N излучающих источников в направлении наблюдения (θ, φ) , равен:

$$G_{Vtot}(\theta, \varphi) = \left| \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) e^{j\Delta\psi_n(\theta, \varphi)} \right|, \quad (34)$$

где a_n – процент мощности, питающей n -й излучатель, а $G_{Vn}(\theta, \varphi)$ – коэффициент усиления по напряжению в направлении (θ, φ) , который может быть получен из амплитудной диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях n -го источника с учетом опорного направления и вращения вокруг него.

Что касается фазы вектора при суммировании (34), общая разность фаз, в радианах, n -го источника в направлении наблюдения может определяться следующим выражением:

$$\Delta\psi_n(\theta, \varphi) = \Delta\psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) + \Delta\psi_{n\ diag}(\theta, \varphi) + \Delta\psi_{n\ el}, \quad (35)$$

в котором $\Delta\psi_{n\ pos}(\theta, \varphi)$ – разность фаз местоположения (рад) n -го источника в направлении наблюдения относительно источника, расположенного в начале системы координат (см. рисунок 46), и может быть выражена следующим образом:

$$\Delta\psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s, \quad (36)$$

где:

$$\Delta s = (\mathbf{R}_n \cdot \mathbf{r}).$$

\mathbf{R}_n задается формулой (32), а \mathbf{r} может быть выражено, учитывая, что на рисунке 46 координата θ является положительной в полупространстве $Z < 0$, следующим образом:

$$\mathbf{r} = \cos \theta \sin \varphi \mathbf{x}_0 + \cos \theta \cos \varphi \mathbf{y}_0 - \sin \theta \mathbf{z}_0. \quad (37)$$

Раскрывая скалярное произведение, получим разность фаз местоположения n -го источника:

$$\Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos\theta \sin\varphi x_n + \cos\theta \cos\varphi y_n - \sin\theta z_n \right). \quad (38)$$

Указывая местоположение n -го источника в цилиндрических координатах (d_n, γ_n, h_n) (см. выражение (33)), выражение (38) приобретает вид:

$$\Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos\theta \sin\varphi d_n \sin\gamma_n + \cos\theta \cos\varphi d_n \cos\gamma_n - \sin\theta h_n \right) \quad (39)$$

или аналогично:

$$\Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\cos\theta \cos(\gamma_n - \varphi) d_n - h_n \sin\theta \right]. \quad (40)$$

В выражении (35) $\Delta\Psi_{n\ diag}(\theta, \varphi)$ представляет собой разность фаз (рад) фазовой диаграммы n -го источника в направлении (θ, φ) , а $\Delta\Psi_{n\ el}$ – разность фаз питания n -го источника, которая не зависит от направления наблюдения (θ, φ) .

Преобразуя выражение (34), получаем:

$$\begin{aligned} G_{Vtot}(\theta, \varphi) &= \left| \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) \cos \Delta\Psi_n(\theta, \varphi) + j \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\varphi, \theta) \sin \Delta\Psi_n(\theta, \varphi) \right| = \\ &= \sqrt{\left(\sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) \cos \Delta\Psi_n(\theta, \varphi) \right)^2 + \left(\sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\varphi, \theta) \sin \Delta\Psi_n(\theta, \varphi) \right)^2}. \end{aligned} \quad (41)$$

3 Реализация программного обеспечения для расчета

Для обеспечения большей гибкости процедура была реализована в модульной структуре, а перевод на язык программирования высшего уровня сделан на языке "Си".

В следующих разделах рассматривается модуль, относящийся к функции $G_{Vtot}(\theta, \varphi)$, а также к другим функциям, с которыми он связан, и используемый для расчета общего коэффициента усиления по напряжению антенной системы, в состав которого входят все N излучающих источников в направлении наблюдения (θ, φ) .

3.1 Общие переменные

В этом разделе приводится перечень общих переменных, используемых модулями, описанными ниже. Кроме того, даются краткие количественные описания каждой переменной.

NUMS:	число излучающих источников;
TIPO[n]:	тип n -го излучающего источника; если все источники принадлежат к одному типу, TIPO[n]=1 для каждого n ;
DIAG_AMPH[]:	вектор, содержащий коэффициент усиления по напряжению, нормированный в соответствии с максимумом в горизонтальной плоскости с шагом 1° ;
AMPV_FRONT[]:	вектор, содержащий коэффициент усиления по напряжению, нормированный в соответствии с максимумом с передней стороны вертикальной плоскости с шагом 1° ;
AMPV_BACK[]:	вектор, содержащий коэффициент усиления по напряжению, нормированный в соответствии с максимумом с задней стороны вертикальной плоскости с шагом 1° ;
GVMAX[n]:	максимальный коэффициент усиления по напряжению n -го источника;

LAMBDA_LAV:	длина волны (см);
FI_O[n],TETA_O[n]:	азимут и угол места (рад) опорного направления n -го источника излучения;
RIB[n]:	значение угла вращения (градусы) n -го источника относительно его опорного направления;
POSX[n],POSY[n],POSZ[n]:	прямоугольные координаты местоположения n -го источника (см. рисунок 46);
FASE_EL[n]:	угол фазы питания n -го источника (рад);
A[n]:	коэффициент мощности питания n -го источника.

3.2 Функция расчета

3.2.1 Функция DIAG

Эта функция рассчитывает коэффициент усиления по напряжению источников излучения NUMS в направлении наблюдения (FI,TETA). Она соответствует G_{Vtot} (φ , θ), как описано в теоретических основах.

float DIAG(fi,teta)

```
double fi ,teta;          /* полярные координаты (азимут, угол места) направления
                           наблюдения, выраженные в радианах */
                           /* индикатор излучающего
                           источника */
{
  int n;
  double fase_tot;
  double aux0,reale,imag,aux;
  float amp_rad();
  double fase_rad();
  double fase_pos();
  double faseaux;
  reale=0.0;
  imag=0.0;
  for (n=0; n<NUMS;n++)
  {
    fase_tot = fase_rad (fi,teta,n) + fase_pos (fi,teta,n) + fase_el [n];
    aux0 = sqrt(a[n]) * amp_rad (fi,teta,n);
    reale = reale + aux0 * cos(fase_tot);
    imag = imag + aux0 * sin(fase_tot);
  }
  aux = sqrt((reale*reale) + (imag*imag));
  return(aux);
}
```

3.2.2 Функция AMP_RAD

Эта функция рассчитывает коэффициент усиления по напряжению в направлении наблюдения (FI,TETA) n -го источника, учитывая его амплитудную диаграмму направленности в горизонтальной плоскости (DIAG_AMPH[]), амплитудная диаграмма направленности в вертикальной плоскости с передней стороны (AMPV_FRONT[]) и с задней стороны (AMPV_BACK[]), а также направление и вращение источника. Это соответствует G_{Vn} (φ , θ), как описано в теоретических основах.

float AMP_RAD(fi,teta,n)

```
double fi ,teta;          /* полярные координаты (азимут, угол места) направления
                          наблюдения, выраженные в радианах */
int n;                   /* индикатор излучающего источника */
{
  double f2,t2;
  int m;
  int az,abb1,abb2;
  float aux;
  double abb;
  float ampv1,ampv2,ampv;
  m = tipo[n];
  RUOTA_RIB(n,fi,teta,&f2,&t2);
  az = (180./PI)*f2;
  abb = (180./PI)*t2;
  abb1 = abb;
  if (abb1 < 0)
    abb1 += 360;
  abb2 = abb1 + 1;
  if (az < 0)
    az += 360;
  if ((abb1==90)||(abb1==270))
    az = 0;
  /* коэффициент усиления по напряжению n-го источника в направлении (φ, θ) */
  if ((az > 90) && (az < 270))
  {
    /* интерполяция значений обратной амплитудной диаграммы направленности в
    вертикальной плоскости */
    ampv1 = ampv_back[m][abb1+90];
    ampv2 = ampv_back[m][abb2+90];
    ampv = ampv1 + (ampv2-ampv1)*(abb-abb1);
    aux = gvmax[m]*diag_amph[m][az]*ampv;
  }
  else
  {
    /* интерполяция значения прямой амплитудной диаграммы направленности в вертикальной
    плоскости */
    ampv1 = ampv_front[m][abb1+90];
    ampv2 = ampv_front[m][abb2+90];
    ampv = ampv1 + (ampv2-ampv1)*(abb-abb1);
    aux = gvmax[m]*diag_amph[m][az]*ampv;
  }
  return(aux);
}
```



```

aux *= (PI/180.);
return(aux);
}
RUOTA_RIB (n,fi,teta,fout,tout)
double fi ,teta;          /* полярные координаты (азимут, угол места) направления
                           наблюдения, выраженные в радианах */
int n;                    /* индикатор излучающего источника */
double *fout,*tout;      /* полярные координаты (азимут, угол места) направления, в
                           котором необходимо прочесть диаграмму направленности n-го
                           источника, с тем чтобы учесть его опорное направление и
                           вращение */

{
float aux;
double trib,fin,tin,arg;
double faux,taux,tgnum,tgden;
int az1,abb1;
/* опорное направление (fi_o[n],teta_o[n]) n-го излучающего источника */
tgnum= cos(teta)*sin(fi-fi_o[n]);
tgden= ( cos(teta)*cos(teta_o[n])*cos(fi-fi_o[n]) + sin(teta)*sin(teta_o[n]) );
fin = atan2(tgnum,tgden);
tin = asin( -cos(teta)*sin(teta_o[n])*cos(fi-fi_o[n]) + sin(teta)*cos(teta_o[n]) );
/* rib[n] градусов постоянное вращение n-го источника */
if (rib[n] != 0)
{
trib = (double) (PI/180.)*rib[n];
faux = atan2( cos(trib)*cos(tin)*sin(fin) - sin(trib)*sin(tin) , cos(tin)*cos(fin) );
arg = sin(trib)*cos(tin)*sin(fin) + cos(trib)*sin(tin);
if (arg >= 1)
    arg = 1.0;
if (arg <= -1)
    arg = -1.0;
taux = asin(arg );
}
else
{
faux = fin;
taux = tin;
}
if (faux>0)
    faux += 0.01;
else
    faux -= 0.01;
if (taux>0)
    taux += 0.01;
else
    taux -= 0.01;
(*fout) = faux;
(*tout) = taux;
}

```

3.2.4 Функция FASE_POS

Эта функция рассчитывает разность фаз в направлении наблюдения (φ , θ) n -го излучающего источника, расположенного в точке с координатами (x_n, y_n, z_n) (см. рисунок 46).

```
double FASE_POS (fi,teta,n)  
double fi ,teta;          /* полярные координаты (азимут, угол места) направления  
                           наблюдения, выраженные в радианах */  
int n;                    /* индикатор излучающего источника */  
{  
    double aux;  
    double deltas;  
    deltas = cos(teta)*sin(fi)*posx[n] + cos(teta)*cos(fi)*posy[n] - sin(teta)*posz[n] ;  
    aux = (2*PI/lambda_lav) * deltas;  
    return(aux);  
}
```
