

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R F.1336-4
(02/2014)

**Эталонные диаграммы направленности
всенаправленных, секторных и
других антенн для фиксированной и
подвижной служб в целях
применения в исследованиях совместного
использования частот
в диапазоне от 400 МГц до
приблизительно 70 ГГц**

Серия F
Фиксированная служба

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	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

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

Электронная публикация
Женева, 2015 г.

© ITU 2015

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 F.1336-4*

Эталонные диаграммы направленности всенаправленных, секторных и других антенн для фиксированной и подвижной служб в целях применения в исследованиях совместного использования частот в диапазоне от 400 МГц до приблизительно 70 ГГц

(Вопрос МСЭ-R 242/5)

(1997-2000-2007-2012-2014)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлены эталонные модели антенн, используемых в фиксированной службе и подвижной службе. Приведены пиковые и средние диаграммы направленности всенаправленных и секторных антенн в диапазоне от 400 МГц до приблизительно 70 ГГц, а также направленных антенн с низким усилением в диапазоне от 1 ГГц до приблизительно 3 ГГц в целях применения в исследованиях совместного использования частот.

Ключевые слова

Фиксированная служба, сухопутная подвижная служба, эталонная диаграмма направленности, секторная антенна, всенаправленная антенна, пиковая диаграмма направленности по боковым лепесткам, средняя диаграмма направленности по боковым лепесткам.

учитывая,

- a)* что при исследовании вопросов координации и оценке взаимных помех между фиксированными беспроводными системами (ФБС) или системами сухопутной подвижной службы (СПС) связи пункта со многими пунктами (П-МП) и между станциями таких систем и станциями спутниковых служб радиосвязи, совместно использующими ту же полосу частот, может возникнуть необходимость использования эталонных диаграмм направленности антенн для базовых станций ФБС или СПС;
- b)* что в зависимости от сценария совместного использования частот возможно потребуется учитывать при исследовании совместного использования частот диаграммы направленности с огибающей пиков боковых лепестков или средние диаграммы направленности по боковым лепесткам;
- c)* что возможно потребуется использовать диаграмму направленности антенны, представляющую средние уровни боковых лепестков, в следующих случаях:
- для прогнозирования совокупных помех геостационарному или негеостационарному спутнику от большого числа фиксированных беспроводных станций или базовых станций СПС;
 - для прогнозирования совокупных помех фиксированным беспроводным станциям или базовым станциям СПС от большого числа геостационарных спутников;
 - для прогнозирования помех фиксированным беспроводным станциям или базовым станциям СПС от одного или нескольких негеостационарных спутников при постоянно меняющихся углах;
 - в любых других случаях, когда целесообразно использование диаграммы направленности, представляющей средние уровни боковых лепестков;
- d)* что эталонные диаграммы направленности могут потребоваться в ситуациях, когда информация о реальной диаграмме направленности отсутствует;

* Настоящая Рекомендация должна быть доведена до сведения 4-й, 6-й и 7-й исследовательских комиссий по радиосвязи.

e) что использование антенны с наилучшей возможной диаграммой направленности обеспечит наиболее эффективное использование радиочастотного спектра;

f) что при больших угловых расстояниях от главного лепестка диаграмма направленности усиления может не отражать полностью излучений антенны в силу отражений от местных предметов на земной поверхности;

отмечая,

что в Рекомендациях МСЭ-R F.699 и МСЭ-R F.1245 приведены соответственно пиковые и средние эталонные диаграммы направленных антенн для использования при исследовании вопросов координации и при оценке помех в случаях, не упомянутых в пп. 1–4 раздела *рекомендует*, ниже,

рекомендует,

1 чтобы в отсутствие конкретной информации о диаграмме направленности используемой антенны П-МП ФБС или базовой станции СПС (см. Примечание 1) применялась определяемая ниже эталонная диаграмма направленности для:

1.1 оценки помех между П-МП ФБС прямой видимости (LoS) или базовыми станциями СПС;

1.2 исследований вопросов координации и оценки помех между станциями П-МП LoS ФБС или базовыми станциями СПС и другими станциями служб, совместно использующими ту же полосу частот;

2 чтобы в диапазоне частот от 400 МГц и до приблизительно 70 ГГц в случаях, когда на станциях применяют всенаправленные (по азимуту) антенны, должны использоваться следующие эталонные диаграммы направленности антенны:

2.1 для пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам, упомянутых в п. b) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие уравнения для углов места в интервале от -90° до 90° (см. Приложение 1):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{при } 0 \leq |\theta| < \theta_4 \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) & \text{при } \theta_4 \leq |\theta| < \theta_3 \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] & \text{при } \theta_3 \leq |\theta| \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

с:

$$\theta_3 = 107,6 \times 10^{-0,1 G_0} \quad (1b)$$

$$\theta_4 = \theta_3 \sqrt{1 - \frac{1}{1,2} \log(k+1)}, \quad (1c)$$

где:

$G(\theta)$: усиление относительно изотропной антенны (дБи);

G_0 : максимальное усиление антенны в азимутальной плоскости (дБи);

θ : угол места относительно угла максимального усиления (градусы) ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$);

θ_3 : ширина луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости (градусы);

k : параметр, который учитывает повышенные уровни боковых лепестков относительно ожидаемых уровней для антенны с улучшенной характеристикой боковых лепестков (см. пп. 2.3 и 2.4 раздела *рекомендует*);

2.2 для средних диаграмм направленности по боковым лепесткам, упомянутых в п. с) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие уравнения для углов места в интервале от -90° до 90° (см. Приложение 1 и Приложение 5):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{при } 0 \leq |\theta| < \theta_3 \\ G_0 - 15 + 10 \log(k+1) & \text{при } \theta_3 \leq |\theta| < \theta_5 \\ G_0 - 15 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1,5} + k \right] & \text{при } \theta_5 \leq |\theta| \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1d)$$

с:

$$\theta_5 = \theta_3 \sqrt{1,25 - \frac{1}{1,2} \log(k+1)},$$

где θ , θ_3 , G_0 и k определены и описаны в п. 2.1 раздела *рекомендует*.

2.3 в случаях использования типовых антенн, работающих в диапазоне частот от 400 МГц до 3 ГГц, параметр k должен составлять 0,7;

2.4 в случаях использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков в диапазоне частот от 400 МГц до 3 ГГц и для всех антенн, работающих в диапазоне 3–70 ГГц, параметр k должен составлять 0;

2.5 в случаях, когда антенны, упомянутые в пп. 2.1–2.2 раздела *рекомендует* работают с электрическим наклоном, все уравнения, приведенные в этих пунктах раздела *рекомендует*, действительны с определениями следующих переменных (см. п. 3 в Приложении 5):

θ_e : угол места (градусы), по которому рассчитываются наклонные диаграммы направленности с использованием уравнений, приведенных в пп. 2.1 и 2.2 раздела *рекомендует*;

θ_h : угол места (градусы), измеренный относительно горизонтальной плоскости в месте установки антенны ($-90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ$: где 90° – азимутальная плоскость, а -90° – надир);

β : угол наклона, положительный угол (градусы), на который ось главного лепестка ниже горизонтальной плоскости в месте установки антенны.

Эти переменные взаимосвязаны следующим образом:

$$\theta_e = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 + \beta} \quad \text{при } \theta_h + \beta \geq 0 \quad (1e)$$

$$\theta_e = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 - \beta} \quad \text{при } \theta_h + \beta < 0.$$

Усиление излучения с электрическим наклоном при θ_h рассчитывается с использованием θ_e из уравнения (1e), вместо θ в уравнениях, приведенных в пп. 2.1 и 2.2 раздела *рекомендует*, соответственно;

3 чтобы в диапазоне частот от 400 МГц и до приблизительно 70 ГГц в случаях, когда на станциях применяют секторные антенны, должны использоваться следующие эталонные диаграммы направленности:

3.1 в диапазоне частот от 400 МГц до приблизительно 6 ГГц (см. Приложение 7)

3.1.1 в случае пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам, упомянутых в п. б) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие уравнения для углов места в интервале от -90° до 90° и углов азимута в интервале от -180° до 180° :

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{дБи}), \quad (2a1)$$

где:

$G_{hr}(x_h)$: относительное усиление эталонной антенны в азимутальной плоскости в нормализованном направлении $(x_h, 0)$ (дБ);

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3;$$

φ : азимутальный угол, соответствующий углу максимального усиления в горизонтальной плоскости (градусы);

φ_3 : ширина луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости (градусы) (обычно равна ширине луча секторной антенны);

$G_{vr}(x_v)$: относительное усиление эталонной антенны в угломестной плоскости в нормализованном направлении $(0, x_v)$ (дБ);

$$x_v = |\theta|/\theta_3;$$

R : коэффициент сжатия горизонтального усиления при смещении азимутального угла от 0° к φ , определенный ниже:

$$R = \frac{G_{hr}(x_h) - G_{hr}(180^\circ/\varphi_3)}{G_{hr}(0) - G_{hr}(180^\circ/\varphi_3)}. \quad (2a2)$$

Другие переменные и параметры определены в п. 2.1 раздела *рекомендует*;

3.1.1.1 относительное минимальное усиление, G_{180} , может быть рассчитано следующим образом:

$$G_{180} = -12 + 10 \log(1 + 8k_p) - 15 \log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right), \quad (2b1)$$

где:

k_p : параметр, который реализует относительное минимальное усиление для пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам;

3.1.1.1.1 в случае использования типовых антенн параметр k_p должен составлять 0,7 (см. Примечание 2);

3.1.1.1.2 в случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков параметр k_p должен составлять 0,7; который применяется также для антенн базовых станций ИМТ (см. Примечание 2);

3.1.1.2 относительное усиление эталонной антенны в азимутальной плоскости;

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 && \text{при} && x_h \leq 0,5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} && \text{при} && 0,5 < x_h \end{aligned} \quad (2b2)$$

$$G_{hr}(x_h) \geq G_{180},$$

где:

k_h : коэффициент корректировки азимутальной диаграммы направленности на основе протекающей мощности ($0 \leq k_h \leq 1$) $\lambda_{kh} = 3(1 - 0,5^{-k_h})$;

3.1.1.2.1 в случае использования типовых антенн параметр k_h должен составлять 0,8 (см. Примечание 2);

3.1.1.2.2 в случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков параметр k_h должен составлять 0,7; который применяется также для антенн базовых станций ИМТ (см. Примечание 2);

3.1.1.3 относительное усиление эталонной антенны в угломестной плоскости:

$$\begin{aligned} G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{при } x_v < x_k \\ G_{vr}(x_v) &= -12 + 10 \log(x_v^{-1,5} + k_v) && \text{при } x_k \leq x_v < 4 \\ G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{kv} - C \log(x_v) && \text{при } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{при } x_v = 90^\circ/\theta_3, \end{aligned} \quad (2b3)$$

где:

k_v : коэффициент корректировки угломестной диаграммы направленности на основе протекающей мощности ($0 \leq k_v \leq 1$);

$$x_k = \sqrt{1 - 0,36 k_v};$$

$$\lambda_{kv} = 12 - C \log(4) - 10 \log(4^{-1,5} + k_v);$$

коэффициент наклона затухания C выражается следующим образом:

$$C = \frac{10 \log \left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3} \right)^{1,5} \cdot (4^{-1,5} + k_v)}{1 + 8k_p} \right)}{\log \left(\frac{22,5^\circ}{\theta_3} \right)}.$$

3.1.1.3.1 в случае использования типовых антенн параметр k_v должен составлять 0,7 (см. Примечание 2);

3.1.1.3.2 в случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков параметр k_v должен составлять 0,3; который применяется также для антенн базовых станций ИМТ (см. Примечание 2);

3.1.2 в случае средних диаграмм направленности по боковым лепесткам, упомянутых в п. с) раздела *учитывая*, при статистической оценке помех должны использоваться следующие уравнения для углов места в интервале от -90° до 90° и углов азимута в диапазоне от -180° до 180° :

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{дБи}).$$

3.1.2.1 относительное минимальное усиление, G_{180} , может быть рассчитано следующим образом:

$$G_{180} = -15 + 10 \log(1 + 8k_a) - 15 \log \left(\frac{180^\circ}{\theta_3} \right), \quad (2c1)$$

где:

k_a : параметр, который реализует относительное минимальное усиление для средних диаграмм направленности по боковым лепесткам;

3.1.2.1.1 в случае использования типовых антенн параметр k_p должен составлять 0,7 (см. Примечание 2);

3.1.2.1.2 в случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков параметр k_p должен составлять 0,7; который применяется также для антенн базовых станций ИМТ (см. Примечание 2);

3.1.2.2 относительное усиление эталонной антенны в азимутальной плоскости:

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 && \text{при } x_h \leq 0,5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} && \text{при } 0,5 < x_h \end{aligned} \quad (2c2)$$

$$G_{hr}(x_h) \geq G_{180},$$

где:

$$\lambda_{kh} = 3(1 - 0,5^{-k_h}).$$

3.1.2.2.1 в случае использования типовых антенн параметр k_h должен составлять 0,8 (см. Примечание 2);

3.1.2.2.2 в случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков параметр k_h должен составлять 0,7; который применяется также для антенн базовых станций ИМТ (см. Примечание 2);

3.1.2.3 относительное усиление эталонной антенны в угломестной плоскости:

$$\begin{aligned} G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{при } x_v < x_k \\ G_{vr}(x_v) &= -15 + 10 \log(x_v^{-1,5} + k_v) && \text{при } x_k \leq x_v < 4 \\ G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{kv} - 3 - C \log(x_v) && \text{при } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{при } x_v = 90^\circ/\theta_3 \end{aligned} \quad (2c3)$$

где:

$$x_k = \sqrt{1,33 - 0,33 k_v}$$

$$\lambda_{kv} = 12 - C \log(4) - 10 \log(4^{-1,5} + k_v);$$

коэффициент наклона затухания C выражается следующим образом:

$$C = \frac{10 \log \left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3} \right)^{1,5} \cdot (4^{-1,5} + k_v)}{1 + 8k_a} \right)}{\log \left(\frac{22,5^\circ}{\theta_3} \right)}.$$

3.1.2.3.1 в случае использования типовых антенн параметр k_v должен составлять 0,7 (см. Примечание 2);

3.1.2.3.2 в случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков параметр k_v должен составлять 0,3; который применяется также для антенн базовых станций ИМТ (см. Примечание 2);

3.2 в диапазоне частот от 6 ГГц до приблизительно 70 ГГц (см. Приложение 6):

3.2.1 в случае пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам, упомянутым в пункте б) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие уравнения для углов места в интервале от -90° до 90° и углов азимута в интервале от -180° до 180° :

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x) \quad (2d1)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi}\right) \quad -90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (2d2)$$

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{при} \quad 0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \quad (2d3)$$

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{при} \quad 90^\circ < \psi \leq 180^\circ$$

$$\psi = \arccos(\cos \varphi \cos \theta), \quad 0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad (2d4)$$

$$x = \psi / \Psi_\alpha, \quad (2d5)$$

где:

φ_{3m} : эквивалентная ширина луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости для коррекции усиления в горизонтальной плоскости (градусы);

$$\varphi_{3m} = \varphi_3 \quad \text{при} \quad 0^\circ \leq |\varphi| \leq \varphi_{th} \quad (2d6)$$

$$\varphi_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{при} \quad \varphi_{th} < |\varphi| \leq 180^\circ \quad (2d7)$$

φ_{th} : краевой азимутальный угол (градусы)

$$\varphi_{th} = \varphi_3.$$

Другие переменные и параметры определены в пп. 2.1 и 3.1.1 раздела *рекомендует*;

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{при} \quad 0 \leq x < 1 \quad (2e)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12 - 15 \log(x) \quad \text{при} \quad 1 \leq x$$

3.2.2 в случае средних диаграмм направленности по боковым лепесткам, упомянутым в пункте с) раздела *учитывая*, при статистической оценке помех должны использоваться следующие уравнения для углов места в интервале от -90° до 90° и углов азимута в интервале от -180° до 180° (см. Примечание 3):

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{при} \quad 0 \leq x < 1,152 \quad (2f)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 15 - 15 \log(x) \quad \text{при} \quad 1,152 \leq x$$

В этом случае, как для φ_{th} в уравнениях (2d6) и (2d7), $\varphi_{th} = 1,152\varphi_3$.

3.3 в случае использования секторных антенн с шириной луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости менее приблизительно 120° соотношение между максимальным усилением и шириной луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости и угломестной плоскости предварительно принимается равным (см. Приложение 2 и Примечания 4 и 5):

$$\theta_3 = \frac{31\,000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\varphi_3}, \quad (3a)$$

где все параметры определены в п. 3.1 раздела *рекомендует*;

3.4 в случаях, когда антенны, упомянутые в пп. 3.1–3.2 раздела *рекомендует* работают с электрическим наклоном, все уравнения, приведенные в этих пунктах раздела *рекомендует*, действительны с определениями и повторными определениями следующих переменных (см. п. 2 в Приложении 5):

- θ : угол места (градусы), измеренный относительно плоскости, определяемой осью максимального усиления антенны и осью, относительно которой наклонена диаграмма направленности (относительно этой плоскости измеряется также (θ_3));
- φ : азимут (градусы), измеренный относительно азимута максимального усиления в плоскости, определяемой осью максимального усиления антенны и осью, относительно которой наклонена диаграмма направленности;
- θ_h : угол места (градусы), измеренный относительно горизонтальной плоскости в месте установки антенны ($(90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ)$);
- φ_h : азимутальный угол (градусы) в горизонтальной плоскости в месте установки антенны, измеренный относительно азимута максимального усиления ($(180^\circ \leq \varphi_h \leq 180^\circ)$);
- β : угол наклона, положительный угол (градусы), на который ось главного лепестка ниже горизонтальной плоскости в месте установки антенны.

Эти переменные взаимосвязаны следующим образом:

$$\theta = \arcsin(\sin \theta_h \cos \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \sin \beta), \quad -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (3b)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{(-\sin \theta_h \sin \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \cos \beta)}{\cos \theta}\right), \quad 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (\text{см. Примечание 1 в Приложении 5}) \quad (3c)$$

3.5 в случаях, когда антенны, упомянутые в пп. 3.1–3.2 раздела *рекомендует* работают с электрическим наклоном, усиление излучения с электрическим наклоном при θ_h рассчитывается также с использованием θ_e из уравнения (1e), приведенного в п. 2.5 раздела *рекомендует*, вместо θ в уравнениях, приведенных в пп. 3.1 и 3.2, раздела *рекомендует*, соответственно;

4 чтобы в диапазоне частот от 1 ГГц до приблизительно 3 ГГц в случаях применения станций, в которых используются антенны с низким усилением при круговой симметрии по отношению к ширине луча по уровню 3 дБ и с усилением главного лепестка антенны менее приблизительно 20 дБи, использовались следующие эталонные диаграммы направленности:

4.1 для пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам, упомянутых в п. b) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие уравнения (см. Примечание 6):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\varphi_3}\right)^2 & \text{при } 0 \leq \theta < 1,08 \varphi_3 \\ G_0 - 14 & \text{при } 1,08 \varphi_3 \leq \theta < \varphi_1 \\ G_0 - 14 - 32 \log\left(\frac{\theta}{\varphi_1}\right) & \text{при } \varphi_1 \leq \theta < \varphi_2 \\ -8 & \text{при } \varphi_2 \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases}, \quad (4)$$

где:

- $G(\theta)$: усиление относительно изотропной антенны (дБи);
- G_0 : усиление главного лепестка антенны (дБи);
- θ : угол отклонения от оси (градусы) ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$);
- φ_3 : ширина луча по уровню 3 дБ антенны с низким усилением (градусы);

$$= \sqrt{27000 \times 10^{-0,1 G_0}} \text{ (градусы);}$$

$$\varphi_1 = 1,9 \varphi_3 \text{ (градусы);}$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 \times 10^{(G_0 - 6)/32} \text{ (градусы);}$$

4.2 для средних диаграмм направленности по боковым лепесткам, упомянутых в п. с) раздела *учитывая*, должна использоваться диаграмма направленности антенн, приведенная в Рекомендации МСЭ-R F.1245;

5 чтобы приведенные ниже Примечания учитывались как часть настоящей Рекомендации:

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Весьма важно, чтобы при исследовании вопросов координации и оценке помех прилагались все возможные усилия для использования диаграммы направленности реальной антенны.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Значения параметра k_h , k_v , k_a и k_p в п. 3.1 раздела *рекомендует* основаны на статистических данных, полученным по результатам большого числа измеренных диаграмм направленности секторных антенн в диапазоне частот от 700 МГц до приблизительно 6 ГГц.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Результаты измерений специально разработанной секторной антенны для использования в диапазоне частот около 20 ГГц показывают, что существует возможность обеспечения соответствия более жесткой эталонной диаграммы направленности по боковым лепесткам. Для разработки такой оптимизированной диаграммы направленности необходимы дальнейшие исследования.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – В случае использования антенн с известной шириной главного луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости в качестве входного параметра рекомендуется использовать известную величину θ_3 .

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Как показано в Приложении 2, экспоненциальный коэффициент заменен единицей. В результате теоретическая погрешность при данной аппроксимации составит менее 6% для значений ширины луча антенны по уровню 3 дБ в угломестной плоскости менее 45°.

ПРИМЕЧАНИЕ 6. – Эталонная диаграмма направленности антенны, приведенная в п. 4.1 раздела *рекомендует*, главным образом относится к ситуациям, когда усиление главного лепестка антенны меньше или равно 20 дБи и использование Рекомендации МСЭ-R F.699 дает неточные результаты. Для определения всех диапазонов частот и усиления, в которых данные уравнения будут справедливы, требуются дальнейшие исследования;

Приложение 1

Эталонная диаграмма направленности всенаправленных антенн, используемых в фиксированных беспроводных системах связи II-МП

1 Введение

Всенаправленные антенны часто используются для передачи и получения сигналов на центральных станциях фиксированных беспроводных системы связи II-МП. Здесь описаны исследования, касающиеся вопросов совместного использования частот этими типами фиксированных беспроводных систем и системами спутниковых служб в диапазоне 2 ГГц с применением эталонной диаграммы направленности.

2 Анализ

Эталонная диаграмма направленности основана на следующих предположениях относительно всенаправленной антенны:

- что антенна является n -элементной линейной антенной решеткой, излучающей в перпендикулярном от плоскости антенны направлении;
- предполагается, что элементы антенной решетки являются диполями;
- элементы антенной решетки разнесены на $3\lambda/4$.

Ширина луча антенной решетки по уровню 3 дБ в угломестной плоскости θ_3 относится к коэффициенту направленного действия D следующим образом (определение D см. в Приложении 3):

$$D = 10 \log \left[191,0 \sqrt{0,818 + 1/\theta_3} - 172,4 \right] \quad (\text{дБи}). \quad (5a)$$

Уравнение (5a) может быть решено относительно θ_3 при известном коэффициенте направленного действия:

$$\theta_3 = \frac{1}{\alpha^2 - 0,818}, \quad (5b)$$

$$\alpha = \frac{10^{0,1D} + 172,4}{191,0}. \quad (5c)$$

Соотношение между шириной луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости и коэффициентом направленного действия было выведено при предположении, что диаграмма направленности в угломестной плоскости была адекватно аппроксимирована при помощи следующего уравнения:

$$f(\theta) = \cos^m(\theta),$$

где m – произвольный параметр, используемый для установления соответствия между шириной луча по уровню 3 дБ и диаграммой направленности в угломестной плоскости. При использовании этой аппроксимации коэффициент направленного действия был получен путем интегрирования диаграммы направленности в угломестной и азимутальной плоскости.

Напряженность поля в дальней зоне линейной антенной решетки задается уравнением:

$$E_T(\theta) = E_e(\theta) \cdot AF(\theta), \quad (6)$$

где:

$E_T(\theta)$: суммарное E -поле при угле θ относительно нормали к оси антенной решетки;

$E_e(\theta)$: E -поле при угле θ относительно нормали к оси антенной решетки, создаваемое единичным элементом решетки;

$AF(\theta)$: коэффициент антенной решетки при угле θ относительно нормали к оси антенной решетки.

Нормализованное E -поле элемента диполя равно:

$$E_e(\theta) = \cos(\theta). \quad (7)$$

Коэффициент антенной решетки равен:

$$AF_N = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(N \frac{\Psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \right], \quad (8)$$

где:

N : количество элементов антенной решетки;

$$\frac{\Psi}{2} = \frac{1}{2} \left[2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right];$$

d : расстояние между излучателями;

λ : длина волны.

Для оценки количества элементов N в антенной решетке была использована следующая процедура. Предполагается, что максимальное усиление антенной решетки равно коэффициенту направленного действия данной решетки.

- При заданном максимальном усилении всенаправленной антенны в угломестной плоскости θ_3 вычисляется ширина луча по уровню 3 дБ, используя уравнения (5b) и (5c);
- Не учитывается небольшое уменьшение внеосевого усиления, вызванное элементом диполя, и принимается к сведению, что коэффициент антенной решетки AF_N принимает значение 0,707 (– 3 дБ) при $N \frac{\Psi}{2} = 1,396$; и
- затем определяется N как целое число из следующего уравнения:

$$N = \left\lceil \frac{2 \times 1,3916}{2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right)} \right\rceil, \quad (9)$$

где $\lceil x \rceil$ означает наибольшее целое число, не превышающее значение x .

Нормализованная внеосевая избирательность ΔD рассчитывается по формуле:

$$\Delta D = 20 \log \left[|AF_N \times \cos(\theta)| \right] \quad (\text{дБ}). \quad (10)$$

Уравнение (10) было решено как функция внеосевого угла (т. е. угла места) для нескольких значений максимального усиления. Для значений в диапазоне от 8 дБи до 13 дБи было обнаружено, что огибающая диаграммы направленности в угломестной плоскости может быть хорошо аппроксимирована с помощью следующих уравнений:

$$G(\theta) = \max [G_1(\theta), G_2(\theta)], \quad (11a)$$

$$G_1(\theta) = G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 \quad (\text{дБи}), \quad (11b)$$

$$G_2(\theta) = G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\max \left\{ \frac{|\theta|}{\theta_3}, 1 \right\} \right)^{-1,5} + k \right] \quad (\text{дБи}), \quad (11c)$$

где k представляет собой параметр, учитывающий повышенные уровни боковых лепестков, превышающие ожидаемые уровни для антенны с улучшенными характеристиками боковых лепестков.

На рис. 1–4 сравниваются огибающие эталонной диаграммы направленности с теоретическими диаграммами направленности антенны, полученными из уравнения (11), при усилении от 8 дБи до 13 дБи, при использовании значения $k = 0$. На рис. 5–8 сравниваются огибающие эталонных диаграмм направленности с реальными измеренными диаграммами направленности антенн при использовании значения параметра $k = 0$. На рис. 7 и 8 видно, что боковые лепестки ниже уровня главного лепестка примерно на 15 дБ или более, допуская, что малый процент пиковых значений боковых лепестков может превышать это значение. Однако реальные факторы, такие как использование электрического угла наклона, ухудшение диаграммы направленности антенны на границах полосы и изменения при производстве, могут привести к дальнейшему повышению уровня боковых лепестков до значения, которое примерно на 10 дБ ниже уровня главного лепестка диаграммы направленности при установке в реальных полевых условиях. Параметр k , упомянутый выше в уравнении (11), предназначается для учета таких изменений уровней боковых лепестков. На рис. 9 и 10 представлено сравнение антенн с усилением 10 дБи и 13 дБи, на частоте 2,4 ГГц, с эталонной огибающей диаграммы направленности при использовании значения $k = 0,5$. Значение параметра $k = 0,5$ учитывает, что уровни боковых лепестков примерно на 15 дБ ниже пикового уровня главного лепестка. Однако для учета увеличения уровней боковых лепестков, которое может быть обнаружено при установке в реальных полевых условиях, для типовых антенн необходимо использовать значение параметра $k=0,7$, которое учитывает уровни боковых лепестков примерно на

13,5 дБ ниже уровня главного лепестка. И, наконец, на рис. 11 и 12 показано влияние изменения значений параметра k на диаграммы направленности по углам места.

РИСУНОК 1

Сравнение нормализованной диаграммы направленности линейной антенной решетки с элементами диполей с аппроксимированной огибающей диаграммы направленности
 $G_0 = 10$ дБи, $k = 0$

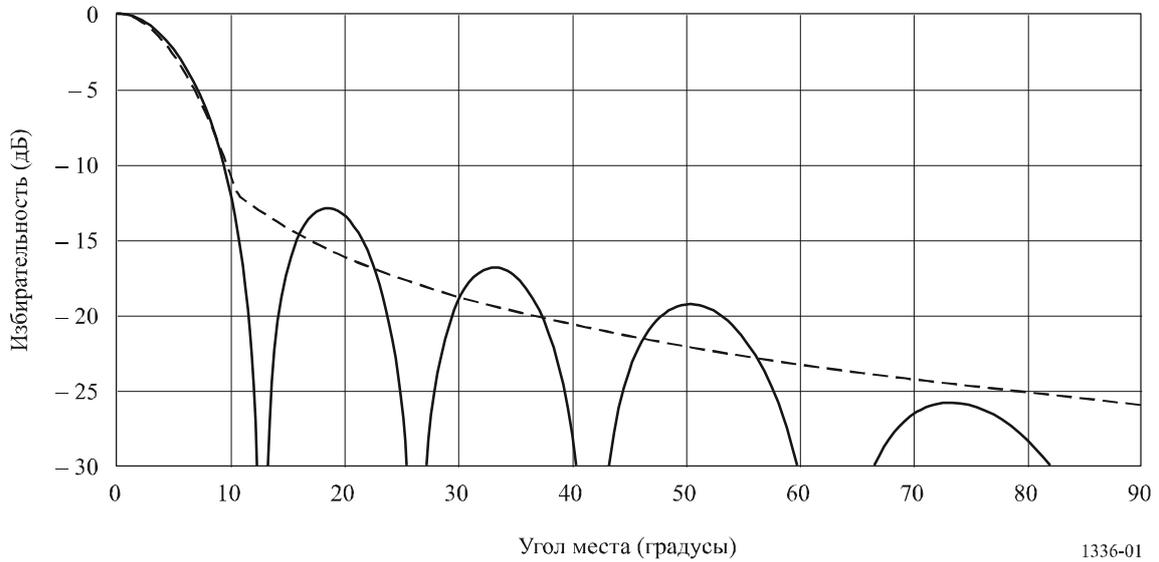


РИСУНОК 2

Сравнение нормализованной диаграммы направленности линейной антенной решетки с элементами диполей с аппроксимированной огибающей диаграммы направленности
 $G_0 = 11$ дБи, $k = 0$

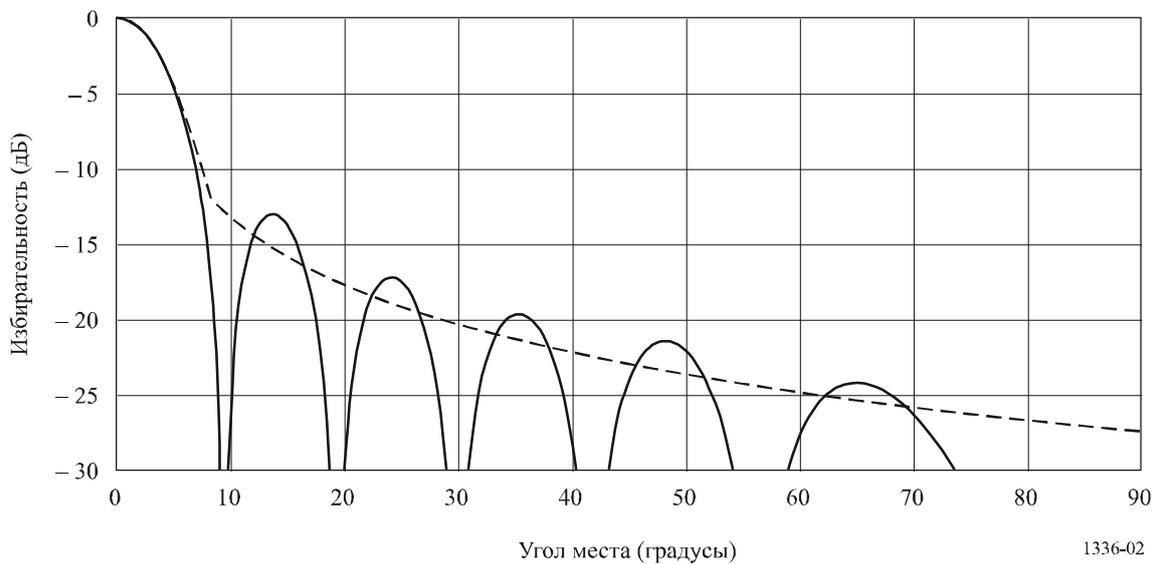


РИСУНОК 3

Сравнение нормализованной диаграммы направленности линейной антенной решетки с элементами диполей с аппроксимированной огибающей диаграммы направленности
 $G_0 = 12$ дБи, $k = 0$

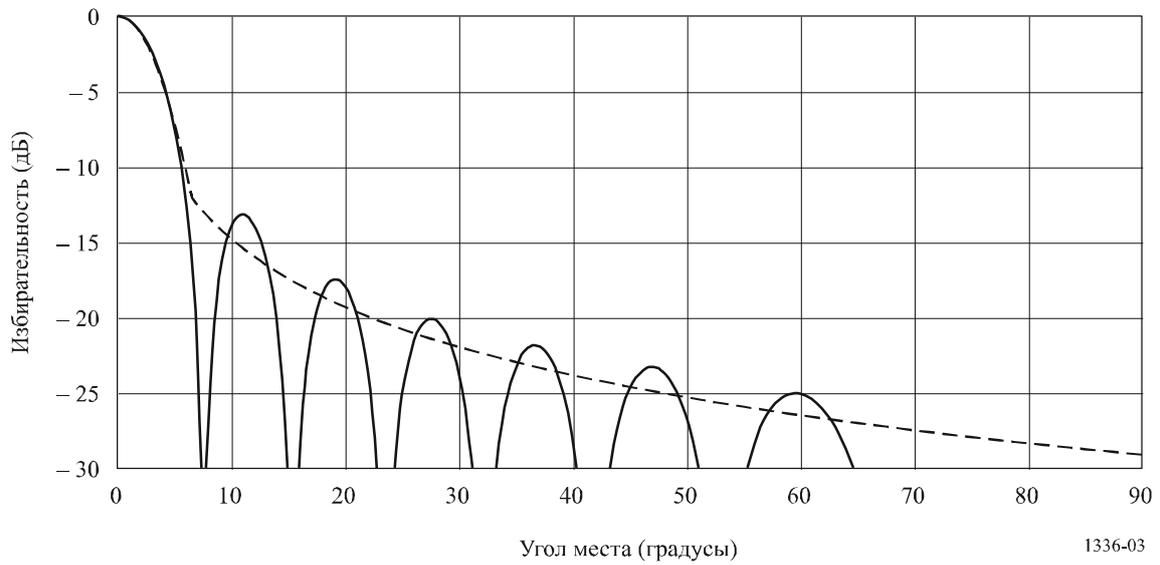


РИСУНОК 4

Сравнение нормализованной диаграммы направленности линейной антенной решетки с элементами диполей с аппроксимированной огибающей диаграммы направленности
 $G_0 = 13$ дБи, $k = 0$

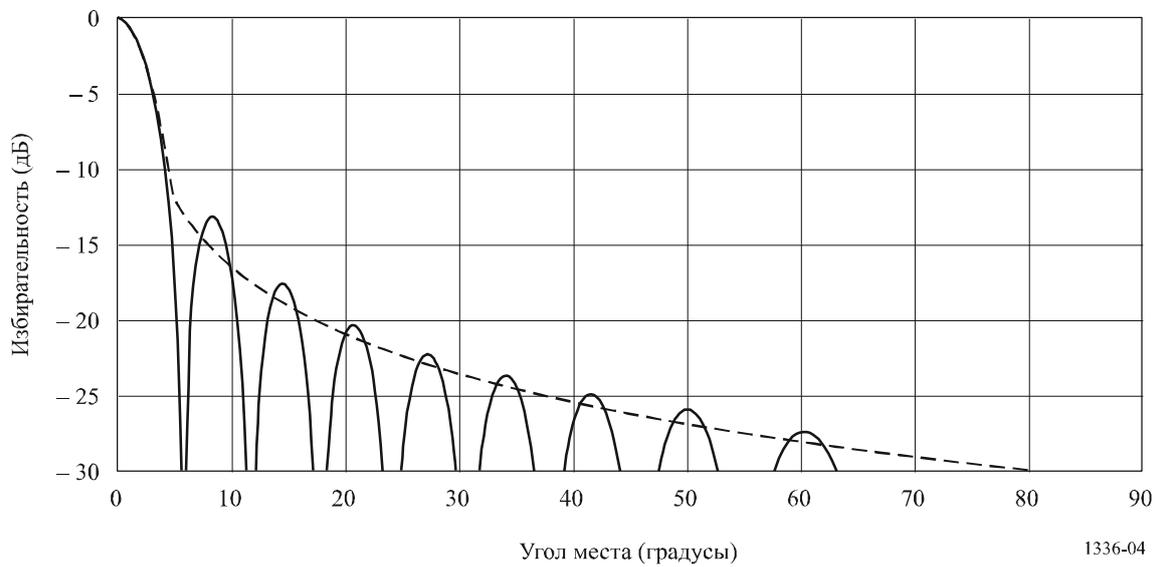


РИСУНОК 5

Сравнение измеренной диаграммы направленности и огибающей эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 11 дБи, работающей в полосе частот 928–944 МГц, $k = 0$

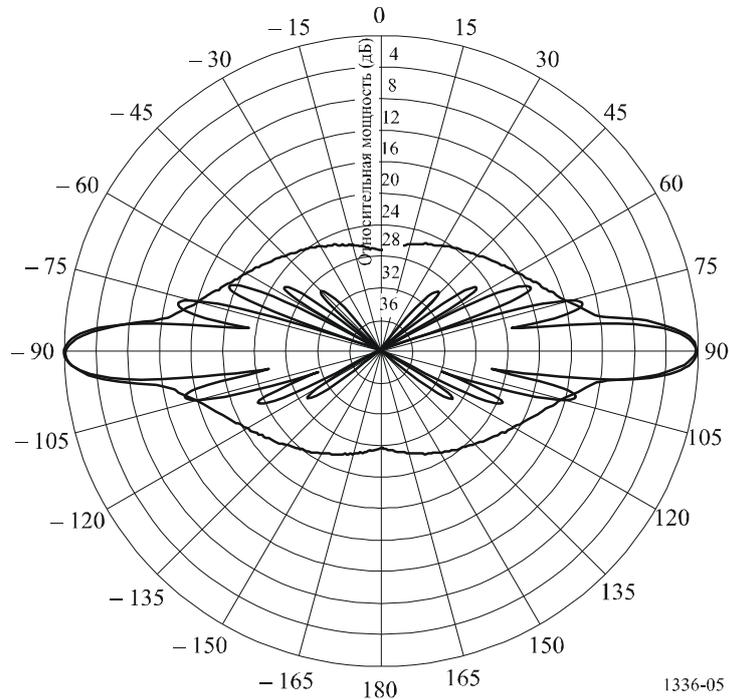


РИСУНОК 6

Сравнение измеренной диаграммы направленности и огибающей эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 8 дБи, работающей в полосе частот 1850–1990 МГц, $k = 0$

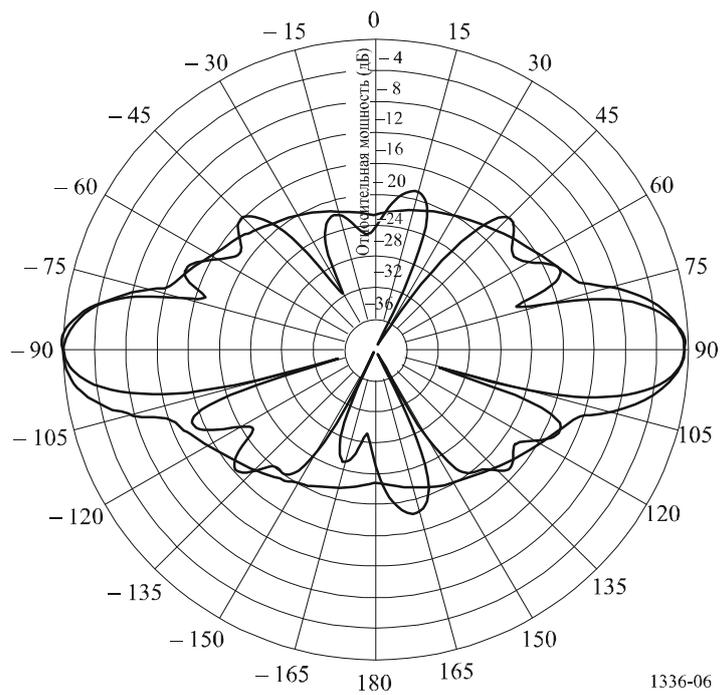


РИСУНОК 7

Сравнение измеренной диаграммы направленности и огибающей эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 10 дБи, работающей в диапазоне 1,4 ГГц, $k = 0$

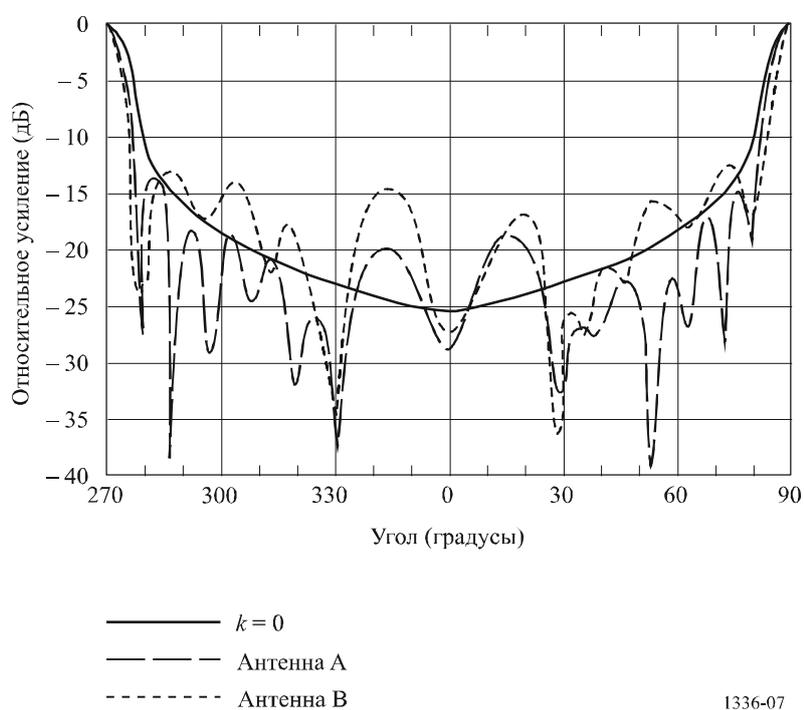


РИСУНОК 8

Сравнение измеренной диаграммы направленности и огибающей эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 13 дБи, работающей в диапазоне 1,4 ГГц, $k = 0$

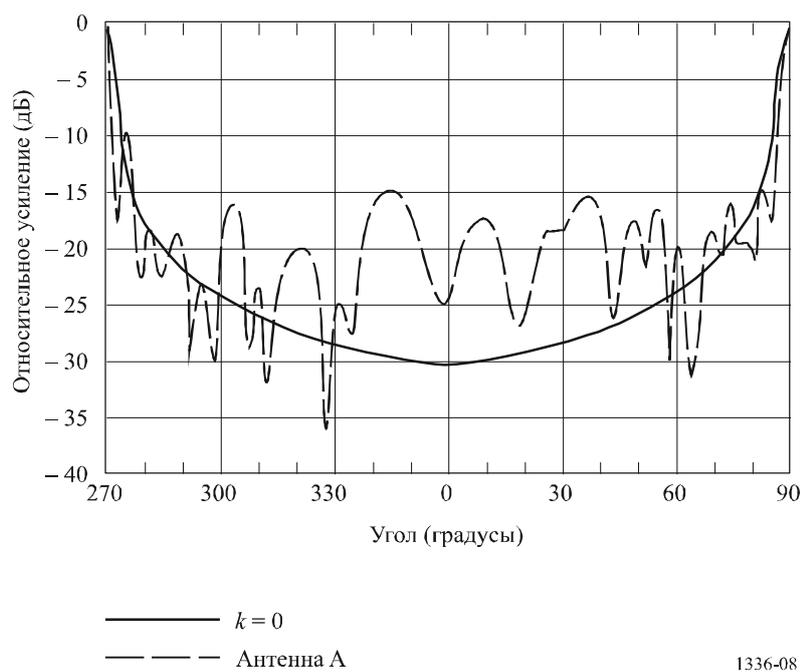


РИСУНОК 9

Сравнение измеренной диаграммы направленности и огибающей эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 10 дБи, работающей в диапазоне 2,4 ГГц, $k = 0,5$

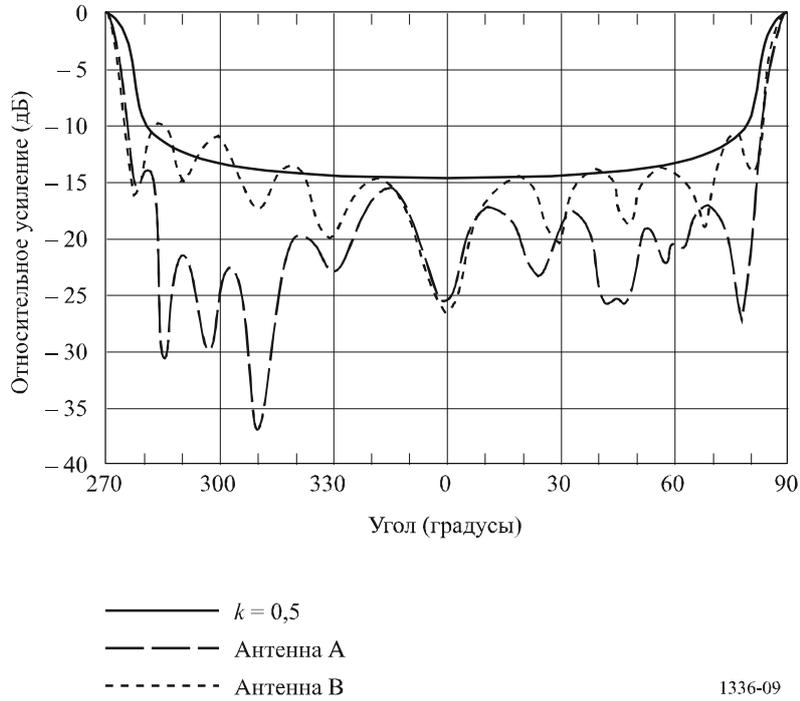


РИСУНОК 10

Сравнение измеренной диаграммы направленности и огибающей эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 13 дБи, работающей в диапазоне 2,4 ГГц, $k = 0,5$

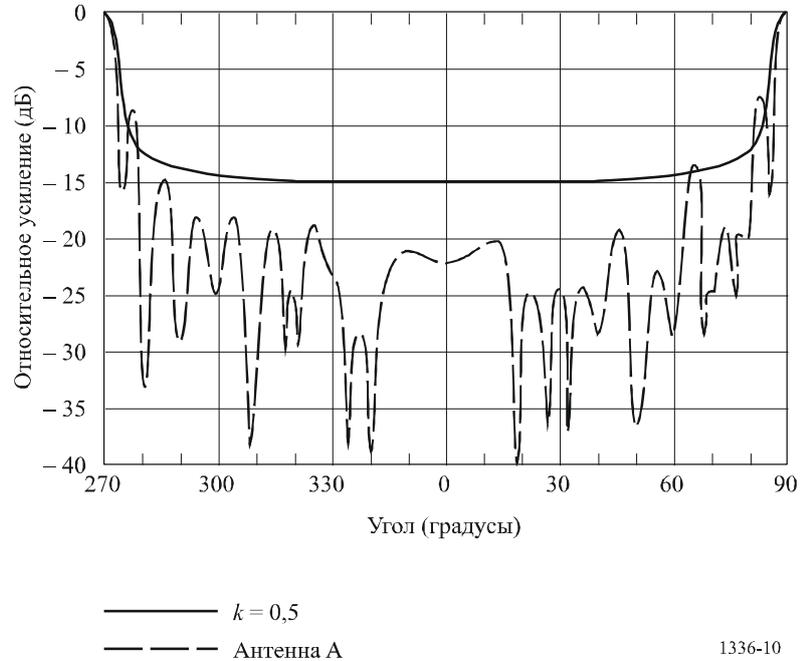
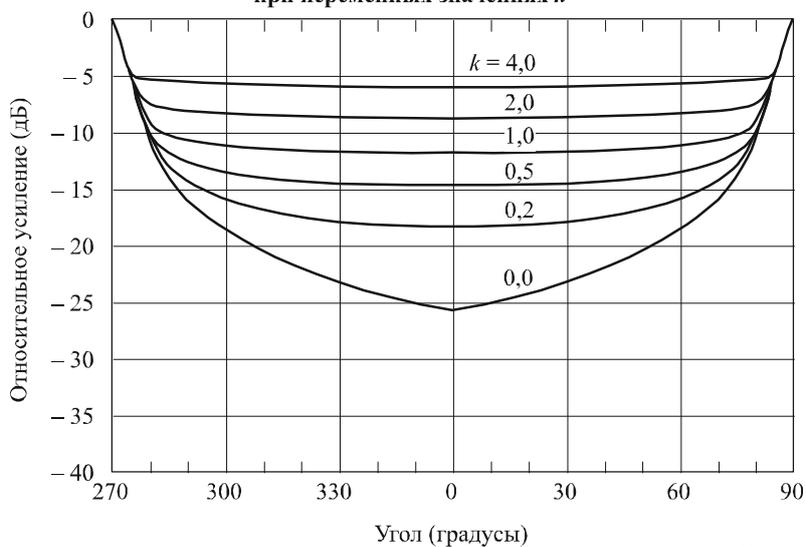


РИСУНОК 11

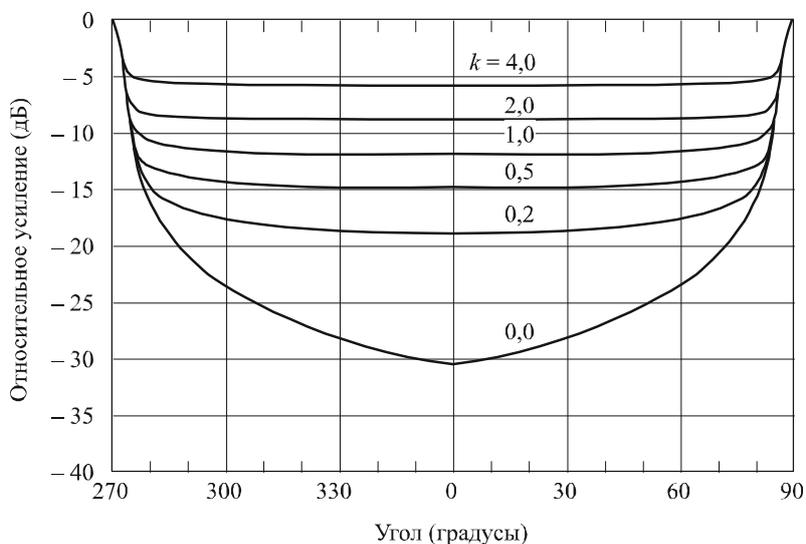
Огибающие эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 10 дБи при переменных значениях k



1336-11

РИСУНОК 12

Огибающие эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 13 дБи при переменных значениях k



1336-12

3 Резюме, выводы и последующий анализ

Была представлена эталонная диаграмма направленности для всенаправленных антенн с усилением от 8 дБи до 13 дБи. Эталонная диаграмма направленности была получена на основе теоретических данных о диаграмме направленности коллинеарной антенной решетки диполей. Предлагаемая диаграмма была показана для того, чтобы правильно представить теоретические диаграммы направленности и измеренные диаграммы направленности антенн в диапазоне значений усиления от 8 дБи до 13 дБи. Необходимо продолжить работу по определению диапазона усиления, которому соответствует эталонная диаграмма направленности, особенно это касается антенн, работающих в диапазонах частот выше 3 ГГц.

Приложение 2

Соотношение между усилением и шириной луча для всенаправленных и секторных антенн

1 Введение

Целью данного Приложения является установление взаимосвязи между усилением всенаправленной и секторной антенн и шириной их луча в угломестной и азимутальной плоскости. В разделе 2 представлен анализ коэффициента направленного действия всенаправленной и секторной антенн в предположении использования двух различных функций интенсивности излучения в азимутальной плоскости. Предполагается, что в обоих случаях интенсивность излучения в угломестной плоскости представляет собой экспоненциальную функцию. В разделе 3 представлено сравнение между результатами по соотношению усиление – ширина луча, полученными с использованием методов раздела 2, и результатами на основе предложения предварительного уравнения для соотношения усиление – ширина луча для всенаправленных и секторных антенн, а также даны предложения по направлению дальнейших исследований.

2 Анализ

Предполагается, что диаграмма направленности в дальней зоне секторной антенны в угломестной плоскости соответствует экспоненциальной функции, тогда как диаграмма направленности в дальней зоне в азимутальной плоскости предположительно соответствует либо прямоугольной функции, либо экспоненциальной функции. При использовании данных предположений, коэффициент направленного действия D , секторной антенны может быть получен из следующего уравнения (в сферических координатах):

$$D = \frac{U_M}{U_0}, \quad (12)$$

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\varphi) F(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi, \quad (13)$$

где:

- U_M : максимальная интенсивность излучения;
- U_0 : интенсивность излучения изотропного источника;
- φ : угол в азимутальной плоскости;
- θ : угол в угломестной плоскости;
- $F(\varphi)$: интенсивность излучения в азимутальной плоскости;
- $F(\theta)$: интенсивность излучения в угломестной плоскости.

Коэффициент направленного действия всенаправленных и секторных антенн определяется в следующих подразделах в предположении, что интенсивность излучения в азимутальной плоскости представляет собой либо прямоугольную функцию, либо экспоненциальную функцию.

2.1 Прямоугольная функция интенсивности излучения в секторе

Предполагается, что прямоугольная функция интенсивности излучения в секторе $F(\varphi)$ выражена следующим образом:

$$F(\varphi) = U \left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi| \right), \quad (14)$$

где:

φ_s : ширина луча в секторе;

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 && \text{для } x \geq 0, \\ U(x) &= 0 && \text{для } x < 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Предполагается, что для либо прямоугольной, либо экспоненциальной функций интенсивности излучения в секторе, интенсивность излучения в угломестной плоскости выглядит следующим образом:

$$F(\theta) = e^{-a^2\theta^2}, \quad (16)$$

где:

$$a^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\theta_3} \right)^2 = \frac{2,773}{\theta_3^2}; \quad (17)$$

θ_3 : ширина луча антенны по уровню 3 дБ в угломестной плоскости (градусы).

Подставляя уравнения (18) и (20) в уравнение (17), получим:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U\left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi|\right) d\varphi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta. \quad (18)$$

Этот двойной интеграл можно решить, рассматривая его как произведение двух независимых интегралов. Интеграл по переменной φ вычисляется прямым путем. Однако труднее вычислить интеграл по переменной θ . Интеграл по θ можно вычислить численно с представлением результатов либо в виде таблицы, либо путем подбора подходящего полинома по цифровым данным. Однако следует отметить, что если пределы интегрирования изменить на $\pm\infty$, то интеграл по θ представляется в конечном виде:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \approx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta = \frac{1}{a} \sqrt{\pi} e^{-1/4a^2}. \quad (19)$$

Это достаточно простое и гибкое уравнение, которое, в зависимости от его точности, может быть достаточно полезным при оценке коэффициента направленного действия секторных антенн, а также всенаправленных антенн.

Была оценена точность, с которой неопределенный интеграл аппроксимирует определенный интеграл. Определенный интеграл, т. е. интеграл в левой части уравнения (19), был решен для нескольких значений ширины луча по уровню 3 дБ с использованием 24-точечного метода квадратуры Гаусса, и было произведено его сравнение с оценкой, полученной с помощью уравнения, соответствующего неопределенному интегралу в правой части уравнения (19). (В действительности, определенный интеграл, вследствие своей симметрии, был численно решен в интервале от 0 до $\pi/2$ и полученный результат удвоен). Результаты вычислений для ряда выбранных значений ширины луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости приведены в таблице 1. В таблице показано, что для ширины луча по уровню 3 дБ, равной 45° , разница между значениями, полученными от определенного интеграла и неопределенного интеграла, составила менее 0,03%. При 25° и менее ошибка практически нулевая. Так что уравнение (18) теперь легко оценить как:

$$U_0 = \frac{\varphi_s \theta_3}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2,773}} \times e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}}. \quad (20)$$

ТАБЛИЦА 1

**Относительная точность вычисления неопределенного интеграла
в уравнении (19) при оценке средней интенсивности излучения**

Ширина луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости (градусы)	Определенный интеграл	Неопределенный интеграл	Относительная погрешность (%)
45	1,116449558	1,116116449	0,0298
25	0,67747088	0,67747088	0,0000
20	0,549744213	0,549744213	0,0000
15	0,416896869	0,416896869	0,0000
10	0,280137168	0,280137168	0,0000
5	0,140734555	0,140734558	0,0000

Из уравнений (14) и (16) получаем $U_M = 1$. Подставив данные значения и уравнение (20) в уравнение (12), получим коэффициент направленного действия секторной антенны в зависимости от ширины луча в угломестной и азимутальной плоскости:

$$D = \frac{11,805}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}}, \quad (21)$$

где углы даны в радианах. Если углы даны в градусах, уравнение (21) превращается в:

$$D = \frac{38750}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}}. \quad (22)$$

Заметим, что для всенаправленной антенны уравнение (22) представляется в сокращенном виде:

$$D = \frac{107,64}{\theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}}. \quad (23a)$$

Если предположить, что КПД антенны составляет 100% и потери антенны незначительны, то усиление $10^{0,1G_0}$, и коэффициент направленного действия D всенаправленной антенны совпадут. Кроме того, для всенаправленных антенны с шириной луча по уровню 3 дБ менее приблизительно 45° , соотношение между усилением и шириной луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости можно упростить, установив экспоненциальный коэффициент равным единице. Конечная погрешность составит менее 6%.

$$G_0 \approx \frac{107,64}{\theta_3}. \quad (23b)$$

2.2 Экспоненциальная функция интенсивности излучения в секторе

Второй случай рассматривается для интенсивности излучения в секторе, описываемой экспоненциальной функцией. А именно:

$$F(\varphi) = e^{-b^2 \varphi^2}, \quad (24)$$

где:

$$b^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\varphi_s} \right)^2 \quad (25)$$

и φ_s представляет собой ширину луча в секторе по уровню 3 дБ.

Подставив уравнения (16) и (24) в уравнение (13) и изменив пределы интегрирования так, чтобы определенные интегралы стали неопределенными, интегрируя и затем, подставляя результат в уравнение (12), получим следующую аппроксимацию:

$$D = \frac{11,09}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}}, \quad (26)$$

где углы определены выше и выражены в радианах. Преобразуя углы в градусы, получим уравнение (26) в виде:

$$D = \frac{36400}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}}. \quad (27)$$

При сравнении уравнений (22) и (27) видно, что разница между коэффициентом направленного действия, вычисленного с помощью любого из этих уравнений, составляет менее 0,3 дБ.

Результаты, полученные при использовании уравнения (27), следует сравнить с рядом измеренных диаграмм направленности для того, чтобы определить непосредственное влияние на данный коэффициент КПД антенны и других потерь. В настоящий момент для секторных антенн, предназначенных для работы в полосе частот от 25,25 до 29,5 ГГц, доступны результаты только двух серий измерений. Замеренные диаграммы в угломестной и азимутальной плоскости приведены, соответственно, на рис. 13 и 14 для одного набора антенн, а на рис. 15 и 16, соответственно, для другого набора. Из рис. 13 и 14 видно, что ширина луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости равна 90° и ширина луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости равна 2,5°. Из уравнения (27) получаем, что коэффициент направленного действия равен 22,1 дБ. Этот результат следует сравнить с усилением 20,5–21,4 дБи, измеренным для антенны, работающей в диапазоне частот 25,5–29,5 ГГц. Предположим, что усиление антенны G_0 в диапазоне около 28 ГГц на 0,7 дБ меньше коэффициента направленного действия, и экспоненциальный коэффициент заменён единицей, что приводит к росту погрешности при увеличении ширины луча. При 45° погрешность достигает 6%. Большая ширина луча приводит к большей погрешности. Основываясь на данном рассмотрении, полуэмпирическое отношение между усилением и шириной луча секторной антенны представляется в следующем виде:

$$G_0 \approx \frac{31000}{\varphi_s \theta_3}. \quad (28a)$$

Аналогично получаем полуэмпирическое соотношение между усилением и шириной луча такой секторной антенны из рис. 15 и 16:

$$G_0 \approx \frac{34000}{\varphi_s \theta_3}. \quad (28b)$$

РИСУНОК 13

Измеренная диаграмма направленности 90° секторной антенны в азимутальной плоскости. Диаграмма направленности измерена в диапазоне от 27,5 до 29,5 ГГц. Крестики с левой стороны рисунка, нарисованные вручную, соответствуют значениям, полученным с помощью выражения (28) (при представлении в дБ) с учетом ширины луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости равной 90°

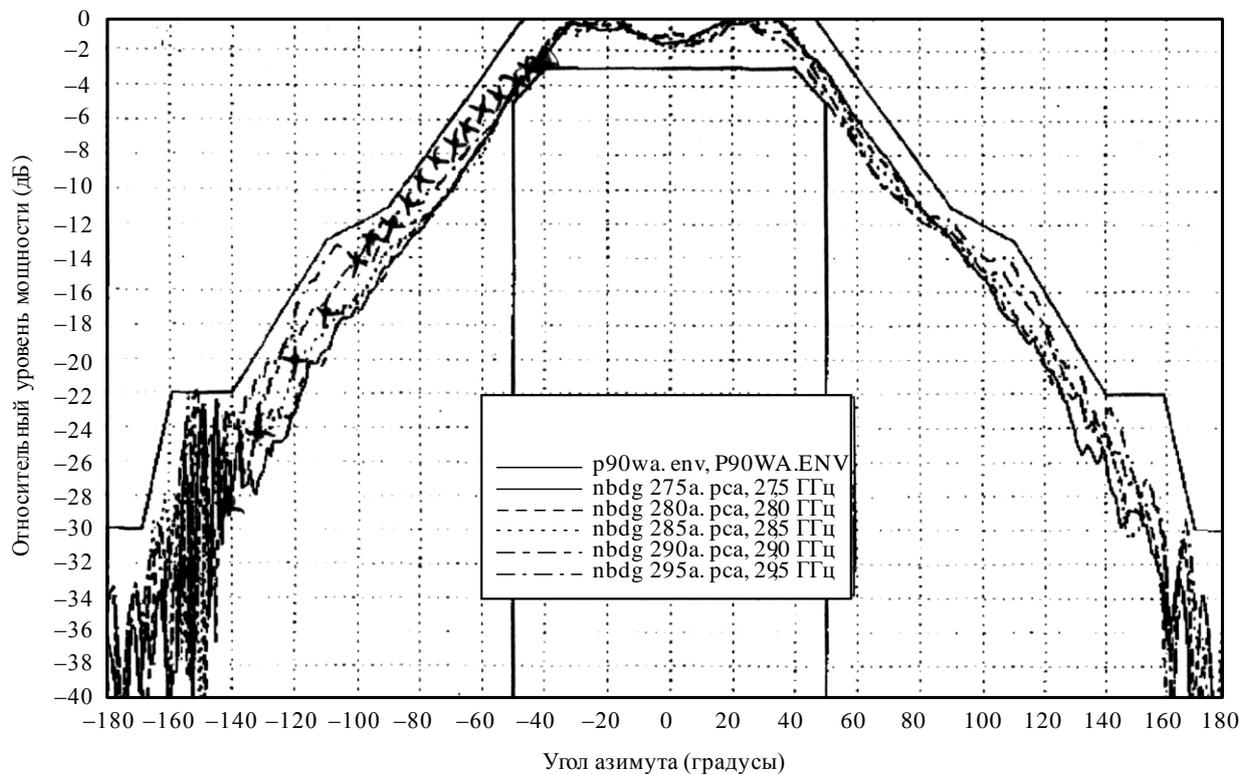


РИСУНОК 14

Измеренная диаграмма направленности 90° секторной антенны в азимутальной плоскости.
 Диаграмма направленности измерена в диапазоне от 27,5 ГГц до 29,5 ГГц

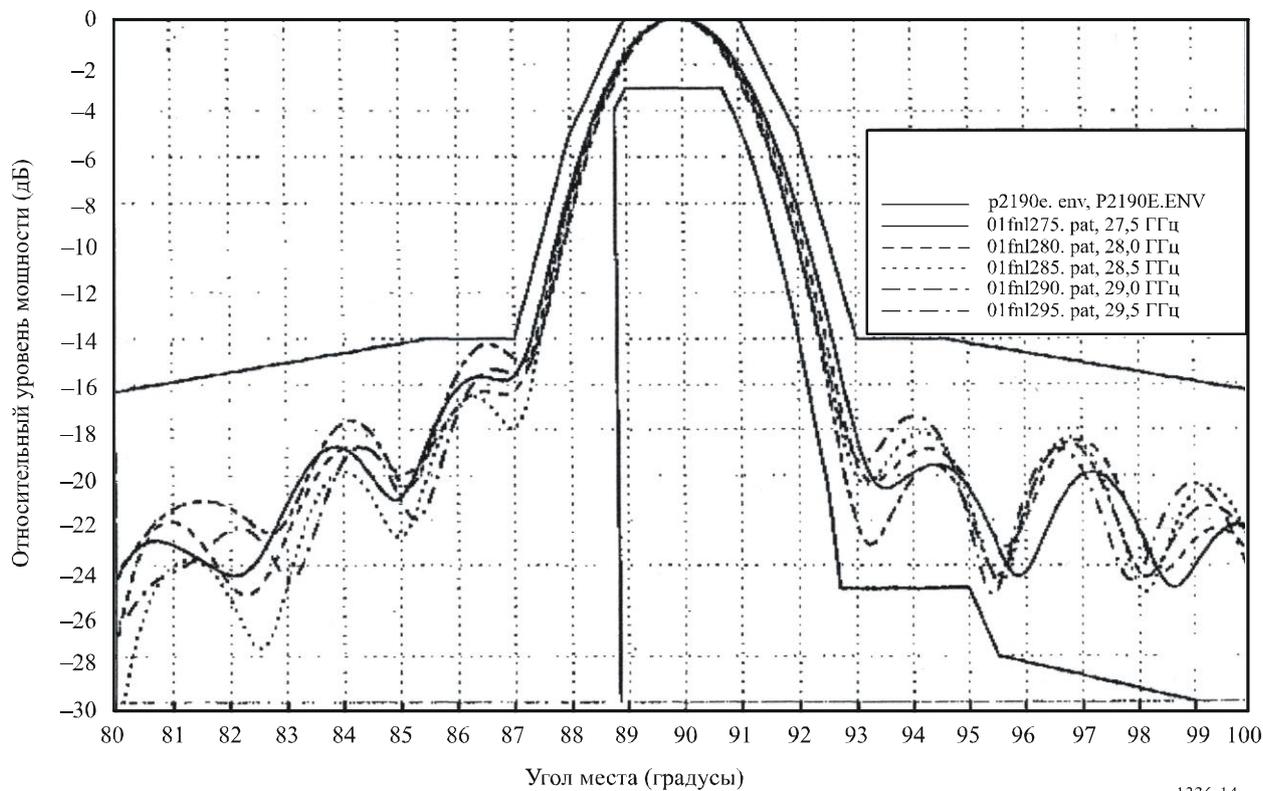


РИСУНОК 15

Диаграмма направленности типовой 90° секторной антенны
 (вертикальная (V) поляризация) в азимутальной плоскости
 Половинный угол при 15 дБи: 90° (рупорная антенна, работающая на частоте 26 ГГц)

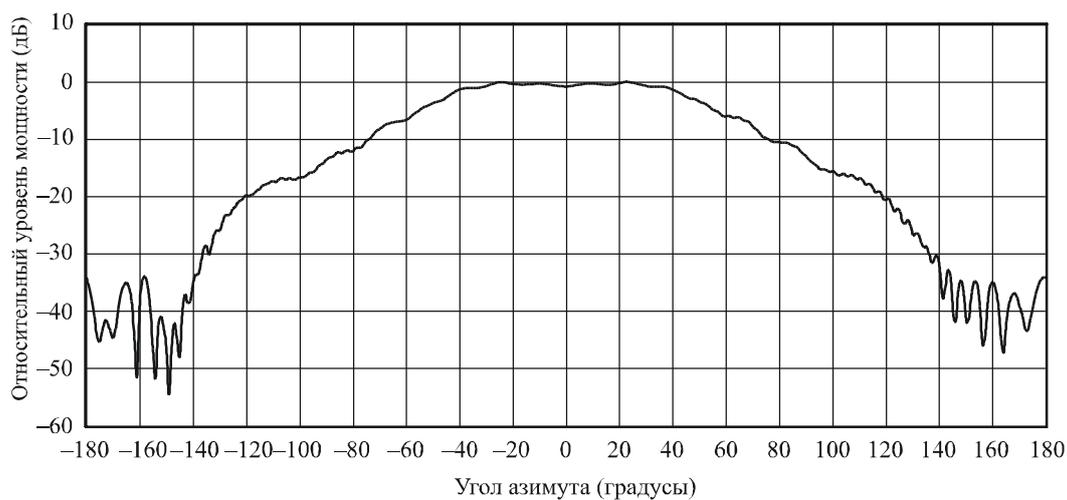


РИСУНОК 16



3 Сравнение с предыдущими результатами для всенаправленных антенн

Целью данного раздела является сравнение результатов, полученных при помощи уравнения (23) для всенаправленных антенн, с предыдущими результатами, описанными и обобщенными в Приложении 1 к настоящей Рекомендации.

Использованная интенсивность излучения в угломестной плоскости для всенаправленных антенн была представлена в форме:

$$F(\theta) = \cos^{2N} \theta. \quad (29)$$

Подставляя уравнение (29) в уравнение (13) и предположив, что $F(\varphi) = 1$, получим:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2N}(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi. \quad (30)$$

Этот двойной интеграл принимает вид:

$$U_0 = \frac{(2N)!!}{(2N+1)!!}, \quad (31)$$

где $(2N)!!$ – двойной факториал, определенный как $(2 \cdot 4 \cdot 6 \dots (2N))$, и $(2N+1)!!$ также представляет собой двойной факториал, определенный как $(1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2N+1))$.

Следовательно, коэффициент направленного действия преобразуется в:

$$D = \frac{(2N+1)!!}{(2N)!!}. \quad (32)$$

Ширина луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости выражается как:

$$\theta_3 = 2 \cos^{-1} \left(0,5^{1/2N} \right). \quad (33)$$

В таблице 2 приведено сравнение между коэффициентами направленного действия, вычисленными на основе предположений и методов, использованных в уравнении (23), и вычисленными с помощью уравнений (32) и (33). Показано, что результаты, полученные с использованием уравнения (23а), хорошо соотносятся с результатами, полученными с использованием уравнений (32) и (33). Во всех случаях уравнение (23а) несколько занижает значения коэффициента направленного действия,

полученного с использованием уравнений (32) и (33). Максимальное значение относительной погрешности оценок (%), выраженной в дБ, составляет $-2,27\%$ и получается при значении ширины луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости равном 65° . Погрешность в этом случае, выраженная в дБ, составляет $-0,062$ дБ. Для значения углов ширины луча по уровню 3 дБ, меньшем 65° , относительная погрешность (%) и погрешность (дБ) являются монотонно убывающими функциями по мере уменьшения ширины луча по уровню 3 дБ. Для значения ширины луча по уровню 3 дБ, равном 16° , относительная погрешность (%) составляет около $-0,01\%$ и значение погрешности (в дБ) меньше приблизительно $0,0085$ дБ. Оценка, аналогичная приведенной в таблице 2 для значений $2N$ до 10 000 (соответствует ширине луча по уровню 3 дБ равной $1,35^\circ$ и коэффициенту направленного действия $19,02$ дБ), подтверждает сходимость результатов обоих подходов.

ТАБЛИЦА 2

Сравнение коэффициента направленного действия всенаправленных антенн, вычисленного с использованием уравнения (23а), с коэффициентом направленного действия, вычисленным с использованием уравнений (32) и (33)

$2N$	θ_3 (градусы) (уравнение (33))	Коэффициент направленного действия (дБ) (уравнение (32))	Коэффициент направленного действия (дБ) (уравнение (23а))	Относительная погрешность (%)	Погрешность (дБ)
2	90,0000	1,7609	1,7437	-0,98	-0,0172
4	65,5302	2,7300	2,6677	-2,28	-0,0623
6	54,0272	3,3995	3,3419	-1,69	-0,0576
8	47,0161	3,9110	3,8610	-1,28	-0,0500
10	42,1747	4,3249	4,2814	-1,01	-0,0435
12	38,5746	4,6726	4,6343	-0,82	-0,0383
14	35,7624	4,9722	4,9381	-0,69	-0,0341
16	33,4873	5,2355	5,2047	-0,59	-0,0307
18	31,5975	5,4703	5,4423	-0,51	-0,0280
20	29,9953	5,6822	5,6565	-0,45	-0,0256
22	28,6145	5,8752	5,8516	-0,40	-0,0237
24	27,4083	6,0525	6,0305	-0,36	-0,0220
26	26,3428	6,2164	6,1959	-0,33	-0,0205
28	25,3927	6,3688	6,3496	-0,30	-0,0192
30	24,5384	6,5112	6,4931	-0,28	-0,0181
32	23,7649	6,6449	6,6278	-0,26	-0,0171
34	23,0603	6,7708	6,7545	-0,24	-0,0162
36	22,4148	6,8897	6,8743	-0,22	-0,0154
38	21,8206	7,0026	6,9879	-0,21	-0,0147
40	21,2714	7,1098	7,0958	-0,20	-0,0140
42	20,7616	7,2120	7,1986	-0,19	-0,0134
44	20,2868	7,3096	7,2967	-0,18	-0,0129
46	19,8431	7,4030	7,3906	-0,17	-0,0124
48	19,4274	7,4925	7,4806	-0,16	-0,0119

ТАБЛИЦА 2 (окончание)

2N	θ_3 (градусы) (уравнение (33))	Коэффициент направленного действия (дБ) (уравнение (32))	Коэффициент направленного действия (дБ) (уравнение (23а))	Относительная погрешность (%)	Погрешность (дБ)
50	19,0367	7,5785	7,5671	-0,15	-0,0115
52	18,6687	7,6613	7,6502	-0,14	-0,0111
54	18,3212	7,7410	7,7302	-0,14	-0,0107
56	17,9924	7,8178	7,8075	-0,13	-0,0104
58	17,6808	7,8921	7,8820	-0,13	-0,0100
60	17,3847	7,9638	7,9541	-0,12	-0,0097
62	17,1031	8,0333	8,0239	-0,12	-0,0094
64	16,8347	8,1007	8,0915	-0,11	-0,0092
66	16,5786	8,1660	8,1571	-0,11	-0,0089
68	16,3338	8,2294	8,2207	-0,11	-0,0087
70	16,0996	8,2910	8,2825	-0,10	-0,0085
72	15,8751	8,3509	8,3426	-0,10	-0,0083
74	15,6598	8,4092	8,4011	-0,10	-0,0081

4 Резюме и выводы

Были получены уравнения для более простого вычисления коэффициента направленного действия и соотношения между шириной луча и усилением всенаправленных и секторных антенн, используемых в системах радиорелейной связи П-МП. Для определения коэффициента направленного действия секторных антенн предлагается использовать следующие уравнения:

$$D = \frac{k}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}}, \quad (34)$$

где:

$$\begin{aligned} k &= 38750 && \text{при } \varphi_s > 120^\circ, \\ k &= 36400 && \text{при } \varphi_s \leq 120^\circ; \end{aligned} \quad (35)$$

φ_s – ширина луча по уровню 3 дБ секторной антенны в азимутальной плоскости (градусы) для интенсивности излучения с предполагаемой экспоненциальной функцией по азимуту, и θ_3 – ширина луча по уровню 3 дБ секторной антенны в угломестной плоскости (градусы).

Для всенаправленных антенн при определении ширины луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости, при усилении, представленном в дБи (см. уравнение (23b)), предлагается использовать следующее упрощенное уравнение:

$$\theta_3 \approx 107,6 \times 10^{-0,1 G_0}.$$

Предлагается использовать на предварительной основе следующее полуэмпирическое уравнение, связывающее усиление секторной антенны (дБи) с шириной луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости и азимутальной плоскости в случае, когда угол сектора составляет порядка 120° или меньше и ширина луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости меньше чем приблизительно 45° (см. уравнение (28a)):

$$\theta_3 \approx \frac{31000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\varphi_s}.$$

Необходимо провести дальнейшее исследование для определения, что делать с переходной областью, подразумеваемой в уравнении (35), а также для оценки точности таких аппроксимаций, применяемых для измеренных диаграмм направленности секторных и всенаправленных антенн, предназначенных для использования в системах радиорелейной связи П-МП в полосах частот в диапазоне от 1 ГГц до приблизительно 70 ГГц.

Приложение 3

Процедура определения усиления секторной антенны при произвольном внеосевом угле, задаваемом углом азимута и углом места относительно направления прицеливания антенны

1 Анализ

На рис. 17 представлена основная геометрическая модель для определения усиления секторной антенны при произвольном внеосевом угле. Предполагается, что антенна располагается в центре сферической системы координат; максимальное излучение направлено по оси x ; плоскость x - y представляет собой локальную горизонтальную плоскость; плоскость углов места включает в себя ось z ; и u_0 – единичный вектор, направление которого используется для определения усиления секторной антенны. При анализе секторных антенн, в частности, важно соблюдать диапазон действительности азимутальных углов и углов места:

$$-180^\circ \leq \varphi \leq +180^\circ$$

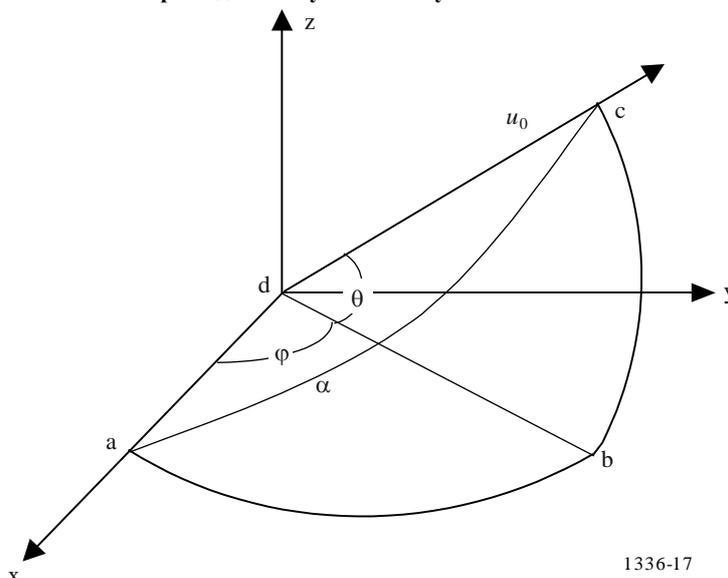
$$-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ .$$

Следует также соблюдать, чтобы диапазон действительности угла α составлял:

$$-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ .$$

РИСУНОК 17

Определение угла вне направления прицеливания при заданных углах азимута и места



1336-17

Сделаны два фундаментальных предположения, касающиеся данной процедуры:

- контур усиления по уровню -3 дБ диаграммы направленности в дальней зоне, нанесенный на двумерную плоскость как функция углов азимута и места, будет представлен в виде эллипса, как показано на рис. 18; и
- усиление секторной антенны при произвольном внеосевом угле является функцией ширины луча по уровню 3 дБ и ширины луча антенны, измеренной в плоскости, включающей ось x и единичный вектор u_0 (см. рис. 17).

При известной ширине луча секторной антенны по уровню 3 дБ (градусы) в угломестной и азимутальной плоскости φ_3 и θ_3 , численное значение усиления по направлению прицеливания представлено, на предварительной основе, следующим уравнением (см. п. 3.3 раздела *рекомендует* и уравнение (28a)).

$$G_0 = \frac{31\,000}{\varphi_3 \theta_3}. \quad (36)$$

Первым шагом при оценке усиления секторной антенны при произвольном внеосевом угле, φ и θ , является определение значения α . С учетом рис. 17 и предполагая, что abc представляет собой прямоугольный сферический треугольник, α определяется следующим образом:

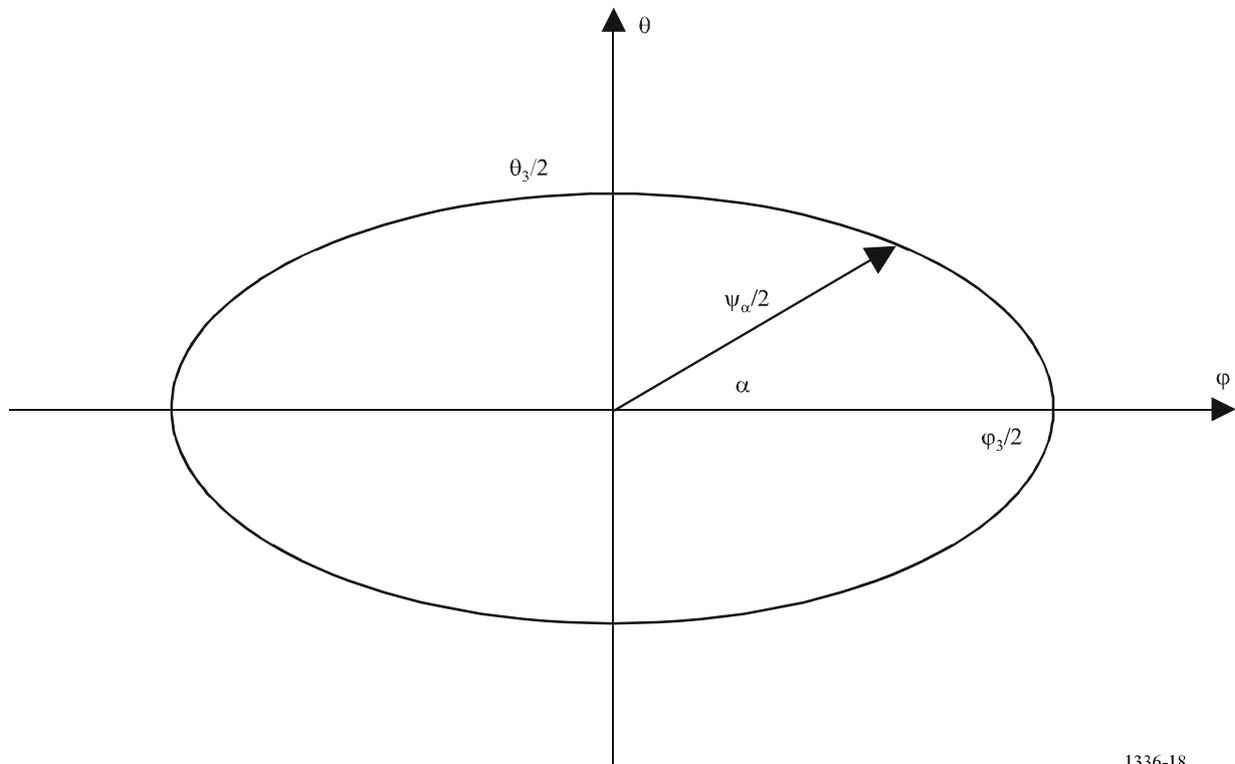
$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi}\right), \quad -90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ \quad (37a)$$

и внеосевой угол в плоскости adc выражается как:

$$\psi = \arccos(\cos \varphi \cos \theta), \quad 0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad (37b)$$

РИСУНОК 18

Определение ширины эллиптического луча по уровню 3 дБ при произвольном угле наклона α



1336-18

Учитывая, что луч имеет эллиптическую форму, ширина луча секторной антенны по уровню 3 дБ в плоскости adc на рисунке 17 определяется с помощью уравнения:

$$\Psi_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\Phi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\Theta_3}\right)^2}} \quad (38)$$

На основании этого метода расчета альтернативный метод (см. Приложение 6) обеспечивает определение эталонной диаграммы направленности в диапазоне частот от 6 ГГц до приблизительно 70 ГГц (см. п. 3.2 раздела *рекомендует* настоящей Рекомендации).

2 Выводы

Данная процедура была определена для оценки усиления секторной антенны при произвольном внеосевом угле. Подчеркивалась важность соблюдения диапазона действительности азимутального угла и угла места при моделировании эталонной диаграммы направленности секторной антенны. Требуется проведение дальнейших исследований для указания диапазона усиления и ширины луча в азимутальной и угломестной плоскости, в котором используемое здесь представление эталонной диаграммы направленности (уравнения (2d1)–(2f), (3a) и (3б)) справедливо для секторных антенн.

Приложение 4

Математическая модель обобщенных средних диаграмм направленности всенаправленных антенн П-МП ФБС для использования при статистической оценке помех

1 Введение

В основном тексте настоящей Рекомендации (см. п. 2.2 раздела *рекомендует*) приведены эталонные диаграммы направленности, представляющие средние уровни боковых лепестков для всенаправленных (по азимуту) антенн, которые можно применять в случае нескольких источников помех или источников помех, уровень которых изменяется во времени.

С другой стороны, для использования при пространственном статистическом анализе помех, например, создаваемых большому количеству ФБС несколькими спутниковыми системами ГСО, требуется математическая модель обобщенных диаграмм направленности, как представлено в последних разделах данного Приложения.

Следует отметить, что данные математические модели, основанные на синусоидальных функциях, в случае использования при вычислении помех от нескольких источников, могут привести к необъективным результатам, если только источники помех не будут распределены в большом диапазоне углов азимута/места. Поэтому, использование данных диаграмм направленности рекомендуется только для случая, указанного выше.

2 Математическая модель для всенаправленных антенн

В случае применения пространственного анализа помех, создаваемых большому количеству ФС станций от одной или нескольких спутниковых систем ГСО, для углов места в интервале от -90° до 90° следует использовать следующие средние диаграммы направленности по боковым лепесткам (см. Приложение 1):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{при } 0 \leq \theta < \theta_4, \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) + F(\theta) & \text{при } \theta_4 \leq \theta < \theta_3, \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] + F(\theta) & \text{при } \theta_3 \leq \theta \leq 90^\circ, \end{cases} \quad (39a)$$

с:

$$F(\theta) = 10 \log \left(0,9 \sin^2 \left(\frac{3\pi\theta}{4\theta_3} \right) + 0,1 \right), \quad (39b)$$

где θ , θ_3 , θ_4 , G_0 и k определены и представлены в п. 2.1 раздела *рекомендует* в основном тексте.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В случае использования типовых антенн, работающих в диапазоне частот 1–3 ГГц, параметр k должен равняться 0,7.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков, работающих в диапазоне частот 1–3 ГГц, и для всех антенн, работающих в диапазоне частот 3–70 ГГц, параметр k должен равняться 0.

Приложение 5

Процедура определения диаграммы направленности антенны при произвольном внеосевом угле, когда направление прицеливания антенны имеет механический или электрический наклон

1 Введение

В настоящем Приложении представлены методы расчета диаграммы направленности секторной антенны, имеющей механический или электрический наклон. Анализ средств механического наклона представлена в п. 2, электрического наклона – в п. 3.

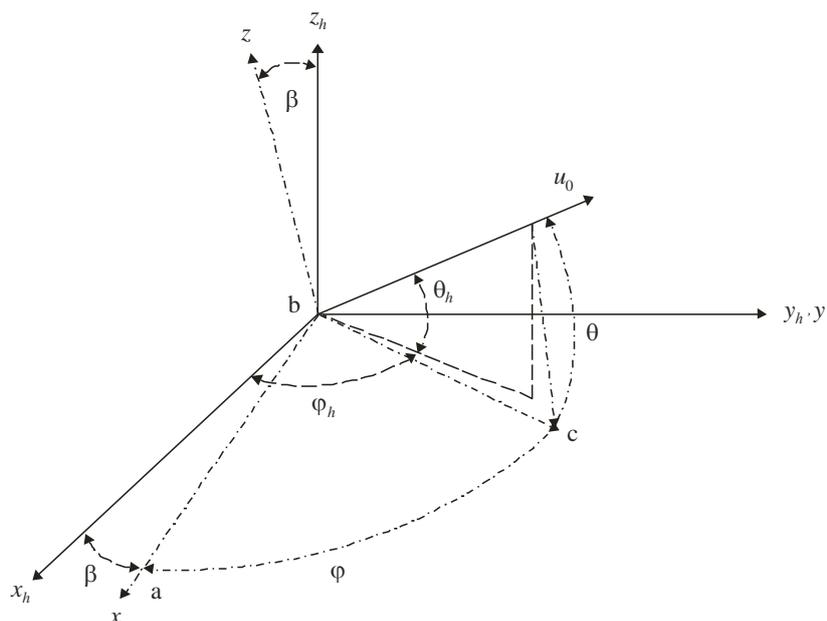
2 Анализ механического наклона

На рис. 19 представлена основная геометрическая модель для определения усиления секторной антенны при произвольном внеосевом угле. Предполагается, что антенна располагается в центре сферической системы координат; максимальное излучение направлено по оси x . Если антенна имеет наклон, возникает необходимость различения координат на базе антенны (θ , φ) и координат, относящихся к горизонтальной плоскости (θ_h , φ_h). Взаимосвязь между этими системами координат наилучшим образом определяется путем рассмотрения присоединенных к ним прямоугольных систем координат.

Если антенна наклонена на определенный угол наклона путем вращения системы координат вокруг оси y , плоскость x - z содержит ось основного луча секторной антенны, и эта плоскость пересекает локальную горизонтальную плоскость по оси z . Угол наклона β определяется как положительный угол, на который ось главного лепестка (градусы) находится ниже горизонтальной плоскости в месте установки антенны.

РИСУНОК 19

Правосторонние системы координат, используемые для расчета диаграммы направленности секторной антенны, имеющей наклон



F.1336-19

В прямоугольной системе координат, расположенной на антенне, когда ее ось x находится в вертикальной плоскости, в которой присутствует максимальное усиление антенны, координаты единичного вектора определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} z_h &= \sin \theta_h \\ x_h &= \cos \theta_h \cos \varphi_h \\ y_h &= \cos \theta_h \sin \varphi_h \end{aligned} \quad (40)$$

Следует отметить, что это нестандартная сферическая система координат в том, что угол места измеряется в диапазоне от -90 до $+90$ градусов. Это то же соглашение, которое использовалось в разделе *рекомендует* в основном тексте и в предыдущих приложениях.

Рассмотрим прямоугольную систему координат на рис. 19, которая содержит ось главного лепестка антенны и повернута вниз вокруг оси y на угол в β градусов. Единичный вектор в этой системе имеет координаты x , y и z , определяемые следующим образом:

$$\begin{aligned} z &= z_h \cos \beta + x_h \sin \beta \\ x &= -z_h \sin \beta + x_h \cos \beta \\ y &= y_h \end{aligned} \quad (41)$$

В соответствующей сферической системе координат, относящейся к плоскости, определенной осью главного лепестка и осью y , сферические углы соотносятся с координатами x , y и z как $\sin \theta = z$ и $\tan \varphi = y/x$. Определение значения φ , лежащего в диапазоне от -180 до $+180$ градусов, выполняется с помощью $\arctan(y/x)$ с возможными коррекциями в зависимости от алгебраического знака x и y .

Альтернативно, используя тот факт, что сумма квадратов x , y и z является единицей, можно показать, что $\cos \varphi = x/\cos \theta$ в ограниченном диапазоне значений φ . Подставляя уравнения (40) в (41) и далее используя полученные значения z и x для отношений $z = \sin \theta$ и $x = \cos \theta \cos \varphi$, получаем следующие выражения для значений сферических координат (см. Примечание 1):

$$\begin{aligned} \theta &= \arcsin(z) = \arcsin(\sin \theta_h \cos \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \sin \beta), & -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ \varphi &= \arccos\left(\frac{x}{\cos \theta}\right) = \arccos\left(\frac{(-\sin \theta_h \sin \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \cos \beta)}{\cos \theta}\right), & 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (42)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1 – Диапазон функции "arccos" лежит от 0° до 180°. Однако это не ограничивает применимости данной методики, так как диаграммы направленности антенны обладали зеркальной симметрией относительно плоскости x-z и плоскости x-y.

Выражения в п. 3.4. раздела *рекомендует* получены из уравнения (42).

3 Применения уравнений диаграммы направленности, приведенных в пп. 2.5 и 3.5 раздела *рекомендует*, к антеннам с электрическим наклоном

В случае электрического наклона уравнения диаграммы направленности должны теоретически быть функцией угла наклона β , который зависит от величины фазового сдвига потока, излучаемого от элементов антенны вертикального размещения. Однако, учитывая что β является в принципе малым значением (например, в пределах 15°), для упрощения можно применить следующее допущение.

Поскольку значения усиления излучения с наклоном в зените и надире должны оставаться теми же значениями относительно независимо от угла наклона β (см. рис. 20), реальная диаграмма направленности по сравнению с диаграммой направленностью до наклона несколько расширяется или сжимается выше оси максимального усиления или ниже этой оси, соответственно, иллюстрацией чего служит диаграмма, представленная на рис. 20 сплошной линией.

Значения усиления этой диаграммы направленности (показанной сплошной линией) могут быть аппроксимированы значениями другой диаграммы (показанной на рис. 20 прерывистой линией), используя преобразование параметров. Диаграмма направленности, представленная прерывистой линией, выводится с использованием идеального равномерного сдвига угла места β для исходной диаграммы направленности, рассчитанной по уравнениям, приведенным в пп. 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 в соответствующих случаях.

Таким образом, диаграммы направленности с электрическим сдвигом выводятся с использованием преобразования параметров в уравнениях, приведенных в разделе *рекомендует* (пп. 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2), следующим образом:

Угол места θ относительно оси максимального усиления может быть определен следующим образом:

$$\theta = \theta_h + \beta, \quad (43)$$

где:

θ_h : угол места (градусы), измеренный от горизонтальной плоскости в месте установки антенны для диаграммы направленности с наклоном ($-90^\circ \leq \theta_h \leq 90^\circ$);

β : угол электрического наклона, определенный в п. 2 настоящего Приложения или в пп. 2.5 и 3.4 раздела *рекомендует*.

Для применения уравнений эталонной диаграммы направленности, приведенных в пп. 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 раздела *рекомендует*, к антеннам с электрическим наклоном, вводится коэффициент сжатия/расширения R_{CE} на основе вышеприведенного допущения. Коэффициент сжатия/расширения R_{CE} можно определить следующим образом:

$$R_{CE} = \frac{90}{90 \pm \beta}. \quad (44)$$

Угол места θ_e , с которым рассчитывается усиление излучения с наклоном в θ_h с использованием уравнений, приведенных в пп. 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 раздела *рекомендует*, можно описать следующим образом:

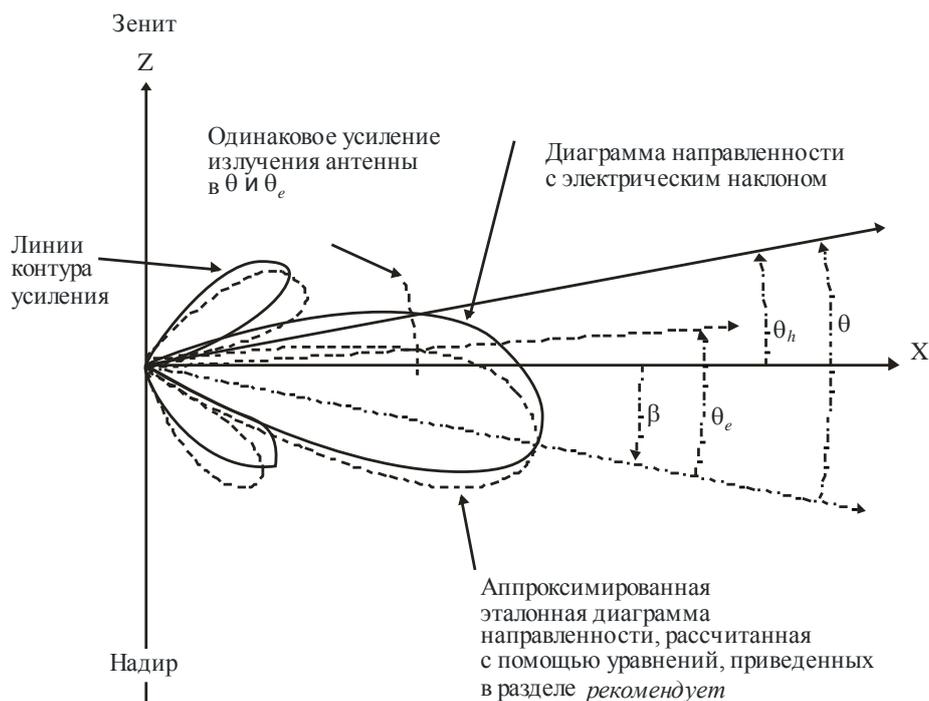
$$\theta_e = \theta \cdot R_{CE} = \frac{90 \cdot \theta}{90 + \beta} = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 + \beta} \quad \text{при } \theta_h + \beta \geq 0$$

$$\theta_e = \theta \cdot R_{CE} = \frac{90 \cdot \theta}{90 - \beta} = \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 - \beta} \quad \text{при } \theta_h + \beta < 0 . \quad (45)$$

Диаграммы направленности с электрическим наклоном рассчитываются с использованием θ_e из уравнений (45), вместо θ из уравнений, приведенных в пп. 3.1. и 3.2. раздела *рекомендует* для секторных антенн, а также в пп. 2.1 и 2.2 раздела *рекомендует* для всенаправленных антенн.

РИСУНОК 20

**Аппроксимация эталонной диаграммы направленности
для антенны с электрическим наклоном**



F.1336-20

Приложение 6

Метод расчета эталонных диаграмм направленности секторной антенны для диапазона частот от 6 ГГц до приблизительно 70 ГГц, определенного в п. 3.2 раздела *рекомендует* в основной части

1 Введение

В настоящем Приложении представлено определение и дополнительные разъяснения уравнений и параметров для эталонных диаграмм направленности секторных антенн для диапазона частот от 6 ГГц до приблизительно 70 ГГц, определенного в п. 3.2 раздела *рекомендует* в основной части настоящей Рекомендации. Уравнения, представленные в настоящем Приложении, были получены по результатам практического анализа на базе измеренных данных секторных антенн.

2 Рассмотрение

Эталонные диаграммы направленности секторных антенн, определенные в предыдущих версиях настоящей Рекомендации, недостаточно хорошо соответствовали измеренным диаграммам направленности, в особенности за пределами главного лепестка в азимутальной плоскости, а в

угломестной плоскости описанные диаграммы направленности достаточно хорошо соответствуют измеренным данным.

В силу разницы между значениями ширины луча по уровню 3 дБ, то есть φ_3 и θ_3 , в азимутальной и угломестной плоскостях, расчетные диаграммы направленности, базирующиеся на этих значениях, дают разные значения усиления в точке пересечения $(\varphi, \theta) = (\pm 180, 0)$, хотя значения усиления в обеих плоскостях в этой точке пересечения теоретически равны между собой.

Необходимо вследствие этого отметить, что в результате такого несоответствия базовая математическая модель и соответствующие допущения (показанные на рисунках 17 и 18 в Приложении 3), которые приняты в алгоритме получения диаграмм направленности секторной антенны, могут оказаться неприменимыми в полных трехмерных углах.

Учитывая вышеизложенные соображения, приняты действующие алгоритмы, которые поясняются ниже, для преодоления несоответствия между расчетной и измеренной диаграммами направленности.

В диапазоне углов, где ψ больше приблизительно 90° , предлагается изменить значения ширины луча по уровню 3 дБ φ_3 и θ_3 на переменные значения φ_{3m} и θ_{3m} , соответственно, с тем чтобы постепенно получить единое значение $\varphi_{3(180)}$ в точке пересечения $(\pm 180, 0)$, так как несоответствие в этой точке вызвано разницей между φ_3 и θ_3 .

В качестве возможного значения $\varphi_{3(180)}$ может быть принята имеющаяся константа θ_3 , допуская, что более не существует различия в точке пересечения между угломестной и азимутальной плоскостями, и это представляет простейший выбор, поскольку мы рассматриваем точку пересечения как находящуюся в угломестной плоскости.

Следовательно,

$$\varphi_{3(180)} = \theta_3 \text{ (см. Примечание 1)}. \quad (46)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Если известен коэффициент обратного излучения (FBR) эталонной антенны, возможно принять $\varphi_{3(180)}$ в следующем виде:

$$\varphi_{3(180)} = \frac{180}{10^{(FBR-\lambda k)/15}}. \quad (47)$$

Что касается азимутальной плоскости, то поскольку разница в диаграммах направленности начинается от угла, соответствующего $x = 1$ для пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам и $x = 1,152$ для средних боковых лепестков, азимутальный угол в этой точке φ_{th} выражается следующим образом:

$$\varphi_{th} = \varphi_3 \quad \text{(для пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам)} \quad (48a)$$

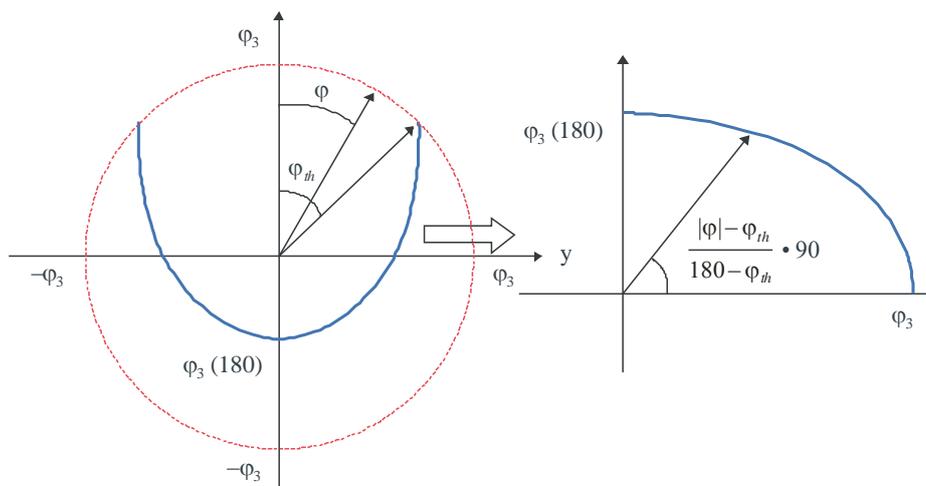
$$\varphi_{th} = 1,152\varphi_3 \quad \text{(для средних диаграмм направленности по боковым лепесткам)}. \quad (48b)$$

Вновь определенная переменная ширины луча по уровню 3 дБ φ_{3m} постепенно изменяется от φ_3 при $\pm\varphi_{th}$ до $\varphi_{3(180)}$ при азимутальном угле $\pm 180^\circ$. Учитывая, что изменяющееся геометрическое место точек является частью эллипса, разница между азимутальными углами $|\varphi|$ и φ_{th} сжимается с коэффициентом $90/(180 - \varphi_{th})$, как показано на рисунке 21. Далее φ_{3m} выражается, в общем случае, с помощью следующего уравнения, то есть уравнения (2d7) в основной части:

$$\varphi_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin\left(\frac{|\varphi| - \varphi_{th}}{180 - \varphi_{th}} \cdot 90\right)}{\varphi_{3(180)}}\right)^2}} \quad \text{при} \quad \varphi_{th} < |\varphi| \leq 180^\circ. \quad (49)$$

РИСУНОК 21

Определение коэффициента сжатия для уравнения эллипса



F.1336-21

Учитывая что значение φ_{3m} в диапазоне $\varphi_{th} < \varphi \leq 90^\circ$ описывается уравнением (49), требуется внести логически вытекающее изменение в уравнение (2a3) в п. 3.1. раздела *рекомендует* 3.1 предыдущих версий настоящей Рекомендации:

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{при} \quad 0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ, \quad (50)$$

где:

$$\varphi_{3m} = \varphi_3 \quad \text{при} \quad 0^\circ \leq \psi \leq \varphi_{th}.$$

Кроме того, в пределах угла ψ между 90° и 180° в угломестной плоскости (в данном случае $\theta = 180 - \psi$), определена следующая новая переменная θ_{3m} , которая постепенно изменяется от θ_3 при 90° до $\varphi_{3(180)}$ при 180° . Учитывая, что изменяющееся геометрическое место точек является частью эллипса, θ_{3m} выражается, в общем случае, с помощью следующего уравнения (следует отметить, что в случае $\varphi_{3(180)} = \theta_3$, θ_{3m} является постоянным значением θ_3):

$$\theta_{3m} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta}{\varphi_{3(180)}}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{при} \quad 90^\circ < \psi \leq 180^\circ. \quad (51)$$

Аналогичным образом, учитывая уравнение (51), в диапазоне, где ψ больше 90° , значение Ψ_α не зависит от α , а зависит от θ и описывается следующим уравнением:

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta}{\varphi_{3m}}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{\theta_3}\right)^2}} \quad \text{при} \quad 90^\circ < \psi \leq 180^\circ. \quad (52)$$

Вышеприведенные уравнения (50) и (52) соотносятся с уравнением (2d3) в основном тексте.

Приложение 7

Метод расчета эталонных диаграмм направленности секторной антенны для диапазона частот от 00 МГц до приблизительно 6 ГГц, определенного в п. 3.1 раздела *рекомендует* в основной части

1 Введение

В настоящем Приложении представлено определение и дополнительные разъяснения уравнений и параметров для эталонных диаграмм направленности секторных антенн для диапазона частот от 400 МГц до приблизительно 6 ГГц, определенного в п. 3.1 раздела *рекомендует*.

В предыдущей версии настоящей Рекомендации был принят алгоритм для расчета эталонных диаграмм направленности с использованием тех же уравнений и того же параметра k в обеих – азимутальной и угломестной – плоскостях. Вследствие этого было сложно обеспечить хорошее соответствие эталонных диаграмм направленности и диаграмм на основе измеренных данных в азимутальной и угломестной плоскостях.

Для преодоления этой проблемы в настоящей версии принят новый подход, при котором для расчета каждой диаграммы направленности в азимутальной или угломестной плоскости используются разные уравнения, которые не базируются на допущении относительно ширины луча по уровню 3 дБ эллиптического луча, определенного в Приложении 3 настоящей Рекомендации.

2 Рассмотрение

Для введения новых базовых уравнений для эталонных диаграмм направленности для структуры секторной антенны принимается следующее:

- элементы антенны включаются в решетку в вертикальном направлении аналогично всенаправленным антеннам;
- элементы антенны являются секторно направленными в горизонтальном направлении.

На базе структуры всенаправленной антенны общая вертикальная диаграмма направленности излучающих элементов в решетке является функцией только угла места в силу исключительно вертикальной ориентации решетки. Соответственно, вертикальные диаграммы направленности не подвержены влиянию изменения азимутального угла. Для всенаправленных антенн, в которых используются дипольные излучающие элементы, вертикальные диаграммы направленности являются идентичными независимо от азимутальных углов. С другой стороны, для секторных антенн, излучающие элементы которых являются направленными, диаграмма направленности при произвольном азимутальном угле φ несколько уменьшена относительно диаграммы направленности при $\varphi = 0^\circ$ с коэффициентом сжатия R , который означает степень сжатия горизонтального усиления при смещении азимутального угла от 0° к φ .

Вместе с тем, горизонтальные диаграммы направленности не подвержены влиянию изменения угла места θ , следовательно, относительное горизонтальное усиление антенны (дБ) (отрицательное усиление) является одним и тем же значением при произвольном азимутальном угле независимо от углов места. Соответственно, относительное горизонтальное усиление в произвольной точке $G_{ar}(\varphi, \theta)$ выражается следующим образом:

$$G_{ar}(\varphi, \theta) = G_{ar}(\varphi, 0^\circ) \quad (\text{дБ}) \quad (53)$$

φ : азимутальный угол относительно угла максимального усиления в горизонтальной плоскости (градусы) ($-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$);

θ : угол места относительно локальной горизонтальной плоскости, когда максимальное усиление находится в этой плоскости ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$).

Таким образом, вышеупомянутый коэффициент сжатия R можно описать следующим образом:

$$R = \frac{G_{ar}(\varphi, 0^\circ) - G_{ar}(180^\circ, 0^\circ)}{G_{ar}(0^\circ, 0^\circ) - G_{ar}(180^\circ, 0^\circ)}$$

R : коэффициент сжатия горизонтального усиления при смещении азимутального угла от 0° к φ ,

И вертикальное относительное усиление в произвольной точке $G_{er}(\varphi, \theta)$ выражается следующим образом:

$$G_{er}(\varphi, \theta) = R \cdot G_{er}(0^\circ, \theta) \quad (\text{дБ}) \quad (54)$$

В результате, относительное усиление секторной антенны в произвольной точке описывается как сумма в дБ уравнений (53) и (54), а усиление относительно изотропной антенны $G(\varphi, \theta)$ – как функция нормализованного направления по ширине луча на уровне 3 дБ, то есть приведенное в основной части уравнение (2a1) принимает следующий вид:

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (\text{дБи}) \quad (55)$$

G_0 : максимальное усиление в азимутальной плоскости (дБи);

$G_{hr}(x_h)$: относительное усиление в азимутальной плоскости в нормализованном направлении $(x_h, 0)$ (дБ);

$x_h = |\varphi|/\varphi_3$;

φ_3 : ширина луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости (градусы) (обычно равна ширине луча секторной антенны);

$G_{vr}(x_v)$: относительное усиление в угломестной плоскости в нормализованном направлении $(0, x_v)$ (дБ);

$x_v = |\theta|/\theta_3$;

θ_3 : ширина луча по уровню 3 дБ в угломестной плоскости (градусы);

в этом случае R , то есть уравнение (2a2) в основном тексте может быть представлено следующим образом:

$$R = \frac{G_{hr}(x_h) - G_{hr}\left(\frac{180^\circ}{\varphi_3}\right)}{G_{hr}(0) - G_{hr}\left(\frac{180^\circ}{\varphi_3}\right)}. \quad (56)$$

Кроме того, используя элементы антенны с секторным направлением, диаграммы направленности основного лепестка в азимутальной плоскости могут быть представлены как $-12x_h^2$ в дБ, так как это уравнение в ходе предыдущих исследований показало хорошее соответствие в пределах ширины луча по уровню 3 дБ измеренным данным излучения антенны в азимутальной плоскости.

Наряду с этим принимается, что значения относительного усиления эталонной диаграммы направленности $G_{hr}(x_h)$ и $G_{vr}(x_v)$ имеют относительное минимальное значение. Минимум обнаруживается вблизи $\pm 180^\circ$ в азимутальной плоскости и при $\pm 90^\circ$ в угломестной плоскости на основе структуры секторной антенны, и оба значения минимального усиления теоретически являются одинаковыми. Что касается относительного минимального усиления G_{180} , то целесообразно выбирать значение, рассчитанное в точке $(\varphi, \theta) = (0^\circ, \pm 180^\circ)$ в угломестной плоскости, используя следующие уравнения, так как это расчетное значение в предыдущих исследованиях очень хорошо соответствовало угломестным диаграммам направленности на основании большого числа совокупностей измеренных данных:

$$G_{180} = -\lambda_k - 15 \log(180^\circ/\theta_3) \quad \text{для пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам,} \quad (57)$$

где:

$$\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k_p);$$

k_p : параметр, который реализует относительное минимальное усиление для пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам;

$$G_{180} = -\lambda_k - 3 - 15\log(180^\circ/\theta_3) \quad \text{для средних диаграмм направленности по боковым лепесткам} \quad (58)$$

где:

$$\lambda_k = 12 - 10\log(1 + 8k_a);$$

k_a : параметр, который реализует относительное минимальное усиление для средних диаграмм направленности по боковым лепесткам .

3 Вывод уравнений диаграммы направленности

В данном разделе значения относительного усиления эталонной диаграммы направленности $G_{hr}(x_h)$ и $G_{vr}(x_v)$ обнаруживаются конкретно в случае пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам в диапазоне частот от 400 МГц до приблизительно 6 ГГц. С другой стороны, для средних диаграмм направленности по боковым лепесткам соответствующие уравнения могут быть легко выведены следующим образом:

- уравнение (59) заменяется уравнением (58), которое уменьшено на 3 дБ относительно уравнения (57);
- уравнение (60) является тем же, и уравнение (61) используется практически неизменным, за исключением разницы в -3 дБ за пределами части главного лепестка.

Эти значения эталонного усиления имеют относительное минимальное значение G_{180} и базируются на уравнении (57), это значение, то есть приведенное в основной части уравнение (2b1) принимает следующий вид:

$$G_{180} = -12 + 10\log(1 + 8k_p) - 15\log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right), \quad (59)$$

где:

k_p : параметр, который реализует относительное минимальное усиление для пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам.

3.1 Уравнения относительных значений эталонной антенны в азимутальной плоскости

Усиление эталонной антенны $G_{hr}(x_h)$, то есть приведенное в основной части уравнение (2b2), выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 && \text{при } x_h \leq 0,5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh} && \text{при } 0,5 < x_h \\ G_{hr}(x_h) &\geq G_{180}, \end{aligned} \quad (60)$$

где:

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3;$$

k_h : коэффициент корректировки азимутальной диаграммы направленности на основе протекающей мощности ($0 \leq k_h \leq 1$);

$$\lambda_{kh} = 3(1 - 0,5^{-k_h}).$$

3.2 Уравнения относительных значений эталонной антенны в угломестной плоскости

Уравнения для относительного усиления эталонной антенны в основном соответствуют уравнениям, определенным в предыдущей версии настоящей Рекомендации, так как расчетные эталонные диаграммы направленности в ходе предыдущих исследований показали хорошее соответствие измеренным данным излучения антенны около первого бокового лепестка в угломестной плоскости.

Однако относительное эталонное усиление не является также меньше G_{180} , а также $G_{hr}(x_h)$, и минимальное значение находится в точке $\theta = 90^\circ$. В уравнении для расчета около точки минимума, следовательно, коэффициент наклона затухания, равный 15, заменяется на C , для того чтобы достичь точки минимума.

Усиление эталонной антенны $G_{vr}(x_v)$, то есть уравнение (2b3) в основной части, выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{при } x_v < x_k \\ G_{vr}(x_v) &= -12 + 10\log(x_v^{-1.5} + k_v) && \text{при } x_k \leq x_v < 4 \\ G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{kv} - C\log(x_v) && \text{при } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{при } x_v = 90^\circ/\theta_3, \end{aligned} \quad (61)$$

где:

$$x_v = |\theta|/\theta_3;$$

k_v : коэффициент корректировки угломестной диаграммы направленности на основе протекающей мощности ($0 \leq k_v \leq 1$);

$$x_k = \sqrt{1 - 0,36k_v};$$

$$\lambda_{kv} = 12 - C\log(4) - 10\log(4^{-1.5} + k_v);$$

коэффициент наклона затухания C выражается следующим образом:

$$C = \frac{10\log\left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right)^{1.5} \cdot (4^{-1.5} + k_v)}{1 + 8k_p}\right)}{\log\left(\frac{22,5^\circ}{\theta_3}\right)}.$$

4 Сравнение измеренных данных и расчетных эталонных диаграмм направленности

В целях выбора для типовых антенн надлежащих вышеупомянутых значений k_h , k_v , k_p и k_a были проведены сравнения – для пиковых и средних диаграмм направленности – эталонных диаграмм направленности, рассчитанных с использованием приведенных в разделе 3, выше, уравнений, и измеренных диаграмм направленности по боковым лепесткам. Диаграммы направленности антенн по боковым лепесткам измерялись для разных условий путем изменения наклона и частоты передачи.

По результатам статистического анализа этих измерений 95-й перцентиль измерений представлен в качестве измеренных пиковых данных боковых лепестков, а средняя характеристика измерений показана в качестве измеренных средних данных боковых лепестков. Если в ходе измерений применялся наклон, эти данные были компенсированы коэффициентами путем преобразования данных измерений в угловой размер, с тем чтобы поместить максимальное усиление в нулевой угол места.

В ходе разработки последней по времени версии настоящей Рекомендации в МСЭ-R были сообщены некоторые измеренные данные для секторных антенн в диапазоне частот вплоть до 698 МГц. На основании изучения расчетных данных, которое показало применимость этих эталонных диаграмм направленности вплоть до 400 МГц, следует отметить также, что не существует физической причины, которая обусловила бы резкое изменение характеристик антенн в нижней полосе.

Сравнение диаграмм направленности типовых антенн представлено на рисунках 22–25.

Измеренные характеристики диаграмм направленности представлены в таблице 3.

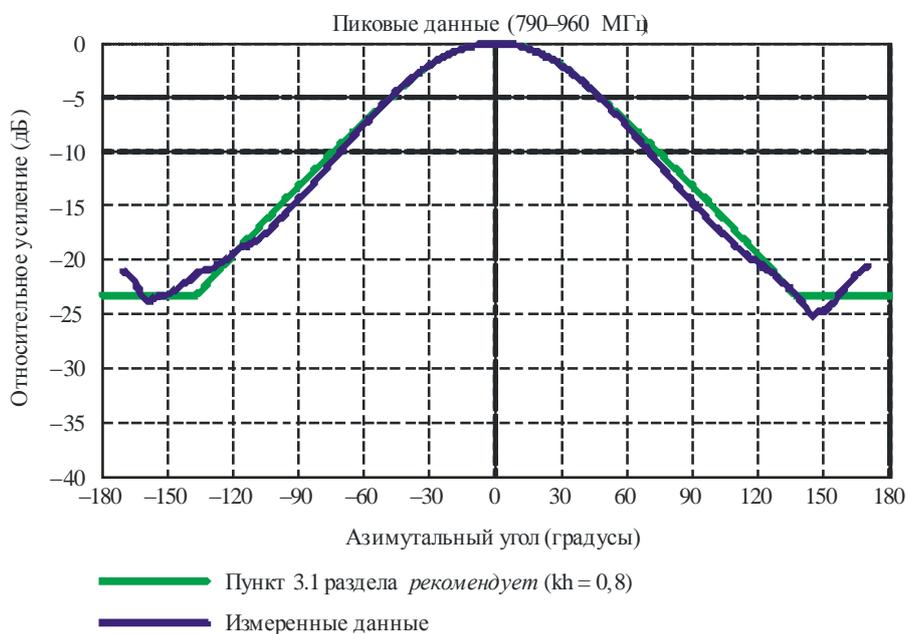
ТАБЛИЦА 3

Измеренные характеристики диаграммы направленности

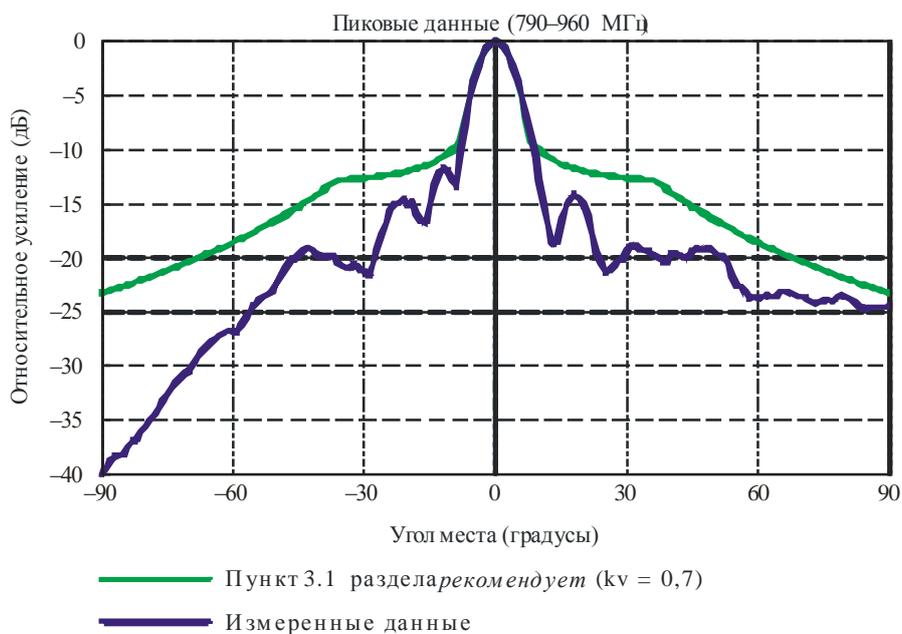
Номер рисунка	Тип диаграммы направленности	Измеренная частота f (GHz)
22	Пиковая	0,79–0,96
23		1,71–2,7
24	Средняя	0,79–0,96
25		1,71–2,7

РИСУНОК 22

Сравнение статистически измеренных пиковых диаграмм направленности и расчетных пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам (f : 790–960 МГц)



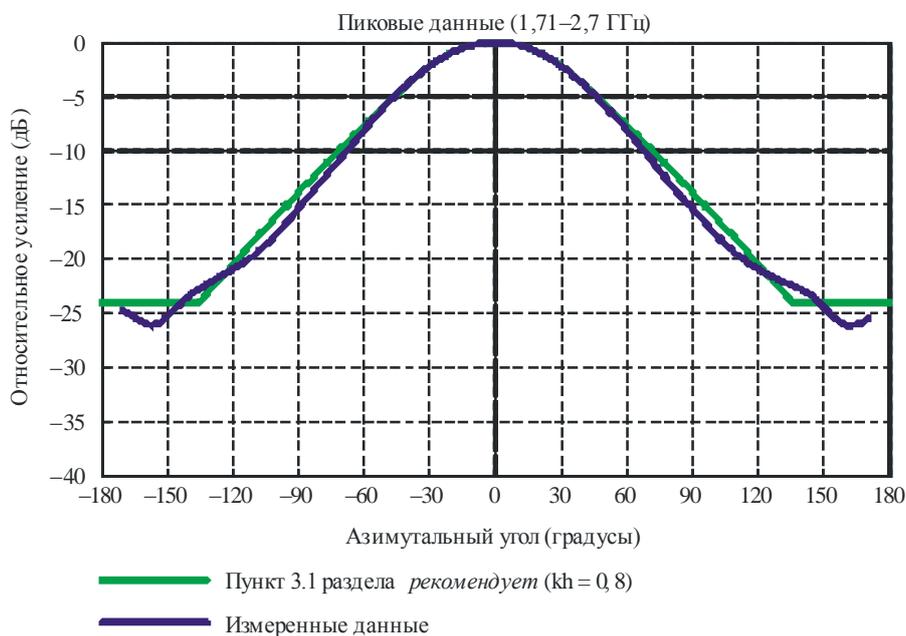
а) Азимутальная плоскость



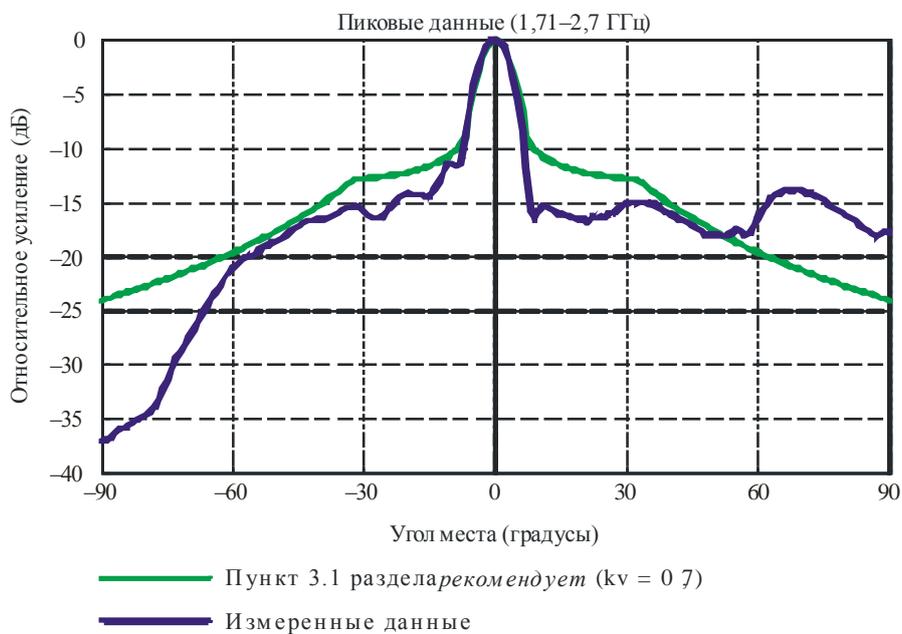
б) Угломестная плоскость

РИСУНОК 23

Сравнение статистических измеренных пиковых диаграмм направленности и расчетных пиковых диаграмм направленности по боковым лепесткам
($f: 1,71-2,7$ ГГц)



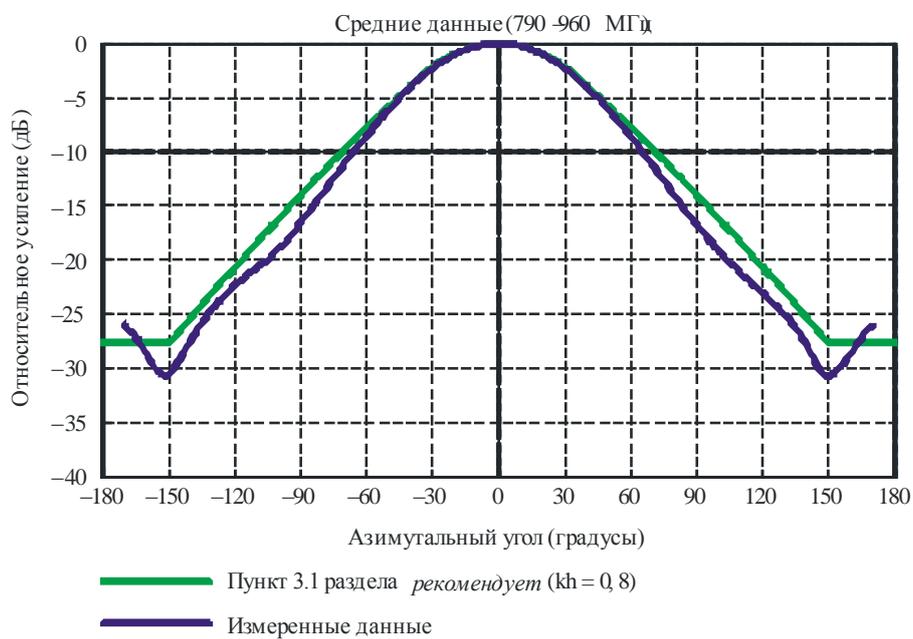
а) Азимутальная плоскость



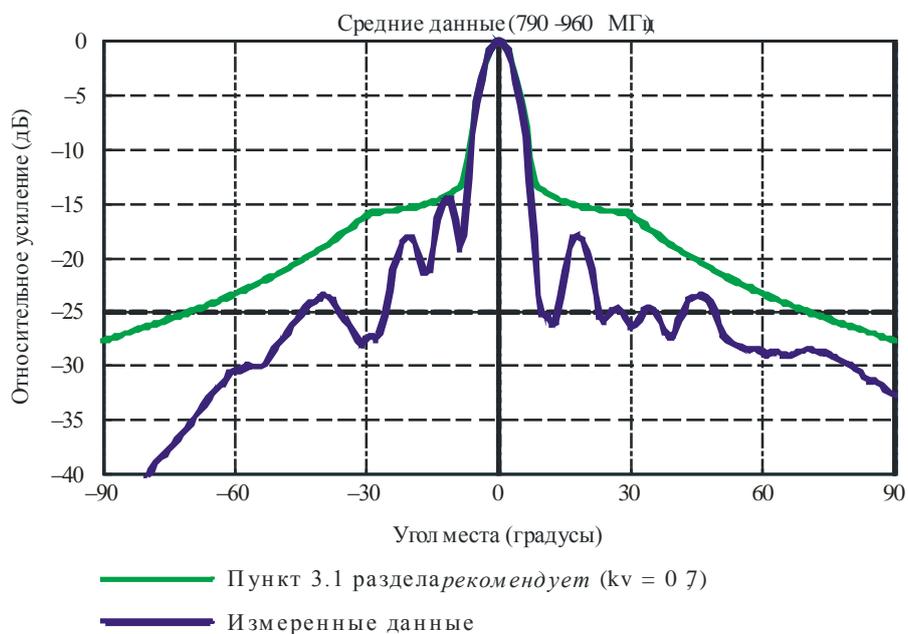
б) Угломестная плоскость

РИСУНОК 24

Сравнение статистически измеренных средних диаграмм направленности и расчетных средних диаграмм направленности по боковым лепесткам ($f: 790-960$ МГц)



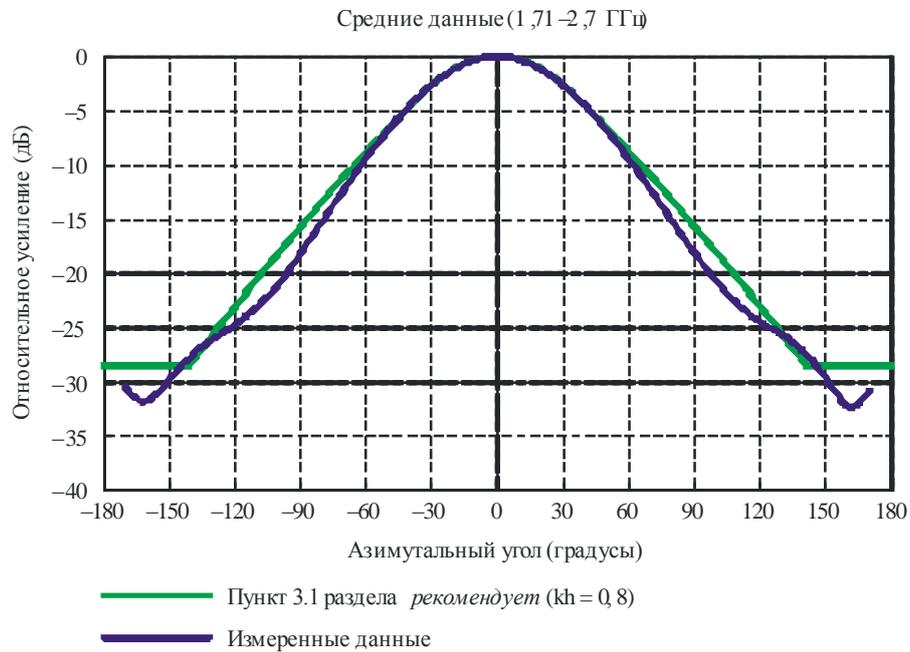
а) Азимутальная плоскость



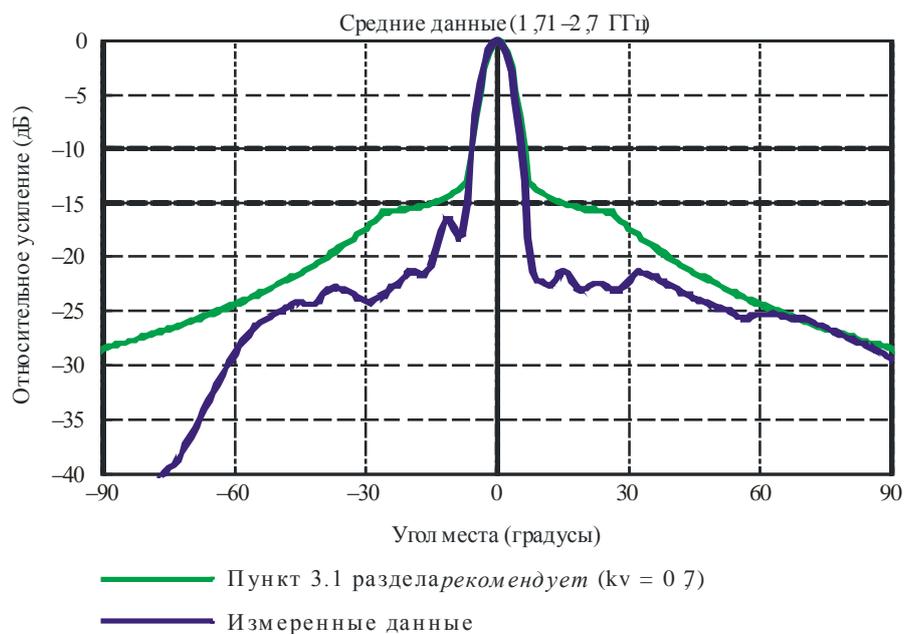
б) Угломестная плоскость

РИСУНОК 25

Сравнение статистически измеренных средних диаграмм направленности и расчетных средних диаграмм направленности по боковым лепесткам ($f: 1,71-2,7$ ГГц)



а) Азимутальная плоскость



б) Угломестная плоскость

5 Сводка различных значений параметра k

Выбранные значения надлежащих параметров k_h , k_v , k_p , и k_a представлены в нижеследующей таблице 4 (см. соответствующие части пп. 3.1.1 и 3.1.2 раздела рекомендует в основном тексте).

ТАБЛИЦА 4

Значения параметров k_h , k_v , k_p и k_a для эталонных пиковых/средних диаграмм направленности по боковым лепесткам

	Диапазоне частот от 400 МГц до приблизительно 6 ГГц			
	Обычный тип		Улучшенный тип, который также применяется для антенн базовых станций ИМТ	
	Пиковая по боковым лепесткам	Средняя по боковым лепесткам	Пиковая по боковым лепесткам	Средняя по боковым лепесткам
k_h	0,8	0,8	0,7	0,7
k_v	0,7	0,7	0,3	0,3
k_p/k_a	0,7	0,7	0,7	0,7