

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R F.1336-2*

Эталонные диаграммы направленности всенаправленных, секторных и других антенн в системах связи пункта со многими пунктами для использования при изучении вопросов совместного использования частот в диапазоне от 1 ГГц до приблизительно 70 ГГц

(Вопрос МСЭ-R 202/9)

(1997-2000-2007)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлены эталонные модели диаграмм направленности с максимальными и средними значениями для всенаправленных, секторных и направленных антенн в системах связи пункта со многими пунктами с целью использования при изучении вопросов совместного использования частот в диапазоне от 1 ГГц до приблизительно 70 ГГц.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что при исследовании вопросов координации и оценке взаимных помех между фиксированными беспроводными системами (FWS) связи пункта со многими пунктами (П-МП) и между станциями таких систем и станциями спутниковых служб радиосвязи, совместно использующими один и тот же диапазон частот, может оказаться необходимым использование эталонных диаграмм направленности антенн FWS;
- b) что в зависимости от сценария совместного использования частот возможно потребуется учитывать диаграммы направленности с огибающей максимальных значений или со средними значениями боковых лепестков при исследовании совместного использования частот;
- c) что в следующих случаях возможно потребуется использовать диаграммы направленности антенн, представляющие средние уровни боковых лепестков:
 - для прогнозирования совокупных помех геостационарному или негеостационарному спутнику от ряда фиксированных беспроводных станций;
 - для прогнозирования совокупных помех фиксированным беспроводным станциям от нескольких геостационарных спутников;
 - для прогнозирования помех фиксированным беспроводным станциям от одного или нескольких негеостационарных спутников под постоянно меняющимися углами;
 - в любых других случаях, при которых 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;
- e) что при больших углах следует учитывать вероятность отражений от местных предметов на земной поверхности;

* Настоящая Рекомендация должна быть доведена до сведения 4-й (РГ 4А), 6-й (РГ 6S), 7-й (РГ 7В), 8-й (РГ 8D) Исследовательских комиссий по радиосвязи и РГ 4-9S.

f) что использование антенны с наилучшей доступной диаграммой направленности приведет к наибольшей эффективности использования радиочастотного спектра;

отмечая,

a) что в Рекомендациях МСЭ-R F.699 и МСЭ-R F.1245 приведены соответственно эталонные диаграммы направленности антенн с максимальными и средними значениями для использования при исследовании координации и при оценке помех в случаях, не описанных в пп. 1–4 раздела *рекомендует*, приведенных ниже,

рекомендует,

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

1.1 оценки помех между П-МП FWS прямой видимости (LoS);

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

2 чтобы в диапазоне частот от 1 ГГц 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 максимальных значений боковых лепестков диаграммы направленности антенны, упомянутых в п. b) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие выражения для углов места в интервале от 0° до 90° (см. Приложение 1):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{для } 0 \leq \theta < \theta_4, \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) & \text{для } \theta_4 \leq \theta < \theta_3, \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1,5} + k \right] & \text{для } \theta_3 \leq \theta \leq 90^\circ, \end{cases} \quad (1a)$$

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 горизонтальной плоскости или около нее (дБи);

θ : абсолютное значение угла места относительно угла максимального усиления (градусы);

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

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

2.2 для средних значений боковых лепестков диаграмм направленности, упомянутых в п. с) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие выражения для углов места в интервале от 0° до 90° (см. Приложение 1 и Приложение 5):

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

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 1–3 ГГц, параметр k должен равняться 0,7;

2.4 в случаях использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков в диапазоне частот 1–3 ГГц и для всех антенн, работающих в диапазоне 3–70 ГГц, параметр k должен равняться 0;

3 чтобы в диапазоне частот от 1 ГГц и до приблизительно 70 ГГц в случаях, когда на станциях применяют секторные антенны с шириной луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости менее приблизительно 120° (см. Приложение 4 и Примечание 4), должны использоваться следующие эталонные диаграммы направленности:

3.1 для максимальных значений боковых лепестков диаграммы направленности, упомянутых в п. б) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие выражения для углов места в интервале от 0° до 90° и углов азимута в интервале от -180° до 180° (см. Примечание 2):

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x), \quad (2a1)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi} \right), \quad (2a2)$$

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_3} \right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3} \right)^2}} \quad (2a3)$$

$$= \varphi_3 \cdot \theta_3 \sqrt{\frac{(\sin \theta)^2 + (\sin \varphi \cdot \cos \theta)^2}{(\varphi_3 \cdot \sin \theta)^2 + (\theta_3 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta)^2}} \quad (\text{градусы}),$$

$$\Psi = \arccos(\cos \varphi \cdot \cos \theta) \quad (\text{градусы}), \quad (2a4)$$

$$x = \Psi / \Psi_\alpha, \quad (2a5)$$

где:

φ : угол азимута, соответствующий углу максимального усиления (градусы);

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

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

3.1.1 в диапазоне частот от 1 ГГц до приблизительно 6 ГГц (см. Приложение 6):

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{для } 0 \leq x < x_k, \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1,5} + k) && \text{для } x_k \leq x < 4, \\ G_{ref}(x) &= G_0 - \lambda_k - 15 \log(x) && \text{для } x \geq 4, \end{aligned} \quad (2b)$$

с $\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k)$ и $x_k = \sqrt{1 - 0,36k}$;

3.1.1.1 в случае использования типовых антенн параметр k должен равняться 0,7 (поэтому $\lambda_{k=0,7} = 3,8$ и $x_{k=0,7} = 0,86$);

3.1.1.2 в случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков параметр k должен равняться 0 (поэтому $\lambda_{k=0} = 12$ и $x_{k=0} = 1$);

3.1.2 в диапазоне частот от 6 ГГц до приблизительно 70 ГГц:

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{для } 0 \leq x < 1, \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 - 15 \log(x) && \text{для } 1 \leq x; \end{aligned} \quad (2c)$$

3.2 для средних значений боковых лепестков диаграмм направленности, упомянутых в п. с) раздела *учитывая*, при статистической оценке помех должны использоваться следующие выражения для углов места в интервале от 0° до 90° и углов азимута в интервале от -180° до 180° (см. Приложение 5 и Примечание 2):

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x);$$

3.2.1 в диапазоне частот от 1 ГГц до приблизительно 6 ГГц (см. Приложение 6):

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{для } 0 \leq x < x_k, \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 15 + 10 \log(x^{-1,5} + k) && \text{для } x_k \leq x < 4, \\ G_{ref}(x) &= G_0 - \lambda_k - 3 - 15 \log(x) && \text{для } x \geq 4, \end{aligned} \quad (2d)$$

с $\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k)$ и $x_k = \sqrt{1,25 - 0,36k}$;

3.2.1.1 в случае использования типовых антенн параметр k должен равняться 0,2 (поэтому $\lambda_{k=0,2} = 7,85$ и $x_{k=0,2} = 1,08$);

3.2.1.2 в случае использования антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков параметр k должен равняться 0 (поэтому $\lambda_{k=0} = 12$ и $x_{k=0} = 1,118$);

3.2.2 в диапазоне частот от 6 ГГц до приблизительно 70 ГГц

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{для } 0 \leq x < 1,152, \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 15 - 15 \log(x) && \text{для } 1,152 \leq x; \end{aligned} \quad (2e)$$

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 плоскости углов места предварительно принимается равным (см. Приложение 3 и Примечание 4):

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

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

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

4.1 для максимальных значений боковых лепестков диаграмм направленности, упомянутых в п. б) раздела *учитывая*, должны использоваться следующие выражения (см. Приложение 2 и Примечание 3):

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

где:

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

G_0 : усиление главного лепестка антенны (дБи);

θ : угол отклонения от оси (градусы);

φ_3 : ширина луча по уровню 3 дБ антенны с небольшим усилением (градусы);

$$= \sqrt{27\,000 \times 10^{-0,1 G_0}} \text{ (градусы);}$$

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

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

4.2 для средних значений боковых лепестков диаграмм направленности, описанных 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. – Для оценки усиления антенны θ' для всех углов места от 0° до 180° в вертикальной плоскости значение параметра x для углов места менее 90° должно определяться с использованием дополнительного значения угла места ($180^\circ - \theta'$) при дополнительном значении угла азимута, т. е. $180^\circ \pm \varphi$.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Различные значения параметра k в пп. 3.1.1.1 и 3.2.1.1 раздела *рекомендует* вычисляются с учетом огибающих максимальных значений или средних уровней боковых лепестков ряда типовых измеренных диаграмм направленности антенн в диапазоне частот от 1 до 6 ГГц.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – В случае использования антенн, ширина главного луча которых отличается от рассчитанной с помощью выражения (3), в качестве входного параметра рекомендуется использовать величину θ_3 .

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Как обсуждается в Приложении 3, экспоненциальный коэффициент заменен единицей. В результате теоретическая погрешность при данной аппроксимации составит менее 6% для значений ширины луча антенны по уровню 3 дБ в плоскости углов места 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 интервалов значений усиления, в которых данные выражения будут справедливы, требуются дальнейшие исследования;

ПРИМЕЧАНИЕ 7. – Результаты измерений специально разработанной секторной антенны для использования в диапазоне частот около 20 ГГц показывают, что существует возможность выполнения более жестких требований к боковым лепесткам эталонной диаграммы направленности. Для разработки такой оптимизированной диаграммы направленности необходимы дальнейшие исследования.

Приложение 1

Эталонная диаграмма направленности всенаправленных антенн, используемых в II-МП FWS

1 Введение

Всенаправленные антенны часто используются для передачи и получения сигналов на центральных станциях II-МП FWS. 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 плоскости углов места 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 плоскости углов места и коэффициентом направленного действия было выведено при предположении, что диаграмма направленности в плоскости углов места была адекватно аппроксимирована при помощи следующего выражения:

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

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

Напряженность поля в дальней зоне линейной антенной решетки задается выражением:

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

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 плоскости углов места θ_3 вычисляется ширина луча по уровню 3 дБ, используя выражения (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 выражения:

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

где $|x|$ означает наибольшее целое число, не превышающее значение x .

Нормализованная внеосевая избирательность ΔD рассчитывается по формуле:

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

Выражение (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 плоскости углов места может быть хорошо аппроксимирована с помощью следующих выражений:

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

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

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

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 выражения (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 максимальных значений боковых лепестков может превышать это значение. Однако реальные факторы, такие как использование электрических двойных пилообразных импульсов, 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 выражении (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 максимального 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, $k = 0$

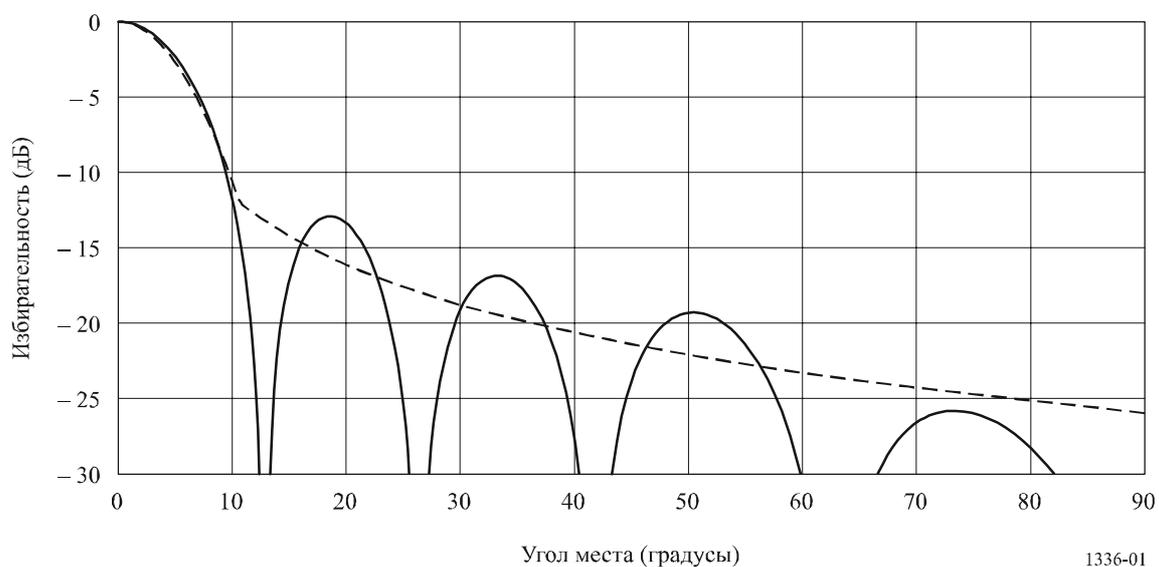


РИСУНОК 2

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

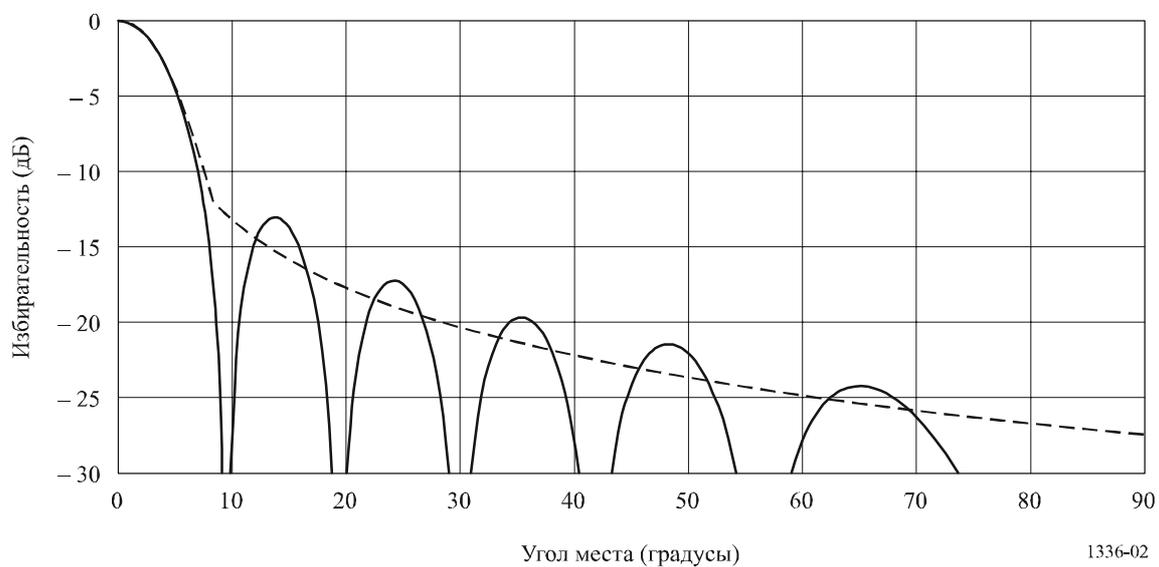
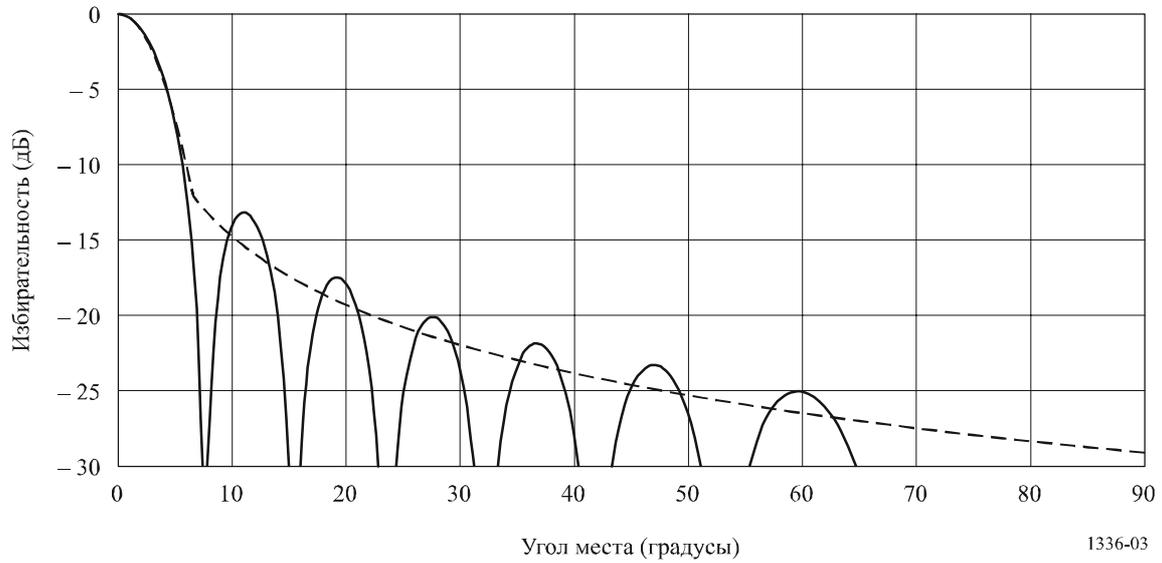


РИСУНОК 3

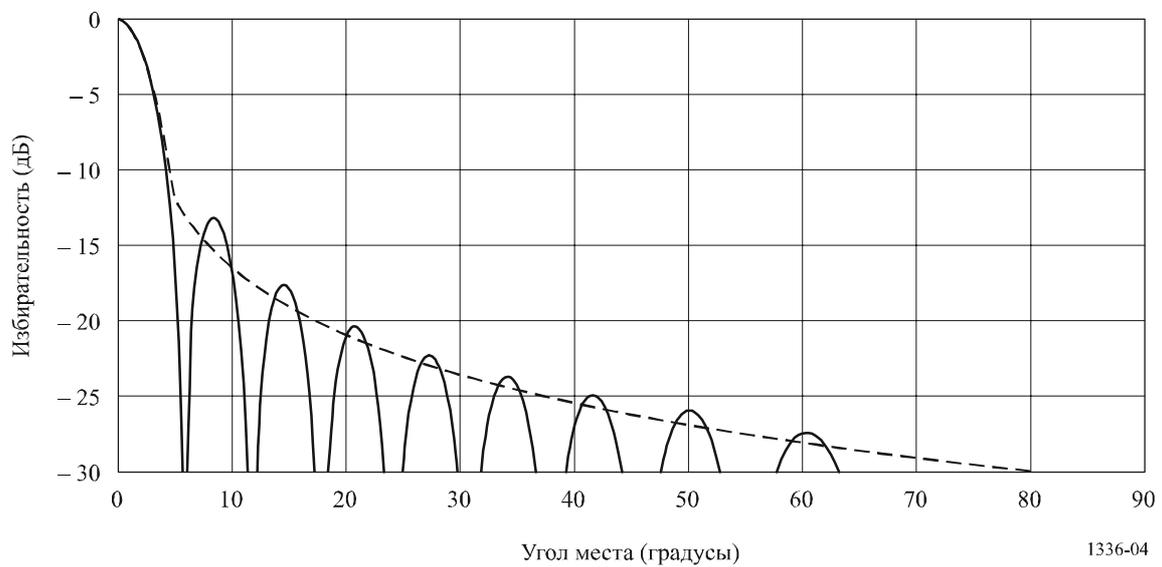
Сравнение нормализованной диаграммы направленности линейной антенной решетки с элементами диполей с аппроксимированной огибающей диаграммы направленности
 $G_0 = 12$ дБи, $k = 0$



1336-03

РИСУНОК 4

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



1336-04

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, $k = 0$

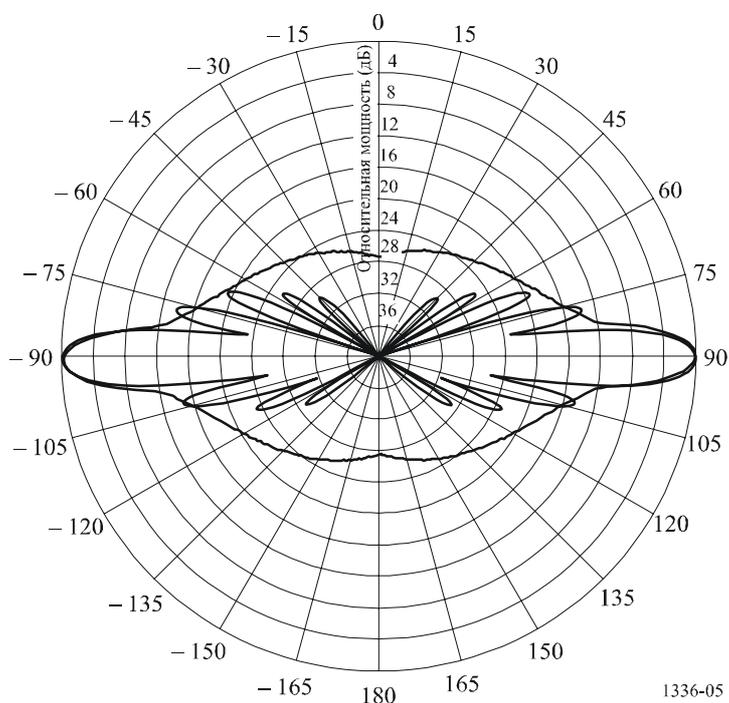


РИСУНОК 6

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

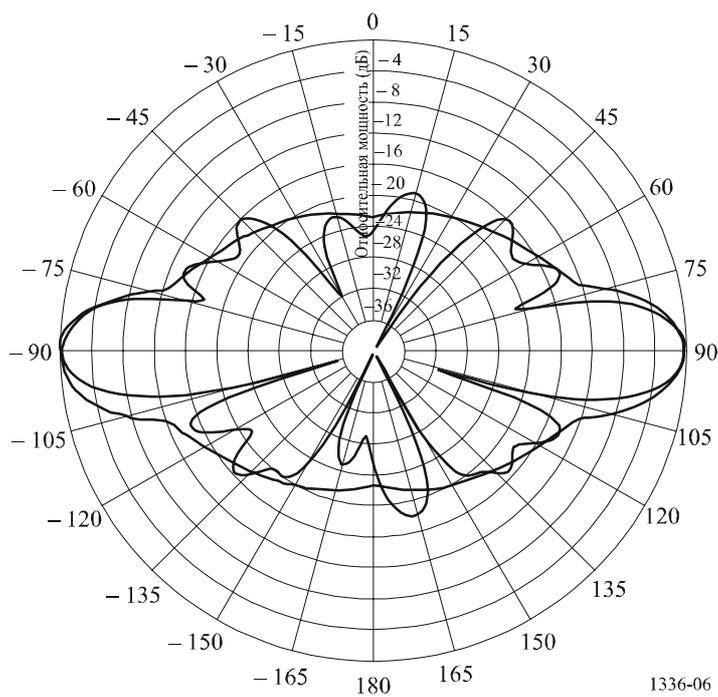


РИСУНОК 7

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

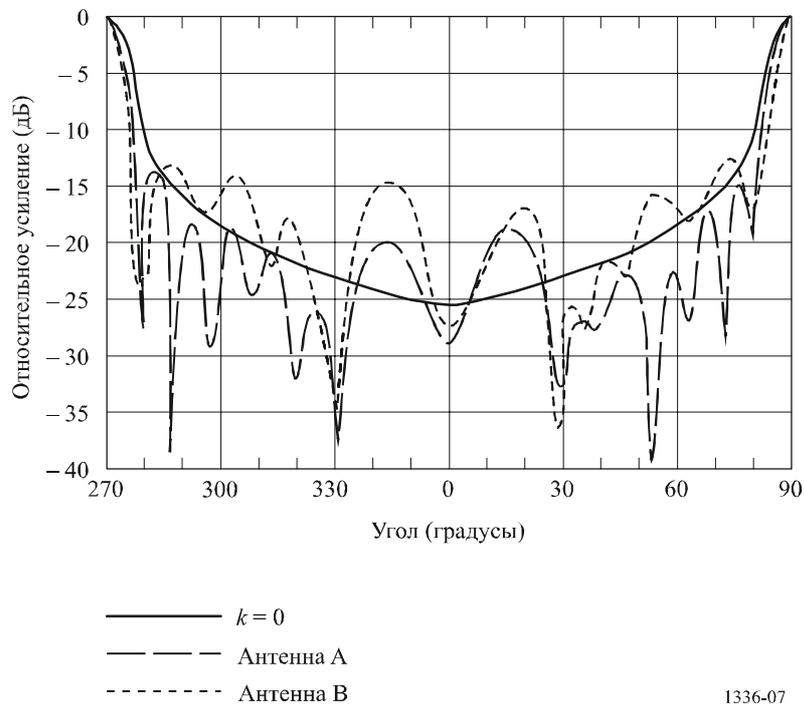


РИСУНОК 8

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

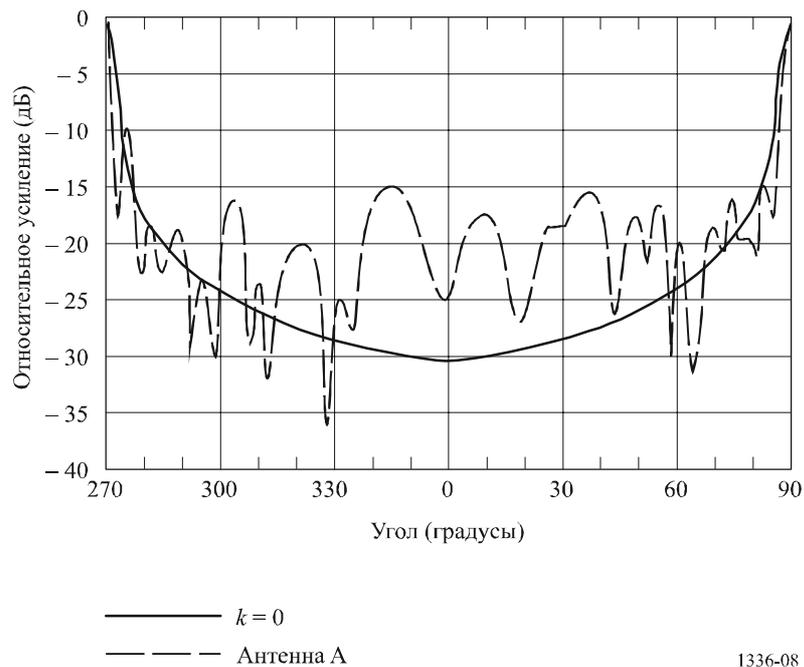


РИСУНОК 9

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

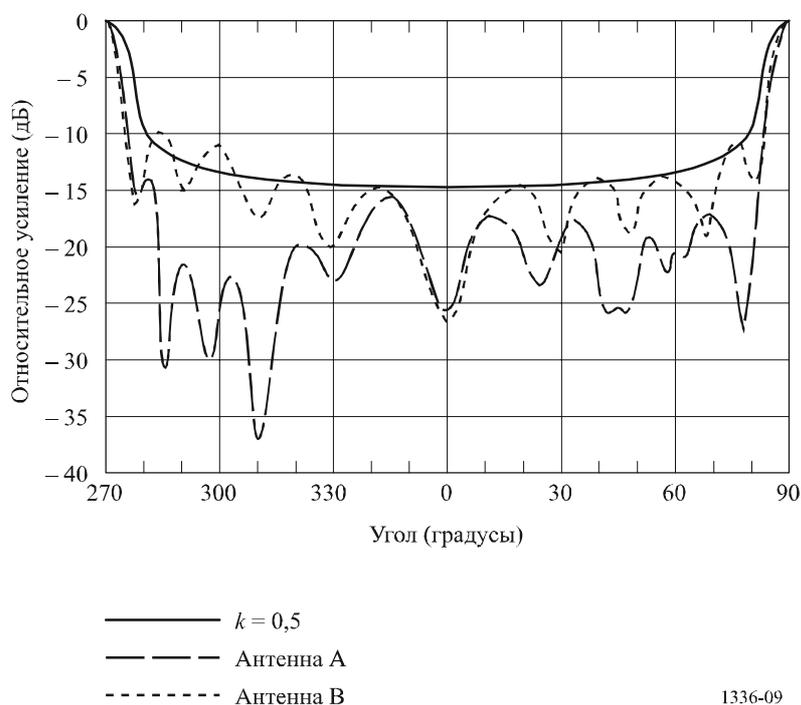


РИСУНОК 10

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

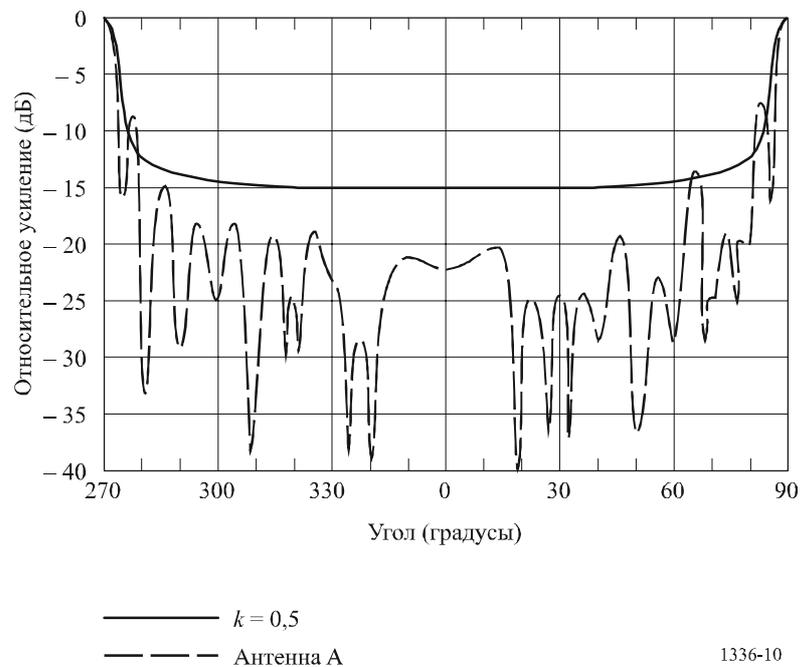
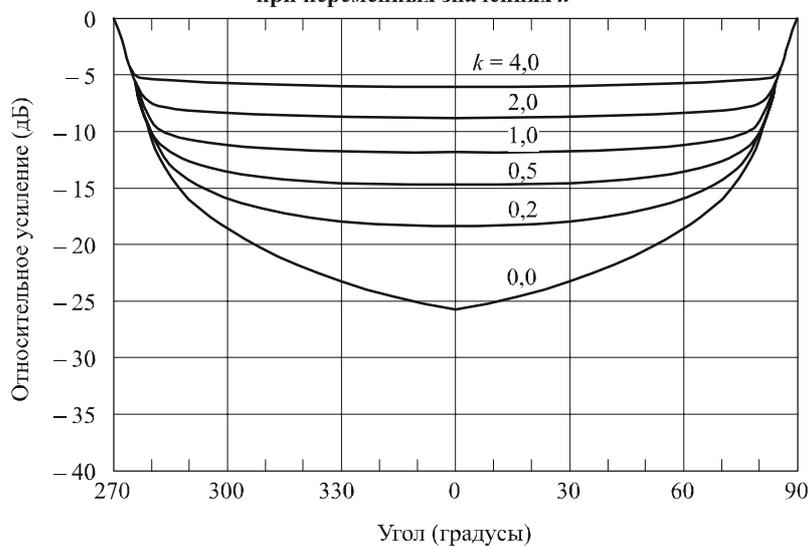


РИСУНОК 11

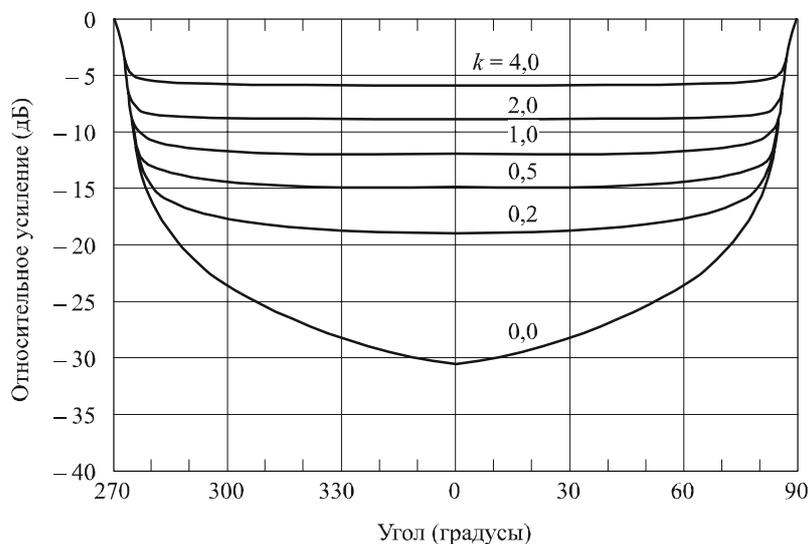
Огибающие эталонной диаграммы направленности для всенаправленной антенны с усилением 10 дБи при переменных значениях k



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 решетке 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

Эталонная диаграмма направленности для абонентских антенн с круговой симметрией и низким усилением, которые используются в П-МП FWS в диапазоне частот 1–3 ГГц

1 Введение

Антенны с относительно низким усилением часто используются для передачи и приема сигналов на удаленных станциях или в секторах центральных станций П-МП FWS. Такие антенны могут показывать усиление порядка 20 дБи или менее. Было обнаружено, что использование эталонной диаграммы направленности, приведенной в Рекомендации МСЭ-R F.699 для таких антенн с относительно низким усилением, приведет к завышенным значениям усиления при сравнительно больших внеосевых углах. Следовательно, если использовать диаграмму направленности, приведенную в Рекомендации МСЭ-R F.699, при относительно больших внеосевых углах уровень помех, создаваемых другим системам, и уровень помех, получаемых от других систем, будет, скорее всего, значительно завышен.

2 Анализ

Эталонная диаграмма направленности абонентской антенны основана на следующих предположениях:

- что коэффициент направленного действия антенны меньше приблизительно 20 дБи;
- что диаграмма направленности антенны представляет собой круговую симметричную фигуру вокруг главного лепестка;
- что усиление главного лепестка равно коэффициенту направленного действия.

Предлагаемая эталонная диаграмма направленности задается выражением:

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\varphi_3} \right)^2 & \text{для } 0 \leq \theta < 1,08 \varphi_3, & (12) \\ G_0 - 14 & \text{для } 1,08 \varphi_3 \leq \theta < \varphi_1, & (13) \\ G_0 - 14 - 32 \log \left(\frac{\theta}{\varphi_1} \right) & \text{для } \varphi_1 \leq \theta < \varphi_2, & (14) \\ -8 & \text{для } \varphi_2 \leq \theta \leq 180^\circ, & (15) \end{cases}$$

где:

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

G_0 : максимальное усиление вдоль оси (дБи);

θ : внеосевой угол (градусы);

φ_3 : ширина луча по уровню 3 дБ

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

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

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

3 Резюме и выводы

Представлена эталонная диаграмма направленности для абонентских антенн с низким усилением, меньшим или равным 20 дБи. Эталонная диаграмма направленности излучения была получена на основе ограниченных данных о диаграммах направленности плоских антенных решеток, предназначенных для использования в системах П-МП локального доступа, действующих в диапазоне частот 2 ГГц. Предложенная диаграмма направленности была показана для того, чтобы представить реальную диаграмму направленности более точно по сравнению с диаграммой направленности, приведенной в Рекомендации МСЭ-R F.699. Необходимо продолжить работу по определению диапазона значений усиления, которому соответствует эталонная диаграмма направленности, и по сравнению эталонной диаграммы направленности с измеренными диаграммами.

Приложение 3

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 плоскостях углов азимута и места. 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 плоскости углов места 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 выражения 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 плоскости углов места 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 выражения (в сферических координатах):

$$D = \frac{U_M}{U_0}, \quad (16)$$

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\varphi) F(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi, \quad (17)$$

где:

U_M : максимальная интенсивность излучения;

U_0 : интенсивность излучения изотропного источника;

φ : угол в азимутальной плоскости;

θ : угол в плоскости углов места;

$F(\varphi)$: интенсивность излучения в азимутальной плоскости;

$F(\theta)$: интенсивность излучения в плоскости углов места.

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:

$$F(\varphi) = U\left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi|\right), \quad (18)$$

где:

φ_s : ширина луча в секторе;

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 && \text{для } x \geq 0, \\ U(x) &= 0 && \text{для } x < 0. \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$F(\theta) = e^{-a^2\theta^2}, \quad (20)$$

где:

$$a^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\theta_3}\right)^2 = \frac{2,773}{\theta_3^2}; \quad (21)$$

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

Подставляя выражения (18) и (20) в выражение (17), получим:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U\left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi|\right) d\varphi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta. \quad (22)$$

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:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \approx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta = \frac{1}{a} \sqrt{\pi} e^{-1/4a^2}. \quad (23)$$

Это достаточно простое и гибкое выражение, 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 выражения (23), 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 выражения, соответствующего неопределенному интегралу в правой части выражения (23). (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 плоскости углов места 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 выражение (22) теперь легко оценить как:

$$U_0 = \frac{\varphi_s \theta_3}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2,773}} \times e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}}. \quad (24)$$

ТАБЛИЦА 1

Относительная точность вычисления неопределенного интеграла в выражении (23) при оценке средней интенсивности излучения

Ширина луча по уровню 3 дБ в плоскости углов места (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 выражений (18) и (20) получаем $U_M = 1$. Подставив данные значения и выражение (24) в выражение (16), получим коэффициент направленного действия секторной антенны в зависимости от ширины луча в плоскостях углов азимута и места:

$$D = \frac{11,805}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}}, \quad (25)$$

где углы даны в радианах. Если углы даны в градусах, выражение (25) превращается в:

$$D = \frac{38750}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}}. \quad (26)$$

Заметим, что для всенаправленной антенны выражение (26) представляется в сокращенном виде:

$$D = \frac{107,64}{\theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}}. \quad (27a)$$

Если предположить, что КПД антенны составляет 100% и потери антенны незначительны, то усиление и коэффициент направленного действия всенаправленной антенны совпадут. Вдобавок, для всенаправленных антенн с шириной луча по уровню 3 дБ менее приблизительно 45° , соотношение между усилением и шириной луча по уровню 3 дБ в плоскости углов места можно упростить, установив экспоненциальный коэффициент равным единице. Конечная погрешность составит менее 6%.

$$G_0 \approx \frac{107,64}{\theta_3}. \quad (27b)$$

2.2 Экспоненциальная функция интенсивности излучения в секторе

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

$$F(\varphi) = e^{-b^2 \varphi^2}, \quad (28)$$

где:

$$b^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\varphi_s} \right)^2 \quad (29)$$

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

Подставив выражения (20) и (28) в выражение (14) и изменив пределы интегрирования так, чтобы определенные интегралы стали неопределенными, интегрируя и затем, подставляя результат в выражение (16), получим следующую аппроксимацию:

$$D = \frac{11,09}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}}, \quad (30)$$

где углы определены выше и выражены в радианах. Преобразуя углы в градусы, получим выражение (30) в виде:

$$D = \frac{36400}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}}. \quad (31)$$

При сравнении выражений (26) и (31) видно, что разница между коэффициентом направленного действия, вычисленного с помощью любого из этих выражений, составляет менее 0,3 дБ.

Результаты, полученные при использовании выражения (31), 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 плоскостях углов азимута и места 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 плоскости углов места равна $2,5^\circ$. Из выражения (31) 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:

$$G_0 \approx \frac{31\,000}{\varphi_s \theta_3} \quad (32a)$$

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

$$G_0 \approx \frac{34\,000}{\varphi_s \theta_3} \quad (32b)$$

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°

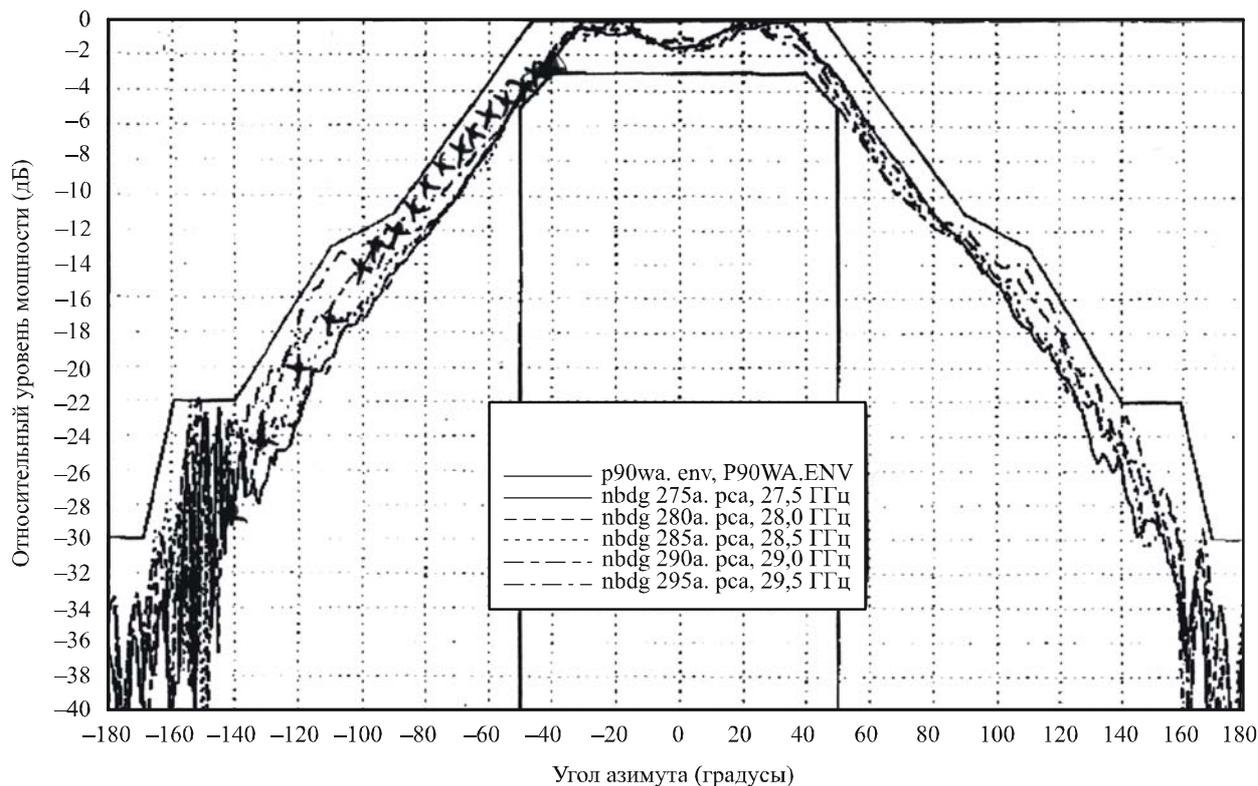


РИСУНОК 14

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

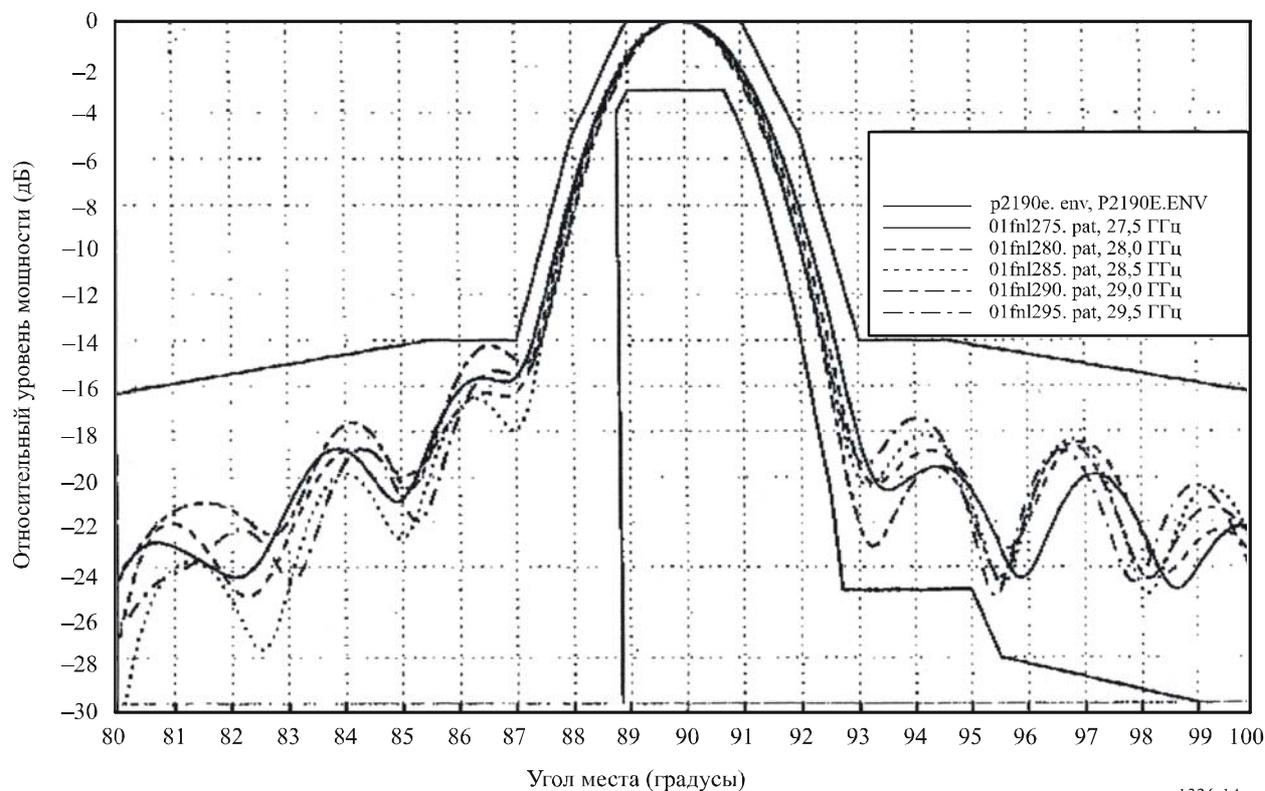


РИСУНОК 15

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)

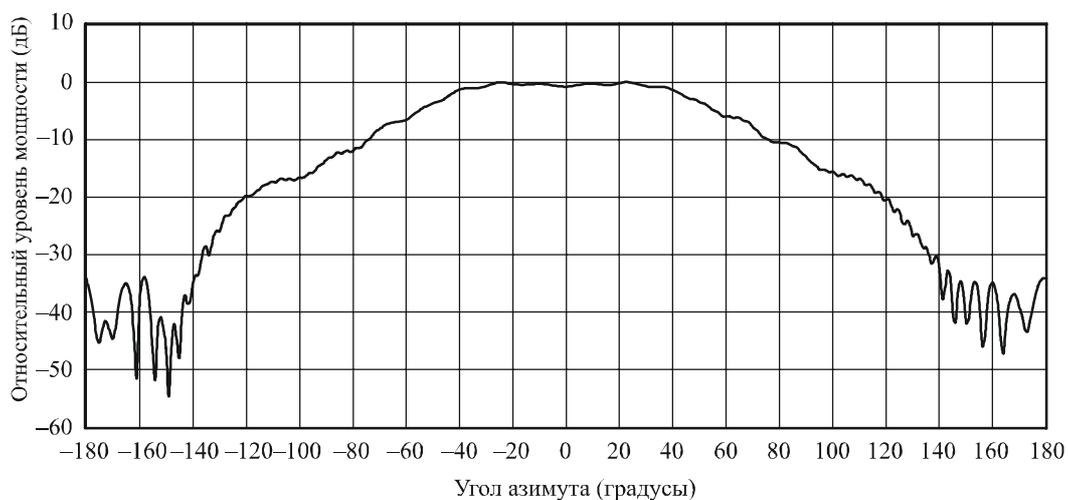
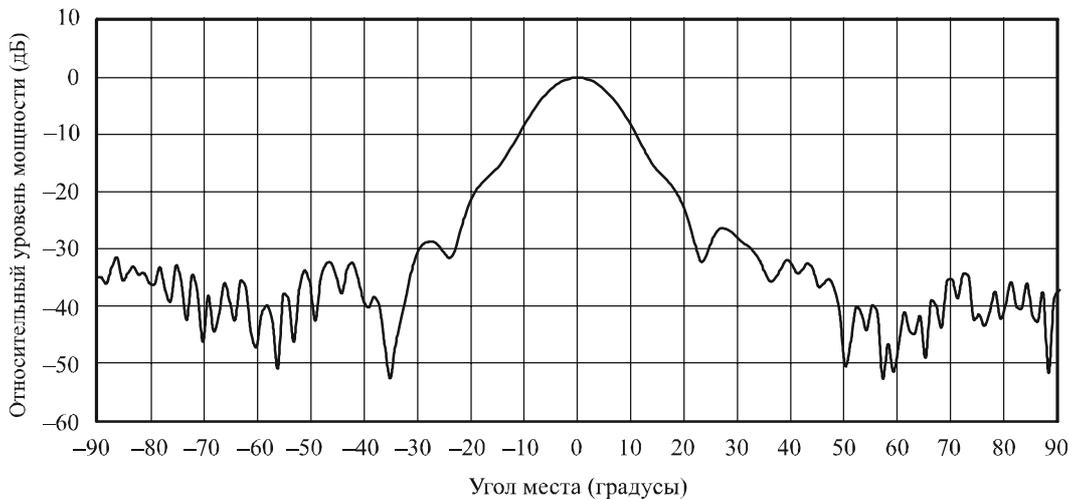


РИСУНОК 16

Диаграмма направленности типовой 90° секторной антенны
(вертикальная (V) поляризация) в плоскости углов места
Половинный угол при 15 дБи: 12° (рупорная антенна, работающая на частоте 26 ГГц)



1336-16

3 Сравнение с предыдущими результатами для всенаправленных антенн

Целью данного раздела является сравнение результатов, полученных при помощи выражения (27) для всенаправленных антенн, с предыдущими результатами, описанными и обобщенными в Приложении 1 к настоящей Рекомендации.

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

$$F(\theta) = \cos^{2N} \theta. \quad (33)$$

Подставляя выражение (33) в выражение (17) и предположив, что $F(\varphi) = 1$, получим:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2N}(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi. \quad (34)$$

Этот двойной интеграл принимает вид:

$$U_0 = \frac{(2N)!!}{(2N+1)!!}, \quad (35)$$

где $(2N)!!$ – это 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:

$$D = \frac{(2N+1)!!}{(2N)!!}. \quad (36)$$

Ширина луча по уровню 3 дБ в плоскости углов места выражается как:

$$\theta_3 = 2 \cos^{-1}(0,5^{1/2N}). \quad (37)$$

В таблице 2 приведено сравнение между коэффициентами направленного действия, вычисленными на основе предположений и методов, использованных в выражении (27), и вычисленными посредством выражений (36) и (37). Показано, что результаты, полученные с использованием выражения (27), хорошо соотносятся с результатами, полученными с использованием выражений (36) и (37). Во всех случаях выражение (27) несколько занижает значения коэффициента направленного действия, полученного с использованием выражений (36) и (37). Максимальное значение относительной погрешности оценок (%), выраженной в дБ, составляет $-2,27\%$ и получается при значении ширины луча по уровню 3 дБ в плоскости углов места равном 65° . Погрешность в этом случае, выраженная в дБ, составляет $-0,062$ 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 выражения (27а), с коэффициентом направленного действия, вычисленным с использованием выражений (36) и (37)

$2N$	θ_3 (градусы) (выражение (37))	Коэффициент направленного действия (дБ) (выражение (36))	Коэффициент направленного действия (дБ) (выражение (27а))	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) (выражение (37))	Коэффициент направленного действия (дБ) (выражение (36))	Коэффициент направленного действия (дБ) (выражение (27a))	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 выражения 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 выражения:

$$D = \frac{k}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}}, \quad (38)$$

где:

$$\begin{aligned} k &= 38750 && \text{для } \varphi_s > 120^\circ, \\ k &= 36400 && \text{для } \varphi_s \leq 120^\circ; \end{aligned} \quad (39)$$

φ_s – это 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 плоскости углов места (градусы).

Для всенаправленных антенн при определении ширины луча по уровню 3 дБ в плоскости углов места, при усилении, представленном в дБи (см. выражение (27b)), предлагается использовать следующее упрощенное выражение:

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

Предлагается использовать на предварительной основе следующее полуэмпирическое выражение, связывающее усиление секторной антенны (дБи) с шириной луча по уровню 3 дБ в плоскости углов места и азимутальной плоскости в случае, когда угол сектора составляет порядка 120° или меньше и

ширина луча по уровню 3 дБ в плоскости углов места меньше чем приблизительно 45° (см. выражение (32a)):

$$\theta_3 \approx \frac{31\,000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\varphi_s}.$$

Необходимо провести дальнейшее исследование для определения, что делать с переходной областью, подразумеваемой в выражении (39), 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 4

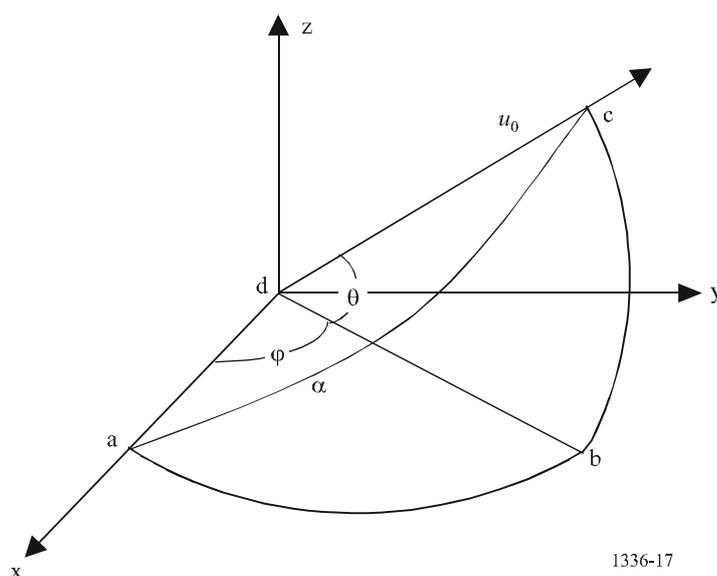
Процедура определения усиления секторной антенны при произвольном внеосевом угле, задаваемом углом азимута и углом места по отношению к направлению максимального усиления антенны

1 Анализ

На рис. 17 представлена основная геометрическая модель для определения усиления секторной антенны для произвольного внеосевого угла. 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 – это единичный вектор, направление которого используется для определения усиления секторной антенны.

РИСУНОК 17

Определение угла вне направления максимального усиления 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 от углов азимута и места, будет представлен в виде эллипса, как показано на рис. 2; и
- усиление секторной антенны при произвольном внеосевом угле является функцией от ширины луча по уровню 3 дБ и ширины луча антенны, измеренной в плоскости, включающей ось x и единичный вектор u_0 (см. рис. 1).

При известной ширине луча секторной антенны по уровню 3 дБ (градусы) в плоскостях углов азимута и места φ_3 и θ_3 , численное значение усиления по направлению максимального усиления представлено, на предварительной основе, следующим выражением (см. п. 3.3 раздела *рекомендует* и выражение (32a)).

$$G_0 = \frac{31\,000}{\varphi_3 \theta_3}. \quad (40)$$

Первым шагом при оценке усиления секторной антенны при произвольном внеосевом угле, φ и θ , является определение значения α . С учетом рис. 1 и предполагая, что abc представляет собой прямоугольный треугольник, α представляется в виде:

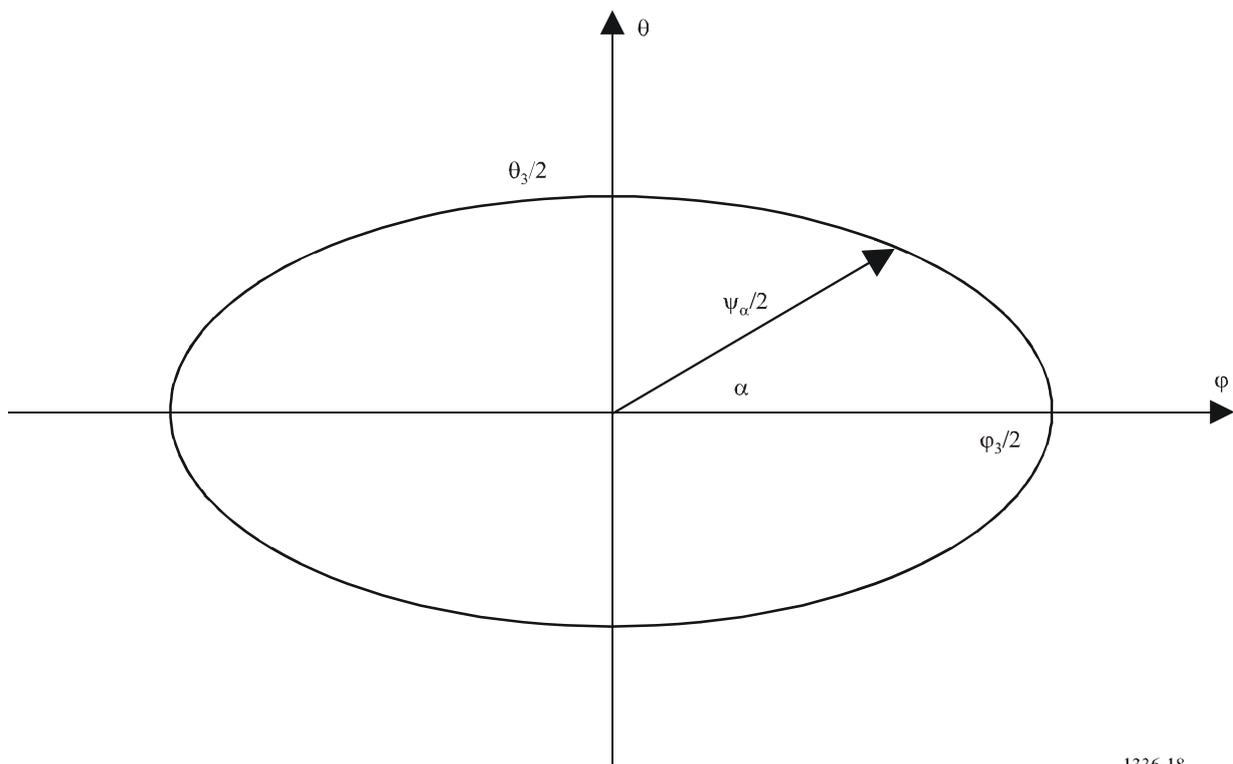
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi} \right) \quad (41a)$$

и внеосевой угол в плоскости adc выражается как:

$$\psi_\alpha = \cos^{-1}(\cos \varphi \cos \theta). \quad (41b)$$

РИСУНОК 18

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



Учитывая, что луч имеет эллиптическую форму, ширина луча секторной антенны по уровню 3 дБ в плоскости α определяется с помощью выражения:

$$\frac{1}{\Psi_{\alpha}^2} = \left(\frac{\cos \alpha}{\Phi_3} \right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3} \right)^2 \quad (42a)$$

или

$$\Psi_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\Phi_3} \right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\theta_3} \right)^2}}. \quad (42b)$$

Усиление секторной антенны при этом произвольном внеосевом угле можно предварительно определить, используя эталонную диаграмму направленности, приведенную в пп. 3.1 и 3.2 раздела *рекомендует* настоящей Рекомендации.

2 Выводы

Данная процедура была определена для оценки усиления секторной антенны при произвольном внеосевом угле. Требуется проведение дальнейших исследований для указания диапазона, в котором данная процедура справедлива для секторных антенн. Администрации просят представить измеренные диаграммы направленности секторных антенн для того, чтобы можно было определить этот диапазон.

Приложение 5

Математическая модель обобщенных диаграмм направленности всенаправленных и секторных антенн П-МП FWS для использования при статистической оценке помех

1 Введение

В основном тексте настоящей Рекомендации (см. пп. 2.2 и 3.2 раздела *рекомендует*) представлены эталонные диаграммы направленности, представляющие средние уровни боковых лепестков для всенаправленных (по азимуту) и секторных 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 FWS 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 0° до 90° следует использовать следующие средние уровни боковых лепестков диаграммы направленности (см. Приложение 1):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{для } 0 \leq \theta < \theta_4, \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) + F(\theta) & \text{для } \theta_4 \leq \theta < \theta_3, \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1,5} + k \right] + F(\theta) & \text{для } \theta_3 \leq \theta \leq 90^\circ, \end{cases} \quad (43a)$$

с:

$$F(\theta) = 10 \log \left(0,9 \sin^2 \left(\frac{3\pi\theta}{4\theta_3} \right) + 0,1 \right), \quad (43b)$$

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.

3 Математическая модель для секторных антенн

При пространственном анализе помех, создаваемых большому количеству ФС станций от одной или нескольких спутниковых систем ГСО, для углов места в интервале от 0° до 90° и для углов азимута от -180° до 180° следует использовать следующие средние уровни боковых лепестков диаграммы направленности:

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x), \quad (44)$$

где:

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{для } 0 \leq x < 1,396,$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12 - 15 \log(x) + F_{ref}(x) \quad \text{для } 1,396 \leq x,$$

$$F_{ref}(x) = 10 \log(0,9 \sin^2(0,75\pi x) + 0,1),$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\tan \theta}{\sin \varphi} \right),$$

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

$$= \Phi_3 \cdot \Theta_3 \sqrt{\frac{(\sin \theta)^2 + (\sin \varphi \cdot \cos \theta)^2}{(\Phi_3 \cdot \sin \theta)^2 + (\Theta_3 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta)^2}} \quad (\text{градусы}),$$

$$\Psi = \arccos(\cos \varphi \cdot \cos \theta) \quad (\text{градусы}),$$

$$x = \Psi / \Psi_{\alpha},$$

где все переменные и параметры определены в п. 3.1 раздела *рекомендует* основного текста;

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – При использовании секторных антенн с шириной луча по уровню 3 дБ в азимутальной плоскости менее приблизительно 120°, отношение между максимальным усилением и шириной луча по уровню 3 дБ и в азимутальной плоскости, и в плоскости углов места предварительно представляется в виде (см. Приложение 3):

$$\Theta_3 = \frac{31\,000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\Phi_3},$$

где все параметры определены в п. 3.1 раздела *рекомендует* основного текста.

Приложение 6

Обоснование, использованное при разработке выражений для максимальных и средних значений секторных антенн, работающих в диапазоне от 1 ГГц до приблизительно 6 ГГц

1 Разработка выражений для секторных антенн, работающих в диапазоне частот между 1 ГГц и 6 ГГц

1.1 Обоснование разработки

Для того чтобы правильно смоделировать данные измерений диаграммы направленности антенны на частотах около 2 ГГц, был введен параметр k для учета в выражениях, используемых для секторных антенн, показателей уровня боковых лепестков, аналогично выражениям, используемым для всенаправленных антенн.

Было обнаружено, что диаграмма направленности секторной антенны со значением параметра k больше нуля согласуется с измеренными диаграммами направленности антенн, уровни первых боковых лепестков которых не достаточно хорошо оцениваются при использовании выражений для всенаправленных антенн.

Для диаграмм направленности секторных антенн с максимальными значениями применяется выражение (45):

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

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1,5} + k) \quad \text{для} \quad 1 \leq x. \quad (45)$$

Определение всех параметров аналогично приведенным в основном тексте настоящей Рекомендации (п. 3.1 раздела *рекомендует*).

Следует отметить, что при $x = 1$ в выражении (45) присутствует небольшое нарушение непрерывности.

Например, при $k=0,7$ нижняя формула преобразуется в $G_{ref}(x) = G_0 - 9,7$, в то время как верхняя остается в виде $G_{ref}(x) = G_0 - 12$ (разница около 2 дБ). Такое нарушение непрерывности уменьшается при меньших значениях параметра k .

Для того, чтобы более точно определить точку разрыва между этими двумя выражениями, было найдено, что при небольшой аппроксимации ($k \ll 1$ и точка разрыва x_k приближается к 1):

$$\begin{aligned} G_{ref}(x_k) &= G_0 - 12 + 10 \log(x_k^{-1,5} + k) = G_0 - 12x_k^2, \\ \Rightarrow -12x_k^2 &= -12 + \frac{10}{\ln(10)} \ln(x_k^{-1,5} + k) \approx -12 + \frac{10}{\ln(10)} k, \\ \Rightarrow x_k &\approx \sqrt{1 - \frac{5k}{6 \ln 10}}. \end{aligned}$$

Тогда точку разрыва "1" можно заменить плавающей точкой разрыва x_k .

При этом выражение (45) принимает вид:

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{для } 0 \leq x < x_k, \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1,5} + k) && \text{для } x_k \leq x, \end{aligned} \quad (46)$$

с

$$x_k = \sqrt{1 - 0,36k}.$$

1.2 Определение области, где выражения остаются справедливыми

При оценке измерений диаграмм направленности антенн было установлено, что для антенн, работающих в диапазоне от 1 ГГц до приблизительно 6 ГГц, требуются различные выражения.

1.3 Исследование значений параметра k

Результаты анализа параметра k и измеренных диаграмм направленности антенн представлены в таблице 3, в которой также прослеживается тенденция к улучшению характеристик боковых лепестков за 10-летний период.

1.4 Влияние параметра k на диаграмму направленности секторной антенны

Вообще показано, что для большинства случаев (типовой случай боковых лепестков) применимы диаграммы направленности антенны с максимальными значениями с типовым значением параметра $k = 0,7$ (см. раздел 2 данного Приложения).

Следует отметить, что при $k = 0$ эти диаграммы направленности антенн соответствуют диаграммам направленности секторных антенн с улучшенными характеристиками боковых лепестков.

ТАБЛИЦА 3

Значение параметра k в настоящей Рекомендации

Рекомендация МСЭ-R F.1336		1997 г.	2000 г.	2006 г. (используемые в настоящей Рекомендации)	
Всенаправленная антенна	Типовые боковые лепестки	1–3 ГГц	$k = 1,5$	$k = 0,7$	$k = 0,7$
		3–70 ГГц	$k = 1,5$	$k = 0$	$k = 0$
	Боковые лепестки с улучшенными характеристиками	1–70 ГГц	$k = 0$	$k = 0$	$k = 0$
Секторная антенна	Типовые боковые лепестки	1–3 ГГц	–	$k = 0,7$	Максимальное значение: $k = 0,7$ Среднее значение: $k = 0,2$ (Примечание 1)
		3–6 ГГц	–	$k = 0$	
		6–70 ГГц	–	$k = 0$	
	Боковые лепестки с улучшенными характеристиками	1–70 ГГц	–	$k = 0$	

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для секторных антенн используются выражения (46).

Выражение (47) следует использовать для диаграмм направленности секторных антенн с максимальными значениями:

$$\begin{aligned}
 G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{для } 0 \leq x < x_k, \\
 G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1,5} + k) && \text{для } x_k \leq x < 4, \\
 G_{ref}(x) &= G_0 - \lambda_k - 15 \log(x) && \text{для } x \geq 4,
 \end{aligned} \quad (47)$$

с $\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k)$ и $x_k = \sqrt{1 - 0,36k}$

и

x_k : точка разрыва, обеспечивающая непрерывность между значениями уровней главного лепестка и первых боковых лепестков;

λ_k : необходимый коэффициент затухания, уменьшающий значение усиления антенны для обеспечения непрерывности значений уровней боковых лепестков и задних лепестков для $x = 4$.

Выражение (47) используется в пп. 3.1.1 и 3.2.1 раздела *рекомендует*.

2 Рассмотрение параметра k для секторных антенн в диапазоне 1–6 ГГц

Для оценки надлежащего значения параметра k была вычислена общая разница между эталонной диаграммой направленности и измеренными диаграммами направленности, предоставленными некоторыми странами для фиксированных и для подвижных применений. Эти измеренные диаграммы направленности содержат данные об усилении при многих значениях углов места.

Для диаграммы направленности с максимальными значениями была произведена прямая сверка экспериментальных данных с выражением (47) при коэффициенте k , равном 0,7.

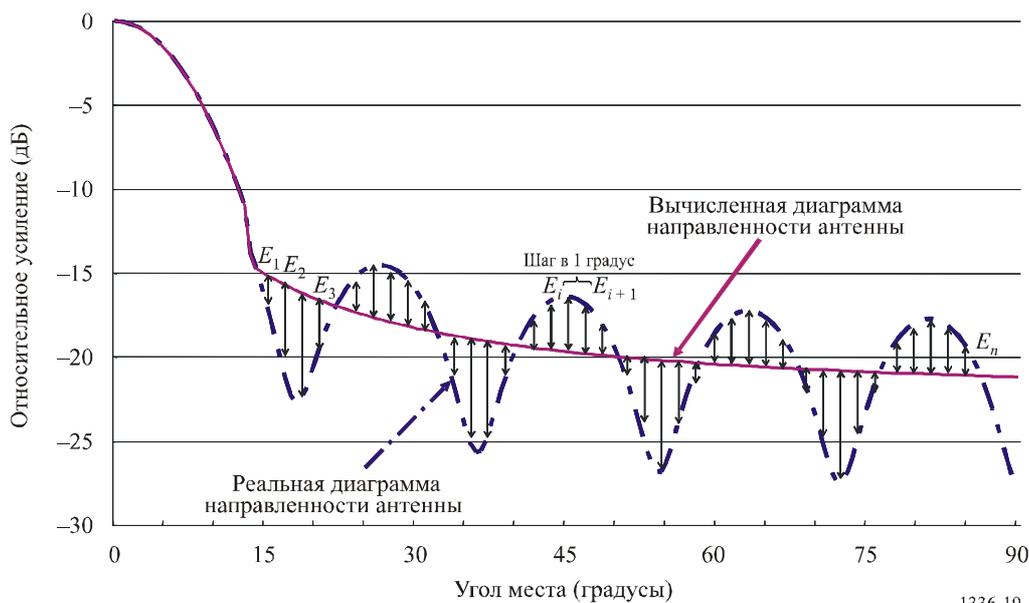
Для диаграммы направленности со средними значениями вычисления были проведены только для диапазона боковых лепестков (а не для участка главного лепестка); отсчеты разницы между рассчитанной и реальной диаграммами направленности антенн выбирались через каждый градус для определения "общей погрешности".

Общая погрешность определяется, как показано ниже. E_i вычисляется для действительных значений, а не для значений в дБ.

$$\text{Общая погрешность} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2}.$$

РИСУНОК 19

Общая погрешность при вычислении параметра k для диаграммы направленности со средними значениями



Для каждой диаграммы направленности была вычислена общая погрешность с использованием нескольких значений параметра k в интервале между 0 и 0,3. Результаты приведены на рис. 19. Значение параметра k , при котором обеспечивается минимальная общая погрешность, можно рассматривать как оптимальное значение. Из этого следует, что значение параметра $k = 0,2$ следует использовать для диаграмм направленности антенн со средними значениями

Еще одним важным фактором, который следует учитывать, является "значение Сигма", которое определяется путем интегрирования суммарной мощности по диапазону значений углов.

Основная идея такова:

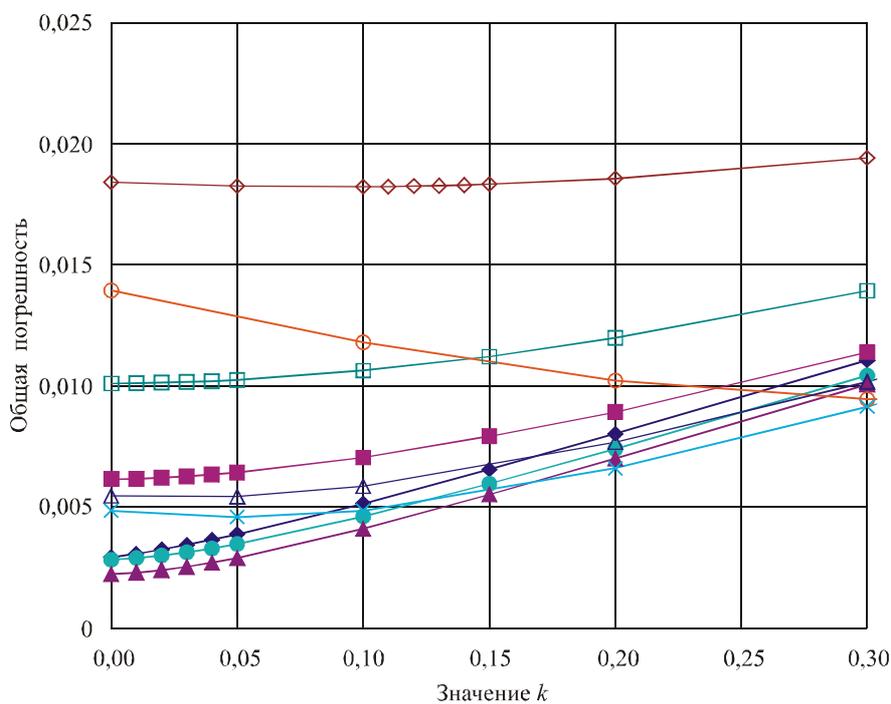
- для огибающих максимальных значений диаграмм направленности значение Сигмы должно быть в интервале 2–4 дБ;
- для средних значений боковых лепестков диаграмм направленности значение Сигмы должно быть в интервале 0–1 дБ.

Результаты вычислений значений Сигмы для выражений, рекомендованных для репрезентативных примеров типовых антенн, приведены в таблице 4.

Для огибающей максимальных значений диаграмм направленности значение Сигма при $k = 0,7$ находится в допустимых пределах. Кроме того, $k = 0,2$ будет возможным значением для средних значений боковых лепестков диаграмм направленности.

РИСУНОК 20

Пример оценки оптимального значения параметра k для диаграммы направленности со средними значениями



Новые измеренные данные

- ◆ Антенна 1 (2 ГГц, для ПС)
- Антенна 2 (2 ГГц, для ПС)
- Антенна 3 (2 ГГц, для ФС, сектор 60°)
- ▲ Антенна 4 (2 ГГц, для ФС, сектор 90°)
- ◇ RV901704_P
- 2,0 ГГц 6°/4°
- Антенна 5
- △ Антенна 6
- × Антенна 7

1336-20

ТАБЛИЦА 4

Результаты вычисления значений Сигмы

	Диаграмма направленности	Выражения	Параметр k	Значение Сигмы	
				16 дБи, сектор 60°	16 дБи, сектор 120°
Типовая антенна, в диапазоне 1–6 ГГц	Огибающая максимальных значений	п. 3.1.1 раздела <i>рекомендует</i>	$k = 0,7$	3,8 дБ	2,55 дБ
			Среднее значение боковых лепестков	п. 3.2.1 раздела <i>рекомендует</i>	$k = 0,2$
	$k = 0,4$	1,43 дБ	0,57 дБ		
	$k = 0,6$	1,93 дБ	0,97 дБ		