

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R F.699-7*

Эталонные диаграммы направленности антенн фиксированных беспроводных систем для использования при изучении вопросов координации и оценке помех в диапазоне частот от 100 МГц до примерно 70 ГГц

(Вопрос МСЭ-R 110/9)

(1990-1992-1994-1995-1997-2000-2004-2006)

Сфера применения

В данной Рекомендации содержатся эталонные диаграммы направленности и информация по антеннам фиксированных беспроводных систем (ФБС) в диапазоне частот от 100 МГц до примерно 70 ГГц. Данная информация может быть использована при изучении вопросов координации и оценке помех в отсутствие конкретной информации об антеннах ФБС.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что при изучении вопросов координации и оценке взаимных помех между фиксированными беспроводными системами (ФБС) и между станциями таких систем и земными станциями служб космической радиосвязи, работающими в одной и той же полосе частот, может оказаться необходимым использовать эталонные диаграммы направленности антенн ФБС;
- b) что для вышеупомянутых исследований могут быть пригодны диаграммы направленности, основанные на уровне, превышаемом малым процентом максимумов боковых лепестков;
- c) что диаграммы боковых лепестков антенн различного размера в значительной мере зависят от отношения диаметра антенны к рабочей длине волны;
- d) что эталонные диаграммы направленности необходимы в случае отсутствия информации о диаметре антенны;
- e) что при больших углах необходимо учитывать вероятность локальных отражений от земной поверхности;
- f) что использование антенн с наилучшими диаграммами направленности, с учетом Отчета МСЭ-R [9D/Антенны] (Док. 9/61) приведет к наиболее эффективному использованию радиочастотного спектра,

рекомендует,

1 чтобы в отсутствие конкретной информации о диаграмме направленности используемой антенны фиксированной беспроводной системы (см. Примечание 1) применялась определяемая ниже эталонная диаграмма направленности для:

1.1 оценки помех между фиксированными беспроводными системами;

1.2 изучения вопросов координации и оценки помех между станциями ФБС и станциями служб космической радиосвязи, работающими в одной и той же полосе частот;

2 чтобы для частот в диапазоне от 100 МГц до примерно 70 ГГц была принята следующая эталонная диаграмма направленности:

* Настоящая Рекомендация должна быть доведена до сведения 4, 6, 7 и 8-й Исследовательских комиссий радиосвязи.

2.1 для частот в диапазоне от 1 ГГц до примерно 70 ГГц в случаях, когда отношение диаметра антенны к рабочей длине волны больше 100, должны использоваться следующие уравнения (см. Примечания 6 и 7):

$$\begin{aligned}
 G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{при } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \\
 G(\varphi) &= G_1 && \text{при } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\
 G(\varphi) &= 32 - 25 \log \varphi && \text{при } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ \\
 G(\varphi) &= -10 && \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ,
 \end{aligned}$$

где:

$G(\varphi)$: коэффициент усиления относительно изотропной антенны

φ : угол отклонения от оси (градусы)

D : диаметр антенны }
 λ : длина волны } выраженные в одних и тех же единицах

G_1 : коэффициент усиления первого бокового лепестка = $2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \quad (\text{градусы})$$

$$\varphi_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad (\text{градусы});$$

2.2 для частот в диапазоне от 1 ГГц до примерно 70 ГГц в случаях, когда отношение диаметра антенны к рабочей длине волны меньше или равно 100, должны использоваться следующие уравнения (см. Примечания 6 и 7):

$$\begin{aligned}
 G(\varphi) &= G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{при } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \\
 G(\varphi) &= G_1 && \text{при } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D} \\
 G(\varphi) &= 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi && \text{при } 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ \\
 G(\varphi) &= 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} && \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ;
 \end{aligned}$$

2.3 для частот в диапазоне от 100 МГц до менее 1 ГГц в случаях, когда отношение диаметра антенны к рабочей длине волны больше чем 0,63 (G_{max} больше 3,7 дБи), должны использоваться следующие уравнения:

$$G(\varphi) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{при} \quad 0^\circ < \varphi < \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{при} \quad \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D}$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi \quad \text{при} \quad 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < \varphi_s$$

$$G(\varphi) = -2 - 5 \log \frac{D}{\lambda} \quad \text{при} \quad \varphi_s \leq \varphi \leq 180^\circ,$$

где:

$$\varphi_s = 144,5 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,2};$$

3 чтобы в случаях, когда известно только максимальное значение коэффициента усиления антенны, D/λ можно было оценить с помощью следующего выражения:

$$20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{max} - 7,7,$$

где G_{max} – коэффициент усиления главного лепестка диаграммы направленности антенны (дБи);

4 чтобы в случаях, когда известна только ширина главного лепестка антенны:

4.1 D/λ (выраженные в одних и тех же единицах) можно было оценить с помощью следующего выражения:

$$D/\lambda \approx 70 / \theta,$$

где θ – ширина лепестка (ниже 3 дБ) (в градусах);

4.2 при данном θ , G_{max} можно было приблизительно оценить следующим образом:

$$G_{max} \text{ (дБи)} \approx 44,5 - 20 \log \theta;$$

5 чтобы администрации представили измененные диаграммы направленности или спецификации, с тем чтобы дать возможность разработать и предложить новые и улучшенные диаграммы направленности для использования при изучении вопросов координации и оценки помех (см. Дополнение 1 к Приложению 1);

6 чтобы для получения дополнительной информации, относящейся к эталонным диаграммам направленности для антенн ФБС, обращались к Приложению 1;

7 чтобы при подробном расчете уровней помехи на пути помехи учитывался кроссполаризационный отклик антенн системы испытываемой помехи и мешающей системы;

7.1 что для расчета в п. 7 раздела *рекомендует*, включая компонент сигнала, излучаемого передающей антенной по предусмотренной полярности, а также отклик собственной поляризации испытывающей помехи принимающей антенны на компонент сигнала, излучаемого передающей антенной по непредусмотренной полярности, можно использовать следующее уравнение:

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} \right) \quad \text{дБи},$$

где следующие параметры относятся к коэффициенту усиления антенны (дБи):

- $G_t(\varphi_t)$: коэффициент усиления эффективности передающей антенны в направлении испытывающей помехи антенны
- $G_r(\varphi_r)$: коэффициент усиления эффективности принимающей антенны в направлении мешающей антенны
- $G_{tH}(\varphi_t)$: горизонтально поляризованный компонент коэффициента усиления передающей антенны
- $G_{rV}(\varphi_r)$: вертикально поляризованный компонент коэффициента усиления принимающей антенны
- $G_{tV}(\varphi_t)$: вертикально поляризованный компонент коэффициента усиления передающей антенны
- $G_{rH}(\varphi_r)$: горизонтально поляризованный компонент коэффициента усиления принимающей антенны.

φ_t и φ_r – углы между направлением основного луча и направлением к испытывающей помехи и передающей антеннам, соответственно.

Более подробная информация, а также числовые примеры использования данного уравнения содержатся в Приложении 2.

8 чтобы следующие примечания рассматривались как часть настоящей Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Весьма важно, чтобы при изучении вопросов координации и оценке помех были предприняты все усилия по использованию диаграммы направленности реальной антенны.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Следует отметить, что диаграмма направленности реальной антенны может быть намного хуже эталонной диаграммы в некотором диапазоне углов (см. Примечание 3). Поэтому эталонная диаграмма направленности, приведенная в настоящей Рекомендации, не должна рассматриваться в качестве установленного максимального предела для диаграмм направленности существующих или планируемых антенн ФБС. Учитывая это в целях сертификации, администрация может принять стандарты, как правило, основанные на статистических измерениях реальных антенн, которые могут отражать различные значения для уровней диаграмм направленности боковых лепестков.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Необходимо соблюдать осторожность при использовании эталонной диаграммы направленности в диапазоне углов, при которых конкретная система облучения антенны может приводить к относительно высоким уровням приема по боковым лепесткам.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Эталонная диаграмма, приведенная в п. 2, применяется только для одной поляризации (горизонтальной или вертикальной). Эталонные диаграммы для двух поляризаций (горизонтальной и вертикальной) в настоящее время находятся в стадии изучения.

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Эталонная диаграмма направленности, приведенная в настоящей Рекомендации, применима только для антенн, которые имеют круговую симметрию. Эталонная диаграмма направленности антенн с асимметричными апертурами, а также антенн ФБС без апертур в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц требует дальнейшего изучения. Для таких антенн вышеуказанные эталонные диаграммы могут рассматриваться в качестве временных. В таком случае значение D/λ , вычисляемое на основе G_{max} , является эквивалентным D/λ , а не реальным D/λ .

ПРИМЕЧАНИЕ 6. – Математические модели усредненных диаграмм направленности для использования при изучении определенных вопросов координации и оценке помех приведены в Рекомендации МСЭ-R F.1245.

ПРИМЕЧАНИЕ 7. – Эталонные диаграммы направленности всенаправленных и секторальных антенн в системах связи пункта со многими пунктами приведены в Рекомендации МСЭ-R F.1336.

ПРИМЕЧАНИЕ 8. – Для обеспечения дальнейшего совершенствования эталонных диаграмм направленности с учетом последних достижений в области конструирования антенн требуются дополнительные исследования.

ПРИМЕЧАНИЕ 9. – Диаграмма направленности, приведенная в п. 2 раздела *рекомендует*, хотя и предназначена для общего применения, не соответствует некоторым используемым на практике антеннам фиксированной службы и должна рассматриваться с осторожностью в диапазоне углов от 5° до 70° (см. также Примечания 2 и 3).

Приложение 1

Эталонные диаграммы направленности для антенн ФБС

1 Введение

При изучении вопросов совместного использования частот фиксированной беспроводной системой и фиксированной спутниковой службой или возможности повторного использования частот в ФБС сети, часто оказывается необходимым использовать эталонную диаграмму направленности, поскольку фактическая диаграмма направленности антенн не всегда точно известна или дает слишком много подробностей. Поэтому эталонная диаграмма направленности должна представлять огибающую боковых лепестков в упрощенном виде.

Выбор эталонной диаграммы направленности может, однако, быть различным в зависимости от вида применения, для которого она предназначена.

В общем случае должны применяться эталонные диаграммы направленности, приведенные в основном тексте настоящей Рекомендации.

2 Использование эталонных диаграмм направленности

Существует два основных вида применения эталонных диаграмм направленности антенн:

2.1 Предварительные исследования в пределах координационной зоны

При определении координационной зоны вокруг земной станции предполагается, что антенны ФБС станций ориентированы непосредственно на эту станцию. Однако в большинстве случаев будет иметь место некоторая угловая избирательность. Применение простой эталонной диаграммы направленности позволяет исключить из последующего рассмотрения ФБС станции, расположенные в координационной зоне, но, по всей вероятности, не создающие помех.

Данная диаграмма должна быть по необходимости завышенной, с тем чтобы не исключить критические источники помех, вносящие существенный вклад. Точный расчет уровня помех, безусловно, потребует более точной информации о диаграмме направленности антенны.

2.2 Повторное использование частот в фиксированной беспроводной сети

В фиксированной беспроводной сети одна и та же частота может использоваться неоднократно либо на достаточно удаленных друг от друга участках, либо на одном и том же участке при применении кроссполяризации.

В двух последних случаях большое значение имеют характеристики антенны, и при проектировании сети должны применяться достаточно точные эталонные диаграммы направленности; такая диаграмма может быть менее простой по сравнению с рассмотренной в п. 2.1, учитывая, что в расчет должна приниматься экономическая эффективность, администрация может поощрять применение

типов антенн с высокими эксплуатационными характеристиками в областях применения в спектре высоких частот.

3 Результаты измерений антенн в фиксированных беспроводных линиях связи

Измерения на многочисленных антеннах в достаточной степени подтверждают эталонные диаграммы направленности, приведенные в основном тексте настоящей Рекомендации, по крайней мере, до значения отношения D/λ , приблизительно равного 130. Однако необходимо иметь в виду следующие положения:

3.1 Некоторые антенны относительно устаревших конструкций имеют менее удовлетворительные эксплуатационные характеристики по сравнению с более новыми моделями. Наличие таких антенн со средними эксплуатационными характеристиками должно учитываться при совместном использовании частот.

3.2 Вышеуказанное сравнение основано на предположении, что антенны работают в условиях свободного пространства. Эксплуатационные характеристики антенн, установленных в полевых условиях, могут, однако, быть менее удовлетворительными из-за отражений от соседних препятствий или от других полевых антенн, размещенных на той же мачте.

4 Диаграммы направленности антенн с высокими эксплуатационными характеристиками

Антенны с высокими эксплуатационными характеристиками в значительной мере способствуют повышению пропускной способности узлов в ФБС. Для рупорно-параболических антенн, разработанных в целях удовлетворения требованиям наземных ФБС в сетях с большой плотностью, вышеуказанная эталонная диаграмма может рассматриваться в качестве действующей только в горизонтальной плоскости. В плоскостях, отличных от горизонтальной, имеют место значительные изменения чувствительности.

На рис. 1 приведен пример диаграммы направленности специфической, но широко используемой пирамидальной рупорно-параболической антенны. Линии огибающей уровней направленности нанесены (в дБ ниже уровня основного луча) в системе координат с использованием углов φ и θ (причем центр сферической системы координат является центром апертуры антенны). Существенное отклонение от круговой симметрии, предполагавшейся в эталонных диаграммах направленности в п. 2 раздела *рекомендует* в данной Рекомендации, обусловлено:

- наличием бокового лепестка с сильным излучением в районе $\varphi = +90^\circ$ и $60^\circ < \theta < 80^\circ$,
- наличием лепестка из-за влияния кожуха для защиты от непогоды в районе $\varphi = -90^\circ$ и $50^\circ < \theta < 90^\circ$.

Боковой лепесток с сильным излучением является результатом дифракции волн на верхней кромке апертуры, вызванной действием прямых лучей, излучаемых пирамидально-рупорной секцией. Это влияние проявляется только при вертикальной поляризации. Лепесток из-за влияния кожуха для защиты от непогоды вызван отражениями энергии наклонным пластиковым кожухом обратно на параболическую поверхность, которая затем перенаправляет большую часть энергии вниз на нижнюю кромку апертуры. Это явление не зависит от поляризации и частоты.

Антенна зеркального типа со смещенным облучателем имеет острую направленность, особенно в горизонтальной плоскости. На рис. 2 показаны примеры диаграмм направленности зеркальной антенны со смещенным облучателем вместе с примером диаграммы пирамидальной рупорно-параболической антенны, взятым из рис. 1.

РИСУНОК 1

Трехмерная диаграмма направленности пирамидальной рупорно-параболической антенны на частоте 3,9 ГГц и вертикальной поляризации
(Обратить внимание на изменение масштаба при $\theta = 10^\circ$)

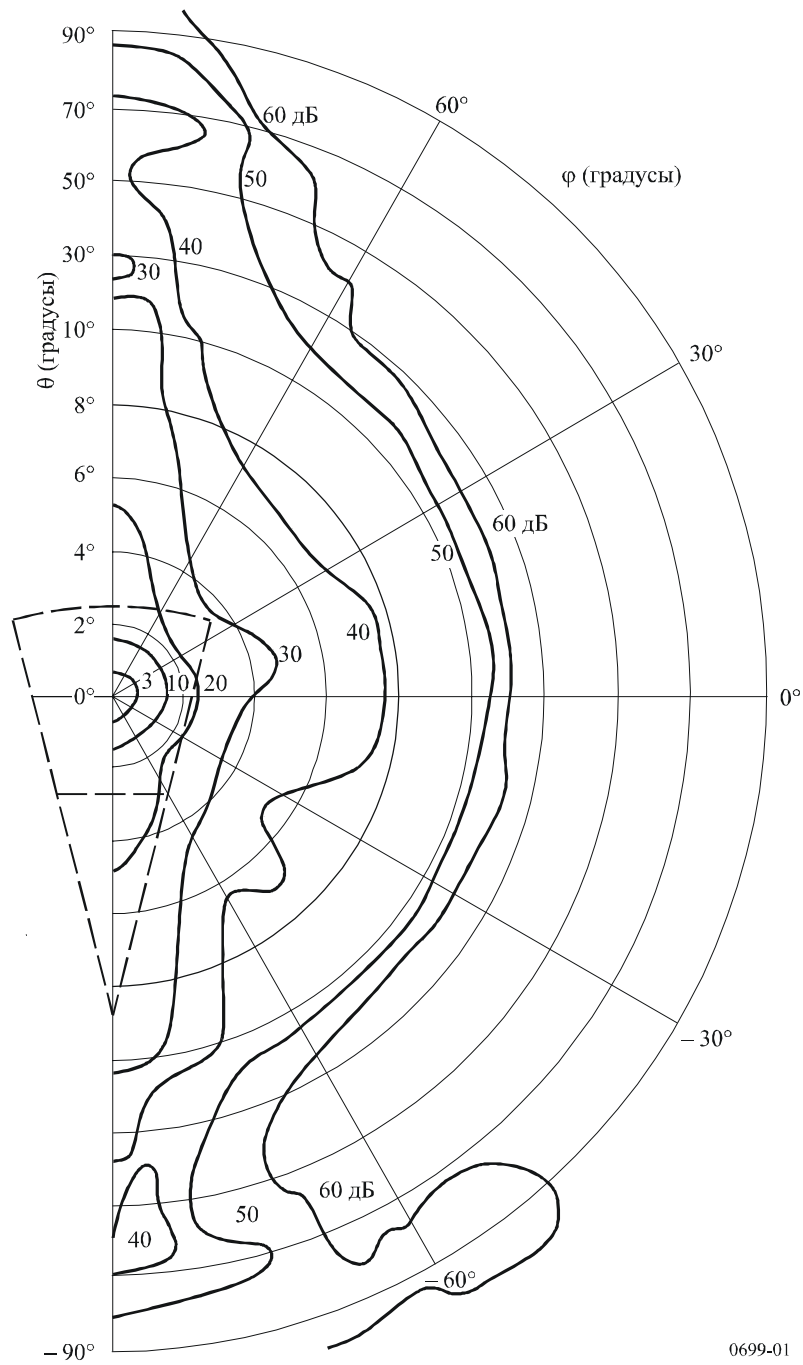
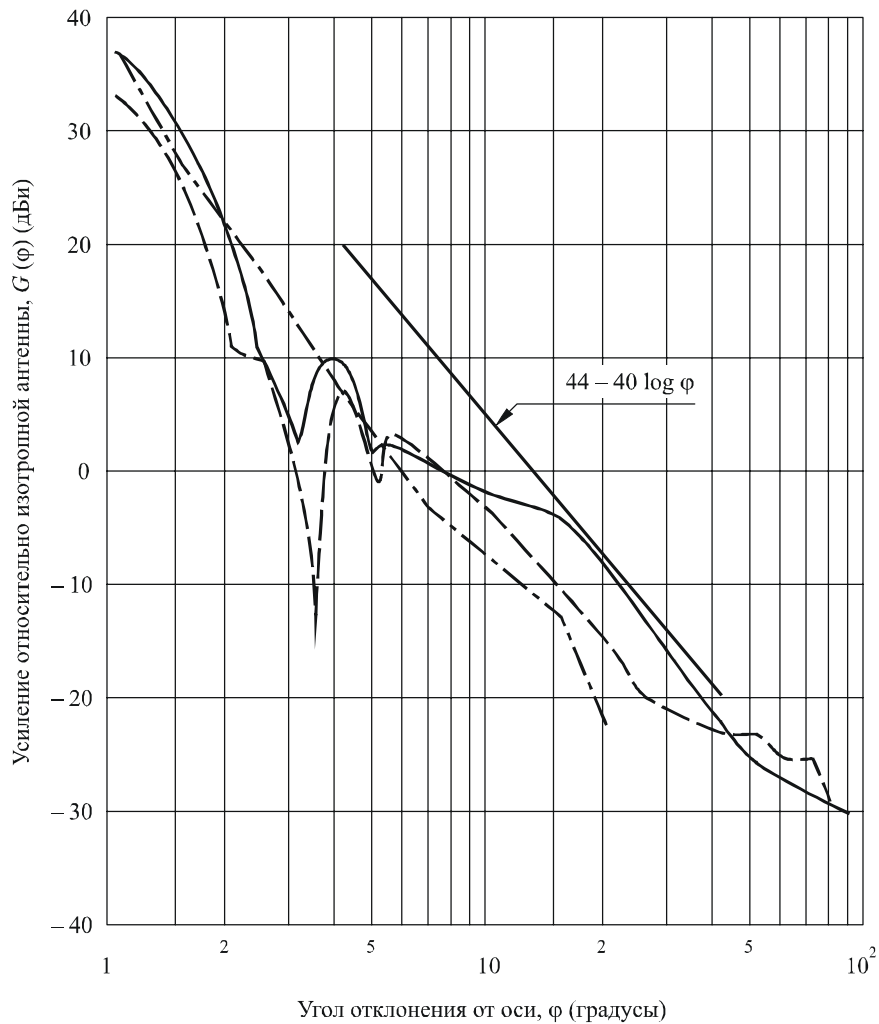


РИСУНОК 2

Диаграмма направленности антенн
с высокими эксплуатационными характеристиками



- Зеркальная антенна со смещенным облучателем диаметром 3,6 м, $\frac{D}{\lambda} = 46,8$ (3,9 ГГц)
- — — Зеркальная антенна со смещенным облучателем диаметром 3,6 м, $\frac{D}{\lambda} = 74,1$ (6,175 ГГц)
- - - - - Пирамидальная рупорно-параболическая антенна (3,9 ГГц)

0699-02

Для рупорно-параболических антенн и антенн со смещенным облучателем с очень слабым излучением на краю рефлектора в качестве эталонной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости может временно использоваться следующее уравнение:

$$G = 88 - 30 \log \frac{D}{\lambda} - 40 \log \varphi. \quad (1)$$

Это уравнение действительно в области направленности вне главного лепестка при углах φ приблизительно до 90° . Однако, когда излучение на краю рефлектора не очень слабое, уровень боковых лепестков в определенных направлениях может превышать уровни, указанные в уравнении (1).

Дополнение 1 к Приложению 1

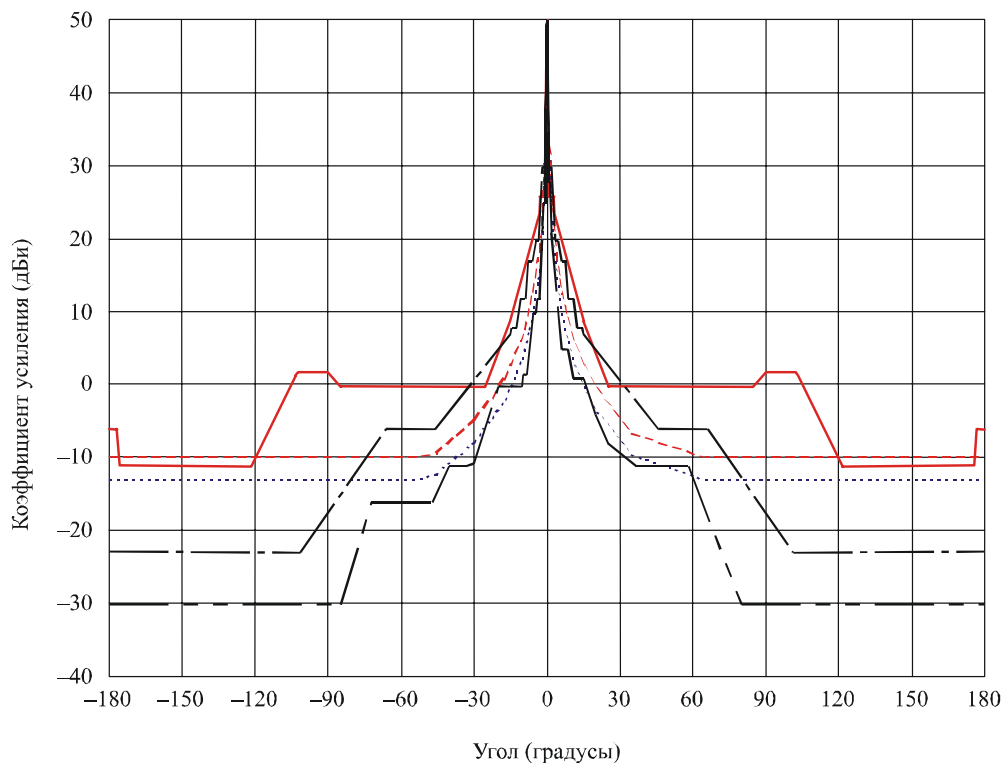
Измеренные диаграммы для применения при дальнейшем развитии данной Рекомендации

1 Введение

Существует постоянная потребность в пересмотре и обновлении эталонных диаграмм направленности, содержащихся в данной Рекомендации. Так как полоса частот, используемых ФБС, выходит за пределы 70 Гц, то существует необходимость расширения области применения рассматриваемых эталонных диаграмм направленности за пределы 70 ГГц. В этих целях в данном Дополнении содержится сравнение некоторых используемых на практике огибающих диаграмм направленности антенн и диаграмм направленности с соответствующими эталонными диаграммами, извлеченными из данной Рекомендации, а также Рекомендации МСЭ-R F.1245.

РИСУНОК 3

Антенна для связи пункта с пунктом (П-П) диаметром 3 м, 10,7 ГГц
($D/\lambda = 114$; коэффициент усиления = 49,8 дБи)
(Н: горизонтальная поляризация, V: вертикальная поляризация)



- Рекомендация МСЭ-R F.699
- Рекомендация МСЭ-R F.1245
- Низкие эксплуатационные характеристики V
- · — · Средние эксплуатационные характеристики V
- Высокие эксплуатационные характеристики V

РИСУНОК 4

Диаграммы направленности образцов антенн для производства
(диаметр 1,8 м, горизонтальная поляризация, 10,7 ГГц)

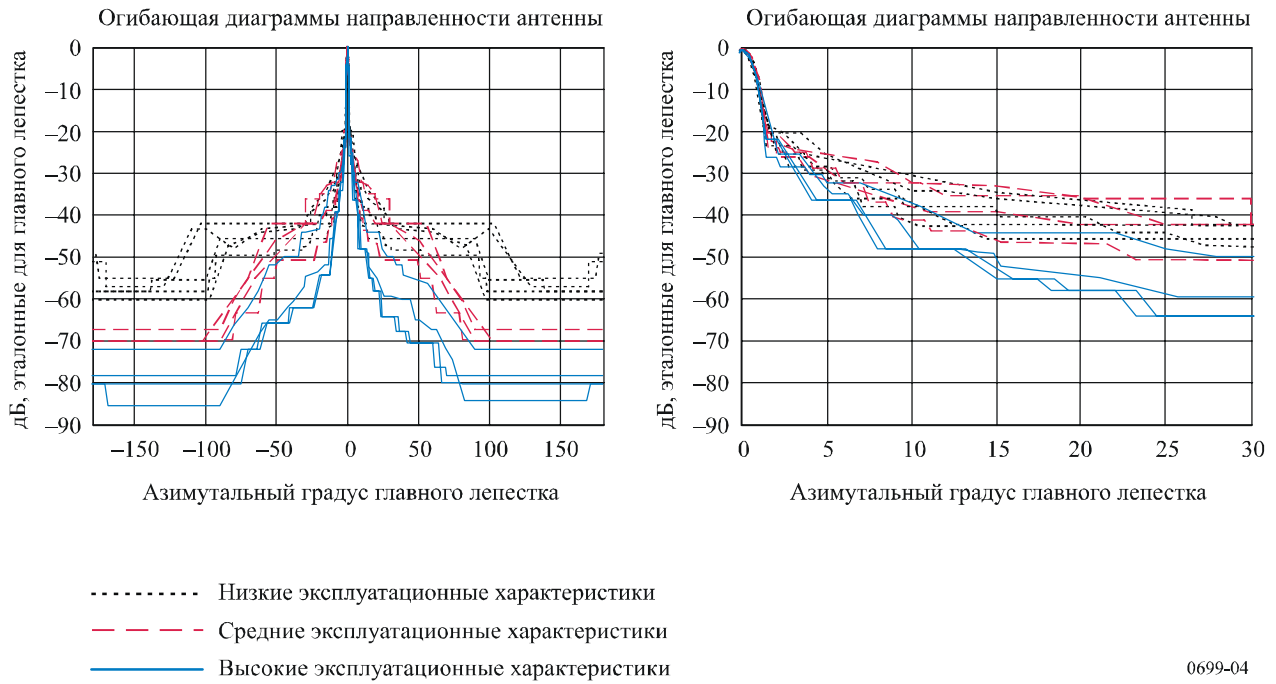
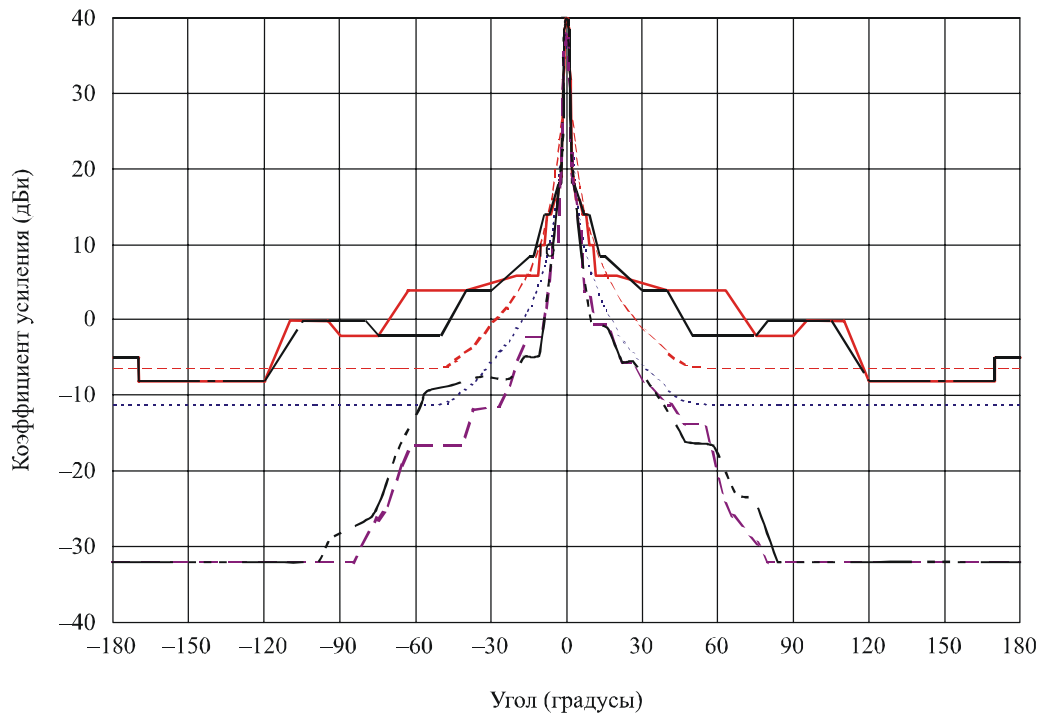


РИСУНОК 5

П-П антенна диаметром 1,2 м, 10,5 ГГц ($D/\lambda = 43$; коэффициент усиления = 39,9 дБи)
(Н: горизонтальная поляризация, V: вертикальная поляризация)

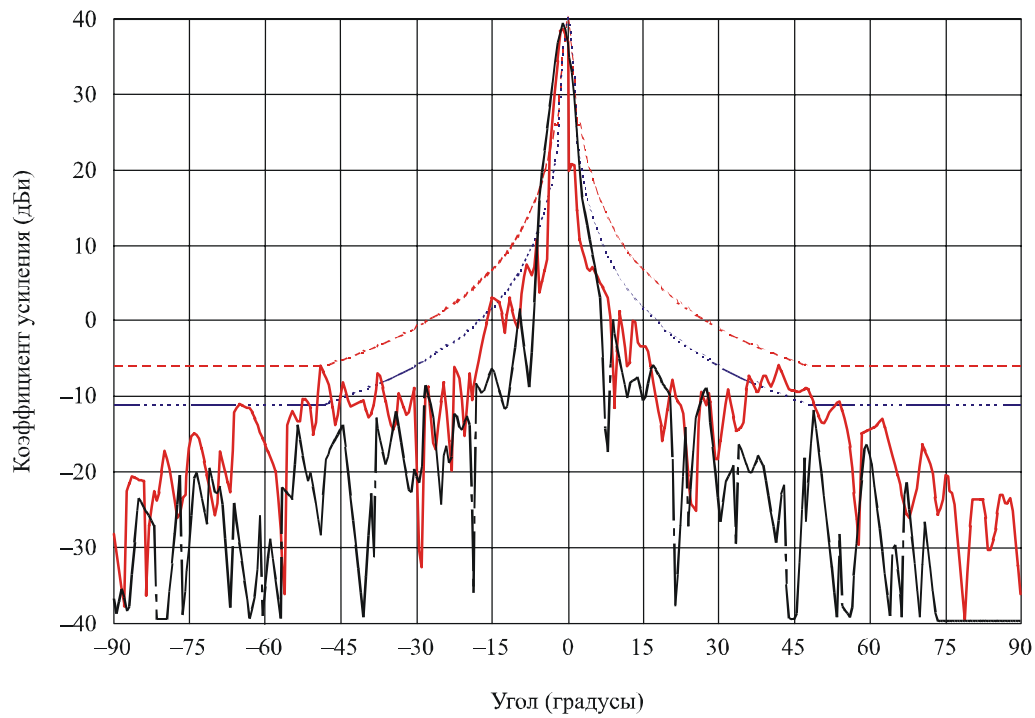


- Рекомендация МСЭ-R F.699
- Рекомендация МСЭ-R F.1245
- Низкие эксплуатационные характеристики Н
- Низкие эксплуатационные характеристики V
- - - Высокие эксплуатационные характеристики Н
- - - Высокие эксплуатационные характеристики V

0699-05

РИСУНОК 6

Линзовая рупорная П-П антенна диаметром 50 см, 21 ГГц ($D/\lambda = 37$; коэффициент усиления = 40 дБи)

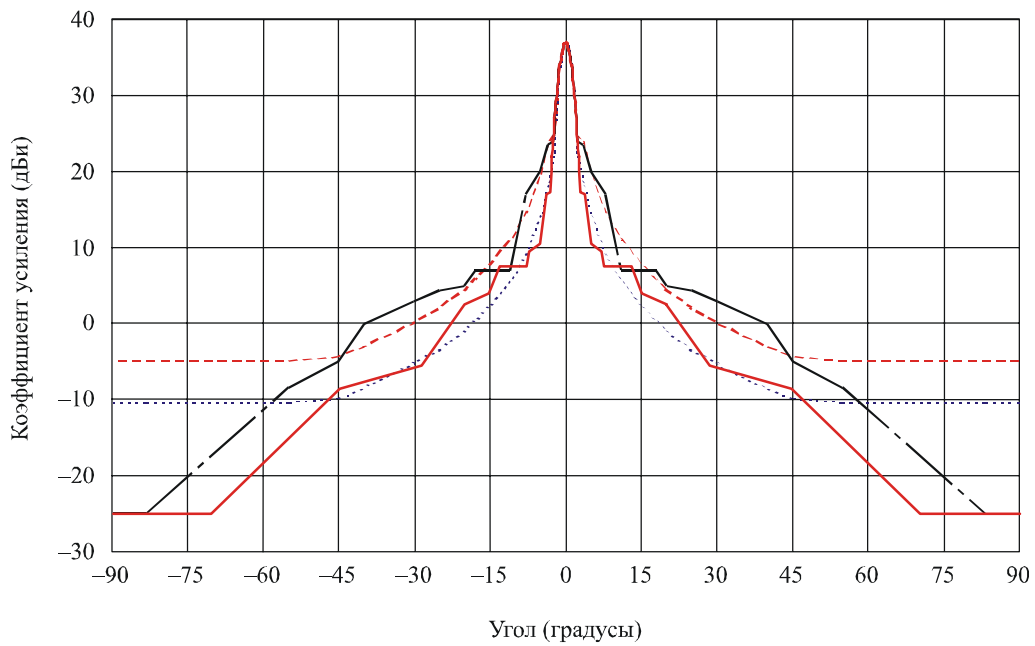


- Рекомендация МСЭ-R F.699
- Рекомендация МСЭ-R F.1245
- Измеренные значения
- Измеренные значения

0699-06

РИСУНОК 7

П-П антенна диаметром 0,3 м, 31 ГГц ($D/\lambda = 32$; коэффициент усиления = 36,9 дБи)
(Н: горизонтальная поляризация, V: вертикальная поляризация)

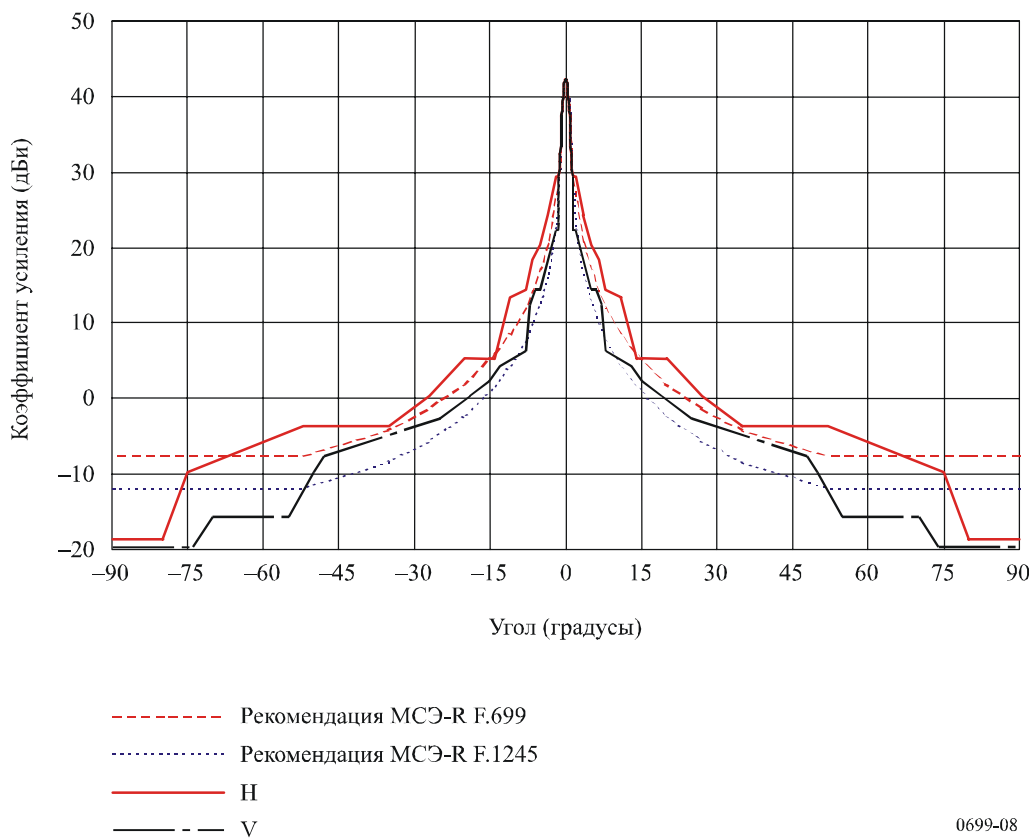


- Рекомендация МСЭ-R F.699
- Рекомендация МСЭ-R F.1245
- Н
- V

0699-07

РИСУНОК 8

П-П антенна диаметром 0,3 м, 55 ГГц ($D/\lambda = 57$; коэффициент усиления = 42,4 дБи)
(Н: горизонтальная поляризация, V: вертикальная поляризация)



0699-08

Приложение 2

Информация по применению п. 7 раздела *рекомендует*

1 Введение

С целью разъяснения обозначений, используемых в уравнении п. 7 раздела *рекомендует*, в данном Приложении содержатся некоторые цифры и числовые примеры.

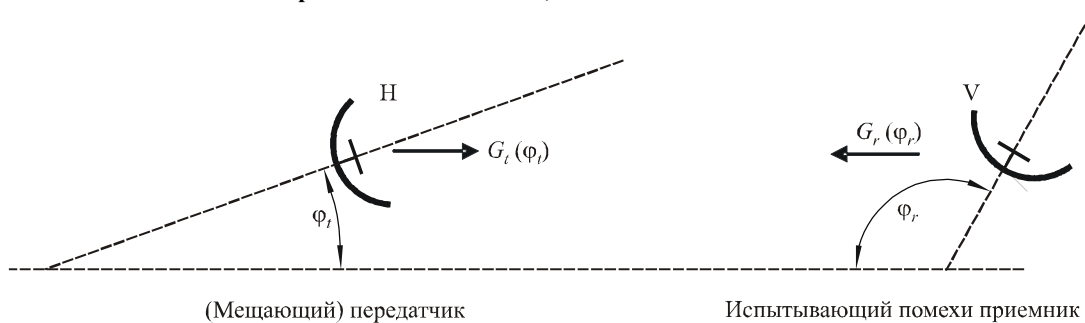
При наличии данных об относительных коэффициентах усиления антенны может использоваться альтернативное уравнение (см. п. 4).

В случае, когда коэффициенты усиления антенн с собственной поляризацией взаимозависимы, будет использоваться альтернативное уравнение (см. п. 5).

2 Расположение

РИСУНОК 9

Обобщенный пример взаимного расположения и ориентации передающей антенны и принимающей антенны, испытывающей помехи



0699-09

3 Числовой пример

РИСУНОК 10

Пример маски передающей антенны для собственной и кроссполяризации

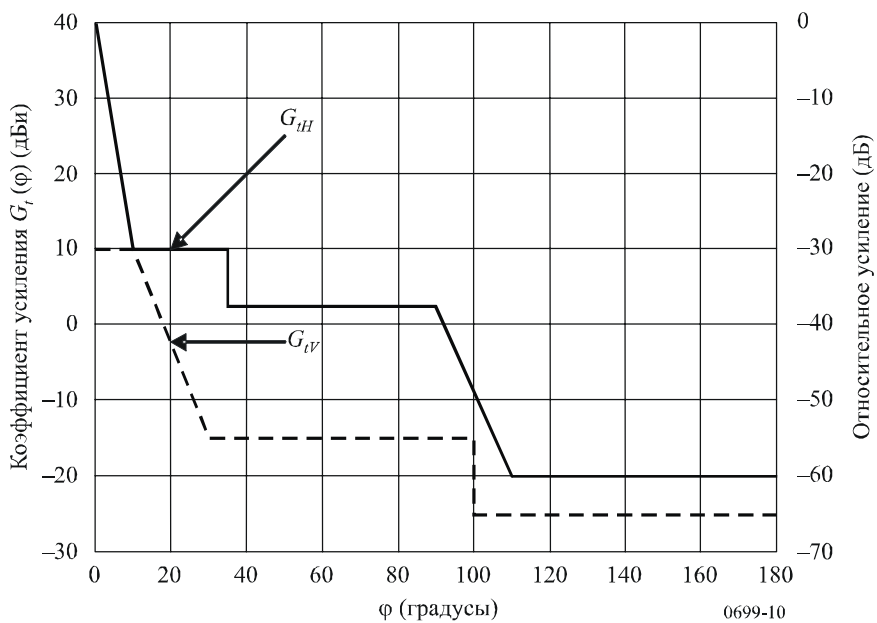
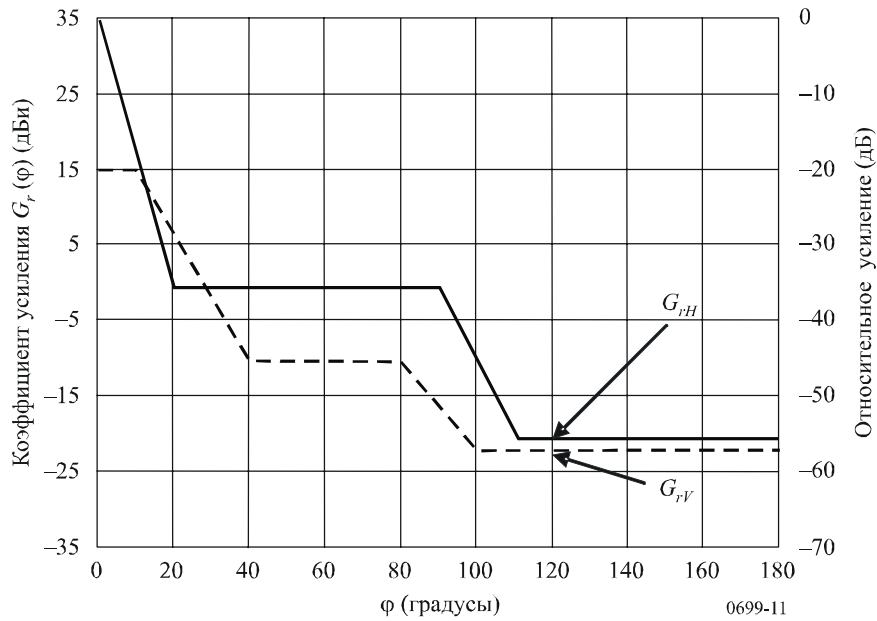


РИСУНОК 11

Пример маски принимающей антенны для собственной и кроссполяризации



Пример для кроссполяризованных антенн представлен ниже.

Из рис. 9, 10 и 11 могут быть получены следующие значения:

$$\varphi_t = 20^\circ$$

$$\varphi_r = 120^\circ$$

$$G_{tH}(\varphi_t) = 10 \text{ дБи}$$

$$G_{rV}(\varphi_r) = -22 \text{ дБи}$$

$$G_{tV}(\varphi_t) = -2 \text{ дБи}$$

$$G_{rH}(\varphi_r) = -20 \text{ дБи.}$$

При подстановке этих значений в уравнение, получается следующий результат:

$$G_t(20^\circ) + G_r(120^\circ) = -11,6 \text{ дБи.}$$

Согласно теореме взаимности, результат взаимного вычисления коэффициента усиления не изменится при перемене передающей и принимающей антенн.

4 Альтернативное уравнение для случая кроссполяризации

В случае, если известны значения G_{tmax} , G_{rmax} и относительного коэффициента усиления диапазона боковых лепестков (в соответствии с правой шкалой на рис. 10 и 11), может применяться уравнение (2):

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = G_{tmax} + G_{rmax} + 10 \cdot \log \left(10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} \right) \text{ дБи.} \quad (2)$$

В уравнении (2) G_{tmax} , G_{rmax} выражены в дБи, а относительное усиление боковых лепестков – в дБ.

5 Альтернативное уравнение для случая собственной поляризации

Если обе антенны с собственной поляризацией, необходимо соответствующим образом изменить значения, и уравнение примет следующий вид:

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} \right) \quad \text{дБи.} \quad (3)$$

Числовой пример для случая собственной поляризации с аналогичными антеннами (рис. 10 и 11) дает общий коэффициент усиления, равный $-9,8$ дБи.
