

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R S.672-4*

**Диаграмма направленности спутниковой антенны, применяемая
в качестве нормативной при проектировании фиксированной
спутниковой службы, использующей геостационарные спутники**

(1990-1992-1993-1995-1997)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что применение антенн космических станций с наилучшими возможными диаграммами направленности позволит наиболее эффективно использовать радиочастотный спектр и геостационарную орбиту;
- b) что на действующих космических станциях применяются антенны как с одним облучателем и лучом эллиптического (или круглого) сечения, так и со многими облучателями и лучом специальной формы;
- c) что несмотря на достигнутый прогресс в проектировании антенн космических станций, тем не менее, прежде всего можно будет принять эталонную диаграмму направленности, предназначенную для использования в процессе координации, требуется дополнительная информация;
- d) что принятие эталонной диаграммы направленности антенн космических станций будет способствовать изготовлению и применению антенн, позволяющих эффективно использовать орбитальный ресурс;
- e) что для целей координации характеристики излучения антенн космических станций необходимо определять только в направлениях потенциальных помех;
- f) что математические выражения, предназначенные для широкого применения, должны быть максимально простыми, но не должны терять при этом возможности эффективного предсказания;
- g) что, тем не менее, эти математические выражения должны учитывать характеристики практических антенных систем и позволять вносить поправки, обусловленные новыми достижениями в технологии;
- h) что трудности измерения приводят к неточности моделирования антенн космических аппаратов в области больших углов от оси главного направления излучения;
- j) что, поскольку размеры запускаемых аппаратов ограничены, ограничиваются и значения D/λ антенн космических станций, особенно на более низких частотах, например в полосах 6/4 ГГц;
- k) что такие параметры диаграммы направленности антенны космической станции, как опорная точка, зона покрытия, эквивалентное пиковое усиление, которые можно использовать для определения эталонной диаграммы направленности антенны космической станции, содержатся в Приложении 1;
- l) что для вычисления контуров покрытия разработано две компьютерные программы (см. Приложение 2),

* В 2001 году 4-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла в данную Рекомендацию редакционные изменения в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 44 (AP-2000).

рекомендует,

1 чтобы для антенн космических аппаратов фиксированной спутниковой службы (ФСС), имеющих один облучатель и луч эллиптического или круглого сечения, в качестве нормы при проектировании использовалась следующая диаграмма направленности вне зоны покрытия:

$$G(\psi) = G_m - 3(\psi/\psi_b)^a \quad \text{дБи} \quad \text{для} \quad \psi_b \leq \psi \leq a\psi_b \quad (1)$$

$$G(\psi) = G_m + L_N + 20 \log z \quad \text{дБи} \quad \text{для} \quad a\psi_b < \psi \leq 0,5b\psi_b \quad (2a)$$

$$G(\psi) = G_m + L_N \quad \text{дБи} \quad \text{для} \quad 0,5b\psi_b < \psi \leq b\psi_b \quad (2b)$$

$$G(\psi) = X - 25 \log \psi \quad \text{дБи} \quad \text{для} \quad b\psi_b < \psi \leq Y \quad (3)$$

$$G(\psi) = L_F \quad \text{дБи} \quad \text{для} \quad Y < \psi \leq 90^\circ \quad (4a)$$

$$G(\psi) = L_B \quad \text{дБи} \quad \text{для} \quad 90^\circ < \psi \leq 180^\circ, \quad (4b)$$

где:

$$X = G_m + L_N + 25 \log(b\psi_b) \quad \text{и} \quad Y = b\psi_b 10^{0,04(G_m + L_N - L_F)}$$

$G(\psi)$: коэффициент усиления под углом ψ от направления главного луча (дБи)

G_m : максимальный коэффициент усиления в главном лепестке (дБи)

ψ_b : половина ширины луча по уровню 3 дБ в рассматриваемой плоскости (на 3 дБ меньше G_m) (градусы)

L_N : требуемый уровень ближнего бокового лепестка в дБ относительно максимального усиления

$L_F = 0$ дБи уровень заднего лепестка (дБи)

z : (большая ось/малая ось) луча

L_B : $15 + L_N + 0,25 G_m + 5 \log z$ дБи или 0 дБи в зависимости от того, какая из величин больше.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Диаграммы, применимые к эллиптическим лучам, требуют экспериментальной проверки. Значения a в таблице 1 являются предварительными.

ТАБЛИЦА 1

L_N (дБ)	a	b	α
-20	$2,58 \sqrt{1 - \log z}$	6,32	2
-25	$2,58 \sqrt{1 - 0,8 \log z}$	6,32	2
-30	–	6,32	–

Численные значения a , b и α для уровней боковых лепестков $L_N = -20$ дБ и -25 дБ указаны в таблице 1. Значения a и α для $L_N = -30$ дБ требуют дальнейшего изучения. Администрациям предлагается предоставить информацию, необходимую для определения значений a и α для $L_N = -30$ дБ;

2 чтобы диаграмма направленности антенн космических аппаратов фиксированной спутниковой службы с несколькими облучателями и лучом специальной формы, используемой в качестве нормативной при проектировании, описывалась одной из следующих формул, в зависимости от класса антенны и диапазона значений отношений обзора.

Определение класса антенн

- Определение антенн класса А:

Антенны класса А – это антенны, у которых точка прицеливания находится внутри зоны покрытия.

- Определение антенн класса В:

Антенны класса В – это антенны, у которых точка прицеливания одного или нескольких лучей находится вне зоны покрытия.

Определение отношения обзора

Существуют два определения для отношения обзора:

Отношение обзора δ в § 2.1 определяется как угловое расстояние между центром зоны покрытия (определенном как центр минимальной эллиптической зоны) и точкой на краю зоны покрытия, разделенное на ширину единичного (элементарного) луча.

Отношение обзора S , используемое в § 2.2 и 2.3, определяется как угловое расстояние между опорным направлением антенны и точкой на краю зоны покрытия, разделенное на ширину элементарного (компонентного) луча.

В первоначальном определении, для которого раздел *рекомендует* применим к конкретной антенне класса А, должно применяться отношение обзора δ ;

2.1 чтобы для антенн класса А, имеющих значения отношения обзора $\delta \leq 3,5$:

$$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0,256 - 13,065 \left(\frac{\Delta\psi}{Q\psi_0} + 0,5 \right)^2 & \text{для } 0 \leq \frac{\Delta\psi}{\psi_0} \leq 0,8904Q \\ G_{ep} - 25 & \text{для } 0,8904Q < \frac{\Delta\psi}{\psi_0} \leq 1,9244Q \\ G_{ep} - 25 + 20 \log \left(\frac{1,9244Q\psi_0}{\Delta\psi} \right) & \text{для } 1,9244Q < \frac{\Delta\psi}{\psi_0} \leq 18/\psi_0, \end{cases}$$

где:

$\Delta\psi$: угол в градусах от выпуклого контура покрытия до точки вне зоны покрытия в направлении, перпендикулярном сторонам контура

G_{ep} : эквивалентное пиковое усиление (дБи)
 $= G_e + 3,0$

ψ_0 : диаметр элементарного луча по уровню половинной мощности (градусы)
 $= 72 (\lambda/D)$

λ : длина волны (м)

D : физический диаметр рефлектора (м)

$$Q = 10^{\left(\frac{0,000075 (\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02]^2} \right)}$$

δ : отношение обзора, определенное в § 2

F/D_p : отношение фокусного расстояния рефлектора F к диаметру параболы D_p

$$D_p = 2(d + h)$$

d : диаметр спроектированной апертуры параболоида со сдвигом

h : высота сдвига границы отражателя;

2.2 чтобы для антенн класса А, имеющих значения отношения обзора $S \geq 5$:

$$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_e - B \left[\left(1 + \frac{\Delta\psi}{\psi_b} \right)^2 - 1 \right] & \text{для } 0^\circ \leq \Delta\psi \leq C\psi_b \\ G_e - 22 & \text{для } C\psi_b < \Delta\psi \leq (C + 4,5)\psi_b \\ G_e - 22 + 20 \log_{10} \left[\frac{(C + 4,5)\psi_b}{\Delta\psi} \right] & \text{для } (C + 4,5)\psi_b < \Delta\psi \leq 18^\circ, \end{cases}$$

где:

$\Delta\psi$: угол (градусы) от выпуклого контура покрытия в направлении, перпендикулярном сторонам контура

G_e : усиление на краю зоны покрытия (дБи)

$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B$ для $S \geq 5$

$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$

$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}$

ψ_b : радиус элементарного луча

$= 36 \lambda/D$

λ : длина волны (м)

D : физический диаметр рефлектора (м)

$$C = \sqrt{1 + \frac{22}{B}} - 1$$

S : отношение обзора, определенное в § 2

F/D : отношение фокусного расстояния к физическому диаметру антенны;

2.3 чтобы для антенн класса В, использующих только значения отношения обзора S (для $S \geq 0$):

$$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_e - B \left[\left(1 + \frac{\Delta\psi}{\psi_b} \right)^2 - 1 \right] & \text{для } 0^\circ \leq \Delta\psi \leq C\psi_b \\ G_e - 17 + 18,7012 \log_{10} \left(\cos \left[\frac{\Delta\psi - C\psi_b}{\psi_b} \right] \right) & \text{для } C\psi_b < \Delta\psi \leq (C + 1)\psi_b \\ G_e - 22 & \text{для } (C + 1)\psi_b < \Delta\psi \leq (C + 4,5)\psi_b \\ G_e - 22 + 20 \log_{10} \left[\frac{(C + 4,5)\psi_b}{\Delta\psi} \right] & \text{для } (C + 4,5)\psi_b < \Delta\psi \leq 18^\circ, \end{cases}$$

где:

$\Delta\psi$: угол (градусы) от выпуклого контура покрытия в направлении, перпендикулярном сторонам контура

G_e : усиление на краю зоны покрытия (дБи)

$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B$ для $S \geq 0$

$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$

$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}$

ψ_b : радиус элементарного луча

$$= 36 \lambda/D$$

λ : длина волны (м)

D : физический диаметр рефлектора (м)

$$C = \sqrt{1 + \frac{17}{B}} - 1$$

S : отношение обзора, определенное в § 2

F/D : отношение фокусного расстояния к физическому диаметру антенны;

2.4 чтобы для антенн класса А, имеющих значения отношения обзора между $\delta > 3,5$ и $S < 5$, нормативные характеристики проектирования продолжали исследоваться. В частности, требуется изучить возможность распространения на эту область выражений, приведенных в § 2.1 и 2.2. Определения отношений обзора δ и S и их применения даны в § 2;

2.5 чтобы следующие примечания рассматривались как часть § 2.1 и 2.2:

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Зона покрытия должна определяться как контур, построенный по точкам выпуклого многоугольника, окружающего зону обслуживания, с использованием методики, приведенной в Приложении 2.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Для отдельных участков, где контур с уровнем -3 дБ располагается за пределами сформированного контура покрытия, характеристика направленности, используемая в качестве нормативной при проектировании, должна начинаться от контура по уровню -3 дБ.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Настоящая Рекомендация должна применяться только в направлении системы, чувствительной к помехам. Это означает, что нет необходимости применять ее в направлениях, где нет потенциальной возможности создания помех другим сетям (например, за краями земной поверхности, ненаселенные зоны океана), в 10% отдельных участков нормативная характеристика может быть превышена.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Настоящая Рекомендация не применяется к двухполосным антеннам. Антенны, в которых применяется рефлектор, который в целях расширения луча вносит фазовую ошибку, также принадлежат к этой категории, и для них требуются дальнейшие исследования.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Диаграммы направленности спутниковых антенн фиксированной спутниковой службы

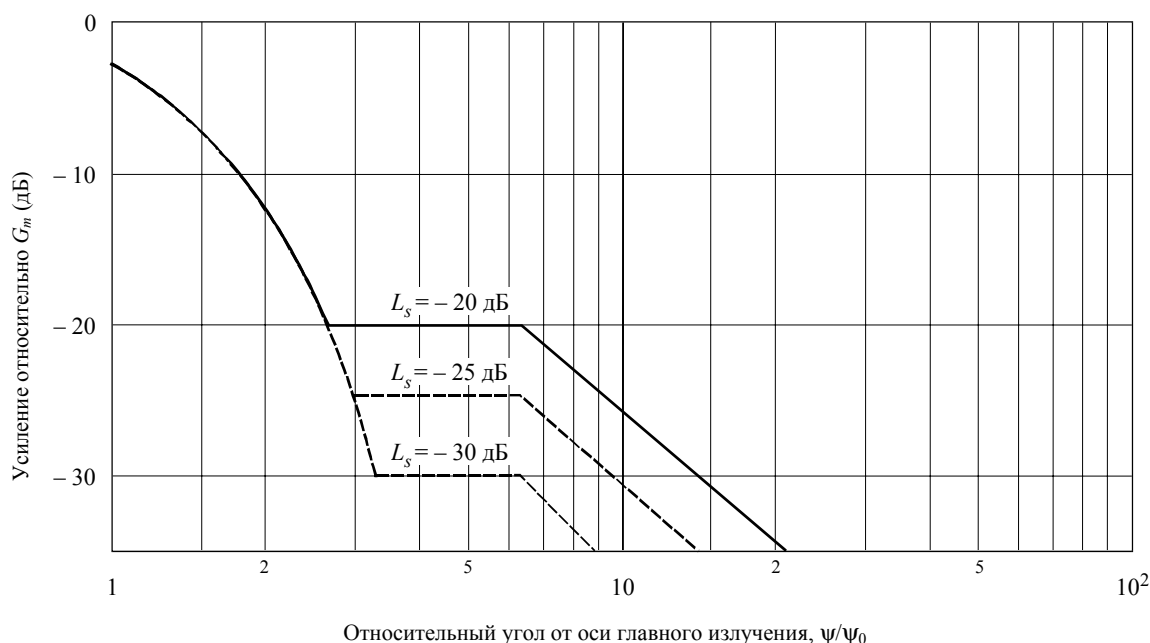
1 Эталонные диаграммы направленности спутниковых антенн

1.1 Антенны с круговыми лучами и одним облучателем

Наиболее важными участками диаграммы направленности спутниковой антенны являются области главного лепестка и задних лепестков. Таким образом, возможные диаграммы, начинающиеся от контура главного лепестка с уровнем -3 дБ, подразделяются на четыре участка. Они показаны на рисунке 1.

Однако трудности возникают при попытке применить утвержденную диаграмму к лучу, имеющему не круговую форму. Следовательно, администрациям рекомендуется представить измеренные диаграммы направленности для антенн, имеющих лучи, отличные от круговых.

РИСУНОК 1
Функции огибающей диаграммы направленности



$$\begin{aligned}
 G(\psi) &= G_m - 3 (\psi/\psi_0)^2 & \text{дБи} & \quad \text{для} \quad \psi_0 \leq \psi \leq a \psi_0 & \quad \text{(I)} \\
 G(\psi) &= G_m + L_s & \text{дБи} & \quad \text{для} \quad a \psi_0 < \psi \leq b \psi_0 & \quad \text{(II)} \\
 G(\psi) &= G_m + L_s + 20 - 25 \log (\psi/\psi_0) & \text{дБи} & \quad \text{для} \quad b \psi_0 < \psi \leq \psi_1 & \quad \text{(III)} \\
 G(\psi) &= 0 & \text{дБи} & \quad \text{для} \quad \psi_1 < \psi, & \quad \text{(IV)}
 \end{aligned}$$

где:

$G(\psi)$: усиление под углом (ψ) от оси (дБи)

G_m : максимальное усиление в главном лепестке (дБи)

ψ_0 : половина ширины луча по уровню 3 дБ в рассматриваемой плоскости (на 3 дБ ниже G_m) (градусы)

ψ_1 : значение (ψ), когда G_m в уравнении (III) равно 0 дБи

L_s : требуемый уровень вблизи лепестка (дБ) относительно пикового усиления

a, b : численные значения указаны ниже

L_s	a	b
-20	2,58	6,32
-25	2,88	6,32
-30	3,16	6,32

0672-01

1.2 Антенны с эллиптическими лучами и одним облучателем

Зависимости на рисунке 1 определяют максимальное значение огибающей для первых боковых лепестков, равное -20 дБ относительно пикового усиления, и такая диаграмма применима к относительно простым антеннам. Однако, в интересах лучшего использования емкости орбиты, может быть желательно уменьшить этот уровень до -30 дБ и использовать более сложные антенны. Диаграмма направленности, принятая Всемирной административной радиоконференцией по планированию радиовещательной спутниковой службы, Женева, 1977 г. (ВАРК РВ-77), для радиовещательных спутниковых антенн, отвечает этому требованию, и сегодня такую диаграмму уже можно получить реально и, следовательно, в таком случае она и

должна применяться. Может быть желательно провести дополнительные исследования для подтверждения возможности достижения в обычной практике таких пониженных уровней боковых лепестков, особенно в полосах 6/4 ГГц.

1.3 Антенны с несколькими облучателями и лучами специальной формы

Аналогичная диаграмма направленности, применяемая к лучам специальной формы, должна опираться на анализ нескольких лучей специальной формы и теоретические исследования. Должны быть определены дополнительные параметры, такие как диаметр элементарного луча и уровень первого бокового лепестка. Кроме того, в состав определения диаграммы направленности антенны входит кросс-секция и средства для измерения углов.

При создании такого эталона очень внимательного рассмотрения заслуживает избирательность, которая должна достигаться относительно границ зон покрытия всех типов антенн, включая наиболее сложные антенны с лучами специальной формы, как функция углового расстояния между зонами покрытия, видимого с орбиты. Диаграмма направленности антенны специальной формы является единственной в своем роде и, как правило, определяется следующими эксплуатационными и техническими факторами:

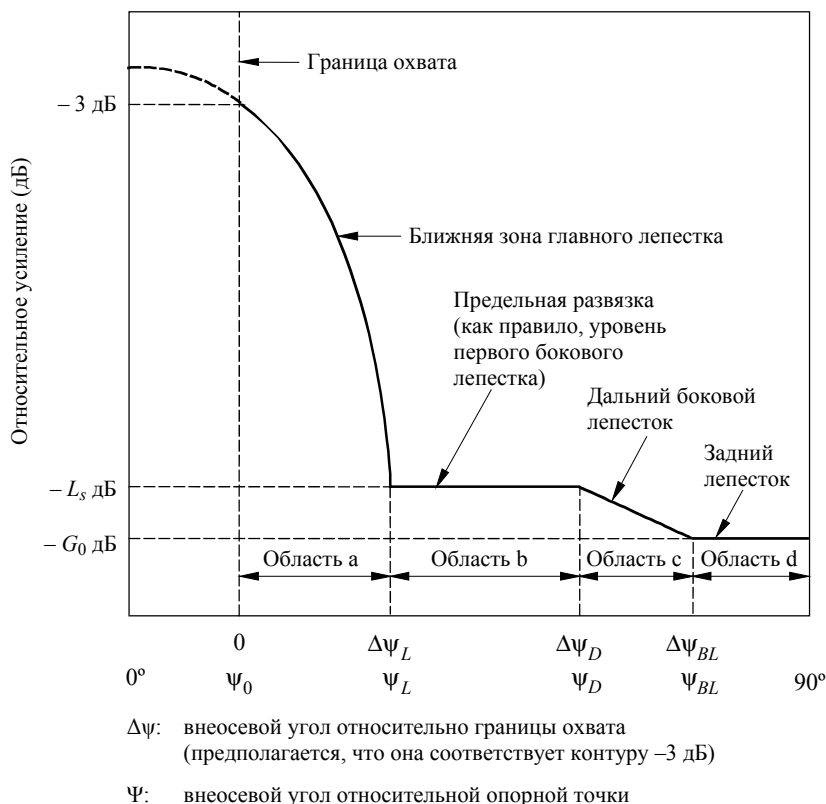
- форма зоны покрытия;
- долгота спутника;
- максимальная апертура антенны;
- конструкция облучателя и форма его луча;
- нормализованный диаметр апертуры рефлектора (D/λ);
- отношение фокусного расстояния к диаметру апертуры (F/D);
- количество станций, использующих повторяющиеся частоты и независимые лучи;
- количество используемых облучателей;
- значения ширины полосы частот;
- требования по ортогональности поляризации;
- область, в которой обеспечивается общее угловое покрытие;
- фазовая и амплитудная стабильность облучателей к возбуждению;
- требования по возможности переконфигурации;
- количество орбитальных позиций, из которых может быть обеспечен охват лучами зон покрытия;
- достигаемые допуски на неравномерность поверхности отражателя;
- нацеливание луча (то есть выполняется со спутника или используется независимое позиционирование луча при помощи земных маяков слежения);
- ухудшение элементарных лучей из-за искажений обзора, которые связаны с конкретной конфигурацией отражателя или антенны (то есть один рефлектор, двойной рефлектор, система профилированных отражателей, не имеющая фокальной оси, решетка непосредственного излучения и т. д.).

Ввиду изложенного, могут возникать определенные трудности при разработке одной-единственной эталонной диаграммы направленности для антенн с лучом специальной формы.

Эталонная диаграмма направленности, изображенная на рисунке 1, не является удовлетворительной для антенн с лучом специальной формы, поскольку ключевым параметром эталонной диаграммы является ψ_0 — ширина луча по уровню -3 дБ, тогда как центр луча специальной формы не определен и, практически, не связан с характеристикой вне луча. Простая диаграмма направленности, состоящая из четырех сегментов, показанная на рисунке 2, может быть более приемлемой в качестве эталонной диаграммы направленности. Угол наклона скатов этой диаграммы будет функцией от углового расстояния за пределами усредненного контура.

РИСУНОК 2

Возможная форма эталонной диаграммы направленности



0672-02

Конкретное направление, в котором необходимо измерять данное угловое расстояние, также является параметром, который необходимо определить. Один из методов состоит в измерении данного угла в направлении, ортогональном контуру с постоянным коэффициентом усиления, который наиболее точно соответствует зоне покрытия. Трудности с этим методом возникают в тех частях, где огибающие коэффициента усиления имеют вогнутый вид, как, например, в случаях с лунообразными диаграммами направленности. Для данного типа диаграммы направленности, излучение в направлении, ортогональном контуру, может еще раз пересекать зону покрытия. С точки зрения проектирования антенны, трудность достижения хорошей развязки в вогнутом участке диаграммы направленности увеличивается с ростом степени вогнутости. Альтернативным методом, который может разрешить эти проблемы, является описание зоны покрытия контуром, не имеющим вогнутых участков и последующее измерение углов, ортогональных к этому контуру; этот контур рассматривается как граница охвата. Возможно применение других методов определения направления измерения, например в качестве опорной точки может использоваться центр эллипса, описывающего эту зону (см. § 2.1 и 2.2), но для любой эталонной диаграммы необходимо дать недвусмысленное определение.

Как только направление определено, диаграмму направленности можно разделить на четыре конкретных участка:

Область а: Область, прилегающая к главному лепестку (граница зоны покрытия до угла предельной избирательности)

Предполагается, что эта область охватывает те участки, которые считаются областями, соседними с областью покрытия. Требуемая развязка между спутниковыми сетями будет достигнута за счет комбинации характеристик избирательности спутниковой антенны и расстоянием между спутниками на орбите.

Для описания этой области может использоваться простая функция, имеющая форму, подобную той, что показана в виде уравнения (I) на рисунке 1.

Область b: Область, не являющаяся соседней с областью покрытия

Этот участок начинается там, где диаграмма направленности достигает достаточной степени развязки, при которой рядом расположенные спутники могут обслуживать зоны, не смежные друг с другом ($\Delta\psi_L$ на рисунке 2). Предельная развязка (L_S) может располагаться между -20 и -30 дБ.

Область c: Область дальних боковых лепестков

Область d: Область заднего лепестка

Каждая из этих областей охватывает участки боковых лепестков высшего порядка и применима к достаточно большим зонам обслуживания, а в тех полосах частот, которые используются для осуществления связи в двух направлениях, и к участкам орбиты. В последнем случае необходимо с большой осторожностью подходить к рассмотрению очень больших углов от главной оси излучения, поскольку непредсказуемые отражения от космического аппарата и перелив энергии через край главного отражателя могут оказывать существенное влияние. Предполагается, что больше информации можно получить при рассмотрении огибающей минимального усиления (область d на рисунке 2).

2 Модели диаграммы направленности для антенн с профилированными лучами

Для моделирования профилированных лучей, до начала действительного проектирования антенны, может использоваться упрощенная эталонная диаграмма направленности. Далее представлены две модели, при помощи которых могут быть созданы такие диаграммы направленности и определены соответствующие им параметры. Обе модели пригодны для компьютерных исследований помех и, совместно с картами размещения спутника, для вычислений, выполняемых вручную. Эти модели являются основой рекомендованной диаграммы или диаграмм. Однако можно рекомендовать применение только "профилей" результирующей диаграммы направленности в направлении к системе, чувствительной к помехам. Это означает, что они не должны применяться для направлений, где не существует возможности создания помех другим сетям (то есть за пределами Земли, в незаселенных районах мирового океана и т. п.).

2.1 Представление зоны покрытия

В прошлом было предложено несколько способов для представления зоны покрытия антенн ФСС. В одном из способов угловое расстояние за пределами зоны покрытия измеряется в направлении, нормальном к географической зоне обслуживания (контур с постоянным усилением), видимой со спутника. На практике контур усиления проектируется так, чтобы он максимально точно соответствовал зоне покрытия, и, следовательно, ожидается, что разница между использованием зоны покрытия и контура постоянного усиления будет очень небольшой. Однако в некоторых случаях, когда отдельные участки контуров усиления являются вогнутыми, например при диаграммах направленности, имеющих крестообразную форму, могут возникнуть определенные трудности. Для таких диаграмм направленности направление, перпендикулярное контуру зоны покрытия, может еще раз пересекать зону покрытия, что влечет за собой неоднозначность (см. рисунок 3а). Еще одна сложность такого представления состоит в том, что для данного местоположения вне границ зоны покрытия можно найти несколько точек в зоне обслуживания, для которых линия, соединяющая это место с точкой внутри зоны обслуживания, перпендикулярна к контуру зоны обслуживания в данной точке (см. рисунок 3а)).

Однако был разработан метод, который позволяет обойти вышеперечисленные трудности, в котором используются измерения углов, нормалей к зоне покрытия и диаграммы направленности, содержащие вогнутые участки. Этот метод требует множества графических построений и описывается в виде пошаговых процедур в Приложении 2.

Кроме того, эти пошаговые процедуры можно упростить за счет использования только выпуклого контура зоны покрытия. Для создания выпуклого контура зоны покрытия выполняется та же процедура, что описана в Приложении 2, за исключением того, что рассматриваются только выпуклые углы, то есть те, для которых круг лежит внутри контура зоны покрытия. Результирующий контур зоны покрытия показан на рисунке 3b).

Еще один способ представления диаграмм направленности с профилированными лучами состоит в описании действительной зоны покрытия эллипсом минимальной площади. Угловое расстояние измеряется от границы эллипса в направлении, нормальном к огибающей эллипса. Это дает то преимущество, что относительно легче написать эффективные компьютерные программы для определения процедуры таких угловых измерений. Однако такое представление имеет тенденцию значительно переоценивать площадь реальной зоны обслуживания.

Еще одним методом является комплексный подход, который позволяет получить недвусмысленное определение для представления зоны покрытия профилированного луча. В этом методе для определения центра зоны покрытия используется эллипс минимальной площади, в который вписана географическая зона покрытия. Центр зоны покрытия необязательно совпадает с центром луча и используется только для определения оси отрезков диаграммы направленности. Как только центр зоны покрытия определен, эллипс минимальной площади теряет свою значимость.

Затем выпуклый многоугольник используется для определения границы зоны покрытия. Количество сторон, образующих многоугольник, определяется на основании того требования, что он должен описывать зону покрытия максимально точно и должен иметь выпуклую форму. Типичный пример представления зоны обслуживания показан на рисунке 3с). Угловые направления располагаются по радиусам от центра зоны покрытия.

Для места наблюдения вне пределов зоны покрытия, направление приложения образца и угловых расстояний однозначно определяется относительно центра зоны покрытия. Однако этот метод, как правило, приводит к переоценке углового расстояния между контурами с различными величинами усиления за пределами зоны покрытия, когда угол радиуса к контуру зоны покрытия существенно отличается от прямого.

В результате, представляется, что наиболее приемлемым методом с точки зрения как точности, так и простоты построений, является использование выпуклого контура зоны покрытия и угловых расстояний, измеряемых вдоль направлений, нормальных к сторонам контура, как показано на рисунке 3b).

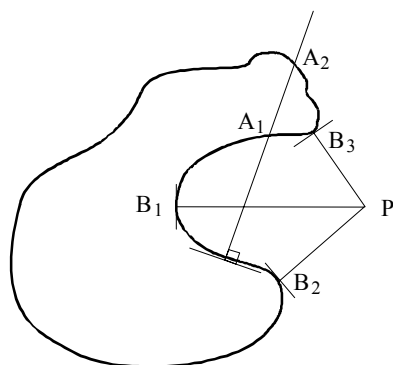
2.2 Эквивалентное пиковое усиление

В ситуациях, когда нет необходимости формировать луч специальным образом, для того чтобы компенсировать изменения условий распространения на протяжении зоны обслуживания, считается, что минимальный коэффициент усиления, достигаемый в зоне покрытия, на 3 дБ меньше эквивалентного пикового усиления (G_{ep}). На практике реальное пиковое усиление может быть больше или меньше эквивалентного пикового усиления и необязательно будет наблюдаться на оси излучения.

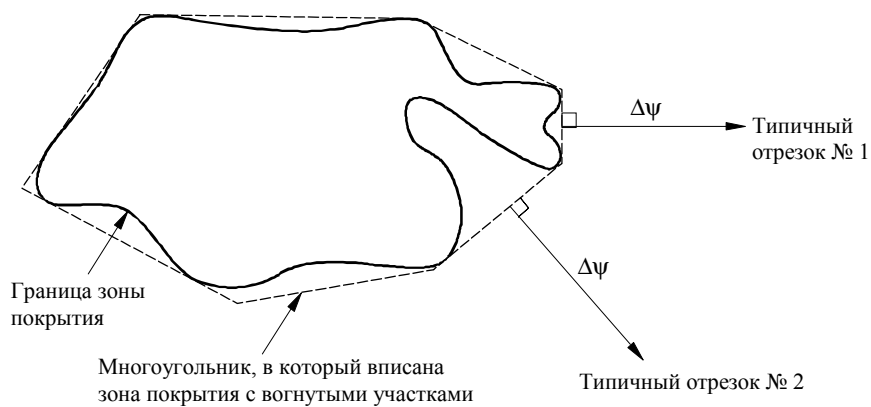
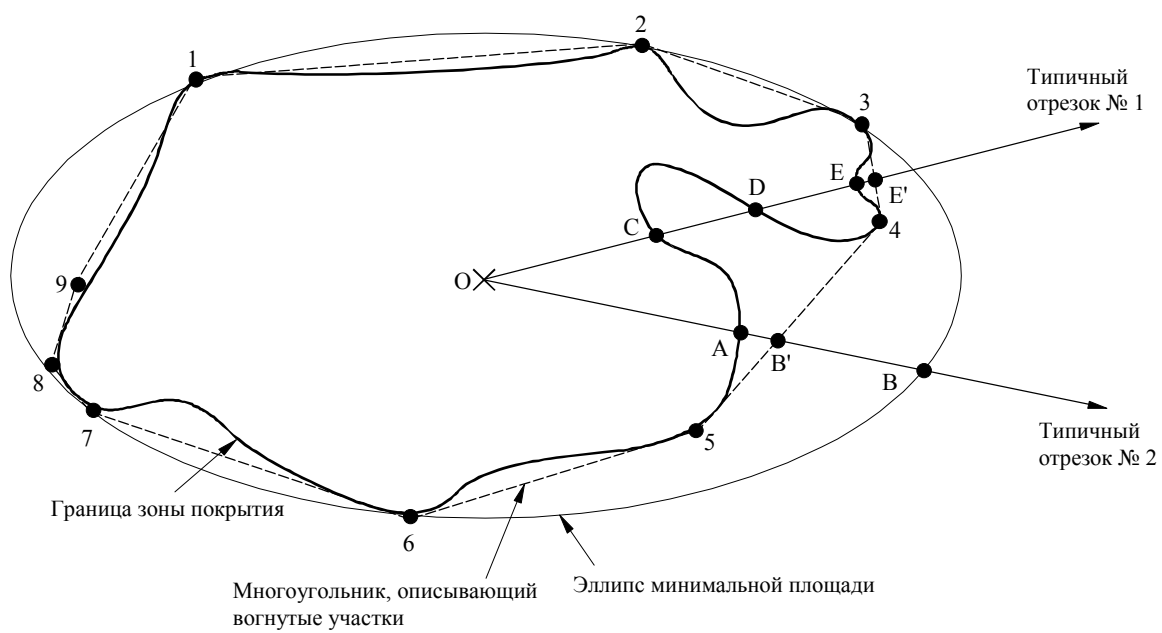
В ряде ситуаций могут наблюдаться значительные вариации условий распространения в зоне обслуживания или необходимое качество обслуживания может требовать специальной формы луча для данной зоны обслуживания. В этих случаях в каждой вершине многоугольника вычисляется минимальное требуемое относительное усиление (относительно усредненного усиления на контуре зоны покрытия) и затем для определения относительного усиления на промежуточных азимутах может использоваться линейная интерполяция, основанная на азимуте от оси луча. В этом сценарии усиление на контуре зоны покрытия зависит от направления.

Заметим, что для профилированного луча изменение усиления внутри зоны покрытия не связано с уменьшением усиления за границами зоны покрытия. Качественные показатели антенны внутри зоны покрытия, включая коэффициент усиления, не связаны с помехами, создаваемыми соседним системам. Следовательно, для диаграмм направленности антенн с профилированными лучами не требуется определять изменение усиления внутри зоны покрытия.

РИСУНОК 3
Различное представление зоны покрытия



a)

b) Измерение угла $\Delta\psi$ на основании (вогнутого) контура зоны покрытия

c)

0672-03

2.3 Размер элементарного луча

Уровни боковых лепестков определяются при помощи функции освещенности апертуры. Рассмотрим функцию освещенности:

$$f(x) = \cos^N \left(\frac{\pi}{2} \cdot x \right) \quad |x| \leq 1, \quad (5)$$

которая равна нулю на границе апертуры для $N > 0$. Радиус элементарного луча как функция уровня боковых лепестков (дБ) и отношения D/λ для рассматриваемого диапазона аппроксимируется формулой:

$$\psi_b = (16,56 - 0,775 L_s) \lambda / D \quad \text{градусов}, \quad (6)$$

где L_s – относительный уровень первого бокового лепестка (дБ).

Это выражение иллюстрирует компромисс между диаметром антенны, уровнем бокового лепестка и крутизной ската боковых участков главного лепестка. Оно получается из кривой, соответствующей результатам вычислений для различных уровней боковых лепестков. Это соотношение используется как отправная точка при создании моделей, описанных ниже.

2.4 Разработка моделей диаграмм направленности при совпадающей поляризации

Обобщенные диаграммы направленности при совпадающей поляризации для будущих антенн с лучами специальной формы основаны на результатах измерений, выполненных для нескольких работающих антенн с лучами специальной формы (Brazilsat, Anik-C, Anik-E, TDRSS, Intelsat-V, G-Star, Intelsat-VI, Intelsat-VII, Cobra) и на теоретических выкладках, приведенных в данном параграфе.

Предварительное моделирование, как представляется, не может количественно оценить влияние расширения луча. Показанные далее модели включают два различных подхода, в которых рассматриваются эффекты, существенные для точного предсказания параметров антенны с лучами специальной формы.

2.4.1 Первая модель

Диаграмма направленности антенны с лучом специальной формы, описанная в настоящем параграфе, строится на основе главных и второстепенных параметров. Главными параметрами являются размер элементарного луча, ширина зоны покрытия в рассматриваемом направлении и пиковый уровень боковых лепестков. Второстепенными параметрами являются параметр блокировки, изменение поверхности и величина сканируемого пространства, выраженная в единицах ширины луча. Влияние второстепенных параметров на излучение антенны сказывается в увеличении ширины главного луча и уровня боковых лепестков. Хотя основным параметром в расширении луча является величина сканируемого пространства, выраженная в единицах ширины луча, для полноты картины рассмотрены также два других параметра. Однако не следует пренебрегать влиянием блокировки на уровень боковых лепестков. Несмотря на то что на самом деле из-за практических ограничений, даже для антенн, которые в соответствии с проектом свободны от эффекта блокировки, обычно наблюдается некоторая блокировка на границах зоны покрытия. В частности, весьма вероятно возникновение приграничной блокировки для линейных антенн с двойной поляризацией, использующих общую апертуру, как, например, в случае двойных сетчатых рефлекторов, используемых на спутниках Anik-E, G-Star, Anik-C, Brazilsat и т. д. Это происходит благодаря расстоянию, разделяющему точки фокуса двух перекрывающихся рефлекторов, необходимому для того, чтобы удовлетворялись требования по развязке, и обеспечивалось достаточное пространство для размещения двух наборов облучателей.

Для участков дальних боковых лепестков опубликовано очень мало данных, для того чтобы можно было создать модель. Отражения от конструкции космического аппарата, перелив мощности через решетку и фидер, а также направленное излучение связки фидеров могут вносить неточности на больших углах от главной оси излучения, и могут лишить законной силы теоретические предположения. Кроме того, измерения в этой области являются невероятно

сложными и, следовательно, требуются дополнительные исследования для получения надежных значений усиления для данных участков модели. Пока предлагается использовать прямолинейный участок с усилением 0 дБи.

Следует отметить, что предлагаемая диаграмма направленности предназначена для применения только в тех направлениях, которые представляют практический интерес. В некритических направлениях, например в сторону океана или за пределы очертаний Земли, или в направлениях, где помехи не имеют значения, эта диаграмма вовсе не обязательно будет достаточно представительной моделью.

Обобщенная модель 1 при совпадающей поляризации

Предлагается следующая трехсегментная модель, описывающая огибающую диаграммы направленности спутниковой антенны с лучом специальной формы за пределами зоны покрытия:

Участок, прилегающий к главному лепестку:

$$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi) = G_{ep} + U - 4V \left(\frac{\Delta\psi}{Q \cdot \psi_0} + 0,5 \right)^2 \quad \text{для} \quad 0 \leq \Delta\psi \leq W \cdot Q \cdot \psi_0.$$

Участок ближних боковых лепестков:

$$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi) = G_{ep} + SL \quad \text{для} \quad W \cdot Q \cdot \psi_0 \leq \Delta\psi \leq Z \cdot Q \cdot \psi_0.$$

Участок дальних боковых лепестков:

$$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi) = G_{ep} + SL + 20 \log(Z \cdot Q \cdot \psi_0 / \Delta\psi) \quad \text{для} \quad Z \leq \Delta\psi \leq 18,$$

где:

$\Delta\psi$: угол от границы зоны покрытия (градусы)

$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi)$: усиление под углом $\Delta\psi$ (дБи)

G_{ep} : эквивалентное пиковое усиление

$$G_{ep} = G_e + 3,0 \text{ (дБи)}$$

ψ_0 : диаметр элементарного луча по уровню половинной мощности (градусы)

$$\psi_0 \approx (33,12 - 1,55 SL) \lambda / D$$

λ : длина волны (м)

D : диаметр отражателя (м)

SL : уровень бокового лепестка относительно пикового уровня (дБ)

$U = 10 \log A$, $V = 4,3429 B$ – параметры главного луча

$$B = [\ln(0,5/10^{0,1SL})] / [(16,30 - 3,345 SL) / (16,56 - 0,775 SL)]^2 - 1]$$

$$A = 0,5 \exp(B)$$

$$W = (-0,26 - 2,57 SL) / (33,12 - 1,55 SL)$$

$$Z = (77,18 - 2,445 SL) / (33,12 - 1,55 SL)$$

Q : коэффициент расширения луча из-за влияния второстепенных параметров:

$$Q = \exp[(8\pi^2 (\epsilon\epsilon/\lambda^2) \cdot [\eta_i(\Delta)]^{-0,5} \cdot 10^{\left(\frac{0,000075(\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02]^2} \right)}] \quad (7)$$

Переменные в уравнении (7) определяются следующим образом:

ϵ : среднеквадратичная ошибка выполнения поверхности

Δ : параметр блокировки (квадратный корень из отношения площади блокированной зоны к площади апертуры)

δ : ширина сканируемого пространства от направления оси, выраженная в единицах ширины луча

$$= \theta_0 / \psi_0$$

θ_0 : угловое расстояние между центром зоны покрытия, определенного как центр эллипса минимальной площади, до границы зоны покрытия

$$\eta_i(\Delta) = 1 - \Delta^2 \quad \text{для блокировки в центре}$$

$$= [1 - [1 - A(1 - \Delta)^2] \Delta^2]^2 \quad \text{для блокировки на краях.} \quad (8)$$

A в уравнении (8) представляет собой высоту ступеньки в первичной функции освещенности $(1 - Ar^2)$ на рефлекторе, а r – нормализованное расстояние от центра плоскости апертуры плоскости отражателя ($r = 1$ на краю). F/D_p в уравнении (7) представляет собой отношение фокусного расстояния к диаметру параболы. Для рабочих спутниковых антенн это отношение изменяется от 0,35 до 0,45.

Усиление в дальнем боковом лепестке зависит от перегиба мощности, эффектов дифракции и рефракции, обусловленных структурой космического аппарата. Эти эффекты зависят от конкретных проектов и, следовательно, обобщить их достаточно трудно.

Как показано в уравнении (7), коэффициент расширения луча Q зависит от среднеквадратичной ошибки выполнения поверхности ε , параметра блокировки Δ , ширины сканируемого пространства, выраженного в единицах ширины луча δ , и отношения F/D_p . Однако, как правило, на практике влияние ε и Δ на расширение луча невелико и им можно пренебрегать. Таким образом, уравнение (7) может быть упрощено до:

$$Q = 10^{\left(\frac{0,000075 (\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02]^2} \right)}, \quad (9)$$

где:

$$D_p = 2(d + h)$$

d : спроектированный диаметр апертуры параболоида со сдвигом

h : сдвиг по высоте к краю отражателя.

Уравнение (9) ясно показывает зависимость увеличения ширины сканируемого пространства, выраженного в единицах ширины луча и отношения F/D_p спутниковой антенны. Это выражение действительно для δ , не превышающего девяти значений ширины луча, чего более чем достаточно для глобального покрытия даже в полосе 14/11 ГГц; при использовании этой модели для таких больших зон обслуживания, как Канада, Соединенные Штаты или Китай, δ обычно равно одному или двум значениям ширины луча в полосе 6/4 ГГц и примерно четырем значениям ширины луча в полосе 14/11 ГГц. Следовательно, для большинства систем величина Q , как правило, не превышает 1,1. То есть расширение луча, как правило, составляет порядка 10% от ширины элементарного луча антенны с лучом специальной формы.

Пренебрегая расширением главного луча из-за блокировки и ошибки выполнения поверхности отражателя и предполагая, что в наихудшем случае отношение F/D_p для рефлектора составляет 0,35, коэффициент расширения луча Q можно упростить как:

$$Q = 10^{0,0037 (\delta - 1/2)^2}.$$

В полосе 6/4 ГГц уровень боковых лепестков -25 дБ может быть достигнут с небольшими трудностями с использованием монолитной антенны с несколькими облучателями диаметром примерно 2 м. Для получения развязки 30 дБ могут требоваться антенны большего диаметра, если нужно обеспечить угловое расстояние достаточно большого размера или регулировать его. В полосах 14/11 ГГц фиксированной спутниковой службы, как правило, развязка 30 дБ может

быть достигнута при использовании двухметровых антенн и применении хорошо продуманной конструкции подведения сигнала.

Вышеприведенные уравнения для эталонной диаграммы направленности зависят от угла сканирования единичного луча на границе зоны покрытия в направлении каждого отдельного отрезка, к которому должна применяться данная диаграмма направленности. В качестве эталонной диаграммы, которая должна использоваться как нормативная, желательно использовать простую диаграмму с минимальной параметрической зависимостью. Однако следует выбрать значение или значения Q , которые описывают типичные зоны покрытия спутника и введены в вышеприведенные уравнения.

Для спутника, имеющего зону обслуживания в пределах страны, может быть достигнут более крутой наклон ската главного лепестка луча типичной антенны по сравнению со спутниками, имеющими очень большие региональные зоны покрытия; и наоборот, диаграмма направленности, удовлетворяющая требованиям регионального покрытия, будет слишком мягкой для спутника, имеющего зону обслуживания в пределах страны.

Следовательно, предлагается упростить модель 1 и рассмотреть два следующих случая для антенн ФСС. В этих случаях предполагается, что используется диаграмма, в которой боковые лепестки имеют одинаковый уровень -25 дБ.

а) Малая область покрытия ($\delta < 3,5$)

Большинство зон покрытия в пределах страны попадает в эту категорию. Для представления диаграмм направленности с умеренным ухудшением обзора для малых областей покрытия коэффициент расширения луча Q принимается равным 1,10, то есть:

$$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0,256 - \frac{10,797}{\psi_0^2} (\Delta\psi + 0,55\psi_0)^2 & \text{для } 0 \leq \Delta\psi \leq 0,9794\psi_0 \\ G_{ep} - 25 & \text{для } 0,9794\psi_0 < \Delta\psi \leq 2,1168\psi_0 \\ G_{ep} - 25 + 20 \log(2,1168\psi_0 / \Delta\psi) & \text{для } 2,1168\psi_0 < \Delta\psi \leq 18. \end{cases}$$

б) Большие области покрытия ($\delta > 3,5$)

Большие зоны покрытия характерны, например, для лучей охвата полусферы и глобальных лучей систем INTELSAT и INMARSAT. Для того чтобы описать ухудшение диаграммы из-за необходимости обзора большой территории, коэффициент Q принимается равным 1,3. Эталонные диаграммы, применимые к таким зонам покрытия ($\delta > 3,5$), определяются следующим образом:

$$G_{\text{дБи}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0,256 - \frac{7,73}{\psi_0^2} (\Delta\psi + 0,65\psi_0)^2 & \text{для } 0 \leq \Delta\psi \leq 1,1575\psi_0 \\ G_{ep} - 25 & \text{для } 1,1575\psi_0 < \Delta\psi \leq 2,5017\psi_0 \\ G_{ep} - 25 + 20 \log(2,5017\psi_0 / \Delta\psi) & \text{для } 2,5017\psi_0 < \Delta\psi \leq 18. \end{cases}$$

2.4.2 Вторая модель

Будет достаточно не просто создать относительно простую диаграмму направленности, которая была бы применима к различным спутниковым антеннам без ущерба для конкретного проекта или системы. Исходя из этих соображений, диаграмма, показанная здесь в виде модели 2, предназначена не для описания одной-единственной огибающей, а описывает общую форму. Эту диаграмму можно рассматривать не только применительно к одной антенне, но и в качестве обобщенного представления семейства диаграмм, описывающих антенны, пригодные для множества различных приложений.

При разработке этой модели была сделана попытка полностью учесть расширение луча, вызванное тем, что элементарные лучи "смотрят" в сторону от опорного направления антенны с лучом специальной формы. Была сделана осторожная попытка учесть влияние помех и взаимного

перекрытия между соседними элементарными лучами, расположенными вокруг рассматриваемого луча. Во избежание усложнения формул рассматривались два дополнительных соседних луча в направлении движения элементарных лучей. Учитывалось также изменение расширения луча с изменением отношения F/D , результаты были проверены в диапазоне $0,70 \leq F/D \leq 1,3$ и смоделированы для усредненной плоскости сканирования между плоскостью угла места и азимутальной плоскостью. Если бы моделирование выполнялось только для азимутальной плоскости, то можно было бы ожидать, что полученные характеристики были бы более крутыми, чем предсказанные. При моделировании также были сделаны следующие предположения:

- предполагалось, что граница элементарных лучей, соответствующих отдельным элементам решетки, соответствует идеальному контуру с усилением -3 дБ для зоны покрытия луча специальной формы;
- радиус элементарного луча ψ_b определяется по уравнению (6) и соответствует ослаблению на границе апертуры -4 дБ;
- значение B , которое определяет участок главного луча, моделируется непосредственно как функция угла сканирования элементарного луча, диаметра антенны D и отношения F/D отражателя антенны.

Значение F/D , используемое в этой модели, представляет собой отношение фокусного расстояния к физическому диаметру рефлектора. Модель достоверна для диаметров рефлектора вплоть до 120λ , ширины сканируемого пространства, охватывающего до 13 значений ширины луча, и показала хорошее соответствие 34 сегментам диаграммы направленности четырех различных антенн.

Учитывая, что когда-либо в будущем может потребоваться более точно регулировать качественные параметры антенны, эта модель предусматривает два простых коэффициента улучшения K_1 и K_2 , предназначенных для изменения обобщенной диаграммы направленности, разработанной на сегодняшний день.

Обобщенная модель 2 при совпадающей поляризации

Далее описываются уравнения для различных регионов и соответствующих значений внеосевого коэффициента усиления. Эти значения коэффициента усиления измерены в направлении, нормальном к зоне покрытия в каждой точке, и этот метод тесно связан с определением зоны покрытия, приведенном в Приложении 2.

В настоящее время значения коэффициентов K_1 и K_2 следует принять равными единице, то есть $K_1 = K_2 = 1$.

Уравнения, используемые в этой модели, нормализованы относительно первого бокового лепестка (L_s) = -20 дБ. В конечном счете, величина первого бокового лепестка будет заменена значением, выбранным для данного приложения.

а) Участок, прилегающий к главному лепестку: ($0^\circ \leq \Delta\psi < C\psi_b$)

На этом участке функция усиления описывается формулой:

$$G(\Delta\psi) = G_e - K_1 B \left[\left(1 + \frac{\Delta\psi}{\psi_b} \right)^2 - 1 \right] \quad \text{дБи,} \quad (10)$$

где:

$G(\Delta\psi)$: усиление эталонной диаграммы направленности (дБи)

G_e : усиление на границе зоны покрытия (дБи)

$\Delta\psi$: угол (градусы) от (выпуклого) контура зоны покрытия в направлении, нормальном к сторонам этого контура

$\psi_b = 32 \lambda/D$ – радиус элементарного луча (градусы) (соответствующий $L_s = -20$ дБ в уравнении (6))

$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B$ для $S \geq 1,25$ и

$$B = B_0 \quad \text{для } S < 1,25$$

$$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$$

$$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}.$$

Для поддержания обобщенного подхода здесь приводятся уравнения и для азимутальной плоскости, и для плоскости угла места.

$$\text{азимутальная плоскость: } B_0 = 2,15 + T$$

$$\text{плоскость угла места: } B_0 = 1,95 + T,$$

$$\text{где } T = 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$$

$$\text{азимутальная плоскость: } \Delta B = 1,3 (D/\lambda)^{-0,55}$$

$$\text{плоскость угла места: } \Delta B = 2,0 (D/\lambda)^{-0,55}$$

$$D: \quad \text{физический диаметр антенны (м)}$$

$$\lambda: \quad \text{длина волны (м)}$$

S : угловое перемещение A между опорным направлением антенны и точкой на границе зоны покрытия для ширины элементарных лучей по половинной мощности, как показано на рисунке 4, то есть $S_1 = A_1 / 2\psi_b$ и $S_2 = A_2 / 2\psi_b$

$$C = \sqrt{1 + \frac{(20 K_2 - 3)}{K_1 B}} - 1,$$

и оно соответствует пределу, где $G(\Delta\psi)$ равно уровню $-20 K_2$ (дБ) относительно эквивалентного пикового усиления G_{ep} , то есть $G(\Delta\psi) = G_e + 3 - 20 K_2$.

b) Участок ближнего бокового лепестка: $C\psi_b \leq \Delta\psi < (C + 0,5)\psi_b$

Этот участок умышленно поддерживался очень узким, что обусловлено следующими причинами. Высокие первые лепестки порядка -20 дБ встречаются только в некоторых плоскостях, и за ними следуют постепенно убывающие боковые лепестки. На участках, где наблюдается расширение луча, первый боковой лепесток сливается с главным лепестком, который был смоделирован как величина B для участка, прилегающего к главному лепестку. Отсюда необходимо, чтобы этот участок поддерживался очень узким, для того чтобы не переоценить уровень излучения. (Для антенн класса В этот участок был слегка расширен, а функция усиления была изменена.) На этом участке усиление остается постоянным и определяется по формуле:

$$G(\Delta\psi) = G_e + 3 - 20 K_2. \quad (11)$$

с) Участок промежуточного бокового лепестка: $(C + 0,5)\psi_b \leq \Delta\psi < (C + 4,5)\psi_b$

Для этого участка характерно равномерное уменьшение боковых лепестков. Как правило, огибающая уменьшается со скоростью примерно 10 дБ на $4\psi_b$. Отсюда на данном участке:

$$G(\Delta\psi) = G_e + 3 - 20 K_2 + 2,5 \left[(C + 0,5) - \frac{\Delta\psi}{\psi_b} \right] \quad \text{дБи.} \quad (12)$$

Вышеприведенное выражение уменьшается от $G_e + 3 - 20 K_2$ в точке $(C + 0,5)\psi_b$ до $G_e + 3 - 10 - 20 K_2$ в точке $(C + 4,5)\psi_b$.

d) Участок широкоугольного бокового лепестка: $(C + 4,5)\psi_b \leq \Delta\psi < (C + 4,5)\psi_b D$,

$$\text{где } D = 10^{[(G_e - 27) / 20]}.$$

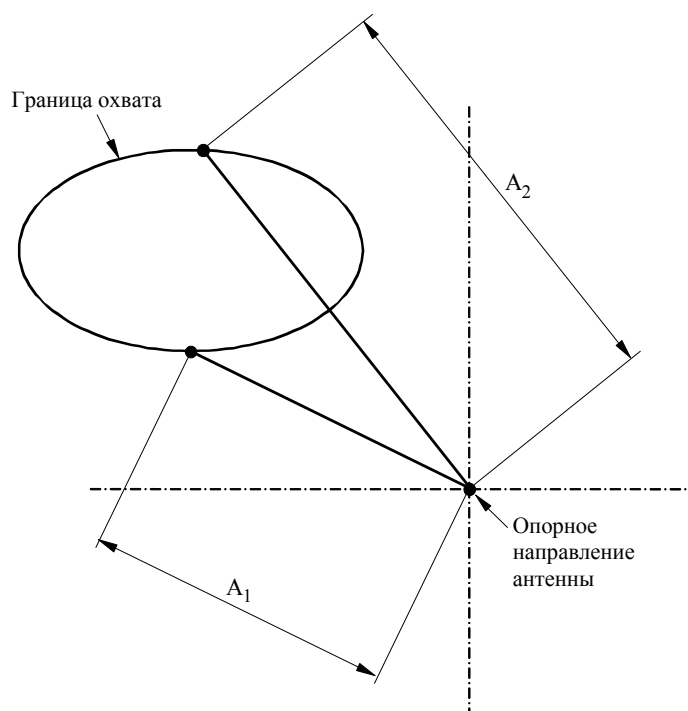
Это соответствует участку, в котором доминирует влияние дифракции на границах отражателя, которое возрастает со скоростью примерно 6 дБ на октаву. Таким образом, этот участок описывается уравнением:

$$G(\Delta\psi) = G_e + 3 - 10 - 20 K_2 + 20 \log \left[\frac{(C + 4,5) \psi_b}{\Delta\psi} \right] \quad \text{дБи.} \quad (13)$$

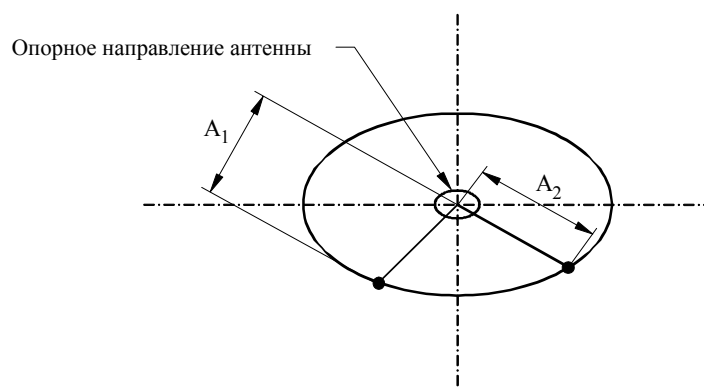
На этом участке $G(\Delta\psi)$ уменьшается от $G_e + 3 - 10 - 20 K_2$ в точке $(C + 4,5) \psi_b$ до $G_e + 3 - 16 - 20 K_2$ в точке $2(C + 4,5) \psi_b$. Верхний предел соответствует точке, где $G(\Delta\psi) = 3$ дБи.

РИСУНОК 4

Схематическое изображение зоны покрытия



а) Опорное направление вне зоны покрытия



б) Опорное направление внутри зоны покрытия

A_1, A_2 : угловое расстояние (градусы) до двух точек на границе зоны покрытия от опорного направления антенны

е) Участок дальнего бокового лепестка: $(C + 4,5) \psi_b D \leq \Delta\psi \leq 90$,

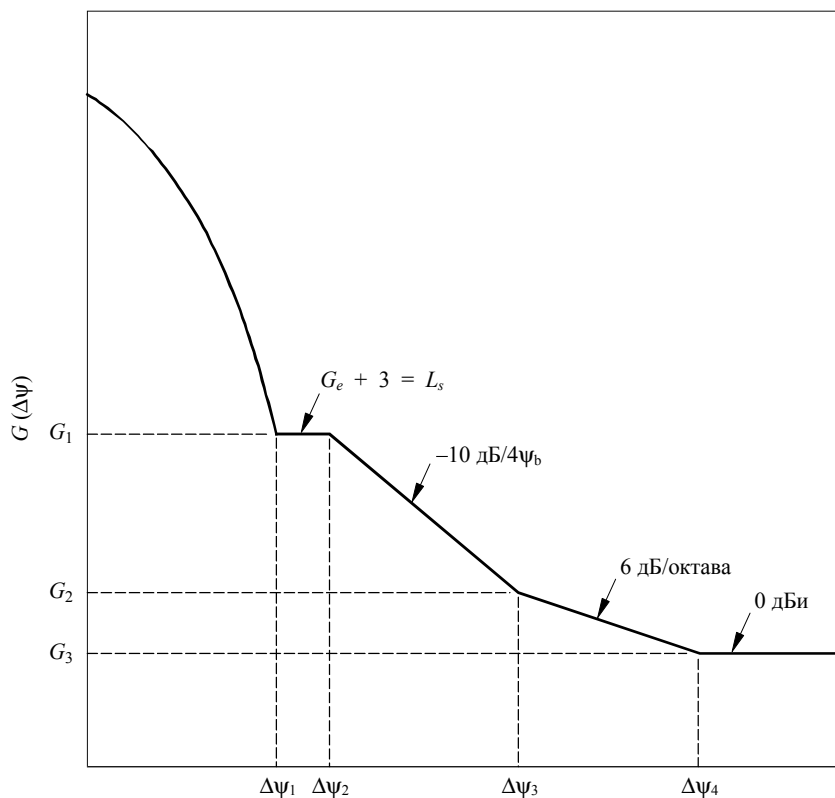
$$\text{где } D = 10^{[(G_e - 27) / 20]}$$

$$G(\Delta\psi) = 3 \quad \text{дБи.} \quad (14)$$

Эти участки изображены на рисунке 5.

РИСУНОК 5

Различные участки предлагаемой модели 2



L_s : уровень первого бокового лепестка

0672-05

Эта модель может быть также распространена на простые круговые лучи, эллиптические лучи и антенны с рефлектором специальной формы. Эти случаи учитываются посредством уточнения величины B в вышеприведенной обобщенной модели:

- для простых круговых и эллиптических лучей B изменяется до величины $B = 3,25$
- для антенн с рефлектором специальной формы изменяются следующие параметры:

$$B = \begin{cases} 1,3 & \text{для } 0,5 \leq S \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,34 S & \text{для } 0,75 < S \leq 2,75 \\ 0,62 & \text{для } S > 2,75, \end{cases}$$

где:

$$S: \quad (\text{угловое перемещение центра зоны покрытия}) / 2\psi_b$$

$$\psi_b = 40 \lambda/D$$

$$K_2 = 1,25.$$

Следует отметить, что значения, предложенные для антенн с рефлектором специальной формы, соответствуют опубликованным данным о конфигурациях простых антенн. Эта новая технология быстро развивается и, следовательно, приведенные величины следует считать экспериментальными. Более того, может потребоваться провести дополнительные исследования для подтверждения достижимости уровней боковых лепестков равномерного участка.

Использование коэффициентов K_1 и K_2

Коэффициенты улучшения K_1 и K_2 не предназначены для описания каких-либо физических процессов в модели, но представляют собой простые константы, предназначенные для корректировки общей формы диаграммы направленности антенны без изменения ее сути.

Повышение величины K_1 от его используемого сегодня значения 1 приведет к увеличению крутизны огибающих, описывающих главный лепесток.

Параметр K_2 может использоваться для коррекции уровней равномерного участка боковых лепестков при помощи выбора значения K_2 , большего чем единица.

2.5 Характеристики огибающей диаграммы направленности луча специальной формы

Характеристики огибающей диаграммы направленности антенны с лучом специальной формы, в первую очередь, зависят от размера антенны. Угловое расстояние $\Delta\psi_L$ от границы зоны покрытия до точки, в которой усиление уменьшается на 22 дБ (относительно усиления на границе), является полезным параметром для планирования орбиты; он связан с размером антенны следующим образом:

$$\Delta\psi_L = C (\lambda/D).$$

Для центральных лучей, форма которых не регулируется или регулируется совсем немного, значение C составляет 64 для пикового уровня бокового лепестка –25 дБ. Однако для сканирующих лучей C обычно лежит в пределах 64–80 в зависимости от степени расширения главного луча.

2.6 Диаграмма направленности для средних значений отношения обзора

В пп. 2.1 и 2.2 раздела *рекомендует* приведены две эталонные диаграммы для спутниковых антенн ФСС, одна – для малых зон покрытия и отношений обзора менее 3,5 и другая – для больших зон покрытия и отношений обзора более 5,0. Однако диаграммы направленности для спутниковых антенн со средними отношениями обзора ($3,5 < \delta < 5,0$) не определены.

Для того чтобы полностью использовать данную Рекомендацию, следует определить диаграмму направленности для антенн со средними отношениями обзора между 3,5 и 5,0. Один из подходов может заключаться в переопределении любой из двух приведенных моделей, с тем чтобы она охватывала и другие скорости. Однако в качестве временного решения предлагается соединить эти две модели с эталонной диаграммой направленности, определенной параметрами, аналогичными тем, что использованы в пп. 2.1 и 2.2 раздела *рекомендует*.

На основании этого подхода была разработана новая эталонная диаграмма направленности, которая применима только к антеннам класса А. Эта диаграмма удовлетворяет существующим требованиям и для малых, и для больших зон покрытия при $\delta = 3,5$ и $\delta = 5,0$, соответственно. Она определяется как функция от коэффициента расширения луча Q_i , который представляет собой

отношение верхних пределов для участков скатов главного луча антенны с лучом специальной формы ($\delta > 1/2$) и острого луча ($\delta = 1/2$). Для промежуточных отношений обзора в диапазоне $3,5 < \delta < 5,0$ величина Q_i интерполируется как:

$$Q_i = Q + \left(\frac{C}{1,7808} - Q \right) \left(\frac{\delta - 3,5}{1,5} \right),$$

где:

$$Q = 10^{\left(\frac{0,000075 (\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02]^2} \right)}$$

$$C = \sqrt{1 + \frac{22}{B}} - 1$$

$$B = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda - (\delta - 1,25) 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}.$$

Эталонная диаграмма направленности для промежуточных отношений обзора ($3,5 < \delta < 5,0$) определяется как:

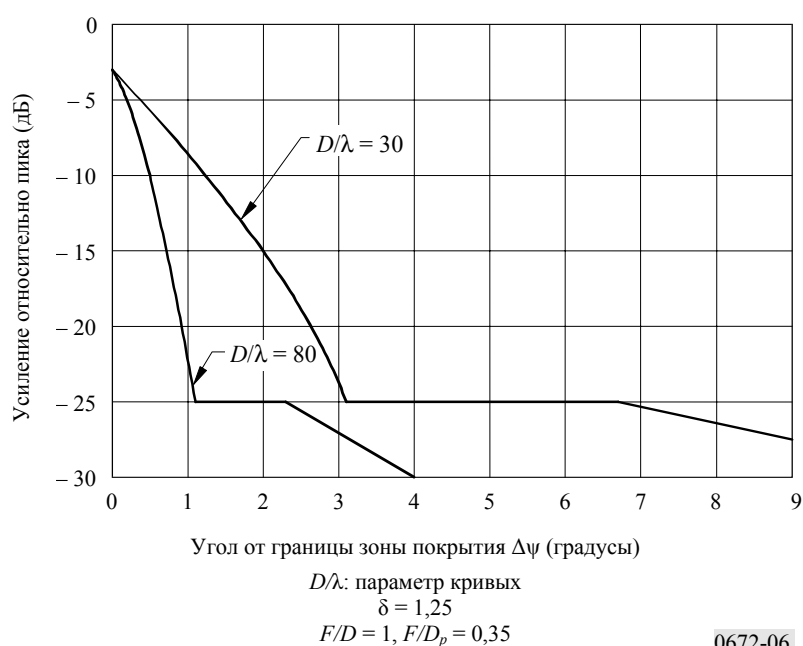
$$G_{\text{дби}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0,256 - 13,065 \left(\frac{\Delta\psi}{Q_i \psi_0} + 0,5 \right)^2 & \text{для } 0 \leq \frac{\Delta\psi}{\psi_0} \leq 0,8904 Q_i \\ G_{ep} - 25 & \text{для } 0,8904 Q_i < \frac{\Delta\psi}{\psi_0} \leq 1,9244 Q_i \\ G_{ep} - 25 + 20 \log \left(\frac{1,9244 Q_i}{\Delta\psi} \right) & \text{для } 1,9244 Q_i < \frac{\Delta\psi}{\psi_0} \leq \frac{18}{\psi_0}. \end{cases}$$

Переменные в вышеприведенных уравнениях были определены в пп. 2.1 и 2.2 раздела *рекомендует*.

На рисунке 6 показан пример новой диаграммы направленности для $\delta = 4,25$ и для двух различных значений D/λ .

РИСУНОК 6

Предлагаемые эталонные диаграммы для промежуточных скоростей сканирования
($3,5 < \delta < 5,0$)



0672-06

Для подтверждения правомочности модели для участка с промежуточным значением отношения обзора необходимы дальнейшие исследования.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

1 Определение огибающих зоны покрытия и контуров усиления вокруг зоны покрытия

1.1 Определение огибающих зоны покрытия

Зона покрытия может быть определена множеством географических точек, видимых со спутника. Количество точек, необходимых для правильного определения зоны покрытия, зависит от сложности конфигурации этой зоны. Эти точки могут быть заменены расчетными значениями допусков точности наведения антенны и изменениями, зависящими от дуги обслуживания. Многоугольник образуется при помощи соединения соседних точек. Контур зоны покрытия строится вокруг этого многоугольника с учетом следующих двух критериев:

- радиус изгиба зоны покрытия должен быть $\geq \psi_b$;
- расстояние между сегментами зоны покрытия, расположенными на прямой линии, должно быть $> 2\psi_b$ (см. рисунок 7).

Если многоугольник зоны покрытия можно вписать в круг радиусом ψ_b , то этот круг представляет собой контур зоны покрытия. Центр этого круга является центром круга с минимальным радиусом, который будет только-только охватывать контур зоны покрытия. Если многоугольник зоны покрытия не может быть вписан в круг радиусом ψ_b , то выполняется следующая процедура:

Шаг 1: Для каждого внутреннего угла многоугольника $< 180^\circ$ построить круг радиусом ψ_b , центр которого расположен на расстоянии (ψ_b) от внутренней биссектрисы угла. Если все углы меньше 180° (нет вогнутых участков), шаги 2 и 4 можно исключить.

Шаг 2: а) Для каждого внутреннего угла $> 180^\circ$ построить круг радиусом ψ_b , который касается линий, соединяющих точки зоны покрытия, центр которого должен находиться на внешней биссектрисе угла.

- б) Если круг не расположен полностью снаружи многоугольника зоны покрытия, то построить круг радиусом ψ_b , который касается многоугольника зоны покрытия в двух его ближайших точках и полностью лежит за пределами многоугольника покрытия.

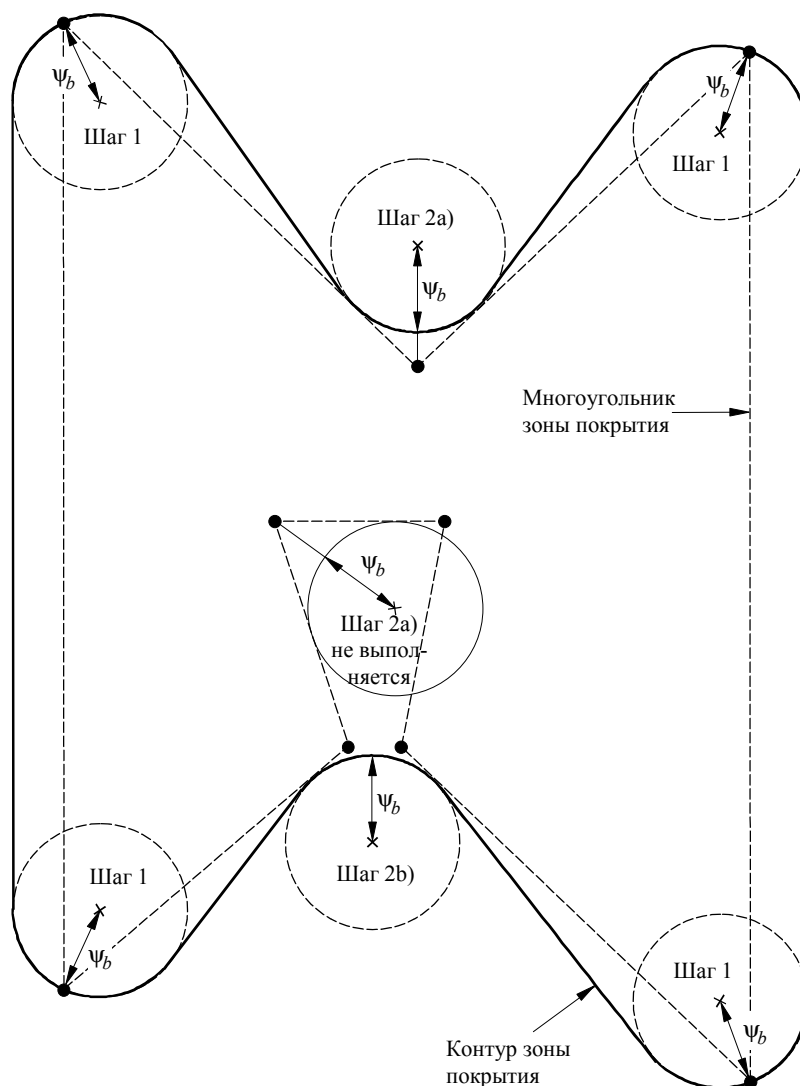
Шаг 3: Построить прямолинейные сегменты, касательные к участкам кругов, построенных в шагах 1 и 2, которые расположены наиболее близко к многоугольнику покрытия, но лежат за его пределами.

Шаг 4: Если внутреннее расстояние между любыми двумя прямолинейными сегментами, построенными в шаге 3, меньше $2\psi_b$, то на многоугольнике зоны покрытия должны быть выбраны такие дополнительные проверочные точки, для которых повторное выполнение шагов 1–3 приведет к тому, что внутреннее расстояние между двумя прямолинейными сегментами будет равно $2\psi_b$.

Пример такого способа построения показан на рисунке 7.

РИСУНОК 7

Конструкция контура зоны покрытия



0672-07

1.2 Контур усиления вокруг зоны покрытия

Как уже отмечено в Приложении 1, трудности возникают, когда контур зоны покрытия имеет вогнутые участки. Использование величины $\Delta\psi$, измеренной в направлении, нормальном к контуру зоны покрытия, приведет к пересечениям нормалей, а также к возможному пересечению с контуром зоны покрытия.

Для того чтобы обойти эту проблему, а также и некоторые другие, предлагается применять двухшаговую процедуру. Если контур зоны покрытия не имеет вогнутых участков, то шаг 2 не выполняется.

Шаг 1: Для каждого значения $\Delta\psi$ построить такой контур, для которого угловое расстояние между этим контуром и контуром зоны покрытия никогда не будет меньше чем $\Delta\psi$.

Это может быть выполнено при помощи создания дуг размером $\Delta\psi$ из точек на контуре зоны покрытия. Внешняя огибающая этих дуг и явится результирующим контуром усиления.

Когда граница зоны покрытия имеет прямолинейные или вогнутые участки, это условие выполняется при помощи измерения нормали к контуру зоны покрытия. В этом случае не будет никаких пересечений нормалей.

За счет выполнения процесса, описанного в шаге 1, исключаются проблемы с построением в зонах с вогнутыми участками. Однако, если смотреть на вещи реально, некоторые проблемные зоны сохраняются. Как отмечено в Приложении 1, регулировка боковых лепестков в зонах с вогнутыми границами с увеличением степени вогнутости может усложняться, кросс-секция диаграммы направленности расширяется, и при использовании для построения огибающей процесса, описанного в шаге 1, могут появляться участки с нарушением непрерывности.

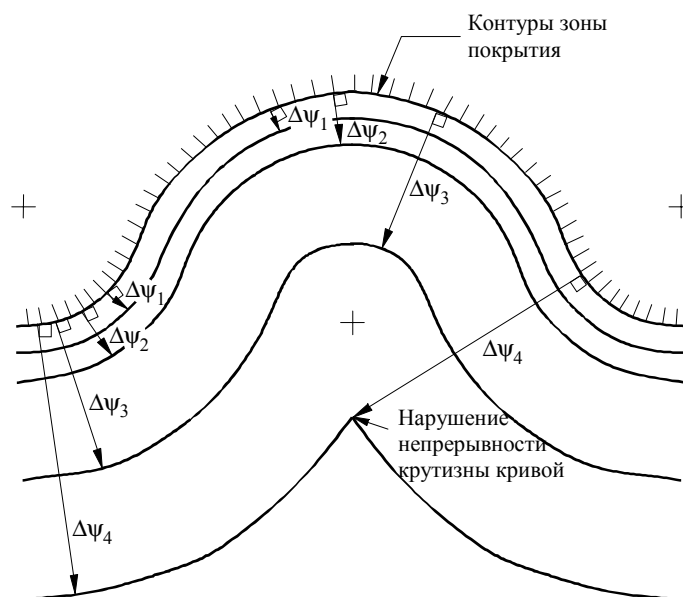
Представляется разумным постулировать, что контуры усиления должны иметь радиусы кривизны, которые ни при каких обстоятельствах не могут быть меньше $(\psi_b + \Delta\psi)$ ни изнутри, ни снаружи контура усиления. Это условие выполняется в ходе реализации процесса, описанного в шаге 1, там, где зона покрытия прямолинейная или выпуклая, но не для вогнутых участков контура зоны покрытия. Точки фокуса для измерения радиусов кривизны там, где зона покрытия прямолинейная или выпуклая, лежат за пределами контура усиления. Для вогнутых участков применение шага 1 может привести к тому, что радиус кривизны, видимый из-за пределов контура усиления, будет меньше величины $(\psi_b + \Delta\psi)$.

На рисунке 8 показан пример выполнения процесса, описанного в шаге 1 для вогнутого участка контура зоны покрытия. Полукруглые сегменты используются для удобства построения контура зоны покрытия. Отметим нарушение непрерывности крутизны кривой.

Для того чтобы учесть вышеназванные проблемы и исключить появление точек, в которых отсутствует непрерывность характеристики, там, где наблюдается вогнутость, предлагается выполнить процесс, описанный в шаге 2.

РИСУНОК 8

Огибающие усиления для шага 1 в контуре вогнутой зоны покрытия



0672-08

Шаг 2: Тот участок контура усиления, определенного в ходе выполнения шага 1, где радиус кривизны, видимый снаружи этого контура, не превышает $(\psi_b + \Delta\psi)$, должен быть замещен контуром с радиусом, равным $(\psi_b + \Delta\psi)$.

На рисунке 9 показан пример применения процесса, описанного в шаге 2, к вогнутому участку, изображенному на рисунке 8. Для иллюстрации показаны также контуры относительного усиления, в предположении, что ψ_b имеет указанное на рисунке значение, а $B = 3$ дБ.

Этот способ построения не имеет неоднозначностей и позволяет построить контуры усиления для вогнутых участков, существование которых вполне разумно ожидать. Однако трудности возникают при разработке программного обеспечения для реализации этого метода, и, кроме того, этот метод не полностью применим для малых зон покрытия. Для уточнения этого метода работа будет продолжена.

Для определения значений усиления в конкретных точках без построения контуров используется следующая процедура.

Значения усиления в точках, которые расположены на некотором удалении от вогнутого участка, могут быть найдены при помощи определения угла $\Delta\psi$, измеренного в направлении, нормальном к контуру зоны покрытия, и вычисления коэффициента усиления с использованием соответствующего уравнения: (10), (11), (12), (13) или (14). Усиление в точке на вогнутом участке можно определить следующим образом.

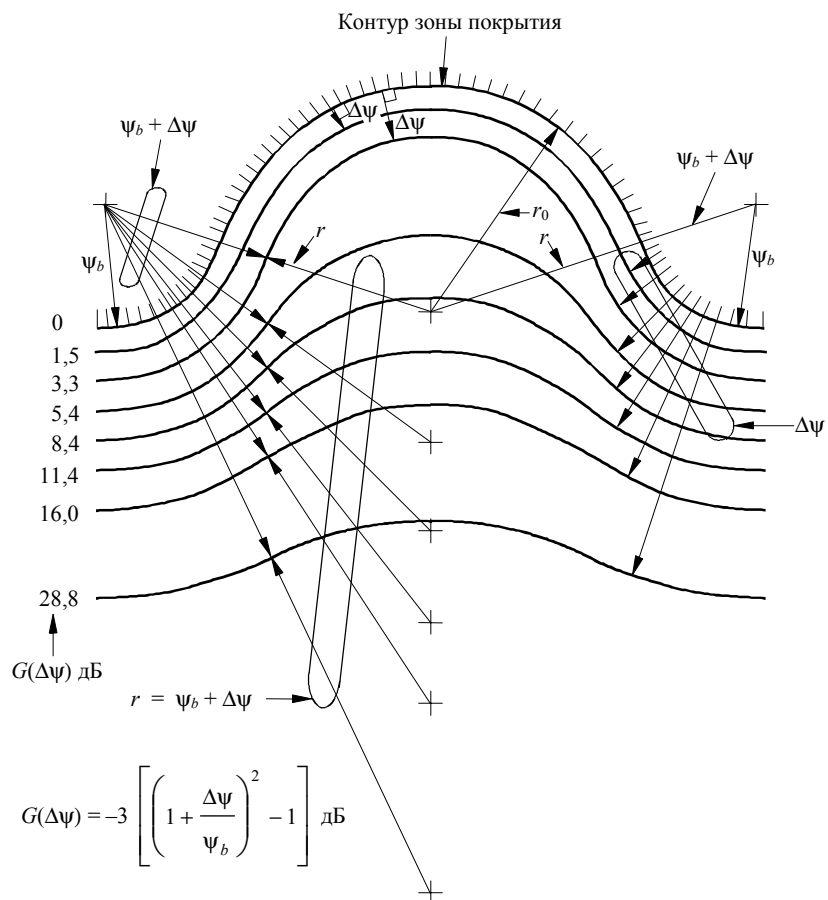
Сначала применяется простая проверка. Через вогнутый участок зоны покрытия начертим прямую линию так, чтобы она касалась границы зоны покрытия в двух точках, но не пересекала бы ее. Из точек касания проведем нормали к контуру зоны покрытия. Если рассматриваемая точка лежит вне зоны покрытия между двумя нормальными, то из-за вогнутости зоны покрытия избирательность антенны в этой точке может измениться. Тогда необходимо выполнить следующее:

Определить наименьший угол $\Delta\psi$ между рассматриваемой точкой и контуром зоны покрытия. Построить круг с радиусом $(\psi_b + \Delta\psi)$, на окружности которого лежит эта точка. Этот круг следует строить таким образом, чтобы угловое расстояние до этой точки из любой точки контура зоны покрытия было максимальным, когда круг полностью расположен вне зоны покрытия; назовем это максимальным угловым расстоянием $\Delta\psi'$. Величина $\Delta\psi'$ может быть любым углом от 0 до $\Delta\psi$; она не может превышать $\Delta\psi$, но может быть ему равна. Избирательность антенны для рассматриваемой точки теперь получается из соответствующего уравнения (10), (11), (12), (13) или (14), в которое вместо $\Delta\psi$ подставлено $\Delta\psi'$.

В Бюро радиосвязи разработаны две компьютерные программы для построения контуров зоны покрытия с использованием вышеописанного метода.

РИСУНОК 9

Построение контуров усиления в контуре вогнутой зоны покрытия
шаг 1 + шаг 2



$$r = \psi_b + \Delta\psi$$

$$r_0 = 1,9 \psi_b$$

r_0 : радиус кривизны вогнутости контура зоны покрытия

r : радиус кривизны

0672-09