

УДК 621.396.67

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-98-107

## Анализ способов снижения влияния боковых излучений антенны станции спутниковой связи на качество связи

С. В. Зинкин, кандидат технических наук, доцент, Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Рассмотрены способы снижения бокового излучения антенны, которые преимущественно относятся к угловым направлениям, непосредственно примыкающим к направлению главного излучения антенны станции спутниковой связи. Проанализированы способы подавления излучения антенны по детерминированным направлениям: подавление узкополосных (широкополосных) сигналов, асимметричное уменьшение бокового излучения антенны. Эффект подавления узкополосных сигналов для представленной схемы определяется тем, что компенсационный канал имеет дополнительный отрезок прохождения электромагнитной волны, равный примерно  $2F$ , где  $F$  – фокусное расстояние параболоидного рефлектора. Поэтому эта схема позволяет эффективно подавить помеху только в том случае, если ее относительная полоса частот много меньше  $\lambda/2F$ . Схема широкополосного подавления сигнала подразумевает резкое увеличение полосы частот, при которой эффективно срабатывает схема компенсации, и в результате выравниваются длины путей основного и компенсационного каналов. Для асимметричного уменьшения бокового излучения антенны рассмотрен способ целенаправленной деформации профиля краевой области рефлектора, а именно схема параболического рефлектора с двумя дополнительными асимметричными рефлекторами, размещенными сверху и снизу основного отражателя. Наиболее приемлемые с практической точки зрения результаты будут соответствовать только той ситуации, когда выполняются два условия: 1) области деформации рефлектора, необходимые для достижения планируемого результата, полностью соответствуют конфигурациям из набора щитовых конструкций, образующих собственно отражающую поверхность; 2) деформация профилей подчиняется линейному закону. Сочетание способов уменьшения ближнего бокового излучения антенны станции спутниковой связи на этапе их проектирования позволит улучшить качество связи.

**Ключевые слова:** способ снижения, боковое излучение антенны, станция спутниковой связи.

### Введение

Снизить влияние боковых излучений антенны станции спутниковой связи на качество связи можно за счет проектирования антенн, настройки оборудования и использования экранирующих конструкций. Эти методы направлены на минимизацию излучения по угловым направлениям, примыкающим к направлению главного излучения антенны.

#### Этап проектирование антенн

1. Устранение влияния аксиального затенения. Рост ближних боковых лепестков из-за затенения можно компенсировать с помощью дополнительного излучателя, фазовый центр которого в нужной плоскости совпадает с фазовым центром антенны. Компенсация теневого излучения осуществляется только в пучке областей, близких к плоскости, перпендикулярной прямой, соединяющей центры основной и вспомогательной антенн.

2. Широкоугольная компенсация бокового излучения. Для этого используются две вспомогательные антенны, расположенные параллельно плоскости подавления. Оптимизируется форма раскрыва вспомогательных излучателей, например, они выполняются в виде прямоугольников длиной 0,290...0,300 и высотой 0,110...0,120 от радиуса раскрыва основной антенны, а распределение в раскрывах вспомогательных антенн косинусоидальное.

3. Пространственное размещение элементов в антенной решетке. Например, используются пространственные антенные системы с двойной гексагональной структурой, волнообразные, гребенчатые. Наи-

более простая форма – изгиб прямоугольного или круглого раскрыва, при этом уровень бокового излучения снижается в плоскости изгиба.

#### Этап настройки оборудования

1. Затенение части раскрыва антенны дополнительными отражателями для подавления излучения в помехоопасном направлении. Отражатели возбуждаются полем облучателя, их размеры и местоположение подбираются опытным путем.

2. Создание зон с пониженной чувствительностью в области боковых лепестков либо методом минимизирующих множителей, либо изменением углового положения нулей диаграммы направленности фазовым методом.

#### Этап использования экранирующих конструкций

1. Установка цилиндрического экрана (бленды) по контуру антенны, что позволяет существенно (на 4...11 дБ) снижать дальнее боковое излучение и излучение в заднем полупространстве. Длину экрана обычно подбирают так, чтобы уровень возбуждения его кромки был близок к нулю.

2. Использование поглощающих и метаматериальных экранов для уменьшения уровня излучения, принимаемого из областей пространства, и достигают подавления сигналов на 4...16 дБ. Однако размеры экранов должны быть не слишком большими, например, 0,4...0,7 м, то есть около 2,4...2,6 длины волны рабочего диапазона.

В рамках настоящей статьи рассмотрены способы снижения бокового излучения антенны, которые преимущественно относятся к угловым направлениям, непосредственно примыкающим к направлению

главного излучения антенны для земной станции спутниковой связи. Актуальность этой проблематики не вызывает сомнений, так как именно поведение диаграммной направленности (ДН) антенны в этой области самым существенным образом определяет электромагнитная совместимость различных систем спутниковой связи.

Рассмотрим способы подавления излучения антенны по детерминированным направлениям:

- подавление узкополосных (широкополосных) сигналов;
- асимметричное уменьшение бокового излучения антенны.

**Цель** статьи – теоретическое исследование способов снижения ближнего бокового излучения антенн для земной станции спутниковой связи.

**Научная новизна** – сочетание способов уменьшения ближнего бокового излучения антенны земной станции спутниковой связи на этапе их проектирования: применение схемы подавления узкополосных (широкополосных) сигналов, при диаметрах вспомогательных рефлекторов  $D_b = 0,261D \dots 0,297D$  и асимметричное уменьшение бокового излучения антенны путем целенаправленной деформации профиля краевой области рефлектора в пределах  $D = 18X \dots 20X$ ,  $F/D = 0,46 \dots 0,48$ .

#### Подавление узкополосных (широкополосных) сигналов

Схема узкополосной компенсации показана на рисунке 1.

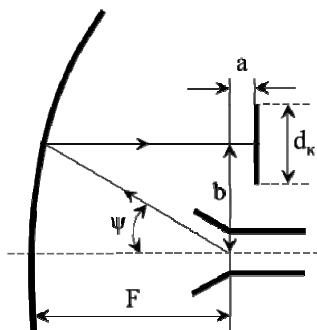


Рис. 1. Схема узкополосной компенсации

Fig. 1. Narrowband compensation scheme

В раскрытии антенны установлен отражающий диск диаметром  $d_k$ , смещенный вдоль фокальной оси на расстояние  $a$  и перпендикулярно ей на расстояние  $b$ . Принцип действия компенсатора:

• возбужденный отраженным от зеркала антенны полем диск переизлучает его, действуя примерно также, как обычный облучатель, вынесенный из фокуса;

• расстояние  $b$  выбирается таким, чтобы максимум диаграммной направленности (ДН) компенсационного диска соответствовал угловому направлению подавления бокового излучения антенны  $\Theta_{\text{пом}}$ ;

• диаметр компенсационного диска  $d_k$  выбирается таким, чтобы усиление луча, образованного введением компенсационного диска, соответствовало усилию чистой антенны в направлении  $\Theta_{\text{пом}}$ ;

- расстояние  $a$  выбирается таким, чтобы фазовые соотношения ДН чистой антенны и ДН компенсационного диска разнились на  $180^\circ$  в направлении  $\Theta_{\text{пом}}$  [1–3].

Указанные параметры определяются следующим образом.

1. Расстояние смещения  $b$  определяется как

$$b = \frac{-F\Theta_{\text{пом}}}{v}, \quad (1)$$

где  $v$  – коэффициент девиации луча;  $F$  – фокусное расстояние;  $\Theta_{\text{пом}}$  – угловое направление подавления бокового излучения антенны.

2. Расстояние  $a$  можно определить экспериментальным путем, передвигая диск по направлению к зеркалу или от зеркала в пределах  $\pm\lambda/4$ .

3. Более сложная ситуация возникает при определении диаметра компенсационного диска, так как линейное увеличение размера диска не приводит к эквивалентному росту интенсивности компенсационного луча.

Интенсивность компенсационного луча определяется двумя факторами: мощностью, перехватываемой диском, и характером распределения вторичного поля  $f(r)$  в раскрытии антенны.

Мощность, перехватываемая и переизлучаемая диском  $P_d$  по отношению к полной мощности в раскрытии антенны  $P_\Sigma$ , определяется соотношением

$$\eta = \frac{P_d}{P_\Sigma} = 0,5 \left( \frac{d_k}{D} \right)^2 \left[ \int_0^1 r f(r) dr \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $P_d$  – перехватываемая и переизлучаемая мощность компенсационного диска;  $P_\Sigma$  – полной мощности в раскрытии антенны;  $d_k$  – диаметр компенсационного диска;  $D$  – диаметр антенны;  $f(r)$  – функция вторичного поля в раскрытии антенны;  $r$  – радиус антенны  $\lambda$ .

Для обычно употребляемых на практике распределений  $f(r)$  величина  $\eta$  составляет

$$\eta \approx 1,8 \dots 2,8 \left( \frac{d_k}{D} \right)^2.$$

Диаграмма направленности поля  $F(\psi)$ , переизлученного компенсационным диском, имеет вид

$$F(\psi) = \Lambda_1 \left( \pi \left( \frac{d_k}{\lambda} \right) \sin \psi \right), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны, поэтому апертурный коэффициент использования

$$k_a = 2 \left[ \tan^2 \left( \frac{\psi}{2} \right) \right]^{-1} \left[ \int_0^{\psi_0} \tan \left( \frac{\psi}{2} \right) \Lambda_1 \left( \pi \left( \frac{d_k}{\lambda} \right) \sin \psi \right) d\psi \right]^2 \times \\ \times \left[ \int_0^{\psi_0} \sin \psi \Lambda_1 \left( \pi \left( \frac{d_k}{\lambda} \right) \sin \psi \right) d\psi \right]^{-1}. \quad (4)$$

На рисунке 2 приведены графики зависимости апертурного коэффициента  $k_a$  от электрического размера компенсатора (штриховая кривая для длиннофокусной антенны  $2\psi_0 = 120^\circ$ , непрерывная кривая – для короткофокусной  $2\psi_0 = 60^\circ$ ).

На рисунке 3 для этих условий приведена зависимость функции  $k_a \left( \frac{d_k}{\lambda} \right)^2$  от  $\left( \frac{d_k}{\lambda} \right)$ , позволяющая определить оптимальные размеры компенсатора, то есть такие его размеры, при которых интенсивность компенсационного поля максимальна [4].

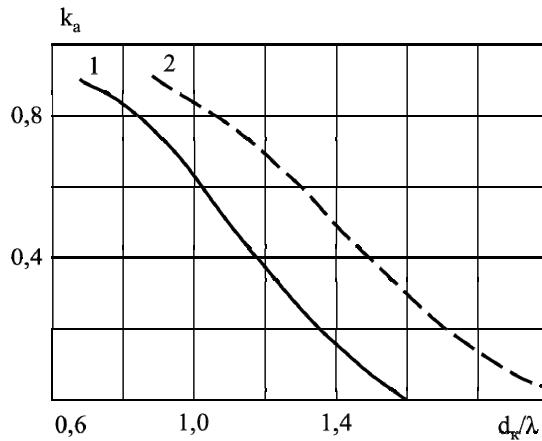


Рис. 2. Графики зависимости апертурного коэффициента  $k_a$  от электрического размера компенсатора (кривая 1 –  $2\psi_0 = 82,2^\circ$ , кривая 2 –  $2\psi_0 = 60^\circ$ )

Fig. 2. Graphs of the dependence of the aperture coefficient  $k_a$  of the spacecraft on the electrical size of the compensator (the curve 1 -  $2\psi_0 = 82,2^\circ$ , the curve 2 -  $2\psi_0 = 60^\circ$ )

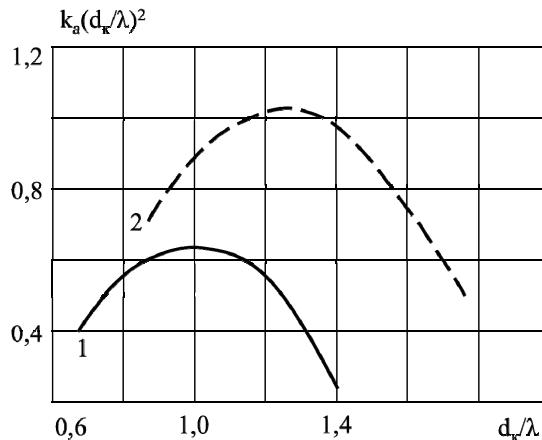


Рис. 3. Зависимость функции  $k_a \left( \frac{d_k}{\lambda} \right)^2$  от  $\left( \frac{d_k}{\lambda} \right)$  для определения оптимальных размеров компенсатора (кривая 1 –  $2\psi_0 = 82,2^\circ$ , кривая 2 –  $2\psi_0 = 60^\circ$ )

Fig. 3. The dependence of the function  $k_a \left( \frac{d_k}{\lambda} \right)^2$  on  $\left( \frac{d_k}{\lambda} \right)$  to determine the optimal size of the compensator (the curve 1 -  $2\psi_0 = 82,2^\circ$ , the curve 2 -  $2\psi_0 = 60^\circ$ )

На рисунке 4 приведены экспериментальные ДН чистой антенны (непрерывная линия) и антенны с компенсатором (штриховая линия). Основные параметры антенны:  $D = 49\lambda$ ,  $2\psi_0 = 165^\circ$ , облучатель – открытый конец волновода диаметром  $0,77\lambda$ .

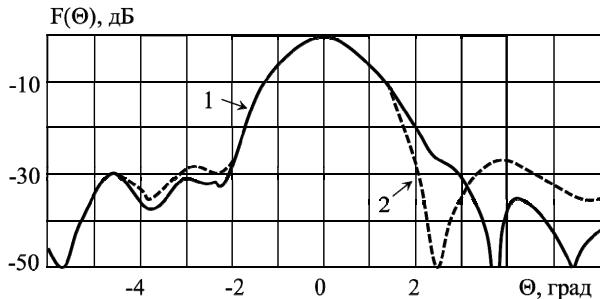


Рис. 4. Экспериментальные диаграммные направленности чистой антенны (линия 1 –  $D = 49\lambda$ ,  $2\psi_0 = 165^\circ$ ) и антенны с компенсатором (линия 2 –  $d_k = 0,98\lambda$ ,  $b = 1,1\lambda$ ,  $a = 0,32\lambda$ )

Fig. 4. Experimental diagrammatic directions of a pure antenna (line 1 -  $D = 49\lambda$ ,  $2\psi_0 = 165^\circ$ ) and an antenna with a compensator (line 2 -  $d_k = 0,98\lambda$ ,  $b = 1,1\lambda$ ,  $a = 0,32\lambda$ )

Основные параметры компенсатора:  $d_k = 0,98\lambda$ ,  $b = 1,1\lambda$  и  $a = 0,32\lambda$ . Измерения проводились в плоскости  $H$ . Как видно из рисунка, в секторе углов, примыкающих к направлению  $\Theta = 2,5^\circ$ , наблюдается интенсивное подавление бокового излучения (примерно на 20 дБ), причем искажения ДН в других боковых направлениях невелики.

В заключение отметим, что узкополосность эффекта подавления для данной схемы определяется тем, что компенсационный канал имеет дополнительный отрезок прохождения электромагнитной волны, примерно равный  $2F$ , где  $F$  – фокусное расстояние параболоидного рефлектора. Поэтому эта схема позволяет эффективно подавить помеху только в том случае, если ее относительная полоса частот много меньше  $\lambda/2F$ .

Рассмотрим схему широкополосного подавления сигнала. Общая идея резкого увеличения полосы частот, при которой эффективно срабатывает схема компенсации, заключается в выравнивании длин путей основного и компенсационного каналов [5–7].

Два основных варианта схемы компенсации приведены на рисунке 5, а, б (варианты соответствуют этим же буквам на рис. 6–8).

Отметим принципиальные особенности рассматриваемых схем:

- дополнительные (вспомогательные) рефлекторы ориентированы относительно облучателя таким образом, чтобы их основное излучение было ориентировано по направлению подавления  $\Theta_{\text{под}}$  бокового излучения основного отражателя;

- габариты вспомогательных отражателей выбраны таким образом, чтобы уменьшить излучение основного рефлектора по направлению  $\Theta_{\text{под}}$  в  $\tau$  раз, дБ.

Несколько слов, поясняющих последнее условие. Основанием для выбора неполной глубины подавления является следующее обстоятельство [8, 9]. Ши-

рина основного лепестка вспомогательного рефлектора во много раз (примерно в  $2(D/D_B)$  раза) больше ширины бокового лепестка основного отражателя. Следовательно, получив полную компенсацию строго по направлению  $\Theta_{\text{под}}$ , можно ожидать резкого роста бокового излучения по направлениям, незначительно отстающим от указанного направления. Поэтому ослабление бокового излучения обычно выбирается равным примерно 10 дБ.

На рисунках 6 и 7 приведены результаты расчета, проведенного токовым методом и подтверждающего эффективность схемы компенсации, приведенной на рисунке 6, *a*. При расчете диаметр основного рефлектора принимался  $D = 50\lambda$ .

Для варианта, соответствующего рисунку 6, соотношение фокусного расстояния и диаметра основного рефлектора составляет  $F/D = 0,5$ , уровень облучения края рефлектора относительно центра минус 10 дБ. Как видно из рисунка 6, *a*, направление, соответствующее максимуму первого бокового лепестка, составляет  $2,15^\circ$ . Принимая  $\Theta_{\text{под}} = 2,15^\circ$  и  $\tau = 10$  дБ, были определены диаметры вспомогательных рефлекторов  $D_B = 0,297D$ . Результирующая ДН рассматриваемой системы приведена на рисун-

ке 6, *b*. Из сравнения обеих ДН видно, что уровень первого бокового лепестка снизился с минус 25,9 до минус 34,8 дБ, то есть уровень подавления составил примерно 9 дБ [10, 11].

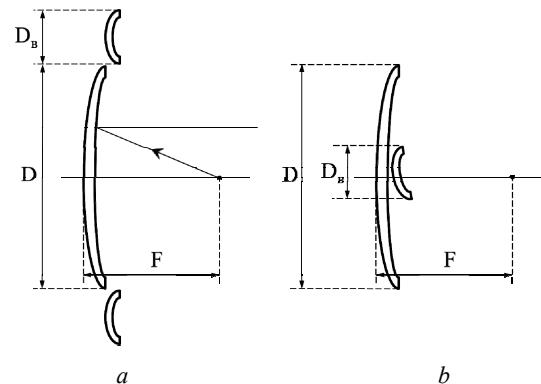
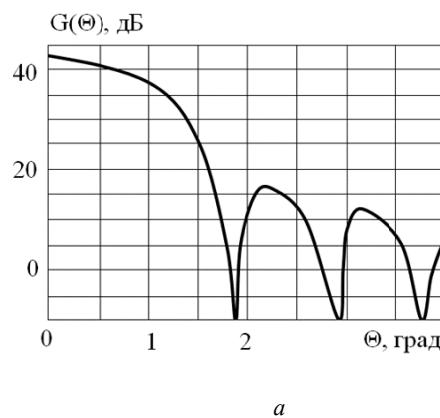
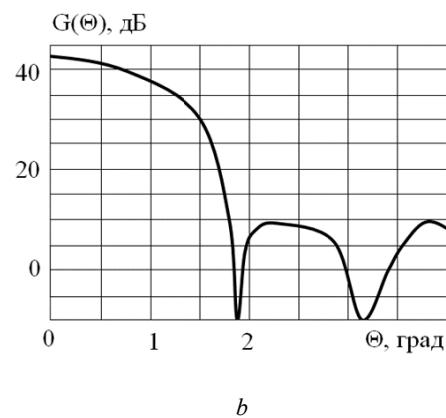


Рис. 5. Варианты схемы компенсации: *a* – дополнительные рефлекторы установлены по краям основного отражателя; *b* – дополнительный рефлектор установлен в центральной части основного отражателя

Fig. 5. Compensation scheme options: *a* – additional reflectors are installed at the edges of the main reflector; *b* – additional reflector is installed in the central part of the main reflector



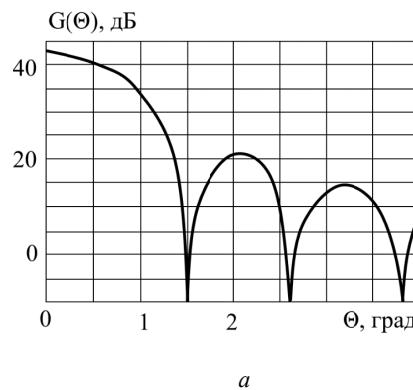
*a*



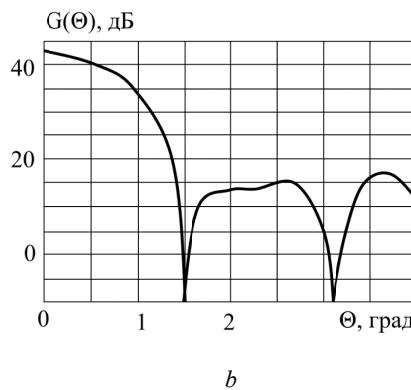
*b*

Рис. 6. Результаты расчета, проведенного токовым методом при  $F/D = 0,5$  ( $\Theta = 0 \dots 4$  град,  $D = 50\lambda$ )

Fig. 6. The results of the calculation performed by the current method at  $F/D = 0,5$  ( $\Theta = 0 \dots 4$  degree,  $D = 50\lambda$ )



*a*



*b*

Рис. 7. Результаты расчета, проведенного токовым методом при  $F/D = 1,0$  ( $\Theta_{\text{под}} = 2,15^\circ$ ,  $\tau = 10$  дБ,  $D_B = 0,297D$ ,  $\Theta = 0 \dots 4$  град)

Fig. 7. The results of the calculation performed by the current method at  $F/D = 1,0$  ( $\Theta_{\text{под}} = 2,15^\circ$ ,  $\tau = 10$  dB,  $D_B = 0,297D$ ,  $\Theta = 0 \dots 4$  degree)

Для варианта, соответствующего рисунку 7, соотношение фокусного расстояния и диаметра основного рефлектора составляет  $(F/D) = 1,0$ , уровень облучения края рефлектора относительно центра минус 6 дБ. Как видно из рисунка 7, *a*, направление, соответствующее максимуму первого бокового лепестка, составляет  $2,0^\circ$ . Принимая  $\Theta_{\text{под}} = 2,0^\circ$  и  $\tau = 10$  дБ, были определены диаметры вспомогательных рефлекторов

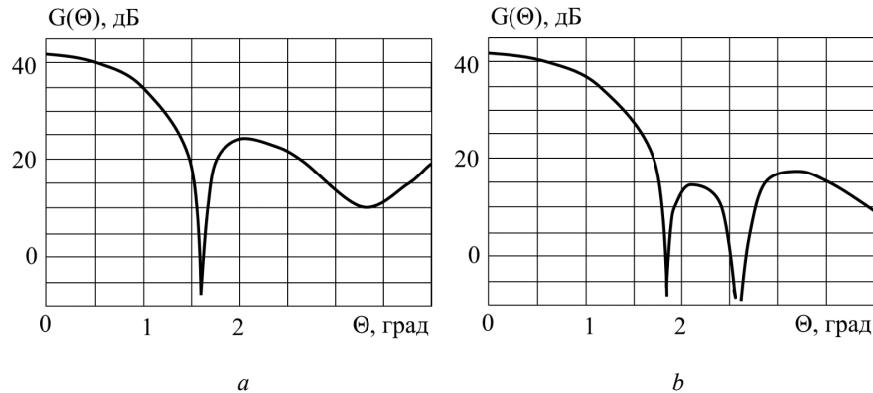


Рис. 8. Диаграммные направленности, подтверждающие эффективность применения схемы компенсации ( $\Theta_{\text{под}} = 2,0^\circ$ ,  $\tau = 10$  дБ,  $D_{\text{в}} = 0,261D$ )

Fig. 8. Diagrammatic directions confirming the effectiveness of the compensation scheme ( $\Theta_{\text{под}} = 2,0^\circ$ ,  $\tau = 10$  дБ,  $D_{\text{в}} = 0,261D$ )

Здесь диаметр основного рефлектора составил 50 длин волн, а фокусное расстояние – 20 длин волн. На рисунке 8, *a* приведена ДН указанного раскрыва с блокированной центральной частью радиуса  $5,05\lambda$ . Для направления  $0 = 2,1^\circ$  уровень излучения составил 23,0 дБи. На рисунке 8, *b* приведена ДН указанного раскрыва с аксиально расположенным компенсационным зеркалом, максимум которой ориентирован по направлению  $\Theta_{\text{под}} = 2,1^\circ$ . Как видно из приведенного рисунка, по направлению  $\Theta_{\text{под}} = 2,1^\circ$  уровень излучения составил 14,0 дБи, то есть подавление излучения 10,0 дБ.

Приведем вывод приближенных соотношений, позволяющих оценить размер компенсационных рефлекторов. Ограничимся случаем аксиального одиночного вспомогательного рефлектора [14].

Итак, постановка задачи выглядит следующим образом.

1. Заданы диаметр основного рефлектора  $D$  и его коэффициент использования поверхности  $K_{\text{и.п.}}$ .

2. Требуется осуществить подавление излучения в направлении максимума для  $n$ -го бокового лепестка, имеющего уровень излучения  $\sigma_n$  относительно излучения в главном направлении [15].

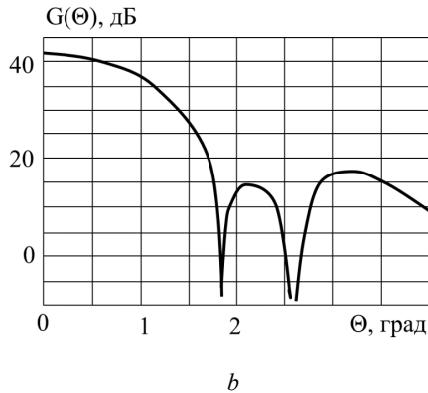
Плотность мощности излучения основного рефлектора в направлении  $n$ -го бокового лепестка

$$P_0 = PG_0 = \frac{\left[ P \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 K_{\text{и.п.}} \sigma_n \right]}{4\pi R^2}, \quad (5)$$

где  $P$  – полная мощность излучения.

$D_{\text{в}} = 0,261D$ . Результирующая ДН рассматриваемой системы приведена на рисунке 7, *b*. Из сравнения обеих ДН видно, что уровень первого бокового лепестка снизился с минус 21,25 до минус 31,12 дБ, то есть уровень подавления составил примерно 10 дБ [12, 13].

На рисунке 8 приведены ДН, подтверждающие эффективность применения схемы компенсации, представленной на рисунке 5, *b*.



Плотность мощности излучения вспомогательного рефлектора в главном направлении, ориентированном по направлению излучения  $n$ -го бокового лепестка основного рефлектора,

$$PP_{\text{в}} = \frac{P_{\text{в}} G_{\text{в}}}{4\pi R^2}, \quad (6)$$

где  $G_{\text{в}}$  – усиление вспомогательного рефлектора;  $P_{\text{в}}$  – мощность, перехватываемая вспомогательным рефлектором,

$$P_{\text{в}} = P_{\text{в}} = \frac{PD_{\text{в}}^2}{D^2 K_{\text{и.п.}}}. \quad (7)$$

Приравнивая (5) и (6), получаем формулу, определяющую диаметр компенсационного зеркала:

$$D_{\text{в}} = D \left( K_{\text{и.п.}} \right)^{0,5} \sigma_n^{0,25}. \quad (8)$$

#### Асимметричное уменьшение бокового излучения антенны

Рассмотрим еще одну возможность снижения бокового излучения антенны, при которой угловой сектор снижения уровня бокового излучения асимметричен относительно направления главного излучения антенны [16]. Такая ситуация возникает в двух случаях:

1) при асимметричном расположении на геостационарной орбите относительно «своего» ретранслятора ретранслятора «чужой» системы, который является основным источником мешающего воздействия или который может быть поражен боковым излучением антенны для ЗССС;

2) для нижнего сектора боковых лепестков ДН антенны для ЗССС в угломестной плоскости, которые при малых углах ориентации максимума ДН в угломестной плоскости ориентированы на землю и во многом определяют шумовую температуру антенны для ЗССС.

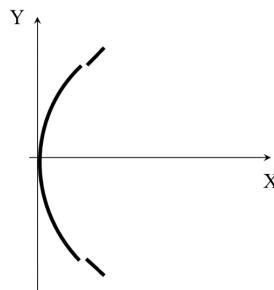


Рис. 9. Схема параболического рефлектора с двумя дополнительными асимметричными рефлекторами

Fig. 9. The scheme of a parabolic reflector with two additional asymmetric reflectors

Техническая реализация такой проблемы возможна различными способами. Наиболее эффективным способом можно считать целенаправленную деформацию профиля краевой области рефлектора.

Способ асимметричного снижения уровня бокового излучения отнесен к антенне в виде параболического цилиндра, то есть анализируется двумерная задача [17–20]. На рисунке 9 приведена схема параболического рефлектора с двумя дополнительными асимметричными рефлекторами, размещенными сверху и снизу основного отражателя, на рисунке 10 даны результаты расчета ДН трех вариантов исполнения антенн:

А – основной рефлектор и два вспомогательных рефлектора;

В – единичный основной рефлектор;

С – рефлектор с увеличенным размером и с меньшим уровнем облучения кромок.

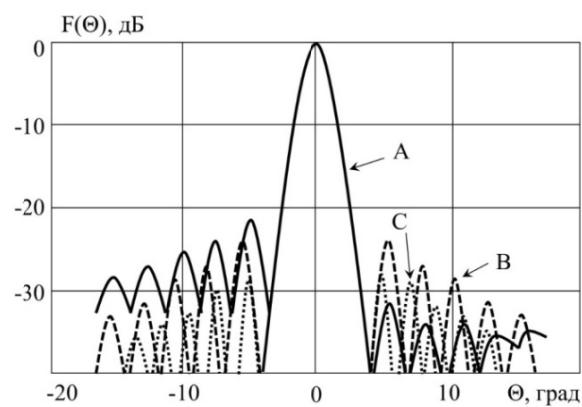


Рис. 10. Результаты расчета диаграммной направленности трех вариантов исполнения антенн ( $F = 20\lambda$ ,  $F/D = 0,47$ ,  $F(\psi) = \cos^2 \psi$ )

Fig. 10. The results of the calculation of the diagrammatic directivity of the three versions of the antennas ( $F = 20\lambda$ ,  $F/D = 0,47$ ,  $F(\psi) = \cos^2 \psi$ )

Из приведенных диаграмм видно, что при варианте В достигается снижение уровня бокового излучения примерно на 10 дБ для положительных значений сектора углов. Расчет проводился для параболического цилиндра размером  $20\lambda$ ,  $F/D = 0,47$  и диаграмме облучателя в виде  $F(\psi) = \cos^2 \psi$ . Расчет производился токовым методом.

Полученный результат, относящийся к параболическому цилиндру, авторы переносят на рефлектор в виде параболоида вращения. Указанная трансформация легко уясняется с помощью рисунка 11. Здесь дополнительный фланец, обрамляющий основной рефлектор, состоит из двух половинок, выполненных с различными профилями, причем профили верхней и нижней частей фланца повторяют профили дополнительных рефлекторов для случая параболического цилиндра.

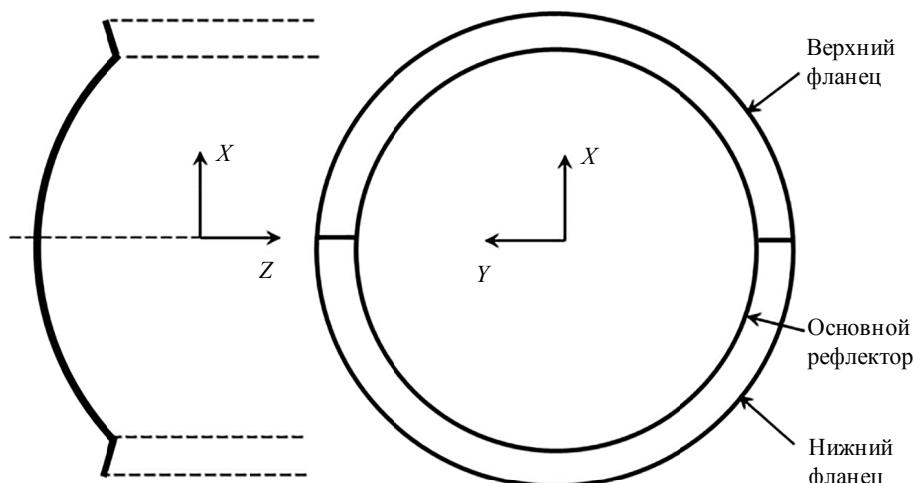


Рис. 11. Рефлектор антенны в виде параболоида вращения

Fig. 11. Antenna reflector in the form of a paraboloid of rotation

На рисунках 12 и 13 приведены результаты расчета ДН двух вариантов исполнения антенн:

- 1) непрерывная кривая – единичный рефлектор в виде параболоида вращения;
- 2) штриховая – основной рефлектор и дополнительный фланец.

Диаграммы направленности, приведенные на рисунке 13, относятся к  $Y$ -плоскости. Расчет проводился для параболоидного рефлектора диаметром  $20X$ ,

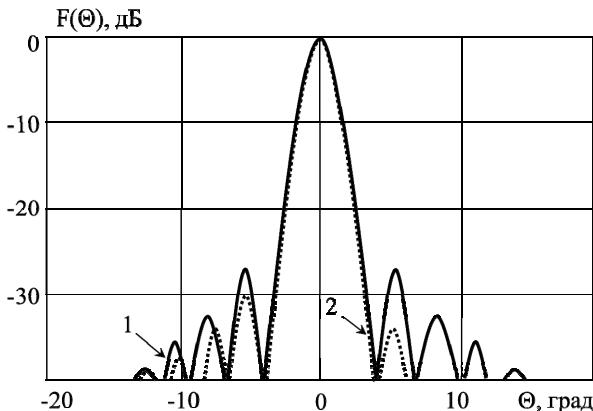


Рис. 12. Результаты расчета диаграммной направленности двух вариантов исполнения антенн ( $X$ -плоскости): линия 1 – единичный рефлектор в виде параболоида вращения; линия 2 – основной рефлектор и дополнительный фланец

Fig. 12. The results of the calculation of the directional pattern of two versions of antennas ( $X$ -planes): line 1 - a single reflector in the form of a paraboloid of revolution; line 2 - main reflector and additional flange

Следует отметить, что указанное техническое решение положительно сказывается и на кроссполяризационной ДН, снижая ее интенсивность.

И еще два замечания.

1. Данные результаты не следует рассматривать как исчерпывающее решение задачи. Представляется, что путем деформации профиля части рефлектора, примыкающей к границе отражателя, можно получить и более впечатляющие результаты.

2. При постановке и решении конкретных задач, связанных с улучшением (полным или частичным) ДН антennы по боковым направлениям, следует иметь в виду следующее обстоятельство. Наиболее приемлемые с практической точки зрения результаты будут соответствовать только той ситуации, когда выполняются два условия:

- области деформации рефлектора, необходимые для достижения планируемого результата, полностью соответствуют конфигурациям из набора щитовых конструкций, образующих собственно отражающую поверхность;
- деформация профилей подчиняется линейному закону.

## Выводы

После рассмотрения всех способов влияния снижения боковых излучений антennы станции спутниковой связи на качество связи следует:

$F/D = 0,47$  и диаграмме облучателя в виде  $F(\psi) = \cos^2 \psi$ , при которой облучение края рефлектора составляло минус 10 дБ. Ширина фланца составляла  $1,25\lambda$  [21–25]. Расчет производился токовым методом. Как видно из приведенных графиков, в  $X$ -плоскости наблюдается асимметричное подавление боковых лепестков (рис. 12), а в  $Y$ -плоскости – общее снижение бокового излучения антennы (рис. 13).

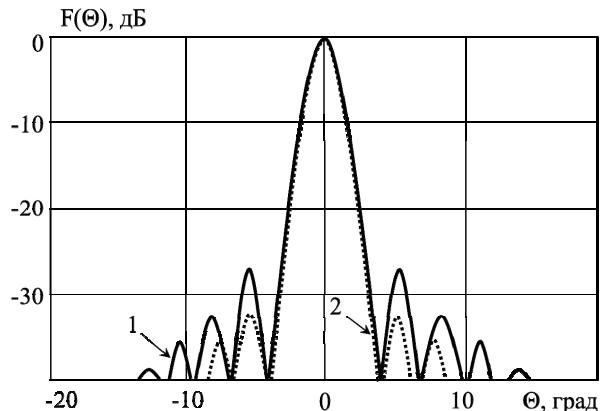


Рис. 13. Результаты расчета диаграммной направленности двух вариантов исполнения антenn ( $Y$ -плоскости) при  $D = 20X$ ,  $F/D = 0,47$ ,  $F(\psi) = \cos^2 \psi$

Fig. 13. The results of calculating the radiation pattern of two antenna designs ( $Y$ -plane) are as follows:  $D = 20X$ ,  $F/D = 0,47$ ,  $F(\psi) = \cos^2 \psi$

1. Для подавления узкополосных (широкополосных) сигналов по детерминированным направлениям необходимо применять схему узкополосной (широкополосной) компенсации при диаметрах вспомогательных рефлекторов  $D_v = 0,261 \dots 0,297D$ .

2. Для асимметричного уменьшения бокового излучения антennы наиболее эффективным способом можно считать целенаправленную деформацию профиля краевой области рефлектора в пределах  $D = 18X \dots 20X$ ,  $F/D = 0,46 \dots 0,48$ .

Дальнейший анализ подавления излучения по детерминированным направлениям и асимметричного уменьшения бокового излучения антennы позволит выбрать необходимый способ снижения ближнего бокового излучения антennы для земной станции спутниковой связи при их проектировании для применения в различных областях деятельности человека.

## Библиографические ссылки

1. Рыбков А. В., Бурмакин В. В. Анализ проблем спутниковой связи на подвижных объектах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2021. Т. 2. С. 47–49.
2. Исследование направленных характеристик антennы земной станции спутниковой связи методом спирального сканирования / А. Б. Гладышев, Д. Д. Дмитриев, В. Н. Ратушняк, О. Б. Грицан // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2021. № 7. С. 830–838.

3. *Gerard Maral, Michel Bousquet, Zhili Sun* (2020) *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*: 6th Edition. John Wiley & Sons Ltd. Published, 2020, 792 p.
4. *Тайгин В. Б., Лопатин А. В.* Разработка зеркальной антенны космического аппарата с ультралегким высокоточным размеростабильным рефлектором // Космические аппараты и технологии. 2019. № 3 (29). С. 121–131.
5. *Liu F., Su M., Li J., Li Y., Chen M.* (2019) Research on Satellite Communication System for Interference Avoidance: Space Information Networks (SINC 2019). Communications in Computer and Information Science, vol. 1169. Singapore: Springer, 2019.
6. *Бузанов Р. А., Широких С. А., Шишаков К. В.* Разработка микрополосковых антенн дециметрового диапазона с круговой поляризацией // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 47–61. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-47-61
7. *Довкиша Д. В., Лешкевич С. В., Саечников В. А.* Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи // Приборы и методы измерений. 2019. № 3. С. 233–242.
8. *Titovets P.A.* (2020) Technique for increasing the antenna gain-to-noise-temperature of satellite communications Earth stations with axisymmetric reflectors. T-Comm, no. 2, pp. 45–51.
9. *Antonov Y.G., Sugak M.I., Ballandovich S.V., Kostikov G.A., Liubina L.M.* Design of Wideband Reflectarray Antennas: 14-th European Conf. on Antennas and Propagation. Copenhagen, Denmark Publ., 15-20 March 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 1–5.
10. Стенд для измерения направленных характеристик антенн спутниковых систем связи / А. Б. Гладышев, Д. Д. Дмитриев, В. Н. Ратушняк, А. В. Жгун, О. Б. Грицан // Космические аппараты и технологии. 2020. № 4 (34). С. 201–208.
11. Двухполяризационные решетки широкополосных печатных излучателей для приложений X- и Ku-диапазонов / В. В. Головин, Ю. Н. Тышук, И. Л. Афонин, А. Л. Поляков, Г. В. Слезкин // РЭНСИТ. 2022. № 1. С. 3–10.
12. Моделирование линейной антенной решетки для спутниковой связи современных телекоммуникационных систем / С. А. Антипов, В. Н. Кострова, П. В. Николаев, Ю. Г. Пастернак, К. А. Разинкин, В. И. Чугуевский // Вестник ВГТУ. 2020. № 4. С. 64–69.
13. *Huang J., Cao J.* (2020) Recent Development of Commercial Satellite Communications Systems. In: *Liang Q., Wang W., Mu J., Liu X., Na Z., Chen B.* (eds) *Artificial Intelligence in China. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 572. Singapore: Springer, 2020.
14. *Пастернак Ю. Г., Плендорин В. А., Сафонов К. С.* Математическая модель излучающей апертуры фар, состоящей из сегменто-параболических антенн // Вестник ВГТУ. 2020. № 6. С. 69–78.
15. Антенные системы с широкоугольным механоэлектрическим сканированием / А. В. Станковский, С. В. Поленга, Е. А. Стригова, Ю. П. Саломатов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2023. № 5. С. 50–62.
16. *Rogerio Atem de Carvalho, Jaime Estela, Martin Langer* (2020) *Nanosatellites: Space and Ground Technologies, Operations and Economics*. John Wiley & Sons Ltd. Published, 2020, 712 p.
17. *Cheng S., Gao Y., Cao J., Guo Y., Du Y., Hu S.* (2020) Application of Neural Network in Performance Evaluation of Satellite Communication System: Review and Prospect. Artificial Intelligence in China: Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 572. Singapore: Springer, 2020.
18. *Кувалкин Е. С., Захаров А. И., Пец А. В.* Оценка затухания радиосигнала для построения трассы связи «Земля – космос» // Вестник Балтийского федерального университета имени И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2019. № 3. С. 99–109.
19. Двухдиапазонная отражательная антенна решетка Ka/Q-диапазонов частот / С. В. Поленга, А. А. Ерохин, Р. О. Рязанцев, А. Д. Полигина, Р. М. Крылов, Е. А. Литинская, Е. Р. Гафаров, А. М. Александрин, Ю. П. Саломатов, И. Ю. Данилов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. № 5. С. 18–31.
20. *Martinez-de-Rioja E., Encinar J.A., Pino A., Gonzalez-Valdes B.* (2019) Design of Bifocal Dual Reflectarray Antennas in Ka-Band to Generate a Multi-Spot Coverage from Geostationary Satellites: 13-th European Conf. on Antennas and Propagation, Krakow, Poland, 31 March 2019 - 5 April 2019. Piscataway, IEEE, pp. 1–5.
21. *Polenga S.V., Erokhin A.A., Krylov R.M., Stanikovsky A.V., Litinskaya E.A., Hudonogova A.D., Danilov I.Y., Salomatov Yu.P.* (2019) A Ka-Band Shaped-Beam Circularly Polarized Reflectarray Antenna. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway, IEEE, pp. 281–284.
22. *Kang E., Yang J., Park Y., Kim J., Shin W., Park Y.B., Choo H.* (2023) Analysis of a low-earth orbit satellite downlink considering antenna radiation patterns and space environment in interference situations. Remote Sens., 15, 1748. DOI: 10.3390/rs15071748
23. *Jinyuan Liu, Lixun Li, Yong Zuo, Huaming Chen, Shaojie Ni.* Analysis of performance degradation introduced by radome for high-precision GNSS antenna. DOI: 10.1155/2019/1529656
24. *Akan V.* (2021) Choke ring horn antenna design for satellite payload data transmitters. Microw. Opt. Technol. Lett., 63, 1913–1919.
25. *Arnaud E., Dugenet J., Elis K., Girardot A., Guihard D., Menudier C., Monediere T., Roziere F., Thevenot M.* (2020) Compact isoflux X-band payload telemetry antenna with simultaneous dual circular polarization for LEO satellite applications. IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., 19, 1679–1683.

## Reference

1. Rybkov A.V., Burmakin V.V. (2021) [Analysis of satellite communication problems on mobile objects]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, vol. 2, pp. 47–49 (in Russ.).
2. Gladyshev A.B., Dmitriev D.D., Ratushnyak V.N., Gritsan O.B. (2021) [Investigation of directional characteristics of the antenna of the Earth station of satellite communications by the method of spectral scanning]. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii*, no. 7, pp. 830–838 (in Russ.).
3. Gerard Maral, Michel Bousquet, Zhili Sun (2020) *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*: 6th Edition. John Wiley & Sons Ltd. Published, 2020, 792 p.
4. Taigin V.B., Lopatin A.V. (2019) [Development of a mirror antenna of a spacecraft with an ultralight high-precision dimensionally stable reflector]. *Kosmicheskie appratory i tekhnologii*, no. 3, pp. 121–131 (in Russ.).
5. Liu F., Su M., Li J., Li Y., Chen M. (2019) Research on Satellite Communication System for Interference Avoidance: Space Information Networks (SINC 2019). Communications in Computer and Information Science, vol. 1169. Singapore: Springer, 2019.
6. Buzanov R.A., Shirokikh S.A., Shishakov, K.V. (2022) [Development of microstrip antennas of the decimeter range with circular polarization]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 25, no. 3, pp. 47–61. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-47-61 (in Russ.).

7. Dovksha D.V., Leshkevich S.V., Saechnikov V.A. (2019) [Development of out-of-focus irradiation based on a phased array antenna for a parabolic mirror antenna of space communications]. *Instruments and measurement methods*, no. 3, pp. 233-242 (in Russ.).
8. Titovets P.A. (2020) Technique for increasing the antenna gain-to-noise-temperature of satellite communications Earth stations with axisymmetric reflectors. *T-Comm*, no. 2, pp. 45-51.
9. Antonov Y.G., Sugak M.I., Ballandovich S.V., Kostikov G.A., Liubina L.M. (2020) Design of Wideband Reflectarray Antennas: 14-th European Conf. on Antennas and Propagation. Copenhagen, Denmark Publ., 15-20 March 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 1-5.
10. Gladyshev A.B., Dmitriev D.D., Ratushnyak V.N., Zhgun A.V., Gritsan O.B. (2020) [Stand for measuring directional characteristics of antennas of satellite communication systems]. *Space apparatuses and technologies*, no. 4, pp. 201-208 (in Russ.).
11. Golovin V.V., Tyschuk Yu.N., Afonin I.L., Polyakov A.L., Slezkin G.V. (2022) [Two-polarization lattices of broadband printed emitters for applications of X and Ku bands]. *RENSIT*, no. 1, pp. 3-10 (in Russ.).
12. Antipov S.A., Kostrova V.N., Nikolaev P.V., Pasternak Yu.G., Razinkin K.A., Chuguevsky V.I. (2020) [Modeling of a linear antenna array for satellite communications of modern telecommunication systems]. *Bulletin of the VSTU*, no. 4, pp. 64-69 (in Russ.).
13. Huang J., Cao J. (2020) Recent Development of Commercial Satellite Communications Systems. In: Liang Q., Wang W., Mu J., Liu X., Na Z., Chen B. (eds.) *Artificial Intelligence in China. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 572. Singapore: Springer, 2020.
14. Pasternak Yu.G., Pendyurin V.A., Safonov K.S. (2020) [A mathematical model of the radiating aperture of headlights consisting of segmental-parabolic antennas]. *Vestnik VGTU*, no. 6, pp. 69-78 (in Russ.).
15. Stankovsky A.V., Polenga S.V., Strigova E.A., Salomatov Yu.P. (2023) [Antenna systems with wide-angle mechano-electric scanning]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*, no. 5, pp. 50-62 (in Russ.).
16. Rogerio Atem de Carvalho, Jaime Estela, Martin Langer (2020) *Nanosatellites: Space and Ground Technologies, Operations and Economics*. John Wiley & Sons Ltd. Published, 2020, 712 p.
17. Cheng S., Gao Y., Cao J., Guo Y., Du Y., Hu S. (2020) Application of Neural Network in Performance Evaluation of Satellite Communication System: Review and Prospect. *Artificial Intelligence in China: Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 572. Singapore: Springer, 2020.
18. Kuvalkin E.S., Zakharov A.I., Petz A.V. (2019) [Evaluation of radio signal attenuation for the construction of the Earth-Space communication route]. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta imeni I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*, no. 3, pp. 99-109 (in Russ.).
19. Polenga S.V., Erokhin A.A., Ryazantsev R.O., Polygina A.D., Krylov R.M., Litinskaya E.A., Gafarov E.R., Alexandrin A.M., Salomatov Yu.P., Danilov I.Yu. (2022) [Two-band reflective antenna array of Ka/Q frequency bands]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*, no. 5, pp. 18-31 (in Russ.).
20. Martinez-de-Rioja E., Encinar J.A., Pino A., Gonzalez-Valdes B. (2019) Design of Bifocal Dual Reflectarray Antennas in Ka-Band to Generate a Multi-Spot Coverage from Geostationary Satellites: 13-th European Conf. on Antennas and Propagation, Krakow, Poland, 31 March 2019 - 5 April 2019. Piscataway, IEEE, pp. 1-5.
21. Polenga S.V., Erokhin A.A., Krylov R.M., Stankovsky A.V., Litinskaya E.A., Hudonogova A.D., Danilov I.Y., Salomatov Yu.P. (2019) A Ka-Band Shaped-Beam Circularly Polarized Reflectarray Antenna. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*, Divnomorskoe, Russia, 24-28 June 2019. Piscataway, IEEE, pp. 281-284.
22. Kang E., Yang J., Park Y., Kim J., Shin W., Park Y.B., Choo H. (2023) Analysis of a low-earth orbit satellite downlink considering antenna radiation patterns and space environment in interference situations. *Remote Sens.*, 15, 1748. DOI: 10.3390/rs15071748
23. Jinyuan Liu, Lixun Li, Yong Zuo, Huaming Chen, Shaojie Ni. Analysis of performance degradation introduced by radome for high-precision GNSS antenna. DOI: 10.1155/2019/1529656
24. Akan V. (2021) Choke ring horn antenna design for satellite payload data transmitters. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 63, 1913-1919.
25. Arnaud E., Dugenet J., Elis K., Girardot A., Guihard D., Menudier C., Monediere T., Roziere F., Thevenot M. (2020) Compact isoflux X-band payload telemetry antenna with simultaneous dual circular polarization for LEO satellite applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 19, 1679-1683.

### Analysis of Methods to Reduce Side Radiation Influence from a Satellite Communication Station Antenna on Communication Quality

S.V. Zinkin, PhD in Engineering, Associate Professor, Penza State University, Penza, Russia

The article discusses ways to reduce the side radiation of the antenna, which mainly relates to the angular directions adjacent to the main radiation direction of the satellite communication station antenna. The methods of antenna radiation suppression in deterministic directions are analyzed: suppression of narrowband (broadband) signals, asymmetric reduction of antenna side radiation. The effect of narrowband signal suppression for the presented circuit is determined by the fact that the compensation channel has an additional passage length of the electromagnetic wave, approximately equal to  $2F$ , where  $F$  is the focal length of the paraboloid reflector. Therefore, this scheme allows to suppress interference effectively only if its relative frequency band is much less than  $\lambda/2F$ . The broadband signal suppression scheme implies a sharp increase in the frequency band at which the compensation scheme is effectively triggered, and as a result, the path lengths of the main and compensation channels are aligned. To reduce antenna side radiation asymmetrically, a method for purposefully deforming the reflector edge region profile is considered, namely, a parabolic reflector circuit with two additional asymmetric reflectors placed on top and below the main reflector. The most acceptable results from a practical point of view will correspond only to the situation when the two conditions are met: 1) reflector deformation areas necessary to achieve the planned result fully correspond to the configurations from the set of shield structures forming the reflecting surface itself; 2) the deformation of the profiles obeys a linear law. A combination of methods to reduce the near-field radiation of a satellite communication station antenna at the design stage will improve the quality of communication.

**Keywords:** method of reduction, side radiation of antenna, satellite communication station.

Получено 17.07.2025

**Образец цитирования**

Зинкин С. В. Анализ способов снижения влияния боковых излучений антенны станции спутниковой связи на качество связи // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 4. С. 98–107. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-98-107

**For Citation**

Zinkin S.V. (2025) [Analysis of Methods to Reduce Side Radiation Influence from a Satellite Communication Station Antenna on Communication Quality]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 4, pp. 98-107. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-98-107 (in Russ.).