

УДК 621.396.677

Критерий эффективности применения антенн с контурными диаграммами направленности в составе бортовых комплексов систем спутниковой связи

Занин К. М.

Постановка задачи: при разработке спутниковых систем радиосвязи требуется обеспечение заданного ее качества в пределах установленной зоны обслуживания, граница которой может иметь произвольную, в том числе и невыпуклую форму. Реализация требуемого качества связи в пределах заданной области неразрывно связана с формируемой антенной системой диаграммой направленности, которая должна учитывать не только контур границы обслуживаемой территории, но и требуемый закон распределения плотности потока мощности. Недостаточный уровень плотности потока мощности в пределах обслуживаемой территории, так же как и излучение за пределы границы рабочей области, приводят к ухудшению качества связи и частичной потере трафика. В то же время области с недостаточным уровнем плотности потока мощности могут иметь высокую концентрацию абонентов, что является дополнительным ограничением. Наиболее полное выполнение указанных требований связано с усложнением антенны: увеличением размеров излучающего раскрытия и переходом к неравномерному распределению амплитуд и фаз на апертуре, что приводит к увеличению массы и стоимости антенны. Таким образом, при построении бортовой антенны спутниковой системы связи требуется учет двух взаимно противоречивых факторов, которые определяют, с одной стороны, качество связи, а с другой стороны – массогабаритные характеристики антенны и ее стоимость. Решение поставленной задачи сопряжено с выводом критерия эффективности, однозначно связывающего указанные параметры. **Цель работы:** оценка эффективности применения антенных систем с контурными диаграммами направленности с учетом отмеченных факторов. **Новизна:** сформулированный критерий эффективности применения антенны с контурной диаграммой направленности учитывает не только форму границы обслуживаемой территории, но и следующие факторы: требуемый закон распределения плотности потока мощности в пределах заданной области; излучение антенны за пределы границы обслуживаемой территории; неравномерность распределения абонентов системы связи. **Результат:** с учетом системного подхода, определяющего взаимосвязь параметров радиоканала и требований к антенной системе, сформулирован критерий эффективности применения антенн с контурными диаграммами направленности в системах спутниковой радиосвязи. **Практическая значимость:** предложен показатель и критерий эффективности, на основе которых могут быть сформированы требования к антенной системе с контурной диаграммой направленности и которые позволяют сравнить две и более антенные системы с учетом отмеченных факторов.

Ключевые слова: спутниковая связь, контурная диаграмма направленности, показатель эффективности, критерий эффективности.

Актуальность

При разработке систем спутниковой связи (ССС), в том числе СССР, спутники-ретрансляторы (СР) которых выводятся на геостационарную орбиту,

Библиографическая ссылка на статью:

Занин К. М. Критерий эффективности применения антенн с контурными диаграммами направленности в составе бортовых комплексов систем спутниковой связи // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 2. С. 1-13. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-001-013

Reference for citation:

Zanin K. M. The Criterion of the Efficiency of Use of Antennas with Contour Beams in Satellite Communication Systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 2, pp. 1-13 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-001-013

необходимо при заданных параметрах абонентских терминалов обеспечить требуемое качество связи в пределах установленной зоны обслуживания. При заданных параметрах терминалов абонентов, качество связи, определяемое ограничительным уровнем вероятности битовой ошибки и скоростью передачи информации, зависит от распределения плотности потока мощности электромагнитного поля (ЭМП), формируемого бортовой антенной СР в пределах зоны обслуживания. Снижение плотности потока мощности в пределах данной области ведет к снижению скорости соединения и снижению трафика. Еще один важный фактор, который необходимо учитывать при разработке антенной системы (АС), – это плотность распределения абонентов. В направлениях, где плотность абонентов велика, снижение плотности потока мощности является более критичным, чем в направлениях, где данная плотность меньше.

В свою очередь, более высокий уровень плотности потока мощности за пределами обслуживаемой территории приводит к увеличению потребляемой мощности АС, величина которой ограничена системой энергоснабжения и теплоотвода СР. Кроме того, излучение бортовой антенны за пределами установленной зоны обслуживания влечет за собой трату ресурсов радиоканала на неучтенный трафик.

Реализация требуемого закона распределения плотности потока мощности неразрывно связана с диаграммой направленности (ДН) АС СР. Формируемая ДН должна учитывать отмеченные выше факторы. ДН АС, удовлетворяющая данным требованиям, должна иметь форму, которая обеспечивает заданную плотность потока мощности в пределах области обслуживания, а также быть равной нулю вне этой области.

Учитывая взаимосвязь ДН и параметров излучающего раскрыва, построение АС с ДН, полностью отвечающей отмеченным требованиям, физически невозможно. Это связано с тем, что ДН определяется преобразованием Фурье от амплитудно-фазового распределения (АФР) ЭМП на апертуре антенны. При ограниченных размерах излучающего раскрыва выполнение условия равенства нулю ДН антенны за пределами заданной угловой области является невозможным. Степень соответствия заданной и реализуемой ДН будет возрастать по мере усложнения антенны: увеличения размеров излучающего раскрыва и перехода к неравномерному АФР. Это определяет сложность построения антенны, ее массогабаритные параметры и, как следствие, ее стоимость. Таким образом, выбор параметров АС СР должен проводиться как компромисс между степенью соответствия ДН АС требованиям, задаваемым при построении СР, с одной стороны, и сложностью построения антенны и ее массогабаритными параметрами, с другой стороны. Такой выбор возможен только на основе показателя и критерия эффективности применения антенн с контурными ДН в составе СР ССС, учитывающими отмеченные факторы.

Вопросы эффективности антенн с контурными ДН рассматривались в работах [1-5]. В работах [6-8] при синтезе контурной ДН в качестве целевой функции использовались выражения, полученные для рассматриваемого частного случая границы обслуживаемой области. Однако в них не учитывалось распределение плотности потока мощности за пределами установленной гра-

ницы рабочей области и снижение ее уровня в определенных направлениях, которое может быть обусловлено различными наклонными дальностями или требованиями к пропускной способности канала ССС. Кроме того, в данных работах не учитывается взаимосвязь параметров ДН с распределением плотности абонентов в пределах обслуживаемой области.

Таким образом, оценка эффективности применения антенн с контурными ДН в составе бортовых комплексов систем спутниковой связи в более общей постановке имеет как научную значимость, так и представляет практический интерес в области теории и техники антенн. Поэтому целью данной работы является оценка эффективности применения АС с контурными ДН с учетом отмеченных факторов.

Достижение данной цели связано с решением следующих задач:

- 1) обоснование требований к АС с контурными ДН;
- 2) определение показателя и критерия эффективности применения антенн с контурными ДН;
- 3) исследование на основании численного моделирования взаимосвязи между требуемыми параметрами радиоканала и параметрами раскрыва АС.

1. Обоснование требований к АС с контурными ДН

В системах связи вероятность битовой ошибки при приеме сигнала связана с отношением энергии принятого бита к спектральной плотности мощности белого гауссовского шума $BER \sim Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$, где: $Q(x) \approx \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$ при $x > 3$; E_b – энергия бита; N_0 – спектральная плотность мощности шума [9]. Аналогично в соответствии с теоремой Шеннона-Хартли указанное отношение определяет и пропускную способность канала связи.

Для описания требований к ДН АС, установленной на СР, введены Декартова и соответствующая сферическая системы координат, связанные с фазовым центром антенны и заданные следующим образом:

- ось Ox сонаправлена с вектором скорости СР;
- ось Oz направлена в подспутниковую точку;
- ось Oy дополняет Ox и Oz до правой тройки векторов.

В совмещенной сферической системе координат орт r – расстояние от точки в пределах обслуживаемой территории до фазового центра АС СР, орт θ – угол, который отсчитывается от оси Oz , орт φ – от оси Ox .

Для наземного терминала, расположенного в направлении (θ, φ) , величина энергии принятого бита может быть определена следующим соотношением:

$$E_b(\theta, \varphi) = \Pi(\theta, \varphi) \cdot S_{\varphi} \cdot \tau_u, \quad (1)$$

в котором: $\Pi(\theta, \varphi)$ – плотность потока мощности; S_{φ} – эффективная площадь наземной антенны; τ_u – длительность импульса.

Плотность потока мощности может быть представлена в виде:

$$\Pi(\theta, \varphi) = \frac{P_{изл} \cdot G \cdot F^2(\theta, \varphi)}{4\pi \cdot R^2(\theta, \varphi)}, \quad (2)$$

где: $P_{изл}$ – излучаемая АС мощность; G – коэффициент усиления (КУ) АС СР; $F(\theta, \varphi)$ – ДН АС СР; $R(\theta, \varphi)$ – наклонная дальность в направлении (θ, φ) .

Используя соотношения (1) и (2) при заданной мощности излучения и характеристиках наземного терминала можно выразить взаимосвязь между основными параметрами канала связи и требованиями к ДН АС СР. Произведение $G \cdot F^2(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi)$ определяет требуемый уровень КУ в направлении (θ, φ) . С учетом этого, требования к ДН АС СР, которые описываются зависимостью КУ от (θ, φ) , можно определить следующим образом:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi \cdot E_b(\theta, \varphi) \cdot R^2(\theta, \varphi)}{P_{изл} \cdot S_{эф} \cdot \tau_u}. \quad (3)$$

В дополнение к полученным соотношениям необходимо отметить, что в случае, если АС СР работает в режиме приема, на входе приемника СР должна обеспечиваться мощность сигнала с уровнем, не ниже заданного. В данном режиме требования к АС можно записать следующим образом:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi \cdot R^2(\theta, \varphi) \cdot P_c}{P_{изл}^{(н)} \cdot S_{эф}}, \quad (4)$$

где: P_c – требуемый уровень мощности сигнала на входе приемника СР; $P_{изл}^{(н)}$ – мощность сигнала, излучаемого абонентским терминалом.

Требования к КУ АС в режиме приема/передачи можно определить путем объединения условий (3) и (4). КУ должен быть не хуже полученных величин.

2. Определение показателя и критерия эффективности применения антенн с контурными ДН

Разработка показателя эффективности выполнена на примере рабочей области, граница которой содержит как пологие контуры, так и участки с резкими изгибами, точность аппроксимации которых с помощью контурной ДН определяется параметрами раскрытия АС. Исходя из заданных требований к ССС, пример требуемого распределения $G(\theta, \varphi) = G_0(\theta, \varphi)$ может быть представлен графиком рис. 1. Данная характеристика имеет требуемый уровень распределения в пределах зоны обслуживания и нулевой уровень за ее пределами.

На рис. 1 и далее: $u = \sin(\theta)\cos(\varphi)$; $v = \sin(\theta)\sin(\varphi)$.

Для упрощения дальнейших иллюстраций рассмотрено сечение графика рис. 1 плоскостью $\sin(\theta)\cos(\varphi) = 0$. Данное сечение приведено на рис. 2.

График $G_0(\theta, \varphi)$ имеет бесконечную крутизну скатов, поэтому не может быть аппроксимирован ДН без искажений в реализуемой АС. Но реализуемая ДН может быть в какой-то степени приближена к $G_0(\theta, \varphi)$. Пример такой ДН

на рис. 2 обозначен как $G_1(\mathbf{A};\theta,\varphi)$, которая также является функцией от совокупности параметров излучающего раскрыва \mathbf{A} .

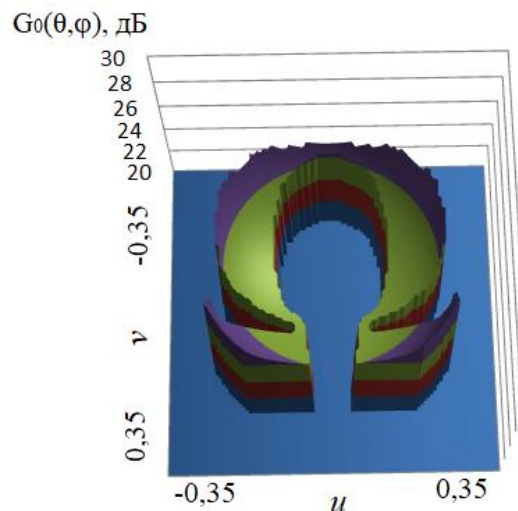


Рис. 1. Пример требуемой ДН АС СР

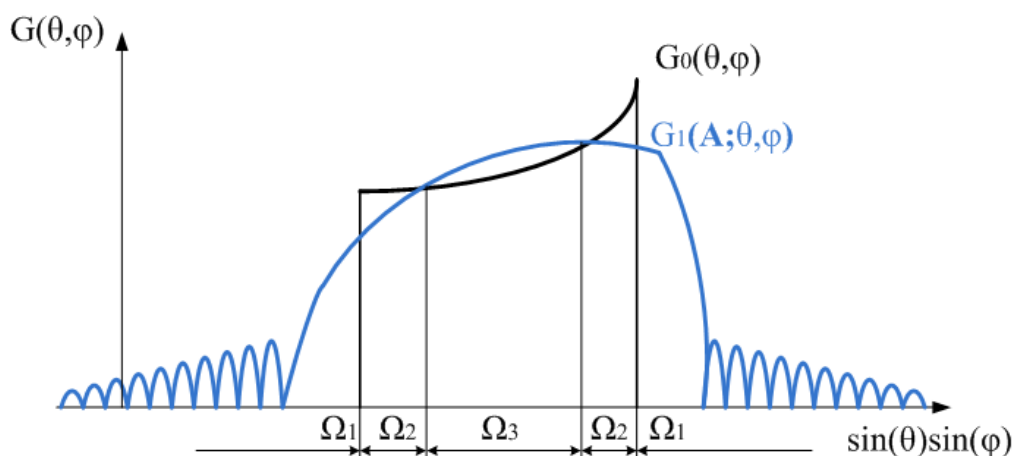


Рис. 2. Сечения ДН

На рис. 2 обозначены интервалы $\Omega_1 - \Omega_3$, которые соответствуют определенным направлениям (θ, φ) и ограничивают следующие области:

- Ω_1 – область, где могут находиться абонентские терминалы, обслуживание которых нежелательно;
- Ω_2 – область, где располагаются абоненты, которые должны, но не получают заданного качества связи;
- Ω_3 – область, где реализуемый КУ превышает заданный.

Области $\Omega_1 - \Omega_3$ определяются следующими условиями:

- Ω_1 : направления (θ, φ) не принадлежат рабочей области;
- Ω_2 : $G_1(\mathbf{A};\theta,\varphi) < G_0(\theta,\varphi)$, когда (θ, φ) принадлежат рабочей области;
- Ω_3 : $G_1(\mathbf{A};\theta,\varphi) > G_0(\theta,\varphi)$, когда (θ, φ) принадлежат рабочей области.

Разработка показателя эффективности проведена на основе данных областей. Для этого с каждой из них связано соответствующее слагаемое, описывающее качество обслуживания соответствующей области. В пределах рабочей области необходимо учитывать, что внутри нее можно выделить районы, где вероятность нахождения большого количества абонентов велика. Тогда возможные потери трафика являются критичными. Или это могут быть области с малой плотностью абонентов, тогда потери трафика не являются существенными. Для учета данных случаев вводятся нормированные весовые коэффициенты $\alpha(\theta, \varphi)$, которые задаются максимальными, где плотность абонентов велика, и минимальными других направлениях (θ, φ) .

Тогда слагаемое, отражающее мощность, излучаемую за пределы рабочей области, можно записать следующим образом:

$$q_1(\mathbf{A}) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta(\varphi_1)}^{\theta(\varphi_2)} G_1(\mathbf{A}; \theta, \varphi) d\theta d\varphi,$$

где φ_1 , φ_2 и $\theta(\varphi_1)$, $\theta(\varphi_2)$ определяют область Ω_1 ; слагаемое, отражающее количество абонентов, которые не получают требуемого качества связи:

$$q_2(\mathbf{A}) = \int_{\varphi_3}^{\varphi_4} \int_{\theta(\varphi_3)}^{\theta(\varphi_4)} \alpha(\theta, \varphi) \cdot (G_0(\theta, \varphi) - G_1(\mathbf{A}; \theta, \varphi)) d\theta d\varphi,$$

где φ_2 , φ_3 и $\theta(\varphi_2)$, $\theta(\varphi_3)$ определяют область Ω_2 ; слагаемое, где реализуемый КУ превышает заданный:

$$q_3(\mathbf{A}) = \int_{\varphi_5}^{\varphi_6} \int_{\theta(\varphi_5)}^{\theta(\varphi_6)} \frac{G_1(\mathbf{A}; \theta, \varphi) - G_0(\theta, \varphi)}{\alpha(\theta, \varphi)} d\theta d\varphi,$$

где φ_5 , φ_6 и $\theta(\varphi_5)$, $\theta(\varphi_6)$ определяют область Ω_3 .

Если $q_1(\mathbf{A})$ и $q_2(\mathbf{A})$ имеют ненулевые значения, проектируемая АС выполняет заданные требования не в полном объеме. Это может быть связано с тем, что АС должна функционировать в условиях предельных характеристик системы. В случае если $q_3(\mathbf{A}) \neq 0$, ССС обеспечивает требуемое качество услуги в области Ω_3 , но имеется запас ресурсов радиоканала, который может быть перераспределен на область Ω_2 , или конструкция АС может быть упрощена в пользу снижения массы, габаритных размеров и стоимости.

Поскольку $q_1(\mathbf{A})$ и $q_2(\mathbf{A})$ выражают меры «штрафов» для АС, весовые коэффициенты $\alpha(\theta, \varphi)$ при расчете $q_2(\mathbf{A})$ являются сомножителями, так как снижение уровня $G_1(\mathbf{A}; \theta, \varphi)$ относительно $G_0(\theta, \varphi)$ в направлениях, где плотность абонентов велика, является более значимым с точки зрения возможных потерь трафика, чем в других направлениях. При расчете неизрасходованного

запаса ресурсов радиоканала $q_3(\mathbf{A})$ $\alpha(\theta, \varphi)$ применяются в качестве делителей, так как увеличение $G_1(\mathbf{A}; \theta, \varphi)$ относительно $G_0(\theta, \varphi)$ в направлениях, где плотность абонентов велика, не является критичным.

С учетом полученных соотношений, критерий эффективности применения АС с контурной ДН может быть выражен следующим образом:

$$K(\mathbf{A}) = \frac{1}{q_1(\mathbf{A}) + q_2(\mathbf{A})} \rightarrow \max_{\mathbf{A} \in \mathbf{A}_0}. \quad (5)$$

Выражение (5) в данной работе определяет показатель ($K(\mathbf{A})$) и критерий эффективности применения АС с контурной ДН, который заключается в достижении условного максимума $K(\mathbf{A})$ при установленных ограничениях на параметры апертуры \mathbf{A}_0 . Максимизация $K(\mathbf{A})$ сводится к задаче выбора формы раскрыва антенны и к задаче синтеза ДН, а именно к поиску АФР, при котором требования к АС выполняются наиболее полно.

Как будет показано далее, данный показатель возрастает с увеличением размеров апертуры антенны, так как аппроксимация требуемой ДН становится более точной. При этом слагаемые $q_1(\mathbf{A})$ и $q_2(\mathbf{A})$ уменьшаются. Однако, при превышении размеров апертуры определенного значения, начинает возрастать $q_3(\mathbf{A})$.

Рост слагаемого $q_3(\mathbf{A})$ не приводит к ухудшению качества связи. В большей степени $q_3(\mathbf{A})$ определяет количество неизрасходованных ресурсов радиоканала, которые путем выбора $\mathbf{A} \in \mathbf{A}_0$ могут быть распределены, например, на уменьшение $q_2(\mathbf{A})$. Также значение $q_3(\mathbf{A})$ может быть снижено путем уменьшения $P_{изл}$ и ограничения на размер апертуры АС, что в ССС является наиболее актуальным.

3. Численное моделирование показателя эффективности и параметров излучающего раскрыва АС

Для синтеза ДН применен метод парциальных диаграмм [10], который является достаточно универсальным с точки зрения формирования АФР в раскрыве АС при заданной форме ДН. Также необходимо отметить, что учет весовых коэффициентов $\alpha(\theta, \varphi)$ и выбор наиболее удачного подхода к синтезу заданной ДН не является основной задачей в данной работе.

Согласно методу парциальных диаграмм значения АФР на плоскости xOy апертуры антенны могут быть вычислены следующим образом:

$$\mathbf{A}(x, y) = \sum_p F(\theta_p, \varphi_p) \cdot \exp\left(ik\left(x \sin(\theta_p) \cos(\varphi_p) + y \sin(\theta_p) \sin(\varphi_p)\right)\right)$$

где: $\mathbf{A}(x, y)$ – распределение комплексных амплитуд поля вектора \mathbf{E} на плоскости; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны на рабочей частоте; p – номер парциального луча; (θ_p, φ_p) – направление парциального луча.

С использованием данного метода синтезированы четыре ДН для различных параметров раскрыва. Полученные результаты приведены на рис. 3.

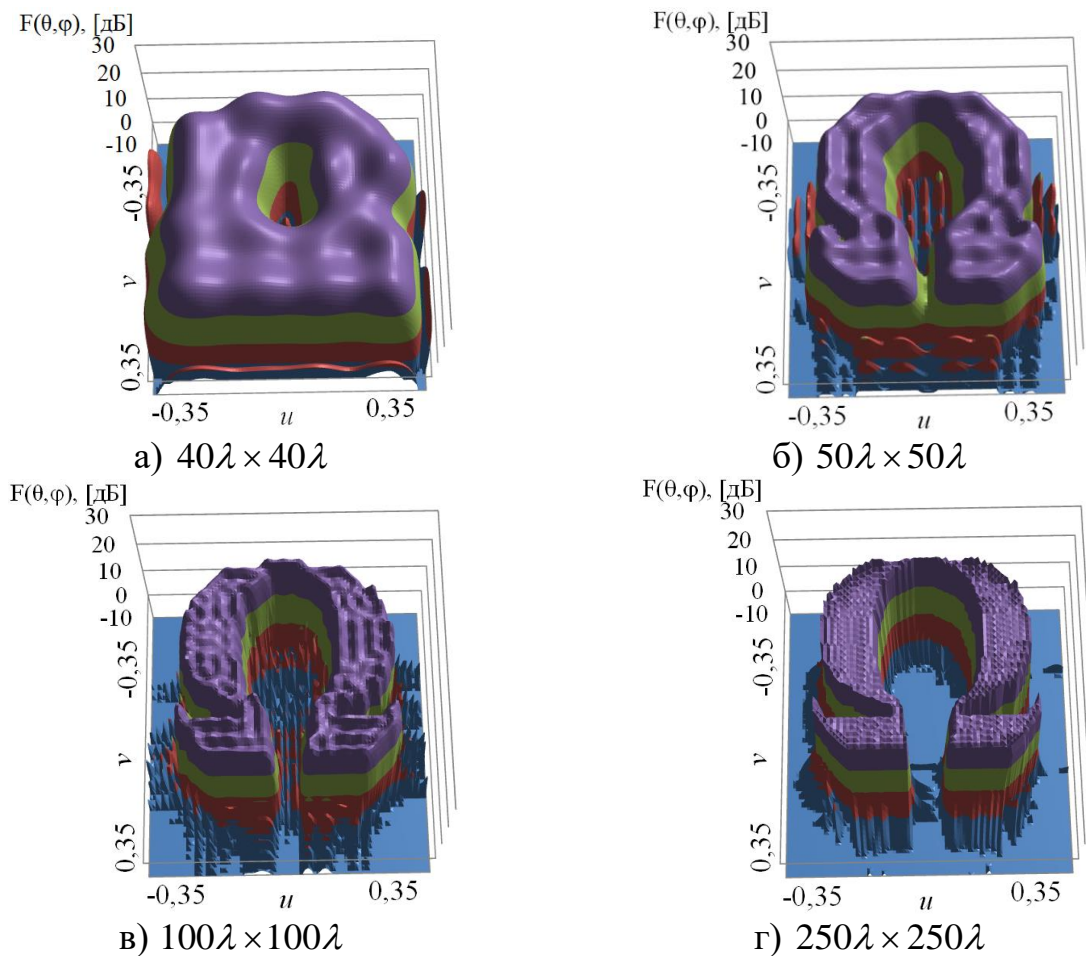


Рис. 3. Результаты синтеза ДН для различных размеров раскрыва

Значения слагаемых $q_1(\mathbf{A}), q_2(\mathbf{A}), q_3(\mathbf{A})$ и $K(\mathbf{A})$ для четырех конфигураций раскрыва АС приведены в таблице 1. Результаты получены с учетом примера распределения весовых коэффициентов $\alpha(\theta, \varphi)$, согласно рис. 4.

Полученные результаты рис. 3 и таблицы 1 показывают, что с учетом заданных параметров (контура обслуживаемой территории, распределения $G_0(\theta, \varphi)$ и $\alpha(\theta, \varphi)$) при увеличении размеров апертуры точность аппроксимации требуемой ДН увеличивается. Слагаемые $q_1(\mathbf{A})$ и $q_2(\mathbf{A})$ уменьшаются, показатель $K(\mathbf{A})$ возрастает. Однако, при превышении размеров апертуры определенного значения, начинает возрастать $q_3(\mathbf{A})$, что свидетельствует о том, что размер апертуры выбран некорректно и может быть уменьшен. На рис. 5 и в таблице 2 приведены результаты моделирования ДН АС, отличающейся от рассмотренной ранее и имеющей размер раскрыва $70\lambda \times 70\lambda$, для различных параметров синтеза АФР. К данным параметрам относятся выбор направлений парциальных лучей (θ_p, φ_p) , смещение координат (x, y) фазовых центров каналов управления АФР и т.д.

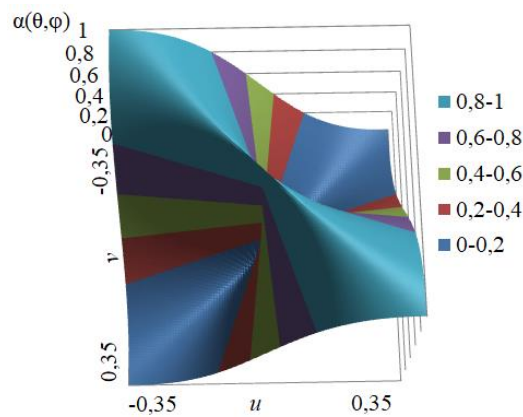


Рис. 4. Распределение весовых коэффициентов $\alpha(\theta, \varphi)$

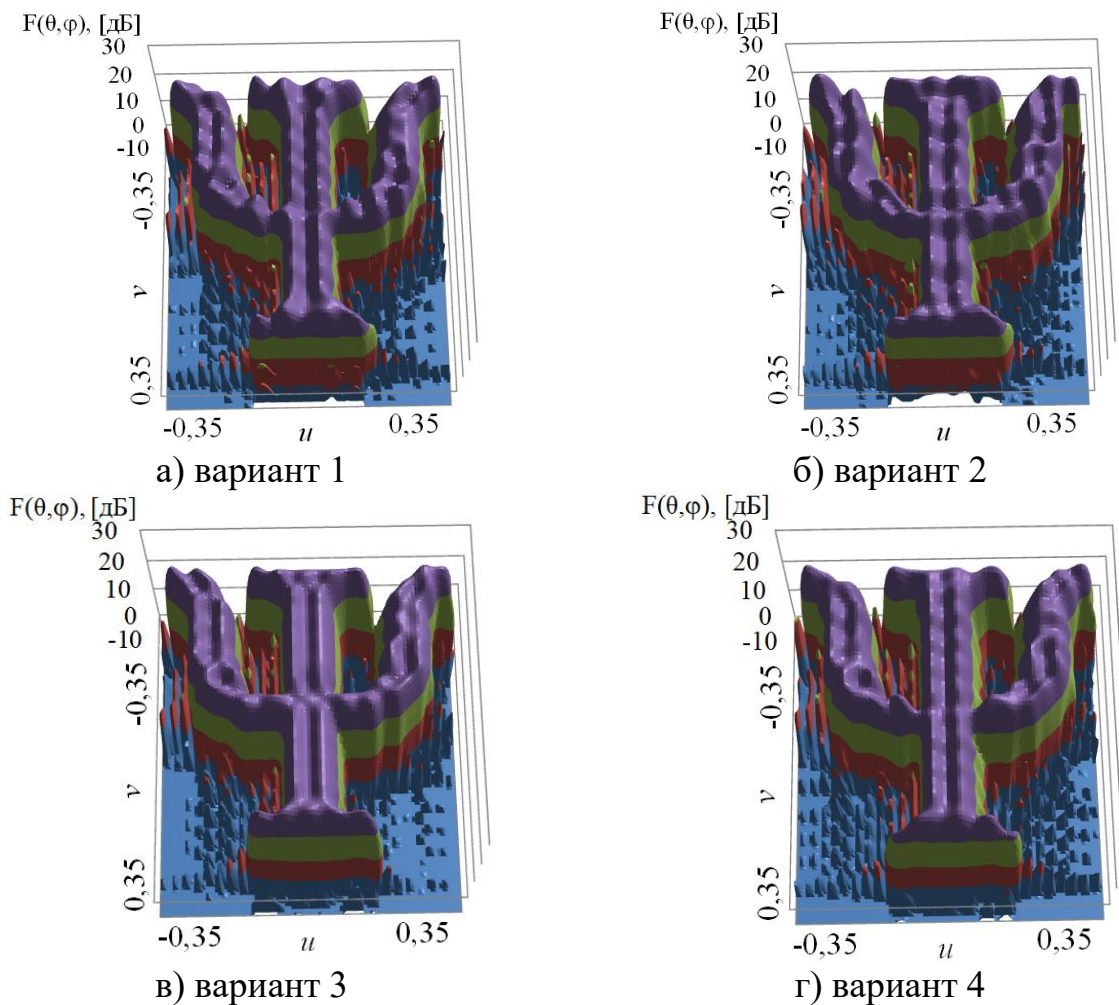


Рис. 5. Результаты синтеза ДН для установленного размера раскрыва

Таблица 1 – Результаты моделирования показателя эффективности при различных размерах излучающего раскрыва

№ п/п	Размер раскрыва	q_1	q_2	q_3	K
1.	$40\lambda \times 40\lambda$	25,8	17,9	0,3	0,023
2.	$50\lambda \times 50\lambda$	22	14,9	0,021	0,027
3.	$100\lambda \times 100\lambda$	12,5	5,8	36,8	0,055
4.	$250\lambda \times 250\lambda$	2,11	0,645	175	0,36

Таблица 2 – Результаты моделирования показателя эффективности при установленном размере излучающего раскрыва

№ п/п	q_1	q_2	q_3	K
1.	21,6	22,1	20,7	0,023
2.	21,8	20,7	33,1	0,024
3.	20,3	14	7,91	0,029
4.	18,5	13,9	27,5	0,031

Показанные на рис. 5 ДН имеют близкую форму. Показатель K позволяет выбрать ту АС, что удовлетворяет требованиям к ССС наиболее полно.

Выводы

1. Предложенные в данной работе показатель и критерий позволяют провести оценку эффективности применения АС с контурными ДН в составе бортовых комплексов систем спутниковой связи в более общей постановке. Разработка показателя и критерия проведена с учетом требуемых параметров радиоканала, которые определяют необходимый уровень распределения КУ АС СР. При работе АС СР в режиме передачи требования к распределению ее КУ определяются заданным уровнем плотности потока мощности в точке приема, расстоянием R и излучаемой мощностью СР. При работе АС СР в режиме приема – в большей степени требуемым уровнем мощности полезного сигнала на входе приемника (чувствительностью приемника) и излучаемой мощностью абонентского терминала. Требования к КУ АС в режиме приема/передачи определяются путем объединения указанных ограничений. КУ должен быть не хуже полученных величин.

2. С учетом параметров радиоканала полученный критерий позволяет оценить эффективности применения АС с контурными ДН основываясь не только на форме границы обслуживаемой территории, но и с учетом следующих факторов: требуемый закон распределения плотности потока мощности в пределах заданной области; излучение антенны за пределы границы обслуживаемой территории; неравномерность распределения абонентов системы связи. В учете данных факторов заключается научная новизна данной работы в сравнении с [1-8].

Также полученный показатель позволяет сравнить две и более АС, имеющие одинаковый размер апертуры, но отличающиеся формой контурной ДН.

3. Результаты моделирования показателя эффективности и параметров излучающего раскрыва АС показывают, что данный показатель возрастает с увеличением размеров апертуры антенны, так как аппроксимация требуемой ДН реализуемой становится более точной. При этом слагаемое, отражающее мощность, излучаемую за пределы рабочей области, и слагаемое, отражающее количество абонентов, которые не получают требуемого качества связи, уменьшаются (q_1 и q_2 соответственно). Однако, при превышении размеров апертуры определенного значения, начинает увеличиваться область, где реализуемый КУ превышает заданный (q_3).

Рост q_3 не приводит к ухудшению качества связи, но это свидетельствует о том, что ресурсы радиоканала путем выбора параметров раскрыва АС могут быть перераспределены на область, где абоненты не получают заданного качества связи. Также значение q_3 может быть снижено путем уменьшения излучаемой мощности и ограничения на размер апертуры АС, что для бортовой аппаратуры ССС является наиболее актуальным.

Литература

1. Мельничук В. И., Шишлов А. В. Эффективность антенн с контурными диаграммами направленности. Двумерная задача // Радиотехника. 2014. № 1. С. 79–87.
2. Шишлов А. В., Кривошеев Ю. В., Мельничук В. И. Свойства контурных диаграмм направленности фазированных антенных решеток // Антенны. 2016. № 8. С. 44–58.
3. Шишлов А. В. Зеркальные антенны с контурными диаграммами направленности – эффективность и предельные возможности // Радиотехника. 2006. № 4. С. 45–50.
4. Соболев С. П. Эффективность излучения плотных антенных решеток, формирующих секторные и контурные диаграммы направленности // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 7. С. 838–441.
5. Шишлов А. В., Шубов А. Г. Эффективность антенных устройств с контурными диаграммами направленности // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997. Т. 2. № 1. С. 54–57.
6. Zhenqin Zheng, Long Zhang, Xianting Xie, Qingwei Ji, Hui Chen, Chunxu Mao. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications // IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology. 2021. P. 658–661. doi: 10.1109/ICEICT53123.2021.9531087.
7. Prado D. R., Lopez Fernandez J. A., Arrebola M., Pino M. R., Goussetis G. General Framework for the Efficient Optimization of Reflectarray Antennas for Contoured Beam Space Applications // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 7295–72310.
8. Prado D. R., Arrebola M., Pino M. R., Goussetis G. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020. Vol. 68, № 11. P. 7682–7687.
9. Песков С. Н., Ищенко А. Е. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи // Теле-Спутник. 2010. № 11. С. 70–75.
10. Мануилов Б. Д., Башлы П. Н., Безуглов Ю. Д. Алгоритм управления многофункциональными антенными решетками на основе метода парциальных диаграмм // Антенны. 2005. № 9. С. 72–81.

References

1. Melnichuk V. I., Shishlov A. V. Effektivnost antenn s konturnymi diagrammami napravlennosti. Dvumernaya zadacha [Efficiency of Antennas with Contour Radiation Patterns. A Two-Dimensional Task]. *Radioengineering*, 2014, no. 1, pp. 79–87 (in Russian).

2. Shishlov A. V., Krivosheev YU. V., Melnichuk V. I. Svoystva konturnykh diagramm napravlenosti fazirovannykh antennykh reshetok [Properties of Contour Radiation Patterns of Phased Antenna Arrays]. *Antennas*, 2016, no. 8, pp. 44–58 (in Russian).

3. Shishlov A. V. Zerkalnye anteny s konturnymi diagrammami napravlenosti – effektivnost i predelnye vozmozhnosti [Mirror Antennas with Contour Radiation Patterns – Efficiency and Ultimate Capabilities]. *Radioengineering*, 2006, no. 4, pp. 45–50 (in Russian).

4. Sobolev S. P. Effektivnost izlucheniya plotnykh antennykh reshetok, formiruyushchih sektornye i konturnye diagrammy napravlenosti [Radiation Efficiency of Dense Antenna Arrays Forming Sector and Contour Radiation Patterns]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 7, pp. 838–441 (in Russian).

5. Shishlov A. V., Shubov A. G. Effektivnost antennykh ustroystv s konturnymi diagrammami napravlenosti [Efficiency of Antenna Devices with Contour Radiation Patterns]. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 1997, vol. 2, no. 1, pp. 54–57 (in Russian).

6. Zhenqin Zheng, Long Zhang, Xianting Xie, Qingwei Ji, Hui Chen, Chunxu Mao. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications. *IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology*, 2021, pp. 658–661. doi: 10.1109/ICEICT53123.2021.9531087.

7. Prado D. R., Lopez Fernandez J. A., Arrebola M., Pino M. R., Goussetis G. General Framework for the Efficient Optimization of Reflectarray Antennas for Contoured Beam Space Applications. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 7295–72310.

8. Prado D. R., Arrebola M., Pino M. R., Goussetis G. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, vol. 68, no. 11, pp. 7682–7687.

9. Peskov S. N., Ishchenko A. E. Raschet veroyatnosti oshibki v cifrovyykh kanalah svyazi [Error Probability Calculations in Digital Communications]. *Telesputnik [Telesatellite]*, 2010, no. 11, pp. 70–75 (in Russian).

10. Manuilov B. D. Bashly P. N. Bezuglov Yu. D. Algoritm upravleniya mnogofunktsionalnymi antennymi reshetkami na osnove metoda partsialnykh diagramm [An Algorithm for Controlling Multifunctional Antenna Arrays Based on the Partial Diagram Method]. *Antennas*, 2005, no. 9, pp. 72–81 (in Russian).

Статья поступила 31 января 2024 г.

Информация об авторе

Занин Константин Михайлович – аспирант, руководитель группы. Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи. Область научных интересов: СВЧ-устройства и антенные системы, радиосвязь, радиолокация. E-mail: konstantinzanin@rambler.ru

Адрес: 344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130.

The Criterion of the Efficiency of Use of Antennas with Contour Beams in Satellite Communication Systems

K. M. Zanin

Purpose. When developing a satellite radio communication system, it is required to ensure a given quality of radio communication within a given service area. The quality of communication in a given area is related to the radiation pattern, which is formed by the antenna system. The directional pattern should take into account the contour of the border of the serviced area and many other factors. The level of compliance with the specified and implemented radiation pattern will increase with the complexity of the antenna. The complexity of the antenna includes an increase in the size of the antenna aperture and a transition to an uneven distribution of amplitudes and phases at the aperture. These parameters are very important, as they determine the mass of the antenna system and its cost. When building an antenna system, two mutually contradictory factors must be taken into account. The first factor determines the accuracy of forming the distribution of the power flow density within the service area. The second factor determines the complexity of the implementation of the directional pattern, which provides the specified requirements. The solution to this problem is related to the calculation of the efficiency criterion, which should combine the quality of customer service with the parameters of the antenna pattern. The purpose of the article is to evaluate the effectiveness of using an antenna system with a contour beam in a satellite radio communication system. **Novelty.** For the first time, the density of subscriber distribution is taken into account in the article, and the area under study is divided into several parts. It is subscriber terminals, the maintenance of which is undesirable, subscriber terminals that do not receive the specified communication quality and the realized antenna gain exceeds the specified one. **Results.** Taking into account the systematic approach, a criterion for the effectiveness of antennas with contour beams in radio communication systems is formulated. **Practical relevance.** A efficiency indicator has been obtained that combines the efficiency of customer service within the required area and the difficulty of receiving signals outside the workspace. The initial data are the parameters of the radiation pattern of the antenna system.

Key words: contour beam, satellite communication, efficiency indicator, efficiency criterion.

Information about Author

Konstantin Mikhailovich Zanin – Postgraduate student. Head of the Group. Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication. Field of research: microwave devices and antenna systems, radio communications, radar systems. E-mail: konstantinzanin@rambler.ru

Address: 344038, Russia, Rostov-on-Don, Nansena str, 130.