

УДК 621.369.677

**Д.Д. Габриэлян, Н.И. Бобков, Н.Г. Пархоменко**

**СИНТЕЗ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ  
НА ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ЗАДАННОЙ ДИАГРАММЕ  
НАПРАВЛЕННОСТИ**

*Поставлена задача синтеза амплитудно-фазового распределения токов на поверхности отражателя зеркальной антенны, обеспечивающего сохранение заданных характеристик диаграммы направленности неизменными в широкой полосе частот, являющаяся актуальной при разработке сверхширокополосных зеркальных антенн перспективных радиоэлектронных комплексов различного назначения. Решение задачи приводит к системе интегральных уравнений Фредгольма первого рода, сведенных к системе линейных алгебраических уравнений, решаемой методами теории матриц. На примере параболического цилиндра исследованы закономерности изменения амплитудно-фазового распределения токов, поддерживающего с заданной точностью характеристики диаграммы направленности в восьмикратной полосе частот для центрального и отклоненного луча сверхширокополосной многолучевой зеркальной антенны.*

*Зеркальная антенна; параболоид; отражатель; амплитудно-фазовое распределение; матрица; электрический ток; диаграмма направленности.*

**D.D. Gabrieljan, N.I. Bobkov, N.G. Parkhomenko**

**SYNTHESIS OF THE AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION OF CURRENTS  
ON THE REFLECTOR SURFACE IN ACCORDANCE WITH THE PATTERN**

*The problem of synthesis of the amplitude-phase distribution of currents on the surface of the dish antenna reflector that preserves the characteristics of the given constant pattern over a wide frequency band, which is relevant in the development of ultra-wideband reflector antennas for the prospective electronic systems for various purposes, was set. The solution of problem leads to a system of first kind Fredholm integral equations, reduced to a system of linear algebraic equations and solved using the theory of matrices. In the example of a parabolic cylinder regularities of changes in the amplitude-phase distribution, which supports a given accuracy characteristics of the radiation pattern in the eightfold frequency band for the central beam and deflected beam of the ultra-wideband multibeam reflector antenna, were investigated.*

*Reflector antenna; paraboloid; reflector; amplitude-phase distribution; the matrix; the electric current; radiation pattern.*

Решение задачи синтеза амплитудно-фазового распределения (АФР) токов на поверхности отражателя антенны по требованиям к заданной диаграмме направленности (ДН) представляет собой основу при разработке зеркальных антенн (ЗА), входящих в состав радиоэлектронных комплексов различного назначения [1, 2]. При этом такие антенны должны функционировать в широкой полосе частот при условии стабилизации характеристик направленности. Решение этой задачи невозможно без исследования частотной зависимости требуемого АФР токов на поверхности отражателя, обеспечивающего формирование ДН с заданными и неизменными на различных частотах характеристиками.

В работах [3–6] достаточно подробно рассмотрены решения задач синтеза АФР применительно к произвольным поверхностям. Однако основные закономерности изменения АФР в полосе частот, обеспечивающего стабилизацию характеристик ДН, остаются в настоящее время неисследованными.

Целью статьи является решение задачи синтеза АФР электрических токов по заданной диаграмме направленности и исследование закономерностей изменения АФР в полосе частот для стабилизации характеристик ДН ЗА на примере отражателя в виде параболического цилиндра.

В рассматриваемой постановке будем считать заданными:

- ♦ форму и размеры поверхности  $S$  отражателя, удовлетворяющей условиям Ляпунова;
- ♦ требуемую диаграмму направленности, определяемую в виде разложения по ортам сферической системы координат

$$\vec{F}_{\text{зад}}(\theta, \varphi) = \vec{i}_\theta F_\theta^{\text{зад}}(\theta, \varphi) + \vec{i}_\varphi F_\varphi^{\text{зад}}(\theta, \varphi). \quad (1)$$

Необходимо найти закон распределения плотности поверхностных электрических токов  $\vec{j} = \vec{\tau}j_\tau + \vec{\xi}j_\xi$  на поверхности отражателя  $S$  ( $\vec{\tau}$  и  $\vec{\xi}$  – касательные орты локальной системы координат  $O'\tau\xi\zeta$  в точке  $O'$  на поверхности), который обеспечивает формирование ДН с минимальным среднеквадратическим отклонением от заданной. Геометрия задачи приведена на рис. 1.

Компоненты ДН можно представить в следующем виде [7]

$$F_\theta = \int_0^{2\pi} \int_0^{A(\psi)} [j_\tau G_{\theta\tau}(\theta, \varphi; \alpha, \psi) + j_\xi G_{\theta\xi}(\theta, \varphi; \alpha, \psi)] d\alpha d\psi, \quad (2)$$

$$F_\varphi = \int_0^{2\pi} \int_0^{A(\psi)} [j_\tau G_{\varphi\tau}(\theta, \varphi; \alpha, \psi) + j_\xi G_{\varphi\xi}(\theta, \varphi; \alpha, \psi)] d\alpha d\psi. \quad (3)$$

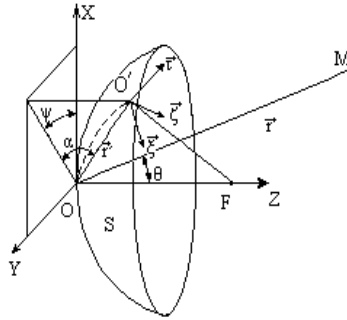


Рис. 1. Система координат, связанная с параболоидом

В соотношении (2)  $G_{\theta\tau}(\theta, \varphi; \alpha, \psi)$ ,  $G_{\theta\xi}(\theta, \varphi; \alpha, \psi)$  и аналогичные множители в (3) представляют элементы тензорной функции Грина, определяющие вклад составляющих электрических токов, касательных к поверхности отражателя  $S$  в  $\theta$ - и  $\varphi$ -компоненты ДН;  $A(\psi)$  – пределы интегрирования в соответствующем сечении, углы  $\theta$ ,  $\varphi$  определяют направление в дальней зоне в сферической системе координат.

Для нахождения неизвестного распределения плотности поверхностных электрических токов, обеспечивающего формирование ДН с минимальным среднеквадратическим отклонением от заданной диаграммы, потребуем совпадения формируемой и заданной ДН в  $P$  направлениях, определяемых углами  $\theta_p, \varphi_p$ , ( $p = 1, \dots, P$ )

$$\begin{cases} F_\theta(\theta_p, \varphi_p) = F_\theta^{\text{зад}}(\theta_p, \varphi_p), \\ F_\varphi(\theta_p, \varphi_p) = F_\varphi^{\text{зад}}(\theta_p, \varphi_p). \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) представляет собой систему интегральных уравнений (ИУ) Фредгольма первого рода относительно неизвестных распределений компонент токов  $j_\tau$  и  $j_\zeta$ .

Для решения данной системы ИУ представим неизвестное распределение компонент токов с помощью кусочно-постоянных функций следующим образом

$$j_\tau(\alpha, \psi) = \sum_{n=1}^N B_n^\tau \delta_n(\alpha) \delta_n(\psi), \quad (5)$$

$$j_\zeta(\alpha, \psi) = \sum_{n=1}^N B_n^\zeta \delta_n(\alpha) \delta_n(\psi), \quad (6)$$

$$\text{где } \delta_n(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha_n \leq \alpha \leq \alpha_{n+1}, \\ 0, & \alpha \leq \alpha_n \text{ или } \alpha_{n+1} \leq \alpha, \alpha_1 = 0, \alpha_N = A, \end{cases}$$

$$\delta_n(\psi) = \begin{cases} 1, & \psi_n \leq \psi \leq \psi_{n+1}, \\ 0, & \psi \leq \psi_n \text{ или } \psi_{n+1} \leq \psi, \psi_1 = 0, \psi_N = 2\pi. \end{cases}$$

Выбранная аппроксимация неизвестного распределения поверхностных токов позволяет свести решение системы интегральных уравнений к решению системы линейных алгебраических уравнений

$$[T] \cdot |B\rangle = |F\rangle. \quad (7)$$

В соотношении (7) вектор-столбец  $B$ , элементами которого являются искомые коэффициенты разложения токов, имеет размерность  $2N$ , вектор-столбец  $|F\rangle$ , элементами которого являются комплексные значения  $\theta$ - и  $\varphi$ -компонент ДН, имеет размерность  $2P$ . Элементы матрицы  $T$  определяют соответственно вклад составляющих поверхностного электрического тока  $n$ -го элемента поверхности отражателя ( $n = 1, \dots, N$ ) в  $\theta$ - или  $\varphi$ -компоненты ДН в  $p$ -ом направлении ( $p = 1, \dots, P$ ).

При выполнении условия  $P \gg N$  получаемое решение системы (7) будет давать наилучшее приближенное решение по методу наименьших квадратов [8]. Поскольку ранг матрицы  $T$  равен  $2N$ , решение задачи амплитудно-фазового синтеза при этом может быть найдено в виде [8]:

$$|B\rangle = [T]^\dagger \cdot |F\rangle, \quad (8)$$

где  $[T]^\dagger$  – псевдообратная матрица для матрицы  $[T]$ , определяемая выражением:

$$[T]^\dagger = (\gamma E + T^* T)^{-1} T^*. \quad (9)$$

В выражении (9)  $T^*$  – матрица, транспонированная и комплексно-сопряженная по отношению к  $T$ ,  $E$  – единичная матрица.

Параметр регуляризации  $\gamma$  выбирается из условия компромисса между точностью синтеза ДН и гладкостью получаемого амплитудно-фазового распределения.

Отдельным вопросом является задание физически реализуемой ДН, характеристики которой соответствуют требуемым значениям. В качестве  $\vec{F}_{зад}(\theta, \varphi)$  можно выбирать ДН, формируемую токами  $j(x', y')$ , распределенными на вспомогательной поверхности  $S'$ , для которой взаимосвязь между параметрами распределения токов и характеристиками ДН хорошо изучена, например плоской поверхности, ог-

раниченной окружностью или прямоугольником; с распределением токов по закону «косинус на пьедестале». Однако при решении задачи стабилизации характеристик ДН ЗА в диапазоне частот в качестве заданной может выбираться ДН, формируемая этой же антенной на одной из частот требуемого диапазона.

В качестве примера рассмотрим частный, но важный с практической точки зрения случай двумерного синтеза АФР на поверхности цилиндрического параболоида по заданной ДН. Будем считать, что ДН задана своим сечением в плоскости, поперечной по отношению к образующей отражателя, и АФР вдоль образующей отражателя является постоянным.

Поперечное сечение отражателя описывается уравнением

$$z = x^2 / 4f, \quad x \in [-L; L], \quad (10)$$

где  $f$  – фокусное расстояние,  $2L$  – размер апертуры.

В качестве заданной рассматривается ДН, формируемая антенной на нижней частоте диапазона рабочих частот. Распределение тока на поверхности отражателя, используемое для формирования заданной ДН, выбрано в виде

$$j(x) = \Delta + (1 - \Delta) \cos \frac{\pi x}{2L}. \quad (11)$$

Соответствующие ДН для синфазного равноамплитудного распределения ( $\Delta=1$ ) и спадающего распределения с пьедесталом  $\Delta=0,1$  приведены на рис. 2.

Параметр  $\varepsilon$ , определяющий степень различия заданной и формируемой ДН – нормированное среднеквадратическое отклонение во всем диапазоне углов, определяется соотношением

$$\varepsilon = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} |F(\theta) - F_{зад}(\theta)|^2 \sin \theta d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} |F_{зад}(\theta)|^2 \sin \theta d\theta}. \quad (12)$$

Исследования проводились при следующих параметрах отражателя:  $f = 5,55\lambda_n$ ,  $L = 7,5\lambda_n$ , где  $\lambda_n$  – длина волны на нижней границе рабочего диапазона частот. Результаты исследований синтезируемого АФР и формируемых ДН для  $\Delta=1$  на частотах  $f_n$ ,  $2f_n$ ,  $4f_n$ ,  $8f_n$  приведены на рис. 3–6, где показаны амплитудные распределения и соответствующие ДН ЗА.

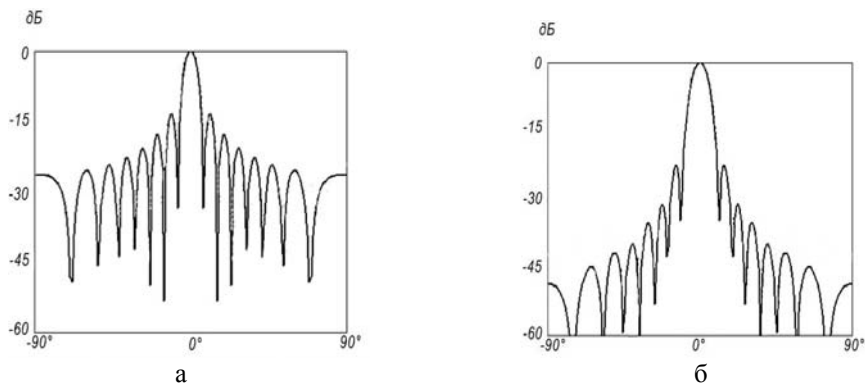


Рис. 2. ДН, формируемые на частоте  $f_n$ , принятые в качестве заданных для антенны с равномерным (а) и спадающим (б) распределениями токов для луча, формируемого вдоль нормали к раскрытию ЗА

Кривые синтезируемого фазового распределения не показаны. Величина  $\mathcal{E}$  при этом составляла 0,16–0,18. Параметр регуляризации  $\gamma$  выбран равным 1,05. Аналогичные результаты для косинусоидального распределения с  $\Delta=0,1$ , рассчитанные на частотах  $f_n, 2f_n, 4f_n, 8f_n$  приведены на рисунках 7–10, при этом величина  $\mathcal{E}$  составила 0,008.

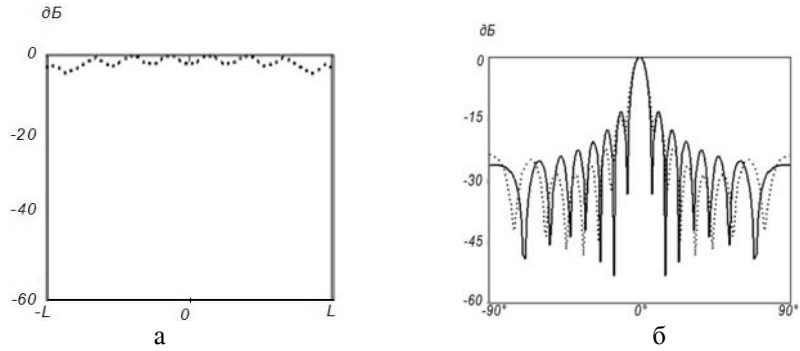


Рис. 3. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $f_n$ ,  $\Delta=1$

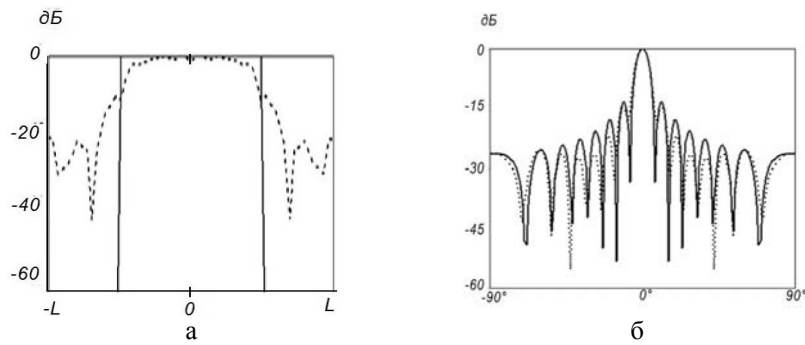


Рис. 4. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $2f_n$ ,  $\Delta=1$

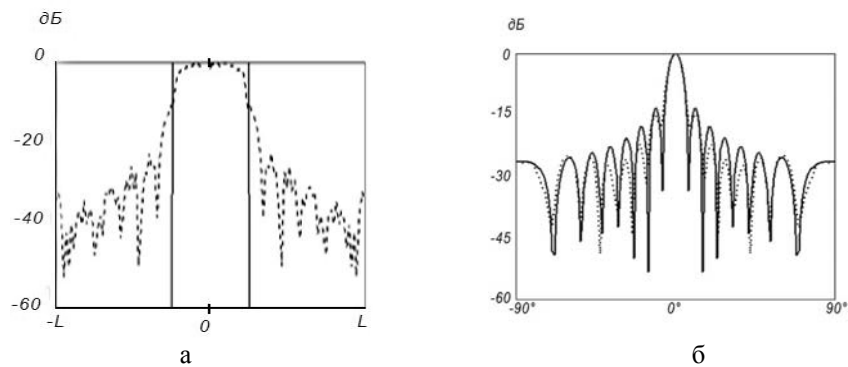


Рис. 5. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $4f_n$ ,  $\Delta=1$

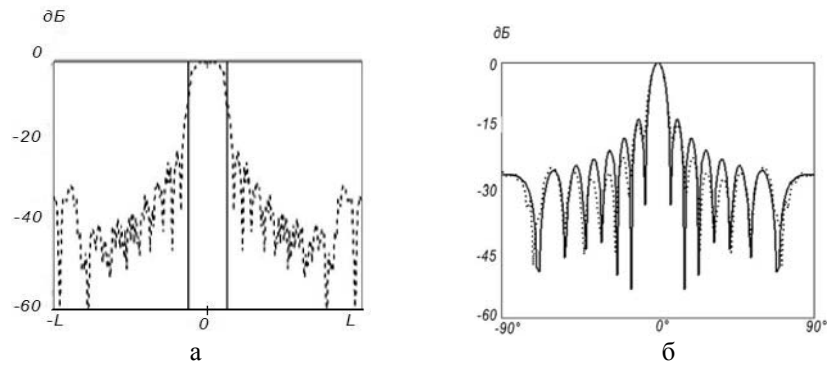


Рис. 6. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $8f_n$ ,  $\Delta=1$

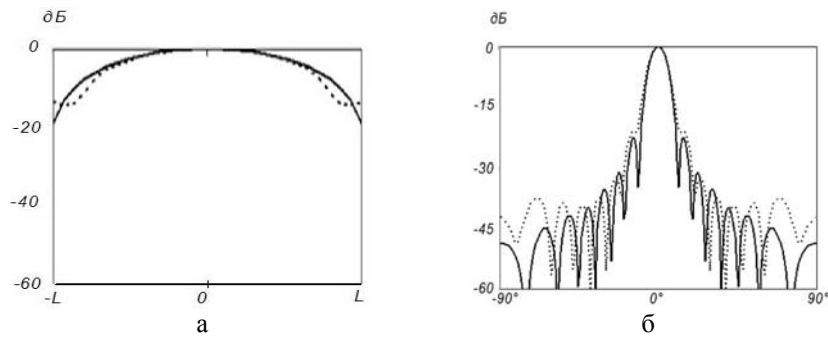


Рис. 7. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $f_n$ ,  $\Delta=0,1$

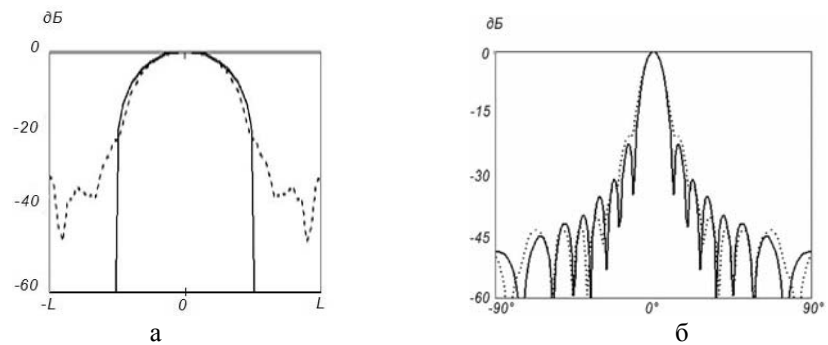


Рис. 8. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $2f_n$ ,  $\Delta=0,1$

Проведено также исследование АФР и ДН, формируемых антенной для луча, отклоненного на  $30^\circ$  от нормали к раскрытию ЗА для равноамплитудного распределения ( $\Delta=1$ ) и спадающего распределения с пьедесталом  $\Delta=0,1$ , заданные ДН которых приведены на рис. 11.

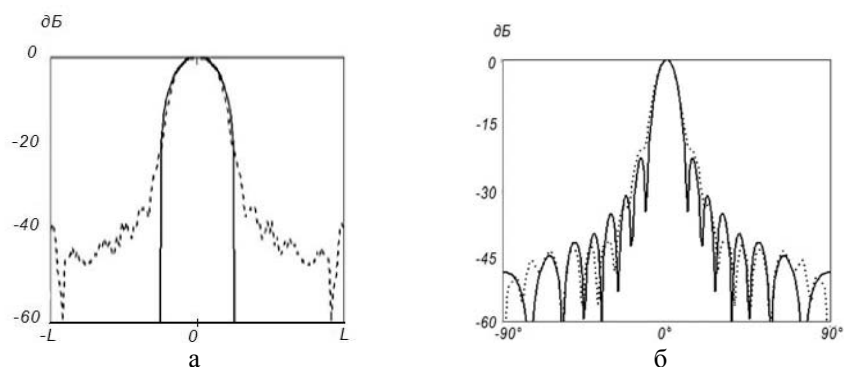


Рис. 9. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $4f_n$ ,  $\Delta=0,1$

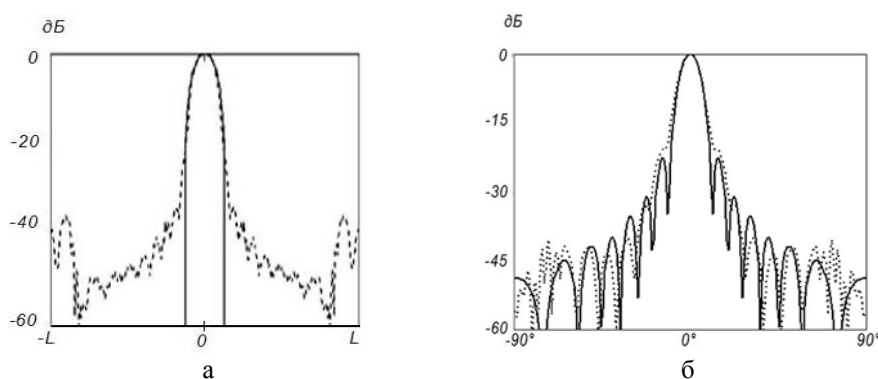


Рис. 10. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $8f_n$ ,  $\Delta=0,1$

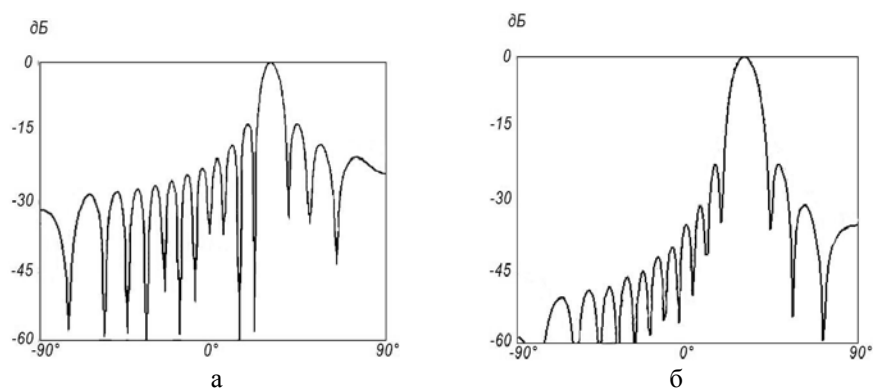


Рис. 11. ДН, формируемые на частоте  $f_n$ , принятые в качестве заданных для антенны с равномерным (а) и спадающим (б) распределениями токов для луча, отклоненного на  $30^\circ$  от нормали к раскрытию ЗА

На рис. 12–15 приведены результаты расчетов для луча, отклоненного на  $30^\circ$  от нормали к раскрытию ЗА для частот  $f_n$ ,  $2f_n$ ,  $4f_n$ ,  $8f_n$  соответственно при равноампли-

тудном распределении токов на поверхности отражателя. Величина параметра  $\mathcal{E}$  при этом составляла 0,029–0,031. Исследования проводились для той же геометрии зеркальной антенны, что для описанной выше.

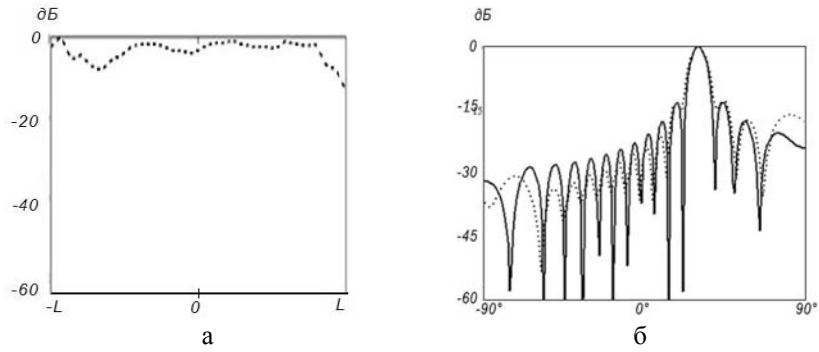


Рис. 12. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $f_n$ ,  $\Delta=1$

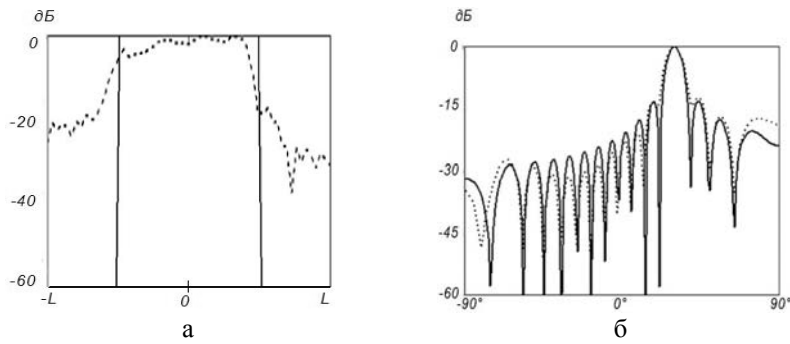


Рис. 13. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $2f_n$ ,  $\Delta=1$

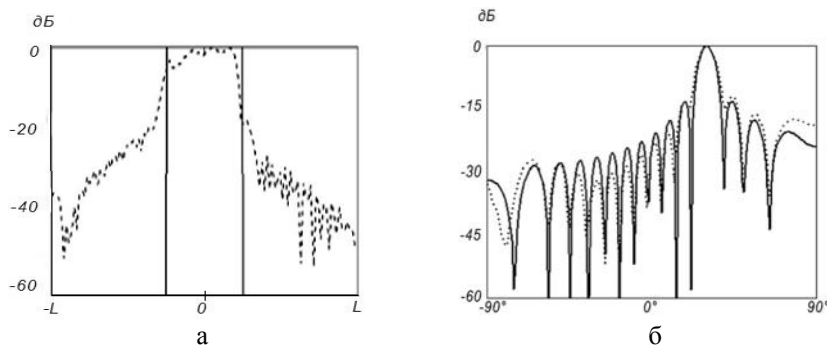


Рис. 14. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $4f_n$ ,  $\Delta=1$



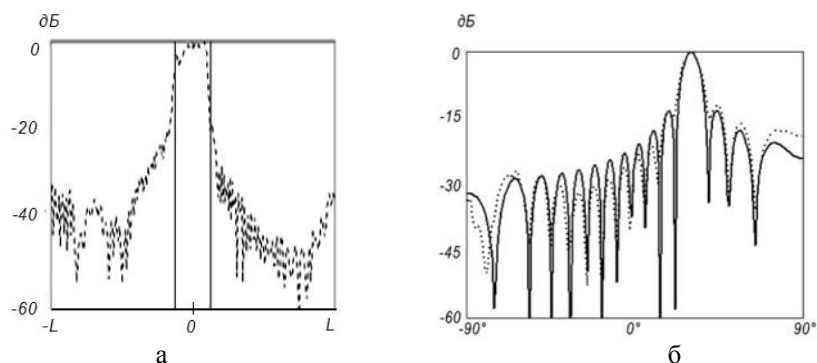


Рис. 15. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $8f_n$ ,  $\Delta=1$

Результаты расчета для отклоненного луча для ЗА с косинусоидальным распределением токов с пьедесталом  $\Delta=0,1$  приведены на рис. 16–19 для частот  $f_n$ ,  $2f_n$ ,  $4f_n$ ,  $8f_n$  соответственно, при этом величина  $\mathcal{E}$  составила 0,013–0,014. Параметр регуляризации  $\gamma$  выбран величиной, равной 1,05. Фазовые диаграммы и фазовые распределения токов не приведены.

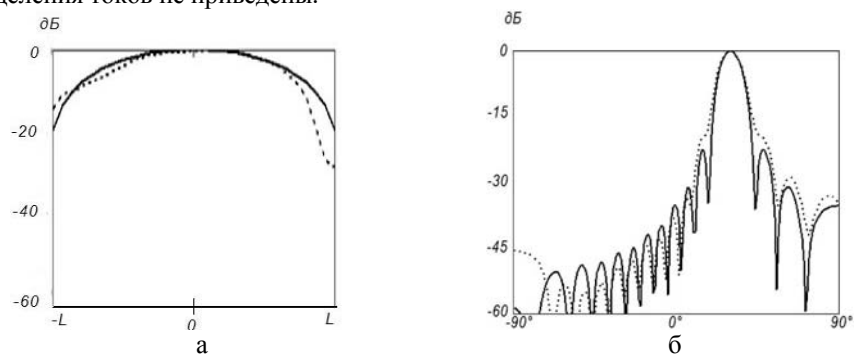


Рис. 16. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $f_n$ ,  $\Delta=0,1$

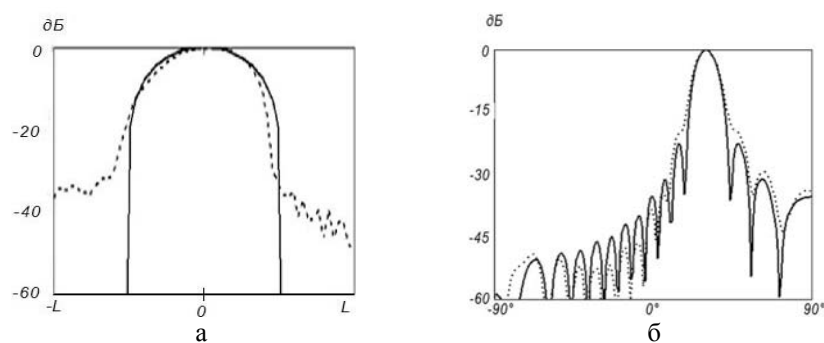


Рис. 17. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $2f_n$ ,  $\Delta=0,1$

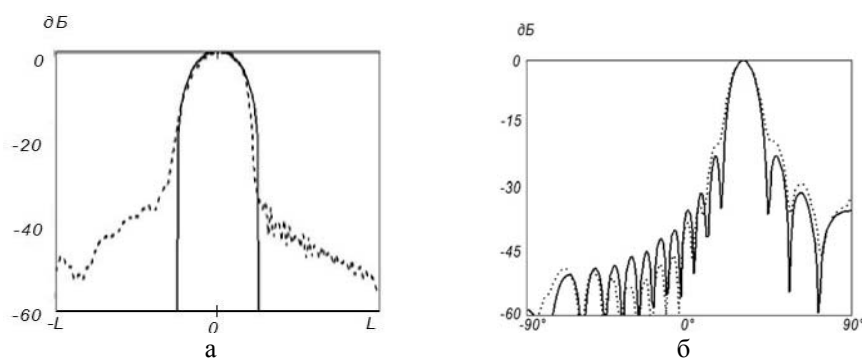


Рис. 18. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $4f_n$ ,  $\Delta=0,1$

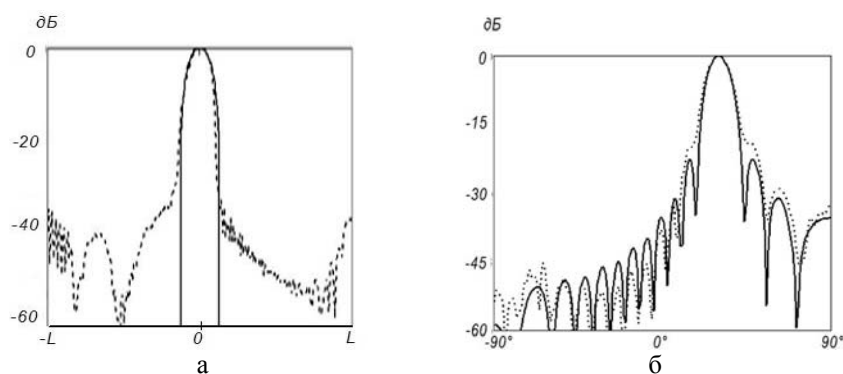


Рис. 19. Требуемое (сплошная линия) и синтезированное (пунктир) амплитудные распределения (а) и соответствующие (б) заданная ДН (сплошная линия) и формируемая ДН (пунктир) на частоте  $8f_n$ ,  $\Delta=0,1$

Приведенные результаты показывают достаточно хорошее совпадение формируемых ДН с заданными в области главного и первых боковых лепестков. В области дальнего бокового излучения несовпадение не превышает 3–5 дБ, что подтверждает возможность синтеза АФР на поверхности отражателя ЗА для формирования ДН с заданными с требуемой точностью параметрами. Важным является также возможность реализации такого АФР в широкой полосе частот, что обеспечивает решение задачи стабилизации характеристик ДН в сверхширокополосных зеркальных антеннах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролов О.П., Вальд В.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 496 с.
2. Бобков Н.И., Габриэлян Д.Д., Зелененко А.Т., Семенов В.Н., Стуров А.Г. Многолучевая зеркальная антенна для систем сверхширокополосной радиолокации. Сб. докладов V Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 21-25 ноября 2011 г. – С. 173-177.
3. Будагян И.Ф., Щучкин Г.Г. Моделирование характеристик излучения зеркальных антенн с корректирующим переменным импедансом // Антенны. – 2004. – № 12 (91). – С. 6-27.
4. Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф. Задачи синтеза антенн и методы их решения. Кн.1. – М.: ИПРЖР, 2002. – 72 с.

5. *Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф.* Синтез антенн на основе атомарных функций. Кн.2. – М.: ИПРЖР, 2003. – 72 с.
6. *Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д.* Синтез излучающих систем. Теория и методы расчета. – М.: Сов. радио, 1974.
7. *Васильев Е.Н.* Возбуждение тел вращения. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.
8. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. – 4-изд. – М.: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.В. Семенихина.

**Бобков Николай Иванович** – Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (ОАО «ВНИИ «Градиент»); e-mail: gradient@aanet.ru; 344010, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96; тел.: 88632348900, 88634131563; начальник сектора

**Пархоменко Николай Григорьевич** – тел.: 88632324770; генеральный директор.

**Габриэлян Дмитрий Давидович** – ФГУП «Федеральный научно-производственный центр РНИИРС»; 344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена 130; тел.: 88632508985, 88632956702; д.т.н.; профессор; зам. начальника НТК по науке.

**Bobkov Nikolay Ivanovich** – Joint Stock Company “All-Russian Scientific Research Institute “Gradient” (JSC “VNI“Gradient”); e-mail: gradient@aanet.ru; 96, Sokolov street, Rostov-on-Don, 344010, Russia; phones: +78632348900, +78634131563; the chief of research laboratory.

**Parkhomenko Nikolay Grigor’evich** – phone: +78632324770; director general.

**Gabrieljan Dmitriy Davidovich** – FSUE «Federal research and production center RNIIRS»; 130, Nansena street, Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +78632508985, +78632956702; dr. of eng. sc.; professor; the science assistant of the head of department.

УДК 629.7.028.6

**Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко, Д.А. Кардос**

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ**

*В последнее время разработка микрополосковых антенн проводится в направлении миниатюризации их конструкции. В работе представлена двухрезонансная антенна, состоящая из нескольких сегментов, одна часть антенны обеспечивает работу в нижнем поддиапазоне, другая – в верхнем. Исследование антенны выполнено в программной среде трехмерного электромагнитного моделирования FEKO (ядро OPTFEKO). В работе при решении задачи расширения рабочего диапазона конструкция антенны оптимизирована с использованием Simplex метода. Для поиска целевой функции применен метод моментов. В результате оптимизации достигнуты значения КСВ антенны ниже 2 во всем рабочем диапазоне за счет выбора точки питания без изменения ее габаритов. Частотные зависимости КСВ и входного сопротивления антенны представлены на графиках.*

*Микрополосковая антенна; коэффициент стоячей волны (КСВ); оптимизация.*

**N.N. Kisel', S.G. Grishchenko, D.A. Kardos**

### **OPTIMISATION DUAL-RESONANT PATCH ANTENNA**

*Development of small antennas has received a lot of attention during the last years due to size reduction of the devices. The antenna is based on the dual-resonant antenna structure reported. The studied antenna consists of three shorted patches, one for the lower band and two for the upper band. The antenna is fed by a probe. The antenna structure was designed and theoretically studied using FEKO (kernel OPTFEKO) based 3D electromagnetic simulation program. This*