

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ С РЕФЛЕКТОРОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

**М.С. Воробьев<sup>1</sup>, Л.П. Кудрин<sup>1</sup>, Р.Р. Салихов<sup>2</sup>, А.Б. Хашимов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск;

<sup>2</sup> ООО «НПО РТС», г. Челябинск

Задача проектирования антенной системы с заданными требованиями к полю излучения в вертикальной и горизонтальной плоскости решается комбинированным методом синтеза, включающим в себя формулировки как внешней, так и внутренней задачи. Для решения внешней задачи синтеза амплитудное распределение функции возбуждения антенной решетки считается известным, его вид определяется использованием широкополосных мостовых делителей. Реализация оптимального фазового распределения в виде отрезков фидерных линий приводит к необходимости учета неравномерности фазового распределения в заданной полосе частот. Требования к заданной диаграмме направленности в вертикальной плоскости учитываются с помощью функционала специального вида, в состав которого введены весовые коэффициенты для управления синтезируемым фазовым распределением. Решение внешней задачи синтеза формы рефлектора производится переходом к эквивалентной двумерной задаче. Численное решение интегрального уравнения I рода методом коллокаций используется для оптимизации функционала, который учитывает требования к полю излучения в горизонтальной плоскости. В методе коллокаций используются формулы Гаусса – Лежандра и эффективная организация вычислительного процесса. Полученные результаты показывают высокую эффективность и универсальность предложенного метода синтеза антенной системы.

*Ключевые слова:* диаграмма направленности, амплитудно-фазовое распределение, антенная решетка, рефлектор, оптимизация, интегральное уравнение.

Общая классификация задач синтеза антенных систем (АС) предполагает решение внешних и внутренних задач синтеза. Внешние задачи – синтез амплитудно-фазового распределения (АФР) возбуждения АС, формирующего диаграмму направленности (ДН) в дальней зоне. Эта ДН должна быть максимально приближена к заданной ДН в соответствии с выбранными критериями: допустимое отклонение в области главного лепестка (например, по критерию минимума среднеквадратичного отклонения); допустимое превышения уровня боковых лепестков в заданных угловых секторах (например, по минимаксному чебышевскому критерию). При этом часто заданная ДН относится к классу нереализуемых функций в пространствах  $L_2$  реальных ДН. Внешние задачи синтеза для широкого круга задач подробно рассмотрены в большом количестве работ, например [1, 2]. Отметим, что методы решения внешних задач должны учитывать специфические особенности соответствующих функционалов для непрерывных и дискретных АС. В частности, для дискретных АС (антенных решеток) необходим обоснованный выбор расстояния между излучателями антенной решетки, так как множитель направленности (МН) АС может содержать нежелательные максимумы в заданном секторе углов. Кроме того, в антенных решетках необходимо учитывать взаимное влияние между излучателями, которое может значительно искажать синтезированное АФР и приводить к рассогласованию входного импеданса АС в рабочей полосе частот.

Внутренние задачи синтеза, в отличие от внешних задач, формулируются значительно сложнее. Если для внешних задач характерна определенная степень формализации математических моделей (ММ) АС (например, вариационная формулировка задачи синтеза АФР криволинейного излучателя имеет одинаковый вид, как для электрических, так и магнитных эквивалентных токов), то для внутренних задач решение производится только для конкретной АС. В частности, синтез геометрии сложного рефлектора для вибраторных антенн производится для заданного объекта установки с учетом ограничений на массогабаритные характеристики. К внутренним задачам относятся также формирование синтезированного АФР, оптимизация всего волноводного

тракта для заданных ограничений в частотной области. Все эти вопросы решаются индивидуально для конкретного типа проектируемой АС. Отметим, что внутренние задачи синтеза АС часто относятся к классу нелинейных задач.

Сформулируем задачу проектирования АС радионавигационной системы со следующими параметрами: рабочая полоса частот – 960...1215 МГц; поляризация поля излучения – вертикальная; ширина ДН в горизонтальной плоскости –  $70^\circ$ , уровень обратного излучения – не более  $-25$  дБ; ДН в вертикальной плоскости должна быть близка к косекансной ДН (рис. 1), где  $\theta$  – угол места, который отсчитывается от нормали к оси антенной решетки; коэффициент усиления – не менее 14 дБ относительно изотропного излучателя; ограничения к габаритам – высота АС не должна превышать 1800 мм, ширина – не более 350 мм.

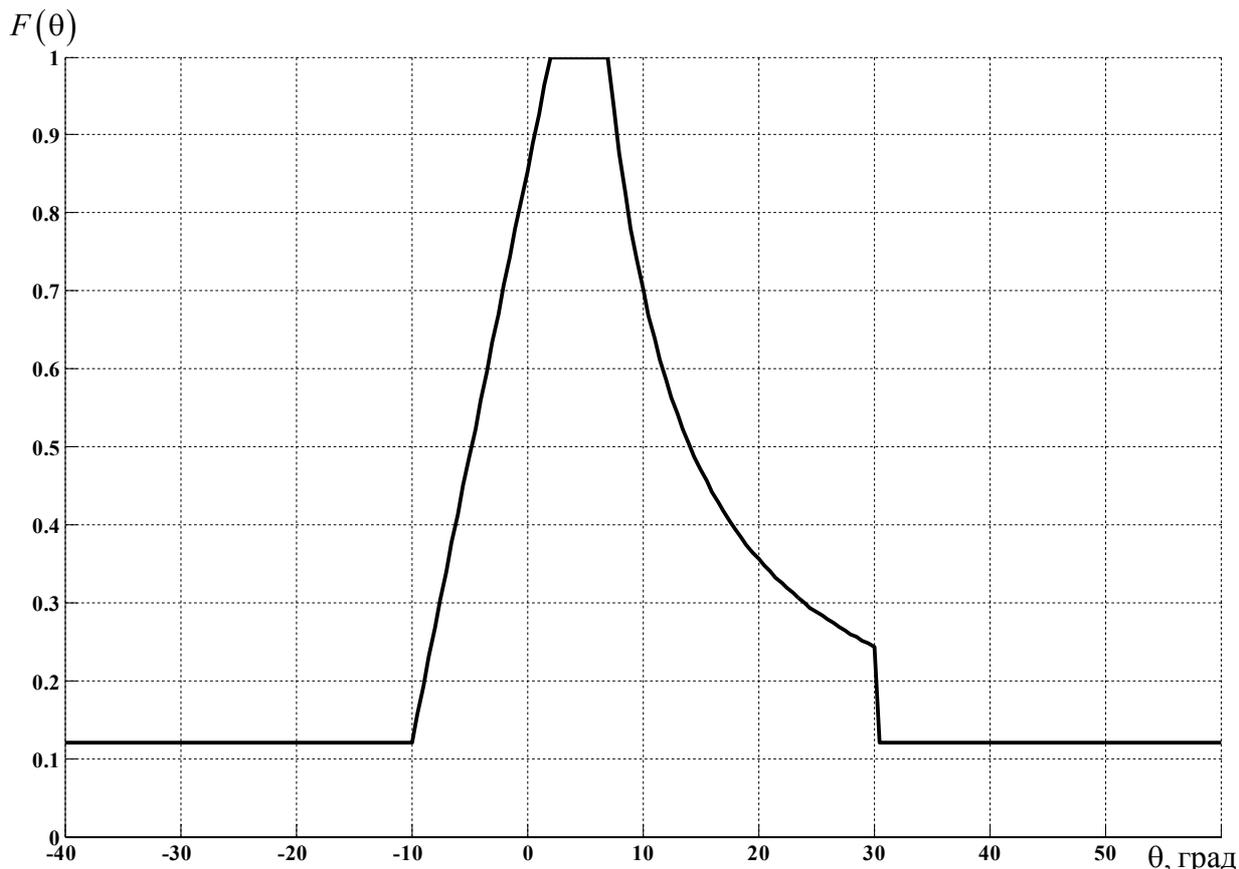


Рис. 1. Требования к ДН АС в вертикальной плоскости

На первом этапе рассмотрим решение внешней задачи синтеза. С учетом ограничений на габариты наиболее рациональный и достаточно просто реализуемый вариант построения АС заключается в выборе линейной антенной решетки, состоящей из восьми излучателей. Известные рекомендации [3] по выбору расстояния  $d$  между излучателями ( $0,5\lambda < d < \lambda$ ), гарантирующего отсутствие побочных дифракционных максимумов в МН антенной решетки, позволяет выбрать начальное значение  $d \approx 0,7\lambda_{cp}$ , где  $\lambda_{cp}$  – средняя длина волны частотного диапазона. Это значение в дальнейшей процедуре синтеза можно варьировать, но в небольших пределах. В качестве излучателей АС выберем полуволновые широкополосные вибраторы вертикальной поляризации. Такие излучатели широко используются на практике в диапазоне от метровых до сантиметровых волн, так как они обладают хорошими массогабаритными характеристиками, а их конструкции являются технологичными и не требуют дорогостоящих материалов. Для линейной антенной решетки необходима диаграммообразующая схема (ДОС), которая обеспечивает деление сигнала от общего входа к излучателям АС. Наиболее распространенный вариант построения ДОС – схема деления, состоящая из ряда делителей-мостов (синфазных или квадратурных), соединенных

отрезками фидерных линий. Основная функция ДОС – обеспечение АФР возбуждения излучателей в полосе частот, при котором ДН АС в наибольшей степени приближена к заданной ДН. Такая схема деления предполагает, что амплитудное распределение возбуждения принимается фиксированным, а необходимое фазовое распределение обеспечивается выбором длин соответствующих фидерных линий. Недостаток такой ДОС – существенная частотная зависимость фазовых распределений, особенно для широкополосных АС. Необходимо отметить, что частотные характеристики коэффициентов матрицы рассеяния для большинства современных мостов достаточно стабильны в широкой полосе частот, поэтому вариации фазовых распределений в полосе частот в основном вызываются частотными свойствами отрезков фидерных линий. К достоинству ДОС с мостами, входы которых соединяются отрезками микрополосковых линий, относится компактность планарных СВЧ узлов, топологические параметры которых хорошо совместимы с общей конструкцией АС. Общие рекомендации по выбору амплитудного распределения, соответствующего заданной ДН, требуют выбора спадающего к краям АС амплитуд возбуждения излучателей. С учетом свойств мостов-делителей такое амплитудное распределение реализуется достаточно просто.

Таким образом, основными варьируемыми параметрами внешней задачи синтеза являются фазы излучателей антенной решетки. В отличие от обычной задачи синтеза фазовых распределений для фазированных антенных решеток, обеспечивающих сканирование ДН, для проектируемой АС необходимо формировать статичную ДН. Следовательно, здесь нет необходимости использования управляемых фазовращателей, поэтому синтезированное фазовое распределение можно реализовать с помощью отрезков фидерных линий, что значительно упрощает конструкцию АС. Отметим, что такая ДОС требует контроля изменения поля излучения в процедуре синтеза во всей заданной полосе частот.

Общее выражение для МН линейной антенной решетки в вертикальной плоскости выглядит следующим образом [3]:

$$f_{\Sigma}(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n \exp[i(\psi_n + kz_n \cos\theta)], \quad (1)$$

где  $N$  – количество излучателей;  $I_n \exp(i\psi_n)$  – АФР возбуждения антенной решетки;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $z_n$  – координаты излучателей, ось антенной решетки совпадает с осью  $z$ . Тогда поле излучения антенной решетки в дальней зоне принимает следующий вид [1]:

$$\mathbf{E}(\theta) = \mathbf{i}_z U_{\text{вх}} F_{\text{изл}}(\theta) f_{\Sigma}(\theta) \frac{\exp(-ikr)}{r}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{вх}}$  – амплитуда напряжения на входе ДОС;  $F_{\text{изл}}(\theta)$  – ДН излучателя антенной решетки, последний множитель указывает на сферический характер поля излучения в дальней зоне. Будем считать, что ДН излучателя в вертикальной плоскости определяется как ДН полуволнового вибратора над идеально проводящим бесконечным экраном. Такое допущение широко используется в практике синтеза АФР возбуждения антенных решеток, особенно для протяженных рефлекторов. Кроме того, в процедуре синтеза не будем учитывать взаимное влияние излучателей антенной решетки. Очевидно, что эти допущения могут приводить к отличию синтезированных ДН от реальных, поэтому в конструкции АС необходимо предусмотреть возможность коррекции расчетных функций возбуждения.

Синтез фазового распределения будем проводить на частоте  $f_{\text{cp}}$ . Сформируем целевую функцию следующего вида [1]:

$$\Phi(\boldsymbol{\psi}) = \int_{\theta_{\text{csc}}} |F(\theta) - F^*(\theta)|^2 d\theta + p \int_{\pi \theta_{\text{csc}}} [F(\theta) - F^*(\theta)]^+ d\theta \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $\boldsymbol{\psi}$  – вектор фазового распределения;  $F(\theta)$  – ДН антенной решетки в вертикальной плоскости, определяемая из выражения (2);  $F^*(\theta)$  – заданная ДН в вертикальной плоскости;  $\theta_{\text{csc}}$  – угловой сектор, в пределах которого необходимо обеспечить косекансную ДН;  $p$  – весовой коэффициент, регулирующий вклад в целевую функцию отклонений в различных угловых областях;

знак «+» во втором слагаемом означает интегрирование функции, образованной только при превышении заданной ДН. Для минимизации целевой функции (3) была использована программа *fminsearch* [4], реализующая метод деформируемого многогранника Нелдера–Мида. Эта программа наиболее удобна для целевых функций вида (3), так как использование методов квадратичного программирования здесь неэффективно в силу сложной аппроксимации частных производных и матрицы Гессе функционала (3).

На рис. 2 приведены ДН АС в вертикальной плоскости на трех частотах  $f_n, f_{cp}, f_v$  и заданная ДН. Сравнение этих ДН показывает, что требования к полю излучения в основном выполнены. Отличия ДН АС диктуются, прежде всего, заранее определенным фиксированным амплитудным распределением, вид которого может в значительной степени отличаться от оптимального. С другой стороны, если допустить возможность вариации амплитудного распределения, то результаты решения задачи синтеза в большинстве случаев невозможно реализовать практически. Это связано с ограниченными возможностями построения регулируемых амплитудных делителей. Тогда предварительный выбор реализуемого (но не оптимального) амплитудного распределения и синтез только фазового распределения в практике проектирования антенных решеток является наиболее рациональным. Но при этом степень приближения поля излучения АС к заданному виду может значительно уступать результатам решения задачи синтеза полного АФР [2].

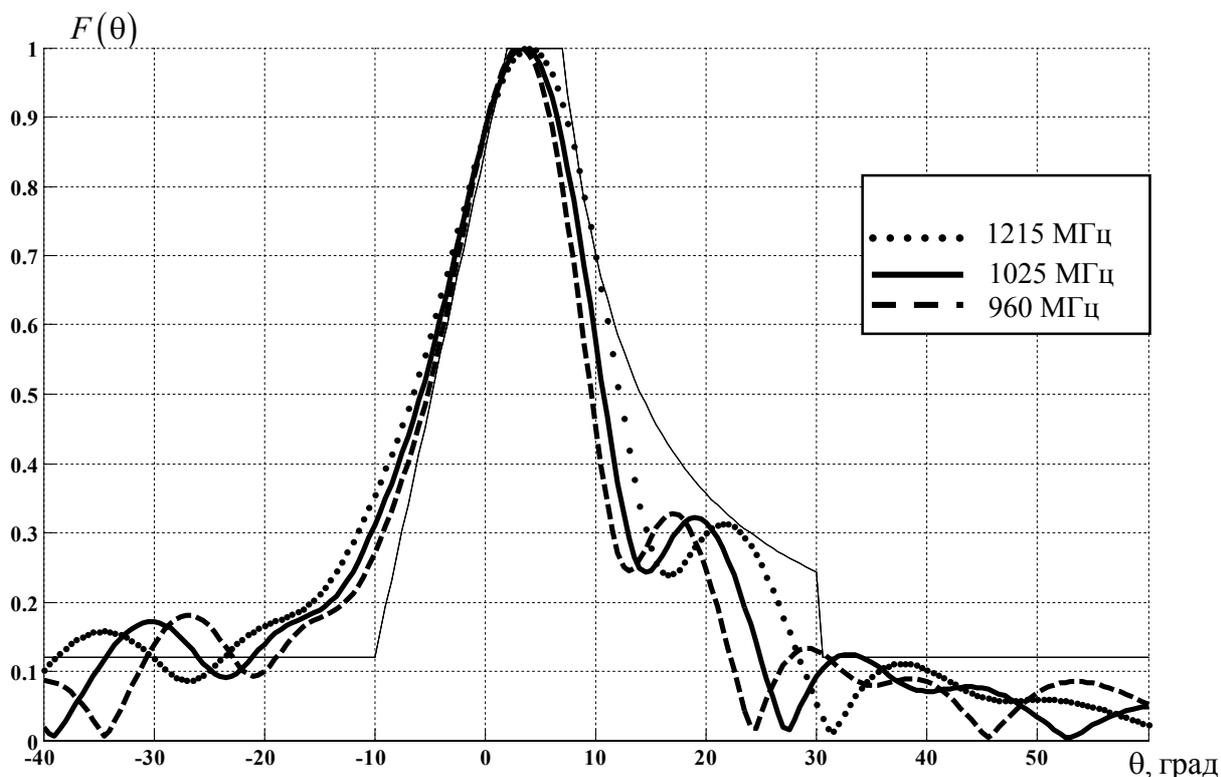


Рис. 2. Синтезированные ДН АС в вертикальной плоскости

На втором этапе будем решать задачу определения геометрии АС в плоскости поперечного сечения, что относится к внешним задачам синтеза [1]. Требования к ДН в горизонтальной плоскости предполагают введения в конструкцию АС рефлектора, форма и размеры которого должны быть определены с учетом заданных ограничений. Для заданной поляризации поля излучения с учетом основных результатов работ [5, 6] возможен переход к решению более простой двумерной задачи. Построение ММ АС в этом случае отличает меньшая размерность дискретного представления дифракционной задачи, к которой сводится взаимодействие излучающих элементов и рефлектора АС. Подчеркнем, что основные закономерности, полученные для таких задач, остаются справедливыми и для общего векторного трехмерного случая. Общий подход к решению дифракционных задач для сред с плоскостной симметрией (существует направление в простран-

стве, вдоль которого характеристики среды не меняются, все поверхности разрыва – цилиндрические бесконечно-протяженные поверхности с параллельными образующими) заключается в скаляризации исходной электродинамической задачи уже на этапе ее постановки. Такое понижение размерности задачи (переход от векторного интегрального уравнения по объему к скалярному по плоской области) очень эффективно, прежде всего, в вычислительном плане. Будем рассматривать ММ АС в горизонтальной плоскости в виде нити электрического тока  $I$ , расположенной над замкнутым контуром  $L$  (рис. 3). Пусть образующие контура параллельны оси  $z$ . Будем считать, что контур  $L$  удовлетворяет условию Ляпунова: для двух точек на контуре  $p(x_p, y_p)$ ,  $q(x_q, y_q)$  и векторов нормалей к этим точкам  $\mathbf{n}_p, \mathbf{n}_q$  существуют числа  $c$  и  $0 < \alpha \leq 1$ , такие, что

$$|\mathbf{n}_p - \mathbf{n}_q| \leq c|p - q|^\alpha, \quad p, q \in L. \quad (4)$$

Это означает, что контуры Ляпунова содержатся в классе функций гладкости  $C^1$ , а вектор нормали непрерывен в смысле Гельдера.

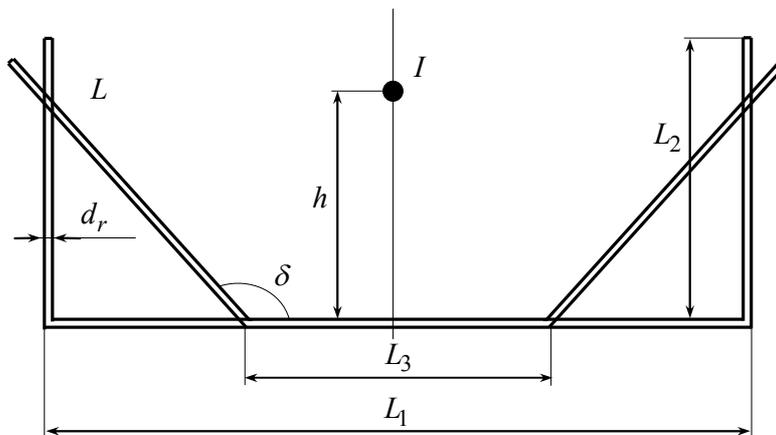


Рис. 3. Геометрия профиля рефлектора АС

Тогда для  $E$ -поляризации поля излучения с учетом граничных условий на контуре  $L$  получим следующее интегральное уравнение I рода:

$$\int_L j_s(q) H_0^{(2)}(kr_{pq}) dl_q = -IH_0^{(2)}(kr_{ps}), \quad (5)$$

где  $j_s(q)$  –  $z$ -составляющая распределения тока на контуре  $L$ ;  $H_0^{(2)}(kr_{pq})$  – функция Ганкеля второго рода нулевого порядка аргумента  $kr_{pq}$ ;  $r_{pq} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}$  – расстояние между точками наблюдения  $p$  и интегрирования  $q$ ,  $p, q \in L$ ;  $I$  – АФР тока источника;  $s$  – точка, в которой расположен источник поля возбуждения. Численное решение уравнения (5), которое относится к классу некорректных задач, позволяет определить поле рассеяния на контуре  $L$ , которое совместно с полем источника дает возможность рассчитать ДН АС в горизонтальной плоскости.

Принципиальное значение в численном решении уравнения (5) имеет выделение особенности при вычислении ядра, так как при совпадении координат точек  $p, q$  мнимая часть функции Ганкеля стремится к  $-\infty$ . Известные асимптотические оценки [7] позволяют получить общие квадратурные соотношения для редукции интегрального уравнения (5) к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Такой подход приводит к разным несогласованным оценкам точности вычислений коэффициентов СЛАУ, особенно для неравномерной дискретизации контура  $L$ . Например, для численного решения (5) методом коллокаций использование квадратурных формул Гаусса – Лежандра позволяет получить оценки относительной погрешности вычислений  $\sim 10^{-7}$  для интервалов дискретизации, не принадлежащих точкам особенности. В то же время интегрирование асимптотического приближения функции Ганкеля не гарантирует такой

же погрешности, что ведет к росту общей погрешности решения уравнения (5). В работе [7] предложен прямой численный метод обработки квадратурных выражений с особенностями на основе формул Гаусса–Лежандра, с повышенным (28...32) числом узлов, без использования асимптотических приближений ядра интегрального уравнения. Показано, что коэффициенты СЛАУ согласованы в смысле однородной процедуры численного интегрирования, при этом формирование матрицы СЛАУ сокращается на 15...18 %. Повышение эффективности численного решения (5) связано, в первую очередь, с рациональной организацией вложенных циклов при переборе точек и отсутствием логических операций *if* при выделении особенности [4].

В качестве исходного варианта для синтеза формы рефлектора АС выберем плоский экран шириной  $L_1 = 200$  мм, толщина  $d_r = 3$  мм (см. рис. 3). Для такого рефлектора известно аналитическое решение в виде бесконечных рядов по функциям эллиптического цилиндра Матье, Матье–Бесселя, Матье–Ганкеля. Это решение может служить тестовым для численного решения уравнения (5) предложенным методом. На рис. 4 приведена ДН АС с таким рефлектором (штриховая линия). Отличие численного решения (5) от аналитического решения при числе узлов дискретизации  $N = 168$  контура  $L$  составляет 0,02 %. Результаты численного решения показывают, что такая конфигурация рефлектора не удовлетворяет заданным требованиям как по ширине ДН в горизонтальной плоскости, так и по уровню излучения в обратном направлении. Одним из вариантов изменения ДН является трансформация профиля рефлектора к резонаторной форме в виде прямоугольного желоба (см. рис. 3).

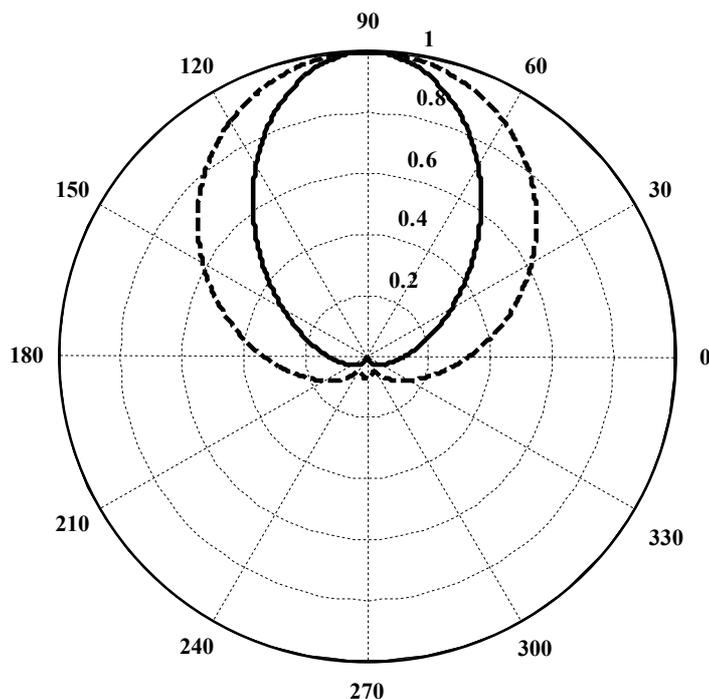


Рис. 4. ДН в горизонтальной плоскости

На рис. 4 (сплошная линия) приведена ДН АС, которая уже значительно отличается от первоначального варианта, но еще не удовлетворяет заданным требованиям по ширине ДН. Расчеты проведены для размеров  $L_1 = 210$  мм,  $L_2 = 105$  мм при той же толщине рефлектора. Дальнейшая оптимизация формы рефлектора проводилась для следующих изменяемых параметров: размер  $L_1$ , угол  $\delta$  между боковой стенкой и основанием рефлектора, так как размер  $L_2$  удовлетворяет требованиям конструкторско-технологического проектирования. Использование программы *fminsearch* позволило получить результаты, приведенные на рис. 5. Необходимо подчеркнуть, что функционал оптимизации включает в себя решение интегрального уравнения (5) на каждом

шаге, поэтому особую важность приобретают численные методы повышенного быстродействия. Расчеты ДН в горизонтальной плоскости получены для следующих параметров:  $L_3 = 100$  мм;  $\delta = 120^\circ$ , эти параметры незначительно отличаются от оптимальных и приведены к значениям, соответствующих технологическим требованиям изготовления АС.

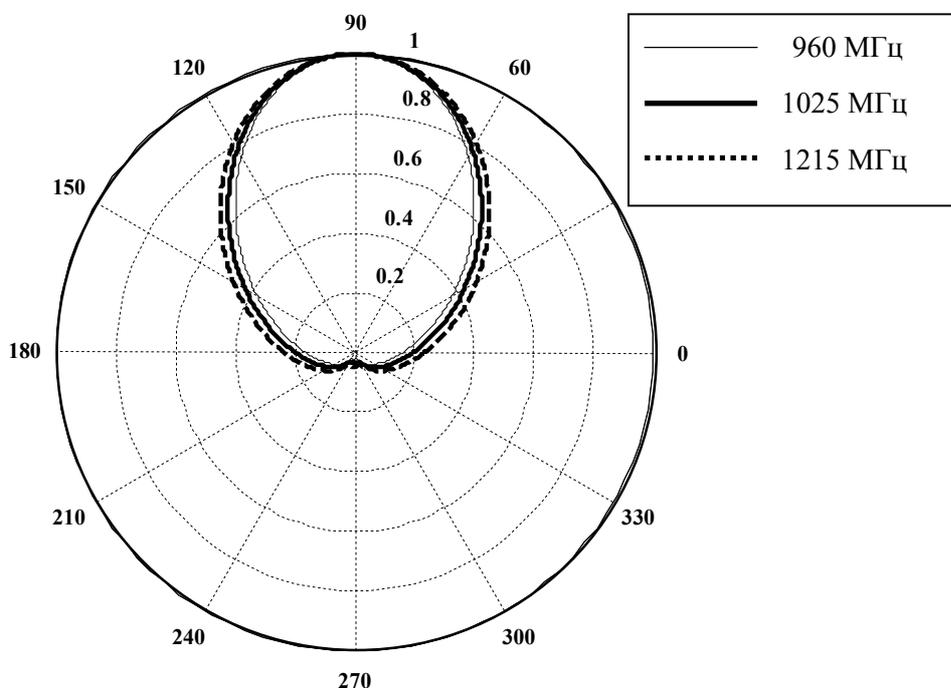


Рис. 5. ДН АС в горизонтальной плоскости

Сравнение ДН в горизонтальной плоскости (см. рис. 5) показывает, что заданные требования к полю излучения полностью выполнены для всей рабочей полосы частот. Действительная ДН, соответствующая реальному излучателю АС, может незначительно отличаться от расчетных ДН, но основные характеристики поля излучения останутся стабильными для ММ. Это связано с регулирующим, сглаживающим характером интегральных операторов рассматриваемой задачи синтеза.

### Выводы

1. Использование фиксированного амплитудного распределения и синтез только фазового распределения обеспечивает простой, легко реализуемый на практике вариант построения функции возбуждения АС для расчета ДН в вертикальной плоскости. Для такого подхода особую важность имеют вопросы контроля ДН для всего заданного частотного диапазона, так как использование фазированных элементов в виде отрезков фидерных линий имеет частотно-зависимый характер. Функционал специального вида (3) позволяет гибко реагировать на изменение формы ДН в разных угловых областях.

2. Синтез формы рефлектора в плоскости поперечного сечения с использованием редукции к двумерной задаче приводит к решению интегрального уравнения I рода. Использование высокоэффективных численных процедур решения такого уравнения позволяет использовать его в формировании функционала для оптимизации формы двумерного контура.

3. Полученные результаты синтеза АФР и геометрии АС показывают высокую эффективность и универсальность предложенных ММ, которые могут быть использованы и для более сложных требований к полю излучения.

### Литература

1. Зелкин, Е.Г. Методы синтеза антенн. Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием / Е.Г. Зелкин, В.Г. Соколов. – М.: Советское радио, 1980. – 296 с.
2. Хансен, Р.С. Фазированные антенные решетки / Р.С. Хансен. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
3. Неганов, В.А. Устройства СВЧ и антенны. Ч. II. Теория и техника антенн / В.А. Неганов, Д.С. Клюев, Д.П. Табаков. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 728 с.
4. Ануфриев, И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
5. Войтович, Н.И. О соответствии асимптотических решений двумерных и трехмерных задач в антенной технике / Н.И. Войтович, А.Б. Хашимов // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55, № 12. – С.1471–1476.
6. Войтович Н.И. Обобщенные математические модели антенн радионавигационных систем / Н.И. Войтович, А.Б. Хашимов // Антенны. – 2014. – № 1 (200). – С. 8–14.
7. Хашимов, А.Б. Применение вычислительных схем повышенной точности в проектировании антенных систем / А.Б. Хашимов, Р.Р. Салихов, Р.С. Альметов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2014. – Т.3, № 2. – С. 77–91.

**Воробьев Михаил Степанович**, канд. техн. наук, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vms@drts.susu.ac.ru.

**Кудрин Леонид Петрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; klp@kipr.susu.ac.ru.

**Салихов Ринат Рафикович**, главный конструктор ООО «НПО РТС», г. Челябинск; salihov@nports.ru.

**Хашимов Амур Бариевич**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; xab@kipr.susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 13 марта 2015 г.

DOI: 10.14529/ctcr150202

## COMBINED METHOD OF SYNTHESIS OF THE ANTENNA SYSTEM WITH COMPLEX SHAPE REFLECTOR

**M.S. Vorob'ev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, vms@drts.susu.ac.ru,  
**L.P. Kudrin**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, klp@kipr.susu.ac.ru,  
**R.R. Salikhov**, JSC "NPO RTS", Chelyabinsk, Russian Federation, salihov@nports.ru,  
**A.B. Khashimov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, xab@kipr.susu.ac.ru

The problem of design an antenna system with given requirements for the radiation field in the vertical and the horizontal plane is formulated as the combined method of synthesis, involving both external and internal problems. For solving the external problem of synthesis an amplitude distribution of the antenna array excitation is assumed known. The form of an amplitude distribution is determined by using broadband power dividers. Implementation optimal phase distribution as segments of feeder lines leads to the necessity of considering the uneven phase distribution in a given frequency band. The requirements for a given radiation pattern in the vertical plane are taken into account by using a special kind of functional, with the weighting coefficients in structure to control the synthesized phase distribution. Solution of the external problem of reflector shape synthesis is made by

conversion to an equivalent two-dimensional problem. The numerical solution of the integral equation of the I kind by collocation method is used to optimize the functional that takes into account the requirements of the radiation field in the horizontal plane. In the collocation method used the Gauss-Legendre formulas and effective procedures of the computing process. The results show the high efficiency and versatility of the proposed method for synthesis of the antenna system.

*Keywords:* pattern, amplitude-phase distribution, antenna array, reflector, optimization, integral equation.

### References

1. Zelkin E.G., Sokolov V.G. *Metody sinteza antenn. Fazirovannye antennye reshetki i anteny s nepreryvnym raskryvom* [Methods of an Antenna Synthesis. Phased Arrays and Continuous Aperture Antennas]. Moscow, Soviet Radio, 1980. 296 p.
2. Khansen R.S. *Fazirovannye antennye reshetki* [Phased Arrays]. Moscow, Tekhnosfera, 2012. 560 p.
3. Neganov V.A., Klyuev D.S., Tabakov D.P. *Ustroystva SVCH i anteny. Ch. II. Teoriya i tekhnika antenn* [UHV Devices and Antennas. Part II. Theory and Practice of Antennas]. Moscow, LENAND, 2014. 728 p.
4. Anufriev I.E., Smirnov A.B., Smirnova E.N. *MATLAB 7* [Matlab 7]. St. Peterburg, BHV-Peterburg Publ., 2005. 1104 p.
5. Voitovich N.I., Khashimov A.B. [On the Correspondence of Asymptotic Solutions to 2D and 3D Problems in Antenna Engineering]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, vol. 55, no. 12, pp. 1374–1379. (in Russ.) DOI: 10.1134/S1064226910120077
6. Voitovich N.I., Khashimov A.B. [Generalized Mathematical Models of Navigation System]. *Antennas*, 2014, no. 1 (200), pp. 8–14.
7. Khashimov A.B., Salikhov R.R., Al'metov R.S. [Using of High Precision Numerical Techniques for Antenna System Design]. *Bulletin of the South Ural State University, Series Computational Mathematics and Software Engineering*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 77–91.

*Received 13 March 2015*

---

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Комбинированный метод синтеза антенной системы с рефлектором сложной формы / М.С. Воробьев, Л.П. Кудрин, Р.Р. Салихов, А.Б. Хашимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 12–20. DOI: 10.14529/ctcr150202

### REFERENCE TO ARTICLE

Vorob'ev M.S., Kudrin L.P., Salikhov R.R., Khashimov A.B. Combined Method of Synthesis of the Antenna System with Complex Shape Reflector. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 12–20. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr150202