

УДК 621.396.677

В. И. Литун, В. Н. Митрохин

**АППРОКСИМАЦИЯ ОБРАЗУЮЩЕЙ
КУПОЛЬНО-ЛИНЗОВОЙ АНТЕННЫ**

Описан метод аппроксимации оптимальной образующей купольно-линзовой антенны фиксированной толщины с постоянным коэффициентом увеличения угла сканирования. Приведена оценка точности сохранения формы.

E-mail: v.i.litun@gmail.com

Ключевые слова: купольная линзовая антенна сверхширокоугольное сканирование.

Для расширения диапазона углов сканирования плоских антенных решеток их можно совмещать с пассивными устройствами оптического типа. Теоретическая и конструкторская проработка гибридных линзовых антенн (ГЛА), обеспечивающих сверхширокоугольное сканирование луча, наиболее активно велась во второй половине 1970-х и начале 1980-х годов [1].

Состоит ГЛА из первичного источника поля, функции которого могут выполнять фазированная антенная решетка (ФАР), активная ФАР или цифровая антенная решетка [2], и купольной линзы (КЛ) (рис. 1). Более точно отражая особенности построения описанной системы, ее можно называть купольно-линзовой антенной (КЛА).

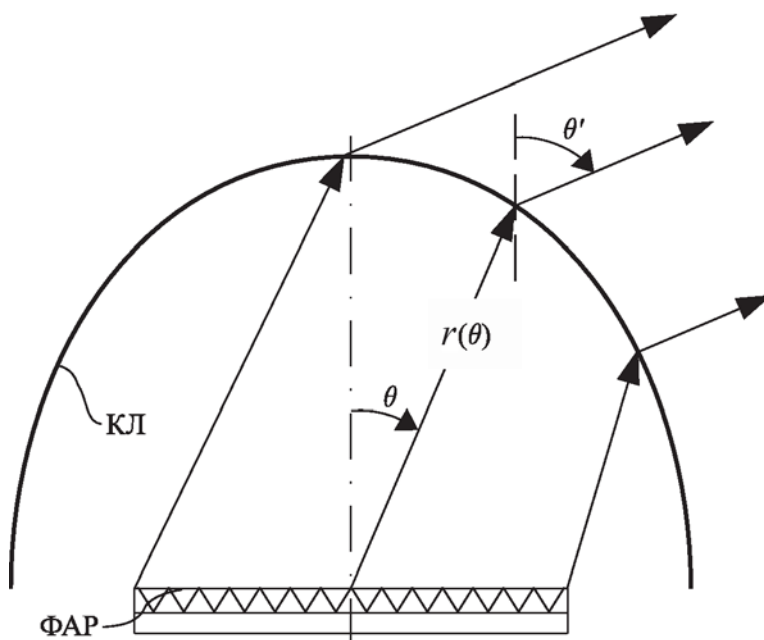


Рис. 1. Лучевая схема распространения поля в КЛА

Стоит отметить, что КЛ находится в ближней зоне первичной решетки, но в дальней по отношению к каждому отдельному ее элементу. Принцип функционирования состоит в том, что у рассеивающей линзы каждый участок выполняет роль призмы, осуществляя преломление лучей. Таким образом реализуется увеличение сектора сканирования плоской антенной решетки. Вместе с тем происходит снижение коэффициента усиления (КУ), произведение усредненного (по сектору сканирования) значения которого на значение сектора сканирования определяется числом управляющих элементов.

Конструктивно КЛ классифицируются на дискретные (волноводные и коаксиально-дипольные) и непрерывные (диэлектрические). В сантиметровом диапазоне волн применимы линзы обоих классов, но в случае проектирования линзы большого электрического размера с габаритами порядка 1 м и более, приоритет отдается дискретным волноводным КЛ ввиду их преимуществ по технологическим и массогабаритным показателям. Диэлектрические КЛ максимально эффективны в миллиметровом диапазоне и коротковолновой части сантиметрового диапазона волн при условии относительно небольших геометрических размеров. Структура дискретной КЛ приведена на рис. 2. Возможны варианты ее построения как с фиксированными фазосдвигающими секциями, так и с управляемыми фазовращателями.

Аналитический обзор, включающий в себя большое количество информации об антеннах с купольными линзами различных конструкций, приведен в работе [3].

Купольно-линзовые антенны проигрывают выпуклым ФАР по ширине рабочей полосы частот, точности установки луча и контроля диаграммы направленности (ДН). Кроме того, ниже и их КУ, но коэффициент использования излучателей (задействованности их в формировании ДН) максимален. Иначе говоря, КЛА позволяют реализовать

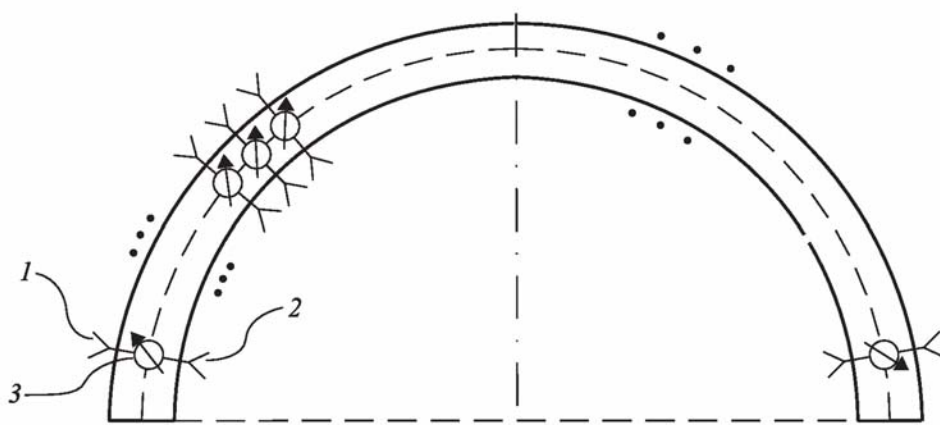


Рис. 2. Структура дискретной КЛ:

1 — наружный излучатель; 2 — внутренний излучатель; 3 — фазосдвигающая секция

сверхширокоугольное сканирование при минимальном числе управляющих элементов. При использовании приемопередающих модулей активных ФАР (достаточно дорогостоящих и чувствительных к внешним воздействиям) для построения первичной антенной решетки КЛ способна обеспечить их защиту от механических воздействий и условий окружающей среды [2].

Форма образующей поверхности является важным параметром КЛ, оказывая влияние на потенциальные возможности сканирования луча и распределение фазовых задержек для обеспечения требуемого коэффициента увеличения угла сканирования (КУУС). Под КУУС понимается отношение угла отклонения от оси системы преломленного луча θ' к исходному углу отклонения θ $K(\theta) = \theta'/\theta$ (см. рис. 1). В работе [4] отмечается, что одного и того же сектора сканирования можно добиться при использовании КЛ в виде полусферы или же поверхности более сложной формы, причем во втором случае максимальное значение требуемой фазовой задержки, вносимой линзой, будет меньше.

Задача нахождения оптимальной образующей линзы фиксированной толщины была поставлена и решена в работе [1]. В качестве критерия оптимизации было выбрано достижение максимума плотности потока мощности в заданном направлении на множестве возможных профилей КЛ. Полученная зависимость для постоянного КУУС $K(\theta) = K = \text{const}$ имеет следующий вид:

$$r(\theta) = R_0 \left[\cos \left(\frac{K-1}{2} \theta \right) \right]^{\frac{2}{K-1}},$$

где R_0 — высота линзы.

Контроль сложной формы поверхности волноводной КЛ является непростой задачей с технологической точки зрения. Предпочтительнее было бы использование простых форм.

Предлагается для аппроксимации оптимальной поверхности купольной линзы использовать сферическую поверхность, центр которой смещен из плоскости апертуры первичной ФАР вдоль оси системы. В таком случае критерием выбора радиуса сферы R_S и смещения вдоль оси системы является максимально точное повторение эталонной образующей в некотором диапазоне углов. Заданная высота линзы позволяет перейти к решению задачи в нормированных величинах и однозначно связывает радиус аппроксимирующей сферы и смещение ее центра вдоль оси системы (рис. 3).

В качестве диапазона углов, в котором задана образующая, в работе [1] используется $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, поэтому синтез аппроксимирующей сферы проведен в аналогичном и в расширенном ($-75^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$) диапазоне углов. Результаты расчетов, проведенных при минимизации максимальной и усредненной квадратической ошибок повторения

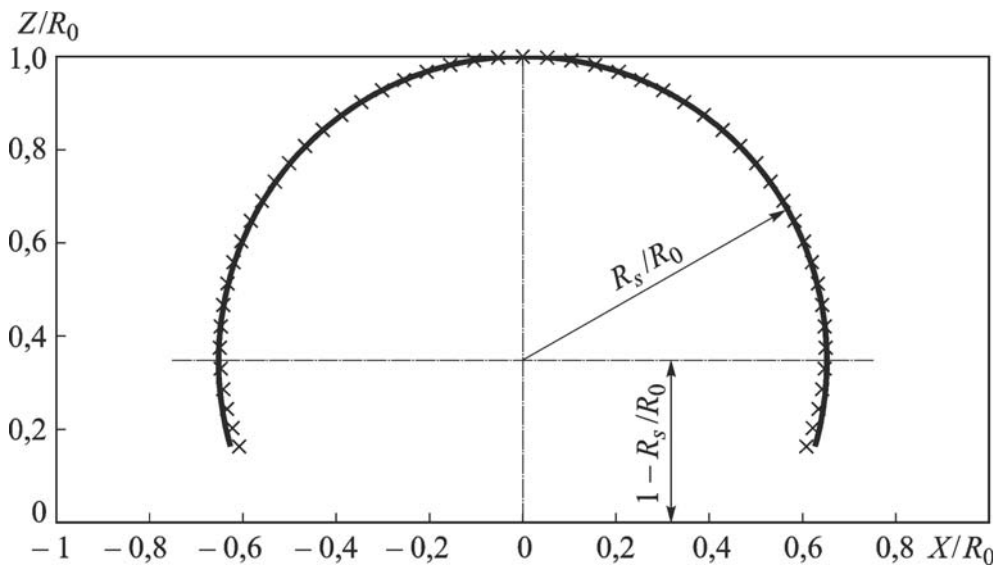


Рис. 3. Образующие КЛ с заданной высотой при КУУС = 2:
 × — оптимальная; — — аппроксимированная смещенной сферой

формы, показывают, что начальное предложение о выборе простой формы позволяет достичь достаточно высокой точности. Нормированные к радиусу сферы модули ошибок повторения образующей оптимальной КЛ (Δ) при обоих критериях оптимизации в диапазоне углов места $-75^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ показаны на рис. 4 для КУУС = 2,0.

Можно сделать вывод, что первый критерий оптимизации формы приводит к получению более точного результата в диапазоне углов места. Как следствие, он выбран для применения в дальнейших исследованиях.

Зависимость нормированного относительно высоты линзы синтезированного радиуса сферы (R_s/R_0) от КУУС приведена на рис. 5.

Из приведенных зависимостей для обоих диапазонов углов, в которых происходил синтез радиуса сферы, следует, что с возрастанием

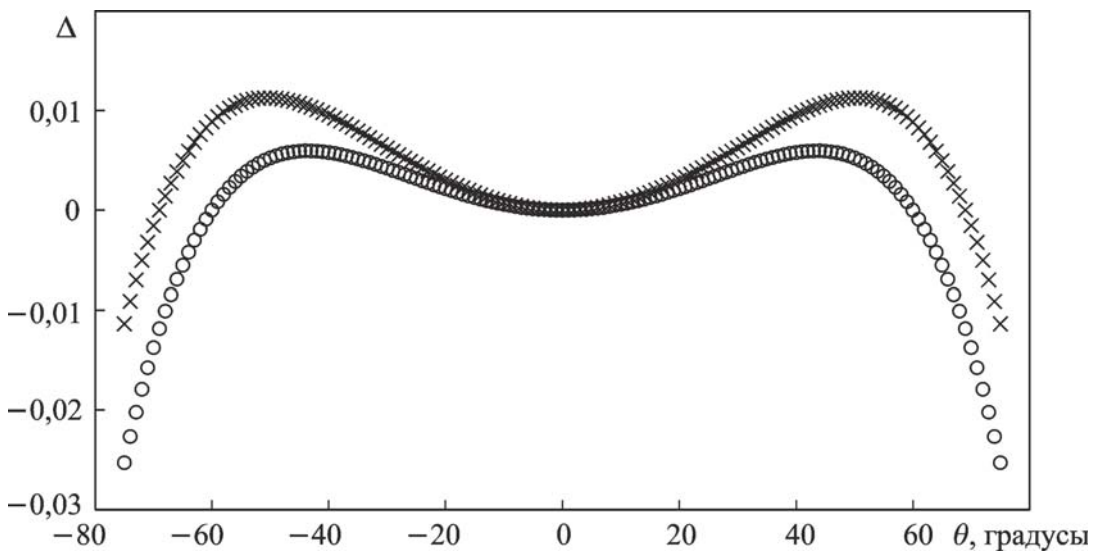


Рис. 4. Нормированное отклонение профиля образующей синтезированной поверхности от профиля оптимальной:
 × — с минимизацией максимальной ошибки, o — с минимизацией усредненной ошибки

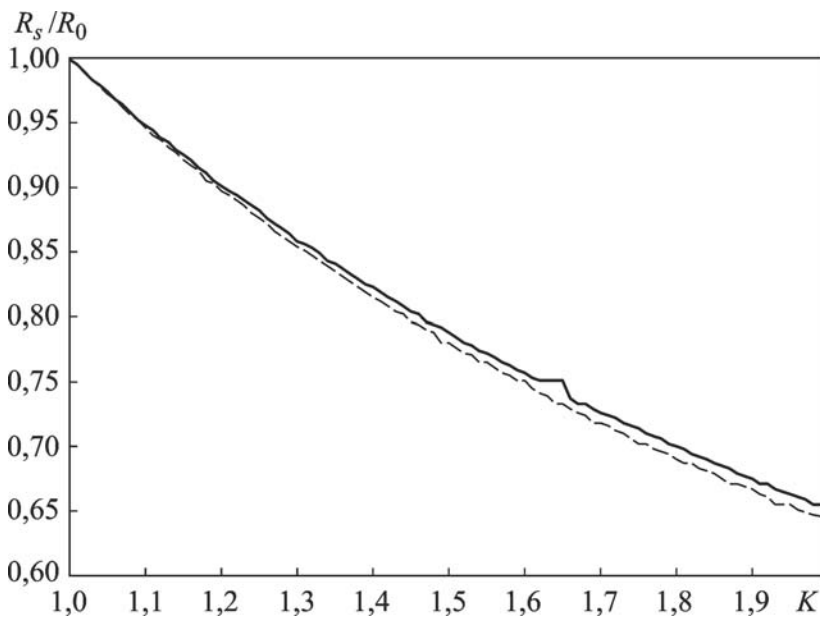


Рис. 5. Зависимость нормированного синтезированного радиуса сферы от КУУС для диапазонов $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ (сплошная кривая) и $-75^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ (штриховая)

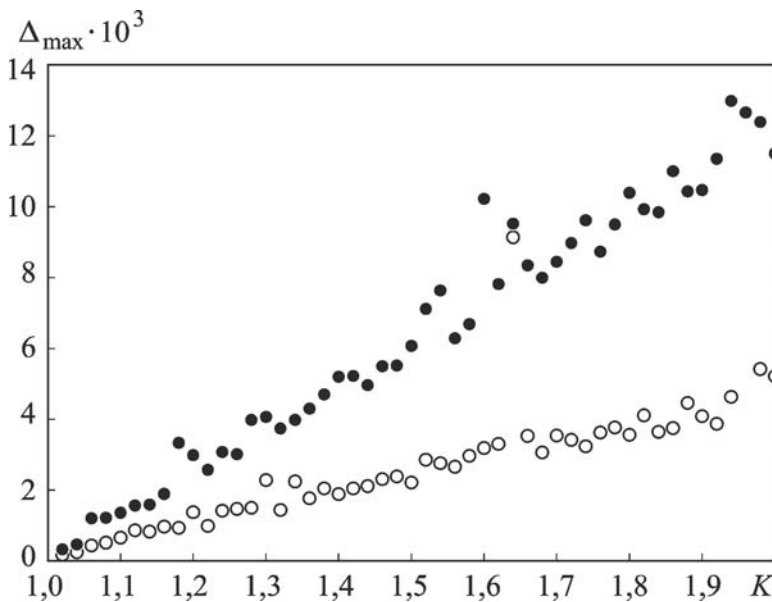


Рис. 6. Нормированное максимальное расхождение профилей оптимальной КЛ и синтезированной сферы для диапазонов $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ (○) и $-75^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ (●)

требуемого КУУС образующая становится все более криволинейной, что подтверждают результаты работы [4].

Точность аппроксимации профиля оптимальной КЛ сферой можно оценить по зависимости нормированного к радиусу аппроксимирующей сферы максимального в диапазоне углов расхождения профилей оптимальной КЛ и синтезированной сферы Δ_{\max} от КУУС (рис. 6).

Как следует из рис. 6, максимальная относительная погрешность, с которой оптимальную образующую КЛ можно аппроксимировать сферой, с увеличением КУУС растет и имеет в целом достаточно устойчивый характер. В более широком диапазоне углов аппроксима-

ция менее точна. Тем не менее максимальная ошибка повторения не превосходит значений порядка 1 %.

Следовательно, аппроксимацию можно считать достаточно качественной и применимой для проектирования КЛА, а КЛ со сферической поверхностью с синтезированным на основании оптимальной образующей радиусом — квазиоптимальной.

Вычисление распределения фазовых задержек по линзе для обеспечения требуемого КУУС можно проводить, исходя из дифференциальной формулировки задачи нахождения градиента фазового распределения $d\varphi/d\theta$ при произвольной форме образующей $r(\theta)$ и функции КУУС $K(\theta)$ [5]:

$$\frac{d\varphi(\theta)}{d\theta} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(r(\theta) \sin[(K(\theta) - 1)\theta] - \{1 - \cos[(K(\theta) - 1)\theta]\} \frac{dr(\theta)}{d\theta} \right),$$

где λ_0 — длина волны в свободном пространстве.

Рассматриваемая образующая имеет вид

$$r(\theta) = \left(1 - \frac{R_S}{R_0}\right) \cos \theta + \sqrt{\left(\frac{R_S}{R_0}\right)^2 - \left[1 - \left(\frac{R_S}{R_0}\right)^2\right] \sin^2 \theta}.$$

Полученное аналитическое выражение более громоздкое, чем в работе [1], что обусловлено лишь смещением системы координат из центра сферы.

Результаты сравнения вычисленных при различных значениях требуемого КУУС фазовых распределений по оптимальной и квазиоптимальной линзам (усредненное между ними значение и модуль разности) приведены на рис. 7 для $R_0 = 20\lambda_0$.

Как видим, наибольшее расхождение электрических характеристик возникает на краю диапазона углов, а его максимальное значение составляет лишь доли процента.

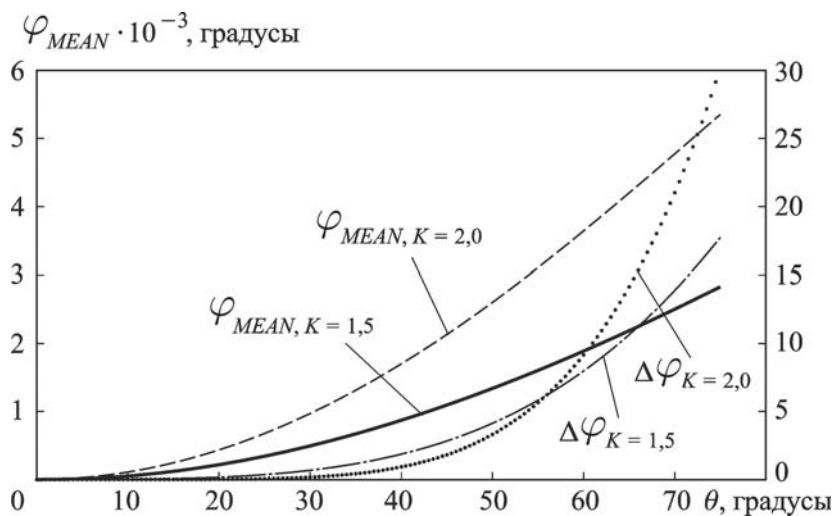


Рис. 7. Сравнительные характеристики распределения фазовых задержек по оптимальной и квазиоптимальной линзам

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- предложен способ аппроксимации оптимальной КЛ с помощью смещенной из начала координат сферы;
- приведены характеристики, подтверждающие достаточно высокую точность соответствия геометрических и электрических характеристик;
- полученную форму КЛ можно считать квазиоптимальной и более приемлемой с конструкторско-технологической точки зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б у б н о в Г. Г., К о р о с т ы ш е в с к и й Е. Н., С е р г е е в В. Н. Оболочечная линза для увеличения сектора сканирования плоской ФАР // Антенны. – 1980. – № 28. – С. 26–33.
2. С х е м ы построения антенн для радиолокационных комплексов повышенной защищенности / Н.А. Бей, В.С. Скворцов., А.А. Ковалев, Р.В. Комягин // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. “Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов”. – 2009. – С. 58–62.
3. М н о г о ф у н к ц и о н а л ь н ы е полотна антенных решеток / Д.И. Воскресенский, Ю.В. Котов, Ю.Я. Харланов, Е.В. Овчинникова // Антенны. – 2006. – № 9(112). – С. 5–23.
4. S u s m a n L., M i e r a s H. Results of an exact dome antenna synthesis procedure // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 1979. – Vol. 17. – P. 38–41.
5. X i a n g Z. -P. Theoretical calculation of phased array lens antenna // Military microwaves. Conference Proceedings'82. London, England. – 1982. – P. 506–511.

Статья поступила в редакцию 28.03.2012

Владимир Игоревич Литун окончил в 2009 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант, научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор шести научных работ в области моделирования антенн и волноводных устройств.

V.I. Litun graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2009. Post-graduate, researcher of the Research Institute for Radio Electronic Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of six publications in the field of simulation of antennas and waveguide devices.

Владимир Николаевич Митрохин окончил в 1966 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана и в 1971 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, главный научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области технической электродинамики, антенн и устройств СВЧ.

V.N. Mitrokhin graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966 and the Lomonosov Moscow State University in 1971. D. Sc. (Eng.), professor of the Bauman Moscow State Technical University, chief researcher of the Research Institute for Radio Electronic Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of technical electrodynamics, microwave antennas and devices.