

Отзыв официального оппонента Лаврецкого Е.И. на диссертацию Ви Ут Нама «Многолучевые антенны на основе бифокальных систем», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.14- «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Актуальность. Диссертация Ви Ут Нама посвящена вопросам разработки широкоугольных многолучевых антенн на основе бифокальных систем с минимальными aberrациями. Многолучевые антенны являются актуальным направлением исследований, имеют как традиционные приложения, так и новые приложения (базовые станции систем мобильной связи нового поколения, системы космической связи, системы радиомониторинга). К характеристикам многолучевых антенн в настоящее время предъявляются все возрастающие требования в части расширения их сектора обзора при сохранении коэффициента усиления.

Одним из видов многолучевых антенн являются системы с квазиоптическим формированием лучей с применением диаграммо-образующих схем (ДОС) на основе планарного волновода, представляющие собой в простейшем случае двуслойные структуры. В известных конструкциях планарных диаграммо-образующих схем применяли зеркально-линзовые ДОС с принудительным преломлением и трехзеркальные ДОС, что приводило к усложнению конструкции, увеличению потерь и т.п. Поэтому актуальной оставалась задача расширения углового сектора сканирования (угла зрения) многолучевой антенны при использовании более простых конструкций. Данное направление исследований активно развивалось в последние годы в научной группе под руководством профессора Калошина В.А., который является научным руководителем диссертанта. Настоящая диссертационная работа исследует бифокальные двухзеркальные цилиндрические ДОС, зеркально-линзовые цилиндрические ДОС, а также чисто линзовые ДОС на основе диэлектрических линз (цилиндрических и трехмерных). Для указанных видов диаграммо-образующих схем в диссертации решена задача синтеза бифокальных систем с минимальной среднеквадратической aberrацией (СКА) с целью построения на их основе широкоугольных многолучевых антенн.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Диссертация содержит 109 страниц машинописного текста, 70 рисунков, список цитируемой литературы состоит из 28 наименований. Основные результаты диссертации изложены в 7 научных публикациях.

Новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты, относящиеся как к методике, так и к синтезу конкретных устройств, обладающих рекордными характеристиками:

1. Развита численно-аналитическая методика синтеза бифокальных цилиндрических двухзеркальных, а также диэлектрических линзовых и зеркально-линзовых систем с минимальной величиной среднеквадратической aberrации.
2. Синтезированы двухзеркальные цилиндрические бифокальные системы с $СКА=8 \times 10^{-6}$ в угле зрения 50° , с $СКА=2 \times 10^{-5}$ в угле зрения 70° и с $СКА=4 \times 10^{-5}$ в угле зрения 105° .
3. Синтезированы зеркально-линзовые цилиндрические бифокальные системы с $СКА=2 \times 10^{-5}$ в угле зрения 50° , с $СКА=5 \times 10^{-5}$ в угле зрения 70° и с $СКА=1,3 \times 10^{-4}$ в угле зрения 100° .
4. Синтезирована цилиндрическая бифокальная диэлектрическая линза с $СКА=1,5 \times 10^{-4}$ в угле зрения 90° .
5. Синтезирована трехмерная бифокальная диэлектрическая линза с $СКА=6 \times 10^{-4}$ в угле зрения 90° .
6. С использованием численного моделирования исследованы широкоугольные многолучевые антенны на основе оптимизированных бифокальных систем.

Во введении обоснована актуальность темы, сформированы цели и задачи исследования, описаны научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приведены сведения об апробации работы и положениях, выносимых на защиту, приведено краткое описание работы, указан личный вклад соискателя.

В главе 1 описана методика синтеза и оптимизации бифокальной двухзеркальной цилиндрической системы. В первом разделе главы развита методика синтеза цилиндрических двухзеркальных бифокальных систем с использованием последовательного нахождения участков зеркал и заданием начального участка вспомогательного зеркала в виде полинома второй или четвертой степени. Один из коэффициентов полиномов определяется в результате решения уравнения, найденного в работе, которое в общем случае обеспечивает непрерывность вторых производных функций, описывающих поверхности зеркал. Начальный участок главного зеркала находится в результате решения задачи синтеза плоского фронта для центрального положения источника.

Во втором разделе главы приведены зависимости СКА бифокальной двухзеркальной системы с начальным участком первого зеркала в виде параболы в зависимости от угла зрения при ряде значений параметров, показана геометрия бифокальной двухзеркальной системы, а также линии уровня СКА при разных наборах параметров. В удобной графической форме представлены области параметров, где решение задачи синтеза существует и где не существует. Указано, что использование дополнительной степени свободы при задании формы первого участка вспомогательного зеркала в виде полинома четвертого порядка не приводит к уменьшению СКА.

В главе 2 рассмотрена задача синтеза и оптимизации цилиндрических зеркально-линзовых бифокальных систем. Приведены зависимости СКА бифокальной зеркально-линзовой системы в зависимости от угла зрения при ряде значений параметров. Показана геометрия бифокальной зеркально-линзовой системы, представлены области параметров, где решение задачи синтеза существует и где не существует.

Следует заметить, что при коэффициенте преломления линзы $n=1,5$ представлены результаты синтеза, свидетельствующие о том, что характеристика СКА приближается к характеристике трехфокусной системы. Сделан вывод о том, что продольный размер бифокальных зеркально-линзовых систем с оптимальными параметрами слабо зависит от угла зрения и близок к размеру апертуры.

В главе 3 рассмотрены задачи синтеза и оптимизации бифокальных цилиндрических диэлектрических линз и синтез трехмерной диэлектрической линзы.

Проведено исследование зависимости значений СКА бифокальной цилиндрической линзы от ее параметров. Выполнены расчеты бифокальной цилиндрической линзы с коэффициентом преломления $n=1,6$. Приведены зависимости СКА бифокальной цилиндрической линзы в зависимости от угла зрения при ряде значений параметров. Показано, что при умеренных углах зрения 40° характеристика СКА приближается к характеристике трехфокусной системы. При увеличении угла зрения до 90° характеристики на оси линзы ухудшаются, остается только локальный минимум СКА на оси (вместо фокуса).

С помощью описанного алгоритма синтезирована трехмерная бифокальная диэлектрическая линза для угла зрения 90° . Расчетная характеристика СКА демонстрирует наличие небольшого «полезного» локального минимума по оси линзы.

Сделан вывод, что разработанная методика позволяет синтезировать и оптимизировать бифокальные диэлектрические цилиндрические линзы по минимуму СКА. С увеличением угла зрения в два раза СКА цилиндрической линзы увеличивается в 5 раз. СКА синтезированных цилиндрических линз больше, чем СКА соответствующих двухзеркальных и зеркально-линзовых систем. СКА синтезированной трехмерной линзы в 4 раза превышает СКА соответствующей цилиндрической линзы.

В главе 4 приведены результаты исследований широкоугольных многолучевых антенн на основе двухзеркальных, линзовых и зеркально-линзовых бифокальных систем.

В разделе 4.1 даны результаты исследований многолучевых антенн на основе планарных двухзеркальных бифокальных систем. Приведены зависимости коэффициента усиления (КУ) и значения КИП от угла сканирования антенны для двух значений размера апертуры в Н-плоскости, рассчитанные с использованием метода конечных элементов в Ansys HFSS и в приближении Кирхгофа. В качестве излучающей системы был рассмотрен Н-секториальный рупор. Показано, что расчетный КИП в полосе обзора 100° составляет не менее 0,4. Сделан вывод, что многолучевая антенна на основе планарной бифокальной двухзеркальной системы позволяет сформировать в одной плоскости до 650 лучей в секторе обзора 100° (при $D/\lambda = 1000$).

В разделе 4.2 даны результаты исследований многолучевых антенн на основе планарных бифокальных зеркально-линзовых систем. Приведены зависимости коэффициента усиления и величины КИП от угла сканирования антенны, рассчитанные с использованием метода конечных элементов в Ansys HFSS и в приближении Кирхгофа. Сектор обзора антенны по уровню КИП=0,5 составляет более 80° . Сделан вывод, что многолучевая антенна на основе планарной бифокальной зеркально-линзовой системы позволяет сформировать в одной плоскости до 275 лучей в секторе обзора 80° (при $D/\lambda = 500$).

В разделе 4.3 приведены результаты исследований многолучевой антенны на основе планарной бифокальной линзы. Бифокальная линза с минимальной абберацией выполнена из полистирола. Для улучшения согласования на входной и выходной поверхностях линзы имеются выступы длиной равной четверти длины волны в диэлектрике. Используется металло-диэлектрический облучатель, состоящий из металлического рупора и выступающего из него ступенчато-нерегулярного в Е-плоскости диэлектрического стержня из полистирола прямоугольного сечения. Результаты расчетов многолучевой антенны сравниваются с результатами экспериментального исследования макета антенны. КУ экспериментального образца идут на 2 дБ ниже результатов моделирования, что объяснено неучетом при моделировании омических потерь в металле и диэлектрике, а также погрешностями изготовления и измерения. Сделан вывод, что многолучевая антенна на основе планарной бифокальной линзы с металло-диэлектрическими облучателями позволяет сформировать в одной плоскости до 370 лучей в секторе обзора 80° (при $D/\lambda = 350$).

В разделе 4.4 приведены результаты исследований многолучевой антенны на основе трехмерной диэлектрической бифокальной линзы. Указано, что многолучевые антенны на основе планарных бифокальных систем могут обеспечить широкие углы обзора и большое количество лучей в Н-плоскости при относительно небольших величинах КУ. Для увеличения КУ можно использовать эти антенны в качестве ДОС многолучевых планарных решеток или облучающих систем для цилиндрической зеркальной системы, фокусирующей в ортогональной плоскости. Применение трехмерной бифокальной диэлектрической линзы предлагает другой путь увеличения КУ многолучевой антенны. Проведен расчет многолучевой антенны на основе трехмерной бифокальной диэлектрической линзы с системой облучателей в виде пирамидальных рупоров. Параметры рупоров подобраны из условия облучения кромки апертуры линзы на уровне -10 дБ. Сделан вывод, что многолучевая антенна на основе трехмерной бифокальной линзы позволяет сформировать в одной плоскости 85 лучей в секторе обзора 80° (при $D/\lambda = 100$). Предельные возможности многолучевой антенны на основе трехмерной бифокальной линзы, в том числе формирования лучей во всем пространстве, требуют дальнейших исследований.

В приложении 1 рассмотрены многолучевые планарные антенные решетки на основе бифокальных систем. Демонстрируются эскизы конструкции планарной волноводно-щелевой антенной решетки с двухзеркальной и с зеркально-линзовой ДОС. Полотно волноводно-щелевой антенной решетки состоит из 40 прямоугольных волноводов сечением 5 x 1,6 мм, заполненных диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,2$, с че-

тырьмя продольными щелями на широких стенках на каждом периоде и синусоидальным амплитудным распределением вытекающей моды вдоль волноводов решетки. Показаны рассчитанные в Ansys HFSS диаграммы направленности антенных решеток в азимутальной плоскости при перемещении рупорного облучателя по фокальной кривой на частоте 30 ГГц. Также показаны рассчитанные диаграммы направленности антенных решеток в угломестной плоскости при изменении частоты от 22 ГГц до 38 ГГц и центральном положении облучателя.

Следует заметить, что в азимутальной плоскости планарные антенные решетки явно демонстрируют двугорбую кривую КИП при перемещении облучателя по фокальной кривой, что качественно соответствует бифокальным системам.

В приложении 2 приведены материалы синтеза цилиндрической двухзеркальной системы по заданному амплитудному распределению в апертуре и синтеза цилиндрической двухзеркальной системы с рупорно-зеркальным возбуждением.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что в диссертации получены методики геометрического синтеза (математические модели) для следующих задач:

- цилиндрических двухзеркальных бифокальных систем;
- цилиндрических зеркально-линзовых бифокальных систем;
- цилиндрических линзовых бифокальных систем;
- трехмерных линзовых бифокальных систем.

Полученные математические модели диссертант применил для исследования потенциальных возможностей двухзеркальных, линзовых и зеркально-линзовых бифокальных систем с точки зрения минимизации СКА и построения широкоугольных многолучевых антенн на их основе.

Для решения задачи синтеза была применена весьма оригинальная методика, позволяющая обеспечить малые aberrации в широком диапазоне углов (включая осевое направление). Кратко опишем процедуру синтеза для случая двухзеркальной системы. На первом и втором зеркалах вводились начальные (центральные) участки, формирующие плоский фронт по оси для источника, расположенного в некоторой точке на оси (в «третьем» фокусе). Далее рассматривались источники в фокусах F_1, F_2 , использовались условия параллельности выходных лучей и равенства их эйконалов. Сначала рассматривались участки зеркал, примыкающие к начальным участкам (первые дополнительные участки). Вводилось первое условие, что лучи из F_1, F_2 , отраженные от начального участка первого зеркала, должны приходить строго на дополнительные участки второго зеркала. Вводилось второе условие, чтобы лучи плоской волны, падающей под углом к оси, отражающиеся от начального участка второго зеркала, попадали в фокус F_1 (или F_2) путем отражения только от дополнительного участка первого зеркала. На стыках начальных и дополнительных участков зеркал была обеспечена непрерывность функций, описывающих зеркала, и их производных. Основное уравнение диссертант записывал из условия непрерывности второй производной функции, описывающей профиль первого зеркала, на стыке начального и дополнительного участков. Это позволило ему после решения трансцендентного уравнения однозначно определить начальные участки зеркал, а затем найти первые дополнительные участки зеркал. Далее итерационный алгоритм аналогичным образом определял последующие дополнительные участки зеркал. В результате применения такого итерационного процесса были найдены первое и второе зеркала, состоящие из $2m+1$ участков. На всех стыках между участками зеркал обеспечивалась непрерывность не только функций и первых производных функций, описывающих профиль зеркал, но и вторых производных функций. Использование непрерывности по вторым производным дает безразрывное по амплитуде решение задачи геометрического синтеза, исключает краевые волны, снижает уровень бокового излучения и т.д.

Заметим, что поперечный размер начального участка первого зеркала позволял контролировать уровень aberrаций по оси системы. По всей видимости, метод синтеза в определенных ситуациях может дать возможность найти конфигурацию системы, близкой к трехфокальной (что подтверждается результатами расчетов зеркально-линзовой системы). В целом, использование разработанной методики для синтеза бифокальных систем показало, что минимальные величины СКА близки к ранее полученным СКА для трехфокальных систем.

Для случая зеркально-линзовой системы аналогичным образом вместо двух отражений рассматривались преломление и отражение, для линзовых систем рассматривались два преломления. Следует заметить, что при синтезе бифокальной трехмерной диэлектрической линзы диссертантом применено удачное представление поверхностей линзы в виде суммы четных одномерных функций, что позволило использовать для расчета поверхностей в одном из сечений алгоритм, созданный для цилиндрических структур.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность результатов синтеза бифокальных систем подтверждена расчетом характеристик исследуемых систем в приближении Кирхгофа и с применением МКЭ в программной среде Ansys HFSS, а также экспериментальными результатами в макете.

Результаты работы опубликованы в авторитетных рецензируемых научных изданиях и доложены на международной профильной конференции.

Практическая значимость работы состоит в том, что исследуемые многолучевые антенны на основе синтезированных бифокальных систем дают возможность расширить сектор обзора при заданном коэффициенте усиления и увеличить коэффициент усиления при заданном секторе обзора. Разработана конструкция экспериментального макета многолучевой антенны на основе бифокальной цилиндрической диэлектрической линзы для угла зрения 90° .

Замечания и недостатки.

1. Введение недостаточно подробно описывает ранее полученные результаты и особенности известных технических решений по широкоугольным многолучевым антеннам. Сравнение синтезированных бифокальных систем с апланатическими системами по достижимым углам сканирования и aberrациям отсутствует.

2. Не объяснен факт, что в синтезированных цилиндрических бифокальных двухзеркальных системах СКА при одинаковом угле зрения меньше, чем в цилиндрических бифокальных зеркально-линзовых системах.

3. В результатах исследований многолучевых антенн на основе бифокальных систем в главе 4 максимальный КИП наблюдался по оси, чему не дано объяснения. В то же время, в приложении 1 планарные антенные решетки на основе бифокальных систем демонстрируют двугорбую кривую КИП с провалом по оси при перемещении облучателя по фокальной кривой.

4. Сравнение разных видов бифокальных систем, которое позволило бы инженеру выбрать на реализацию ту или иную систему (двухзеркальную, зеркально-линзовую или линзовую), выполнено в недостаточной мере.

5. Для синтезированных систем не указаны среднеквадратические фазовые ошибки (привычные для специалистов по антеннам), которые могли быть рассчитаны по СКА.

6. Синтезированные бифокальные системы не исследованы на допуски.

Данные замечания не влияют на общую оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне.

