

ФОРМИРОВАНИЕ СЕКТОРНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ И АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин,
Нгуен Динь То, Э. В. Гаджиев

Приводится обзор способов формирования секторных диаграмм направленности в линейных антенных решетках. Рассматриваются антенные решетки с различным числом элементов. Для антенных решеток с малым числом элементов в литературе предложены методы, использующие предсказания требуемых секторных диаграмм направленности. Для непрерывных антенных систем или антенн с большим числом элементов рассмотрены различные модификации метода парциальных диаграмм направленности, обеспечивающие заданную точность воспроизведения форм секторных диаграмм направленности. Приведены результаты синтеза секторной диаграммы направленности антенной решетки из волноводных излучателей с эллиптической поляризацией. Рассмотрены шаблонные функции, определяющие секторную диаграмму направленности, в виде полиномов Чебышева нечетных порядков. Определены статистические характеристики антенной решетки. Показано влияние амплитудных и фазовых ошибок на поляризационные характеристики.

Ключевые слова: секторные диаграммы направленности, синтез характеристик направленности, волноводные антенные решетки, бортовые связные антенные решетки, статистические характеристики антенных решеток.

Введение

Антенные решетки позволяют осуществлять гибкое управление характеристиками направленности в соответствии с тактико-техническими задачами, решаемыми радиотехнической системой. Изменение формы диаграммы направленности (ДН), а также возможность формирования ДН специальной формы требуется для функционирования радиолокационных систем, систем радиоэлектронной борьбы, связи и т. д. В ряде радиотехнических систем возникает необходимость формирования секторных ДН, поэтому в настоящее время имеется значительное число статей, посвященных решению этой задачи [1 – 7]. Похожие задачи возникают и при построении информационных телекоммуникационных систем, для которых необходимо обеспечивать допустимое изменение коэффициентов усиления и эллиптичности в заданном секторе углов, что можно достичь с помощью синтеза ДН специальной формы [8]. Для решения такой задачи подходит секторная ДН. Секторные ДН синтезируются и исследуются достаточно давно, они используются в гидроакустике, радиолокации и связи. Многочисленные публикации по синтезу секторных ДН содержат рекомендации по выбору шаблонных функций, в качестве которых рассматриваются: модифицированные квадратичные функции и функции Хевисайда. Выбор данных функций обусловлен возможностью введения предсказаний для лучшего воспроизведения секторной ДН. Ряды, используемые для разложения секторных ДН, также определяются качеством воспроизведения шаблонной функции, минимизацией эффекта Гиббса и геометрией задачи. В литературе применяются ряды Фурье, модифицированные ряды Тейлора и разложение по нечетным функциям Матье.

В одной из первых работ [1] рассмотрено формирование секторной ДН в гидроакустической системе. В ней изложен модифицированный метод парциальных ДН, который заключается во введении по элементам акустической антенной решетки только фазового распределения. При синтезе секторной ДН с помощью ряда Фурье сложно обеспечить требуемую форму, так как она зависит от количества базисных функций.

В работе [2] показана возможность уменьшения неравномерности ДН путем применения оптимизированного шаблона. Оптимизация шаблона получается за счет введения в него предсказаний.

В статье [3] рассмотрен синтез косекансной ДН. Разработана методика оптимизации требуемой ДН по критерию минимума отклонения реальной ДН от требуемой и минимума бокового излучения. В приведенных работах осуществляется синтез требуемой формы ДН (шаблона) путем разложения ее в ряд Котельникова или Фурье.

В статье [4] предложен метод, который позволяет получить наименьший уровень боковых лепестков при допустимом переколебании плоской вершины главного лепестка секторной диаграммы направленности.

В работе [5] рассмотрен синтез секторной ДН линейного излучателя путем разложения требуемой функции в ряд по нечетным функциям Матье. Точность воспроизведения секторной ДН при использовании изложенного метода зависит от длины линейного излучателя. Хорошее описание требуемой формы ДН метод дает при длине излучателя от 5λ и более.

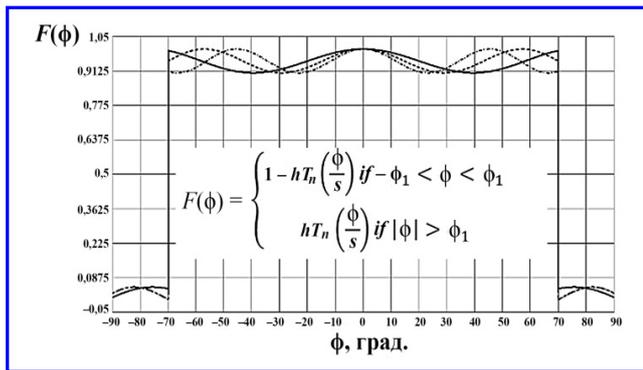


Рис. 1. Функции Чебышева нечетного порядка

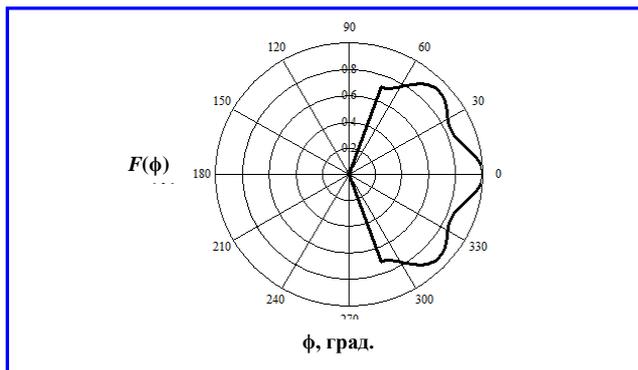


Рис. 2. Разложение шаблонных функций в ряд Фурье

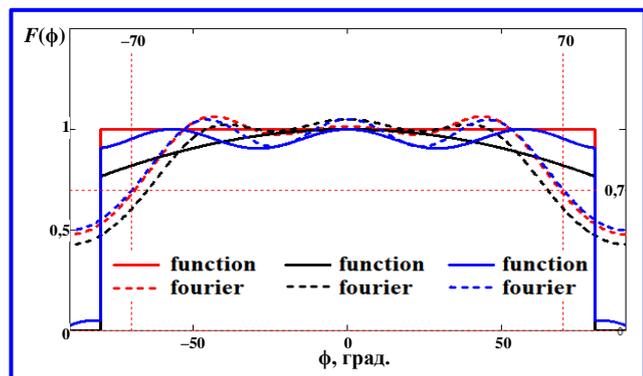


Рис. 3. Форма секторной диаграммы направленности для антенны

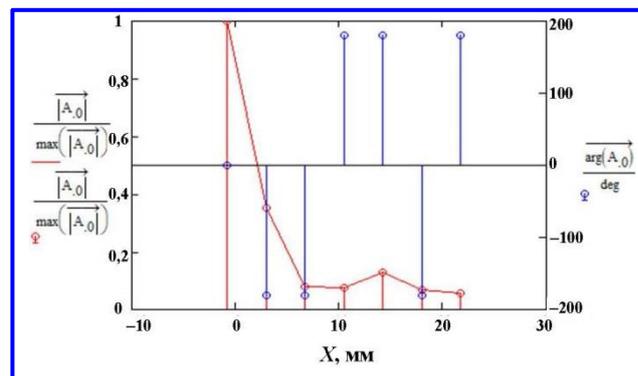


Рис. 4. Зависимости амплитуд и фаз возбуждения от координаты элемента в антенной решетке

В статье [6] приведен обзор работ по фазовому синтезу секторных ДН фазированной антенной решетки (ФАР) многофункциональной радиолокационной станции (РЛС). Разработан алгоритм формирования веерных парциальных ДН, обеспечивающий требуемое изменение формы ДН в реальном времени при высоком быстродействии цифровой активной фазированной антенной решетки (АФАР). В статье показано, что использование парциальных ДН соседних излучателей позволяет сформировать секторные ДН различной ширины.

Форма синтезируемой функции, а также ее представление в виде ряда во многом определяется геометрией задачи. В работе [7] рассмотрено формирование секторной ДН в антенной решетке с круглой апертурой, поэтому для удобства ее представления авторами был выбран ряд Тейлора и различные его модификации. В статье приведены секторные ДН различной формы для антенной решетки с круглой апертурой и прямоугольной сеткой размещения элементов.

Моделирование волноводной антенной решетки с секторной диаграммой направленности

Возможность оперативного изменения характеристик направленности необходима также в телекоммуникационных системах, так как от энергетического

потенциала и покрытия области пространства, в которой размещены пользователи, зависит качество связи. При построении радиолинии передачи целевой информации, устанавливаемой на борту малого космического аппарата [9, 10], возникает необходимость сохранения поляризационных характеристик в секторе размещения пунктов приема. Для получения требуемых поляризационных характеристик и характеристик направленности предлагается использовать ДН решетки в виде модифицированной функции Чебышева нечетного порядка:

$$F(\phi) = \begin{cases} 1 - hT_n\left(\frac{\phi}{s}\right) & \text{if } -\phi_1 < \phi < \phi_1 \\ hT_n\left(\frac{\phi}{s}\right) & \text{if } |\phi| > \phi_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где h, s – нормирующие коэффициенты; T_n – функция Чебышева первого рода n -го порядка. Функции (1) для $n = 11, 15, 19$ приведены на рис. 1. На рис. 2 показано разложение в ряд Фурье трех шаблонных функций. Требуемая форма секторной ДН для бортовой антенной системы передачи целевой информации приведена на рис. 3.

На рис. 4 показаны зависимости амплитуд и фаз возбуждения от координаты элемента в антенной решетке. Красной линией обозначены амплитуды возбуждения элементов, а синей – фазы возбуждения элементов.

Максимальное отклонение требуемой формы ДН от расчетной определяется выражением:

$$\Delta f(\phi) = \max |F(\phi) - f(\phi)|,$$

где $F(\phi)$ – требуемая форма диаграммы направленности; $f(\phi)$ – синтезируемая форма диаграммы направленности.

Максимальное отклонение рассматриваемых функций от требуемых приведено на рис. 5. На рис. 5 сплошной линией показана кривая, соответствующая максимальному отклонению для функции Чебышева $n = 19$ порядка, пунктирной – для функции Хевисайда, штрихпунктирной – для модифицированной квадратичной функции. Выбор функций нечетных порядков обусловлен

минимальным отклонением требуемой формы ДН от расчетной.

На рис. 6 приведены синтезированные ДН решеток из $N = 8, 16$ и 32 элементов, совмещенные с ДН требуемой формы.

Из рис. 6 видно, что наилучшим образом требуемая ДН аппроксимируется решеткой из $N = 32$ элементов. Если антенная решетка имеет меньшую размерность, ДН одиночного излучателя обеспечивает лучшие поляризационные характеристики, чем секторная ДН. Однако, если требуется покрывать меньший сектор или возникает необходимость управления сектором перекрытия, то в этом случае антенная решетка с синтезированной секторной ДН имеет лучшие поляризационные характеристики.

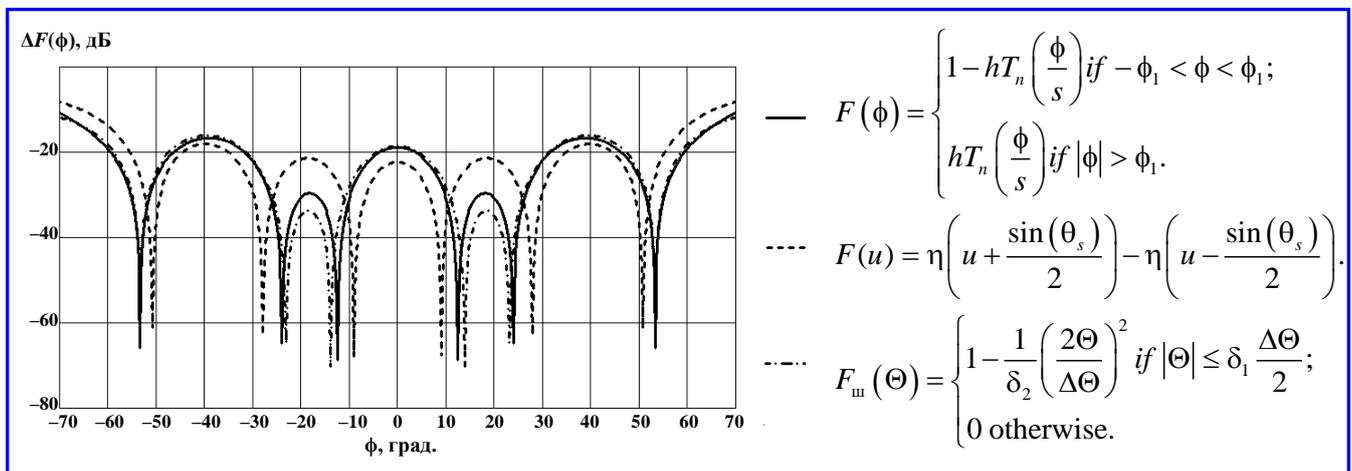


Рис. 5. Максимальное отклонение рассматриваемых функций от требуемых

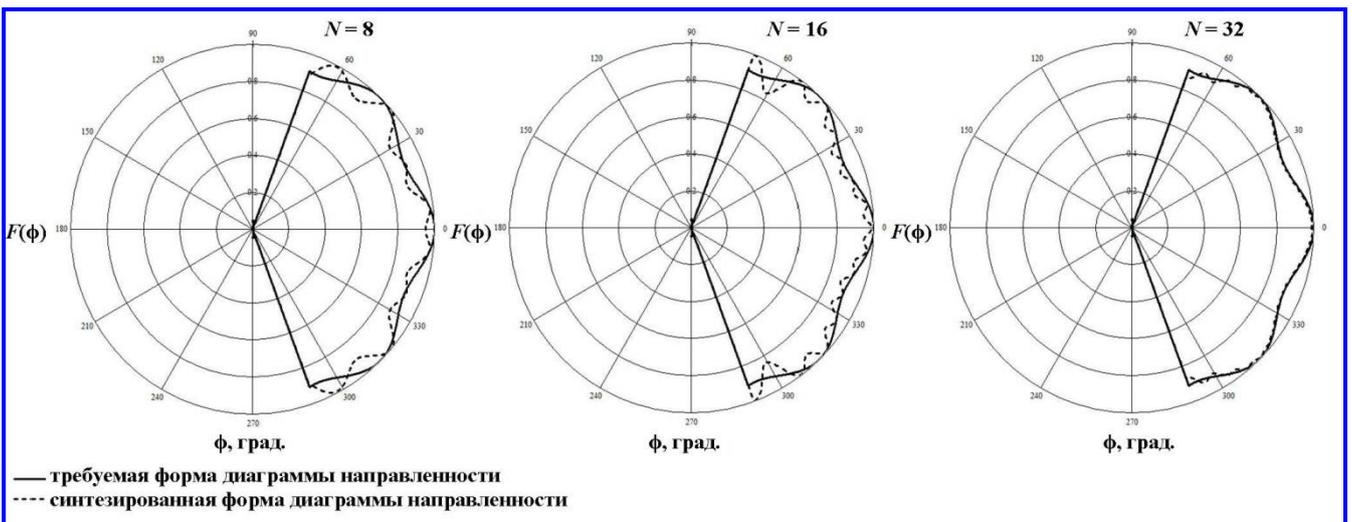


Рис. 6. Синтезированные диаграммы направленности решеток из $N = 8, 16$ и 32 элементов

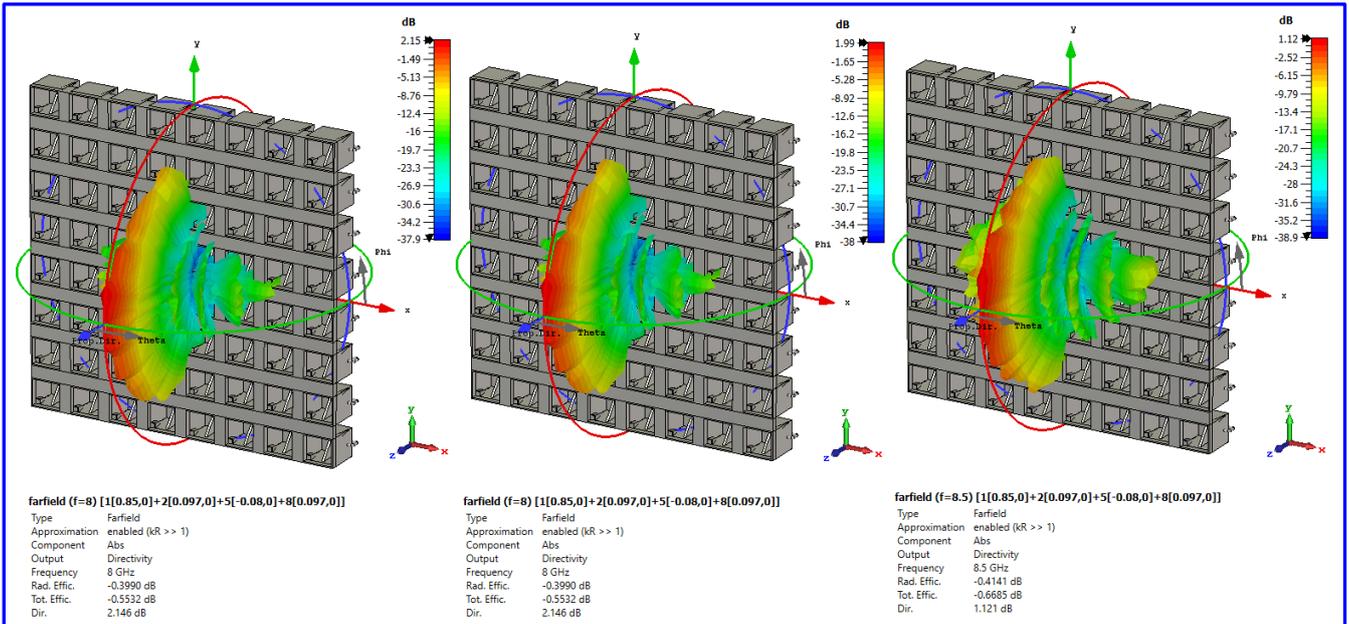


Рис. 7. Пространственные секторные диаграммы направленности антенной решетки в виде функции Чебышева 19-го порядка

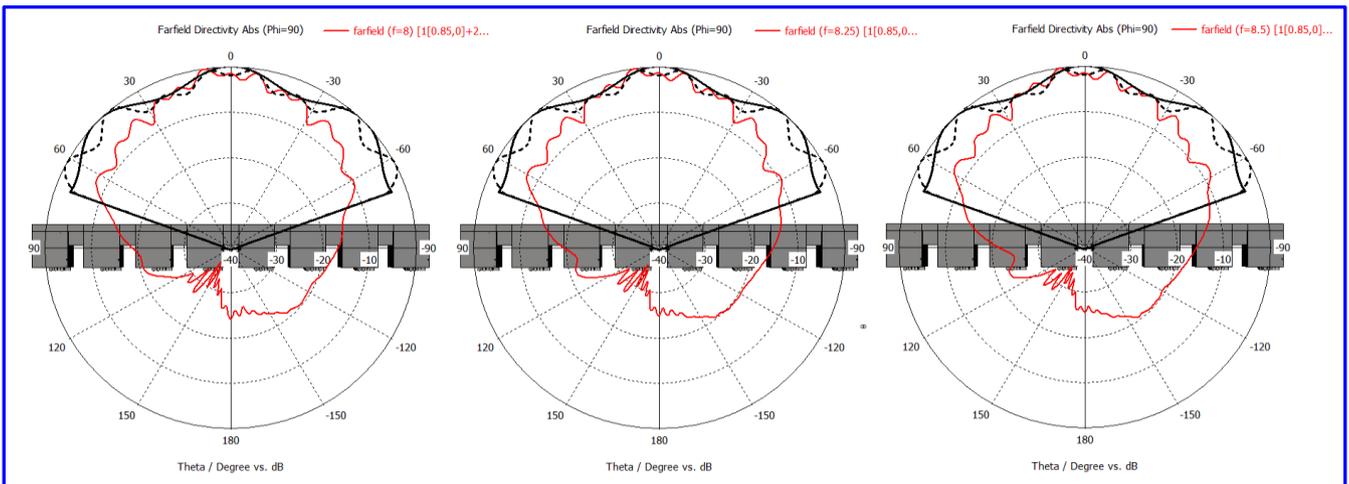


Рис. 8. Диаграммы направленности антенной решетки

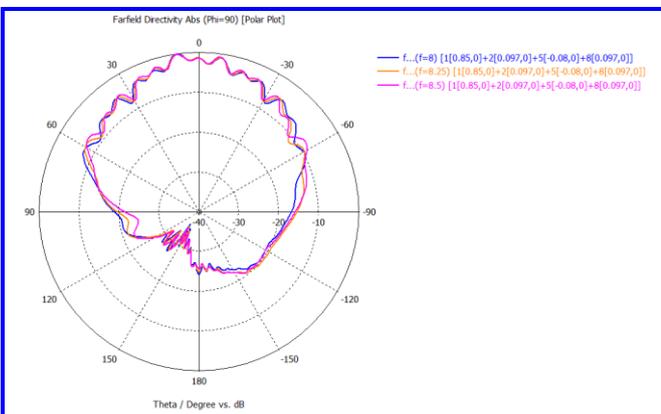


Рис. 9. Диаграммы направленности антенной решетки на трех частотах рабочего диапазона

Моделирование волноводной антенной решетки с секторной диаграммой направленности

На рис. 7 приведены результаты моделирования антенной решетки с секторной ДН в виде функции Чебышева 19-го порядка [11].

На рис. 8 приведены совмещенные графики для требуемой синтезируемой и полученной при моделировании ДН антенной решетки.

Диаграммы практически не изменяются при изменении частоты в рабочем диапазоне.

На рис. 9 приведены диаграммы направленности антенной решетки на трех частотах рабочего диапазона.

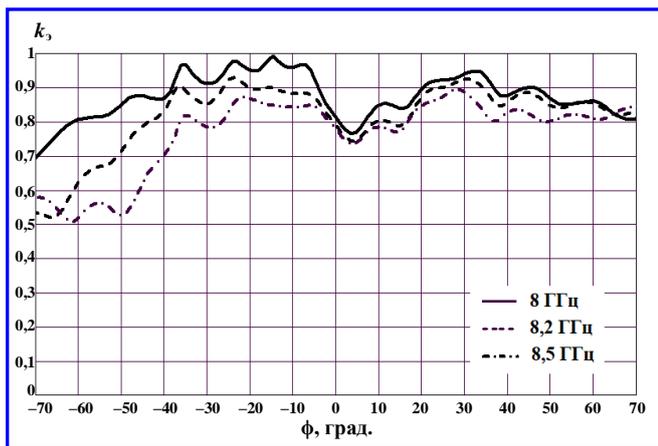


Рис. 10. Зависимости коэффициента эллиптичности от угловой координаты

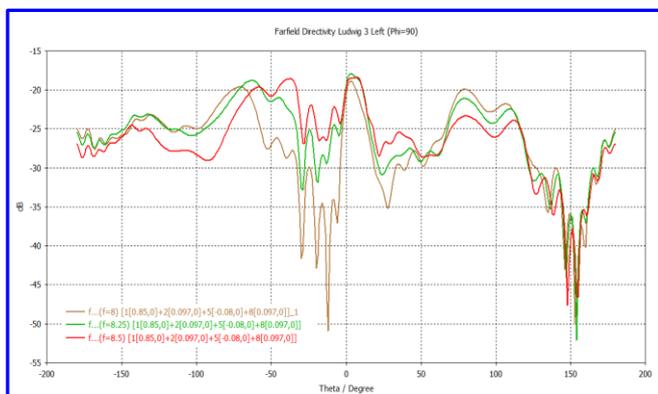


Рис. 11. Кроссполаризационные диаграммы направленности антенной решетки

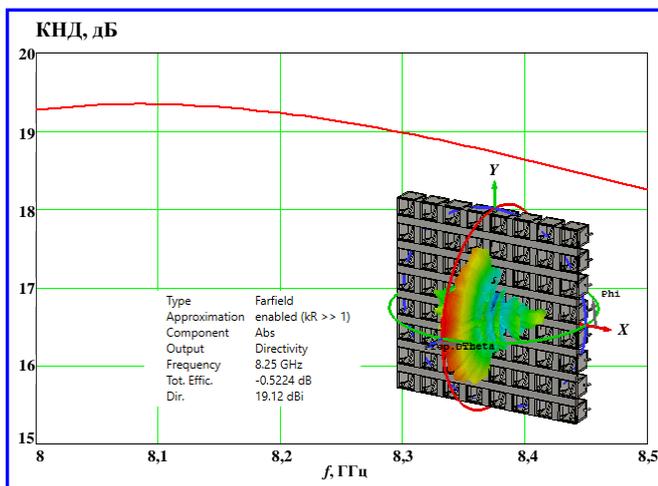


Рис. 12. Зависимость коэффициента направленного действия от частоты для плоской антенной решетки с секторной диаграммой направленности

На рис. 10 показаны зависимости коэффициента эллиптичности k_e от угловой координаты.

Для телекоммуникационных систем очень важны энергетические характеристики, поэтому ниже

приводятся результаты расчета коэффициента направленного действия (КНД) и кроссполаризационных ДН антенных решеток с секторной ДН.

На рис. 11 и 12 показаны кроссполаризационные ДН и приведены зависимости КНД от частоты для плоской антенной решетки с секторной ДН соответственно.

Определение статистических характеристик волноводных излучателей с линейной перегородкой и выступами

Исследование статистических характеристик антенных решеток является важнейшей задачей. Решение такой задачи традиционно проводилось с помощью статистической теории антенн [12 – 16]. Расчет статистических характеристик позволяет связать допуски на изготовление антенны с допустимыми изменениями характеристик направленности и поляризационных характеристик.

При разработке многоэлементных антенн вопросы практической реализации их характеристик определяются технологическими возможностями производства, которые в свою очередь подразумевают выполнение отдельных элементов с погрешностями. Как известно, эти погрешности делятся на систематические и случайные [17]. Если влияние первого типа погрешности легко учесть и устранить, то на второй тип влияет множество факторов, которые являются случайными.

На рис. 13 приведены зависимости коэффициента эллиптичности от пространственной угловой координаты для излучателя с линейной перегородкой и выступами без учета и с учетом влияния амплитудных и фазовых ошибок. Зависимость коэффициента эллиптичности без учета фазовых ошибок показана сплошной линией, аналогичная зависимость с учетом фазовых ошибок показана пунктирной линией. На рис. 14 представлены аналогичные зависимости для излучателя со ступенчатой перегородкой и выступами [18 – 20].

Характеристики рассчитывались для амплитудных ошибок со среднеквадратичным отклонением (СКО), равным 15%, и фазовых ошибок с величиной СКО, равного 10°, статистика которых взята с производства. Проведенные расчеты позволяют найти допустимые величины искажений поляризационных характеристик, обеспечивающие функционирование антенной системы. Однако при практической реализации антенны важно знать, какая точность изготовления должна выдерживаться при воспроизведении ее конструктивных параметров.

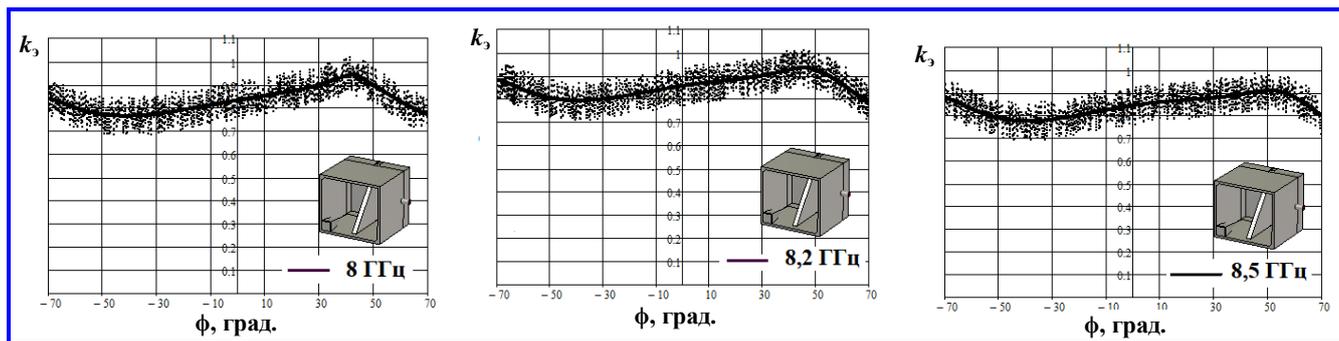


Рис. 13. Зависимости коэффициента эллиптичности от пространственной угловой координаты для излучателя с линейной перегородкой и выступами без учета и с учетом влияния амплитудных и фазовых ошибок

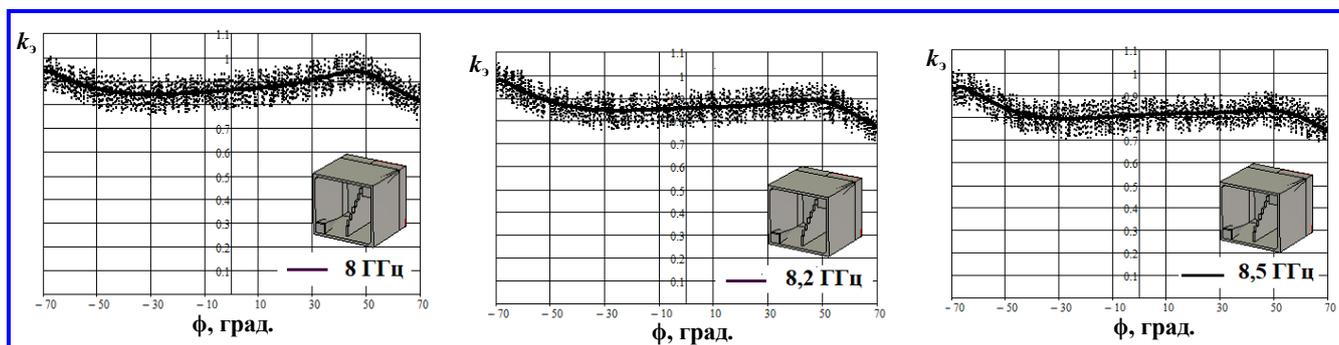


Рис. 14. Зависимости коэффициента эллиптичности от пространственной угловой координаты для излучателя со ступенчатой перегородкой и выступами без учета и с учетом влияния амплитудных и фазовых ошибок

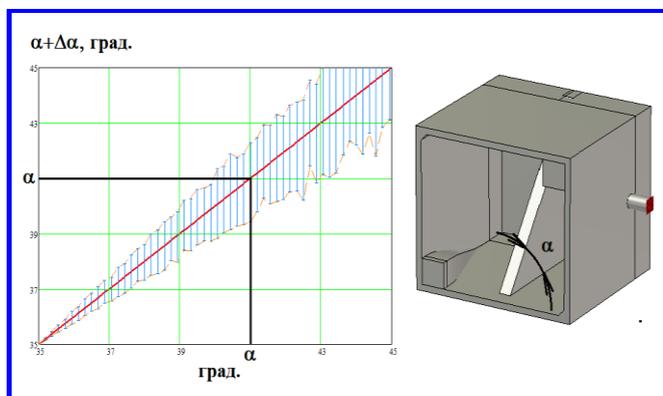


Рис. 15. Изменение угла пластины по случайному закону с линейно-нарастающей зависимостью параметра α

В рассматриваемом диапазоне частот шероховатость поверхности волновода слабо влияет на поляризационные характеристики, характеристики направленности и согласования. А точность изготовления выступов и пластины могут оказать существенное влияние. Поэтому целесообразно оценить влияние изменения параметров этих элементов конструкции на ее характеристики. Для расчета поляризационных характеристик можно использовать методы статисти-

ческой теории антенн, задавая изменение угла среза пластины с помощью датчика случайных чисел.

На рис. 15 показано изменение угла пластины по случайному закону с линейно-нарастающей зависимостью параметра α .

На рис. 16 – 18 приведены зависимости коэффициента эллиптичности от пространственной угловой координаты для разных значений α .

На рис. 19 приведены зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты.

Из рисунков видно, что оптимальным углом среза пластины является угол $\alpha = 35^\circ$. Изменение угла на 5° соответствует увеличению или уменьшению среза на 2 мм. Современная технология изготовления волноводных устройств позволяет выдерживать такие допуски.

На рис. 20 показаны ДН антенны с линейной перегородкой при выполнении угла среза перегородки с ошибкой $\pm 5^\circ$.

Изменение размеров выступов на 1,5 – 2 мм также не приводит к существенным изменениям поляризационных характеристик, характеристик направленности и согласования.

Определение статистических характеристик линейной антенной решетки из волноводных излучателей с перегородкой и выступами

ДН линейной антенной решетки при наличии амплитудных и фазовых ошибок можно представить в виде:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N f(\theta, \varphi) [I_n + r_n e^{j\alpha n}] \times e^{jk(x_n \cos(\varphi) \sin(\theta))}, \quad (2)$$

где $f(\theta, \varphi)$ – диаграмма излучателя антенной решетки; A_n – амплитуда возбуждения элемента; r_n – амплитудная ошибка; α_n – фазовая ошибка.

Фазовая ошибка имеет равномерное распределение, которое можно представить в виде:

$$P(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & -\pi \leq \alpha \leq \pi, \\ 0, & \alpha > \pi. \end{cases} \quad (3)$$

Амплитудная ошибка, обычно, распределена по нормальному закону:

$$P(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_r} e^{-\frac{r^2}{\sigma_r^2}}, \quad (4)$$

где σ_r – дисперсия величины r .

Таким образом, если известна статистика технологических погрешностей, возникающих при серийном изготовлении волноводных антенн и СВЧ-устройств, то несложно определить статистические зависимости основных характеристик от пространственных угловых координат [21].

ДН одиночного излучателя в азимутальной плоскости приведены на рис. 19, и они мало отличаются от ДН того же излучателя в составе антенной решетки.

ДН, построенные с учетом амплитудных и фазовых ошибок для решетки из волноводных излучателей с линейной перегородкой и выступами, приведены на рис. 21 – 23.

ДН, построенные с учетом амплитудных и фазовых ошибок для решетки из волноводных излучателей со ступенчатой перегородкой и выступами, приведены на рис. 24 – 26.

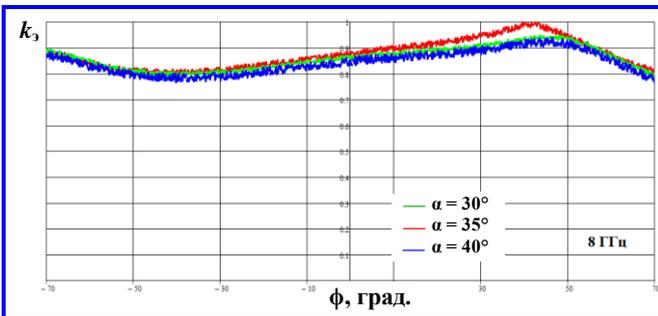


Рис. 16. Зависимости коэффициента эллиптичности от пространственной угловой координаты для разных значений α на частоте 8 ГГц

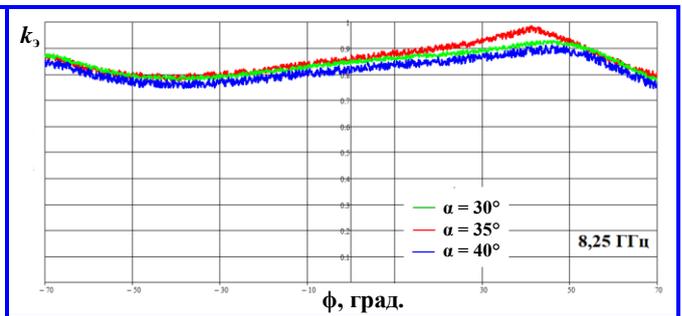


Рис. 17. Зависимости коэффициента эллиптичности от пространственной угловой координаты для разных значений α на частоте 8,25 ГГц

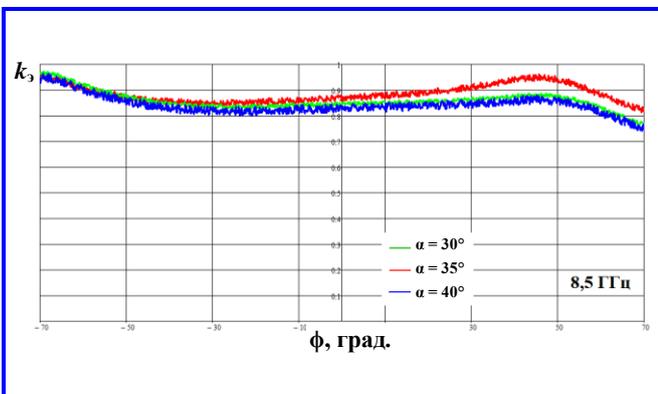


Рис. 18. Зависимости коэффициента эллиптичности от пространственной угловой координаты для разных значений α на частоте 8,5 ГГц

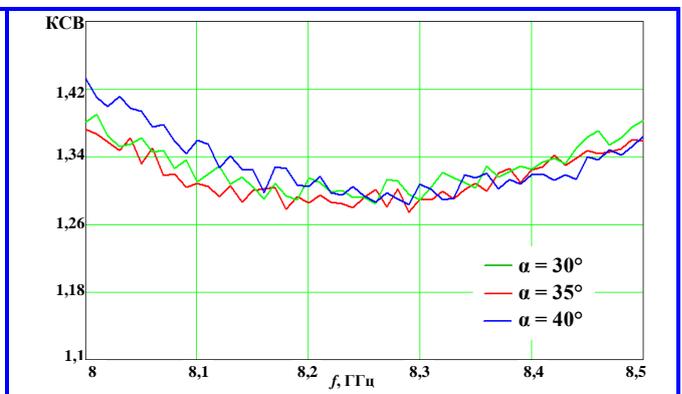


Рис. 19. Зависимости коэффициента стоячей волны от частоты

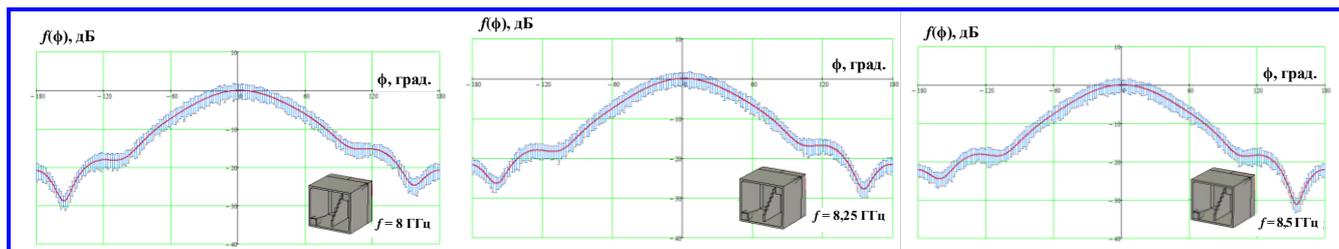


Рис. 20. Диаграмма направленности антенны с линейной перегородкой при выполнении угла среза перегородки с ошибкой $\pm 5^\circ$

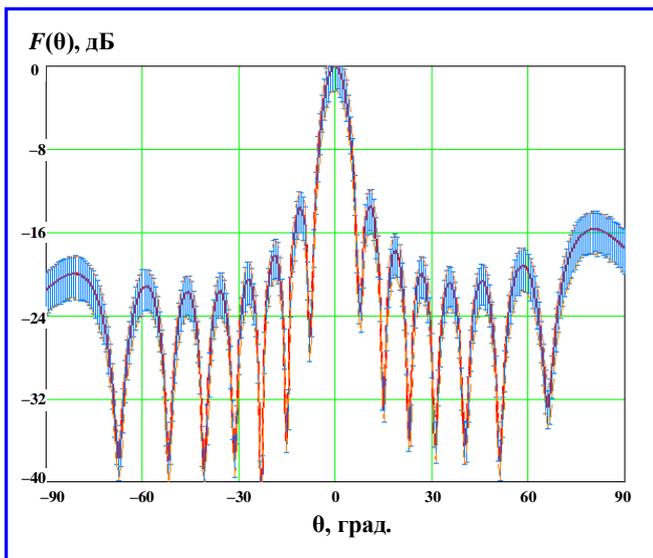


Рис. 21. Диаграмма направленности антенной решетки из волноводных излучателей, построенная с учетом амплитудных и фазовых ошибок на частоте 8 ГГц

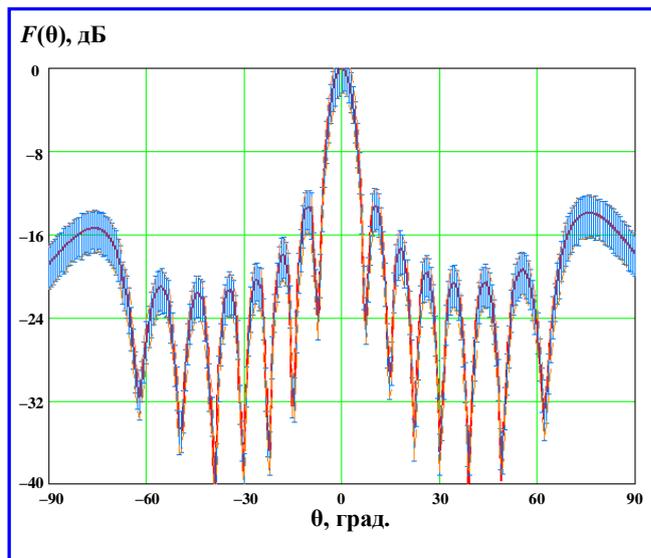


Рис. 22. Диаграмма направленности антенной решетки из волноводных излучателей, построенная с учетом амплитудных и фазовых ошибок на частоте 8,25 ГГц

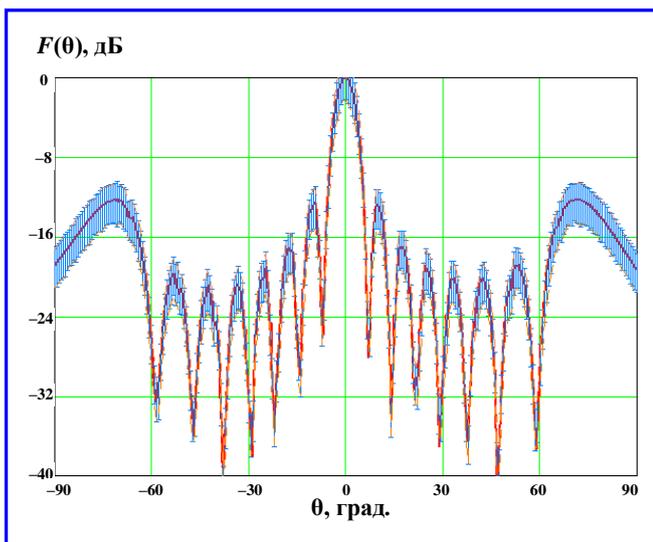


Рис. 23. Диаграмма направленности антенной решетки из волноводных излучателей, построенная с учетом амплитудных и фазовых ошибок на частоте 8,5 ГГц

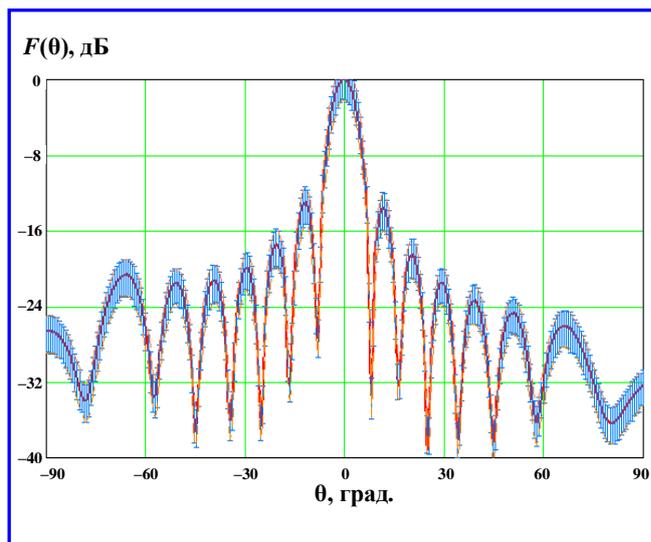


Рис. 24. Диаграмма направленности антенной решетки из волноводных излучателей, построенная с учетом амплитудных и фазовых ошибок на частоте 8 ГГц

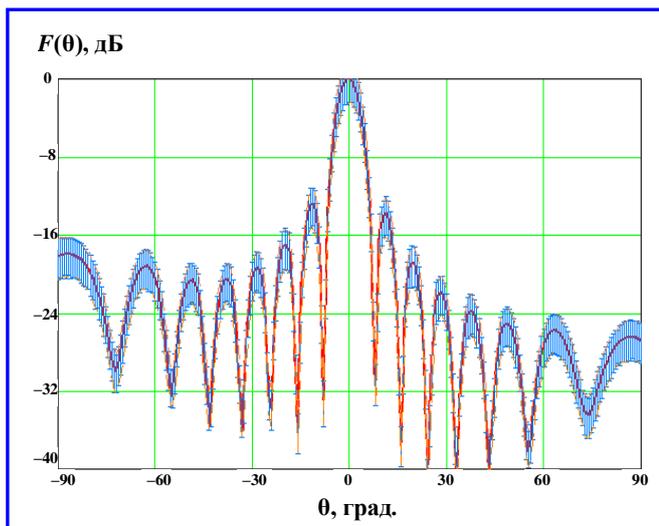


Рис. 25. Диаграмма направленности антенной решетки из волноводных излучателей, построенная с учетом амплитудных и фазовых ошибок на частоте 8,25 ГГц

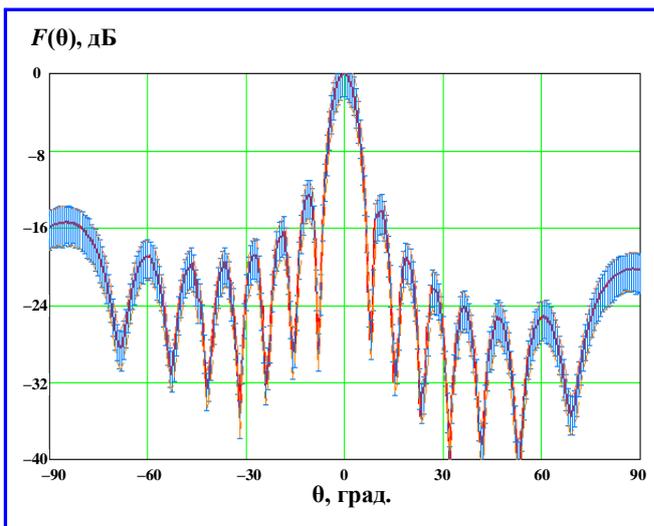


Рис. 26. Диаграмма направленности антенной решетки из волноводных излучателей, построенная с учетом амплитудных и фазовых ошибок на частоте 8 ГГц

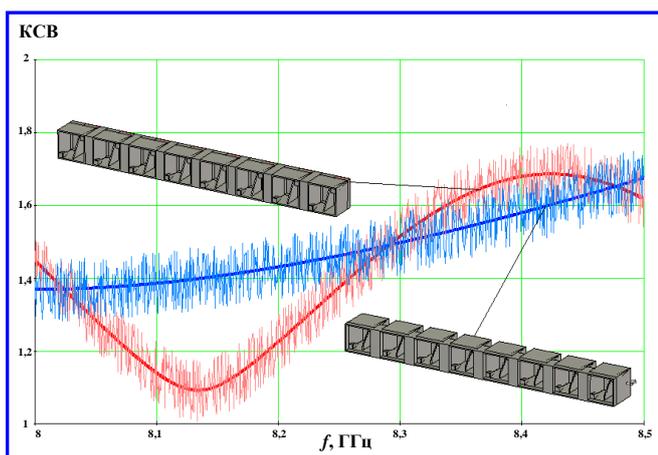


Рис. 27. Зависимости коэффициента стоячей волны от частоты

На рис. 26 приведена зависимость КСВ от частоты для решеток с линейной и ступенчатой перегородками.

Из результатов расчета видно, что при амплитудных ошибках с СКО, равным 15%, и фазовых ошибках с СКО, равным 10°, характеристики направленности и согласования изменяются в допустимых пределах. Изменение угла среза пластин волноводных излучателей также не оказывает существенного влияния как на характеристики излучения, так и на характеристики согласования.

Ниже приводятся результаты расчета кроссполаризационных диаграмм направленности

линейных антенных решеток с линейной и ступенчатой перегородками.

На рис. 27 и рис. 28 показаны кроссполаризационные ДН для антенной решетки с линейной перегородкой.

На рис. 29 и рис. 30 показаны кроссполаризационные ДН для антенной решетки со ступенчатой перегородкой.

Заключение

Предложена методика синтеза секторной ДН антенной решетки в виде функций Чебышева нечетных порядков. Дано обоснование выбора данной шаблонной функции. Приведены результаты расчета максимального отклонения функций для функций Чебышева нечетных порядков. Показано, что применение этих функций обеспечивает требуемое отклонение ДН от заданной формы.

С помощью разработанной методики рассчитаны ДН антенной решетки из волноводных излучателей с круговой поляризацией. Показано, что требуемая ДН хорошо аппроксимируется решеткой из $N = 32$ элементов. При меньшем числе элементов целесообразно использовать ДН одиночного излучателя, который обеспечивает лучшие поляризационные характеристики и более широкий сектор. Приведены зависимости коэффициента эллиптичности от пространственных угловых координат.

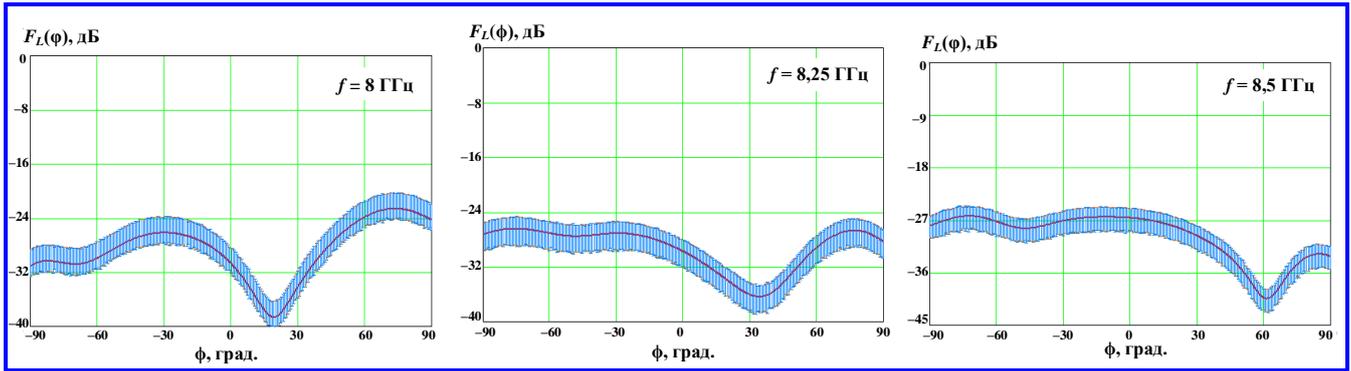


Рис. 28. Кроссполаризационные диаграммы направленности в азимутальной плоскости для антенной решетки со ступенчатой перегородкой

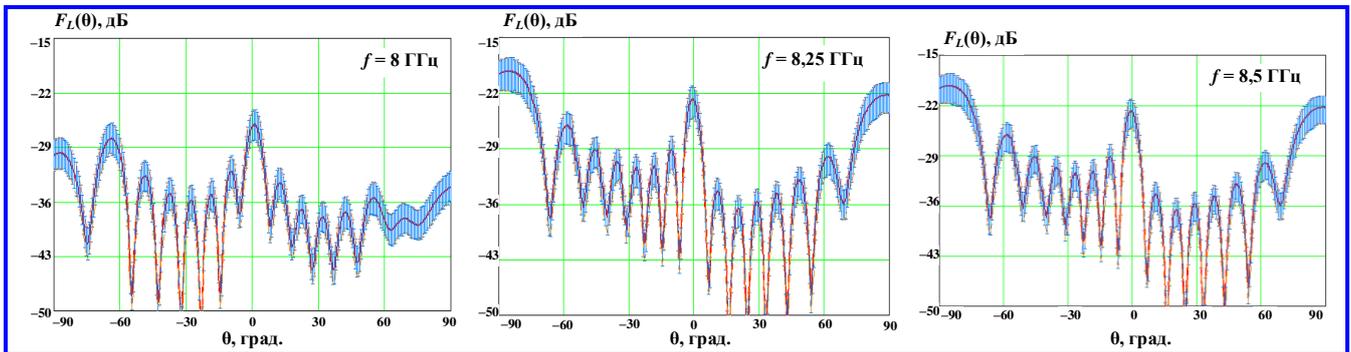


Рис. 29. Кроссполаризационные диаграммы направленности в угломерной плоскости для антенной решетки со ступенчатой перегородкой

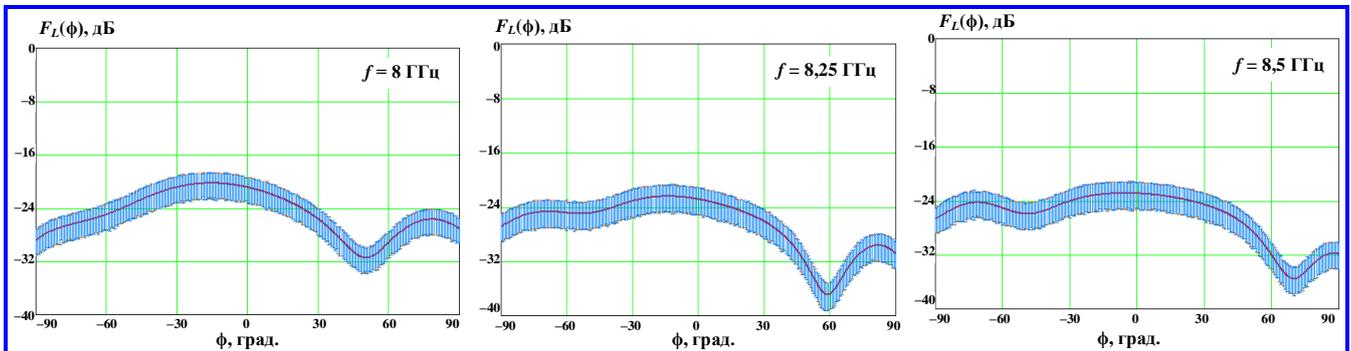


Рис. 30. Кроссполаризационные диаграммы направленности в азимутальной плоскости для антенной решетки со ступенчатой перегородкой

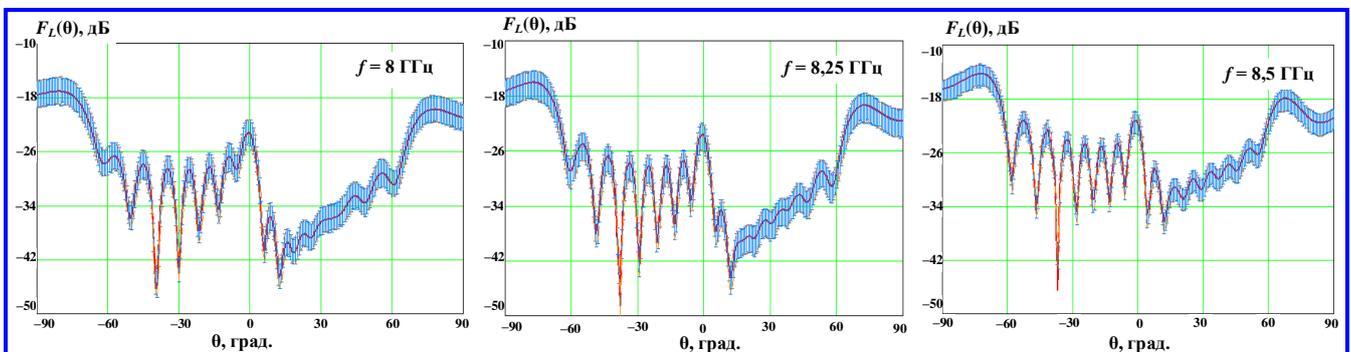


Рис. 31. Кроссполаризационные диаграммы направленности в угломерной плоскости для антенной решетки со ступенчатой перегородкой

Проведено исследование основных характеристик с учетом погрешностей изготовления элемента и антенной решетки из восьми элементов. Определены ДН и зависимости коэффициента эллиптичности от пространственных координат в рабочем диапазоне частот с учетом амплитудных и фазовых ошибок. Найдена связь между статистическими характеристиками и основными конструктивными параметрами элемента. Показано, что допуски на изготовление элементов достаточно большие и составляют 1,5 – 2 мм.

Литература

1. Об одной модификации метода парциальных диаграмм для синтеза секторных диаграмм направленности антенных решеток / Ю. О. Добровольский, И. Л. Рубанов // Акустический журнал. – 1982. – Т. 28. – Вып. 1. – С. 42 – 45.
2. Синтез фазированной антенной решетки с секторной диаграммой направленности / А. В. Останков, А. С. Нечаев, С. Ю. Дашян // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – № 3. – С. 78 – 84.
3. Оптимизация шаблона для повышения эффективности синтеза антенной решетки с косекансной диаграммой направленности / И. А. Кирпичева, А. В. Останков, А. И. Рябчунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – № 2. – С. 106 – 112.
4. Синтез излучающей системы, формирующей секторную диаграмму направленности с минимизацией эффекта Гиббса / В. Н. Митрохин, А. А. Пропастин // Радиоптика. – 2016. – № 6. – С. 1 – 13.
5. Применение нечетных функций Матье для синтеза секторной диаграммы направленности многоэлементного излучателя / Ю. С. Русов, А. А. Пропастин // Радиостроение. – 2021. – № 3. – С. 1 – 12. – DOI : 10.36027/rdeng.0321.0000194.
6. Обобщенные характеристики расширенных секторных лучей фазированной антенной решетки, полученных масштабированием фазовых распределений / О. В. Павлович, А. Н. Грибанов, С. Е. Гаврилова [и др.] // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2020. – № 1. – С. 46 – 54. – DOI : <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-46-54>.
7. Realizing ϕ -Symmetric Radiation Patterns of Circular Apertures Using Circular Square-Grid Arrays / R. Eirey-Perez, J. A. Rodriguez-Gonzalez, F. J. Ares-Pena // IEEE Antennas and Propagation magazine. – 2012. – Vol. 54. – № 3. – P. 135 – 142.
8. Антенные решетки спутниковых мобильных телекоммуникационных систем / Е. В. Овчинникова, Э. В. Гаджиев, С. Г. Кондратьева [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 182. – № 3. – С. 39 – 54.
9. Антенные системы радиолиний передачи информации малых космических аппаратов / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев, Е. В. Овчинникова [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-1. – С. 176 – 177.
10. Антенные системы радиолинии передачи информации космических аппаратов: состояние и перспективы развития / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 3. – С. 86 – 95. – DOI : 10.18127/j00338486-202103-09.
11. Волноводная антенная решетка X-диапазона с эллиптической поляризацией / Е. В. Овчинникова, Э. В. Гаджиев, Д. Т. Нгуен [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 114 – 115.
12. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн / Я. С. Шифрин. – Москва : Советское радио, 1970. – 384 с.
13. New results of the random errors theory for phased arrays / Ekstrom J. L. // Wescon Technical Papers (Antennas and Microwaves). – 1964. – Pt. 1. – P. 1 – 7.
14. Зайцев Э. Ф. Статистическая теория антенн : учебное пособие / Э. Ф. Зайцев, А. С. Черепанов. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 73 с.
15. Лобкова Л. М. Статистическая теория антенн сверхвысоких и оптических частот : (Влияние атмосферной турбулентности на характеристики антенн) / Л. М. Лобкова. – Москва : Связь, 1975. – 175 с.
16. Analysis of the pattern tolerances in linear arrays with arbitrary amplitude errors / P. Rocca, L. Manica, N. Anselmi [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2013. – Vol. 12. – P. 639 – 642.
17. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern / J. Ruze // Suppl. al Nuovo Cimento. – 1952. – Vol. 9. – P. 364 – 380.
18. Малогабаритный волноводный излучатель / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Инжиниринг и телекоммуникации – En&T : Сборник тезисов VIII Международной конференции, Долгопрудный, 24 – 25 ноября 2021 года. – Москва / Долгопрудный: Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 2021. – С. 59 – 62.
19. Моделирование антенной решетки из волноводных излучателей на основе септум-поляризаторов / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин [и др.] // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 4. – С. 108 – 118. – DOI : 10.18127/j00338486-202104-12.
20. Modelling of a Small-Sized Waveguide Radiator with Elliptical Polarization / E. Ovchinnikova, E. Gadzhiev, N. D. To [et al.] // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T, 2021, Dolgoprudny, 24 – 25 ноября 2021 года. – Dolgoprudny, 2021. – DOI : 10.1109/EnT50460.2021.9681739.
21. Фам Ван Винь. Двухдиапазонная антенна системы спутникового телевидения : специальность 05.12.07 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фам Ван Винь. – Казань, 2019. – 114 с.

Поступила в редакцию 21.12.2021

Елена Викторовна Овчинникова, доктор технических наук, доцент,
e-mail: oea8888@gmail.com, т. 8 (915) 323-40-36.

(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

Светлана Геннадьевна Кондратьева, кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kondratieff89@ya.ru, т. 8 (915) 042-94-22.

(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ)));

Российский университет дружбы народов (РУДН)).

Павел Александрович Шмачилин, кандидат технических наук, доцент,
e-mail: shmachilin@gmail.com, т. 8 (916) 586-44-32.

Нгуен Динь То, аспирант, e-mail: ndt.mai.198@gmail.com, т. 8 (968) 447-99-44.
(Московский авиационный институт (МАИ (НИУ))).

Эльчин Вахидович Гаджиев, кандидат технических наук, доцент,
e-mail: gadzhiev_elchin@mail.ru, т. 8 (926) 392-96-27.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)).

GENERATION OF SECTOR RADIATION PATTERN AND ANALYSIS OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF WAVEGUIDE ANTENNA ARRAY

**E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondrateva, P. A. Shmachilin,
Nguen Din To, E. V. Gadzhiev**

The article presents the methods for generation of sector radiation patterns in linear antenna arrays. Antenna arrays with different numbers of components are considered. Methods are proposed in the literature for antenna arrays with a small number of components that use preemphasis of the required sector radiation patterns. For continuous antenna systems or antennas with a numbers of components, various modifications of the method of partial radiation patterns are considered, that provide a preset accuracy of presentation of the sector radiation patterns shapes. The results of the synthesis of the sector radiation pattern of an antenna array from waveguide radiators with elliptical polarization are presented. The template functions that determine the sector radiation pattern are considered in the form of Chebyshev polynomials of odd orders. The statistical characteristics of the antenna array are determined. The effect of amplitude and phase errors on the polarization characteristics is presented.

Keywords: sector radiation patterns, synthesis of pattern characteristics, waveguide antenna arrays, onboard contact antenna arrays, statistical characteristics of antenna arrays.

References

1. About one modification of the partial diagrams method for the synthesis of sector radiation patterns of antenna arrays / Iu. O. Dobrovolskii, I. L. Rubanov // Akusticheskij Zhurnal, 1982. – Vol. 28. – Issue 1. – P. 42 – 45.
2. Synthesis of phased antenna array with a sector radiation pattern / A. V. Ostantkov, A. S. Nechaev, S. Iu. Dashian // Bulletin of Voronezh State Technical University, 2021. – Vol. 17. – No. 3. – P. 78 – 84.
3. Template optimization for improving the synthesis efficiency of an antenna array with a cosecant radiation pattern / I. A. Kirpicheva, A. V. Ostantkov, A. I. Riabchunov // Bulletin of Voronezh State Technical University, 2020. – Vol. 16. – No. 2. – P. 106 – 112.
4. Synthesis of radiating system generating a sector radiation pattern with minimization of the Gibbs phenomenon / V. N. Mitrokhin, A. A. Propastin // Radio optics. 2016. – No. 6. – P. 1 – 13.
5. The use of odd Mathieu functions for the synthesis of sector radiation pattern of a multi-component radiator / Iu. S. Rusov, A. A. Propastin // Radio engineering, 2021. – No. 03. – P. 1 – 12. – DOI: 10.36027/rdeng.0321.0000194.
6. Generalized characteristics of extended sector beams of phased array antenna obtained by scaling phase distributions / O. V. Pavlovich, A. N. Griбанov, S. E. Gavrilova, G. F. Moseichuk, I. A. Kuznetsov // JSC Concern of Aerospace Defense ‘Almaz-Antey’, 2020. – No. 1. – P. 46 – 54. – DOI : <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-46-54>.
7. Realizing ϕ -Symmetric Radiation Patterns of Circular Apertures Using Circular Square-Grid Arrays / R. Eirey-Perez, J. A. Rodriguez-Gonzalez, F. J. Ares-Pena // IEEE Antennas and Propagation magazine, 2012. – Vol. 54. – No. 3. – P. 135 – 142.
8. Antenna arrays of satellite mobile telecommunication systems / E. V. Ovchinnikova, E. V. Gadzhiev, S. G. Kondrateva, A. L. Polandov, P. A. Shmachilin, M. A. Sokov, O. A. Volkov // Matters of Electromechanics. VNIIEP Proceedings, 2021. – Vol. 182. – No. 3. – P. 39 – 54.
9. Antenna systems of radio links for information transmission of small spacecrafts / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev, E. V. Ovchinnikova, Nguen Din To, S. G. Kondrateva, P. A. Shmachilin // Microwave engineering and telecommunications technologies, 2020. – No. 1-1. – P. 176 – 177.

10. Antenna systems of the information transmission radio link of spacecraft: state and development prospects / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondrateva, P. A. Shmachilin, Nguen Din To, E. V. Gadzhiev, A. O. Perfilova // Radio engineering, 2021. – Vol. 85. – No. 3. – P. 86 – 95. – DOI : 10.18127/j00338486-202103-09.
11. X-band waveguide antenna array with elliptical polarization // E.V. Ovchinnikova, E.V. Gadzhiev, D. T. Nguen, S. G. Kondrateva, P. A. Shmachilin // Microwave engineering and telecommunications technologies, 2021. – No. 3. – P. 114 – 115.
12. Shifrin Ia. S. Issues of antenna statistical theory. – Moscow: Sovetskoe radio, 1970. – 384 p.
13. New results of the random errors theory for phased arrays / Ekstrom J. L. // Wescon Technical Papers (Antennas and Microwaves), 1964. – Pt. 1. – P. 1 – 7.
14. Zaitsev E. F. Antenna statistical theory : Textbook / E. F. Zaitsev, A. S. Cherepanov. – St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing, 1999. – 73 p.
15. Lobkova L. M. Statistical theory of microwave and optical frequencies antennas : (Impact of atmospheric turbulence on antenna characteristics). – Moscow: Sviaz, 1975. – 175 p.
16. Analysis of the pattern tolerances in linear arrays with arbitrary amplitude errors / P. Rocca, L. Manica, N. Anselmi, A. Massa // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013. – Vol. 12. – P. 639 – 642.
17. Ruze J. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern // Suppl. al Nuovo Cimento, 1952. – Vol. 9. – P. 364 – 380.
18. Small-size waveguide radiator / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondrateva, P. A. Shmachilin [et al.] // Engineering and telecommunications – En&T : Collected volume of abstracts of VIII International Conference, Dolgoprudny, 24 – 25 November, 2021. – Moscow / Dolgoprudny: Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 2021. – P. 59 – 62.
19. Modeling of antenna array of waveguide radiators based on septum polarizers / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondrateva, P. A. Shmachilin, Nguen Din To, E. V. Gadzhiev, A. O. Perfilova // Radio engineering, 2021. – Vol. 85. – No. 4. – P. 108 – 118. – DOI : 10.18127/j00338486-202104-12.
20. Modelling of a Small-Sized Waveguide Radiator with Elliptical Polarization / E. Ovchinnikova, E. Gadzhiev, N. D. To [et al.] // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T, 2021, Dolgoprudny, 24 – 25 November, 2021. – Dolgoprudny, 2021. – DOI 10.1109/EnT50460.2021.9681739.
21. Fam Van Vin. Dual band antenna of satellite television system : specialty 05.12.07: Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Fam Van Vin. – Kazan, 2019. – 14 p.

Elena Viktorovna Ovchinnikova, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Associate Professor,
e-mail: oea8888@gmail.com, tel. +7 (915) 323-40-36.
(Moscow Aviation Institute (MAI (NRU))).

Svetlana Gennadevna Kondrateva, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
Associate Professor, e-mail: kondratieff89@ya.ru, tel. +7 (915) 042-94-22.
(Moscow Aviation Institute (MAI (NRU))).
(Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)).

Pavel Aleksandrovich Shmachilin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
e-mail: shmachilin@gmail.com, tel. +7 (916) 586-44-32.
Nguen Din To, Ph. D. Student, e-mail: ndt.mai.198@gmail.com, tel. +7 (968) 447-99-44.
(Moscow Aviation Institute (MAI (NRU))).

Ehlichin Vakhidovich Gadzhiev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
e-mail: gadzhiev_elchin@mail.ru, tel. +7 (926) 392-96-27.
(JC «VNIEM Corporation»).