

Всенаправленная в Н-плоскости рефлекторная антенна

А. Тасмагамбетов, Г. А. Костиков, С. В. Балландович, Ю. Г. Антонов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
andreytas2002@gmail.com

Аннотация: предложена оригинальная конструкция слабонаправленной антенны, функционирующей аналогично двухзеркальным рефлекторным антеннам. В результате электродинамического моделирования и оптимизации характеристик в диапазоне 5,5 ГГц – 6,3 ГГц, неравномерность диаграммы направленности (ДН) в азимутальной плоскости составила не более 2,2 дБ, максимальный КУ равен 7 дБ. Представлены результаты экспериментальных исследований изготовленного макета.

Ключевые слова: рефлекторная антенна; антенна Кассегрена; всенаправленная диаграмма направленности в Н-плоскости; узкая диаграмма направленности в Е-плоскости; антенна с высоким уровнем входной мощности

I. ВВЕДЕНИЕ

В ряде областей требуются антенны линейной поляризации способные работать с высоким уровнем мощности и обладающие изотропной диаграммой направленности (ДН) в азимутальной плоскости. Простейшими антеннами, удовлетворяющими этим требованиям, являются электрические диполи. Коэффициент усиления (КУ) для одиночной антенны такого типа зависит от электрической длины и может принимать значения в диапазоне от 2,46 дБи до 4,8 дБи; полоса частот зависит от геометрических параметров [1] и может составлять 5–20 %.

Тем не менее, для многих задач требуются антенны с большим КУ. Увеличить КУ позволяет переход на коллинеарные антенные решетки. Например, в [2] представлена антенна, состоящая из щелевых излучателей с волноводной системой питания. Неравномерность ДН в Н-плоскости не превышает 1,4 дБ в относительной полосе рабочих частот около 6 %. КУ антенны достигает 16 дБи на 26 ГГц при ширине главного лепестка ДН в 5°. Антенна может работать с высоким уровнем мощности, так как выполнена из металла. В то же время, предложенная конструкция [2] является весьма трудоемкой в изготовлении. Печатные коллинеарные антенные решетки [3, 4] значительно технологичнее волноводных, но при больших входных мощностях для них характерен высокий нагрев полосковых элементов.

В данной работе описана антенна с изотропной ДН в Н-плоскости и повышенным КУ. За счет развитой металлической поверхности предложенная конструкция способна работать на высоком уровне мощности.

II. КОНЦЕПТ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ АНТЕННЫ

В основе разработанной антенны лежит двухзеркальная схема Кассегрена (рис. 1). Классические антенные системы Кассегрена осесимметричны

относительно оси ox (рис. 1). Предлагаемая антенна создается путем вращения схемы на рис. 1 вокруг оси oz . На рис. 2 изображена получившаяся конструкция. Облучателем в ней является радиальный волновод, сформированный из двух дисков и возбуждаемый коаксиально-волноводным переходом.

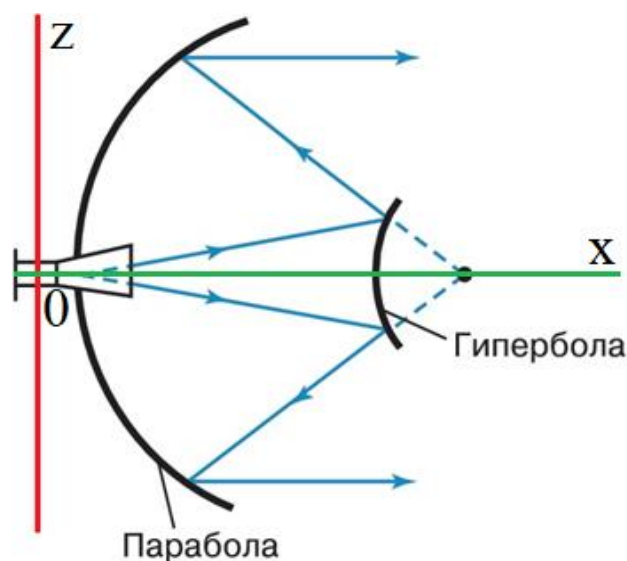


Рис. 1. Двухзеркальная схема Кассегрена

Волна, формирующаяся на выходе радиального волновода, отражается от вторичного рефлектора в форме гиперболы и освещает основное зеркало параболической формы.

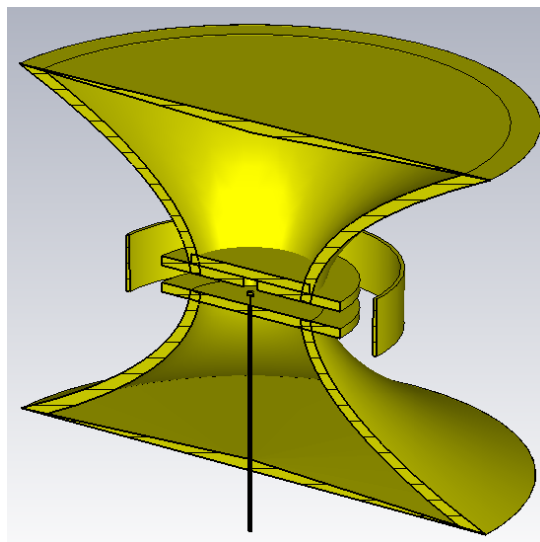


Рис. 2. Трехмерная модель разработанной антенны в разрезе

Размеры антенны сопоставимы с рабочими длинами волн, вследствие чего применение законов геометрической оптики ограничено. Для количественной оценки, оптимизации характеристик антенны и уточнения конструкции необходим электродинамический анализ предложенной структуры. Начальное приближение для наибольшего линейного размера антенны, в нашем случае ее высоты (на рис. 2 она обозначена как D) может быть получено из требуемой ширины главного лепестка ДН в Е-плоскости ($2\Delta\theta$) на основе соотношения для косинусоидального токового распределения [1]:

$$2\Delta\theta = 57^\circ \cdot \lambda/D, \quad (1)$$

Для частоты $f_0=5,8$ ГГц и $2\Delta\theta=30^\circ$ в соответствии с (1) высота антенны составляет 98 мм.

III. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ

В результате оптимизации получились следующие размеры антенны: 98 мм – высота, 71 мм – диаметр. Расчетная частотная зависимость модуля коэффициента отражения изображена на рис. 3.

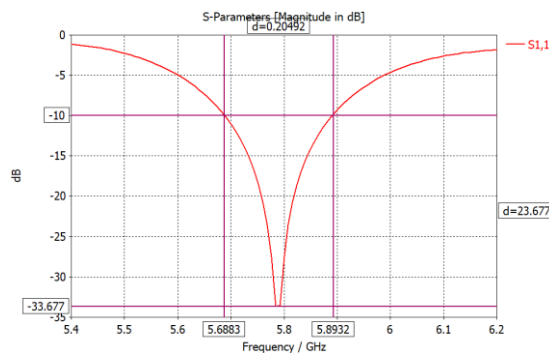


Рис. 3. Расчетная частотная зависимость модуля коэффициента отражения антенны

Относительная полоса рабочих частот, определяемая по уровню $|S_{11}|$ не более -10 дБ составила 3,4 %. ДН на центральной частоте рабочего диапазона в Е и Н-плоскостях изображены на рис. 4а и рис. 4б соответственно.

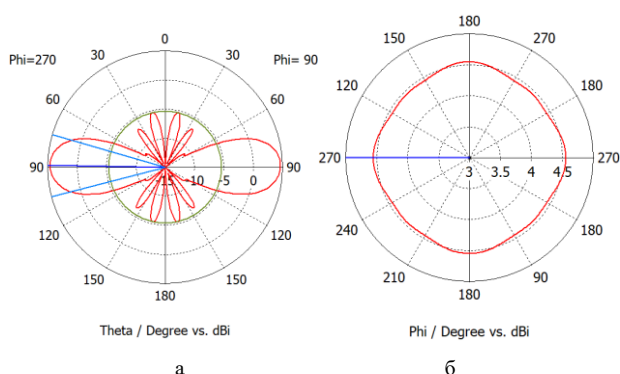


Рис. 4. а – диаграмма направленности в Е-плоскости, б – диаграмма направленности в Н-плоскости.

Максимальный КУ антенны составляет 4,6 дБи; ширина главного лепестка ДН равна 31° ; уровень боковых лепестков -9,9 дБ. Неравномерность ДН в Н-плоскости, равная 0,12 дБ, обусловлена погрешностью моделирования, возникающей из-за особенностей разбиения трехмерной модели на элементарные ячейки.

IV. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ АНТЕННЫ

В целях упрощения процесса изготовления макета профили основного и вторичного рефлекторов были заменены профилями с кусочно-линейной аппроксимацией, как показано на рис. 5. Основной рефлектор, имеющий параболическую форму, был аппроксимирован усеченными конусами, по два с каждой стороны от дисков радиального волновода. Вторичный рефлектор, имеющий гиперболическую форму, был аппроксимирован плоскостью. В модель добавлены также элементы конструкции, винты и гайки. Электродинамическое моделирование показало, что это не привело к заметным потерям в характеристиках.

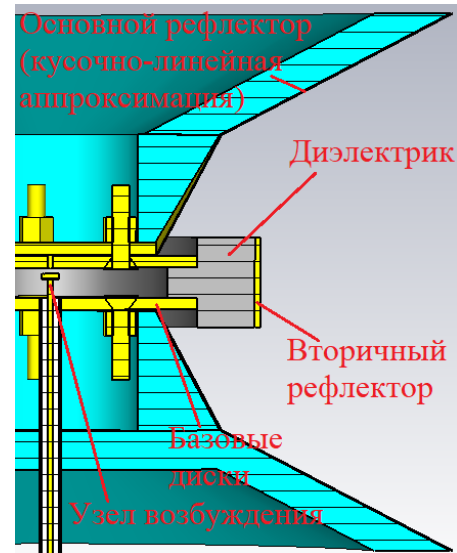


Рис. 5. Двухмерное представление разрабатываемой антенны в разрезе

Вторичный рефлектор крепится с помощью диэлектрической втулки (рис. 5), выполненной из вспененного ПВХ ($\epsilon=1,32$). В основном рефлекторе вместо цельнометаллической конструкции была использована пластиковая основа с медным покрытием. Обтекатель антенны имеет форму цилиндра с крышками, которые изготовлены по технологии 3D печати из пластика ПЭТГ ($\epsilon=2,6$). Итоговая трехмерная модель антенны изображена на рис. 6.

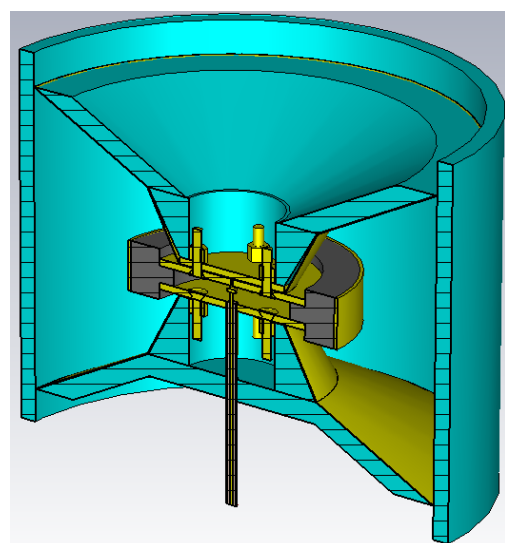


Рис. 6. Трехмерная модель антенны в разрезе

V. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

В результате, была сделана электродинамическая модель антенны с учетом конструктивных особенностей. В их числе аппроксимация основного и вторичного рефлекторов; элементы крепления; использование медной фольги, нанесенной на пластиковую основу; диэлектрический слой из вспененного ПВХ, необходимый для крепления вторичного рефлектора; обтекатель из ПЭТГ.

Расчетная частотная зависимость $|S_{11}|$ антенны представлена на рис. 7.

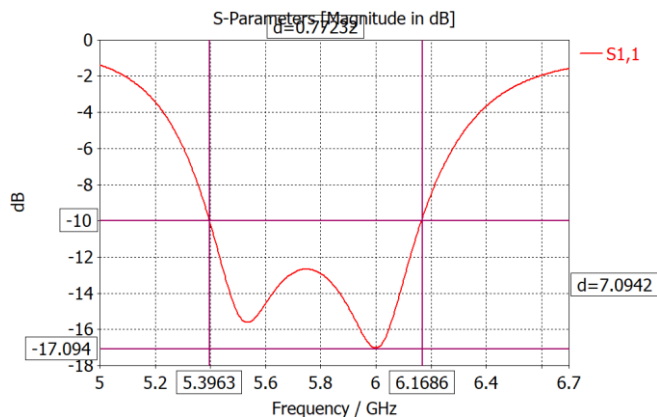


Рис. 7. Расчетная частотная зависимость $|S_{11}|$ антенны с учетом конструктивных особенностей

Относительная рабочая полоса частот составила 13,3 %. Сечения ДН на центральной частоте f_0 в Е и Н-плоскостях изображены на рис. 8а и рис. 8б соответственно.

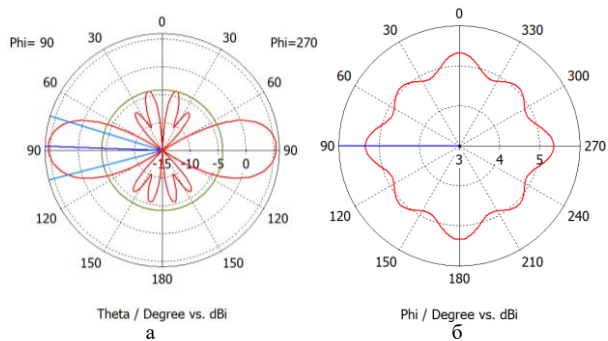


Рис. 8. а – диаграмма направленности в Е-плоскости, б – диаграмма направленности в Н-плоскости

Максимальный КНД антенны достигает 5,34 дБи. Ширина главного лепестка ДН антенны в Е-плоскости составляет $31,7^\circ$. Неравномерность диаграммы направленности в Н-плоскости оказывается не хуже 0,52 дБ. Увеличение неравномерности вызвано наличием винтов, скрепляющих базовые диски радиального волновода с основным рефлектором. КПД антенны в рабочей полосе частот не хуже 97 %.

Термостатический анализ антенны показал, что при входной мощности сигнала 50 Вт и при отсутствии ветра происходит нагрев антенны на 10°C по отношению к температуре окружающей среды. Причем максимальный нагрев наблюдается вблизи коаксиального кабеля. Из деталей антенны, наибольший нагрев происходит в пределах коаксиально-волноводного перехода, здесь температура оказалась выше, чем у окружающей среды на 5°C . На рис. 9 представлена трехмерная цветная

диаграмма распределения температуры по поверхности антенны, где хорошо виден характерный нагрев центральной жилы кабеля.

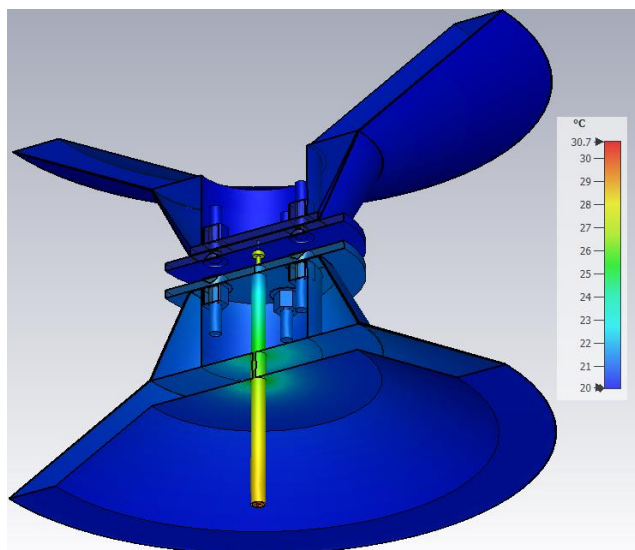


Рис. 9. Трехмерная цветная диаграмма температур (максимальной температуре соответствует красный цвет, а минимальной температуре соответствует синий цвет)

VI. МАКЕТ РАЗРАБОТАННОЙ АНТЕННЫ

На основе модели был создан макет антенны. Фотография, сделанная при измерениях макета в БЭК ЛЭТИ, показана на рис. 10.

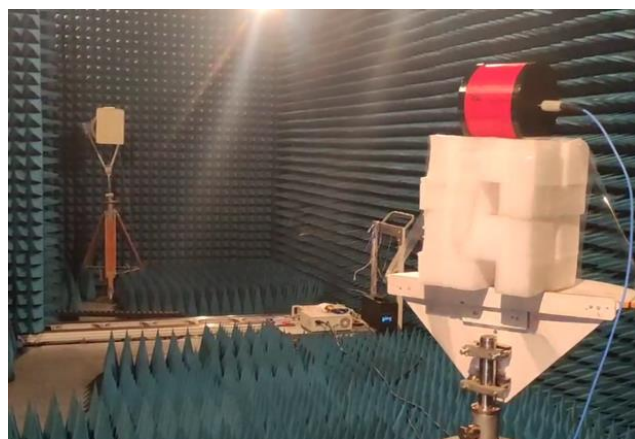


Рис. 10. Макет антенны в БЭК

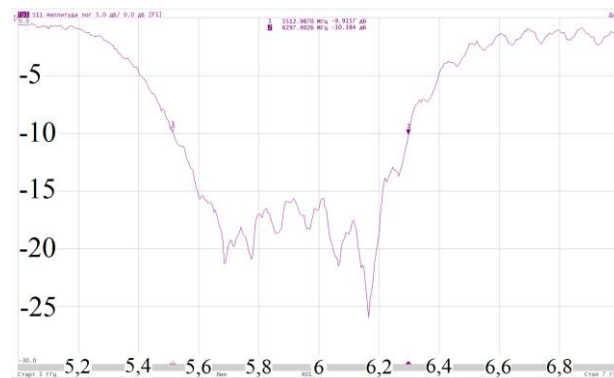


Рис. 11. Экспериментальная частотная зависимость модуля коэффициента отражения антенны

Экспериментальная частотная зависимость модуля коэффициента отражения антенны приводится на

рис. 11. Относительная рабочая полоса частот по уровню $|S_{11}| = -10$ дБ составила 14 %. Измеренные ДН антенны в Н- и Е-плоскостях на центральной частоте диапазона приводится на рис. 12 и рис. 13 для Н- и Е-плоскостей соответственно.

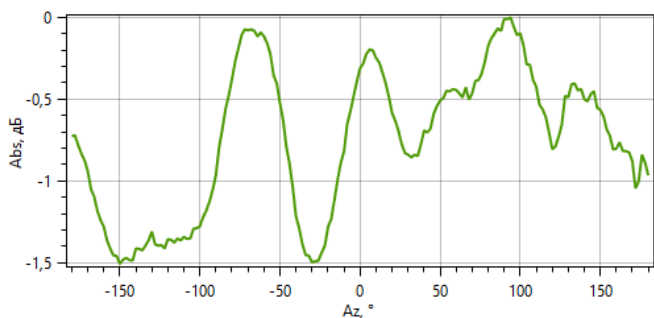


Рис. 12. Нормированная диаграмма направленности на частоте 5,8 ГГц в Н-плоскости

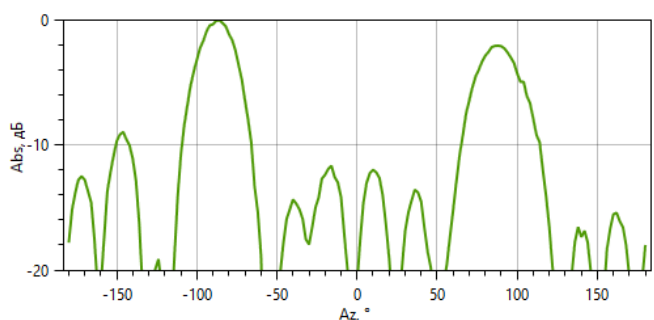


Рис. 13. Нормированная диаграмма направленности на частоте 5,8 ГГц в Е-плоскости

На рис. 14 приведена зависимость неравномерности ДН антенны в азимутальной плоскости в зависимости от частоты. Из рис. 14 видно, что неравномерность в Н-плоскости не превышает 2,2 дБ.

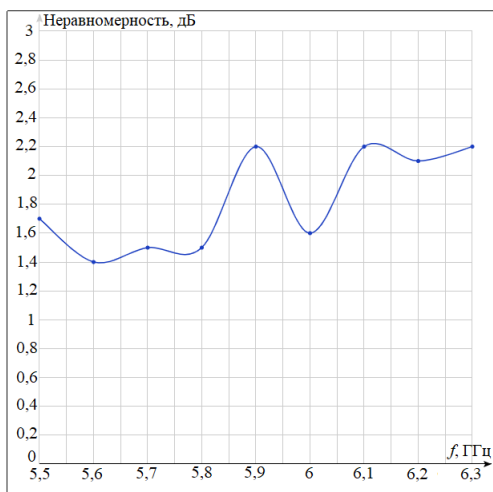


Рис. 14. Частотная зависимость неравномерности диаграммы направленности в Н-плоскости

На рис. 15 приведена частотная зависимость максимального уровня боковых лепестков ДН в Е-плоскости. В диапазоне 5,5 – 5,9 ГГц уровень боковых лепестков остается не выше -8,9 дБ.

На рис. 16 изображена частотная зависимость ширины главного лепестка диаграммы направленности в Е-плоскости, которая лежит в пределах 25° – 34°. Причем с ростом частоты ширина главного лепестка уменьшается.

На рис. 17 приведена частотная зависимость измеренного КУ разработанной антенны. Значения КУ находятся в интервале 3,6 – 6,9 дБи, максимальное значение достигается на частоте 5,9 ГГц.

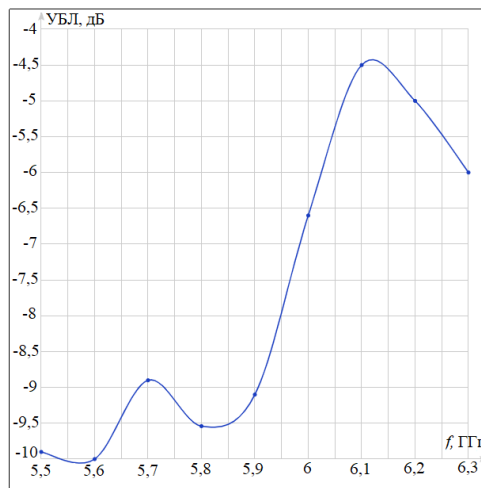


Рис. 15. Частотная зависимость максимального уровня боковых лепестков диаграммы направленности в Н-плоскости

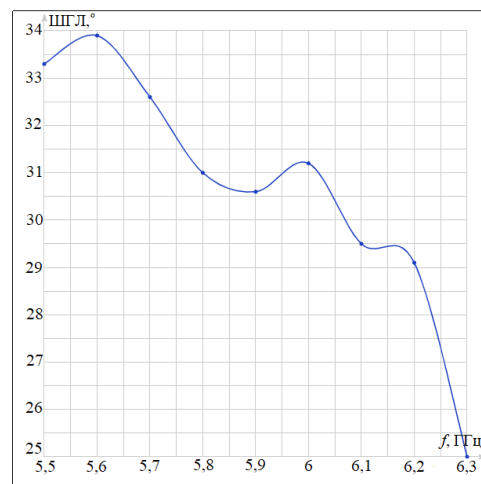


Рис. 16. Частотная зависимость ширины главного лепестка диаграммы направленности в Е-плоскости

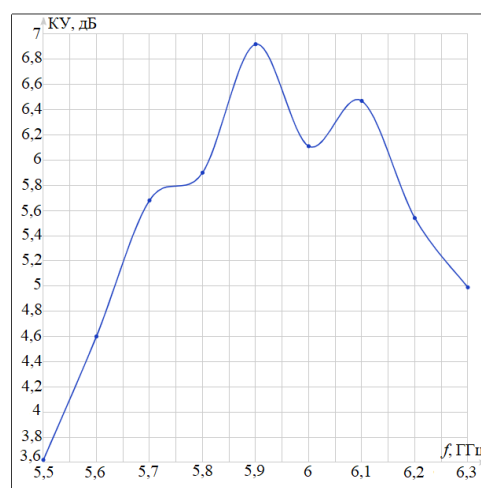


Рис. 17. Частотная зависимость коэффициента усиления

Из рис. 15 – рис. 17 следует, что основной причиной снижения КУ в верхней части рабочего частотного диапазона является повышенный уровень боковых лепестков.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты разработки и экспериментальных исследований рефлекторной антенны с изотропной ДН в Н-плоскости. Предложенные конструктивные решения показали свою состоятельность и позволили реализовать антенну с шириной главного лепестка в Е-плоскости порядка 30° и максимальным коэффициентом усиления около 7 дБи. Неравномерность ДН в азимутальной плоскости не превышает 2,2 дБ. Рабочая полоса частот антенны лежит в пределах от 5,5 ГГц до 6,3 ГГц. Средний КПД в полосе не хуже 97 %.

Неравномерность диаграммы направленности в Н-плоскости у разработанной антенны превосходит таковую у коллинеарной антенной решетки [2] на 0,8 дБ. Относительная рабочая полоса частот по согласованию для макета разработанной антенны больше, чем у коллинеарной антенной решетки [2] на 7 %. Вместе с тем

полученная антенна имеет более простую систему питания и может использоваться на более высоких уровнях входной мощности по сравнению с полосковыми коллинеарными решетками [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Constantine A. Balanis (1996). *Antenna theory: analysis and design*, 2nd edition.
- [2] H.R.D. Filgueiras, I. F. da Costa, Arismar Cerqueira S. Jr., James R. Kelly and Pei Xiao: A Novel Approach for Designing Omnidirectional Slotted-Waveguide Antenna Arrays.
- [3] Антонов Ю.Г., Баллантович С.В., Костиков Г.А., Любина Л.М., Сугак М.И. Копланарная коллинеарная антенная решётка для БПЛА // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции (4–6 октября 2023 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2023. С. 65–67.
- [4] Yang Yu, Yong-Zhong Zhu, and Weiguo Dang, "A Wideband Omnidirectional Printed Array Antenna," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 77, 137-143, 2018. doi:10.2528/PIERL18032702