

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СЕКЦИОНИРОВАННОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Я.А. Хомяков, Ю.Е. Седельников

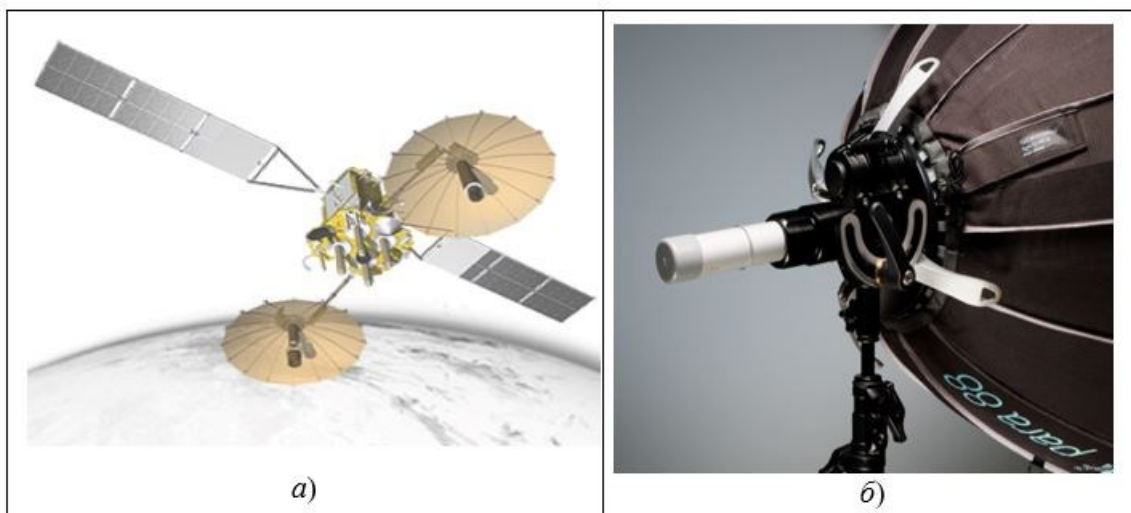
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10

Аннотация: Разработана упрощенная модель зеркальной антенны с секционированным рефлектором Ка-диапазона для оценки зависимости диаграммы направленности (ДН) от количества ребер. В среде MathCAD 15.0 выполнен предварительный расчёт для оценки влияния секционирования профиля рефлектора. Произведено моделирование спроектированной антенны в ПО CST Studio Suite. Получены графики ДН для различных условий, выполнено сравнение зависимости коэффициента усиления антенны от количества секций.

Ключевые слова: зеркальная антенна, Ка-диапазон, цилиндрическая антенна, антенна Pillbox, секционированный рефлектор, аппроксимированный профиль.

Введение

Зеркальные антенны ведут историю от Г. Герца, впервые использовавшего в 1887 году в опытах с электромагнитными полями металлический рефлектор. К настоящему времени зеркальные антенны являются одним из наиболее распространенных типов остронаправленных антенн диапазонов длин волн от метрового до субмиллиметрового. Известно большое число их разновидностей, отличающихся электрическими размерами, типом, конструкцией и материалом рефлектора. Весьма широка и область применения-от профессиональных радиосистем до уровня бытовой аппаратуры. Среди них можно выделить группу разновидностей антенн (Рис.1), в которых рефлектор выполнен в виде ряда плоских секций или локально плоских участков, криволинейного, как правило, параболического профиля [1-5].



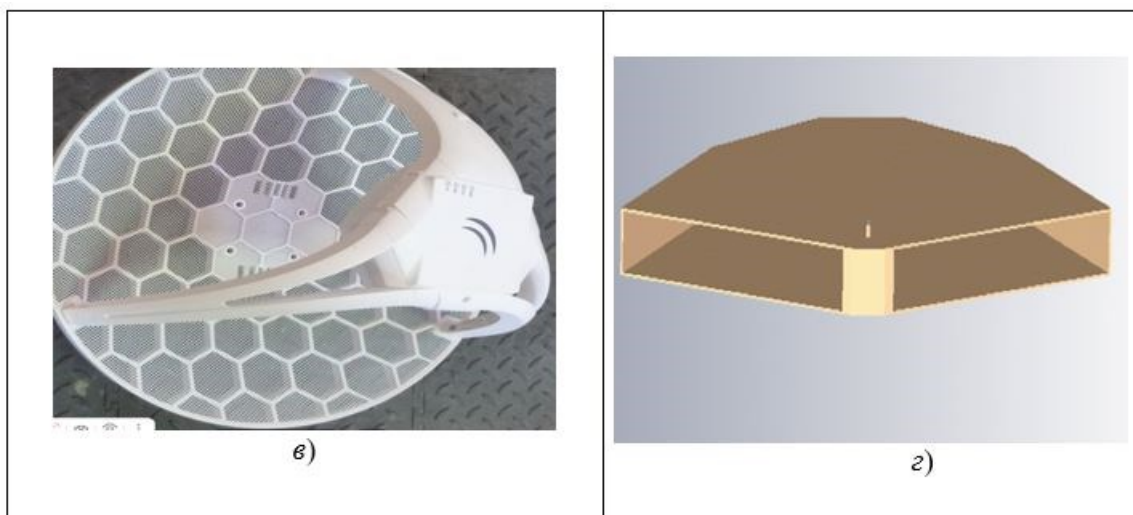


Рисунок 1. Варианты антенн с секционированным рефлектором:
 а) развертываемая антенна системы «Молния-1»,
 б) развертываемая антенна наземной системы фиксированной связи,
 в) антенна наземной аппаратуры спутникового ТВ вещания,
 г) антенна аппаратуры беспроводной широкополосной связи WLAN

Строгий электродинамический анализ таких антенн представляет весьма сложную задачу, решение которой занимает продолжительное время. Более того, зачастую задача проектирования рефлектора строго ограничена требованиями к габаритам и массе. Поэтому представляет практический интерес предварительная оценка влияния секционированного выполнения рефлектора, состоящего из набора локально плоских участков, на электрические свойства антенны. Выработка указанных оценок является целью настоящей работы.

Оценка влияния секционирования профиля рефлектора

Отклонение реальной отражающей поверхности рефлектора от гладкой, соответствующей требуемому параболическому профилю, приводит к искажению диаграммы направленности и, соответственно, отклонению ее основных параметров от номинальных. Оценку ухудшения основных показателей можно выработать на основе представлений геометрической оптики и статистической теории антенн.

Рассмотрим двумерную модель профиля рефлектора (Рис. 2).

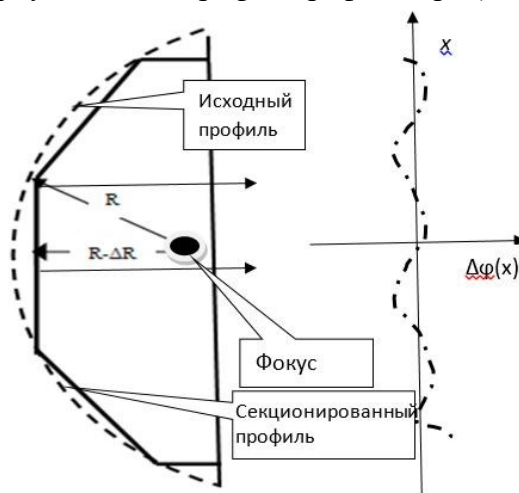


Рисунок 2. Модель секционированного рефлектора

Согласно геометрическим представлениям электромагнитное поле в апертуре будет отличаться от синфазного на величину

$$\Delta\varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R(x), \quad (1)$$

где $\Delta R(x)$ — разность путей падающей и отраженной волн для идеального профиля и профиля, аппроксимированного набором плоскостей.

Оценку величины $\Delta R(x)$ нетрудно получить представив параболическую поверхность сферой радиусом $R_{\text{сфер}}$, равным удвоенному фокусному расстоянию:

$$R_{\text{сфер}} = \frac{L_{\text{рефлект}}}{2 \cos \pi \setminus 3}. \quad (2)$$

Из Рисунка 2 следует оценка:

$$\Delta R \approx 0.145 \frac{L_{\text{рефлект}}}{M^2}. \quad (3)$$

Максимальное значение фазовой ошибки поля в апертуре соответственно:

$$\Delta\varphi_{\text{апертмакс}} \approx 0.91 \frac{L_{\text{рефлект}}}{M^2} \text{ (рад)}, \quad (4)$$

где M — число разбиений профиля на плоские участки.

Для оценки влияния фазовой ошибки на основные параметры ДН антенны величина $\Delta\varphi_{\text{аперт}}(x)$ может рассматриваться как случайная с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением:

$$\sigma_{\Delta\varphi_{\text{аперт}}} = \Delta\varphi_{\text{апертмакс}} / 2 \dots 3. \quad (5)$$

Согласно классическим представлениям статистической теории антенн [6,8] относительное снижение коэффициента усиления оценивается как:

$$\delta G_{\Delta\varphi} = e^{-(\sigma_{\Delta\varphi_{\text{аперт}}})^2}. \quad (6)$$

На Рис. 3 приведены рассчитанные данные для $\delta G_{\Delta\varphi}$.

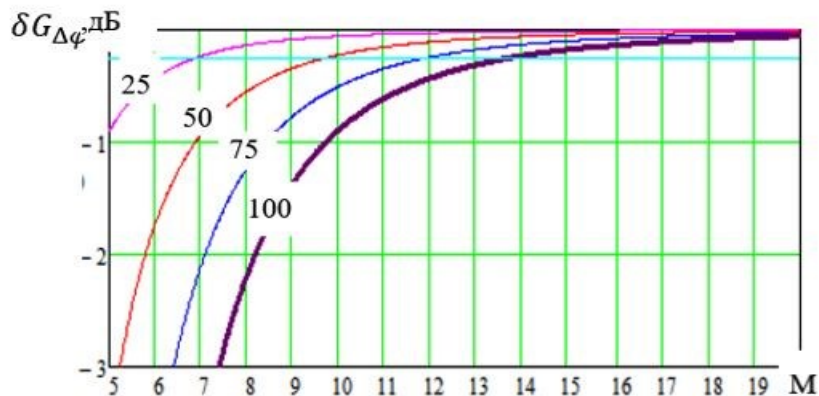


Рисунок 3. Относительное снижение КУ для различных значений $L_{\text{рефлект}}/\lambda$

Геометрия модели, метод моделирования

Приведенные в предыдущем разделе соотношения основаны на ряде упрощающих допущений. Для проверки их соответствия действительности осуществлено электродинамическое моделирование.

Рассматривалась цилиндрическая однозеркальная антенна (pillbox) с размерами апертуры 900 мм и фокусным расстоянием 510 мм. В качестве облучателя был выбран открытый конец волновода WR-187[9]. Расчеты проводились в среде электродинамического моделирования CST Studio на частоте 5.6ГГц. На Рисунках 4—6 показана модель антенны.

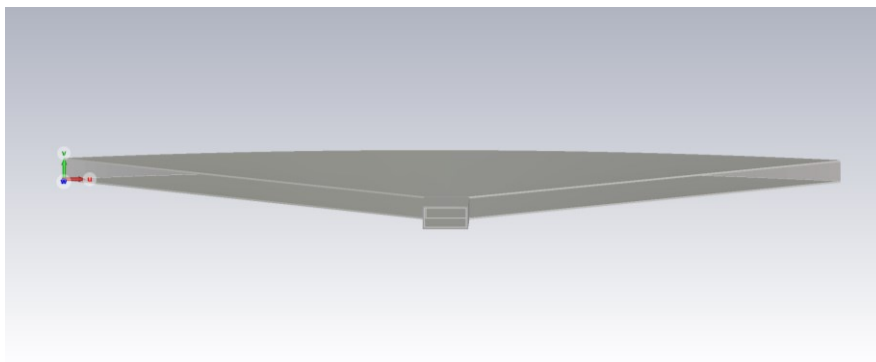


Рисунок 4. Спроектированная модель антенны (вид спереди)

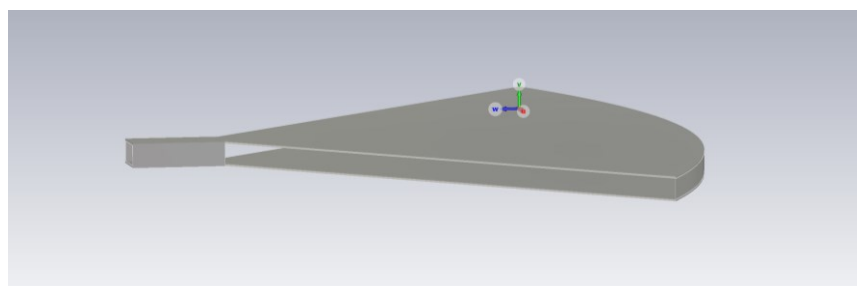


Рисунок 5. Спроектированная модель антенны (вид сбоку)

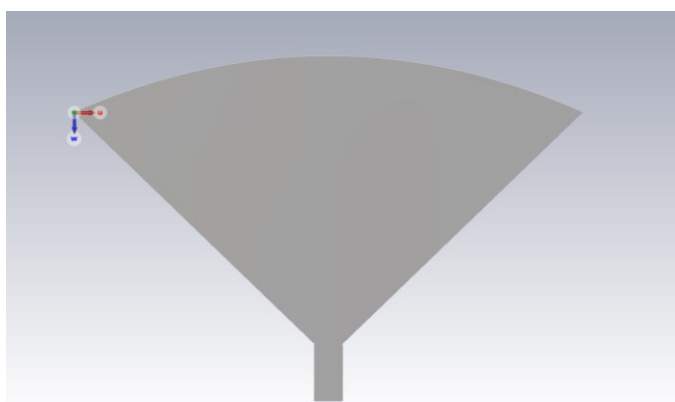


Рисунок 6. Спроектированная модель антенны (вид сверху)

Наша спроектированная модель имеет следующие параметры:

- радиус параболы – 900 мм,
- высота раскрыва – 22.1 мм,

- задний рефлектор может изменять количество ребер (в данном проекте количество ребер будет изменяться в пределах от 3 до 50).

Геометрические размеры волновода WR-187:

- ширина 47.55 мм — соответствует стандарту,
- высота 22.15 мм — соответствует стандарту,
- длина 100 мм — выбрана оптимальная длина для подавления высших мод [9].

Анализ результатов

По итогам моделирования были получены следующие диаграммы направленности для сплошного и секционированных рефлекторов (Рис. 7 — 11):

В описании рисунков используются следующие аббревиатуры:

- ДН — диаграмма направленности;
- КНД — коэффициент направленного действия;
- УБЛ — уровень боковых лепестков.

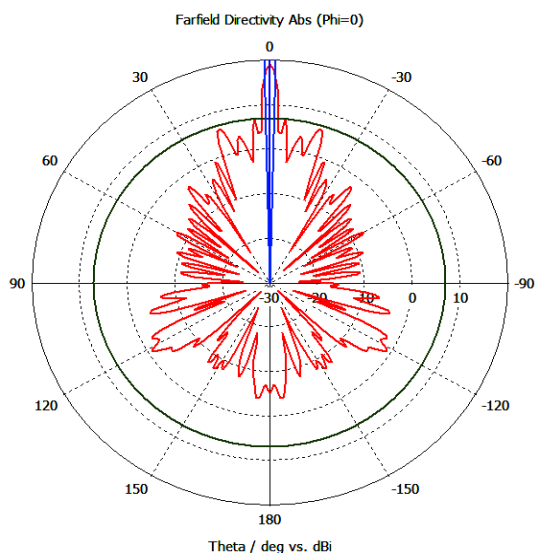


Рисунок 7. ДН для сплошного рефлектора.
КНД – 19.4дБ; Ширина главного лепестка – 2.7 градуса; УБЛ – -12.1дБ.

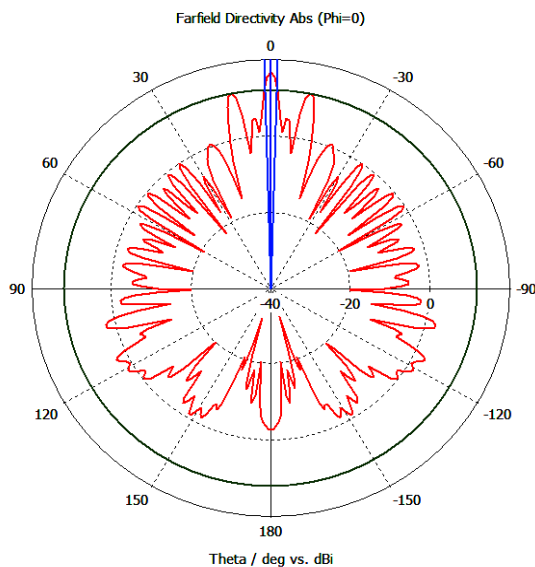


Рисунок 8. ДН при 3 плоских вставках.
КНД – 16.6 дБ; Ширина главного лепестка – 3.0 градуса; УБЛ – -4.6 дБ

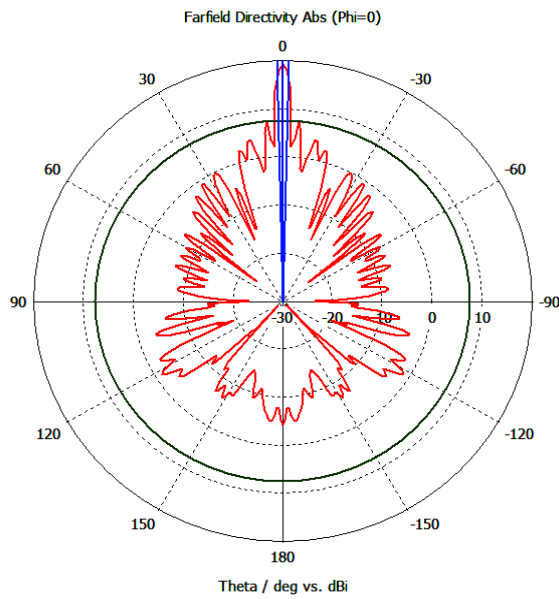


Рисунок 9. ДН при 7 плоских вставках.
КНД – 19.3 дБ; Ширина главного лепестка – 2.8 градуса; УБЛ – - 11.6 дБ.

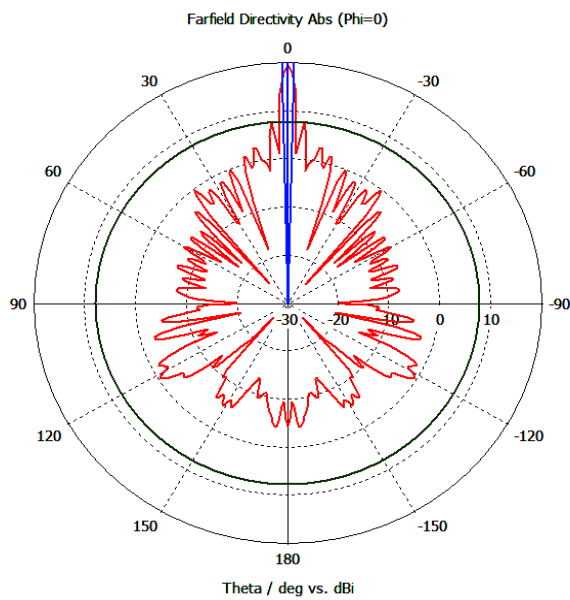


Рисунок 10. ДН при 10 плоских вставках.
КНД – 19.3 дБ; Ширина главного лепестка – 2.8 градуса; УБЛ – -11.7 дБ.

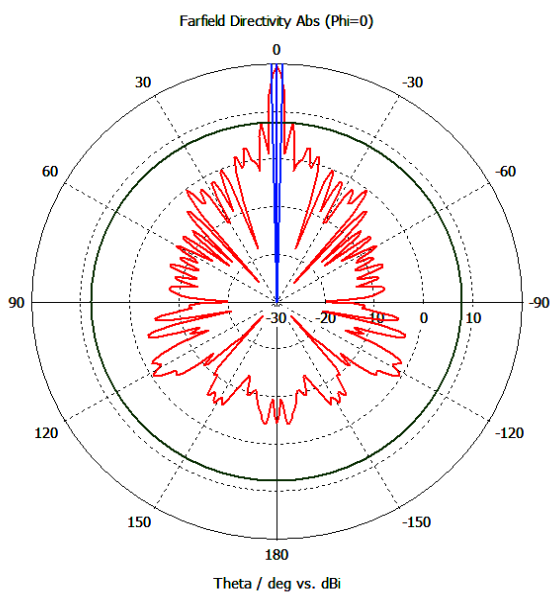


Рисунок 11. ДН при 50 плоских вставках.
 КНД – 19.4 дБ; Ширина главного лепестка 2.7 градуса; УБЛ – -11.8 дБ

Далее приведена расчетная зависимость коэффициента усиления (КУ) антенны от числа секций (М) и сравнение с данными приближенной оценки (Рис.12):

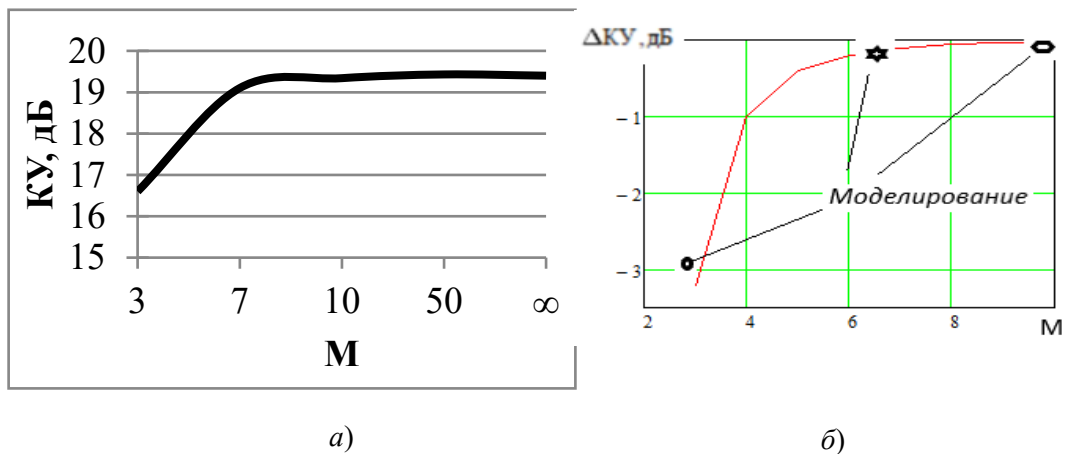


Рисунок 12. Зависимость КУ от М:
 а) экспериментальная зависимость КУ от числа секций,
 б) расчётная зависимость КУ от числа секций

Исходя из данного графика становится видно, что после 7 плоских вставок качественное улучшение замедляется, тем самым значение КНД при 10 и большем количестве вставок стремится к значению КНД для сплошного параболического рефлектора.

Заключение

Проектирование зеркальной антенны с секционированным рефлектором на основе данных более или менее строгого электродинамического анализа требует значительных вычислительных ресурсов и временных затрат. Предложенные оценки минимально необходимого числа секций, аппроксимирующих сплошную поверхность рефлектора зеркальной антенны, позволяют ускорить проведение расчетного этапа проектирования. Также полученные результаты позволят найти компромисс между массогабаритными и электрическими характеристиками антенны.

Список литературы

1. Гостев В.И. Многофункциональные зеркальные антенны / В.И. Гостев, М.В. Гряник, Д.А. Худолий // Киев: Издательство «Радюаматор», 1999. — 318 с.
2. Juan M. Fernandez. Pleat-Folded and Rib-Supported Thin-Shell Composite Antenna Reflector / Juan M. Fernandez, Andrew F. Paddock, Kevin P. Roscoe, Kevin Demarco Segmented // 41st ESA Antenna Workshop on Large Deployable Antennas, 25 - 28 September 2023 at ESA-ESTEC in Noordwijk, Netherlands. — P. 1-7.
3. Dobričić D. Pillbox Antenna for 5.6 GHz Band / D. Dobričić // *antenneX* Issue No. 156, April 2010. — P. 1-7.
4. Лопатин А. Анализ точности отражающей поверхности антенны типа «зонтик» / А. Лопатин, М. Рутковская, В. Гантовкин // *Космические аппараты и ракеты*. - №45 (1), — С.148-151. — DOI: 10.2514/1.29377.
5. Научные труды Одесской национальной академии связи им. АС Попова. — 2004. — №. 2.
6. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн // *Сов. радио*, 1970. — 383 с.
7. Гряник М.В. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа // *Москва: Радио и связь*, 1987. — 71 с.
8. Амосова А.И. Диапазонные свойства зонированного рефлектора // *Журнал радиоэлектроники*. — 2008. — №2.
9. Paul Wade's THE W1GHZ ONLINE MICROWAVE ANTENNA BOOK // Paul «W1GHZ» Wade, 1994-2026 — URL: <http://www.w1ghz.org/antbook/contents.htm> .
10. Lee S.W. A segmented Mirror Antenna for Radiometers / S.W. Lee, B. Houshmand, M. Zimmerman // *NASA Technical Memorandum*, 102045, 1989 — 39 с.

ANALYSIS OF A SEGMENTED REFLECTOR ANTENNA MODEL

Y.A. Khomyakov, Y.E. Sedelnikov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
10, Karl Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. A simplified model of a Ka-band grid reflector antenna has been developed to evaluate the dependence of the radiation pattern on the number of ribs. A preliminary calculation was performed in the MathCAD 15.0 environment to assess the influence of reflector profile segmentation. Modeling of the designed antenna was carried out in the CST Studio Suite software. Radiation pattern graphs for various conditions have been obtained, and a comparison has been made of the dependence of the antenna gain on the number of sections.

Keywords: mirror antenna, Ka-band, cylindrical antenna, Pillbox antenna, segmented reflector, approximated reflector profile.

Статья представлена в редакцию 09 февраля 2026 года