

СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 621.396.67

Ю. Г. Ксенофонов,
ст. преподаватель кафедры радиосвязи на морском флоте,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНТЕННЫ ФРЕНЕЛЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СПУТНИКОВЫМ МОБИЛЬНЫМ ТЕЛЕВИЗИОННЫМ СИСТЕМАМ

THE FRENEL ANTENNA DESIGN METHODOLOGY APPLICABLE FOR SATELLITE MOBILE TELEVISION SYSTEMS

Рассмотрены вопросы применения антенны Френеля в мобильных системах спутникового телевизионного вещания, представлена методология ее расчета и получены электрические и геометрические параметры данной антенны для K_u -диапазона.

The questions of use of the antenna of Frenel in mobile satellite television broadcasting systems are considered, the methodology of its calculation is presented and electric and geometrical parameters of this antenna for K_u -band are received.

Ключевые слова: однополупериодная зона, фазокорректирующая зона, патч, интерференция, зональная пластина, диаграмма направленности, коэффициент усиления, уровень боковых лепестков.

Key words: one-half-period zone, faze correcting zone, patch, interference, zone plate, directional pattern, gain, level of lateral petals.

В

НАСТОЯЩЕЕ время бурно развивается рынок мобильных систем спутниковой связи. Они главным образом предназначены для приема сигналов космического телевидения.

Для обеспечения телевизионного приема на подвижных объектах (речных и морских судах любого водоизмещения и назначения) применяются установки специальных спутниковых мобильных телевизионных систем, предназначенных для приема спутникового телевидения и индивидуального или коллективного просмотра телепрограмм. С этой целью используются новейшие разработки спутниковых телевизионных антенн, обеспечивающих точный и бесперебойный прием сигнала независимо от положения и состояния приемной антенны на месте и в движении с любой скоростью. Массогабаритные параметры антенн позволяют размещать и устанавливать их на любых подвижных объектах, в том числе на морских и речных судах и яхтах. Данные антенны обеспечивают телевизионный прием на всех акваториях территории России. В состав судовой телевизионной системы входят: антенный блок, блок управления, соединительный кабель и приемный ресивер. Качество телевизионного приема обеспечивается цифровыми технологиями телевизионных систем и является предельно высоким для существующих стандартов вещательного телевидения. Система также может быть использована для ассиметричного высокоскоростного доступа в глобальную сеть Интернет.

Наиболее важным элементом судовой телевизионной системы является антенна. Это достаточно сложное и дорогостоящее устройство, от параметров которого зависит качество принимаемого телевизионного сигнала. В связи с этим вопросам разработки антенн и поиску оптимальных технологических решений при их производстве уделяется особое внимание.

В данной статье рассматривается антенна Френеля как разновидность антенн с плоским отражателем, характеристики которых сопоставимы с характеристиками параболических антенн, что позволяет использовать их при приеме сигналов с мощных вещательных ИСЗ.

Физико-механические свойства приемных антенн позволяют использовать их круглосуточно на открытом воздухе в любых погодных условиях и воздействиях окружающей среды с условиями практически всех климатических зон России.

Принцип работы антенны Френеля отражен на рис. 1. Плоская волна распространяется в свободном пространстве. Принцип Гюйгенса постулирует, что электромагнитное поле в точке F

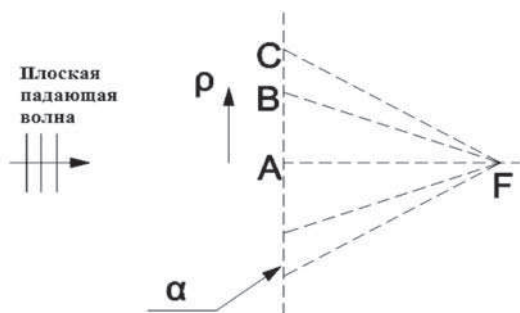


Рис. 1. Иллюстрация концепции зон Френеля

может быть описано как суперпозиция бесконечного числа точечных излучателей сферических волн на плоскости α . Например, в точке F есть вклад от источника в точке A . Для любой другой точки на плоскости расстояние до F будет больше, чем расстояние AF , что означает, что фаза от вкладов этих точек различна. Фаза вклада от точки B , например, сдвинута на некоторую величину от вклада от точки A . Расстояние между A и B может быть выбрано таким образом, что при данной частоте фазы вкладов от двух точек будут раз-

ниться на π радиан. Тогда вклады в поле в точке F от A и B будут находиться в противофазе и интерферировать с ослаблением. Подобным образом, точка C может быть выбрана так, что вклады от A и C будут в фазе (то есть различны на 2π радиан) и будут складываться. Эта особенность повторяется, то есть на плоскости α , далее от точки A , есть точки, вклады которых сдвинуты кратно 2π радиан. Каждая из этих точек отмечает двухполупериодную зону Френеля. Это означает, что на рис. 1 каждая точка между A и C находится в одной и той же двухполупериодной зоне. Разумеется, геометрическое место точек, которые отмечают границы каждой двухполупериодной зоны, есть окружность на плоскости α .

Каждая точка на плоскости α имеет соответствующую точку в пределах той же самой двухполупериодной зоны, вклад которой точно противоположен по фазе. Также каждая точка между A и B имеет соответствующую противоположную по фазе точку между B и C . Жак-Луи Соре указывал, что если противоположные по фазе вклады могут быть удалены, то оставшиеся вклады будут в точке F складываться с взаимным усилением. Делая перемежающиеся участки каждой зоны на плоскости прозрачными и непрозрачными для электромагнитного излучения, зонная пластина может быть построена так, что будет иметь фокусирующие свойства линзы [1, р. 11–25]. Поэтому есть две однополупериодные зоны на каждой двухполупериодной зоне.



Рис. 2. Геометрия зональной пластины Соре

Простейший тип зонной пластины (зонная пластина Соре) сделан из колец проводника (perfect electrical conductors — PEC), которые блокируют каждую вторую однополупериодную зону, как и предложил Соре. Эта зонная пластина представлена на рис. 2. Из него видно, что часть падающего поля будет отражаться непрозрачными (PEC) однополупериодными зонами, тогда как остальное будет проходить сквозь прозрачные зоны.

Однополупериодные зоны конструируются так, что только та часть поля, которая будет с усилением интерферировать на расстоянии F перед зонной пластиной, будет отражаться непрозрачными частями зонной пластины. Подобная интерференция с усилением также будет иметь место для проходящего поля на расстоянии F за зонной пластиной. Поэтому у этой конструкции имеются две точки фокуса, и она может быть использована или как отражающая зонная пластина, если потребление с той же стороны от зонной пластины, что и падающая волна, или как проходная зонная пластина, если потребление организовано на противоположной стороне зонной пластины.

Для обеспечения усиливающей интерференции радиусы зон вычисляются исходя из требования, чтобы расстояние от точки фокуса до границы зоны было на половину длины волны больше, чем расстояние от точки фокуса до границы предыдущей зоны.

На рис. 2 ρ_1 и ρ_2 выбраны так, чтобы $r_2 = r_1 + \lambda/2$.

Применение этих требований к каждой последовательной зоне ведет к хорошо известной расчетной формуле для зонных пластин Соре, внешний радиус n -й однополупериодной зоны вычисляется по формуле

$$\rho_n = \sqrt{\left(\frac{n\lambda}{2}\right)^2 + n\lambda F}, \quad (1)$$

где n — номер однополупериодной зоны; λ — требуемая длина волны в свободном пространстве, м; F — расстояние до точки фокуса, м.

В общее количество однополупериодных зон N_{Soret} включены как прозрачные, так и непрозрачные зоны.

При вычислении радиусов, которые ограничивают каждую однополупериодную зону, никогда не устанавливается, четная или нечетная зона должна быть сделана непрозрачной. Основанные на зонном принципе Френеля, эти дополняющие друг друга конфигурации работают одинаково хорошо. Выбор, какие зоны должны быть сделаны непрозрачными, зависит главным образом от назначения зонной пластины. Обычно четные зоны непрозрачны у проходных зонных пластин. В этом случае общее количество однополупериодных зон N_{Soret} четное. Нечетные зоны непрозрачны для отражательных зонных пластин, как на рис. 2, и N_{Soret} нечетно.

Методика расчета плоского печатного отражателя Френеля представлена на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема этапов расчета плоского печатного отражателя Френеля

Внешний радиус зон Френеля r_n определен по формуле [2, р. 324]:

$$r_n = \sqrt{2nf \frac{\lambda}{P} + \left(n \frac{\lambda}{P}\right)^2}, \quad (2)$$

где r_n — внешний радиус фазокорректирующей зоны, то есть подзоны полноволновой (двухполупериодной) зоны Френеля, мм;

n — номер зоны, центральная зона имеет номер 1;

f — фокусное расстояние, мм;

λ — длина волны в мм, вычисляется по формуле $\lambda = \frac{299792458}{\nu \cdot 1000000}$ при частоте ν в ГГц;

P — число фазокорректирующих подзон в полноволновой зоне Френеля.

Результаты расчета и расположения патчей представлены на рис. 4.

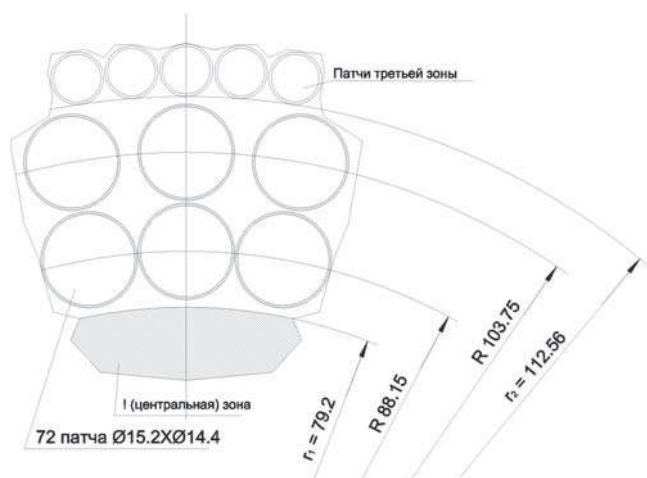


Рис. 4. Первая (полностью металлизированная) и вторая зоны с примыкающим участком

В работе [5, р. 350–355] исследована фазосдвигающая способность бесконечных плоских решеток при отражении плоской перпендикулярной волны, образованных прямоугольной расстановкой проводящих плоских колец на диэлектрической подложке. Показано, что расстояние между кольцами влияет на сдвиг фазы много меньше, чем средний диаметр колец. То есть можно обеспечить нужный сдвиг фаз по зонам Френеля круговой расстановкой подходящих по среднему диаметру колец. Кроме того, чем меньше размеры кольца, тем больше фазовый сдвиг, что связано с преобладанием емкостных свойств с уменьшением размера.

Принимая, что первая четвертьволновая подзона ($P = 1$) дает эффективный

фазовый сдвиг фазы в фокусе антенны $17,3^\circ$, остальные зоны ($P = 2, 3, 4$) должны обеспечивать соответственно $107,3$, $197,3$ и $287,3^\circ$.

Расчет диаграммы направленности (ДН) произведен в программе MATLAB. Полученный по результатам расчета график приведен на рис. 5.

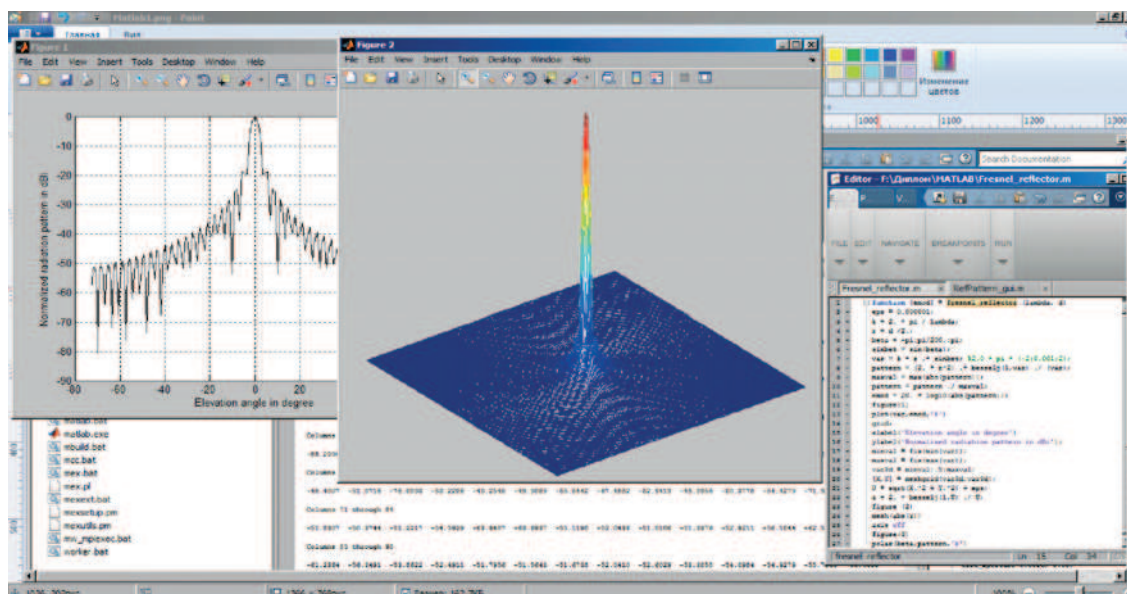


Рис. 5. ДН, рассчитанная в программе MATLAB

На рис. 6 приведена форма диаграммы направленности и значение максимального коэффициента усиления, коэффициент усиления антенны дан в декартовых координатах в логарифмическом масштабе.

Согласно полученному графику (рис. 6):

— $2\theta_{0,5}^E = 5,1$ — ширина ДН по мощности на уровне 0,5 в плоскости E ;

— $2\theta_{0,5}^H = 5,1$ — ширина ДН по мощности на уровне 0,5 в плоскости H (уровню 0,5 по мощности соответствует уровень 0,707 по напряженности поля или уровень -3 дБ в логарифмическом масштабе);

— УБЛ = -23 дБи — относительный уровень боковых лепестков.

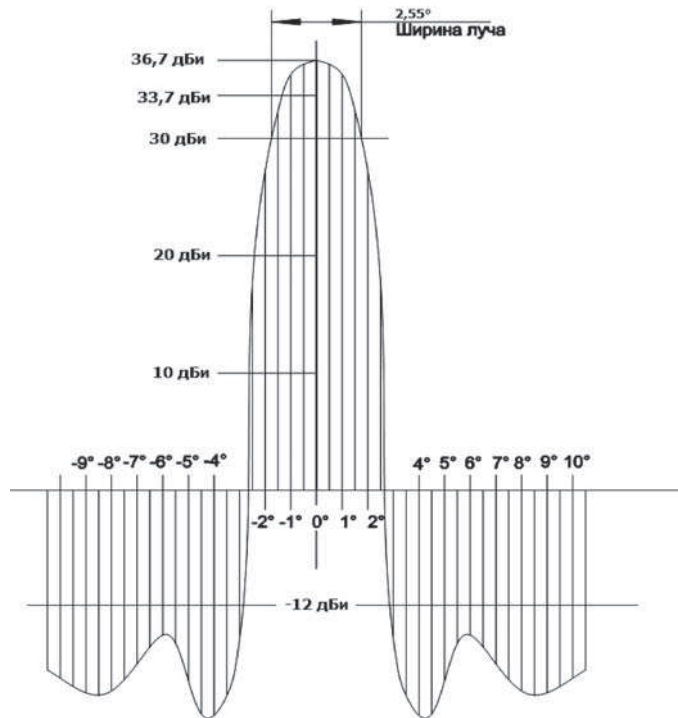


Рис. 6. ДН печатной зональной антенны Френеля

Расчетное значение КНД:

$$D_0 = 36,45 \text{ дБи.}$$

При расчете апертурным методом, при коэффициенте использования апертуры $e_a = 43 \%$ [5], расчетный коэффициент усиления (КУ) определяется по формуле

$$G = 10 \log \left(4\pi \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot \frac{e_a}{\lambda^2} \right), \quad (3)$$

где $G = 36,1$ дБи; $D = 600$ мм — расчетный диаметр антенны; $e_a = 43 \%$ — коэффициент использования апертуры; $\lambda = 26,23$ мм — длина волны.

Расчетная относительная полоса пропускания на уровне 3 дБ по мощности определяется по формуле [2]:

$$S_0 = \left(\frac{1}{N} \right) = 16 \%, \quad (4)$$

где $N = 6$ — число полуволновых зон.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента усиления от частоты, откуда видно, что антенна имеет полосу пропускания не менее 10 % на уровне 3 дБ.

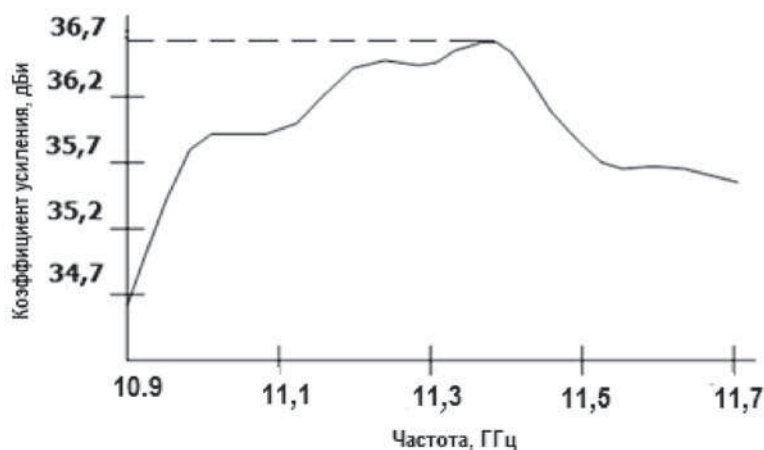


Рис. 7. График зависимости КУ от частоты

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величина	Ширина ДН, град	Уровень боковых лепестков, дБи	D_0 , дБи	G, дБи
Полученное значение	2,55	-23	36,45	36,1

Из нее следует, что предложенная антенна имеет электрические характеристики, которые соизмеримы с аналогичными характеристиками зеркальных антенн и соответствуют требованиям, предъявляемым к спутниковым телевизионным системам.

Список литературы

1. *Soret J.-L.* Studies on the density of the Fresnel zone / J.-L. Soret // Ann. Phy. Chem. — 1875. — Vol. 156. — P. 99–113. Reprinted in Selected Papers on Zone Plates. J. Ojeda-Castaneda and C. Gomez-Reino / eds. Bellingham — WA : SPIE, 1996.
2. *Hristov H. D.* Fresnel Zones in wireless links, zone plate lenses and antennas. — L.: Artech House Boston, 2000.
3. *Guo Y. J.* High-Efficiency Zone Plate Reflector Incorporating Printed Resonators / Y. J. Guo, S. K. Barton // On Antennas and Propagat. (ICAP'93): Prop. Int. Conf. — Edinburgh, UK, 1993. — P. 620–622.
4. *Pozar D. M.* Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarray / D. M. Pozar, S. D. Targonski, H. D. Syrigos // IEEE Trans. Antennas and Propagat. — 1997. — Vol. 45, № 2. — P. 287–296.
5. *Guo Y. J.* Phase Correcting Zonal Reflector Incorporating Rings / Y. J. Guo, S. K. Barton // IEEE Trans. Antennas and Propagat. 1995. — Vol. 43, № 4.