

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН, ВЫПОЛНЕННАЯ НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩЕНИЯ, С ВСЕНАПРАВЛЕННОЙ ЗОНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

И.В.Минин

Институт прикладных физических проблем

Введение.

В последние годы наблюдается огромный прогресс в разработке микросотовых и пикосотовых линий связи в городских условиях и сельской местности, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн. Одновременно развиваются системы беспроводного широкополосного радиодоступа (LMDS – Local Multipoint Distribution Systems; MVDS – Multipoint Distribution Systems; MMAC – Multimedia Mobile Access Communication; PCS – Personal Communication Systems; UHTS – Universal Mobile Telecommunication Systems и т.п.), работающие в миллиметровом диапазоне длин волн.

Для работы в подобных системах необходимо большое количество разнообразных антенн и датчиков миллиметрового диапазона. Во-первых, это антенны для базовых станций с круговой или секторной по азимуту диаграммой направленности. Во-вторых, это остронаправленные антенны для приемных терминалов.

Анализ принципов построения всенаправленных антенн миллиметрового диапазона позволяет сформулировать требования к такой антенне: она должна быть простой, дешевой и эффективной. Практически реализовать такой датчик и/или антенну возможно на основе элементов дифракционной оптики, выполненных на произвольной поверхности.

1. Всенаправленные антенны на цилиндрической поверхности.

Рассмотрим зонную пластину, выполненную на цилиндрической поверхности, рис.1.

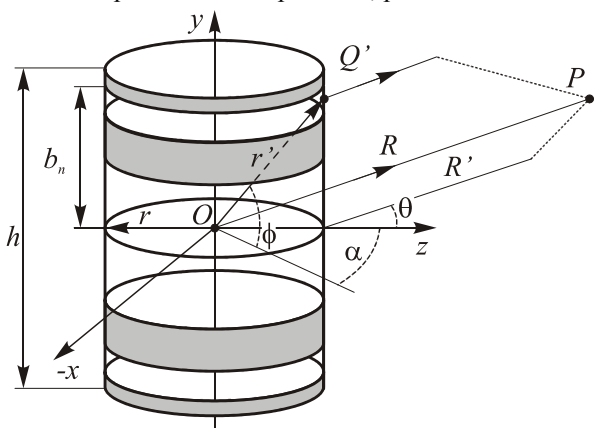


Рис. 1. Схема цилиндрической зонной пластины.

Во всех известных нам работах, посвященных исследованию свойств цилиндрических зонных пластин микроволнового диапазона, в частности, в работах [1-3], для расчета границ зон Френеля применялся метод геометрической оптики, и границы зон

выбирались в соответствии с классическим выражением для плоской зонной пластины:

$$R_i = \sqrt{r\lambda i + (\lambda i / 2)^2},$$

где r – радиус цилиндрической поверхности, i – номер границы зоны Френеля.

В то же время возникает вопрос: а на сколько справедливо использование выражения для расчета границ зон Френеля, полученное для плоской поверхности, в цилиндрической геометрии? Общие физические рассуждения о некорректности такого применения следующие.

При расчете зон цилиндрической зонной пластины существенное значение имеет вопрос об условиях синфазности в некоторой точке пространства цилиндрически расходящейся волны и поправки, возникающей из-за ограничения апертуры.

В общем случае радиусы зон цилиндрической и плоской зонных пластин будут различными по следующим соображениям. Рассмотрим плоскую волну, падающую на экран с отверстием. Тогда в первом приближении поле за экраном представляет собой сумму плоской и сферической волн, причем у этих волн нет взаимного сдвига фаз. Для случая дифракции на кольце на цилиндрической поверхности за экраном складываются волны: сферические, описывающие ограниченность апертуры, и расходящаяся цилиндрическая, фаза которой сдвинута в асимптотическом пределе относительно сферических волн на $\pi/4$. Именно этот фазовый сдвиг и вызывает уменьшение размера зон Френеля для цилиндрической зонной пластины по сравнению с классической.

При расчете границ зон Френеля на цилиндрической поверхности мною была использована следующая общая методика [4]. Определялось распределение поля (фаза) на поверхности антенны вдоль ее образующей и в соответствии с экстремумами этой функции определялись границы зон Френеля. В результате моделирования наблюдалось несовпадение границ зон Френеля, рассчитанных по волновой теории дифракции и геометрической оптике (рис.2).

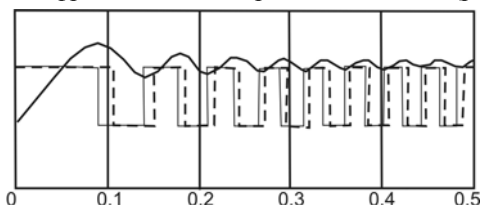


Рис.2. Распределение поля вдоль образующей цилиндрической поверхности и границы зон дифракционного элемента:
пунктир – геометрическая оптика,
сплошная линия – волновая теория.

Для частного случая удалось подобрать эмпирическую аналитическую формулу для расчета границ зон Френеля на цилиндрической поверхности:

$$R_i = \frac{\lambda^2}{220 r} + \sqrt{r \left(i\lambda - \frac{\lambda}{4} \right) + \left(\frac{i\lambda - \frac{\lambda}{4}}{2} \right)^2 - \frac{\lambda^2}{32} + \frac{i\lambda^2}{8} + \lambda^2(i-1) \frac{\lambda}{(212r)}}.$$

Результаты расчетов диаграммы направленности цилиндрической зонной пластины приведены на рис. 3. Параметры цилиндрической зонной пла-

стины были выбраны следующими: высота антенны $h=30\lambda$, $r=10\lambda$, $\lambda=8$ мм (рис. 1).

Полоса пропускания такой антенны составляет около 12,4%. Расчет параметров цилиндрической антенны показал, что использование предложенной методики для определения границ зон Френеля или их определение по эмпирической аналитической зависимости, по сравнению с расчетами, выполненными на основе геометрической оптики, позволяет увеличить коэффициент усиления и уменьшить уровень боковых лепестков. Основные результаты сведены в нижеследующую таблицу 1.

Таблица 1. Сравнительные параметры цилиндрических антенн.

| Параметры цилиндрической антенны | Относительный уровень главного максимума | Ширина диаграммы направленности | Угол первого бокового лепестка | Уровень первого бокового лепестка, дБ |
|----------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| $r=10\lambda, h=3r^*$ | 1 | 0,98 | $\pm 2,15$ | -8,88 |
| $r=10,4\lambda, h=3r$ | 1,541 | 0,96 | $\pm 2,07$ | -9,10 |
| $r=11\lambda, h=3r$ | 1,268 | 0,98 | $\pm 2,11$ | -9,78 |
| $r=12\lambda, h=3r$ | 1,635 | 0,96 | $\pm 2,12$ | -9,68 |
| $r=15\lambda, h=3r$ | 2,412 | 0,95 | $\pm 2,07$ | -9,47 |
| $r=15,4\lambda, h=3r$ | 3,140 | 0,94 | $\pm 2,00$ | -8,88 |
| $r=15,4\lambda, h=3r^*$ | 2,340 | 0,92 | $\pm 2,00$ | -7,88 |
| $r=18\lambda, h=3r$ | 3,135 | 0,93 | $\pm 2,07$ | -9,20 |
| $r=30\lambda, h=3r$ | 4,988 | 0,92 | $\pm 2,07$ | -8,58 |

• Примечание: расчет границ зон Френеля по геометрической оптике.

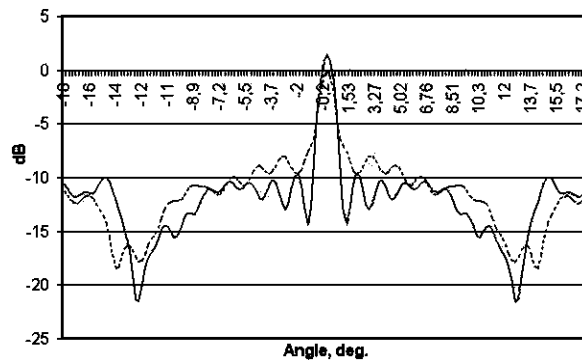


Рис. 3. Диаграмма направленности цилиндрической зонной пластины. Сплошная линия – предлагаемая методика, пунктирная линия – известный метод.

2. Всенаправленные дифракционные антенны на произвольной поверхности вращения.

Представив образующую поверхность антенны в общем виде:

$$r(h) = r_0 \left(1 + Bh + Ch^2 + Dh^3 \right),$$

в зависимости от коэффициентов при h можно получить разнообразные по форме образующих поверхности дифракционные антенны. Три характерных типа таких антенн представлены на рисунке 4.

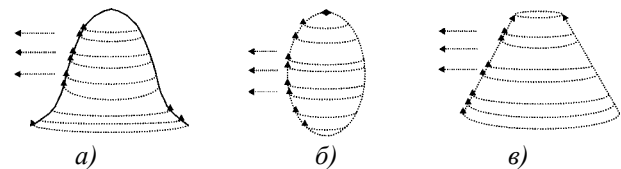


Рис. 4. Три типа всенаправленных дифракционных антенн: (а) $B=C=0$, (б) $B=D=0$, (в) $C=D=0$.

На рис. 5 приведены соответствующие диаграммы направленности антенн. Сплошной линией показана диаграмма направленности, полученная по описанной выше методике, пунктиром – диаграмма направленности соответствующей антенны, границы зон Френеля которой определялись по геометрико-оптическому методу.

Анализ приведенных результатов показывает, что во всех случаях при моделировании параметров дифракционных антенн, выполненных на криволинейной поверхности, применение волнового подхода по сравнению с геометрико-оптическим позволяет:

- Увеличить усиление антенны,
- Снизить уровень боковых лепестков рассеяния,
- Улучшить симметрию диаграммы направленности.

В общем случае применение геометрического метода расчета границ зон Френеля на поверхности трехмерного дифракционного элемента некорректно.

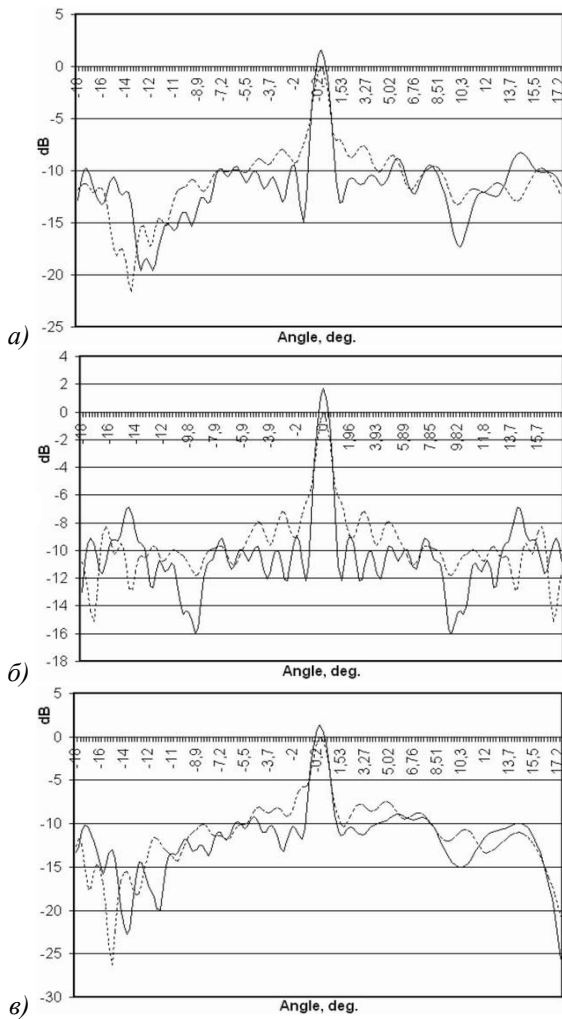


Рис.5. Диаграмма направленности антенны: (а) - по рис.4а, (б) - по рис.4б, (в) - по рис.4в

3. Всенаправленная антенна с плоскими гранями.

Всенаправленная антенна на основе цилиндрической зонной пластины может быть заменена на антенну, состоящую из плоских поверхностей, например, выполненную в форме шестигранника (рис. 6). Это позволяет как упростить изготовление антенны, так и замаскировать ее внешний вид под элементы конструкции, например, светильники в системах охраны периметров [5].

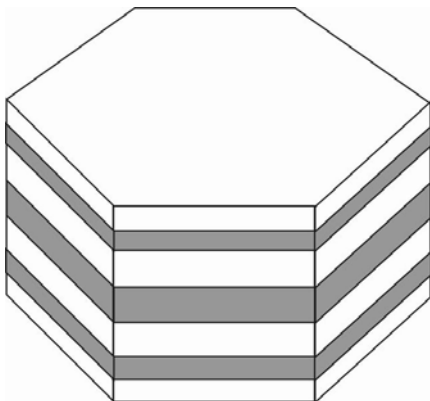


Рис.6. Всенаправленная антенна с шестью плоскими гранями.

Рассмотрим кратко фокусирующие свойства такой антенны. На рисунке 7а показана диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости, а на рис. 7б – в горизонтальной. На этих рисунках верхняя кривая соответствует трем граням, нижняя – одной (т.е. одномерной зонной пластине).

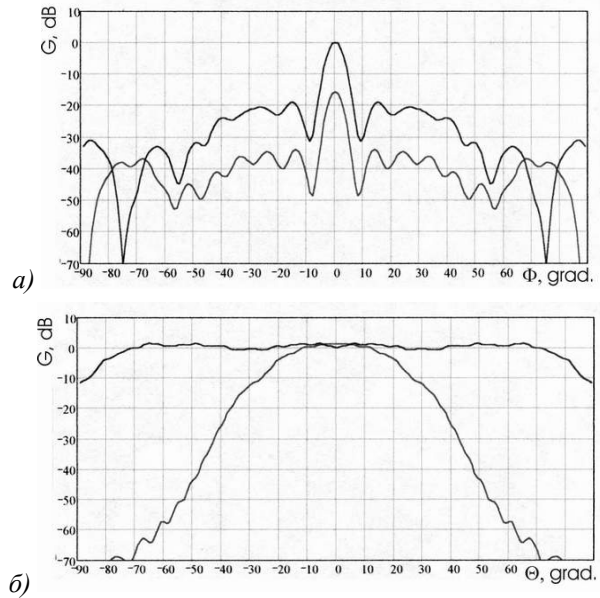


Рис.7. Диаграммы направленности антенны с плоскими гранями в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях.

Из рисунков видно, что увеличение количества граней с одной до трех приводит к увеличению коэффициента усиления примерно на 16 дБ, существенно расширяет равномерность диаграммы направленности в горизонтальной плоскости с ± 10 градусов до ± 70 градусов.

На рисунке 8 показано изменение формы диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости при изменении длины волны излучения от расчетной на $\pm 5\%$.

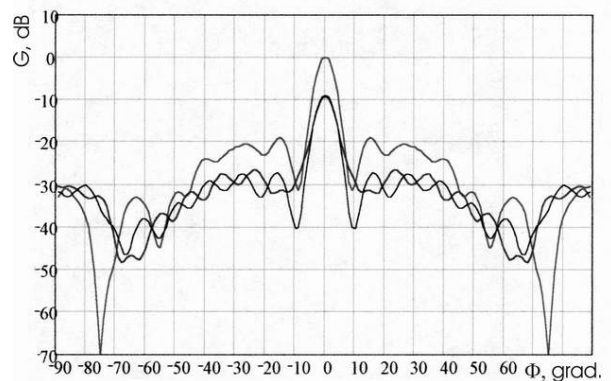


Рис.8. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости для трех длин волн: расчетной (верхняя кривая) и измененных на $\pm 5\%$.

Основное влияние изменения длины волны излучения от расчетной сводится к существенному

падению усиления антенны в точке расчетного фокуса (до 10 дБ).

Исследования влияния смещения положения источника излучения показали, что такая антенна достаточно «чувствительна» к такого рода изменениям. Основные изменения в форме диаграммы направленности при смещении положения источника излучения от расчетного сводятся к уширению диаграммы направленности и падению усиления.

Список литературы

1. Hristov H. Variety of cylindrical Fresnel zone plate antennas. // IEEE Int. Antennas and Propag. Symp., Orlando, FL, July 11-16, Symp.Digest, 1999, v.2, pp. 750-753.
2. Ji Y., Fujita M. A cylindrical Fresnel zone antenna // IEEE Trans. Antennas Propag. Vol. 44, Sept. 1996, pp. 1301-1303.
3. Ye C. F. and Tan S. Y. A Reflective Half-Cylindrical Fresnel Zone Plate Antenna with Low Backward Radiation for Wireless LAN // Microwave and optical Technology Letters, Aug 2000.
4. Minin I.V., Minin O.V. DIFFRACTIONAL LENSES AND MIRROR ANTENNAS FOR MM-WAVES APPLICATIONS. The 6th Russian-Korean Int. Symp. On Science and Technology, June 24-30, 2002, Novosibirsk, Russia. v.2, p. 3347 – 350.
5. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика и ее применения. – Новосибирск: СибАгс, 1999. – 308 с.