

## СИНТЕЗ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ

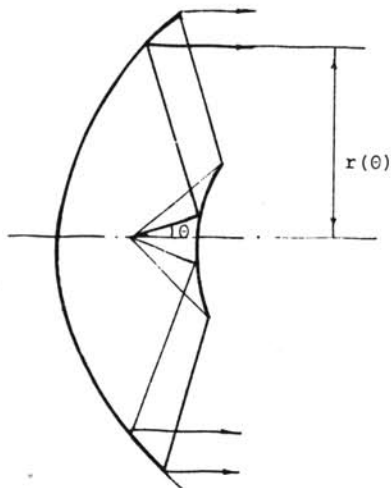
В отличие от классического построения оптических приборов в световом диапазоне приборы (антенны) оптического типа, работающие в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, могут использовать поверхности, отличные от сферических. Это определяется технологическими возможностями производства, так как допуски на точность изготовления определяются в долях длины волны. В настоящее время предельная точность изготовления поверхностей с линейными размерами 10-30 м составляет 0,05 мм. Изготовление таких поверхностей производится на станках, управляемых ЭВМ. Использование таких непривычных для оптиков поверхностей открывает новые возможности. Настоящий доклад посвящен описанию систем различного типа такого рода устройств и краткое изложение принципов их расчета.

Наиболее важное требование, которое предъявляется к оптическим устройствам - достичь максимума направленности (разрешающей способности). Для этого необходимо обратиться в нуль аберрации, то есть самое важное условие - фазовое. Обращение в нуль аберрации в одном направлении (то есть точная фокусировка на конечном расстоянии), если первичное поле - сферическая волна, возможно с помощью однозеркальной системы, поверхность которой - эллипсоид вращения. В частном, но практически

важном случае фокусировки на бесконечность (связные, локационные и другие антенны) поверхностью зеркала должен быть параболюид вращения. Таким образом, однозеркальной антенны достаточно для формирования нужной фазовой структуры, но явно недостаточно для регулирования желаемым образом амплитудного распределения по фронту вторичной волны, а также поляризации. Обратим внимание на то, что даже для устранения аберраций поверхность зеркала асферическая (хотя, что удобно с точки зрения технологии, она является поверхностью вращения).

Двухзеркальные антенны обладают большими возможностями. Здесь за счет выбора формы поверхностей двух зеркал можно добиваться разных целей: или регулировать амплитудное распределение сфокусированного поля, или добиться отсутствия аберраций для двух точек фокусировки (бифокальные системы).

Рассмотрим сначала, как решается задача регулирования амплитуды сфокусированного поля. Наиболее просто решение для осесимметричной системы (см. рисунок). Решение задачи проводится в два этапа: на первом из энергетических соображений устанавливается соответствие между лучами первичной сферической волны и лучами вторичной плоской волны, то есть функция  $r = r(\theta)$ . Это соответствие, естественно, осесиммет-



Обычно полагают, что для этого преобразования достаточно потребовать, чтобы финитный участок  $T_1$  первичного фронта преобразовался в финитный участок  $T_2$  двукратно отраженной волны так, чтобы контур  $\Gamma_1$  преобразовался в контур  $\Gamma_2$ , не налагая условия на закон соответствия между точками контуров  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Это требование и использовалось в [5] как эквивалент граничного условия. Покажем на простом примере, что этого недостаточно. Пусть  $T_1$  и  $T_2$  — круговые участки плоской волны с равномерным амплитудным распределением. Двухзеркальные антенны, преобразующие  $T_1$  и  $T_2$  друг в друга, могут быть устроены тремя различными способами:

- 1) два плоских зеркала;
- 2) два конфокальных параболаида вращения;
- 3) два конфокальных параболических цилиндра.

Все три варианта удовлетворяют условиям поставленной задачи, но имеют различные законы соответствия точек контуров. Очевидно, например, что в третьем варианте угол ориентации оси параболических цилиндров произволен. Указанный пример показывает, что граничное условие должно быть задано и с учетом закона соответствия точек  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ .

Если требовать удовлетворения энергетических условий не строго, а только в среднем (по одной — азимутальной координате), то решение задачи сводится к нелинейному уравнению в частных производных первого порядка [7,8]. Теория этих уравнений хорошо разработана и сводится к решению системы пяти обыкновенных дифференциальных уравнений (характеристическая система). Если немного модифицировать указанный метод (сохранив однопараметрический закон преобразования амплитуды), то одно из зеркал может быть сделано осесимметричным, что явно более технологично. Задача расчета такого зеркала сводится к решению некоторого обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка.

Двухзеркальные антенны можно использовать не только для желаемого преобразования амплитуд, но и для желаемого преобразования поляризации. Однако если поверхности зеркал являются гладкими, то такого рода системы осуществляют только поворот поляризационного эллипса,

рично, то есть устанавливается для меридионального сечения. Затем на втором этапе из условий закона зеркального отражения преобразованных лучей с заданным законом отображения определяются образующие обоих зеркал [1-3]. Двухзеркальные системы такого типа позволяют значительно уменьшить потери энергии на перегибы за края зеркал и одновременно выровнять распределение амплитуды (повысить разрешающую способность) по фронту плоской волны. В настоящее время системы такого типа широко используются в антенной технике и позволяют получить КИП (меру равномерности распределения) до 0,9 [4]. Определение профиля зеркал сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка, решение которого может быть записано в квадратурах [1-2].

Существенно более сложной является теория синтеза неосесимметричных зеркал, использование которых позволяет ликвидировать затенение большого зеркала малым [3,5,6]. Решение задачи трансформации сферической волны в плоскую при заданных распределениях амплитуд первичной и вторичной волн сводится к дифференциальному уравнению в частных производных второго порядка, нелинейному даже по старшим вторым производным (уравнение типа Монжа-Ампера) [5]. Теория таких уравнений разработана весьма слабо, и вопрос о том, как ставить граничные условия для существования и единственности их решения, до сих пор является предметом обсуждения [7,8].

но не меняют величины его эксцентриситета [9]. Для преобразования величины эксцентриситета эллипса поляризации необходимо использовать анизотропные (решетчатые) зеркала. В этом случае, регулируя параметры тензора анизотропии, мы регулируем степень преобразования эллипса поляризации, а регулируя форму поверхности анизотропных зеркал, меняем амплитудное распределение на выходе системы. Наличие анизотропии на двух поверхностях позволяет смягчить условия анизотропности каждого из зеркал [10].

Двухзеркальные системы могут быть использованы и для безаберрационной фокусировки в двух желаемых направлениях. Как ни странно, решение задачи определения поверхностей зеркал в этой задаче математически более просто, чем в задаче преобразования амплитуд. Поверхности зеркала определяются с помощью последовательности рекуррентных формул, причем один (начальный) участок одного из зеркал может выбираться произвольно [11-13]. Принцип решения двумерной задачи дан в [11], трехмерной - в [13], см. также [14]. Если подобные системы строить так, что в двух направлениях они дают точную фокусировку, то в промежуточных направлениях аберрации хотя и не равны нулю, но достаточно малы [15]. Такие системы имеют преимущество перед оптическими системами видимого диапазона по широте поля зрения. Конечно, при сопоставлении необходимо учитывать, что количество поверхностей, на которых происходит преобразование, - всего две.

С увеличением количества отражений или преломлений увеличивается количество возможных безаберрационных направлений. Такого рода подход эквивалентен использованию интерполяционных полиномов, имеющих ре-

шетку нулей в заданном телесном угле. Определение формы поверхностей N-фокальной системы сводится к определению N отражающих или преломляющих поверхностей. Решение этой задачи сводится к вычислениям по системе алгебраических формул [16,17].

Указанные выше системы с точки зрения техники СВЧ являются антенными системами, работающими в режимах приема и (или) передачи. В последнее время получили распространение и системы беспроводной передачи энергии - лучеводные системы. Принципы их построения также основаны на геометрической оптике, то есть отдельные элементы систем этого типа расположены в ближней или Френелевой области друг относительно друга. Расчет их производится или по законам геометрической оптики, или по обобщению этих законов, частично учитывающих законы дифракции с помощью теории Гауссовых пучков [18].

Специфические системы оптического типа могут использоваться также и для расчета фокусирующих систем, в частности систем, фокусирующих не в точку, а в линию (когерентные фокусаторы). При фокусировке первичной сферической или плоской волны в заданную фокальную линию одного зеркала хватает для регулирования амплитуды вдоль фокальной линии [19-23]. Решение указанной задачи зависит от того, что понимать под интенсивностью поля на фокальной линии. Если под интенсивностью понимать общий поток энергии, соответствующий максимуму интенсивности "главного лепестка", то получим решение типа [19], а если под интенсивностью понимать значение квадрата амплитуды на фокальной линии, то получим решение типа [22].

#### Л и т е р а т у р а

1. К и н б е р Б.Е. - Акустический журнал, 1955, т. 1, № 3, с. 221-225.
2. Н e a d А.К. - Proc. of the Phys. Soc. (London), Apr. 1958, vol. 71, pt. 4, № 460, p. 546-551.
3. К и н б е р Б.Е. - Радиотехника и электроника, 1962, т. 7, № 6, с. 977-985.

4. The handbook of antenna design, 1982, vol. 1, p. 249.
  5. Westcott B.S., Stevens F.A., Brice -  
kell F. - IEE Proc. H., 1981, vol. 128, № 1, p. 11-18.
  6. Galindo - Israel V., Mittra R.,  
Chu A.G. - IEEE Trans., 1979, vol. AP-27, № 1, p. 154.
  7. Кинбер Б.Е. Препринт ИРЭ АН СССР № 38(410), М.,  
1984.
  8. Капцов С.Н., Кинбер Б.Е. - Тр. НИИР, 1985,  
№ 3, с. 39-47.
  9. Вайнбранд М.М., Гасанов Э.Э., Кин-  
бер Б.Е. - Радиотехника и электроника, 1985, т. 30, с. 934-940.
  10. Кинбер Б.Е., Гасанов Э.Э., Вайн -  
брандт М.М. - Волны и дифракция, Тбилиси, 1985, с. 443-446.
  11. Vrosh R.M. - IRE Conv. Rec., 1956, vol. 4, № 1.
  12. Бодулинский В.К., Кинбер Б.Е., Ро-  
манова В.И. - Радиотехника и электроника, 1985, т. 30,  
с. 1914-1918.
  13. Кинбер Б.Е., Классен В.И., Стеб -  
лин В.И. - Радиотехника и электроника, 1983, т. 18,  
с. 1509-1517.
  14. Saegye M. Rappoport. - IEEE Trans., 1984,  
vol. AP-32, № 11, p. 1196-1204.
  15. Бодулинский В.К., Кинбер Б.Е., Ро -  
манова В.И. - Радиотехника и электроника, 1986, т. 31,  
с. 990-998.
  16. Вааз И.Л., Кинбер Б.Е. XIV Всесоюзн. конф.  
по распространению радиоволн. Тезисы докладов. - М.: Наука,  
1984.
  17. Вааз И.Л., Кинбер Б.Е. - Радиотехника и  
электроника, 1986, т. 31, № 8, с. 1472-1479.
  18. Мирошниченко А.Л. - Зарубежная радиоэлект-  
роника, 1979, № 7, с. 482.
  19. Данилов В.А и др. - Письма в ЖТФ, 1982, № 8,  
с. 810.
  20. Голуб М.А. и др. - ДАН СССР, 1980, т. 253, с. 1104.
  21. Данилов В.А. и др. - Препринт ФИАН СССР, № 69,  
М., 1983.
  22. Данилов В.А. и др. - Теория когерентных фокусато-  
ров. - Настоящий сборник.
  23. Минаков А.А. - Радиотехника и электроника, 1985,  
т. 30, с. 653-657.
-