

А. С. РУДНИЦКИЙ

СИНТЕЗ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Оптимальная электрическая характеристика устройства СВЧ обычно достигается в том случае, когда на входе линии передачи сопротивление устройства равно волновому сопротивлению линии. Удовлетворительное согласование в небольшом диапазоне частот можно получить при этом с помощью сосредоточенных реактивных проводимостей или четверть-волновых трансформаторов. При широкополосном согласовании используются нерегулярные линии передачи. На их основе разработаны скрутки, изгибы, плавные переходы [1, 2]. Современный уровень производства радиоэлектронной аппаратуры снимает ряд технологических ограничений, что позволяет решать задачи синтеза такого типа устройств с более общих позиций.

В рассматриваемом здесь способе синтеза исходным является дифференциальное уравнение для силовых линий магнитного поля в поперечном сечении волновода

$$H_x dy = H_y dx. \quad (1)$$

Для E -волн существует простой интеграл $E_z = \text{const}$, частным случаем которого является уравнение поперечного сечения волновода $E_z = 0$. В отдельных случаях и для H -волн решение дифференциального уравнения можно представить в аналитическом виде. К примеру, при

$$H_z = \cos \frac{\pi y}{a} B \cos \frac{\pi x}{a} \quad (2)$$

уравнение имеет частное решение вида

$$\text{tg} \frac{\pi b}{2a} \text{tg} \frac{\pi y}{2a} B = \text{tg} \frac{\pi b}{2a} \text{ctg} \frac{\pi x}{2a} \quad (3)$$

где a, b – соответственно ширина и высота прямоугольного волновода.

При изменении параметра B от 1 до 0 форма поперечного сечения волновода изменяется согласно соотношению (3) от равнокатетного треугольника ($B = 1$) с размером катета a до прямоугольника $a \cdot b$ ($B = 0$). Критическая длина волны при этом не зависит от параметра B и равна $2a$. При слабой зависимости параметра B от z решением уравнения (3) является плавно нерегулярная вдоль z поверхность. Участок такой поверхности осуществляет плавную трансформацию поперечного сечения волновода. Это позволяет использовать его для соединения различной формы

волноводов и плавного преобразования структуры поля волны одного волновода в структуру поля необходимой волны другого волновода. Регулярные волноводы с поперечными сечениями (3) при заданных значениях параметра B играют при этом роль волноводов сравнения в таком переходе.

В качестве примера рассмотрим участок нерегулярного волновода при

$$B = \frac{1 + \frac{a}{L}z}{1 - \frac{a}{L}z}. \quad (4)$$

Он образуется из металлических пластин $y = 0$, $0 \leq x \leq 1$ и $x = 0$, $0 \leq y \leq 1$, соединенных между собой вдоль ребра $(0,0,z)$ и с криволинейной поверхностью

$$\frac{\operatorname{tg} \frac{\pi x}{2} \operatorname{ctg} \frac{\pi y}{2}}{\operatorname{ctg} \frac{\pi x}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi y}{2}} = \frac{\operatorname{ctg} \frac{\pi x}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi y}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\pi x}{2} \operatorname{ctg} \frac{\pi y}{2}} \quad (5)$$

вдоль ребер $(1,0,z)$ и $(0,1,z)$. Здесь использованы нормированные на ширину волновода a координаты: $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$, $z/a \leq z \leq L/a$. Поперечные сечения участка нерегулярного волновода на входе ($z = z_0/a$) и выходе ($z = L/a$) имеют форму прямоугольников ширины a с нормированными высотами соответственно y_1, y_2 ($0 \leq y_1, y_2 \leq 1$) и развернуты на угол α . Каждому его сечению $z = z_0$ из интервала $z_0/a \leq z \leq L/a$ можно сопоставить регулярный волновод с продольной компонентой основной волны

$$H_z = \cos(\pi x) + \frac{a}{L} z_0 \cos(\pi y) \exp(i\pi z/a - i\pi h_z z) \quad (6)$$

Пространственная структура поля волны постепенно изменяется от $H_z = \cos(\pi y)$ на входе ($z_0 = z_0/a$) до $H_z = \cos(\pi x)$ на выходе ($z_0 = L/a$). Происходит поворот плоскости поляризации. На практике широко используется устройство поворота плоскости поляризации типа скрутки [1, 2]. Коэффициент отражения волн от нерегулярного участка волновода равен [3]

$$R = \sum_{m,n} S_{m,n} \exp(-2i \int_{z_0/a}^z h_m dz) \quad (7)$$

Коэффициент связи прямой и обратной волны записывается в первом приближении по α в виде

$$S_{m,m} = \frac{h_m^2}{2h_m} \frac{1}{2h_m^2} \int_{\Gamma} \psi(x,y) H_{m\Gamma}^2 d\Gamma, \quad (8)$$

где $\psi(x,y)$ – тангенс угла, образованного с осью z касательной к металлу, перпендикулярной контуру поперечного сечения; $H_{m\Gamma}$ – составляющая вектора напряженности магнитного поля, касательная к контуру поперечного сечения; h_m , m – производная по z от волнового числа и индекс волны соответственно.

Интегрирование в выражении (8) ведется по контуру поперечного сечения. Так как для скрутки поперечное сечение и волновое число не изменяются вдоль z , то слагаемое с h_m^2 в выражении (8) равно нулю. Кроме того, параметр $\psi(x,y)$ антисимметричен в первом приближении [3], а квадраты компонент электромагнитного поля любой волны прямоугольного волновода симметричны относительно x, y . Поэтому интеграл в выражении (8) тоже равен нулю. Это означает, что коэффициент отражения любой из волн прямоугольного волновода от скрутки в первом приближении равен нулю. В рассматриваемом устройстве все волноводы сравнения имеют одинаковую частоту для основной волны и контурный интеграл в выражении (8) для нее равен нулю. Для других типов волн $h_m^2 \neq 0$ и согласно соотношениям (7), (8) коэффициенты отражения отличны от нуля. Кроме того, поперечные сечения на входе и выходе рассматриваемого устройства могут быть разные по высоте ($\square_1 \neq \square_2$).

Таким образом, в устройстве, выполненном на основе нерегулярного волновода с поверхностью (5), обеспечивается одновременно поворот плоскости поляризации основной волны, изменение поперечного сечения и фильтрация типов волн прямоугольного волновода. Применение такого типа многофункциональных устройств позволяет улучшить массогабаритные и другие показатели качества антенно-фидерных трактов.

При оптимизации таких устройств могут быть использованы известные результаты и методы теории нерегулярных волноводов [4–6] с учетом геометрических особенностей задачи. Основным параметром оптимизации устройства является зависимость $B(z)$. При изменении $B(z)$ сохраняется совокупность поперечных сечений и последовательность их расположения вдоль z . Изменяется только их плотность распределения по оси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот. В 2 т. Т. 1. М.: Сов. радио, 1965. 495 с.
2. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. М.: Высшая школа, 1990. 335 с.

