

УДК 621.396.67

## РАСЧЕТ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

*О.И. Галичин*

В статье рассмотрены особенности построения волноводно-щелевой антенны минимальных размеров с стабильным главным максимумом диаграммы направленности при изменении внешних параметров.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, E – и H – тройник и четверник, Коэффициент направленного действия (КНД), отверстие связи, диаграмма направленности.

Одной из основных проблем создания плоских многоэтажных волноводно-щелевых антенн является разработка системы питания щелевых излучателей. Волноводные делители мощности, основанные на направленных ответвителях, использовать нецелесообразно из-за больших габаритов и веса. Помимо реализации заданного амплитудного возбуждения этажей антенны система питания должна обеспечить их синфазность и симметрию возбуждения относительно центра антенны, что дает возможность стабилизировать положение главного луча диаграммы направленности в частотном и температурном диапазонах. Одним из путей решения этих проблем является использование волноводных E – и H – тройников или четверников с отверстиями связи. Это позволяет разработать плоскую антенну имеющую габарит по высоте равный одному из поперечных размеров волновода, что важно для летательных аппаратов.

Принцип работы E – и H – сочленений с отверстиями связи, основывается на том, что волна распространяющаяся в фидере создает на отверстии связи касательное поле, которое в свою очередь, возбуждает боковой волновод соответствующего этажа антенны. Помимо волны основного типа отверстие связи возбуждает множество не распространяющихся высших типов волн. В результате этого структура поля в области волноводного разветвления будет довольно сложной, и коэффициент отражения от разветвления будет отличен от нуля. В тройниках и четверниках мощность ответвляющаяся в боковые плечи зависит от размеров отверстий связи. Таким образом для получения заданного коэффициента деления мощности необходимо определить размеры отверстий связи. Кроме того, для решения вопросов согласования нужно найти входной импеданс делителя мощности или его комплексный коэффициент отражения. Таким образом возникает задача аналитического расчета делителей мощности, основанных на E – и H – тройниках или четверниках.

В литературе среди множества методов расчета волноводных разветвлений есть два наиболее широко используемых в инженерной практике:

- 1) метод квазистатических полей,
- 2) метод собственных функций.

Эти оба метода предполагают учет неоднородности в волноводе при помощи бесконечного числа эквивалентных линий передачи. Такое представление правильно, но сложно. Не распространяющийся характер высших типов волн приводит к тому, что они существуют лишь в непосредственной близости от неоднородности. Это позволяет упростить расчет.

Так в методе квазистатических полей [1] действие неоднородности эквивалентно локальным скачкам напряжения и тока в линии передачи, которой можно заменить волноводное устройство СВЧ, если в нем может распространяться только основной тип волны. Подобные скачки напряжения и тока описываются с помощью эквивалентной схемы с сосредоточенными постоянными. Замена неоднородности эквивалентной схемой, совместно с заменой волновода линией передачи, позволяет решать ряд вопросов влияния неоднородностей на работу фидерного тракта. В этом методе предполагается, что первоначальная электродинамическая задача для одного основного типа волны, преобразуется в статическую задачу о параллельных пластинах при падении бесконечного числа типов волн. Определение полей, обусловленных каждым из падающих статических типов волн, может быть сведено к электростатической задаче, решаемой при помощи конформного отображения основной области на геометрически более простую, для которой статическое решение может быть найдено с помощью теории функций комплексного переменного. Эквивалентная статическая задача для одного основного типа волны является обычной электростатической задачей, когда к пластинам волновода приложено напряжение постоянного тока. Хотя статическая задача при учете высших типов волн не является обычной электростатической задачей, тем не менее, она решается способом, аналогичным с применяемым при распространении основного типа волны. Метод конформного отображения при решении электростатических задач ограничивает возможность применения эквивалентного статического метода в сущности только двухмерными задачами. По этому методу строится обычно приближенное решение, затем, применяя вариационную методику, это решение уточняют. Параметры, полученные этим методом, определяются с точностью до 10% в большей части частотного диапазона. Если сочленения щелевые, то результаты вычислений справедливы для ширины щели малой по сравнению с длиной волны.

Метод собственных функций [2] позволяет определить матрицу рассеяния сложного волноводного разветвления включая волноводные тройники и четверники. В этом случае при помощи метода Галеркина, возбуждающее поле на отверстии связи представляется в виде полной последовательности координатных функций. Исследуемое устройство разбивается на ряд частичных областей и определяются собственные параметры каждой об-

ласти. Внешние параметры устройства в целом находятся после сшивания частичных областей.

Следует отметить, что результаты, полученные по этим методам, хорошо совпадают между собой. Однако параметры схем замещения в первом методе получены сложным путем при помощи конформного отображения и теории функций комплексного переменного, тогда как во втором методе необходимо провести вычисление элементарных интегралов и суммирование хорошо сходящихся рядов.

Выбор схемы питания волноводно-щелевой антенны определяется частотной и температурной стабильностью положения главного лепестка диаграммы направленности. Один из способов заключается в применении встречного питания волноводов, составляющих плоскую волноводно-щелевую решетку. Здесь питание подается двумя волноводами, каждый из которых соединяется с этажами антенны через один этаж так, что образуются две волноводные решетки, входящие одна в другую наподобие гребенки рис 1. В каждой из решеток с изменением температуры и частоты происходит отклонение главного максимума в противоположные стороны и максимум суммарной диаграммы останется неподвижным, если число щелей в этажах одинаково. Но при этом КНД всей антенны уменьшается за счет расширения главного лепестка диаграммы направленности. Однако в ряде случаев приходится мириться с потерей направленности антенны ради стабильности положения главного максимума, что имеет место, например в системах измерения координат радиотехническими методами.

Другой способ запитки состоит в том, что антенная решетка питается из центра рис 2. В этом случае имеются четыре решетки, максимумы излучения которых отклоняются в разные направления так, что суммарная диаграмма направленности имеет стабильный главный максимум.

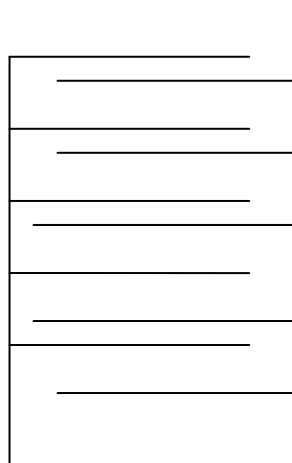


Рис 1. Встречное питание волноводов.

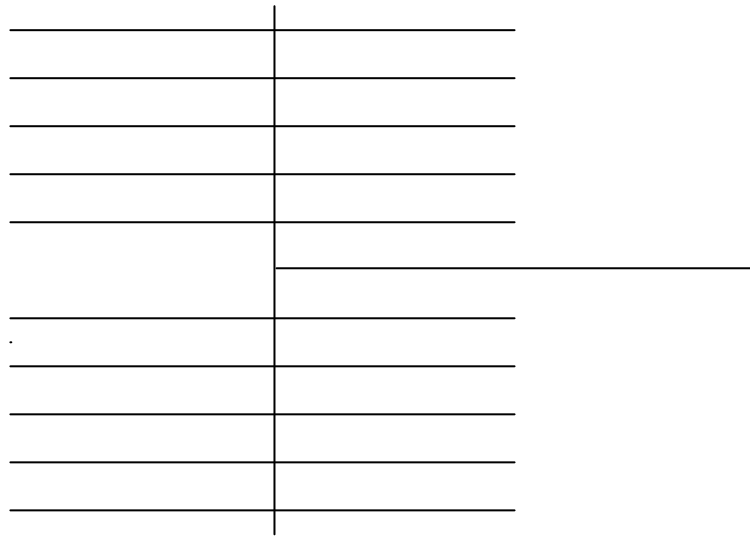


Рис 2. Центральное питание волноводов

Обе эти схемы питания могут применяться лишь в случае, если отклонение главного лепестка от нормали для каждой парциальной решетки антенны не превышает половины ширины диаграммы направленности на уровне половинной мощности. В противном случае диаграмма направленности будет иметь провал в направлении нормали к антенне.

Рассмотрим электрические характеристики этих схем питания с точки зрения стабильности положения главного максимума. При малых отклонениях главного лепестка диаграммы можно пренебречь изменением формы последней при изменении частоты и температуры, а КНД определится произведением диаграмм направленности решеток по мощности в направлении нормали. Так для равноамплитудной решетки уменьшение КНД можно выразить приближенным равенством (1)

$$\eta_{\Delta\lambda}\eta_{\Delta T} \approx \left[ \frac{\sin\left(0.88\pi \frac{\Theta_{\Delta}}{2\Theta_{P/2}}\right) \sin\left(0.88\pi \frac{\Theta_{\Delta}}{\Theta_{P/2}} \frac{L_2}{L_1}\right)}{\left(0.88\pi \frac{\Theta_{\Delta}}{\Theta_{P/2}}\right)^2 \frac{L_2}{L_1}} \right] \quad (1)$$

Где  $\Theta_{\Delta}$  – угол поворота диаграммы направленности в одной плоскости;  
 $\Theta_{P/2}$  – ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности в плоскости  $\varphi=0$

$L_1/L_2$  – отношение размеров решетки в двух плоскостях  $\varphi=90$  и  $\varphi=0$  соответственно.

Угол поворота диаграммы направленности, как будет показано в дальнейшем, не зависит от размера антенны. Угол поворота диаграммы направленности щелевой линейной решетки с равноамплитудным распределением равен

$$\Theta_{\Delta} = -\frac{\Delta\varphi_N}{2\pi} \frac{\lambda_0}{(N-1)d} \quad (2)$$

Где  $\Delta\varphi_N$  – отклонение фаз полей в двух крайних щелях решетки;

$\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве;

$d$  – расстояние между щелями;

$N$  – число щелей

Фаза поля  $N$ -й щели, если принять фазу в первой за нулевую, определится как

$$\phi_N = (N-1) \frac{2\pi}{\Lambda} \left( d - \frac{\Lambda}{2} \right) \quad (3)$$

Где  $\Lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}$  – длина волны в волноводе;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая постоянная диэлектрика заполняющего волновод;

Отклонение фазы в  $N$ -ом излучателе при изменении температуры и рабочей частоты будет равно

$$\Delta\varphi_N = \pm \frac{\partial\varphi_N}{\partial\lambda_0} \Delta\lambda \pm \frac{\partial\varphi_N}{\partial T} \Delta T \quad (4)$$

Где  $\Delta\lambda$  – изменение длины волны от средней;

$\Delta T$  – отклонение температуры от средней

После несложных преобразований, пренебрегая температурной зависимостью диэлектрической проницаемости и изменением формы поперечного сечения, имеем

$$\frac{\partial\varphi_N}{\partial\lambda_0} = -(N-1) \frac{2\pi d}{\lambda_0^2} \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial\varphi_N}{\partial T} = \alpha(N-1) \frac{2\pi d}{\lambda_0} \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (6)$$

Где  $\alpha$  – температурный коэффициент расширения материала волновода. Подставляя (5) и (6) в (4) получим

$$\Delta\varphi_N = \pm(N-1)\frac{2\pi d}{\lambda_0}\frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}\left(\alpha\Delta T \pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right) \quad (7)$$

Определяем теперь по формуле (2) угол поворота диаграммы направленности.

$$\Theta_\Delta = \pm\frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}\left(\alpha\Delta T \pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right) \quad (8)$$

Видим, что угол поворота не зависит от размеров антенны.

Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности для равноамплитудного распределения поля равна

$$2\Theta_{\frac{P}{2}} = 0.88\frac{\lambda_0}{(N-1)d} \quad (9)$$

Отношение угла поворота к ширине диаграммы направленности зависит от размеров антенны и равно

$$\frac{\Theta_\Delta}{2\Theta_{\frac{P}{2}}} = \pm\frac{(N-1)d}{0.88\lambda_0}\frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}\left(\alpha\Delta T \pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right) \quad (10)$$

Эту формулу удобнее представить через максимальный размер решетки  $L_{\max} = (N-1)d$  и коэффициент  $\gamma = \frac{\Lambda}{\lambda_0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}$

$$\left|\frac{\Theta_\Delta}{2\Theta_{\frac{P}{2}}}\right| = \frac{L_{\max}}{\lambda_0}\frac{\varepsilon\gamma}{0.88}\left(\alpha\Delta T + \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right) \quad (11)$$

Из этой формулы видно, что для заданного размера решетки  $L$  и длины волны  $\lambda_0$  в частотном диапазоне  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$  уменьшение в потере КНД может быть достигнуто только уменьшением температурного коэффициента и уменьшением размера каждой секции  $L_{\max}$ . Это достигается использованием центральной схемы питания антенной решетки.

Библиографический список

1. Справочник по волноводам / пер. с англ., под редакцией Я.Н. Фельда. – М: Советское радио, 1952. – 965 с.
2. Коган, Н.Л., Машковцев, Б.М., Цибизов, К.Н. Сложные волноводные системы. – Л: Судпромгиз, 1963. – 445 с.