

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО ТУРНИКЕТНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ВЫХОДОМ НА КВАДРАТНОМ ВОЛНОВОДЕ ДЛЯ АНТЕННЫ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

### Введение

В радарх некогерентного рассеяния (НР) метрового диапазона, как правило, используются приемо-передающие антенны круговой поляризации. Это позволяет исключить влияние эффекта Фарадея на результаты измерения высотного профиля мощности НР сигнала. При этом антенно-фидерное устройство (АФУ) настраивается таким образом, чтобы в режимах приема и передачи направления вращения вектора электрического поля были противоположными (например, правая круговая поляризация – на передачу, левая круговая – на прием).

АФУ радара Института ионосферы с неподвижной зеркальной антенной диаметром 100 м НДА-100 построено по двухканальной схеме [1]. Зондирующие импульсы от двух передатчиков через антенные коммутаторы поступают на ортогональные входы облучателя антенны. Облучатель представляет собой пирамидальный рупор с основанием в виде квадратного волновода. Режим правой либо левой круговой поляризации обеспечивается соответствующим сдвигом фаз между каналами передатчика. В режиме приема сигналы с приемных выходов антенных коммутаторов поступают на мост сложения, где суммируются с требуемым фазовым сдвигом. Такой схеме АФУ присущи некоторые недостатки:

- большая длина фидера и различные условия солнечного освещения двух его каналов приводят к температурной нестабильности разности фаз зондирующих импульсов на входах облучателя;
- двухканальная схема передающего устройства требует постоянного контроля амплитуд и сдвига фаз между каналами;
- конструкция рупорного облучателя не обладает симметрией относительно питающих ортогональных фидеров, что приводит к неидентичности коэффициентов передачи каналов и снижению коэффициента эллиптичности в режимах передачи и приема.

Кроме того, существует вторая проблема, связанная с тем, что в антенных коммутаторах радара НР используются газонаполненные разрядники, имеющие большое время восстановления. В отличие от классических радиолокаторов, решающих задачу обнаружения локальных целей, в радарх НР специфической задачей является измерение мощности сигнала, рассеянного на флуктуациях электронной плотности ионосферной плазмы, присутствующего на значительной части развертки дальности. Требуется учет влияния разрядников на дальностях до 400 – 450 км. Замена газонаполненных разрядников современными переключателями на р-и-п диодах сдерживается большой импульсной мощностью, которую необходимо коммутировать (порядка  $10^6$  Вт на канал).

Известны одноканальные схемы построения АФУ радаров НР, использующие волноводное турникетное соединение в режиме поляризатора и антенного коммутатора [2]. Использование классического варианта турникетного соединения с выходом на круглом волноводе в радаре НР Института ионосферы потребовало бы замены пирамидального рупора облучателя на конический. Это сложно реализовать технически, учитывая габаритные размеры конструкции метрового диапазона волн (высота пирамидальной части рупора превышает 18 м). В этой ситуации оптимальным вариантом является использование турникетного соединения с выходом на квадратном волноводе с сечением, соответствующим сечению основания существующего пирамидального рупора.

Внешний вид двух вариантов волноводного турникетного соединения приведен на рис. 1. Следует отметить, что вариант с выходом на круглом волноводе широко описан в литературе и используется в радиолокационной технике сантиметрового диапазона [3, 4].

В метровом диапазоне технологически более простой представляется конструкция с выходом на квадратном волноводе, описание такой конструкции в литературе авторам найти не удалось.

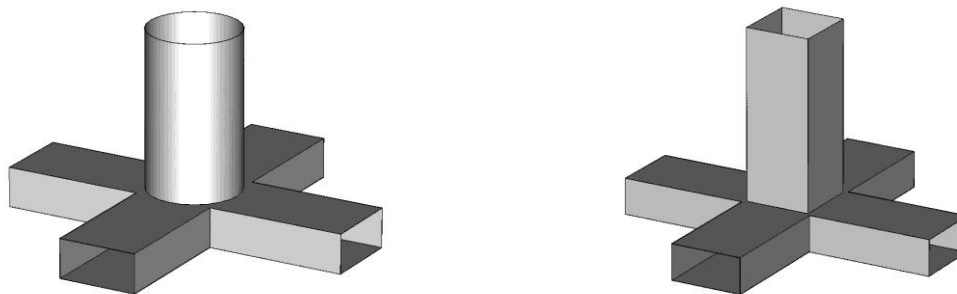


Рис. 1

Цель работы – определение характеристик турникетного соединения с выходом на квадратном волноводе и оценка возможности его применения в радаре НР в качестве поляризатора и антенного коммутатора.

### Моделирование волноводного турникетного соединения с выходом на квадратном волноводе

Турникетное соединение является двенадцатиполосником, при этом в круглом или квадратном волноводе могут распространяться две волны с ортогональными поляризациями. На практике турникетное соединение часто используют в восьмиполосном включении, показанном на рис. 2.

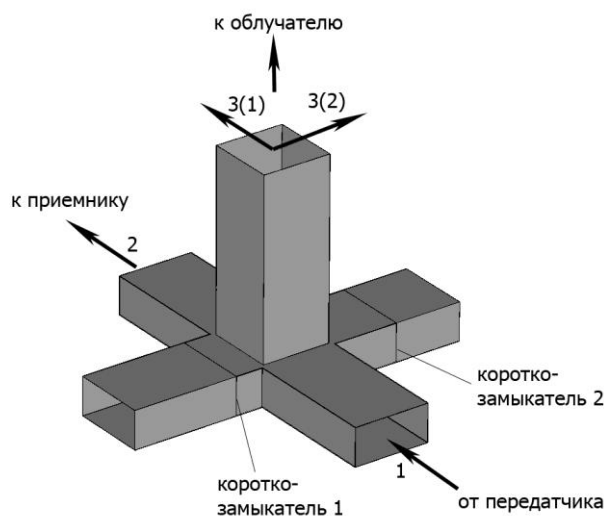


Рис. 2

Входной сигнал подается в плечо 1, в примыкающих к нему двух плечах прямоугольных волноводов устанавливаются короткозамыкатели. Одно из короткозамкнутых плеч должно быть длиннее другого на  $\lambda_v/4$  – четверть длины волны в волноводе. В этом случае отраженные от замыкателей волны сложатся в противофазе и полностью перейдут в плечо 3(2) квадратного волновода. Сохраняя разность длин короткозамкнутых плеч равной  $\lambda_v/4$ , можно выбрать их длины таким образом, что отраженный от них и поступивший в плечо 3(2) сигнал будет отличаться по фазе на  $90^\circ$  от сигнала в плече 3(1).

Таким образом, в квадратном волноводе будут существовать две ортогональных составляющих равной амплитуды с фазовым сдвигом  $90^\circ$  – необходимое условие для излучения волн круговой поляризации. Описанная конструкция может быть представлена матрицей рассеяния [3]

$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & \pm j \\ 0 & 0 & -1 & \pm j \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ \pm j & \pm j & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Из нее следует, что плечи 1 и 2 развязаны, а мощность, подводимая ко входу 1, делится пополам между плечами 3(1) и 3(2) с фазовым сдвигом  $\pm 90^\circ$ . Развязанными также являются плечи 3(1) и 3(2).

Если на входы 3(1), 3(2) подать сигнал круговой поляризации, то в зависимости от направления вращения он поступит либо на выход 1 либо на выход 2. Поскольку в радаре НР излучаемый и принимаемый сигналы имеют противоположное направление вращения, то описанная конструкция обладает свойствами антенного коммутатора.

Определение характеристик турникетного соединения и оптимизация размеров согласующего устройства проведены с помощью трехмерного электродинамического моделирования. Расчетная частота согласования – 158 МГц. Критерием согласования являлось одновременное выполнение нескольких условий:

- 1) малый коэффициент отражения по входу 1 ( $S_{11}$ );
- 2) высокий уровень развязки плеч 1 и 2 ( $S_{21}$ );
- 3) равенство амплитуд сигналов в плечах 3(1) и 3(2).

Разность фаз сигналов в плечах 3(1) и 3(2), равная  $90^\circ$ , была достигнута изменением положения короткозамыкателей при сохранении разности длин короткозамкнутых плеч равной четверти длины волны в волноводе.

В процессе моделирования было выявлено существенное влияние радиуса закругления внутренних углов волноводов на характеристики соединения. Указанный радиус был измерен на существующих волноводах  $1330 \times 660$  мм и оказался равным 6 мм. Это значение также было учтено в модели. Турникетное соединение в разрезе представлено на рис.3, а обозначения размеров согласующего устройства и положения короткозамыкателей указаны на рис.4.

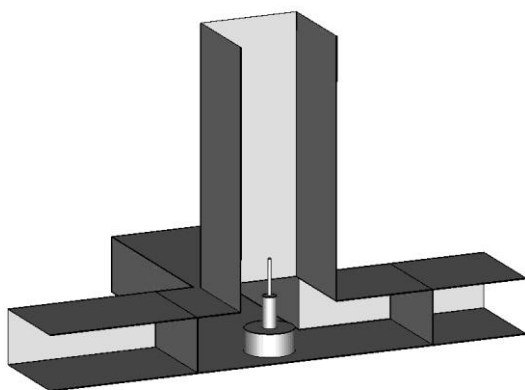


Рис. 3

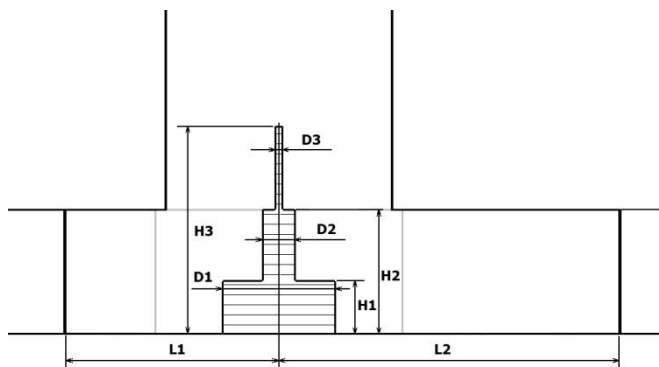


Рис. 4

Оптимальные размеры согласующего устройства составили:  $D1 = 0,316\lambda$ ,  $D2 = 0,09\lambda$ ,  $D3 = 0,021\lambda$ ,  $H1 = 0,148\lambda$ ,  $H2 = 0,348\lambda$ ,  $H3 = 0,579\lambda$ , где  $\lambda$  – расчетная длина волны в свободном пространстве. Положение короткозамыкателей:  $L1 = 0,6\lambda$ ,  $L2 = 0,957\lambda$ .

Результаты моделирования представлены на рис. 5 – 8. На рис. 5 приведены частотные зависимости элементов матрицы рассеяния (1)  $S_{11}$  и  $S_{21}$ . На рабочей частоте 158 МГц коэффициент отражения  $S_{11} = -27,2$  дБ, а развязка плеч 1 и 2  $S_{21} = -33,7$  дБ.

Соотношения амплитуд и фаз поля в плечах 3(1) и 3(2) характеризуют коэффициент эллиптичности круговой поляризации на выходе квадратного волновода. Частотные зависимости амплитуд представлены на рис. 6, фаз – на рис. 7. На рис. 6 видно, что компонента, поступающая в плечо 3(1) непосредственно из плеча 1, является широкополосной. Компонента в плече 3(2) сформирована в результате отражения от короткозамкнутых плеч и является более узкополосной. На рабочей частоте коэффициенты передачи для обеих компонент равны и составляют  $-3,033$  дБ. Из зависимостей, приведенных на рис. 7, следует, что разность фаз коэффициентов передачи равна  $90,24^\circ$  на рабочей частоте. Поляризационную

развязку выходов 1 и 2 характеризуют зависимости, приведенные на рис. 8. При подаче волны правой круговой поляризации в плечи 3(1), 3(2) коэффициент передачи на рабочей частоте составляет 3 дБ для канала 2 и -66 дБ для канала 1. Таким образом, при точной настройке поляризационная развязка каналов 1 и 2 со входов 3(1), 3(2) может достигать 69 дБ.

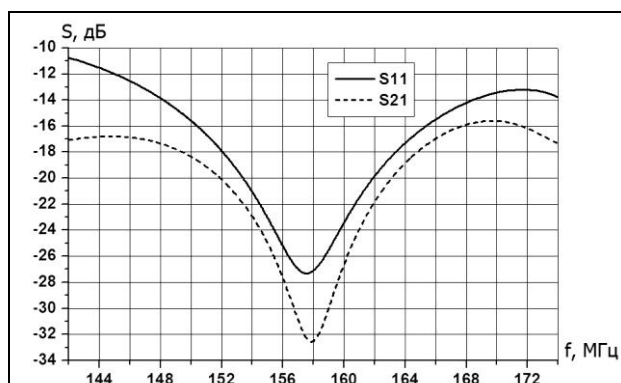


Рис. 5

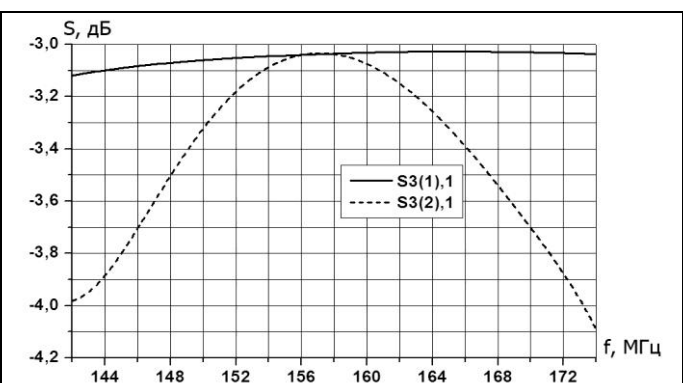


Рис. 6

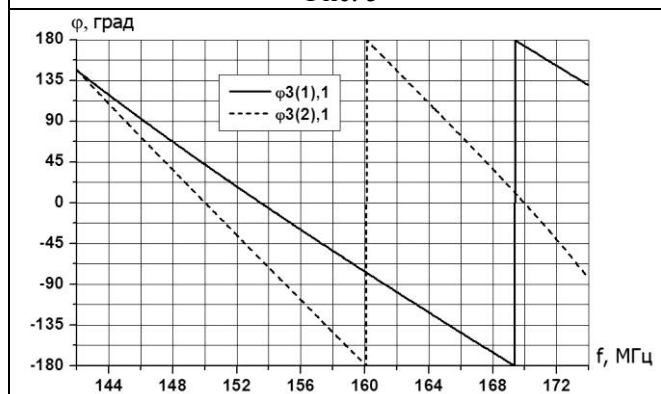


Рис. 7

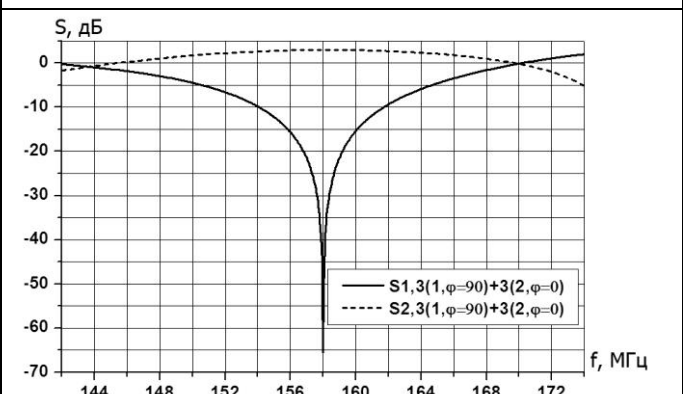


Рис. 8

Указанные характеристики получены при идеально согласованных нагрузках на всех выходах. При работе на реальный пирамидальный рупор картина может измениться, поскольку появятся отражения как от перехода волновод–рупор, так и от раскрыва рупора.

Внешний вид рассмотренного соединения турникетного типа в сборе с пирамидальным рупором антенны НДА-100 приведен на рис. 9. Полная высота конструкции составляет 22,2 м, раскрыв рупора  $9,4 \times 9,4 \text{ м}^2$ .

Результаты компьютерного моделирования S-параметров этой конструкции приведены на рис. 10. Сравнение их с зависимостями S11 и S21, приведенными на рис. 5, показывает, что присоединение рупора вызвало смещение минимума S21 на 0,5 МГц в сторону низких частот. Частотная зависимость S11 приобрела волнистый характер. Тем не менее, значения характеристик остаются высокими: на рабочей частоте S11 = -22,1 дБ, S21 = -32,6 дБ.

В результате моделирования была получена диаграмма направленности (ДН) рупора антенны НДА-100 при возбуждении со входа 1 турникетного соединения. Ее анализ показал, что максимум ДН ориентирован строго по оси рупора, уровень боковых лепестков не превышает -13,5 дБ, коэффициент усиления относительно изотропного излучателя равен 21,8 дБ, ширина ДН по уровню -10 дБ в двух ортогональных вертикальных плоскостях отличается несущественно –  $2\theta_{-10} = 30,7^\circ$ ,  $2\varphi_{-10} = 28,8^\circ$ . Пирамидальный рупор с такими параметрами ДН может использоваться в качестве облучателя двухзеркальной параболической антенны НДА-100.

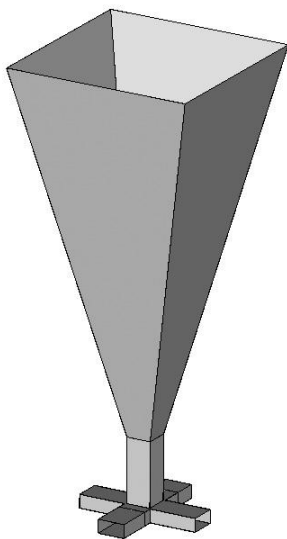


Рис. 9

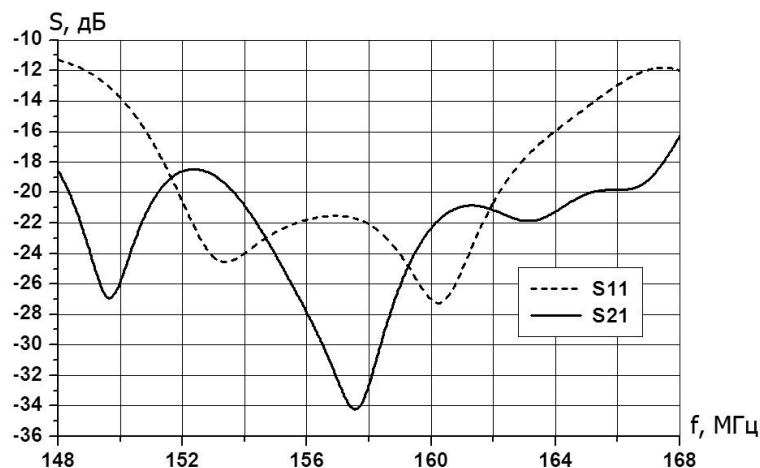


Рис. 10

### Заклучение

Результаты компьютерного моделирования показывают, что предлагаемое соединение может быть согласовано на рабочей частоте радара НР и имеет высокие электродинамические характеристики (КСВН, развязка входов, амплитудные и фазовые соотношения компонент, формирующих круговую поляризацию).

Использование указанного соединения в качестве поляризатора и антенного коммутатора радара НР позволит применить одноканальную схему фидерного тракта, исключив необходимость текущего контроля и подстройки круговой поляризации.

Предлагаемое соединение турникетного типа в восьмиполусном включении обеспечивает развязку выходов 1 – 2 «передача – прием» не менее 30 дБ, что позволяет заменить антенные коммутаторы с газовыми разрядниками (на мощность 1 МВт) переключателями защиты приемника на p-i-n диодах (на мощность 1 кВт) с малым временем восстановления.

**Список литературы:** 1. Емельянов, Л.Я., Скляр, И.Б., Черняев, С.В., Полеткин, А.А. Контроль поляризации и стабильности параметров радара некогерентного рассеяния // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ»: Сб. науч. тр. Тематический выпуск: Автоматика и приборостроение. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – №4. – С. 85 – 88. 2. Evans, J.V. The Millstone ionospheric radar // Aeronomy report. – 1967. – No.19. – P. 47 – 50. 3. Харвей, А.Ф. Техника сверхвысоких частот / пер. с англ. под ред. В.И. Сушкевича. – М.: Сов. радио, 1965. – Т. 1. – 784 с. 4. Альтман, Дж.Л. Устройства сверхвысоких частот / пер. с англ. под ред. И.В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 487 с.

Институт ионосферы НАН и МОНМС Украины

Поступила в редколлегию 05.09.2012