УДК 621.372.88

Ю.В. Крылов

Способ уменьшения поперечного размера ортомодового селектора частотно-поляризационного устройства облучателя зеркальных антенн КА

Рассмотрены моделирование и расчет ортомодового селектора, выполненного на основе крестового разветвления и входящего в состав частотно-поляризационного устройства облучателя зеркальных антенн или глобальных рупорных антенн. Исследовано влияние длины четвертьволнового трансформатора, установленного в плечах ортомодового селектора, на ширину рабочей полосы частот. Приведен способ уменьшения поперечных габаритов ортомодового селектора за счет использования волноводного изгиба в качестве четвертьволнового трансформатора, что позволило уменьшить габариты устройства более чем в 2 раза.

Ключевые слова: облучатель, ортомодовый селектор, четвертьволновый трансформатор.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-18-22

В современных спутниках связи ввиду ограниченности размещения новых космических аппаратов (КА) на геостационарной орбите необходимо применение как частотного, так и поляризационного уплотнения спутниковых сигналов. Поэтому антенны, входящие в состав КА, должны обеспечивать прием и передачу сигналов различных поляризаций. Также к спутниковым антеннам предъявляются жесткие требования по массогабаритным показателям. Для их уменьшения необходимо, чтобы каналы приема и передачи были совмещены в одном облучателе зеркальной антенны или глобальной рупорной антенны. Функции частотного и поляризационного разделения сигналов как в облучателях зеркальных антенн, так и в глобальных рупорных антеннах выполняет частотно-поляризационный селектор.

Частотно-поляризационный селектор, служащий для разделения частот приема и передачи без использования дополнительного облучателя под конкретный диапазон частот, имеет несколько вариантов исполнения. Функцию частотного разделения во всех способах проектирования частотно-поляризационного устройства выполняет ортомодовый селектор (ОС). ОС состоит из волновода круглого сечения и поперечного крестового разветвления, необходимого для разделения двух ортогональных компонент поляризации основной моды H_{11} . ОС можно разделить на два типа. Друг от друга они различаются лишь тем, какой сигнал рабочего диапазона частот (высокочастотный или низкочастотный) будет выделяться с торцевого (прямого) выхода ОС.

Согласно первому типу ОС с прямого выхода волновода круглого сечения выделяется низкочастотный сигнал рабочего диапазона частот [1]. Преимуществом данного способа реализации ОС является относительная простота конструкции – для подавления низкочастотных составляющих сигнала в разветвлениях волноводов прямоугольного сечения ввиду запердельности прямоугольных волноводов нет необходимости в обеспечении дополнительной фильтрации. Однако имеется существенный недос-

таток в виде узкополосности устройства, так как для подавления сигналов высоких частот необходимо на выходе ОС вводить фильтр нижних частот (ФНЧ) для отражения высокочастотного сигнала в область крестового разветвления.

Второй способ проектирования ОС отличается от первого тем, что с прямого выхода волновода круглого сечения выделяется высокочастотный сигнал [2, 3]. Несомненным плюсом данной конструкции ОС является его широкополосность ввиду отсутствия волноводного узкополосного фильтра круглого сечения. Подавление низкочастотной составляющей сигнала на выходе селектора происходит за счет запердельности волновода круглого сечения меньшего диаметра, обеспечивающего прием сигнала на основном типе колебаний и отражение передающего сигнала в область крестового разветвления. Для данного способа построения ОС недостатком являются сравнительно большие поперечные габариты ввиду наличия ФНЧ в плечах ОС. Большие поперечные размеры ОС увеличивают массогабаритные показатели частотно-поляризационного селектора в целом, что является недопустимым при условии его применения в составе облучателей зеркальных антенн КА.

В данной статье рассмотрен способ уменьшения поперечных габаритов ОС, реализованного по схеме с прямым высокочастотным выходом. Данный способ позволил уменьшить поперечные размеры ОС более чем в 2 раза при сохранении ширины рабочей полосы частот относительно ОС в виде крестового разветвителя.

Принцип работы ОС

На рис. 1 показана конструкция ОС с торцевым высокочастотным выходом. Данное устройство состоит из: 1 – волновода большего диаметра, 2 – волновода меньшего диаметра, 3 – трансформатора круглого волновода, 4 – четырех трансформаторов прямоугольного волновода, 5 – четырех ФНЧ.

К выходной части волновода 1 при использовании ОС в составе облучателя зеркальных или глобальных антенн стыкуется рупорный излучатель.

Другая сторона волновода 1 соединяется с модовым трансформатором 3, который служит для того, чтобы нивелировать потери энергии основной волны H_{11} , возбуждаемой в круглом волноводе меньшего диаметра 2, на преобразование в волны высшего типа. Крестовое разветвление из четырех волноводов

прямоугольного сечения 4 предназначено для того, чтобы снять поляризационное вырождение волны H_{11} в низкочастотном рабочем диапазоне. Проектирование ОС такого типа необходимо начинать с модового трансформатора 3. Расчет модового трансформатора подробно описан в [4].

Рис. 1. Поперечный и продольный вид ОС

Следующим этапом проектирования ОС является моделирование волноводного трансформатора прямоугольного сечения. Проектирование ОС проводилось в диапазонах частот: передача – 3,9–4,2 ГГц, прием – 5,9–6,4 ГГц. Моделирование осуществлялось в среде CST Microwave Studio.

Возбуждение прямоугольных волноводов в одной из двух плоскостей происходит за счет прямоугольных щелей, прорезанных вдоль стенок волновода круглого сечения. Щели расположены симметрично по обе стороны круглого волновода в двух плоскостях, тем самым обеспечивая разделение двух ортогональных компонент моды H_{11} . Возбуждение щели в круглом волноводе происходит при условии, что большая сторона этой щели пересекает поверхностные токи, протекающие по внутренним стенкам волновода, поэтому щели ОС размещены строго вдоль волновода круглого сечения. Поле, излучаемое такой щелью, обладает линейной поляризацией с вектором E , перпендикулярным широкой стороне щели.

Длина широкой стороны щели выбирается из условия распространения основной волны H_{10} в прямоугольном волноводе [5]:

$$\lambda_{кр H_{20}} \leq \lambda \leq \lambda_{кр H_{10}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{кр H_{20}}$ – критическая длина волны H_{20} , $\lambda_{кр H_{10}}$ – критическая длина волны H_{10} .

Ввиду того, что $\lambda_{кр H_{10}} = 2a$, $\lambda_{кр H_{20}} = a$, условие (1) можно представить в виде

$$a \leq \lambda \leq 2a, \quad (2)$$

где a – большая сторона волновода, в данном случае – щели.

Длина волны на нижней частоте рабочего диапазона $f_n = 3,9$ ГГц равна $\lambda_n = 77$ мм. Таким образом, из условия 2 можно сделать вывод, что минимально возможная ширина большей стороны щели $a_{щ} = \lambda_n / 2 = 38,5$ мм. Минимальный размер широкой стороны щели выбирается для того, чтобы как можно меньше высших мод высокочастотного диапазона прошло в область крестового разветвления.

Следующим шагом расчета ОС является согласование щели с волноводом прямоугольного сечения. В большинстве случаев согласование щели осуществляется не с волноводом прямоугольного сечения, а с ФНЧ, установленным в каждом из плеч ОС. ФНЧ выполняют функцию отражения высокочастотного сигнала в область модового трансформатора. Таким образом, следующим шагом при разработке ОС является проектирование волноводного трансформатора, согласующего щель в области крестового разветвления с ФНЧ.

Расчет волноводного трансформатора

Согласование щели с ФНЧ осуществлялось с помощью трансформатора прямоугольного сечения. Наилучшее согласование обеспечил трансформатор, представляющий собой отрезок регулярной линии передачи длиной около четверти длины волны, так называемый четвертьволновый трансформатор (ЧТ). Ширина ЧТ должна быть не менее $\lambda_n / 2$ (длины волны на нижней частоте диапазона). Для моделируемого ЧТ ширина составила 47,6 мм, высота – 20,3 мм.

На рис. 2 показаны результаты моделирования ОС, а именно КСВН на частотах передачи при различных длинах ЧТ: 1 – длина ЧТ = 22,5 мм, 2 – длина ЧТ = 24,5 мм, 3 – длина ЧТ = 26,5 мм.

Рис. 2. КСВН ОС на частотах 3,8–4,3 ГГц

Рис. 3. КСВН ОС на частотах 5,8–6,5 ГГц

По результатам моделирования ОС, выполненного в виде крестового разветвителя, можно сделать вывод, что наилучшее согласование обеспечивает ЧТ длиной 24,5 мм. Рассчитанный КСВН для рабочих диапазонов частот составил не более 1,2. Таким образом, ОС, выполненный в виде крестового разветвителя, позволяет обеспечить прием и передачу сигналов в широкой полосе частот, однако он имеет относительно большие поперечные размеры, что вносит весомый вклад в массогабаритные показатели частотно-поляризационного селектора в целом.

На рис. 3 показаны результаты моделирования ОС на частотах приема при различных длинах ЧТ: 1 – длина ЧТ = 22,5 мм, 2 – длина ЧТ = 24,5 мм, 3 – длина ЧТ = 26,5 мм.

Проектирование компактного ОС

Очевидными решениями уменьшения поперечных размеров ОС являются: 1 – уменьшение длины ЧТ, 2 – уменьшение длины ФНЧ. В соответствии с результатами расчета длин ЧТ, приведенных выше, первый вариант уменьшения размеров ОС является невозможным. Второй вариант, который заключается в уменьшении продольных размеров ФНЧ, напрямую влияет на АЧХ фильтра, а именно – на ее деградацию.

Исходя из этих особенностей проектирования ОС, был разработан способ уменьшения попереч-

ных габаритов ОС с сохранением электрических длин как ЧТ, так и ФНЧ. Данный способ заключается в реализации ЧТ в виде волноводного изгиба. Внешний вид ОС с ЧТ такого типа приведен на рис. 4. Данное устройство состоит из: 1 – волновода круглого сечения, 2 – трансформатора круглого волновода, 3 – четырех трансформаторов прямоугольного волновода, 4 – четырех фильтров нижних частот (ФНЧ).

Рис. 4. Внешний вид разработанного ОС

Волноводный изгиб позволяет уменьшить поперечный габарит устройства более чем в 2 раза, сохраняя требуемую ширину рабочей полосы частот. Ширина разработанного ЧТ составила 40 мм. Высота моделируемого ЧТ равна 14 мм.

Также было проведено исследование по влиянию длины ЧТ на КСВН ОС. На рис. 5 показан ОС с удлиненным ЧТ за счет отрезков волноводов длиной 1,5 мм, установленных с обоих концов ЧТ.

Рис. 5. Внешний вид разработанного ОС с увеличенной длиной ЧТ

На рис. 6 показаны результаты моделирования ОС, а именно КСВН на частотах передачи при различных длинах ЧТ: 1 – волноводный изгиб без увеличения длины, 2 – волноводный изгиб с удлинением на 1,5 мм обоих концов ЧТ. На рис. 7 показаны результаты моделирования ОС на частотах приема при различных длинах ЧТ: 1 – волноводный изгиб без увеличения длины; 2 – волноводный изгиб с удлинением на 1,5 мм обоих концов ЧТ. Из рис. 6 и 7 видно, что простой волноводный изгиб ЧТ обеспечивает работу ОС в требуемых рабочих диапазонах частот не хуже, чем ЧТ, выполненный в виде регулярной линии. По результатам моделирования на частотах приема удлиненного ЧТ как для компактного ОС, так и для обычного ОС с крестовым разветвлением, наблюдается явление резкого возрастания

амплитуды отраженной волны (см. кривые КСВН 3 и 2 рис. 3 и 7 соответственно). Этот эффект объясняется наличием ФНЧ в составе ОС. ФНЧ представляет собой неоднородности в виде емкостных диафрагм, а именно – сужений узкой стенки волновода прямоугольного сечения. Отражения от всех неоднородностей представляют собой электромагнитные волны с разными фазами. Если отраженная от ФНЧ волна достигает места сочленения прямоугольного и круглого волновода в противофазе с падающей волной, то общая напряженность поля упадет. Исходя из этого, при проектировании ОС необходимо искать компромисс между минимальным расстоянием от фильтра до щели и согласованием данного ФНЧ с волноводом круглого сечения в требуемой полосе частот.

Рис. 6. КСВН ОС с компактным ЧТ на частотах 3,8–4,3 ГГц

Рис. 7. КСВН ОС с компактным ЧТ на частотах 5,8–6,5 ГГц

Заключение

В статье были рассмотрены расчет и моделирование ОС, входящего в состав частотно-поляризационного селектора облучателя зеркальных антенн или глобальных рупорных антенн. Проведено исследование влияния длины ЧТ, расположенного в плечах ОС, на ширину рабочей полосы частот. Приведен способ уменьшения поперечных габаритов ОС за счет изменения формы ЧТ, а именно – использования волноводного изгиба в качестве ЧТ. Данное решение позволяет уменьшить поперечный габарит устройства более чем в 2 раза, сохраняя требуемую ширину рабочей полосы частот. По результатам исследования влияния длин ЧТ на ширину рабочей полосы частот был сделан вывод, что уменьшение длины ЧТ минимизирует влияние отражений от ФНЧ на высокочастотную составляющую сигнала в области крестового разветвления, а также уменьшает габариты ОС в целом. Таким образом, при использовании изгиба волновода в качестве трансформатора необходимо искать компромиссное решение между устранением противофазных отражений от ФНЧ за счет уменьшения длины ЧТ и согласованием волновода круглого сечения с ФНЧ.

Литература

1. Крылов Ю.В. Частотно-поляризационная селекция сигналов в рупорных облучающих системах зеркальных антенн // Исследования наукограда. – 2015. – № 2. – С. 5–9.
2. Компактный облучатель Ka/Q-диапазона круговой поляризации / Ю.В. Крылов, И.Ю. Данилов, Ю.Г. Выгонский, А.Г. Романов // Наукоемкие технологии. – 2015. – Вып. 3(16). – С. 52–55.
3. Крылов Ю.В. Проектирование облучателя в Ka/Q-диапазоне на основе «восстанавливающей» схемы /

Ю.В. Крылов, В.Б. Тайгин // Вестник СибГАУ. – 2015. – Вып. 2(16). – С. 417–422.

4. Крылов Ю.В. Проектирование волноводного трансформатора для широкополосного облучателя зеркальных антенн // Доклады ТУСУРа. – 2016. – № 3 (19). – С. 16–20.

5. Фельдштейн А.Л. Справочник по элементам волноводной техники / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. – М.: Связь, 1967. – С. 135–140.

Крылов Юрий Валерьевич

Инженер-конструктор АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева», Железнодорожск
Тел.: +7 (391-9) 72-24-39, 76-40-01
Эл. почта: unker007@mail.ru

Krylov Y.V.

Method to reduce the transverse dimension of the orthomode transducer of frequency-polarization device installed on feed antenna for reflector spacecraft antennas

Methods of modeling and calculating orthomode transducer based on the basis of the cross splitter, which is part of the frequency-polarization device of global feed horn antennas or feed antenna for reflector antennas, were reviewed. The influence of the length of the quarter wave transformer installed on the arms orthomode transducer and the width of the operating frequency band were investigated. The method to reduce the transverse dimensions of orthomode transducer by using of the waveguide bend as quarter wave transformer was shown. This allowed to reduce more than two times the size of the device.

Keywords: feed antenna, orthomode transducer, quarter wave transformer.