

УДК 621.396.677.3

Исследование влияния герметизации многорупорного приемо-передающего облучателя на его характеристики

Русов Ю.С.^{1,*}

[*rusov.yu.s@gmail.com](mailto:rusov.yu.s@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены некоторые способы обеспечения герметичности конструкции волноводного многорупорного приемо-передающего облучателя, выполненного в виде соединяемых металлических деталей и работающего на волнах с круговой поляризацией электромагнитного поля. Представлены результаты исследований влияния радиопрозрачной пленки в раскрыве облучателя и пропайки стыков деталей на электрические характеристики облучателя. Обосновано возможное ухудшение характеристик облучателя после установки герметизирующей пленки в его раскрыве и пропайки стыков металлических деталей конструкции. Приведены частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению и развязки передающего и приемных каналов облучателя Ка-диапазона частот, измеренные до герметизации конструкции и после применения рассмотренных способов герметизации.

Ключевые слова: четырехрупорный облучатель; моноимпульсный облучатель; развязка каналов облучателя; герметизация

Введение

В современных радиотехнических системах широкое применение находят апертурные антенны с пространственным возбуждением, например зеркальные антенны или фазированные антенные решетки. Возбуждение раскрывов в таких антеннах выполняется облучателями. С целью обеспечения возможности формирования набора необходимых диаграмм направленности раскрывы облучателей могут выполняться в виде нескольких излучателей. Наиболее распространены моноимпульсные облучатели, формирующие суммарную и разностные диаграммы направленности [1], а также находят применение облучатели, формирующие суммарную диаграмму направленности в режиме передачи электромагнитных волн и несколько парциальных диаграмм направленности в режиме прима [2]. При построении облучателя на базе волноводных схем суммирования и деления мощности электромагнитных волн его раскрыв выполняется в виде рупоров или открытых концов волноводов [3]. Наиболее часто раскрыв волноводного облучателя содержит четы-

ре [4, 5] или двенадцать [6] рупоров. При использовании такого облучателя в приемопередающей антенне важной характеристикой наряду с коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) на его входе и выходах является развязка передающего и приемных каналов [7]. На величину развязки каналов влияет как характеристика развязывающего волноводного узла, так и отражение электромагнитных волн от раскрыва облучателя и в его тракте. При использовании антенной системы в сложных климатических условиях необходимо облучатель и волноводный тракт выполнять герметичными. Представляет интерес исследование влияния некоторых практически применимых способов герметизации раскрыва и тракта волноводного многорупорного облучателя на его электрические характеристики, которые оказывают непосредственное влияние и на характеристики антенной системы в целом.

1. Герметизация раскрыва многорупорного облучателя

Одним из вариантов выполнения многорупорного волноводного облучателя является конструкция, состоящая из плоских соединяемых между собой плит, имеющих металлизированную поверхность или изготовленных целиком из металла с высокой электрической проводимостью [8]. Волноводные каналы выполняются в плитах, собираемых в единое изделие с применением резьбовых соединений. Без принятия специальных мер такая конструкция не является герметичной. Для обеспечения герметичности необходимо устранить возможность попадания влаги внутрь волноводных каналов через открытые раскрывы рупорных излучателей и через стыки деталей конструкции.

Известна конструкция устройства герметизации раскрыва облучателя, содержащая две параллельные диэлектрические пластины, толщины которых равны половине длины волны в материале, из которого они изготовлены. Пластины располагаются друг от друга на расстоянии, равном половине длины волны [9]. Недостатком этого устройства герметизации является сложность конструкции и потери электромагнитных волн в материале пластин, являющиеся следствием их довольно большой толщины.

Герметизация рупоров облучателя может выполняться более простым способом, например путем закрывания их раскрывов пленкой из радиопрозрачного материала. Для снижения влияния такого укрытия толщина пленки должна быть минимальной и выбирается достаточной для обеспечения механической прочности. Электрические свойства пленки должны обеспечивать приемлемое вносимое ослабление электромагнитных волн в рабочем диапазоне частот. На рис. 1 показан пример выполнения четырехрупорного облучателя Ка-диапазона волн, где для герметизации раскрыва используется полиимидная пленка толщиной 0,1 мм. Пленка крепится к раскрыву облучателя прижимным кольцом.

При использовании многорупорного облучателя в приемопередающей системе, работающей на волнах с круговой поляризацией электромагнитного поля, разделение передающего и приемных трактов облучателя может обеспечиваться применением взаимного поляризатора и селектора поляризации в канале каждого рупора (рис. 2). Вход 1 селектора поляризации, работающий на волне с линейной поляризацией поля, соединяется с пе-

редающим трактом облучателя, а выход 2, работающей на волне с линейной поляризацией, ортогональной поляризации волны на входе 1, подключается к тракту соответствующего приемного канала.

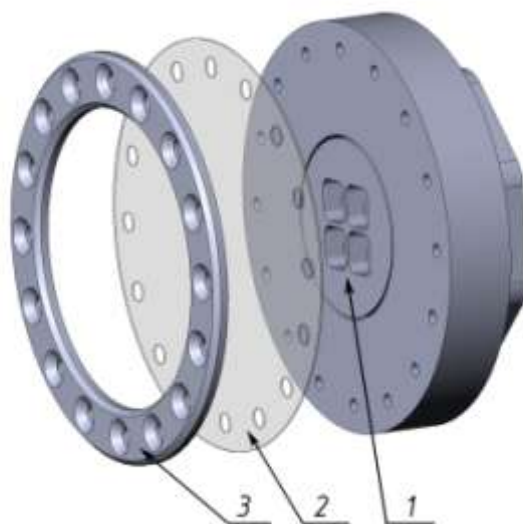


Рис. 1. Герметизация раскрыва четырехрупорного облучателя радиопрозрачной пленкой: 1 – раскрыв облучателя, 2 – радиопрозрачная пленка, 3 – прижимное кольцо

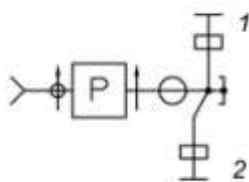


Рис. 2. Схема одного канала приемо-передающего облучателя

Волна с линейной поляризацией поля, поданная на вход 1 селектора поляризации, проходит через взаимный поляризатор, преобразуется в волну с круговой поляризацией и излучается рупором в свободное пространство. Принятая рупором волна с круговой поляризацией поля, ортогональной поляризации излучаемых облучателем волн, проходит через взаимный поляризатор, преобразуется в волну с линейной поляризацией, ортогональной поляризации волны на входе 1, и через выход 2 поступает в приемный тракт. Такое разделение передающего и приемного трактов применяется в известных конструкциях облучателей [2, 5, 7].

Введение герметизирующей пленки в раскрыв облучателя увеличивает отражение электромагнитных волн в его излучателях. Волна с круговой поляризацией поля, отраженная от раскрыва рупора, сохраняет направление вращения вектора напряженности электрического поля, но при этом меняет направление распространения на противополо-

ложное. Таким образом, отраженная волна имеет круговую поляризацию, ортогональную поляризации излучаемой облучателем волны, и, пройдя через поляризатор, направляется в тракт приемного канала. Поэтому герметизация раскрыва облучателя пленкой вызывает ухудшение развязки передающего и приемных каналов облучателя.

2. Герметизация стыков деталей облучателя

Распространены способы герметизации волноводных узлов и соединений с применением уплотнительных прокладок [10]. Недостатком использования подобных уплотнительных прокладок является увеличение габаритов устройства в целом.

Известен способ герметизации волноводных устройств [11], при котором весь внутренний объем устройства после монтажа внутренних элементов заполняют гранулами пенополистирола, а затем вспенивают их непосредственно внутри устройства. Этот способ обеспечивает высокую степень пыле- и влагозащиты, но заполнение внутреннего объема волноводных каналов пенополистиролом неизбежно приведет к увеличению потерь мощности электромагнитных волн за счет значительного объема материала наполнителя.

Возможным вариантом обеспечения герметичности стыков металлических деталей конструкции облучателя является их пропайка, выполняемая на этапе сборки. Этот способ не требует заполнения волноводных каналов диэлектриком и увеличения габаритов устройства. Технология предполагает применение припоя, изготавливаемого в виде тонкой фольги. Заготовка припоя предварительно вырезается с учетом как внешних размеров стыкуемых деталей, так и внутренних границ волноводных каналов. Предварительно подготовленные заготовки припоя размещаются между стыкуемыми плитами конструкции, после чего детали стягиваются посредством предусмотренных резьбовых соединений. Собранный конструкцией нагревается до температуры пайки и после остывания является герметичной.

Одним из недостатков такого способа герметизации является однократная сборка всего изделия без возможности последующей разборки. Другой существенный недостаток заключается в возможности затекания припоя во внутренние волноводные каналы облучателя, что при сложной схеме устройства невозможно проконтролировать визуально через входы и выходы его волноводных трактов. Затекание припоя в волноводные каналы изменяет их внутреннюю форму и может стать причиной увеличения отражения электромагнитных волн в трактах облучателя, что в свою очередь окажет негативное влияние в том числе и на развязку передающего и приемных каналов.

3. Экспериментальные данные

Рассмотренные выше способы герметизации испытаны на волноводном четырехпорном облучателе Ка-диапазона частот, который может использоваться в качестве базовой волноводной сборочной единицы облучателя с диэлектрической линзой [12]. Схема исследуемого волноводного узла приведена на рис. 3. Изделие содержит передающий

тракт с волноводным входом 1 и приемный тракт с четырьмя выходами 2...5. При этом передающий тракт обеспечивает синфазное и равноамплитудное распределение поступающей на его вход электромагнитной волны между четырьмя рупорами излучающего раскрыва.

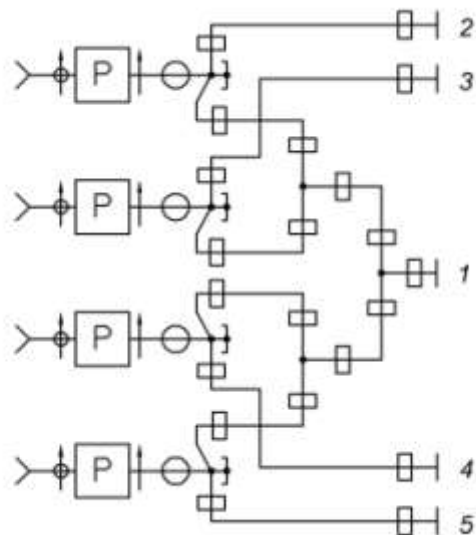


Рис. 3. Схема волноводного четырехрупорного приемо-передающего облучателя

Каждый из приемных выходов 2...5 соединен с соответствующим рупором облучателя. Разделение передающего и приемных каналов обеспечивается четырьмя волноводными селекторами поляризации.

На рис. 4...рис. 8 представлены экспериментальные характеристики облучателя до и после применения рассмотренных способов герметизации: кривые 1 соответствуют облучателю до применения герметизации, кривые 2 измерены после пропайки стыков деталей облучателя, а кривые 3 получены для пропаянного облучателя с герметизирующей пленкой в раскрыве.

На рис. 4 приведены частотные зависимости коэффициента стоячей волны на входе передающего тракта облучателя. Вблизи центральной частоты рабочего диапазона КСВН после пропайки увеличивается до 1,31 от исходного значения 1,28 и до значения 1,35 после пропайки и установки герметизирующей пластины.

Значения КСВН после герметизации могут и уменьшаться. Примером этого являются частотные зависимости КСВН на одном из приемных выходов облучателя, приведенные на рис. 5. Улучшение характеристики КСВН вызвано устранением влияния областей с недостаточно качественным контактом, наличие которых возможно при стыковке деталей облучателя без пропайки. Добавление герметизирующей пленки в раскрыве облучателя приводит к повышению значения КСВН на центральной частоте от 1,08 до 1,12. При этом на некоторых частотах в пределах полосы $\pm 2\%$ наблюдается повышение КСВН до значения 1,2.

Развязка передающего и приемных каналов облучателя существенно зависит как от качества выполнения поляризатора и селектора поляризации, так и от коэффициента отражения электромагнитной волны от раскрыва облучателя. При этом даже незначительное затекание припоя в волноводные каналы может приводить к ухудшению этого параметра.

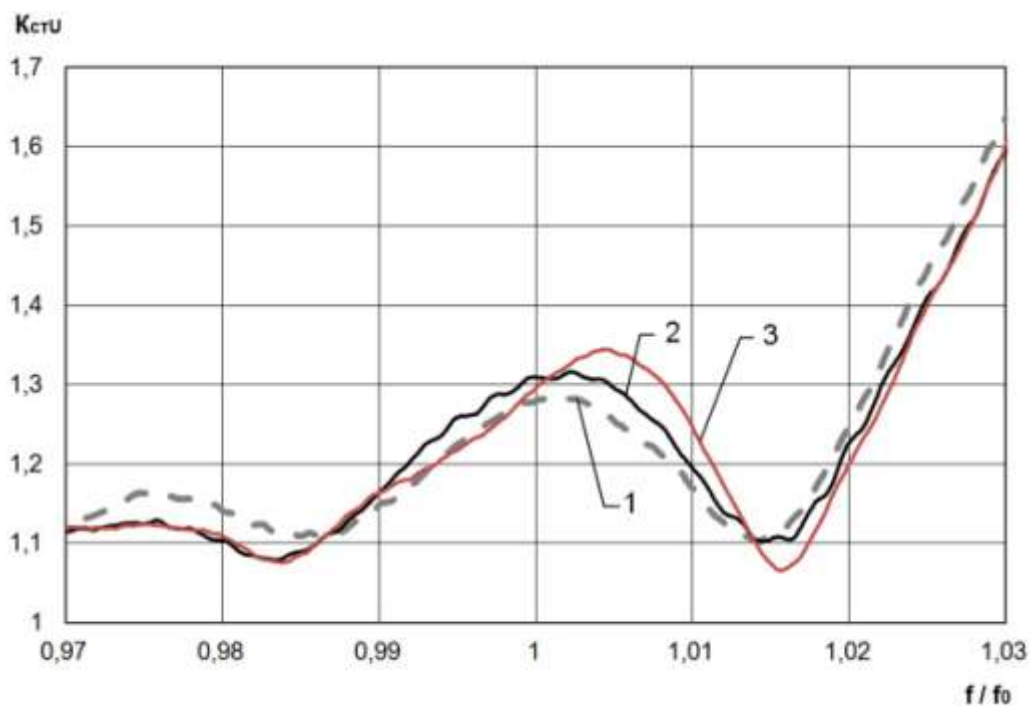


Рис. 4. Частотные зависимости КСВН на входе передающего канала

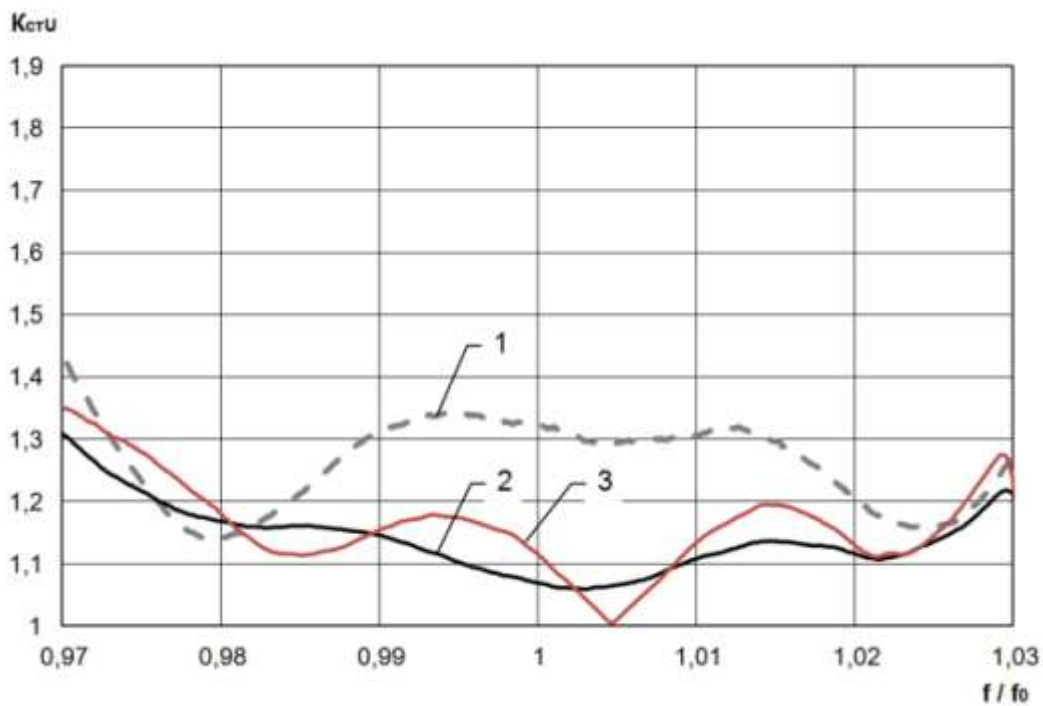


Рис. 5. Частотные зависимости КСВН на выходе одного из приемных каналов

На рис. 6 приведены характеристики коэффициента передачи электромагнитной волны со входа передающего канала на выход одного из приемных каналов. При достаточно качественно выполненной пропайке стыков развязка каналов ухудшается в среднем не более чем на 2 дБ в полосе частот $\pm 2\%$ и не более чем на 3 дБ в полосе $\pm 3\%$. При этом введение герметизирующей пленки дополнительно ухудшает развязку каналов облучателя. Суммарное ухудшение развязки каналов вблизи центральной частоты рабочего диапазона составляет порядка 4 дБ.

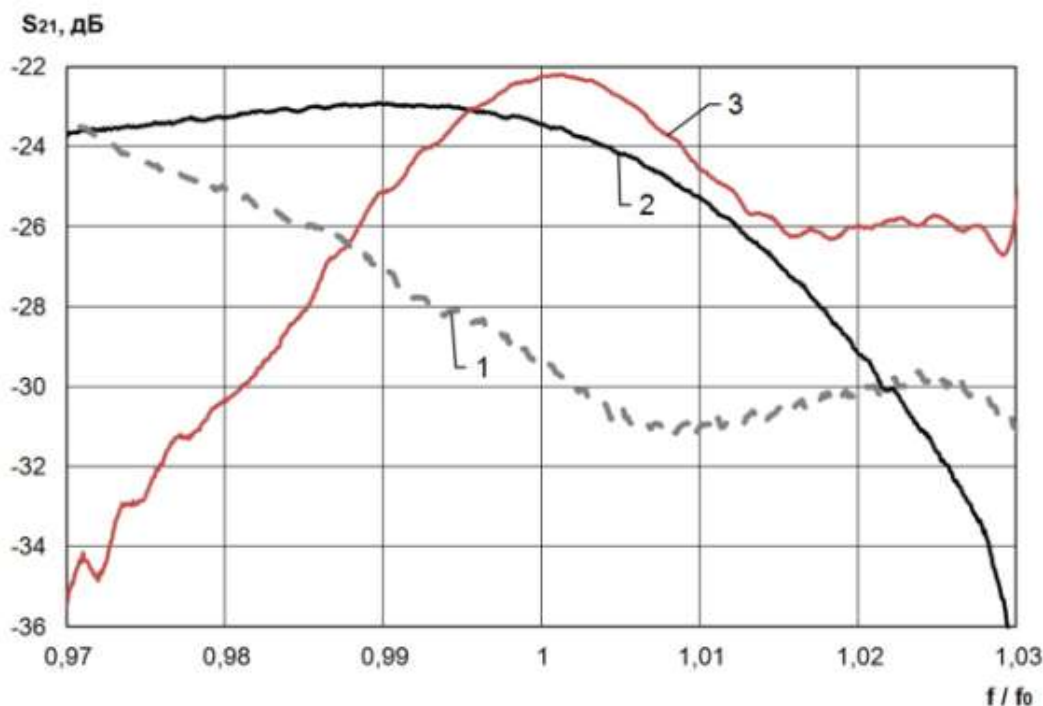


Рис. 6. Частотные зависимости развязки передающего и одного из приемных каналов облучателя

Неконтролируемое и неустранимое после проведения пайки затекание припоя в каналы волноводного тракта облучателя приводит к изменению геометрии внутреннего сечения волноводов и волноводных узлов. Это является причиной рассогласования соответствующих волноводных каналов и нарушения работы селекторов поляризации, от качества которых во многом зависит развязка каналов облучателя. Изменение характеристик облучателя при неудачно проведенной пайке стыков деталей отражено на рис. 7 и рис. 8.

Влияние деформации внутреннего сечения волноводов, вызванной затеканием припоя в процессе пайки, отразилось в увеличении КСВН на одном из приемных выходов и в ухудшении развязки передающего и приемного каналов. Наблюдается существенное повышение КСВН от максимального значения 1,35 до применения герметизации до значения 1,6 на верхней частоте полосы $\pm 2\%$ и от максимального значения 1,42 до применения герметизации до значения 1,82 на верхней частоте полосы $\pm 3\%$ соответственно. Ухудшение развязки каналов вблизи центральной частоты рабочего диапазона составляет порядка 7 дБ, что на 3 дБ больше по сравнению с качественно пропаянными каналами.

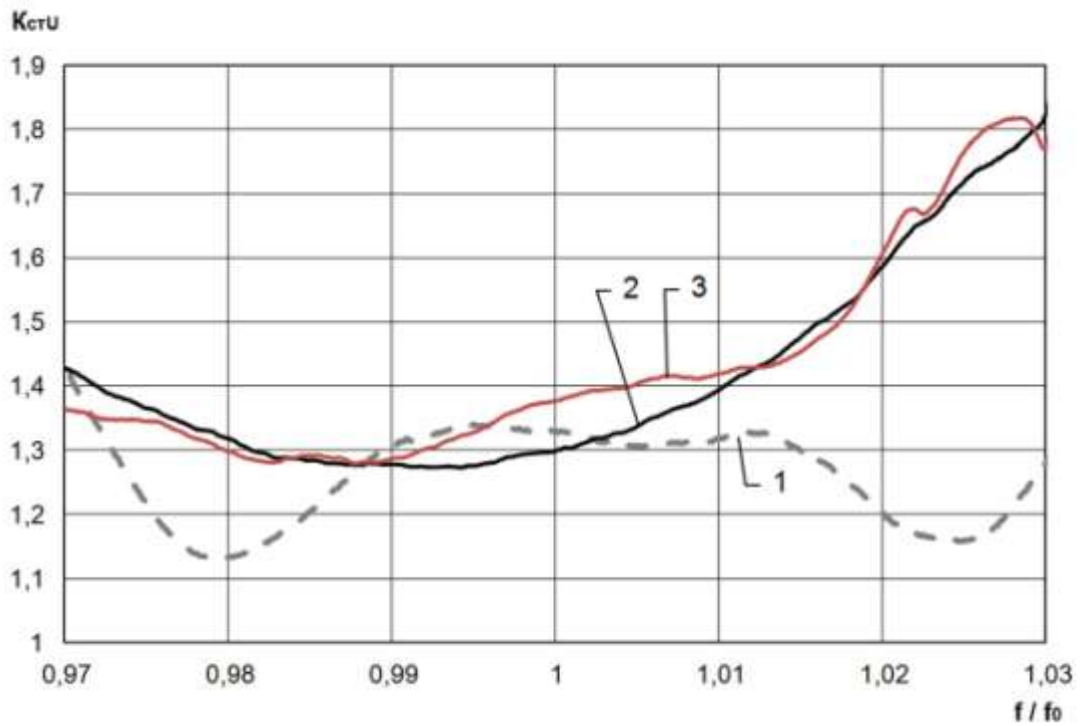


Рис. 7. Изменение характеристик КСВН на выходе одного из приемных каналов при некачественной пропайке стыков

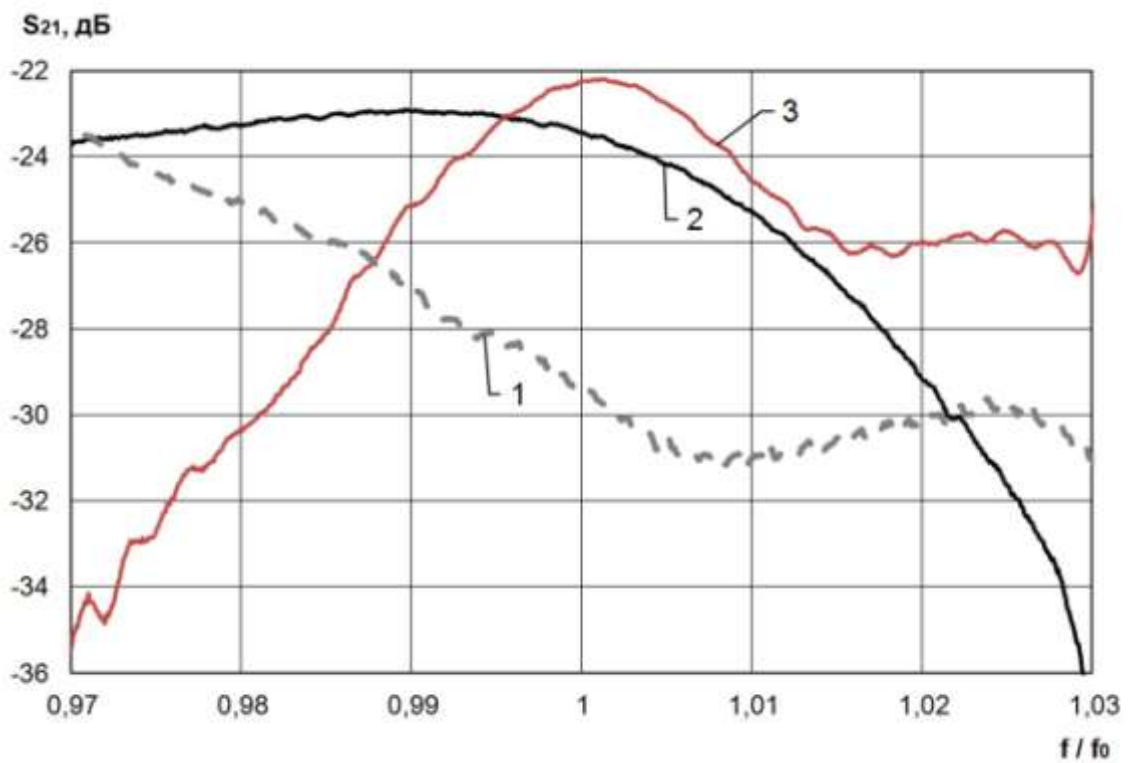


Рис. 8. Изменение характеристик развязки передающего и одного из приемных каналов облучателя при некачественной пропайке стыков

Заключение

Проведенные исследования показали, что применение описанных выше способов герметизации многорупорного облучателя позволяет сохранить высокие значения развязки каналов и приемлемое согласование его входов. Экспериментально установлено, что для четырехрупорного облучателя Ка-диапазона частот ухудшение развязки передающего и приемных каналов может составлять не более 3 дБ в пределах полосы рабочих частот $\pm 3\%$ при увеличении максимальных значений КСВН на его входе и выходах от 1,3 до 1,4.

Список литературы

1. Справочник по радиолокации: В 2 кн. / Под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. Кн. 1. М.: Техносфера, 2015. 671 с. [Radar handbook / Ed. by M.I. Skolnik. 3rd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 2008.].
2. Русов Ю.С., Голубцов М.Е., Крючков И.В., Овечкин В.С. Моноимпульсный облучатель для системы с цифровым формированием приемных диаграмм направленности // 21-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: КрыМиКо'2011 (Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.): Материалы. Т. 2. Севастополь: Вебер, 2011. С. 531-532.
3. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учебное пособие для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2012. 741 с.
4. Крехтунов В.М., Тайков А.В., Долбнев А.В. Моноимпульсный облучатель двухзеркальной антенны КВЧ диапазона // 11-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: КрыМиКо'2001 (Севастополь, 10-14 сентября 2001 г.): Материалы. Севастополь: Вебер, 2001. С. 354-355.
5. Сигитов В.В., Белугин Б.С., Кузнецов Ю.Н., Манаенков Е.В., Найок М.С., Степанов А.Л., Толстых В.Т., Хомяков А.В. Моноимпульсный облучатель: пат. 59330 Российская Федерация. 2006. Бюл. № 34. 6 с.
6. Манаенков Е.В., Иванов А.В., Семенов М.Е. Моноимпульсная система: пат. 2393598 Российская Федерация. 2010. Бюл. № 18. 6 с.
7. Русов Ю.С., Голубцов М.Е., Литун В.И. Моноимпульсные облучатели для возбуждения двухзеркальных антенн // Радиотехника. 2013. № 11. С.113-117.
8. Образумов В.И., Крехтунов В.М., Шевцов О.Ю., Русов Ю.С., Голубцов М.Е. Моноимпульсная антенна: пат. 2370863 Российская Федерация. 2009. Бюл. № 29. 16 с.
9. Виниченко Ю.П., Запорожец А.И., Леманский А.А., Сорокин В.И., Туманская А.Е. Облучатель зеркальных и линзовых антенн и устройство для его герметизации: пат. 2260884 Российская Федерация. 2005. Бюл. № 26. 12 с.
10. Зайченко И.И., Пелихов В.Г. Уплотнительная прокладка: пат. 82804 Российская Федерация. 2009. Бюл. № 13.

11. Седаков А.Ю., Зефирова В.Л., Захарычев Е.А. Способ герметизации волноводных СВЧ-устройств: пат. 2475901 Российская Федерация. 2013. Бюл. № 5. 5 с.
12. Русов Ю.С., Некрасов Е.Г. Облучатель двухзеркальной антенны миллиметрового диапазона волн для системы с четырехканальным приемом // 24-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: КрыМиКо' 2014 (Севастополь, Украина, 7-13 сентября 2014 г.): Материалы. Т. 1. Севастополь: Вебер, 2014. С. 537-538.

Investigating an Hermetic Sealing Effect of the Multi-horn Receiving-Transmitting Irradiator on Its Characteristics

Yu.S. Rusov^{1,*}

[*rusov.yu.s@gmail.com](mailto:rusov.yu.s@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: four-horn irradiator; mono-pulse irradiator; irradiator channels decoupling; hermetic sealing

One embodiment of a multi-horn waveguide irradiator is a structure consisting of flat interconnected plates having a metallized surface or made entirely of metal with high electrical conductivity. Important characteristics of the receiving-transmitting irradiator are the voltage standing wave ratio at its input and output, as well as the decoupling of the transmitting and receiving channels. When using the antenna system in difficult climatic conditions, it is necessary to ensure the tightness of the irradiator. To do this, it is necessary to eliminate the possibility of moisture penetration inside the waveguide channels through the open apertures of the horn radiators and through the joints of the parts. Sealing of the irradiator horns can be performed by closing their apertures with a film of radiolucent material. To reduce the effect of such a shelter, the thickness of the film should be minimal and be chosen sufficient to provide mechanical strength. When using a multi-horn irradiator in a transceiver system operating on waves with circular polarization of an electromagnetic field, using a mutual polarizer and a polarization selector in the channel of each horn can provide decoupling of the transmission and reception paths of the irradiator. The introduction of a sealing film into the aperture of the irradiator increases the reflection of electromagnetic waves in its radiators, which causes deterioration in the decoupling of the transmitting and receiving channels of the irradiator. A possible option to ensure the tightness of joints of metal parts of the irradiator design is their soldering. A significant disadvantage of this sealing method is the possibility for the solder to flow into the internal waveguide channels of the irradiator. This can cause an increasing reflection of the electromagnetic waves in the paths of the irradiator and a deterioration of the decoupling of the transmitting and receiving channels. The sealed methods considered were tested on a waveguide four-horn irradiator of the Ka-band of frequencies. The research has shown that the application of the described methods of sealing the multi-horn irradiator allows maintaining high values of the channel decoupling and acceptable matching of its inputs.

References

1. *Radar handbook* / Ed. by M.I. Skolnik. 3rd ed. N.Y.: McGraw-Hill, 2008. (Russ. ed.: *Spravochnik po radiolokatsii*. Book 1. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2015. 672 p.).
2. Rusov Yu.S., Golubtsov M.E., Kryuchkov I.V., Ovechkin V.S. Monoimpul'snyj obluchatel' dlia sistemy s tsifrovym formirovaniem priemnykh diagram napravlenosti [Monopulse irradiator for a system with digital generation of receiving radiation patterns]. *21-ia Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiia «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii»: KryMiKo '2011* (Sevastopol, Ukraine, September 12-16, 2011): Materialy. T. 2. [21st Intern. Crimean conf. "Microwave engineering and telecommunication technologies": CriMiCo' 2011]: Proc. Vol. 2. Sevastopol: Veber Publ., 2011. Pp. 531-532 (in Russian).
3. *Ustrojstva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok*: [Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays]: a textbook / Ed. by D.I. Voskresenskij. 4th ed. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2012. 741 p. (in Russian).
4. Krekhtunov V.M., Tajkov A.V., Dolbnev A.V. Monoimpul'snyj obluchatel' dvukhzeral'noj anteny KVCH diapazona [Mono-impulse irradiator of a two-mirror antenna of EHF range]. *11-ia Mezhdunarodnaya Krymskaia konferentsiia «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii»: CriMiCo '2001* (Sevastopol, Ukraine, September 10-14, 2001): Materialy [11th Intern. conf. "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies": CriMiCo'2001]: Proc. Sevastopol: Veber, 2001. Pp. 354-355 (in Russian).
5. Sigitov V.V., Belugin B.S., Kuznetsov Yu.N., Manaenkov E.V., Najok M.S., Stepanov A.L., Tolstykh V.T., Khomiakov A.V. *Monoimpul'snyj obluchatel'* [Monopulse irradiator]. Patent RF, no. 59330. 2006.
6. Manaenkov E.V., Ivanov A.V., Semenov M.E. *Monoimpul'snaya sistema* [Monopulse system]. Patent RF, no. 2393598. 2010.
7. Rusov Yu.S., Golubtsov M.E., Litun V.I. Monopulse feeds for dual reflector antenna excitation. *Radiotekhnika* [Radiotechnics], 2013, no. 11, pp.113-117 (in Russian).
8. Obrazumov V.I., Krekhtunov V.M., Shevtsov O.Yu., Rusov Yu.S., Golubtsov M.E. *Monoimpul'snaya antenna* [Monopulse antenna]. Patent RF, no. 2370863. 2009.
9. Vinichenko Yu.P., Zaporozhets A.I., Lemanskij A.A., Sorokin V.I., Tumanskaia A.E. *Obluchatel' zerkal'nykh i linzovykh antenn i ustroistvo dlia ego germetizatsii* [Mirror and lens antenna irradiator and device for its sealing]. Patent RF, no. 2260884. 2005.
10. Zajchenko I.I., Pelikhov V.G. *Uplotnitel'naia prokladka* [Sealing pad]. Patent RF, no. 82804. 2009.
11. Sedakov A.Yu., Zefirov V.L., Zakharychev E.A. *Sposob germetizatsii volnovodnykh SVCh-ustroistv* [The method of sealing waveguide microwave devices]. Patent RF, no. 2475901. 2013.
12. Rusov Yu.S., Nekrasov E.G. Obluchatel' dvukhzeral'noj anteny millimetrovogo diapazona voln dlia sistemy s chetyrekhkanal'nym priemom [The irradiator of a two-mirror millimeter-wave antenna for a system with four-channel reception]. *24-ia Mezhdunarodnaya Krymskaya*

konferentsiia «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii»: KryMiKo'2014 (Sevastopol, Ukraine, September 7-13, 2014): Materialy. T. 1. [24th Intern. Crimean conf. "Microwave Engineering and Telecommunication Technology": CriMiCo'2014]: Proc. Vol. 1. Sevastopol: Veber Publ., 2014. Pp. 537-538 (in Russian).