

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ В СОСТАВЕ К.В.Ч.-РАДИОМЕТРА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© 2021 г. Е. Ю. Гайнулина^а, Н. С. Корнев^а, К. В. Минеев^{а,*},
А. В. Назаров^а, Ю. И. Орехов^а

^а Филиал ФГУП “Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики”
“НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова”
Россия, 603137, Нижний Новгород, ул. Троицына, 47

*e-mail: mineevkv@gmail.com

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 04.06.2020 г.

Исследуется возможность применения сверхразмерных прямоугольных металлических волноводов в составе линии передачи к.в.ч.-радиометра, предназначенного для исследования быстротекущих газодинамических процессов. Приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных исследований гибкого волновода для связи металлических волноводов стандартного и сверхразмерного сечений, построенного на основе диэлектрического волновода. Проводится количественная оценка затухания сигнала в линии передачи, являющейся комбинацией гибкого волновода и сверхразмерного металлического волновода.

DOI: 10.31857/S0032816220060063

ВВЕДЕНИЕ

Специфика измерений тепловых характеристик детонационного фронта, распространяющегося внутри конденсированного взрывчатого вещества, требует размещения приемника к.в.ч.-радиометра [1] на безопасном расстоянии от объекта измерений, а антенны – в непосредственной близости к нему. Широко применяемые в таких экспериментах фторопластовые диэлектрические волноводы (д.в.) сечением 2.2×1 мм² имеют в трехмиллиметровом диапазоне длин волн погонные потери около 2.5 дБ/м, что ограничивает длину волновода в составе к.в.ч.-радиометра величиной не более 2 м (при такой длине обеспечивается флуктуационная чувствительность радиометра не более 300 К при времени накопления 1 мкс).

Дальнейшее увеличение длины д.в. приводит к пропорциональному ухудшению флуктуационной чувствительности. Для повышения точности измерения при максимальном удалении приемного блока радиометра от исследуемого образца взрывчатого вещества необходимо применять линии передачи (л.п.) с меньшими погонными потерями. При этом условия взрывного газодинамического эксперимента накладывают дополнительные ограничения на выбор л.п. для использования в составе к.в.ч.-радиометра:

– л.п. должна позволять размещать измерительную аппаратуру за взрывозащитной плитой вне прямой видимости от эпицентра взрыва;

– уничтожаемый участок л.п. должен иметь низкую стоимость.

На сегодняшний день известны планарные ленточные диэлектрические волноводы [2], квазиоптические лучевые зеркальные и линзовые волноводы (лучеводы Губо) и подобные им направляющие структуры [3, 4], имеющие в миллиметровом диапазоне длин волн погонные потери <0.1 дБ/м. Однако данные л.п. обладают существенными недостатками: ленточные диэлектрические волноводы не допускают изгибов, касаний и неоднородностей диэлектрического полотна, квазиоптические лучевые зеркальные и линзовые волноводы требуют прецизионной юстировки. Поэтому применение перечисленных л.п. в экспериментах вне лабораторных условий крайне затруднено.

Другим известным классом л.п. с малыми потерями в к.в.ч.-диапазоне являются сверхразмерные металлические волноводы (с.р.м.в.), которые обеспечивают погонные потери на порядок меньше, чем в аналогичных одномодовых металлических волноводах [5].

При проектировании л.п. на с.р.м.в. необходимо учитывать возможный многомодовый режим

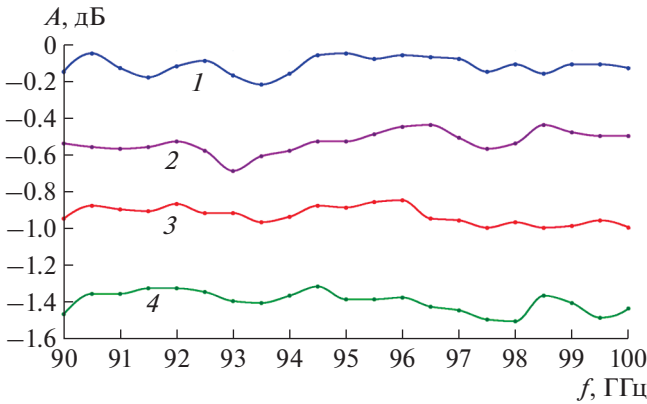


Рис. 1. Ослабление волноводных сборок. 1 — волноводные переходы (2 шт.), 2 — волноводные переходы и волновод длиной 0.5 м, 3 — волноводные переходы и два волновода длиной 0.5 м каждый, 4 — волноводные переходы и три волновода длиной 0.5 м каждый.

распространения волн. Число возможных типов волн пропорционально S/λ^2 , где S — площадь поперечного сечения волновода, λ — длина волны. По этой причине в л.п. на с.р.м.в. недопустимы резкие нерегулярности.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГОННЫХ ПОТЕРЬ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ СВЕРХРАЗМЕРНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Проведем расчет и численное моделирование в пакете CST MWS погонных потерь β для основной волны H_{10} в прямоугольном волноводе стандартного сечения 3.4×7.2 мм², являющегося сверхразмерным на длине волны $\lambda = 3.2$ мм. Расчет будем выполнять по формуле [5]:

$$\beta, \text{ дБ/м} = \frac{0.56 (b/a) + 2\xi^2}{\sigma^{1/2} b^{3/2} \sqrt{\xi - \xi^3}}, \quad (1)$$

где a и b — размеры узкой и широкой стенок волновода, σ — удельная проводимость материала стенок волновода,

$$\xi = \lambda/\lambda_{\text{кр}}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{кр}}$ — критическая длина волны для прямоугольного волновода размером $a \times b$, определяемая формулой

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}}, \quad (3)$$

где m и n — индексы, определяемые числом полуволн, укладываемых вдоль узкой и широкой стенок волновода.

Внутренние стенки волновода будем считать покрытыми серебром с удельной проводимостью

$\sigma_{\text{Ag}} = 4.75 \cdot 10^7$ См/м, толщина покрытия — значительно больше толщины скин-слоя. Согласно формуле (1), погонные потери в таком волноводе составят 0.64 дБ/м.

Для подтверждения полученных результатов расчета в пакете CST MWS было проведено численное моделирование такого волновода. Модель представляла собой регулярный участок прямоугольного волновода сечением 3.4×7.2 мм², выполненный из серебра. Возбуждение проводилось в одномодовом режиме. Согласно результатам моделирования значение погонных потерь на рабочей длине волны $\lambda = 3.2$ мм составило 0.76 дБ/м, что близко к значению, полученному по формуле (1).

Для экспериментального измерения погонных потерь были изготовлены отрезки длиной 0.5 м из латунной трубы $7.2 \times 3.4 \times 0.5$ мм. Для их возбуждения были изготовлены плавные пирамидальные рупорные переходы с сечения 1.2×2.4 на 3.4×7.2 мм² длиной 30 мм ($\sim 10 \lambda$). Для увеличения проводимости стенок волновод и пирамидальные переходы были покрыты слоем серебра.

Потери измерялись на панорамном измерителе к.с.в.н. и ослаблений в диапазоне частот от 90 до 100 ГГц. Результаты измерения ослабления в 4-х вариантах волноводных сборок представлены на рис. 1. К.с.в.н. во всех случаях не превышал 1.14.

Как видно из рис. 1, среднее значение потерь в переходах составляет 0.1 дБ. При увеличении длины сборки на 0.5 м потери в ней увеличиваются на 0.35–0.45 дБ. Вычитая ослабление на переходах (кривая 1) из ослабления в волноводной сборке, содержащей 1 м волновода (кривая 3), получим значения погонного затухания в волноводе, показанные на рис. 2 точками, где для каждой точки отмечен коридор погрешностей панорамного измерителя. В этих же осях изображены теоретическая зависимость погонного затухания, рассчитанная по формуле (1), и результаты моделирования в пакете CST MWS.

Как видно из рис. 2, среднее значение погонных потерь в изготовленных прямоугольных волноводах сечением 3.4×7.2 мм² в рабочей полосе частот к.в.ч.-радиометра составляет 0.8 дБ/м, что близко к результатам моделирования (0.76 дБ/м) и к теоретическому значению (0.64 дБ/м). На основании проведенного анализа можно утверждать, что экспериментальное значение погонных потерь хорошо согласуется с результатами моделирования и теоретическим расчетом. Различие объясняется ограниченной точностью численной модели при моделировании, инструментальной погрешностью панорамного измерителя и неучтенными потерями на различных неоднородностях, имеющих место в реальном волноводе. В частности, в [6] отмечено, что на высоких частотах определяющим фактором, влияющим на характеристики волновода, становится не

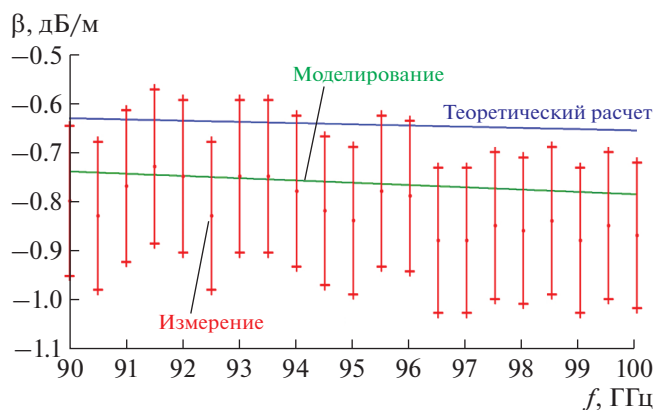


Рис. 2. Погонные потери в с.р.м.в. сечением $3.4 \times 7.2 \text{ мм}^2$.

столько удельная проводимость материала экрана, сколько качество обработки (шероховатость) экранирующих поверхностей.

Использование рассмотренных волноводов дает возможность отнести приемный блок к.в.ч.-радиометра на расстояние до 9 м от места взрыва при сохранении флуктуационной чувствительности на уровне, сопоставимом с тем, который обеспечивается при применении д.в. длиной не более 2 м.

Однако данное решение имеет ряд недостатков. Сверхразмерные волноводы не допускают изгибов, поэтому к.в.ч.-радиометр придется размещать в прямой видимости от эпицентра взрыва на прямолинейном участке, что потребует дополнительных мероприятий по его защите от воздействия прямой ударной волны. Другим недостатком является сравнительно высокая стоимость металлического волновода (особенно с серебряным покрытием). Поэтому использование с.р.м.в. целесообразно в лабораторных условиях, а в условиях газодинамического эксперимента оправдано лишь в исключительных случаях.

Очевидным решением, позволяющим обеспечить безопасность и сохранность измерительной аппаратуры или провести измерения при расположении объекта исследований в труднодоступных местах, является использование гибких одномодовых диэлектрических волноводов совместно с сверхразмерными металлическими. Участок, где необходимо выполнить волноводный изгиб, выполняется из д.в., а регулярный участок — из прямоугольного с.р.м.в.

ГИБКИЙ ВОЛНОВОД ДЛЯ СВЯЗИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ СТАНДАРТНОГО И СВЕРХРАЗМЕРНОГО СЕЧЕНИЙ

На рис. 3 представлен вариант реализации гибкого волновода для связи металлических вол-

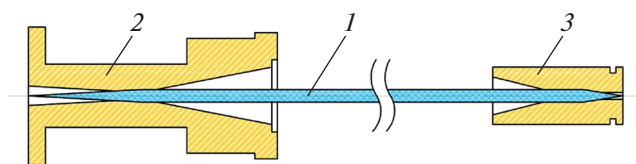


Рис. 3. Устройство гибкого волновода. 1 — диэлектрический волновод; 2, 3 — волноводные переходы к металлическим волноводам сверхразмерного (2) и стандартного (3) сечений.

новодов стандартного и сверхразмерного сечений, состоящего из д.в. 1, обеспечивающего возможность реализации радиальных изгибов, и волноводных переходов 2 и 3 к металлическим волноводам сверхразмерного и стандартного сечений соответственно.

Площадь сверхразмерного сечения на выходе волноводного перехода 2 должна определяться из соотношения:

$$S/\lambda^2 = 2-8, \tag{4}$$

где λ — рабочая длина волны. При этом длина расширяющегося участка волноводного канала должна быть не менее 6λ .

При такой конструкции волноводного перехода 2 обеспечивается минимальное преобразование основной волны H_{10} прямоугольного металлического волновода в высшие типы волн благодаря концентрации электромагнитного поля основной волны внутри клинообразного участка д.в. и ее эффективное преобразование в основную волну HE_{11} д.в. Аналогичным образом, при распространении волны HE_{11} по д.в. происходит ее обратное преобразование в волну H_{10} прямоугольного металлического волновода в волноводном переходе 3.

Для количественной оценки величины ослабления и качества согласования д.в. сечением $2.2 \times 1.0 \text{ мм}^2$ с с.р.м.в. сечением $3.4 \times 7.2 \text{ мм}^2$ на переходе 2 было проведено численное моделирование в CST MWS. Объемная модель представлена на рис. 4, где для ввода-вывода с.в.ч.-мощности имеются порты (1 и 2).

В качестве материала д.в. был задан фторопласт-4 с $\epsilon = 2.2$, $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$, в качестве материала перехода и с.р.м.в. — серебро с удельной проводимостью $\sigma_{Ag} = 4.75 \cdot 10^7 \text{ См/м}$.

Результаты моделирования представлены на рис. 5 и 6.

Из этих рисунков следует, что данный волноводный переход в частотном диапазоне от 90 до 100 ГГц имеет среднее значение к.с.в.н., не превышающее 1.2, и среднее ослабление 0.5 дБ, что определяет возможность использования его в составе гибкого волновода для связи металлических

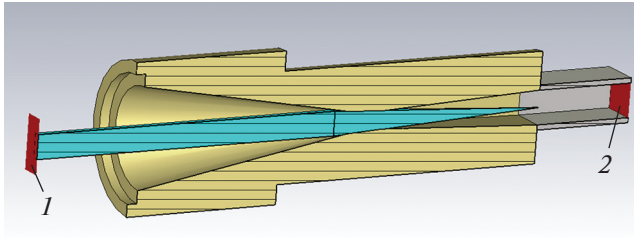


Рис. 4. Модель волноводного перехода с д.в. на с.р.м.в. в CST MWS. 1, 2 – порты ввода-вывода с.в.ч.-мощности.

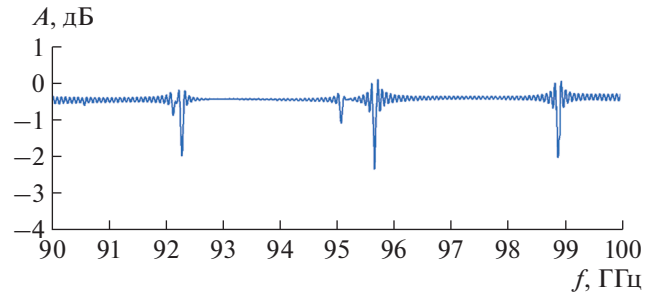


Рис. 6. Ослабление волноводного перехода с д.в. на с.р.м.в.

волноводов стандартного и сверхразмерного сечений.

В соответствии с моделью, представленной на рис. 4, был изготовлен волноводный переход с д.в. на с.р.м.в. (рис. 7). С использованием данного волноводного перехода был изготовлен макет гибкого волновода для связи металлических волноводов стандартного сечения $1.2 \times 2.4 \text{ мм}^2$ и сверхразмерного сечения $3.4 \times 7.2 \text{ мм}^2$ с фторопластовым д.в. сечением $2.2 \times 1.0 \text{ мм}^2$.

Потери в макете гибкого волновода с двумя переходами на металлический измерялись в диапазоне от 90 до 100 ГГц на панорамном измерителе к.с.в.н. и ослабления. Экспериментальные исследования показали, что суммарные потери в гибком волноводе при длине 0.5 м не превышают 1.1 дБ, при этом потери в каждом из волноводных переходов не превышают 0.3 дБ. Следовательно, при применении линии передачи длиной до 7 м, состоящей из двух гибких волноводов длиной 0.5 м каждый и прямоугольного с.р.м.в. сечением $3.4 \times 7.2 \text{ мм}^2$ длиной 6 м, значение флуктуационной чувствительности к.в.ч.-радиометра сохранится на прежнем уровне (при этом радиусы изгибов д.в. должны быть более 20λ).

Гибкий волновод для связи металлических волноводов стандартного и сверхразмерного сечений защищен патентом РФ на изобретение [7].

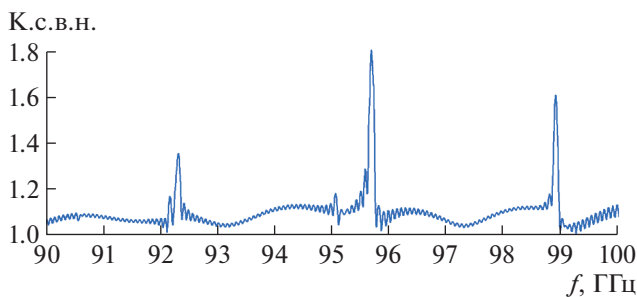


Рис. 5. Коэффициент стоячей волны по напряжению волноводного перехода с д.в. на с.р.м.в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях газодинамического эксперимента благодаря совместному использованию гибких волноводов для связи металлических волноводов стандартного и сверхразмерного сечений и прямоугольных с.р.м.в. возможно построение л.п. длиной до 7 м при сохранении значения флуктуационной чувствительности к.в.ч.-радиометра на том же уровне, что и при использовании фторопластовых д.в. сечением $2.2 \times 1.0 \text{ мм}^2$ длиной 2 м. В случае сокращения длины регулярного участка сверхразмерного волновода флуктуационная чувствительность пропорционально увеличится, следовательно, увеличится точность проводимых радиометрических измерений. Так, например, при построении л.п. общей длиной до 2 м на гибком волноводе совместно с с.р.м.в. флуктуационная чувствительность к.в.ч.-радиометра увеличится в 2 раза по сравнению с л.п. на фторопластовом д.в. аналогичной длины.

Несмотря на возможность выполнения изгибов, недостатком такой л.п. (с точки зрения воздействия прямой ударной волны) по-прежнему остается наличие жесткого регулярного участка, содержащего прямоугольный с.р.м.в. Однако при использовании гибких волноводов возможно организовать защиту с.р.м.в. от воздействия ударной волны, разместив его в защитной трубе, закопанной в грунт, и ограничив тем самым уничто-

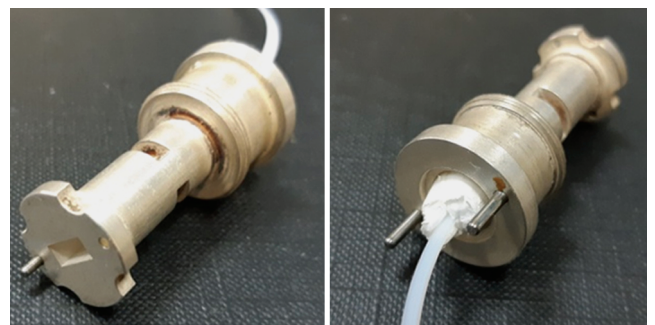


Рис. 7. Волноводный переход с д.в. на с.р.м.в.

жаемый участок только частью заменяемого д.в. из состава гибкого волновода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ботов Е.В., Иконников В.Н., Канаков В.А., Корнев Н.С., Макарычев Н.А., Минеев К.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Седов А.А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61. № 5. С. 432.
<https://doi.org/10.1007/s11141-018-9899-y>
2. *Yeh C., Shimabukuro F.* The Essence of Dielectric Waveguides. Springer, 2008. P. 350.
3. *Костенко А.А.* // Радиофизика и радиоастрономия. 2000. № 3. С. 221.
4. *Князьков Л.Б., Руженцев Н.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. № 20. С. 59.
5. *Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Камышан В.В., Кузьмичев В.М., Макаренко Б.И., Соколов А.В., Шейко В.П.* Техника субмиллиметровых волн. М.: Сов. радио, 1969. С. 250.
6. *Бирюков В.В., Минеев К.В., Назаров А.В.* // XIV Международная научно-техническая конференция “Физика и технические приложения волновых процессов”: Материалы конференции. Самара, 2016. С. 143.
7. *Гайнулина Е.Ю., Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Орехов Ю.И., Светлаков Ю.А.* Патент на изобретение № 2657318 РФ. МПК H01P 5/08 // Опул. 13.06.2018. Бюл. № 17.