

В этом эксперименте также получено хорошее совпадение значений яркостной температуры. Кроме того, совместное использование двух регистраторов с перекрывающимися диапазонами измерений позволило избежать потери информации в эксперименте.

Таким образом, термовизионный метод позволяет получить картину температурных полей, формирующихся при подрыве плоского образца ВВ и измерить яркостную температуру в любой точке в интересующий момент времени.

Термовизионный метод обеспечивает высокую информативность регистрации нестационарных тепловых полей, достоверность и надёжность получения данных.

Список литературы

1. Спектральная яркость ударных волн в воздухе. Модель И. Ш., ЖЭТФ, 1957, т. 32, вып.4, с.714.
2. Спектральная яркость ударных волн. Зельдович Я. Б., Кормер С. Б., Сеницын М. В., Куряпин А. И., ДАН СССР, 1958, т. 46, с.122.
3. Спектральная яркость ударных волн в воздухе. Попов Е. Г., Цикулин М. А., ЖЭТФ, 1969, т. 56, вып. 2, с. 522.
4. С.И.Герасимов, Ю.И.Файков, С.А.Холин. Кумулятивные источники света. Монография. Саров, ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
5. О.Н. Дулин, В.М. Кузин, В.Н., Туркин, А.Е.Захаров, Ю.П.Казачков, В.Р.Скегин, Приборный комплекс СКПФ254 цифровой фотохронографической регистрации быстропротекающих процессов. Приборы и техника эксперимента, 2015, №4, с.144-146.
6. Digital streak camera with rotating mirror. United States Patent No. US 9,020,336 B1, date of patent apr.28, 2015
7. Способ бесконтактного измерения яркостной температуры теплового поля исследуемого объекта. Ю.Б.Базаров, С.А.Лобастов, В.А.Цыганов. Патент на полезную модель № 2552599 от 24.02.2014г.

ВОЛНОВОДНЫЙ ТРАКТ СО СВЕРХМАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТОВ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ

Е.Ю. Гайнулина¹, К.В. Минеев¹, Ю.И. Орехов¹, А.А. Седов², А.А. Шалыгин², Е.С. Митин²

¹ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова, Нижний Новгород, Россия,

²РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Радиоинтерферометры (РИ) мм диапазона длин волн нашли широкое применение в диагностике быстропротекающих процессов [1].

Специфика газодинамических экспериментов требует размещения приемо-передатчика РИ на безопасном расстоянии от объекта и, в то же время, размещения антенны (излучателя) в непосредственной близости от объекта для его зондирования и приема отраженного сигнала. Широкое применение в микроволновой диагностике нашли диэлектрические волноводы (ДВ), благодаря гибкости и малой стоимости, что важно в условиях одноразового применения при взрывных опытах [2]. Однако, погонные потери в ДВ величиной (2,5-3) дБ/м ограничивают длину волноводного тракта (не более 10 м) для применяемых РИ. Поэтому уменьшение погонных потерь в волноводных трактах крайне важно для расширения возможностей РИ и принципиально необходимо для повышения чувствительности радиометрического режима РИ при измерении тепловых характеристик быстропротекающих процессов [3].

Действительно, точность измерения параметров движения объекта, например, его перемещения растет при увеличении отношения мощности полезного сигнала к мощности шума на выходе измерительной системы [1]. Уровень шумов в основном определяется аппаратурой и поэтому практически не меняется, тогда как уровень полезного сигнала зависит от потерь мощности в антенном тракте. В частности, при увеличении длины линий передачи погрешность измерений растет.

Таким образом, для снижения погрешности измерений необходимо снижение потерь в линиях передачи на порядок по сравнению с погонными потерями в ДВ. Особенную актуальность эта проблема приобретает при дистанционном измерении температуры при помощи радиометров микроволнового диапазона, а также при использовании для зондирования объектов в радиоинтерферометрии субмиллиметрового диапазона длин волн.

Известны и широко применяются сверхразмерные металлические волноводы (СРМВ) прямоугольного и круглого сечений, которые при соотношении размера сечения D волновода и длины волны λ , равном $D/\lambda=5\dots 20$, обеспечивают погонные потери на порядок меньше, чем в волноводах стандартного сечения [4]. Так, прямоугольный СРМВ с волной H_{10} сечением $22,8 \times 10,2$ мм² обеспечивает на $\lambda=2$ мм потери 0,23 дБ/м, что в 20 раз меньше, чем МВ стандартного сечения. МВ круглого сечения с волной H_{11} диаметром 24 мм обеспечивает на $\lambda=3$ мм погонные потери 0,1 дБ/м [4].

При разработке линии передачи (ЛП) на СРМВ необходимо учитывать возможный многомодовый режим распространения волн. Число возможных типов волн пропорционален соотношению S/λ^2 , где S – площадь сечения волновода.

По этой причине в ЛП на сверхразмерном волноводе недопустимы резкие нерегулярности, а оптимальное возбуждение таких ЛП, в соответствии с принципами квазиоптики, обеспечивается волновым пучком Гаусса-Эрмита с соотношением ширины пучка w (по уровню 0,5) к диаметру D волновода $w/D=0,5\dots 0,6$ [5].

Рассмотрена ЛП на круглом СРМВ с волной H_{11} . В отличие от прямоугольного СРМВ нерегулярности волновода, помимо возбуждения высших типов волн, приводят и к поляризационной неустойчивости волны. По этой причине целесообразно на круглом СРМВ выполнять только прямолинейные участки ЛП, а гибкость ЛП на конечных участках обеспечивать отрезками гибких ДВ.

В качестве основы ЛП выбрана медная труба ДКРНМ 28×2 М1 ГОСТ 617-2006, широко применяемая в промышленности.

В качестве рупорных возбуждателей ЛП разработан конический рупор с углом при вершине 12° и соотношением длины L рупора и λ , равным 40. Это обеспечивает распределение фазы поля в раскрытии рупора, близкое к синфазному.

Кроме того, разработан двухмодовый рупор, в котором, наряду с основной волной H_{11} возбуждается и волна E_{11} . При соотношении их амплитуд 1:0,6 и равенстве фаз на выходе рупора реализуется распределение поля, близкое к гауссову.

Проведено численное моделирование и разработка ЛП на круглом волноводе, выполненном на указанном выше типоразмере медной трубы, с соотношением $D/\lambda=8$.

При использовании разработанных рупорных возбуждателей расчетные частотные зависимости коэффициента передачи имеют осциллирующий характер и изменяются в пределах 0,05...0,5 дБ/м в частотной полосе шириной 5 ГГц (при $\lambda_{ср}=3$ мм). Причем изменением длины секции ЛП в пределах $\pm\lambda$ можно обеспечить потери не хуже 0,2 дБ/м в требуемой полосе частот 2 ГГц или не хуже 0,3 дБ/м в полосе 3 ГГц.

Осциллирующий характер частотной зависимости потерь в сверхразмерном волноводе объясняется неидеальным возбуждением ЛП разработанными рупорами и отсутствием свойства самофильтрации возбуждаемых высших типов волн, ответственных за осцилляции коэффициента передачи. Экспериментальные результаты близки к расчетным. Так, на длине ЛП, равной 2,5 м,

получены погонные потери 0,5...0,65 дБ/м в требуемой для работы радиоинтерферометров полосе частот.

Дальнейшее уменьшение погонных потерь, как показали результаты моделирования, связано с применением рассмотренного СРМВ круглого сечения с диэлектрической пленкой толщиной 0,2 мм на внутренней поверхности трубы. Пленка может быть выполнена из материалов с параметрами $\varepsilon=2,1...2,5$, $\text{tg } \delta=10^{-4}$.

Такой металло-диэлектрический волновод (МДВ) относится к классу «полый диэлектрический канал» [5]. Парциальные плоские волны возбуждаемого в волноводе волнового пучка (волны Бриллюэна) в отличие от высших типов волн падают на внутреннюю диэлектрическую границу под малыми углами скольжения и эффективно отражаются от нее, создавая волну НЕ₁₁. За счет этого омические потери в МДВ существенно ниже, чем в аналогичном волноводе без пленки, и обеспечивается самофильтрация высших типов волн.

При возбуждении такого МДВ волновым пучком Гаусса-Эрмита основного типа потери в МДВ диаметром 40 мм на $\lambda=2$ мм при толщине диэлектрической пленки 0,2 мм составляют 4 дБ/км [5].

Моделирование ЛП на основе МДВ, содержащем сверхразмерную металлическую трубу с диэлектрической пленкой толщиной 0,2 мм на внутренней поверхности, с использованием разработанных рупорных переходов, показало существенно лучшую частотную равномерность потерь, которые колеблются в пределах 0,1...0,2 дБ/м.

Таким образом, разработанная ЛП на основе сверхразмерного металлического волновода обеспечивает погонные потери около 0,5 дБ/м. Применение такой ЛП в типовых радиоинтерферометрических опытах с длиной ЛП, равной 10 м, обеспечивает выигрыш 50 дБ в ослаблении сигнала при прямом и обратном прохождении по сравнению с ДВ (3 дБ/м), что существенно влияет на точность измерения перемещения газодинамического процесса.

Применение такой ЛП в радиометрической схеме измерения яркостной температуры при использовании ЛП длиной 2 м обеспечивает увеличение точности измерений до 50 К, вместо 250 К-280 К при применении ДВ.

Разработка технологии нанесения пленки на внутреннюю поверхность ЛП позволит еще более снизить погонные потери до 0,1...0,2 дБ/м, что в целом приведет к качественно новому уровню микроволновой диагностики газодинамических процессов.

Список литературы

1. А.Л. Михайлов, С.В. Катин, Н.И. Дмитриев, и др. Состояние и перспектива развития микроволновой радиоинтерферометрии для диагностики газодинамических процессов // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сборник тезисов докладов Междунар. конфер. «XV Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 2013, с.353-354.
2. А.Г. Панкратов, С.С. Чуркин Зондирующие устройства микроволновой РИ на диэлектрических волноводах для исследования объектов на значительных расстояниях // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сборник тезисов докладов Междунар. конфер. «XV Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 2013, с.360.
3. Е.Н. Богданов, В.Н. Иконников, В.А. Канаков, и др. Реализация радиометрического канала в КВЧ интерферометре для диагностики быстропротекающих газодинамических процессов // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сборник тезисов докладов Междунар. конфер. «XVII Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 2013.
4. А.А. Костенко. Квазиоптика: исторические предпосылки и современные тенденции развития // Радиофизика и радиоастрономия, 2000, т.5, №3, стр.221-246.
5. Ю.Н. Казанцев. Круглые волноводы класса «полый диэлектрический канал» // Радиотехника и электроника, 1984, вып. 8, стр. 1441-1450.