

Измерение импульсных механических деформаций методами микроволновой радиоинтерферометрии

В.В. Баландин¹, Вл.Вл. Баландин¹, А.В. Водопьянов^{1,2}, Д.А. Мансфельд², К.В. Минеев^{1,2},
В.В. Пархачёв¹, Р.М. Розенталь^{1,2}

¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Аннотация: В докладе представлены результаты измерений амплитуды поперечных деформаций металлического стержня, вызванных ударной нагрузкой, полученные методами микроволновой радиоинтерферометрии. В измерениях использовались два миллиметровых радиоинтерферометра: с преобразованием высокой частоты в промежуточную и без преобразования частоты с прямой регистрацией уровня сигнала миллиметрового диапазона высокоскоростным цифровым осциллографом. Выявлено хорошее согласование результатов, демонстрирующих потенциальную возможность измерения отклонений поверхности на временах порядка 1 мкс с микронной точностью.

Ключевые слова: деформация, быстропротекающий процесс, радиоинтерферометр, микроволновое излучение, миллиметровый диапазон.

1. Введение

В настоящее время радиоинтерферометры миллиметрового диапазона длин волн широко используются в диагностике ударно-волновых и детонационных процессов [1-4], для изучения ударного взаимодействия тел с преградами [5], измерения динамического коэффициента Пуассона материалов [6], исследования характеристик плазмы ударно-сжатых газов [7, 8], измерения скорости горения материалов [9, 10].

Традиционно приемное устройство микроволнового радиоинтерферометра реализуется по схеме с супергетеродинным (реже с гомодинным) преобразованием и последующей двухканальной квадратурной демодуляцией выходных интерференционных сигналов. При этом часто передатчик и гетеродин выполняются на основе сантиметровых синтезаторов и умножителей на гармониках высокой кратности, преобразующих частоту сантиметрового диапазона вверх в миллиметровый диапазон с ее последующим усилением. Промежуточная частота (ПЧ), как правило, выбирается в пределах нескольких гигагерц, что позволяет осуществлять регистрацию сигналов ПЧ на относительно недорогих цифровых осциллографах с соответствующей полосой пропускания, либо реализовать аппаратный квадратурный фазовый детектор и использовать любой простейший осциллограф.

Вместе с тем верхние значения рабочих частот цифровых осциллографов от ведущих мировых производителей к текущему моменту уже позволяют осуществлять прямую регистрацию сигналов в длинноволновой части миллиметрового диапазона (до 110 ГГц), и дальнейшее расширение их диапазона лишь вопрос времени в условиях стремительного развития следующих поколений систем беспроводной связи [11]. Очевидно, что при этом схема радиоинтерферометрических измерений существенно упрощается, фактически включая в себя лишь стабильный генератор высокочастотных колебаний, приемно-передающий волноводный тракт и цифровой осциллограф. Подобные схемы уже используются для измерения параметров плазменных процессов [12, 13].

В данной работе продемонстрировано сравнение двух схем

радиоинтерферометрических измерений: с преобразованием частоты и без преобразования частоты, на примере измерения отклонения поверхности при внешнем ударном воздействии. Эксперимент был проведен в НИИ механики при ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

2. Схема эксперимента

В качестве объекта измерений использовался металлический стержень, нагружаемый импульсной сжимающей нагрузкой – разогнанным металлическим ударником (рисунок 1). После удара по срежню начинал распространяться импульс сжатия, вызывающий как продольную, так и поперечно деформацию. Вследствие продольного сжатия, наблюдалось поперечное расширение. Вблизи стержня располагались антенные системы двух радиоинтерферометров, сигналы с которых использовались для измерения величины поперечной деформации. Бегущая по стержню волна деформации вызывала одинаковое изменение диаметра стержня в обеих точках измерения, но с временной задержкой, пропорциональной расстоянию между антенными системами.

Для измерений с преобразованием частоты использовался радиоинтерферометр РИ-03/3 с рабочей частотой около 94 ГГц, разработанный и изготовленный в НИИИС им. Ю.Е. Седакова (филиал ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», г. Нижний Новгород), в паре с осциллографом Tektronix DPO 7254C с рабочей полосой 2,5 ГГц и частотой дискретизации 20 ГВыб./с для регистрации сигнала ПЧ. Для измерений без преобразования частоты использовался ВЧ генератор Г4-156, работающий в непрерывном режиме на частоте в районе 32,5 ГГц в паре с цифровым осциллографом Keysight DSAZ594A с полосой пропускания 59 ГГц и частотой дискретизации 160 ГВыб./с.

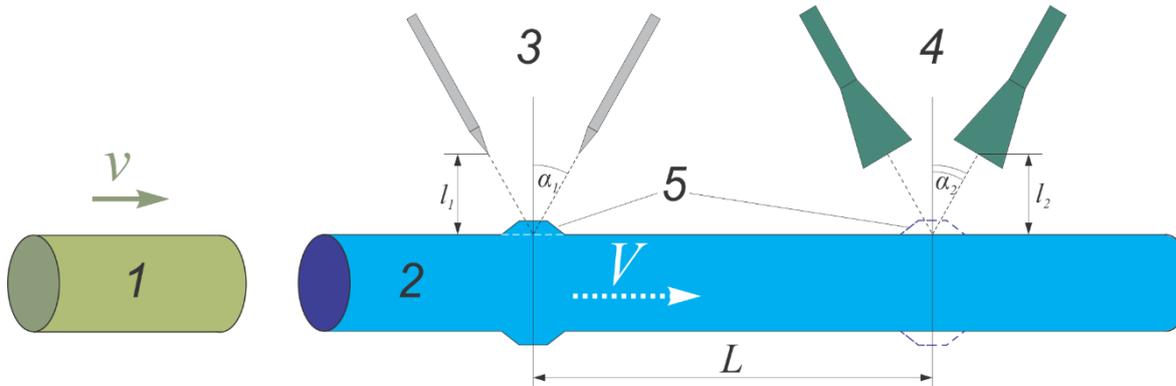


Рисунок 1. Схема эксперимента: 1 – ударник, 2 – металлический стержень, 3,4 – антенные системы интерферометров с преобразование частоты и без преобразования частоты, 5 – волна поперечной деформации.

СВЧ колебания по волноводным трактам поступали на передающие антенны, отражались от поверхности металлического стержня и принимались приемными антеннами. Ближе к месту удара располагалась антенная система интерферометра с преобразованием частоты (3 на рисунке 1), представляющая собой заостренные концы прямоугольного диэлектрического волновода (фторопласт Ф4) сечением $1 \times 2 \text{ мм}^2$, за ней располагались антенны интерферометра без преобразования частоты (4 на рисунке 1), представляющие собой пирамидальные рупоры с апертурой $20 \times 20 \text{ мм}^2$. Все антенны ориентировались в горизонтальной плоскости, проходящей через ось металлического стержня. В такой постановке эксперимента развязка между приемными и передающими каналами радиоинтерферометров в отсутствие отражающей поверхности составляла не менее -30 дБ.

3. Обработка и анализ результатов

Сравнивая текущую фазу опорного и отраженного сигналов можно вычислить величину смещения облучаемой поверхности. Экспериментальный сигнал разбивается по времени на интервалы длительностью 1 мкс, где для каждого n -го интервала оценивается разность фаз отражённого и опорного сигналов φ_n . В результате чего можно оценить смещение отражающей поверхности за время между двумя интервалами Δx_n .

Если антенна установлена под углом α к направлению перемещения, то справедливо следующее соотношение между разностью фаз и перемещением объекта Δx_n :

$$\varphi_n - \varphi_{n-1} = 2k\Delta x_n \cos \alpha, \quad k = 2\pi/\lambda \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения.

Угол α при значительных перемещениях может меняться. В таком случае на каждом шаге вычисления перемещения следует использовать угол, соответствующий текущему положению отражающей поверхности. Для определения смещения боковой поверхности от начального положения производится суммирование полученных величин Δx_n :

$$X = \sum \Delta x_n \quad (2)$$

На рисунке 2 показаны экспериментальные зависимости величины смещения (перемещения) от времени, измеренные с преобразованием частоты (кривая 1) и без преобразования частоты (кривая 2).

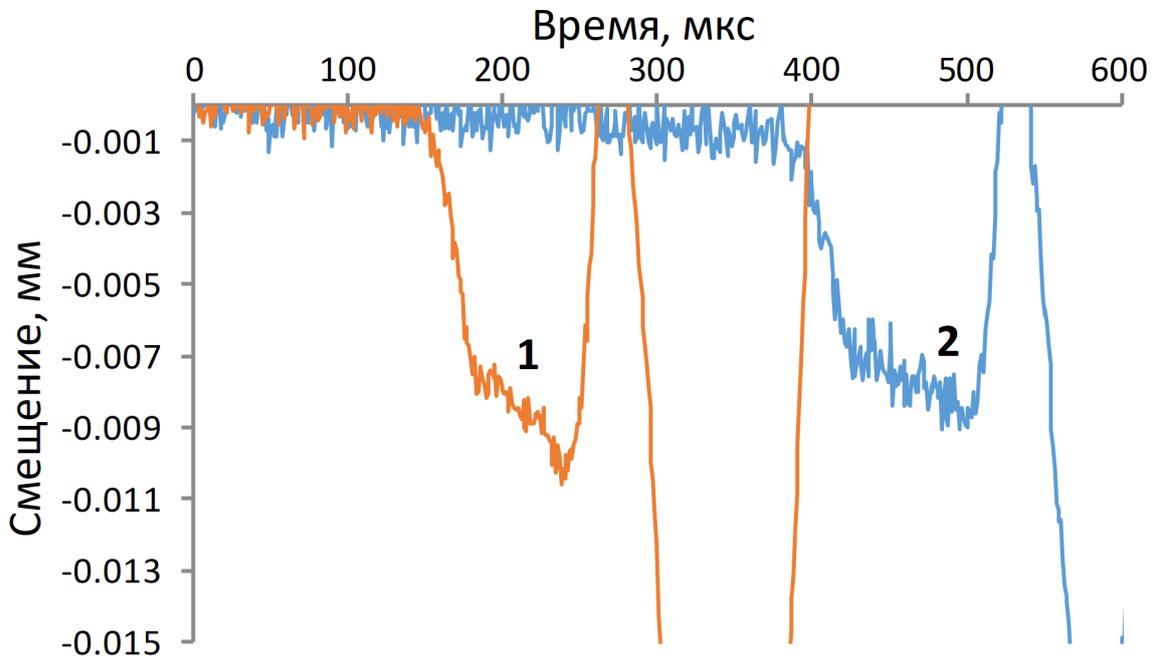


Рисунок 2. Зависимости смещения поверхности стержня от времени: 1 – измерения с преобразованием частоты, 2 – измерения без преобразования частоты.

По величине запаздывания второго сигнала определяется скорость распространения волны продольной деформации вдоль стержня, которая в данном опыте составила величину $V \approx 5000$ м/с, что с хорошей точностью совпадает со скоростью звука в дюралюминии. Из рисунка 2 хорошо видно, что оба интерферометра показывают практически одинаковые зависимости величины смещения от времени.

Разброс значений шумовой составляющей, характеризующей точность измерения, в обоих случаях находится на уровне ± 1 мкм.

4. Заключение

Радиоинтерферометрические методы диагностики с использованием излучения миллиметрового диапазона длин волн имеют ряд преимуществ при исследовании высокоскоростных процессов, наиболее важным из которых является возможность непрерывной регистрации, в том числе в достаточно протяженных оптически непрозрачных средах. Характерные размеры шероховатостей поверхностей ударников и металлических оболочек, отражающих микроволновое излучение, значительно меньше длины волны излучения, поэтому такие поверхности для микроволнового излучения являются гладкими, в то время как для лазерного излучения – диффузно-отражающими.

Возможности современной измерительной техники позволяют использовать более простые схемы построения ВЧ трактов радиоинтерферометров без необходимости осуществления преобразования частоты. При этом не происходит ухудшения точности измерений, а скорее наоборот. Однако, здесь крайне важно иметь стабильный генератор сигналов с низким уровнем фазовых шумов (не хуже -100 дБн при отстройке 20 кГц), и цифровой регистратор, имеющий не только широкую рабочую полосу и высокую частоту дискретизации, но и достаточное количество памяти на канал для возможности регистрации всей реализации исследуемого процесса.

Кроме того, при использовании радиоинтерферометрии без преобразования частоты существенно упрощаются схемы построения систем с многочастотными зондирующими сигналами, которые обладают определенной привлекательностью с точки зрения улучшения соотношения сигнал/шум и возможностью корреляционного анализа.

Исследование выполнено при поддержке **Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (проект № 428-99_2022-2023).**

Список литературы

1. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47. – № 6. – С. 29-41.
2. Ботов Е.В. и др. Измерение яркостной температуры быстропротекающих газодинамических процессов с помощью КВЧ радиоинтерферометра-радиометра при наличии сигнала активного канала // Известия вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61. – № 5. – С. 432-439.
3. Канаков В.А. и др. Состояние и перспективы развития микроволновой радиоинтерферометрии для диагностики газодинамических процессов // Антенны. – 2016. – Вып. 1. – С. 49-54.
4. Owen Mays R. et al. Experimental and computational investigation of microwave interferometry for detonation front characterization // AIP Conference Proceedings. — 2018. — V. 1979. — Art.no. 160016.
5. Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Пархачёв В.В., Ламзин Д.А. Применение радиоинтерферометра для измерения скорости свободной поверхности в плосковолновом эксперименте // Проблемы прочности и пластичности. – 2018. – Т. 80. – №1. – С. 118-126.
6. Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Ломунов А.К., Пархачёв В.В. Измерение величины динамического коэффициента Пуассона древесины с помощью радиоинтерферометра // Проблемы прочности и пластичности. – 2020. – Т. 82. – № 4. – С. 413-427.
7. Огородников В.А. и др. О влиянии проводимости ударно-сжатого газа на регистрацию параметров движения лайнера с помощью интерферометрических методов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2012. – Т. 141. – № 1. – С. 182-188.

8. Богданов Е.Н., Жерноклетов М.В., Козлов Г.А., Родионов А.В. Исследование плазмы ударно-сжатого аргона с использованием микроволновой диагностики // Физика горения и взрыва. – 2020. – Т. 56. – № 4. – С. 121-127.
9. Зарко В.Е., Вдовин Д.В., Перов В.В. Методические проблемы измерения скорости горения твердых топлив с использованием СВЧ-излучения // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36. – № 1. – С. 68-78.
10. Жарков А.С. и др. Применение микроволнового метода для измерения скорости горения высокоэнергетических композиционных материалов // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36. – № 1. – С. 73-82.
11. Rappaport T. S. et al. Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond // in IEEE Access.– 2019. V.7.– P. 78729-78757.
12. Kornev R.A. et al Microwave interferometry of chemically active plasma of RF discharge in mixtures based on fluorides of silicon and Germanium // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2017. – V. 37. – P. 1655-16661.
13. Sintsov S. et al. Study of the Electron Density in an Inductively Coupled Plasma of Fluorine-Hydrogen-Argon Gas Mixture // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2022. – V. 42. – No. 6. – P. 1237-1247.