

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МИКРОВОЛНОВЫХ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ

А. А. Седов, Е. Н. Афанасьев, А. В. Родионов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В Институте физики взрыва РФЯЦ-ВНИИЭФ с начала 21 века проводятся исследования быстропротекающих (в основном газодинамических) процессов с использованием микроволновой интерферометрии [1]. В основе интерферометрического метода измерения лежит принцип сравнения фаз излученного и отраженного от исследуемого объекта сигналов, поэтому для успешного использования метода требуется знание хотя бы основных особенностей распределения электромагнитного излучения в зондируемом объекте, а именно: какое поле излучается передатчиком и как оно отражается от объекта.

Для формирования зондирующего излучения используются различные антенные устройства, поэтому для определения конфигурации излучаемого поля требуется детальное исследование амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) применяемых антенн. С другой стороны, во взрывных экспериментах антенна может располагаться как на значительном удалении от исследуемого объекта, так и в непосредственной близости от него, что требует исследования АФХ не только в дальней, но и в ближней зоне антенны. Особенную актуальность такие исследования приобрели при переходе к многоканальному зондированию.

Наиболее востребованными характеристиками излучения антенны являются диаграмма направленности, характеризующая распределение излученной мощности в дальней зоне антенны в зависимости от углового направления, и коэффициент направленного действия, характеризующий эффективность излучения в направлении максимума диаграммы направленности. Типовая схема измерения этих параметров показана на рис. 1.

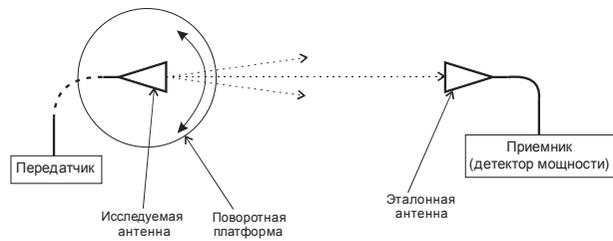


Рис. 1. Стандартная схема измерения диаграммы направленности

Исследуемая антенна подключается к передатчику и устанавливается на поворотном столе. На достаточно большом расстоянии, существенно превышающем длину волны и размер апертуры антенны, раз-

мещается эталонная приемная антенна с известными характеристиками, подключенная к приемнику, регистрирующему мощность пришедшего на него сигнала. Если заменить в данной схеме детектор мощности схемой фазового детектирования, то можно реализовать по такому же принципу и фазовые измерения (рис. 2). Но здесь возникают некоторые сложности.

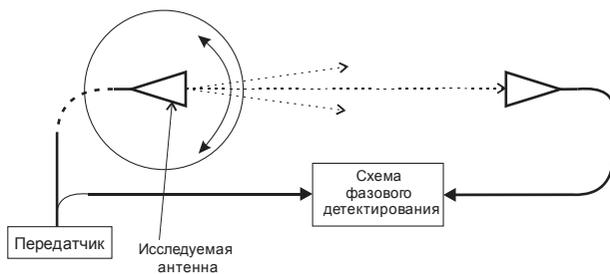


Рис. 2. Усовершенствование схемы, показанной на рис. 1, для выполнения амплитудно-фазовых измерений

Во-первых, фазовое детектирование сигнала со столь медленно меняющимися параметрами требует фазовой синхронизации передатчика и приемника. Одна из антенн в данной схеме должна двигаться, что требует использования гибкой линии передачи, которая должна менять свою конфигурацию в процессе измерения. Но все гибкие линии передачи микроволнового диапазона обладают фазовой нестабильностью: фазовая задержка в самой линии меняется в зависимости от ее конфигурации. Нестабильность фазовой задержки гибкой линии передачи усугубляется с уменьшением длины волны и трудно контролируема, что приводит к сильному искажению информации о фазовом сдвиге при измерениях по такой схеме.

Во-вторых, вторая (эталонная) антенна также обладает своей собственной амплитудно-фазовой характеристикой. В дальней зоне, где форма фазового фронта близка к сферической, эту характеристику можно учесть при обработке результатов измерения, но вблизи апертуры исследуемой антенны, где поле может иметь сложную структуру, такие измерения становятся затруднительными. Проблему можно решить использованием приемника с изотропной по всем направлениям амплитудно-фазовой характеристикой, но такие устройства практически не реализуемы.

Тем не менее, существует возможность построить схему измерения без использования второй антенны. Согласно принципу взаимности в электроди-

наимике [2], справедливому для всех линейных систем без гистерезиса, амплитудно-фазовые характеристики антенны на передачу и прием идентичны друг другу с точностью до размерности. Амплитудная характеристика на передачу является мерой излучаемой мощности в единицу телесного угла, а амплитудная характеристика на прием – мерой чувствительности от антенны в зависимости от направления прихода на нее плоской волны, при этом фазовые задержки на передачу и прием тождественно равны. Данное обстоятельство позволяет обойтись без использования эталонной антенны и выполнять измерение по отражательной схеме, используя в качестве зонда точечный отражатель (рис. 3).

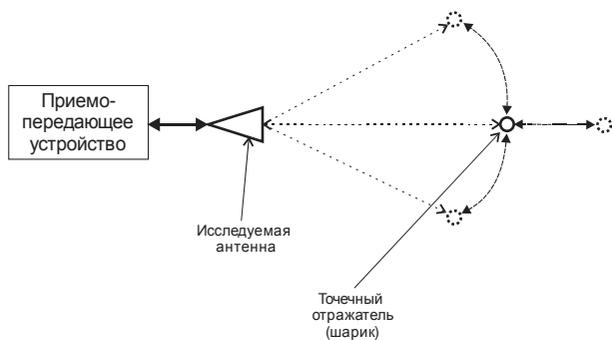


Рис. 3. Упрощенная схема измерения поля вблизи антенны с использованием сферического отражателя

В качестве отражателя наиболее логично использовать металлический шарик, так как он изотропен во всех направлениях. К тому же взаимодействие электромагнитных волн с проводящим шаром аналитически описано в [3].

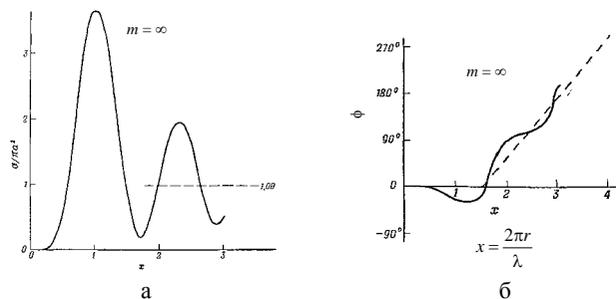


Рис. 4. Характеристики радиоволн, рассеиваемых назад идеально проводящим шаром: а – радарное сечение (коэффициент отражения, нормированный на коэффициент отражения от диска того же диаметра); б – фаза волны (пунктиром показана фаза волны, отраженной от плоскости, расположенной на верхушке шара)

Согласно расчетам, эффективная площадь рассеяния (в [3] она называется «радарное сечение») абсолютно отражающего шара (отношение коэффициента отражения от шара к коэффициенту отражения от диска того же диаметра) имеет периодическую зави-

симость от отношения длины волны к длине окружности шара. Следовательно, у металлического шара существуют размеры резонансных максимумов и минимумов отражения. Следовательно, диаметр шара следует выбирать не произвольный, а соответствующий резонансному максимуму для получения наилучшего соотношения сигнал/шум. К тому же, как показано в [3], фаза плоской волны, отраженной от шара резонансного диаметра, соответствует фазе волны, отраженной от плоскости, ориентированной перпендикулярно волновому вектору и расположенной на верхушке шара. Поэтому шар резонансного диаметра позволяет не только получить максимум амплитуды, но и локализовать точку пространства, в которой производится измерение параметров электромагнитного поля.

Для практической реализации данной измерительной схемы была построена установка, состоящая из приемопередающего устройства с рабочей длиной волны 3,2 мм и механической установки, позволяющей закреплять микроволновую антенну в точно выбранную позицию и перемещать вокруг нее металлический шар. Диаметр отражающего шара составляет 2,4 мм, что соответствует второму резонансному максимуму на рис. 4.а.

Для перемещения шара вокруг исследуемой антенны используется кинематическая схема с двумя поворотными подачами и одной продольной подачей. Позиционирование шара осуществляется в сферической системе координат с горизонтальным расположением полярной оси: платформа с продольной подачей может вращаться вокруг собственной оси и установлена на подвесе, который вращается вокруг горизонтальной оси. Схема приводится в движение при помощи шаговых двигателей.

Для закрепления самого шара используется рамка, в которой натянуты пересекающиеся нити, каждая из которых состоит из пяти нейлоновых волокон толщиной 0,01 мм. Более толстые нити, как было обнаружено в ходе обработки стенда, существенно отражают сигнал, и результат этого отражения заметен на амплитудном распределении измеряемого поля. Закрепление шара на нитях реализовано через отверстия в шаре, без разделения шара на половинки, чтобы исключить разрыв поверхностных токов, наводимых радиоволнами.

В процессе работы стенда шарик перемещается из одной угловой позиции в другую. В каждой угловой позиции шарик совершает поступательное движение от облучателя и к облучателю, при этом на каждом шаге регистрируется напряжение на выходах фазовых детекторов приемника. В результате для каждого такого прохождения шара записывается экспериментальная интерферограмма (рис. 5), амплитуда и фаза которой несет информацию об амплитуде и фазе электромагнитного поля, формируемого антенной. После обработки полученного сигнала получается зависимость амплитуды и фазы от расстояния для заданной угловой позиции.

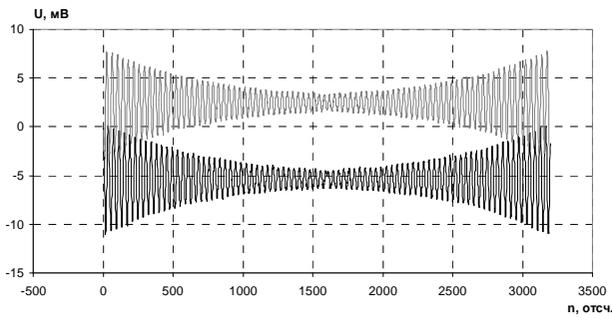


Рис. 5. Сигналы с выходов фазовых детекторов приемопередающего устройства, регистрируемые в результате прохода шара вперед и назад

На рис. 6, 7 показан результат измерения амплитудного распределения поля, излучаемого цилиндрическим диэлектрическим штырем из полиэтилена диаметром 2,5 мм. На графиках хорошо заметны все основные особенности антенного поля: главный лепесток диаграммы направленности, его форма и ширина, уровень боковых лепестков.

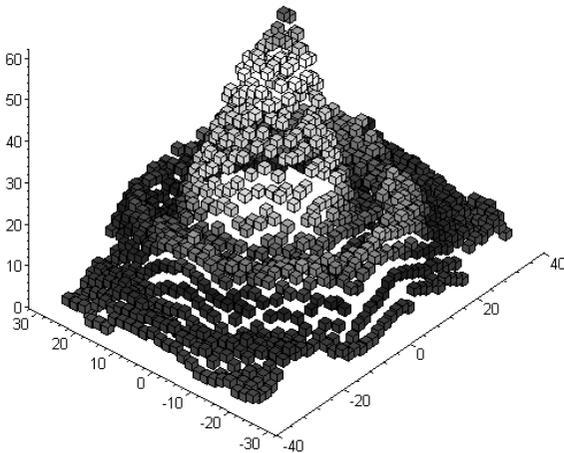


Рис. 6. Трехмерное распределение амплитуды на расстоянии 60,148 мм от облучателя в зависимости от углового отклонения от его оси

Следует сделать небольшое замечание об измерении фазы. В области максимума амплитудного распределения существует диапазон углов, где фазовые фронты антенного поля по своей форме близки к сферическим. Центр сферы, которой можно описать фа-

зовый фронт, считается фазовым центром антенны. Для корректного измерения полей положение антенны в процессе пробных измерений настраивается таким образом, чтобы распределение фаз вблизи амплитудного максимума было как можно ближе к горизонтальной прямой. В этом случае можно говорить, что центр сферических координат системы позиционирования стенда и фазовый центр антенны совмещены.

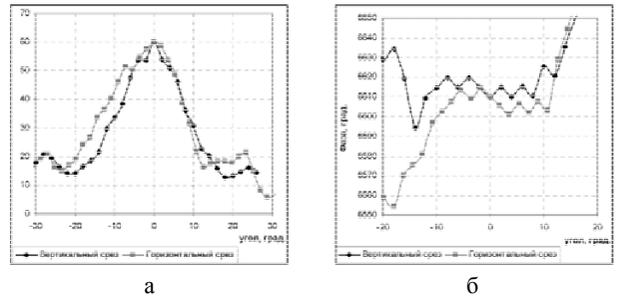


Рис. 7. Срезы распределений в плоскости: а – срез распределения амплитуды, б – срез распределения фазы

Данный стенд позволяет детально исследовать амплитудные и фазовые распределения полей вблизи миниатюрных микроволновых облучателей в сферическом слое, толщиной 60 мм и в диапазоне угловых координат до $\pm 50^\circ$ от оси облучателя. Это позволяет разрабатывать новые виды микроволновых антенн, а также измерять характеристики уже изготовленных образцов для последующего анализа экспериментальных данных, полученных в газодинамических опытах с использованием данных антенн.

Литература

1. Михайлов А. Л., Костюков Ю. И. и др. Некоторые результаты применения в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн для изучения газодинамических процессов // Тр. международ. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества, детонация, ударные волны». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 649–654.
2. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: ГИТТЛ, 1956.
3. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.