

УДК 621.372

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Дубровин В.Ф., д.ф.-м.н., профессор, E-mail: VladislavFD@yandex.ru

Будагян И.Ф., д.ф.-м.н., профессор, E-mail: budif@yandex.ru

МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. В предлагаемой статье изложены основные сведения по методу исследования пространственной структуры электромагнитных полей в незамкнутых («открытых») устройствах и системах диапазона сверхвысоких частот. Описываемый метод позволяет также исследовать характер рассеиваемых и дифрагированных различными объектами полей. Представлена принципиальная схема соответствующего измерительного стенда и приведены экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность метода.

Ключевые слова: метод исследования, пространственная структура, электромагнитные поля, сверхвысокая частота, излучающие устройства, когерентная оптика.

STUDY OF SPATIAL STRUCTURE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

Dubrovin V.F., D.Sc.(Phys-Math), Prof., E-mail: VladislavFD@yandex.ru

Budagyan I.F., D.Sc.(Phys-Math), Prof., E-mail: budif@yandex.ru

MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. In this article the basic information on the method of analysis of the spatial structure of electromagnetic fields in non-closed ("open") mouth-slaves and systems microwave frequencies outlines. The described method allows also investigating the nature of the scattered and diffracted different objects fields. The basic schemes of the corresponding measuring stand are presented and show the experimental results confirming the effectiveness of the method.

Keywords: research method, the spatial structure, the electromagnetic fields, ultrahigh frequency, radiating devices, coherent optics.

При разработке ряда устройств диапазона сверхвысоких частот и устройств когерентной оптики, например, при создании излучающих систем, линий передачи и их элементов, а также в процессе их исследований, значительное место занимают экспериментальные исследования [1]. Однако, для исследований и измерений в диапазонах СВЧ и тем более в оптическом диапазоне как методы, так и аппаратура, обычно используемые в области электромагнетизма, не позволяют получить данные, достаточные для построения современных устройств и систем. Здесь требуется специальный подход. Этот подход – экспериментальное исследование пространственной структуры электромагнитных полей в этих устройствах. Значительная часть таких исследований должна выполняться в «свободном пространстве». В большинстве случаев

при создании устройств и систем в указанных диапазонах требуется знание пространственной структуры поля, которая определяет основные их электродинамические характеристики. В то же время литература, в которой содержались бы необходимые сведения по подобной методике и технике исследований, фактически отсутствует.

Ниже кратко изложены основные сведения по методам исследования и технике выполнения измерений в свободном пространстве.

При изучении любого силового поля фундаментальным является понятие, точнее «образ», его пространственной и временной [2] (в случае переменного поля) структур. Это понятие основывается на представлении силы в виде вектора, а силового поля в виде системы силовых линий (линий касательных в каждой точке пространства к вектору силы). Переходя к переменному электромагнитному полю, необходимо вспомнить, что современное пространственное представление об электрическом и магнитном полях как о системе силовых линий — системе линий напряженности поля или линий индукции, — было введено Фарадеем и обобщено на случай переменного электромагнитного поля во второй половине XIX века Максвеллом.

Электромагнитное поле известно (задано или определено), если известны в каждой точке исследуемой области пространства в момент рассматриваемого промежутка времени его векторы напряженностей электрического и магнитного полей, электрической и магнитной индукций (**E**, **H**, **D** и **B**). Другими словами, известна структура поля, т. е. картина мгновенного пространственного распределения силовых линий (их конфигурация, направление, пространственная плотность). Особое значение приобретает исследование пространственной структуры переменного электромагнитного поля в связи с развитием антенной техники и техники СВЧ, методов пассивного радиопротиводействия. Для оценки энергетического пространственного характера электромагнитного поля полезным является введение понятий амплитудных фронтов и линий равной плотности потока электромагнитной энергии. Это, соответственно, геометрическое место точек с равной величиной векторов поля и точек с равной величиной плотности потока электромагнитной энергии. Для полного представления о волновом процессе необходимо знать ещё и пространственное распределение фазы исследуемого поля, т. е. при изучении электромагнитных волновых полей система силовых линий (амплитудных фронтов и линий равной плотности потока электромагнитной энергии) должна была быть дополнена конфигурацией волновых (фазовых) фронтов.

Постоянная необходимость решать задачи радиолокационной защищённости

объектов, необходимость рассмотрения вопросов электромагнитной совместимости, а также расширение исследований в области излучающих систем СВЧ и оптического диапазонов [3], линий передачи «открытого» типа (диэлектрических волноводов, однопроводных линий передачи, оптических волноводов и устройств на их основе) привело к необходимости создания специальных методов экспериментального получения («визуализации») структуры электромагнитных полей СВЧ. Реально на сегодня существуют три таких метода:

- с последовательным измерением локальных значений напряженности (плотности потока) и фазы поля посредством зонда, вносящего малые искажения в структуру исследуемого поля;

- с последовательным измерением локальных значений напряженности (плотности потока) поля посредством «возмущений» исследуемого поля малыми рассеивающими телами;

- с одновременной фиксацией распределения интенсивности и фазы поля во всем исследуемом пространстве посредством распределения в ней чувствительных элементов, мало искажающих первичную структуру поля (например, радио- и светопрозрачных баллончиков, заполненных газом, интенсивность свечения которого зависит от интенсивности высокочастотного поля и др.).

Достаточно хорошие результаты в большинстве случаев можно получить первым методом — путем прямых измерений посредством электрического зонда (диполя). Уменьшение влияния опоры зонда и других конструктивных элементов его крепления на исследуемое поле достигается за счет покрытия их поглотителями, обеспечивающими малые (порядка 1%) коэффициенты отражения. В сочетании с обычными измерениями входных и выходных параметров получаемые этим методом результаты дают достаточно полную картину волновых процессов передачи и излучения электромагнитной энергии в исследуемых устройствах. Так, в результате использования такой методики выявлен ряд новых эффектов при передаче слабозамедленных волн, и на их основе создан ряд оригинальных узлов и приборов в СВЧ и оптическом диапазонах волн [4].

Стенд для проведения исследований в диапазоне 6,7 - 11,5 ГГц выполняется в виде безэховой камеры. Его принципиальная схема приведена на рисунке 1, где передающая (I) и приемная (II) части собраны на стандартных волноводных деталях и функциональных узлах, например, с сечением волноводов $10 \times 23 \text{ мм}^2$. Передающий тракт может быть разделен в зависимости от решаемой задачи на два или четыре независимых канала (развязка этих каналов по выходу должна быть обеспечена на уровне 60 дБ), каждый из которых должен содержать устройства независимой

регулировки амплитуды и фазы сигнала. Посредством волноводного переключателя тракты могут быть включены на эквивалент антенны или устройства, возбуждающего в исследуемом элементе поверхностные волны. Дополнительный тракт опорного сигнала обеспечивает фазовые измерения.

Исследуемый элемент располагается на испытательном столе (размер 2 x 2 м²), выполненном из электрически прозрачного материала (блоков пенополистирола малой плотности, например, ПС-4), что обеспечивает малые искажения поля. Стол снабжен зажимами (выполнен в виде планшета) для закрепления полупрозрачной бумаги при измерении амплитудно-фазовых диаграмм структуры поля.

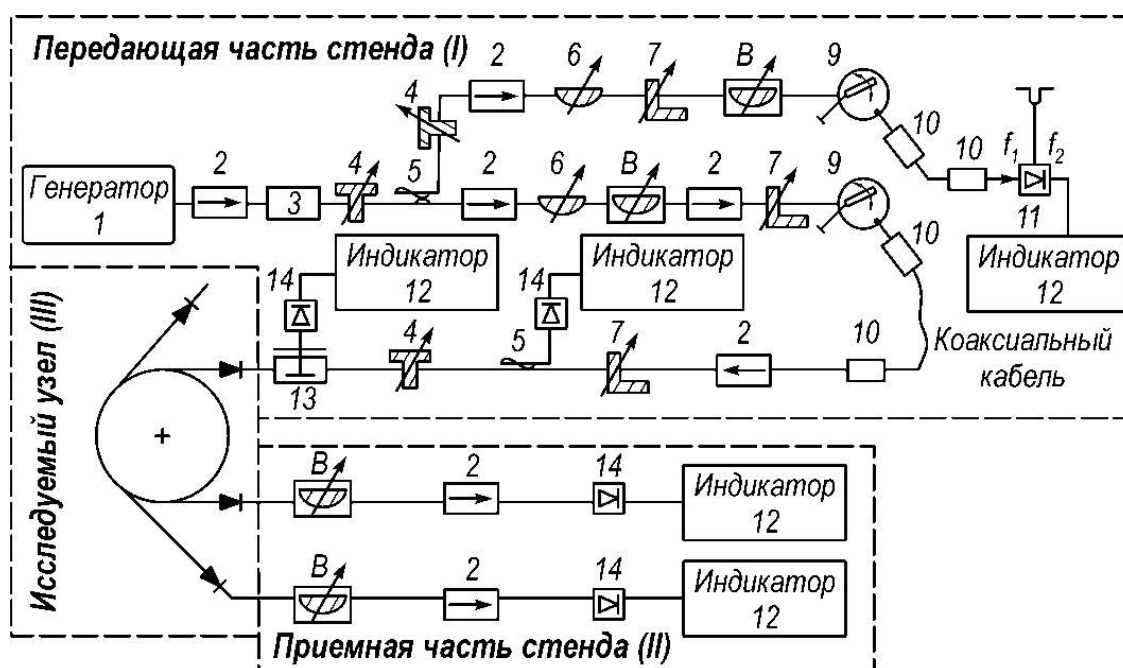


Рисунок 1. Схема стенда для исследования структуры электромагнитного поля

На поверхности стола нанесены координатные сетки (в декартовой и полярной системах координат). Все расположенные на столе и вблизи него излучающие и приемные устройства на металлических выводах, покрыты для исключения нежелательных влияний рассеянного на них излучения, радиопоглощающими материалами. Измерения в полярной системе координат производятся с помощью съемной поворотной малоотражающей «стрелы», несущей индикаторную часть стенда. Последняя имеет два независимых приемных канала с выходами на самостоятельные усилители и самописцы или на СВЧ приемники. Электрический зонд (диполь Герца), включенный на смесительное балансное устройство, позволяет при наличии опорного сигнала производить локальные фазовые измерения, а при выключении опорного

сигнала — амплитудные. Зонд выполнен в виде открытого конца коаксиального кабеля с выдвинутой на $\sim \lambda_{\text{ср}}/2$ центральной жилой, поверхность кабеля зонда также покрыта поглотителем. Для индикации положения зонда, амплитудных фронтов и линий равной плотности потока электромагнитной энергии он снабжен специальным «карандашом», делающим отметку при нажатии на кнопку, выведенную из области измерений. Все тракты стенда в обязательном порядке снабжены ферритовыми развязками, обеспечивающими малые взаимные влияния и «обратные реакции».

Описанный стенд обеспечивает проведение следующих видов измерений:

- коэффициентов передачи устройств на волноводах открытого типа (например диэлектрических, с относительной точностью не хуже 10 %);
- параметров их согласования (коэффициентов отражения, КСВ или КБВ), на входе (с точностью не хуже 5%);
- амплитудно-фазовых диаграмм полей волноводов открытого типа, устройств на их основе.

Методика измерения и построения этих диаграмм состоит в «отслеживании» хода эквипотенциальных уровней путем малых перемещений (шаг не более $\lambda_0/8$) зонда. Измерения могут быть автоматизированы с помощью автоматического координатно-поисково-го устройства, следящего за заданным уровнем сигнала.

Следует отметить, что стенд обеспечивает исследование полей излучающих устройств в ближней, промежуточной и дальней зонах. В случае же использования традиционных методов такие исследования весьма затруднительны, сложны и дороги в их техническом обеспечении или вообще невозможны. Максимально допустимый поперечник исследуемого эффективного раскрытия в данной конкретной конструкции стенда ограничен величиной 0,5 метра, что зависит лишь от возможного максимального разнесения приемной и передающей частей в безэховой камере стенда (который в этом конкретном случае не превышает 6 метров). Динамический диапазон измерений на стенде около 55 дБ.

Наглядной демонстрацией возможностей метода являются результаты исследования соединений на слабозамедленных диэлектрических волноводах.

На рисунке.2 приведены амплитудно-фазовые структуры поля в Н-плоскости Т-образного соединения при подаче сигнала соответственно в боковое плечо 3 и в плечо 1 (или 2). Сплошными линиями изображены эквипотенциальные уровни, пунктирными — эквифазные.

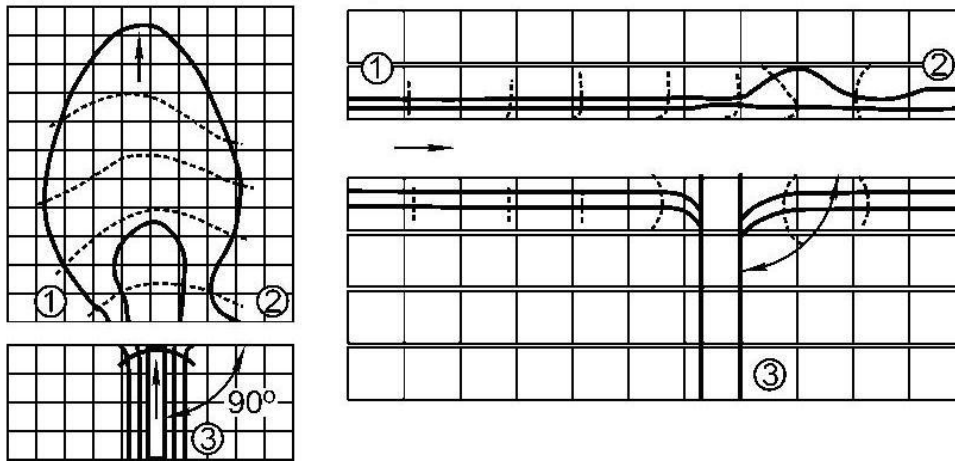


Рисунок 2. Структуры электромагнитных полей в Т-образном соединении диэлектрических волноводов

Характер полученных структур поля свидетельствует о следующем:

- поданный в плечо 3 высокочастотный сигнал не испытывает существенного отражения в месте стыка волноводов, о чем говорит отсутствие осцилляции эквипотенциалей на регулярном участке волновода (КСВ близок к 1);
- в волноводах, образующих плечи 1 и 2 соединения, нет распространяющейся поверхностной волны, и передачи энергии в эти плечи не происходит;
- имеет место интенсивное излучение в области стыка волноводов по направлению оси волновода 3 (стрелка А на рисунке 2, слева), это излучение как бы создает четвертое, «мнимое», плечо соединения;
- сигнал, поданный в плечо 1 (или 2) также не испытывает заметного отражения в области стыка волноводов;
- в боковом волноводе 3 распространяющейся поверхностной волны нет, и передача энергии в этом плече соединения отсутствует;
- высокочастотная энергия из плеча 1 практически полностью поступает в плечо 2 (аналогично из плеча 2 в плечо 1).

Рассмотрим этим же методом передачу энергии СВЧ в соединении, если угол α между основным (1 - 2) и боковым (3) волноводами не равен 90° (рисунок 3). Соединения в этом случае имеют вид несимметричного Y-образного соединения. Характер передачи энергии при изменении угла между волноводами α был исследован путем измерения амплитудно-фазовой структуры полей при различных углах α (от 90° до 15°) между волноводом (3) и волноводом (2 - 1).

На рисунке 3, слева и справа, приведены результаты для значений углов $\alpha = 60^\circ$ и 30° соответственно, при подаче сигнала в плечо 3. Структура поля свидетельствует об

образовании при отклонении угла α от 90° распространяющейся поверхностной волны в том плече, угол пересечения которого с плечом 3 становится больше 90° (на рисунке 3 в плече 1).

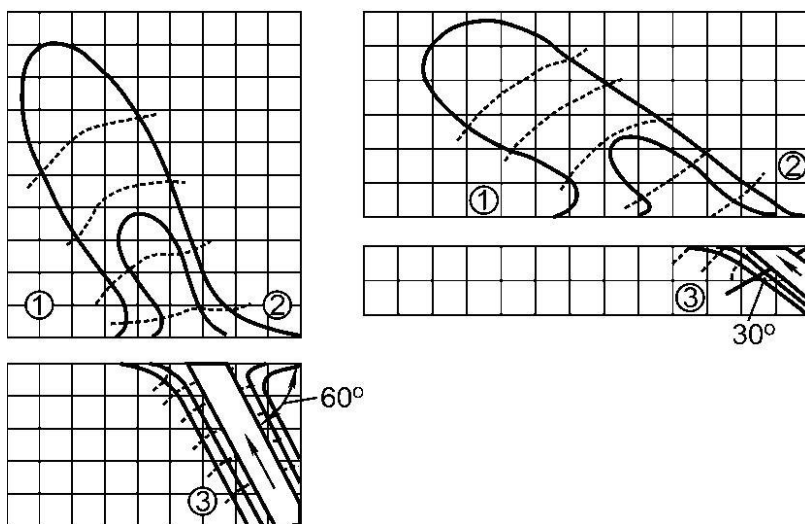


Рисунок 3. Структура электромагнитного поля в несимметричном соединении диэлектрических волноводов

Интенсивность передачи энергии в это плечо растет при уменьшении угла α . Излучение в области стыка волноводов остается достаточно интенсивным и сохраняет направление, близкое к оси продолжения волновода 3. Такое соединение является, следовательно, как и рассмотренное ранее Т-образное соединение, четырехплечим, причем отсутствует поступление энергии в плечо 2. Свойства плеч 1 и 2 различны, что не имеет места в Т-образном соединении металлических волноводов.

Это различие становится более наглядным при подаче сигналов в плечи 1 или 2 соединения с углом $\alpha = 30^\circ$ (рисунок 4), сплошные линии здесь соответствуют подаче сигнала в плечо 1, пунктирные — в плечо 2. В первом случае сигнал делится между плечами 2 и 3. Небольшая выпуклость на эквипотенциальных уровнях в области разветвления объясняется небольшой технологической неоднородностью, возникающей при соединении волноводов. Во втором случае подачи сигнала структура поля свидетельствует, что сигнал из плеча 2 передается в плечо 1, не попадая в плечо 3. В области разветвления имеет место заметное излучение, на что указывает искривление эквипотенциалей. Возникающее излучение обеспечивает условие взаимности соединения. Однако здесь, в отличие от случая подачи сигнала в плечо 3 на рисунке 3, нельзя выделить преимущественного направления излучения, т.е. четко определить положение «мнимого» плеча в пространстве.

Наличие заметной «электрической» несимметрии обусловлено геометрической несимметрией соединения, так как все остальные параметры соединения сохранены

неизменными. Характер несимметрии поля в соединении указывает на наличие в нем направленных свойств при сохранении хорошего согласования всех плеч. О последнем можно судить по гладкости эквипотенциальных уровней для плеч соединения.

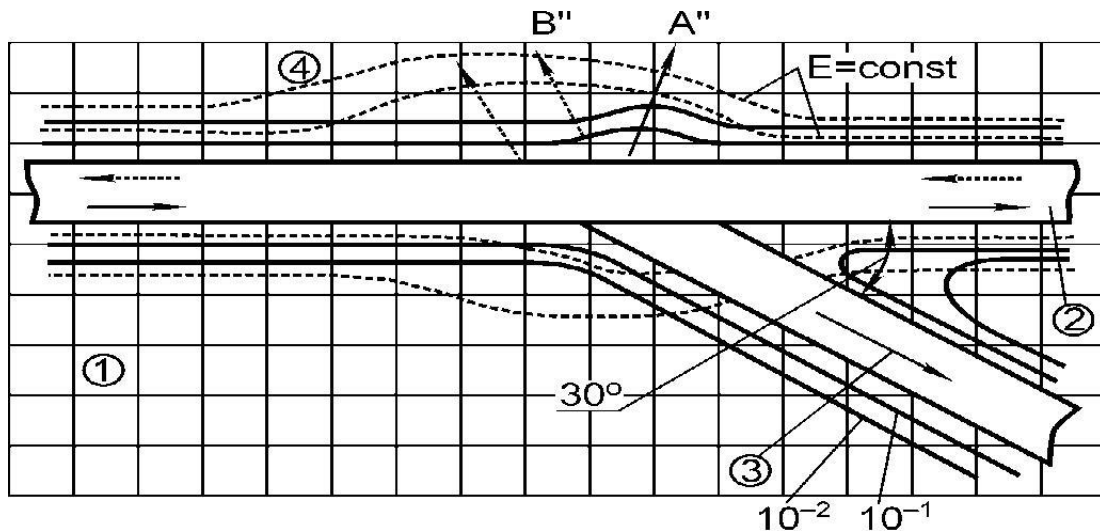


Рисунок 4. Варианты подачи энергии в плечи несимметричного Y-соединения и их влияние на характер поля

В симметричном Y-образном соединении с осью симметрии, совпадающей с биссектрисой угла между плечами 2 и 3 при подаче сигнала в плечо 1, он делится между плечами 2 и 3 (рисунок 5, сплошные линии). Характер структуры поля в пространстве вокруг волноводов свидетельствует о равноправности плеч (с точки зрения деления сигнала). Некоторая выпуклость эквипотенциалей (сплошные линии) в области разветвления, как и в предыдущем случае, объясняется технологической неоднородностью в месте соединения плеч. При подаче сигнала в плечо 2 (или 3), - пунктирные линии на рисунке 5, в области стыка имеет место ненаправленное интенсивное излучение. В плечо 3 (или 2) сигнал не поступает и за вычетом излучившейся части проходит в плечо 1. Степень согласования со стороны всех плеч высока — эквипотенциали не имеют осцилляции. При подаче двух когерентных сигналов в плечи 1 и 2 образуется синфазный СВЧ-сумматор.

Картина поля в таком сумматоре существенным образом зависит от взаимной фазировки сигналов в плечах. Если сигналы в плечах синфазны (сплошные линии), то излучение в области соединения волноводов мало и обусловлено лишь неоднородностью при соединении волноводов (за счет склейки), сигнал практически полностью поступает в плечо 1. При «расфазировке» излучение возрастает (пунктирные линии) и оказывается максимальным при противофазности сигналов, максимум излучения направлен по продолжению плеч 2 и 3. Наибольшее излучение наблюдается в направлении того плеча,

в котором сигнал опережает другой по фазе. В плечо 1 поступает ослабленный (за вычетом излученной части мощности) сигнал. Плечи соединения остаются согласованными, т. е. отражение в плечах 2 и 3 мало.

В аналогичном (по геометрии) соединении на металлических волноводах при подаче в плечи 2 и 3 противофазных сигналов возникает полное отражение, а в плечо 1 сигнал не поступает.

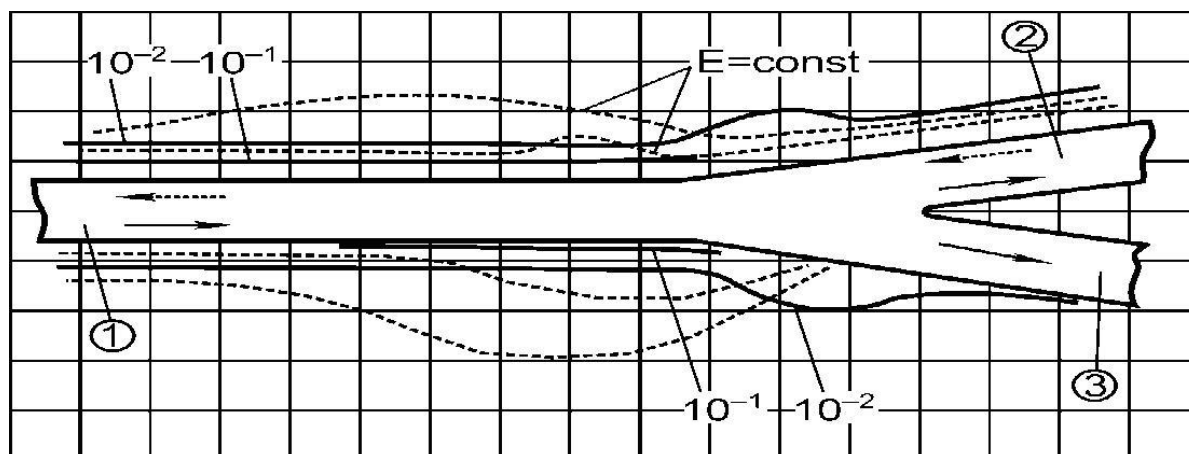


Рисунок 5. Варианты подачи энергии в плечи симметричного Y-соединения и их влияние на характер поля

Полученные данные показали, что анализ полей в диэлектрических волноводах методом «визуализации» структуры нагляден и эффективен. Он выявляет их существенное отличие от аналогичных соединений на металлических волноводах и коаксиальных линиях передачи, позволяя обнаруживать ранее неизвестные физические явления [5].

В статье для пояснения сути и возможностей представленного метода приведена лишь малая часть полученных результатов по исследованию полей в электродинамических устройствах и системах открытого типа.

Разработанный метод «визуализации» пространственной структуры электромагнитных полей достаточно универсален – он может быть с успехом использован для исследования широкого класса «незамкнутых» (открытых) электродинамических систем и устройств. Например, для масштабного и немасштабного моделирования излучающих устройств и канализирующих систем диапазонов сверхвысоких частот и оптического диапазона волн [6], для исследования процессов распространения электромагнитных волн, а также процессов рассеяния и дифракции на различных телах [7].

Список литературы

1. Будагян И.Ф., Дубровин В.Ф., Щучкин Г.Г., Мерсяитова Г.Р., Тихвинская О.В. Электронный программно-методический комплекс «Анализ и синтез СВЧ устройств и антенн» // Антенны - 2009 - вып.9 (148). - С.67-76.
2. Зайцев А.В. Исследование электромагнитных полей во временной области // Антенны – 2001 - вып.6(52). - С.3-10.
3. Дубровин В.Ф. Интерференционное поле системы оптических волноводных излучателей // Радиотехника и электроника – 2010 - т.55, №1. - С.45-48.
4. Будагян И.Ф., Взятыхшев В.Ф., Дубровин В.Ф., Минкара М.С.М. Многоплечие диэлектрические соединения: принципы действия и закономерности дифракции высших типов волн // Труды XI Международной научно–технической конференции 26 – 28 сентября 2012г., - Екатеринбург: изд. Уральского университета – 2012 – С. 28-29
5. Взятыхшев В.Ф., Дубровин В.Ф., Евтихийев Н.Н., Мировицкий Д.И. Диплом на открытие №79 с приоритетом от 27.04.1959. Бюллетень изобретений – 1970 - №18. - С.5.
6. Мировицкий Д.И., Будагян И.Ф., Дубровин В.Ф. Микроволноводная оптика и голография. - М.: Наука - 1983 – 319с.
7. Будагян И.Ф., Щучкин Г.Г., Ганжела К.А., Крючков Д.И., Сергеев А.Д., Белов М.С. Мультимедийный программно-методический комплекс «Исследование волновых процессов при распространении и дифракции радиоволн». Свидетельство об отраслевой регистрации разработки в фонде алгоритмов и программ № 9770 от 17.01.2008. Государственная регистрация разработки в «Национальном информационном фонде неопубликованных документов» № 50200800187 от 29.01.2008.