

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ В КВАЗИОПТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

В. К. Киселев

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [kiseliiov@ire.kharkov.ua](mailto:kiseliiov@ire.kharkov.ua)*

В работе обобщены методы экспериментального исследования процессов электромагнитного рассеяния в квазиоптических направляющих структурах класса «полюй диэлектрический волновод» и изложены основы создания соответствующих радиоизмерительных средств для физического моделирования характеристик рассеяния объектов в терагерцевом диапазоне частот. Ил. 16. Библиогр.: 88 назв.

**Ключевые слова:** терагерцевый диапазон, квазиоптика, физическое моделирование, метод квазиоптического волноводного моделирования, микрокомпактный полигон.

В последние десятилетия развитие экспериментальной радиофизики в значительной мере связано с освоением терагерцевой (ТГц) области электромагнитного спектра, охватывающей коротковолновую часть миллиметрового – так называемого ближнего миллиметрового (БММ) – и весь субмиллиметровый (СММ) диапазоны радиоволн. Одним из направлений научного и прикладного применения ТГц волн является получение данных о физических свойствах и характеристиках материальных объектов, недоступных непосредственному наблюдению. Эти данные получают радиофизическими методами путем дистанционного зондирования объекта направленными электромагнитными волнами и исследования характеристик рассеянного им вторичного излучения в выбранном частотном диапазоне. Достоверность и надежность интерпретации полученных таким образом результатов очень часто могут быть подтверждены лишь путем сравнения с экспериментальными данными, полученными путем моделирования соответствующих электромагнитных характеристик в контролируемых лабораторных условиях с использованием тех или иных физических принципов и физических моделей. При этом в силу естественной ограниченности лабораторного пространства, дороговизны изготовления моделей объектов сложной геометрической формы очень больших или, наоборот, очень малых размеров в натуральную величину широко используется метод масштабного электродинамического моделирования (ЭДМ) [1], основанный на известном принципе подобия [2]. Особенно широко и эффективно метод масштабного ЭДМ применяется в радиолокации; является основным методом исследования эффективной площади рассеяния (ЭПР), диаграмм рассеяния (ДР), элементов поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) и других радиолокационных характеристик объектов в лабораторных условиях.

Чрезвычайно важная особенность волн ТГц диапазона, делающая их особенно привле-

кательными для решения задач физического моделирования электромагнитного рассеяния, заключается в возможности и целесообразности использования принципов квазиоптики, позволяющих сочетать волновой и оптический подходы при разработке методов и средств измерения параметров радиоволн и радиоцепей в этом диапазоне. К настоящему времени создана элементная база и комплексы квазиоптических (КО) радиоизмерительных приборов и компонентов общего применения, выполненных на основе КО линии передачи класса «полюй диэлектрический волновод» (ПДВ): в Институте радиофизики и электроники (ИРЭ НАНУ) [3-5] на основе ПДВ вида «полюй диэлектрический лучевод» (ПДЛ) [6], а также в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ РАН) [7] и в ИРЭ НАН Украины [8-10] на основе ПДВ вида «металлодиэлектрический волновод» (МДВ) [11, 12]. КО радиоизмерительные методы и средства на основе тех или иных видов ПДВ уже успешно применяются для диагностики плазмы на экспериментальных установках термоядерного синтеза, в радиоастрономических наблюдениях и в радиолокации, для радиоспектроскопических исследований диэлектриков, ферритов, полупроводников, композитов и других материалов и веществ, в радиоволновой эллипсомерии и пр.

Ввиду ряда особенностей, присущих КО направляющим структурам класса ПДВ, связанных с наличием сложных импедансных границ волноведущего канала, а также с принципиальной многомодовостью ПДВ, обусловленной большими по отношению к длине волны поперечными размерами канала, потребовались новые подходы как в теоретическом, так и в экспериментальном плане при решении вопросов использования подобных структур для целей моделирования рассеяния электромагнитных волн на объектах (рассеивателях), локализованных внутри таких структур.

Решение проблемы физического электродинамического моделирования процессов рассеяния в БММ и СММ диапазонах волн на основе КО принципов и КО направляющих структур включает в себя разработку адекватных методов и радиоизмерительных средств изучения энергетических, амплитудно-фазовых и поляризационных характеристик рассеяния объектов в указанных диапазонах волн.

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие научные задачи:

- проведение теоретического и экспериментального исследований условий возбуждения и закономерностей распространения и преобразования широких волновых пучков в КО направляющих структурах класса ПДВ, содержащих внутренние локализованные неоднородности;

- установление связи между параметрами рассеяния волноводных мод в КО направляющих структурах класса ПДВ и характеристиками рассеяния плоских волн в свободном пространстве;

- физическое обоснование, разработка и исследование метода КО волноводного моделирования (КВМ) для экспериментального изучения характеристик рассеяния объектов в КО направляющих структурах;

- разработка основ аппаратной реализации метода КВМ, создание расчетного инструмента для оценки и оптимизации параметров соответствующих радиоизмерительных систем – микрокомпактных полигонов (МКП);

- разработка методик измерений основных характеристик рассеяния с помощью МКП, анализ специфических ситуаций, возникающих в ходе использования разработанных методик, выработка практических рекомендаций.

**1. Обзор методов физического моделирования характеристик рассеяния.** Физическое моделирование – метод исследования, при котором изучаемый процесс или объект воспроизводится с сохранением его физической природы или используется подобное физическое явление. Для физического электродинамического моделирования могут быть использованы любые волновые процессы, при которых явления рассеяния аналогичны рассеянию радиоволн. Подробная классификация методов моделирования приведена в монографии [13], в которой отмечается, что из всех многочисленных методов физического моделирования наибольшее распространение как наиболее эффективные и универсальные получили методы прямого моделирования, основанные на условиях электродинамического подобия.

На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема классификации методов моделирования электромагнитного рассеяния. В этой схеме выделена и более подробно описана ветвь, представляющая основные направления развития

методов масштабного физического моделирования на БММ и СММ волнах. В нее включено также новое направление – моделирование в КО направляющих структурах, являющееся предметом настоящей работы.

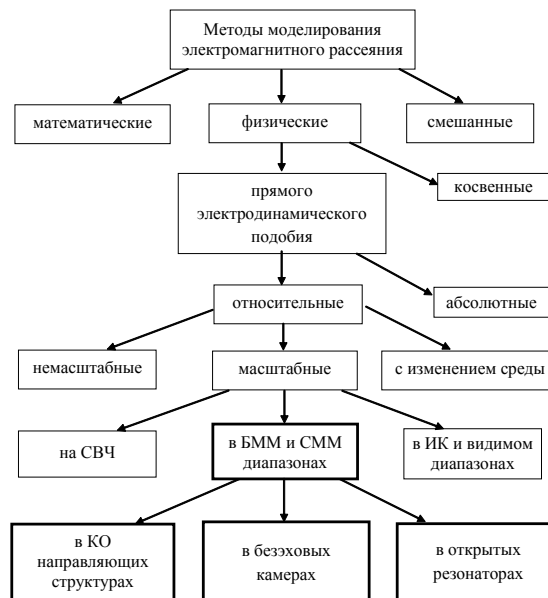


Рис. 1. Структурная схема классификации методов моделирования электромагнитных характеристик рассеяния

Как видно из приведенной схемы, развитие физических методов моделирования на БММ и СММ волнах может осуществляться по трем альтернативным направлениям, каждое из которых имеет свою область наиболее целесообразного и эффективного применения и свой специфический набор технических средств и методических приемов.

Поскольку направление, базирующееся на использовании КО направляющих структур, является новым, рассмотрим вначале с критической позиции два оставшихся известных направления. Одно из них, получившее наибольшее распространение, предусматривает использование так называемых «безэховых камер» (БЭК) и «компактных полигонов» (КП), а второе основано на использовании открытых резонаторов (ОР). К настоящему времени разработаны и успешно используются БЭК и КП самых разнообразных конструкций, размеров и назначения [13-23]. С их помощью проводятся измерения характеристик рассеяния радиолокационных объектов на уменьшенных моделях и в натуральную величину [18-20], измерения параметров антенн [21], испытания радиотехнических комплексов [22] и др. Широкому применению БЭК способствует их экранирование, обеспечивающее помехозащищенность и помогающее решить вопросы электромагнитной совместимости [16]. Радиоизмерения в экранирован-

ных БЭК и КП полностью свободны от различных естественных и искусственных радиопомех, что позволяет выполнять точные измерения и достаточно легко осуществлять их автоматизацию. Основные направления развития теории и техники БЭК и КП, а также методов и средств получения и обработки измерительной информации достаточно полно и подробно освещены в ряде монографий, тематических сборников, оригинальных и обзорных статей [13, 14, 18-23].

Однако создание БЭК и КП, которые, как правило, являются большими и сложными инженерными сооружениями, представляет собой весьма дорогостоящую проблему. Достаточно сказать, что БЭК, построенная фирмой *Emerson and Cuming Inc.* (США) для Датского университета [24], имеет размеры  $16 \times 14 \times 12 \text{ м}^3$ . БЭК облицована внутри пирамидальными радиопоглощающими материалами (РПМ) с высотой пирамид до 2 м и предназначена для проведения измерений антенн и характеристик рассеяния радиолокационных целей в диапазоне от 100 МГц до 100 ГГц. Ее стоимость составляет несколько миллионов долларов, а стоимость больших БЭК, предназначенных для измерений антенных решеток, радиотехнических комплексов и наземной отработки ракетных систем достигает десятков миллионов долларов [25]. Наиболее компактной из них является БЭК [26], работающая в диапазоне от 200 МГц до 30 ГГц, ее размеры  $8,2 \times 3,2 \times 3,1 \text{ м}^3$ .

В 1974 г. был опубликован патент США на перевозимую мини-БЭК, работающую в диапазоне 2...18 ГГц [27]. Мини-БЭК снабжена набором сменных рупорных наконечников и предназначена для испытаний небольших антенн. Габаритные размеры мини-БЭК  $1,5 \times 3 \times 2,1 \text{ м}^3$ , стоимость около 15 тыс. долларов.

В 1970 г. было опубликовано рекламное описание экранированной мини-БЭК [28], предназначенной для испытания передающих антенн, излучающих большую мощность. Рабочий диапазон мини-БЭК 0,3...1 ГГц, размеры  $1,2 \times 1,5 \times 1,2 \text{ м}^3$ , масса 400 кг, стоимость 7 тыс. долларов.

Мини-БЭК, снабженные соответствующим комплексом аппаратных и программных средств, обеспечивающих проведение тех или иных видов измерений в безэховой зоне, т. е. в условиях искусственного «свободного пространства», естественно, можно было бы назвать мини-компактными полигонами (мини-КП).

Примером таких мини-КП, перекрывающих область частот от 2 до 400 ГГц, может служить серия рефлектометров, разработанных в ИРЭ РАН [29], которые применяются, в частности, для исследования обратного рассеяния от небольших моделей и фрагментов физических тел [30]. Прямо-передающие тракты рефлекто-

метров выполнены на основе квадратных МДВ, имеющих различные размеры волноведущих каналов, выбираемые в соответствии с заданным рабочим диапазоном частот.

При измерении характеристик рассеяния физических объектов с помощью КП большое значение для точности измерений имеет то, насколько поле волны, падающей на исследуемый объект (рассеиватель), и рассеянное поле, поступающее на приемную антенну, приближаются к плоскому полю. Наиболее очевидным и распространенным способом получения нужного распределения указанных полей является выбор достаточно большого расстояния между рассеивателем и передающей антенной, а также между рассеивателем и приемной антенной, при котором падающее поле в рабочем объеме и рассеянное поле в пределах апертуры приемной антенны можно считать локально плоскими. Как правило, расстояние между антенной КП и рассеивателем (расстояние дальней зоны) оказывается чрезмерно большим и в некоторых случаях с трудом может быть реализовано даже на открытых полигонах. Особенно большие трудности возникают при экспериментальном изучении характеристик рассеяния объектов, имеющих очень малую отражательную способность и в то же время обладающих относительно большими электрическими размерами  $l_e = l / \lambda \gg 1$  ( $l$  – наибольший геометрический размер объекта;  $\lambda$  – длина волны). Характерным примером таких рассеивателей являются объекты, выполненные по технологии *Stealth* [31].

Существенно сократить размеры БЭК, а следовательно, и размеры КП позволяют коллиматоры – устройства, преобразующие сферическую или цилиндрическую волну в плоскую. Обычно коллиматоры представляют собой различного рода зеркала или диэлектрические линзы [13]. Типичным представителем автоматизированного компактного полигона коллиматорного типа является КП университета штата Огайо [32], предназначенный для измерения характеристик рассеяния (в том числе поляризационных сигнатур) радиолокационных объектов на масштабных моделях с максимальным размером до 1,3 м. В состав этого КП входит БЭК размерами  $12 \times 6 \times 18 \text{ м}^3$ , внутри которой установлен коллиматор в виде параболического зеркала размером  $4,8 \times 4,8 \text{ м}^2$  с вынесенной системой облучателей. Система облучателей представляет собой набор широкополосных рупоров, перекрывающих диапазон частот от 1 до 100 ГГц. Исследуемая модель поддерживается малоотражающим кронштейном специальной формы. Высокая точность ориентации модели обеспечивается введением двух передающих телевизионных трубок, данные с которых об угловом положении модели вводятся в центральную ЭВМ. Устройство управления движением и контроля положения модели обес-

печивает угловую разрешающую способность 0,01°. Работой системы в процессе измерения управляет ЭВМ по специальной программе.

Коллиматорный способ формирования плоского амплитудно-фазового распределения поля хорошо зарекомендовал себя и широко используется при измерениях характеристик рассеяния объектов в дм, см и отчасти в мм диапазонах волн. Однако на более коротких волнах этот способ предъявляет весьма жесткие требования к точности выдерживания формы и чистоте обработки рабочих поверхностей коллиматора, а также (для линзовых коллиматоров) к однородности материала, из которого он изготовлен. Например, отклонение формы поверхности зеркала коллиматора всего лишь на 0,07  $\lambda$  от расчетного значения вызывает изменение амплитуды коллимированного поля на 0,5 дБ [13]. Очевидно, что обеспечить такую точность в СММ диапазоне длин волн чрезвычайно сложно по известным технологическим причинам. Кроме того, максимальный электрический размер объекта, исследуемого этим способом, также ограничен необходимой точностью изготовления коллиматора.

В см и мм диапазонах волн нашел применение метод ЭДМ, основанный на использовании открытых резонаторов [33-36]. Сущность метода заключается в том, что в открытый резонатор под некоторым углом к его оси вводится полупрозрачная диэлектрическая пластина. Резонатор с пластиной находится в свободном пространстве. При резонансе электромагнитное поле в резонаторе можно представить в виде двух волн, распространяющихся навстречу друг другу вдоль оси резонатора, и двух волн, отраженных от пластины и излучаемых в пространство в противоположных направлениях. Если в поле направленного из резонатора излучения поместить рассеиватель, то собственная частота резонатора изменится. Относительная расстройка  $\Delta\omega/\omega_S$  резонансной частоты связана с величиной ЭПР исследуемого рассеивателя зависимостью

$$|\Delta\omega/\omega_S| \cong |R|^2 \sqrt{\sigma} / 4\sqrt{\pi} |k_S|^2 a b l', \quad (1)$$

где  $\omega_S$  – собственная частота колебаний резонатора с пластиной;  $R$  – коэффициент потерь зеркала эквивалентного резонатора;  $\sigma$  – ЭПР рассеивателя;  $a$  и  $b$  – размеры зеркал открытого резонатора;  $l'$  – расстояние между зеркалами эквивалентного резонатора (без диэлектрической пластины);  $k_S = \omega_S / c$ ;  $c$  – скорость света.

Этот способ, в принципе, обеспечивает возможность физического моделирования в СММ диапазоне волн, поскольку открытые резонансные структуры хорошо работают в этом диапазоне благодаря достаточно большому отношению поперечных размеров зеркал к длине волны,

обеспечивающему применимость принципов квазиоптики. Однако имеется ряд существенных недостатков, препятствующих реализации этого способа для измерения характеристик рассеяния объектов в указанном диапазоне волн. Эти недостатки заключаются в следующем.

Наличие высокодобротной резонансной системы, которая определяет чувствительность измерений по этому способу, требует обеспечения очень высокой частотной стабильности источника излучения – генератора. Так, например, для регистрации величины ЭПР порядка 1 см<sup>2</sup> на частоте 30 ГГц ( $\lambda = 10$  мм) требуется долговременная относительная нестабильность частоты  $\Delta\omega/\omega$  не более чем  $10^{-7}$  [13], что само по себе составляет большую проблему даже в длинноволновой части мм диапазона волн.

Высокая долговременная стабильность частоты требует обеспечения соответствующей долговременной температурной и вибрационной стабильности всех элементов конструкции высокочастотной части измерительной установки. Этим требованиям чрезвычайно сложно удовлетворить в СММ диапазоне волн, так как определяющим параметром является стабильность характерных резонансных размеров по отношению к длине волны. Например, при  $\Delta\omega/\omega = 10^{-9}$  ( $\lambda \cong 1$  мм) необходимо обеспечить такого же порядка долговременную стабильность расстояния между зеркалами открытого резонатора. При типичном расстоянии около 100 мм это дает величину требуемой стабильности размеров порядка  $10^{-7}$  мм. Получить такую термостабильность размеров резонатора, в принципе, возможно, если использовать дорогостоящие конструкционные материалы с очень малым температурным коэффициентом расширения и обеспечивать при этом высокую степень теплоизоляции всей высокочастотной части измерительной установки путем помещения ее в термоизолирующую камеру. Однако и этих мер может оказаться недостаточно, так как механические вибрации, вызванные, к примеру, работой электромеханического привода системы позиционирования объекта, движением транспорта вблизи лабораторного здания, хождением обслуживающего персонала, будут оказывать очень сильное мешающее воздействие на резонансную систему. Кроме того, виброчувствительность такой измерительной установки будет возрастать при укорочении длины волны.

Наконец, указанный способ предъявляет высокие требования к чистоте обработки рабочих поверхностей зеркал открытого резонатора, причем при увеличении размеров рассеивателя необходимо не только пропорционально увеличивать линейные размеры зеркал, чтобы поддерживать достаточную однородность поля в рабочем объеме, но также обеспечивать высокую чистоту об-

работки зеркал на большей площади. При этом возникают ограничения на максимальные размеры измеряемого объекта, аналогичные ограничениям коллиматорных методов и обусловленные технологическими пределами и требованиями точности измерений.

Таким образом, большие технические, технологические и экономические трудности не позволяют в настоящее время использовать метод физического моделирования с помощью открытых резонаторов в терагерцевом диапазоне частот.

В ряде крупных национальных исследовательских центров по разработке перспективных радиолокационных систем, в частности, в Лаборатории Линкольна и Лаборатории субмиллиметровой техники Массачусетского технологического института (США), в Национальной радарной лаборатории по моделированию (Великобритания) и др. ведутся систематические исследования, направленные на расширение диапазона частот радиолокации выше 30 ГГц вплоть до 3 ТГц [14, 36-42]. С помощью систем СММ диапазона, включающих твердотельные передатчики на основе частотных синтезаторов, усилители-умножители и приемники на основе диодов Шоттки (на частотах ниже 700 ГГц) [41] или многочастотные СММ газоразрядные лазеры с оптической накачкой и высокочувствительные сверхширокополосные приемники на основе германия или антимонида индия, охлаждаемые жидким гелием (на частотах выше 700 ГГц) [36-39], моделируется работа РЛС мм диапазона волн. На уменьшенных моделях радиолокационных целей (военно-транспортных средств, кораблей и т. п.) в режиме точечного сканирования по цели идентифицируют источники локальных отражений – так называемые «блестящие точки», информация о которых необходима для решения задач радиопеленгации, радиолокационной скрытности, распознавания и пр. Указанные СММ системы являются очень дорогими и сложными, так как требуют прецизионной точности при изготовлении своих компонентов. Однако, несмотря на это, по мнению специалистов, моделирование работы РЛС мм диапазона с помощью систем СММ диапазона все же является более дешевым по сравнению с натурными исследованиями [42].

**2. Выбор направления и обоснование исследований.** Помимо радиолокационных исследований, требующих, как правило, создания больших, сложных и чрезвычайно дорогостоящих компактных полигонов, существует огромное число научных исследований и приложений, где совершенно нет необходимости моделировать условия «свободного пространства» в большом объеме. Часто вполне достаточно рабочего объема в несколько кубических дециметров или даже сантиметров, чтобы поместить туда исследуемый

объект или его масштабную модель и провести все необходимые измерения без больших затрат времени и средств.

Характерным примером такого рода исследований является изучение рассеяния и поглощения света микрочастицами различной формы, состава и происхождения путем масштабного моделирования «вниз» по частоте в микроволновую область, используя увеличенные модели микрочастиц [43-46]. Поскольку отношение длин волн СВЧ излучения и видимого света составляет примерно  $10^5$ , в СВЧ диапазоне легко создавать (например, путем механической обработки) модели частиц какой угодно формы с параметром дифракции  $X < 1$  ( $X = 2\pi b / \lambda$ ;  $b$  – характерный размер частицы;  $\lambda$  – длина волны), нетрудно ориентировать их требуемым образом, а вещество моделей подобрать таким, чтобы его оптические постоянные в диапазоне СВЧ близко соответствовали оптическим постоянным интересующих нас частиц в оптическом диапазоне.

В БММ и СММ диапазонах волн можно моделировать рассеяние света на относительно «больших» частицах естественного или антропогенного происхождения с параметром дифракции  $X > 1$ . К таким частицам можно отнести, например, естественные и искусственные аэрозоли, пыль, продукты сгорания и пр. Эти исследования в научном плане важны для радиоастрономии (моделирование рассеяния и ослабления света на межзвездных частицах с целью определения формы, состава и происхождения последних [43, 47]), для биомедицины (моделирование оптических свойств частиц биологического происхождения, рассеяния света на макромолекулах, вирусах и бактериях [43]), а в прикладном – для радиометеорологии [48], для развития методов экологического и технологического контроля и пр. [43]. Измерения можно проводить на модельных частицах, имеющих размеры от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров. Ясно, что размеры рабочего объема (безэховой зоны), в который помещают модель, имеют такой же порядок малости.

Существует также множество малоразмерных, но весьма сложных для моделирования объектов, изучение рассеивающих свойств которых на БММ и СММ волнах представляет определенный интерес. Сюда можно отнести, например, такие объекты естественного происхождения, как различные виды насекомых, мелких животных и птиц. Исследование подобных объектов в лабораторных условиях, очевидно, целесообразнее проводить прямо на натуральных образцах, без использования каких-либо физических моделей. Отдельные экземпляры или группы объектов можно помещать в сравнительно небольшой рабочий объем и непосредственно исследовать «*in vivo*» или «*in vitro*». Такая инфор-

мация может оказаться полезной в связи с перспективами развития робототехники и нанотехнологий, а также для изучения биологического действия ТГц излучения.

Для получения условий «свободного пространства» в столь небольших объемах и проведения всех необходимых исследований нет необходимости создавать сложные и дорогие компактные и даже мини-КП на основе БЭК и различного рода коллиматоров. Для указанных целей можно использовать относительно простые, удобные и экономичные МКП [49-52], построенные на основе иных принципов формирования поля в рабочем объеме [53]. МКП, реализующие новый предложенный нами метод «квазиоптического волноводного моделирования» (КВМ) [54-56], не требуют для своей реализации ни сложных технологий, ни прецизионной точности выполнения, ни обеспечения специальных условий эксплуатации. В методе КВМ используются уникальные электродинамические свойства КО направляющих структур класса ПДВ, позволяющие этим структурам играть роль своеобразной БЭК и коллиматора одновременно.

На основании проведенного выше литературного обзора и анализа можно сказать, что к настоящему времени сформировалось новое научное направление – физическое моделирование электромагнитного рассеяния в КО направляющих структурах.

На рис. 2 представлена структурная схема развития научного направления и очерчен круг исследований, которые необходимо провести для решения данной проблемы.

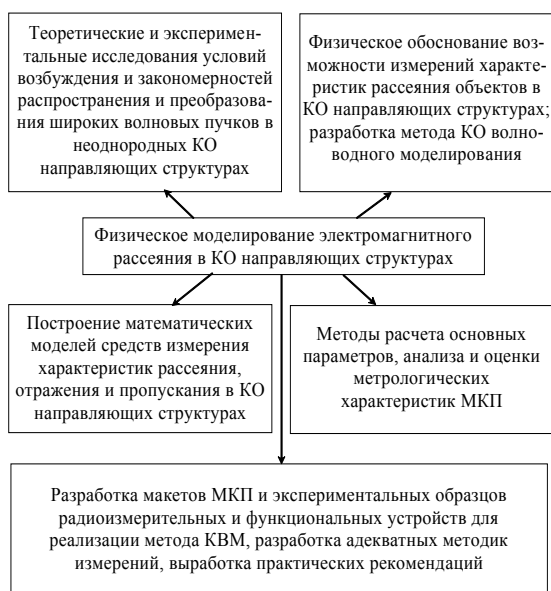


Рис. 2. Структурная схема развития научного направления

Основой направления является метод КО волноводного моделирования, описанный в следующем разделе.

**3. Метод квазиоптического волноводного моделирования.** Нами предложен и развит новый экономичный лабораторный метод исследования характеристик рассеяния физических объектов в БММ и СММ диапазонах волн – метод КО волноводного моделирования (КВМ) [54-56]. В методе КВМ используются уникальные электродинамические свойства КО направляющих структур класса ПДВ с импедансными границами. Идея метода состоит в том, что рассеиватель (т. е. исследуемый объект или его масштабная модель) помещается в КО линию передачи класса ПДВ (рис. 3), в которой возбуждается рабочая волна (основная мода). Этой волной при выполнении определенных условий облучается рассеиватель. Рассеянное излучение транслируется по ПДВ в зону приема, где из принятого излучения выделяется эта же основная мода и по ее измеренным волноводным параметрам – коэффициентам отражения и прохождения – определяются характеристики рассеяния объекта в свободном пространстве, которые непосредственно связаны с указанными волноводными параметрами. При этом ПДВ выполняет следующие функции: формирует квазиплоскую падающую волну в пределах рабочего объема; передает с малыми потерями рассеянную волну с полезной информацией об объекте исследования в зону приема; обеспечивает эффективное очищение рассеянного поля в зоне приема от паразитных мод; экранирует рабочий объем от внешних мешающих факторов; обеспечивает экологическую защиту внешней среды и персонала от вредного влияния рассеянных электромагнитных полей.

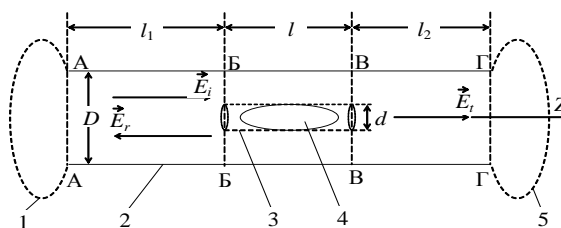


Рис. 3. Схема, поясняющая принцип метода КВМ: 1 – зона излучения, совмещенная с зоной приема отраженной волны; 2 – ПДВ; 3 – рабочий объем; 4 – исследуемый объект (рассеиватель); 5 – зона приема прошедшей волны

Ввиду исключительно важной роли, которую играет ПДВ в методе КВМ, необходимо дать краткую характеристику волноведущим КО структурам этого класса.

Впервые КО волноводы этого класса были рассмотрены в теоретической работе [57]. В ней волновод вида «полый канал в безграничном диэлектрике» был предложен для целей передачи волн оптического диапазона. Авторы работы – *E. A. Marcatili* и *R. A. Shmeltzer* – нашли структуру полей и вычислили затухание волн, распростра-

няющихся в таком волноводе. Пионерский характер этой работы, как справедливо отмечено Ю. Н. Казанцевым [58], заключается в том, что впервые широкий волновод такого вида рассматривался как средство передачи электромагнитной энергии. В дальнейшем этот волновод был модифицирован и предложен в качестве линии передачи волн СММ диапазона [6]. Модифицированный ПДВ представляет собой круглую толстостенную полую трубу, выполненную из диэлектрического материала с потерями, с гладкой либо профилированной внутренней поверхностью канала. Диэлектрическая труба помещается в несущую металлическую трубу, обеспечивающую жесткость конструкции и электромагнитную экранировку. Эта разновидность ПДВ получила название «полюй диэлектрический лучевод» (ПДЛ) [4]. Благодаря удачному сочетанию полезных свойств – отсутствию периодических изменений параметров волнового пучка вдоль направления распространения, гладкому симметричному амплитудному и практически плоскому фазовому распределению поля основной моды  $HE_{11}$ , широкому диапазону рабочих частот при умеренном затухании, а также технологичности и удобству в эксплуатации ПДЛ оказался пригодным для использования в качестве базовой линии передачи при создании устройств и компонентов КО трактов в БММ и СММ диапазонах волн. На базе ПДЛ в ИРЭ НАН Украины был создан комплекс КО радиоизмерительных приборов общего применения [3-5], обеспечивший практически все основные виды радиоизмерений в широком диапазоне БММ и СММ длин волн и сыгравший большую роль в процессе освоения СММ участка электромагнитного спектра в нашей стране и в странах СНГ.

В работах [58-71] были исследованы широкие волноводы различной формы со всевозможными типами граничных структур, условия их оптимального возбуждения, выявлены и подробно изучены общие свойства полей мод и их характеристик распространения, что позволило объединить различные виды этих волноводов в отдельный класс. Важный вклад в теорию широких диэлектрических волноводов внесли E. Snitzer [72], предложивший, кроме того, удобную систему классификации волноводных мод, а также J. J. Degnan [73]. Последний исследовал поля линейно поляризованных мод (псевдомод) на выходе ПДВ в зоне Френеля и в зоне Фраунгофера и предложил использовать единую систему обозначений в Snitzer-формате при рассмотрении полей в диэлектрических волноводах и в волноводных лазерах, которая в настоящее время является общепринятой. Следует также отметить работы C. Dragone [74, 75], посвященные изучению характеристик  $HE_{11}$  моды в ПДВ с импедансными граничными структурами различных типов.

Формально к волноводам класса ПДВ принадлежат линии передачи в виде канала круглой, прямоугольной или иной формы поперечного сечения, больших по сравнению с длиной волны  $\lambda$  поперечных размеров, в котором для основных (так называемых «быстрых») распространяющихся мод выполняются следующие условия [57]:

$$ka \gg 1, \quad \left| \frac{\gamma_{nm}}{n_0 k} - 1 \right| \ll 1, \quad (2)$$

где  $a$  – характерный поперечный размер канала;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\gamma_{nm}$  – коэффициент распространения моды с азимутальным  $n$  и радиальным  $m$  индексами;  $n_0 = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  – показатель преломления среды, заполняющей канал. При выполнении вышеуказанных условий на внутренней границе канала справедливы эквивалентные граничные условия импедансного типа

$$\frac{E_\varphi}{H_z} = Z_t, \quad \frac{E_z}{H_\varphi} = -Z_z, \quad (3)$$

где  $Z_t$  и  $Z_z$  – соответственно поперечный и продольный импедансы,  $E_\varphi$ ,  $E_z$  и  $H_\varphi$ ,  $H_z$  – тангенциальные составляющие соответственно электрического и магнитного поля на границе волноводящего канала. Ю. Н. Казанцев [58, 65] показал, что при анализе электромагнитных полей основных быстрых мод в волноводах класса ПДВ действие границ волноводящего канала произвольной формы и структуры можно заменить эквивалентными граничными условиями импедансного типа (3). Этот прием позволяет избежать сложных и громоздких выкладок при выводе дисперсионных уравнений стандартным методом сшивания тангенциальных компонентов полей на границе раздела, зависящих от типа волновода, и получать относительно простые и достаточно точные приближенные дисперсионные уравнения, допускающие определенные обобщения.

Канал ПДВ может быть образован граничными структурами различного вида: диэлектрическими, слоисто-диэлектрическими, газодиэлектрическими, металлодиэлектрическими, трубчато-диафрагменными, магнитодиэлектрическими и т. п. Внутренняя граница канала может представлять собой как гладкую, так и специальной формы поверхность (например, гофрированную). Характерной особенностью ПДВ является то, что хотя граничные структуры, образующие волноводящий канал различны, эти КО системы обладают рядом общих свойств (что и позволило объединить их в один класс – «полюй диэлектрический волновод»). В частности, распространяющиеся моды разных ПДВ имеют близкие структуры полей и постоянные распространения. Од-

нако коэффициенты затухания как основной моды, так и мод высших порядков для каждой граничной структуры могут существенно различаться. Последнее обстоятельство имеет большое значение и должно обязательно учитываться при выборе базовой линии передачи для любой КО радиоизмерительной системы на основе ПДВ, так как этим определяется эффективность самофильтрации, т. е. способность системы поддерживать квазиодномодовый режим работы.

Благодаря малости углов скольжения парциальных плоских волн Бриллюэна, формирующих основную моду ПДВ, в некоторой внутренней околоосевой области волноведущего канала образуется квазиплоское амплитудно-фазовое распределение электромагнитного поля. Эта область квазиплоского поля может быть достаточно далеко расширена в поперечном направлении путем соответствующего выбора размеров канала, а благодаря хорошим волноведущим свойствам ПДВ – имеет значительную аксиальную протяженность и, следовательно, в принципе может быть использована в качестве рабочего объема для целей ЭДМ. Это обстоятельство в совокупности со способностью некоторых видов ПДВ эффективно подавлять побочные (высшие) моды, возбуждающиеся на различных внутренних неоднородностях, составляют физическую основу метода КВМ.

В методе КВМ в отличие от известных методов ЭДМ формирование плоского амплитудно-фазового распределения поля падающей волны в рабочем объеме осуществляется без использования специальных коллимирующих средств, требующих прецизионной точности выдерживания формы и чистоты рабочих поверхностей. Роль такого коллимирующего устройства выполняет ПДВ, который благодаря своим электродинамическим свойствам обеспечивает необходимую точность формирования поля в рабочем объеме.

Сравнительный анализ различных видов КО волноводов класса ПДВ, различающихся формой волноведущего канала и граничными структурами, показал, что с точки зрения применимости того или иного вида ПДВ для реализации метода КВМ, решающее значение имеет эффективность самофильтрации основной волноводной моды, которая зависит от граничной структуры. При этом также очень важно обеспечить хорошее электрическое согласование стенок волноведущего канала с его внутренним пространством, чтобы минимизировать паразитные вторичные отражения, которые могут возникать между рассеивателем и стенками ПДВ. Эти отраженные от стенок канала волны, попадая в рабочий объем, могут существенно нарушить распределение поля вокруг рассеивателя и привести к искажению его диаграммы рассеяния, в частности, к угловому смещению минимумов

лепестков и изменению их относительных уровней, к появлению ложных боковых лепестков в диаграмме рассеяния и т. п. Поэтому при выборе ПДВ для указанной цели наиболее подходят ПДВ вида ПДЛ с гофрированными и многослойными граничными структурами, обеспечивающими максимальную эффективность самофильтрации и наилучшее согласование на границе воздух – диэлектрик. Наиболее целесообразными формами волноведущего канала являются круглая и прямоугольная, однако если возникают задачи проведения точных поляризационных измерений на различных (не обязательно линейных) поляризациях, то в этом случае предпочтение следует отдать ПДЛ с круглой формой волноведущего канала.

Исходя из того, что на границе волноведущего канала выполняются граничные условия импедансного типа, с использованием леммы Лоренца были найдены комплексные амплитуды волноводных мод, возбуждающихся при рассеянии на неоднородности, локализованной внутри ПДВ. Это позволило получить все волноводные аналоги характеристик рассеяния для рассеивающего тела, определяемые через соответствующие волноводные параметры – коэффициенты отражения и прохождения [50, 51].

Так, в частности, при падении моды с индексом  $i$  на рассеиватель внутри ПДВ имеет место следующее соотношение для сечения экстинкции (величины, характеризующей ослабление энергии прошедшей волны по сравнению с падающей волной, обусловленное взаимодействием последней с рассеивателем):

$$C_{ext}^w = \frac{N_i \operatorname{Re} c_{+i}}{2}, \quad (4)$$

где  $N_i$  – норма моды;  $c_{+i}$  – комплексный коэффициент прохождения моды.

Это выражение является волноводным аналогом известной оптической теоремы, которая выражает тот факт, что экстинкция в свободном пространстве зависит только от амплитуды рассеяния в направлении «вперед», хотя является результатом как поглощения электромагнитной энергии в материале рассеивателя, так и ее рассеяния во всех направлениях. Полученное выражение позволяет сформулировать следующий вывод: если в пределах объема, занимаемого рассеивающим объектом в волноводе, сформировать квазиплоское поле и свести к минимуму переотражения между объектом и стенками волновода, то с помощью коэффициента прохождения волноводной моды можно определить экстинкцию для этого объекта в свободном пространстве в поле плоской волны.

При выполнении указанных условий можно установить связь между комплексным коэффициентом прохождения  $c_{+i}$  моды в волноводе



и амплитудой рассеяния  $X(0^\circ)$  волны в направлении «вперед» для свободного пространства

$$X(0^\circ) = \frac{k^2 N_i c_{+i}}{2\pi}, \quad (5)$$

а также установить аналогичную связь между амплитудой обратного рассеяния  $X(180^\circ)$  волны в свободном пространстве и комплексным коэффициентом отражения  $c_{-i}$  моды в волноводе

$$X(180^\circ) = \frac{k^2 N_i c_{-i}}{2\pi}, \quad (6)$$

где  $k$  – волновое число.

С помощью выражения (6) и стандартного определения сечения обратного рассеяния (радиолокационной однопозиционной ЭПР) можно определить сечение обратного рассеяния объекта в волноводе

$$C_b^w = \frac{k^2 N_i^2 |c_{-i}|^2}{\pi}. \quad (7)$$

Сечение поглощения  $C_{abs}$  определяется разностью между сечением экстинкции и полным сечением рассеяния:  $C_{abs} = C_{ext} - C_{sc}$ .

Если рассеивающий объект непоглощающий, то в ПДВ, как и в свободном пространстве, между полным сечением рассеяния  $C_{sc}^w$  и сечением экстинкции  $C_{ext}^w$  имеет место соотношение

$$C_{sc}^w = C_{ext}^w. \quad (8)$$

Следовательно, полное сечение рассеяния непоглощающего объекта может быть определено по результатам измерения его сечения экстинкции в волноводе.

Установленные взаимоднозначные соответствия между наблюдаемыми величинами – коэффициентами отражения и пропускания волноводной моды на объекте, помещенном в волновод класса ПДВ, – и характеристиками рассеяния этого же объекта в свободном пространстве в поле плоской волны являются теоретической основой метода КВМ.

С целью теоретического подтверждения полученных результатов на характерном объекте, для которого строго решена задача рассеяния в свободном пространстве, нами рассмотрена и решена задача волноводного рассеяния на идеально проводящей сфере радиуса  $b$ , расположенной в круглом ПДВ радиуса  $a$  [76]. Получены аналитические выражения, позволяющие определить сечения обратного рассеяния и экстинкции указанного объекта через коэффициенты отражения и прохождения основной  $HE_{11}$ -моды, геометрические и материальные параметры ПДВ. Проведено численное сравнение результатов расчета эффектив-

ности обратного рассеяния  $\sigma_b = C_b / \pi b^2$  и эффективности экстинкции  $\sigma_{ext} = C_{ext} / \pi b^2$  для случая рассеяния плоской однородной волны на сфере в свободном пространстве с соответствующими данными, полученными для сферы в ПДВ. Оно показало высокую степень их согласия в широкой области изменения параметра дифракции  $kb = 2\pi b / \lambda$ , в том числе в наиболее интересной резонансной области (рис. 4, 5).

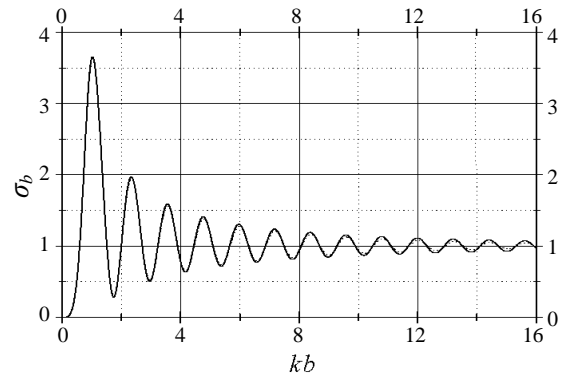


Рис. 4. Зависимость эффективности обратного рассеяния идеально проводящей сферы от параметра дифракции  $kb$ : —  $\sigma_b^f$  – в свободном пространстве; ----  $\sigma_b^w$  – в ПДВ ( $ka=38$ )

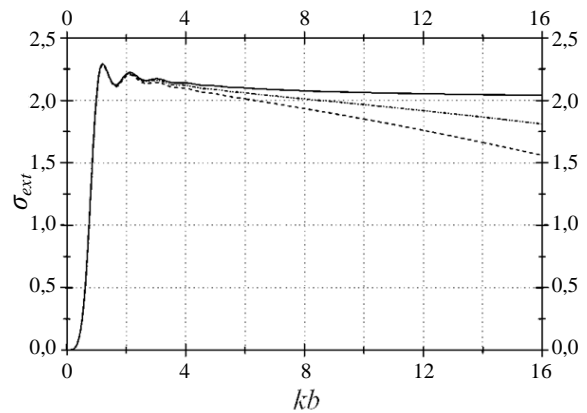


Рис. 5. Зависимость эффективности экстинкции идеально проводящей сферы от параметра дифракции  $kb$ : —  $\sigma_{ext}^f$  – в свободном пространстве; ----  $\sigma_{ext}^w(1)$  – в ПДВ ( $ka=38$ ); -·-·-·  $\sigma_{ext}^w(2)$  – в ПДВ ( $ka=55$ )

Ход кривых в правой части рис. 5 объясняется тем, что для сферы внутри ПДВ с ростом ее параметра дифракции  $kb$  при фиксированном значении волноводного параметра  $ka$  начинает все существеннее сказываться неравномерность поля падающего пучка (интенсивность волны  $HE_{11}$  падает по мере приближения к границе ПДВ). Вследствие этого вклад в экстинкцию дифракционных лучей по мере увеличения  $b/a$  ослабевает и в кон-

це концов эффективность экстинкции в ПДВ стремится к своему естественному геометрическому пределу, равному единице. Разумеется, этот предел наступает тем позже, чем больше параметр  $ka$ . Однако, как следует из расчетных оценок, относительное отклонение эффективности экстинкции идеально проводящей сферы в свободном пространстве от эффективности экстинкции сферы в круглом ПДВ не превышает 0,8 дБ или около 20 % вплоть до значений  $b/a \approx 0,3$ . Таким образом, выбирая диаметр ПДВ достаточно большим, можно с удовлетворительной для практики точностью моделировать в волноводе условия рассеяния плоской волны в направлении «вперед».

Проведенные теоретические оценки методических погрешностей измерения эффективностей обратного рассеяния и экстинкции эталонных сферических объектов показали, что метод обеспечивает достаточно высокую для большинства практических применений точность измерений характеристик обратного и прямого рассеяния в широкой области изменения электрических размеров объекта. Наиболее точные результаты измерений методом КВМ следует ожидать при использовании волноводной моды  $HE_{11}$  в качестве облучающей волны, а также в качестве принимаемой волны, несущей информацию о рассеивающих свойствах объекта. Использование других типов волн или их комбинаций с основной модой  $HE_{11}$  неизбежно ведет к ухудшению точности и к сужению пределов измерений [76].

Результаты теоретических исследований, посвященных анализу КО волновода класса ПДВ как формирователя поля в методе КВМ, привели к разработке методик расчета и оценки основных параметров ПДВ для реализации метода в БММ и СММ диапазонах волн [77]. Изучены условия, при которых ПДВ обеспечивает формирование заданного квазиплоского амплитудно-фазового распределения падающего поля волны  $HE_{11}$  на рассеивателе, и получены аналитические соотношения, позволяющие производить численные оценки размеров рабочего объема и выбор необходимых параметров ПДВ. Установлены критерии качества поля в рабочем объеме, рассмотрены методы расчета и оценки основных параметров ПДВ, обеспечивающих требуемую чистоту поля по заданным критериям [77, 78].

С помощью теории волноводных мод получены соотношения, позволяющие с достаточной для практики точностью рассчитывать и оптимизировать с учетом многомодовости ПДВ основные характеристики КО электродинамической структуры, предназначенной для реализации метода КВМ, а также осуществить оптимизацию этих характеристик [78]. Так, в частности, если задано значение  $\Delta A_r$  максимальной радиальной

(поперечной) амплитудной вариации поля падающей волны во входном сечении Б-Б рабочего объема диаметра  $d$  (рис. 3), то имеет место следующее ограничение на минимально допустимый диаметр  $D$  круглого ПДВ при заданных значениях  $d$  и  $\Delta A_r$ :

$$D \geq 3,54d / \sqrt{\Delta A_r}. \quad (9)$$

На рис. 6 представлена диаграмма, вычисленная по (9), позволяющая осуществить выбор минимального диаметра  $D$  ПДВ при заданных значениях параметров  $d$  и  $\Delta A_r$ .

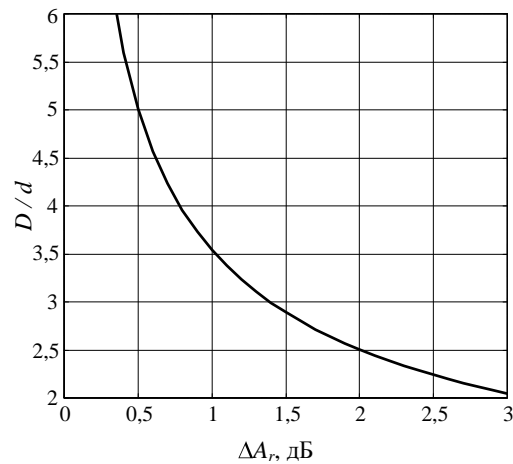


Рис. 6. Диаграмма для оценки значения минимального диаметра ПДВ

Как показали проведенные оценки, фазовый фронт волны  $HE_{11}$  в пределах рабочего объема, отвечающего критерию (9), оказывается настолько близким к фронту плоской волны, что фазовые ограничения, которые обычно являются определяющими для методов ЭДМ в свободном пространстве, практически не влияют на выбор поперечных размеров ПДВ при реализации метода КВМ.

Основное ограничение на максимальный аксиальный (продольный) размер  $l$  рабочего объема в ПДВ в поле волны  $HE_{11}$  определяется формулой

$$l \leq 0,115 D \sqrt{\Delta A_r} \operatorname{Re} \left\{ \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} \right\}^{1/2}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $\Delta A_r$  – предельно допустимое значение амплитудной вариации поля в аксиальном направлении в пределах рабочего объема;  $\epsilon$  – эффективная диэлектрическая проницаемость внутренней границы волноводящего канала.

На рис. 7 представлены диаграммы, вычисленные по (10) для  $\epsilon = 3$ , позволяющие оценить максимальный относительный аксиальный размер  $l/D$  рабочего объема в ПДВ.

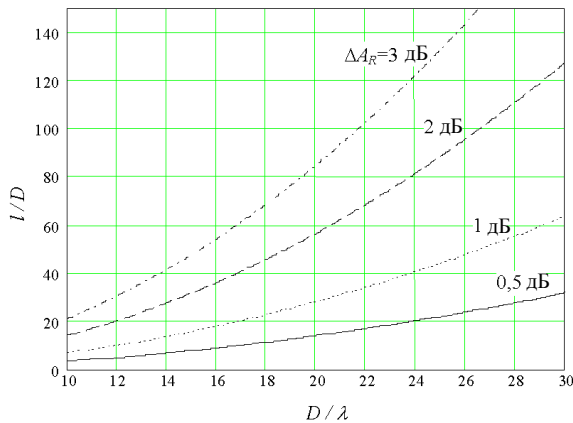


Рис. 7. Диаграммы для оценки максимального аксиального размера рабочего объема в ПДВ

Как видно из формулы (10) и рис. 7, аксиальный размер рабочего объема быстро растет с увеличением параметра  $D/\lambda$  и легко может быть выбран достаточно протяженным путем сравнительно небольшого увеличения диаметра волновода или уменьшения рабочей длины волны.

Относительная аксиальная протяженность  $l/d$  рабочего объема в свободном пространстве растет обратно пропорционально длине волны, в то время как в ПДВ эта величина растет обратно пропорционально квадрату длины волны, т. е. гораздо быстрее [78]. Кроме того, в последнем случае  $l/d$  не зависит от радиальной вариации фазы, так как фазовый фронт волны  $HE_{11}$  в ПДВ остается практически плоским в любом поперечном сечении рабочего объема. Это позволяет сделать вывод о преимуществе использования метода КВМ при исследовании характеристик обратного рассеяния весьма протяженных объектов  $\ll d$ .

Таким образом, в методе КВМ благодаря использованию КО формирующей и направляющей структуры в виде ПДВ, которая обладает очень малым затуханием основной волны, аксиальный размер рабочего объема (по критерию минимизации продольной вариации поля) оказывается значительно большим, чем в методе свободного пространства. Это открывает возможность измерения в лабораторных условиях моделей весьма протяженных рассеивателей, составляющих по длине сотни и даже тысячи длин волн.

На основе аппарата матрицы рассеяния, ориентированных графов и методов теории цепей СВЧ построена математическая модель метода КВМ [78]. Процесс измерения характеристик обратного или прямого рассеяния объекта в рамках этой модели рассматривается как процесс последовательного модового преобразования в КО измерительном тракте МКП, работающем в режиме

измерения коэффициента отражения или, соответственно, прохождения основной волноводной моды. Этот процесс описывается системой линейных алгебраических уравнений, связывающих комплексные амплитуды сигналов на входе и выходе МКП через известные параметры измерительного тракта и неизвестные параметры рассеяния объекта. В рамках данной математической модели измеряемый объект 4 (рис. 3), а точнее, волноводный узел, заключенный между сечениями Б-Б и В-В, представляется как модовый преобразователь, характеризующийся при обратном или прямом рассеянии скалярными комплексными коэффициентами преобразования  $c_{jk}$  ( $j, k = 1, 2$ ), образующими матрицу вида

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Коэффициент  $c_{jk}$  связывает комплексную амплитуду поля  $k$ -й моды, падающей на объект, с комплексной амплитудой поля  $j$ -й моды, рассеянной объектом. Матрица  $\mathbf{C}$  для случая обратного рассеяния является усеченной (точнее, двухмодовой) матрицей обратного отражения, которая, в свою очередь, является подматрицей-клеткой матрицы рассеяния данного волноводного узла. В случае прямого рассеяния  $\mathbf{C}$  является соответственно подматрицей-клеткой матрицы прохождения. Методом ориентированных графов получено топологическое представление системы линейных алгебраических уравнений, описывающих связи между комплексными амплитудами сигналов на входе и выходе КО измерительного тракта. Решение орграфа с использованием правил преобразования топологических цепей такого типа позволило получить уравнение измерительного преобразования и вывести расчетные соотношения для оценки влияния неидеальности параметров радиоизмерительного тракта на погрешности измерений рассеянных сигналов. В частности, получена следующая расчетная формула для оценки предельной погрешности измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) объекта, исследуемого методом КВМ [78]:

$$\Delta\sigma = 20 \lg \left\{ \pm 2 \cdot 10^{G - Q_A - l_1 \Delta\alpha} \right\}^{20}, \text{ дБ}, \quad (12)$$

где  $G$  – динамический диапазон измерений ЭПР;  $Q_A$  – параметр, характеризующий чистоту поля основной волны, возбуждаемой в ПДВ в сечении А-А на выходе из зоны излучения (рис. 8);  $l_1$  – длина ПДВ между зоной излучения и рабочим объемом;  $\Delta\alpha$  – коэффициент погонной самофильтрации ПДВ. Параметр  $Q_B = Q_A + l_1 \Delta\alpha$  характеризует чистоту поля основной волны на входе рабочего объема в сечении Б-Б (рис. 8).

С помощью математической модели получено также уточненное выражение для расчета длины фильтрующей секции ПДВ, обеспечивающей необходимую чистоту поля основной моды на входе рабочего объема МКП при наличии высших мод, возбуждающихся в зоне излучения [58].

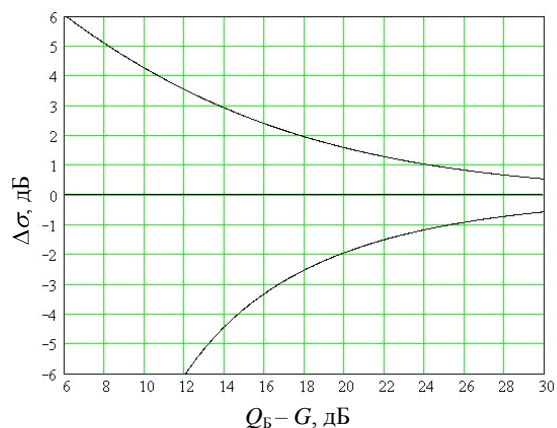


Рис. 8. Зависимость предельной погрешности измерения ЭПР объекта в ПДВ от параметра  $Q_b - G$

Проведенные оценки позволили установить границы применимости метода КВМ и сделать вывод о том, что наиболее целесообразной областью практического использования метода является область БММ и СММ длин волн, хотя в принципе метод допускает распространение на всю мм и даже см области, с одной стороны, вплоть до дальней инфракрасной области – с другой.

**4. Экспериментальное обоснование метода КВМ.** Проведены исследования, направленные на экспериментальное подтверждение полученных теоретических оценок и выводов о возможности использования метода КВМ для измерения энергетических характеристик рассеяния, в частности, таких важнейших энергетических характеристик объекта, как ЭПР и угловые зависимости ЭПР – диаграммы обратного рассеяния (ДОР).

Для экспериментальной проверки метода КВМ и отработки методики измерений ЭПР и ДОР объектов в БММ и СММ диапазонах волн была разработана КО лабораторная установка – экспериментальный макет микрокомпактного полигона МКП [79]. Макет МКП осуществлен на основе круглого ПДЛ с диаметром волноведущего канала 20 мм и комплекса КО лучеводных устройств и компонентов, перекрывающих широкий диапазон длин волн от 2,5 до 0,3 мм [49]. Установка обеспечивает работу в двух измерительных режимах: в режиме приема доплеровских сигналов, отраженных от исследуемого объекта при возвратно-поступательном движении последнего вдоль лучевода, и в гомодинном режиме с компенсацией фона при неподвижной оси вращения

объекта. Первый режим использовался для исследования образцовых объектов, имеющих очень малые значения ЭПР, в том числе для измерения ЭПР ряда небольших металлических сфер в резонансной области рассеяния. Второй режим использовался для измерений ЭПР и ДОР образцовых объектов в виде металлических пластин, цилиндров и моделей элементарных рассеивателей. Полученные результаты по измерению ЭПР и ДОР образцовых объектов подтвердили возможность и целесообразность использования метода КВМ для изучения энергетических характеристик рассеяния в БММ и СММ диапазонах волн.

Экспериментальная проверка метода и отработка методик измерений амплитудно-фазовых характеристик прямого и обратного рассеяния физических объектов или их масштабных моделей осуществлялась с помощью созданного экспериментального макета автоматизированного МКП [51, 52], упрощенная структурная схема которого представлена на рис. 9.

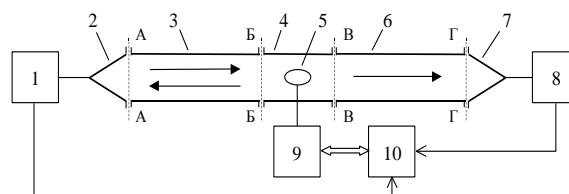


Рис. 9. Упрощенная структурная схема КО волноводного МКП: 1 – система источника излучения, совмещенная с системой приема отраженной волны; 2, 7 – возбудители основной моды ПДВ; 3, 6 – фильтрующие секции ПДВ; 4 – измерительная секция ПДВ; 5 – измеряемый объект; 8 – система приема прошедшей волны; 9 – система позиционирования объекта; 10 – компьютерная система

Высокочастотная часть МКП выполнена на основе широкодиапазонного круглого ПДЛ диаметром 40 мм и комплекса КО лучеводных приборов и элементов, перекрывающих диапазон длин волн примерно от 4 до 2,5 мм. МКП позволяет облучать исследуемый объект, помещенный в ПДЛ, линейно поляризованной  $HE_{11}$  волной и измерять относительные амплитуды и фазы рассеянных в обратном направлении (отраженных), а также рассеянных в прямом направлении (прошедших) волн для любого ракурса объекта при вращении последнего в горизонтальной плоскости в пределах азимутальных углов  $0^\circ \dots 360^\circ$ .

Таким образом, имеется возможность для получения амплитудных диаграмм обратного рассеяния (АДОР) и фазовых диаграмм обратного рассеяния (ФДОР), а также, соответственно, амплитудных диаграмм прямого рассеяния (АДПР) и фазовых диаграмм прямого рассеяния (ФДПР) объекта на заданной частоте и поляризации.

В качестве образцовых рассеивателей использовались прямоугольные металлические пластины, диски, цилиндры и конусы. Для иллюст-

рации эффективности применения метода КВМ для измерения амплитудно-фазовых характеристик рассеяния на рис. 10 представлены некоторые результаты измерений, полученные с помощью осуществленного макета МКП. На рис. 10, а для сравнения изображена также АДОР квадратной пластины, рассчитанная методом геометрической теории дифракции (ГТД) [80, 81], которая демонстрирует хорошее согласие эксперимента с теорией в широкой области значений азимутальных углов там, где метод ГТД обеспечивает достаточно высокую точность.

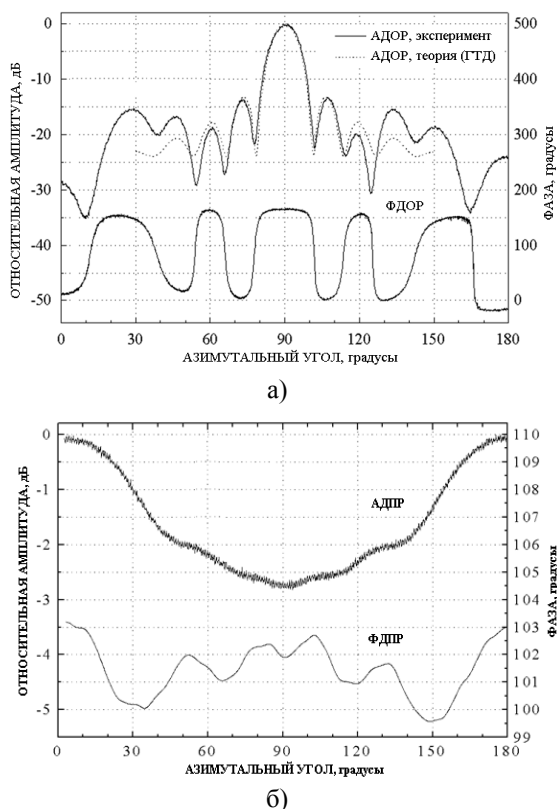


Рис. 10. Амплитудная и фазовая диаграммы обратного (а) и прямого (б) рассеяния квадратной металлической пластины  $10 \times 10$  мм, измеренные методом КВМ на частоте 75 ГГц, поляризация горизонтальная (электрический вектор лежит в плоскости падения волны на пластину)

Возможность использования метода КВМ для изучения поляризационных характеристик рассеяния основана на свойстве некоторых видов ПДВ – поляризационной изотропности, позволяющей передавать по таким ПДВ без искажения сигналы любых видов поляризации. Благодаря этому свойству возникает принципиальная возможность получения экспериментальных данных о поляризационных характеристиках рассеяния объекта, в частности, о комплексных элементах матрицы рассеяния (МР). Как известно, МР может быть получена путем одновременного измерения амплитуд и фаз ортогонально поляризованных компонент волн, отраженных от иссле-

дуемого объекта, при его последовательном облучении двумя ортогонально поляризованными электромагнитными волнами.

Для исследования эффективности применения метода КВМ для измерений МР в БММ и СММ диапазонах волн были разработаны экспериментальные макеты поляриметрического микрокомпактного полигона (ПМКП), осуществленные с использованием разработанного в ИРЭ НАНУ комплекса КО приборов и элементов на основе круглого ПДЛ диаметром 40 мм [82, 83]. ПМКП (рис. 11) представляет собой автоматизированную приемно-передающую измерительную установку гомодинного типа с ортогонально поляризованными приемными каналами.

Измерения осуществляются последовательно для двух ортогональных линейных поляризаций волны, облучающей исследуемый объект в ПДЛ, при полном поляризационном приеме рассеянных волн.

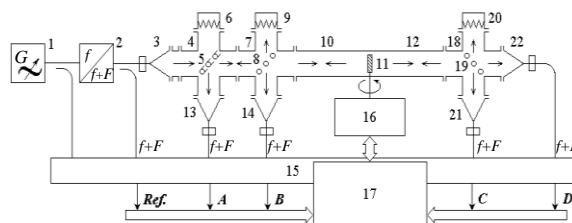


Рис. 11. КО поляриметрический микрокомпактный полигон (ПМКП): 1 – генератор сигналов; 2 – фазовый сдвигатель частоты; 3, 13, 14, 21, 22 – возбуждители ПДЛ; 4, 7, 18 – КО направленные делители мощности; 5, 8, 19 – поляризующие проволочные решетки; 6, 9, 20 – согласованные нагрузки; 10, 12 – секции ПДЛ; 11 – измеряемый рассеиватель; 15 – приемная система; 16 – позиционер; 17 – система управления, сбора, обработки и выдачи данных

Измерительная процедура включает в себя измерение и регистрацию относительных уровней амплитуд и сдвигов фаз ортогональных поляризационных компонент (параллельной и крессовой) отраженного рассеивателем сигнала относительно опорного сигнала, а также дифференциального сдвига фазы между этими компонентами в любом выбранном линейном поляризационном базисе. Таким образом, ПМКП позволяет за два последовательных облучения измерить полную МР объекта, а также так называемую «МР с относительной фазой» (МРО) [84] на заданной частоте при данном угле наблюдения (ракурсе) рассеивателя. Изменяя ракурс рассеивателя посредством программно-управляемого позиционера, можно измерять угловые зависимости модулей и фаз элементов МР и МРО и получать поляризационные диаграммы рассеяния.

В качестве иллюстрации на рис. 12-14 представлены некоторые результаты измерений на длине волны 4 мм угловых зависимостей эле-

ментов  $MР$  и  $MPO$  образцового объекта – металлического цилиндра квадратного сечения  $12 \times 12$  мм, вращаемого вокруг своей оси. Данные получены в собственном линейном поляризационном базисе  $H-V$  ( $H$  означает горизонтальную поляризацию, а  $V$  – вертикальную), здесь же представлены соответствующие теоретические данные, рассчитанные для этого объекта методом геометрической теории дифракции.

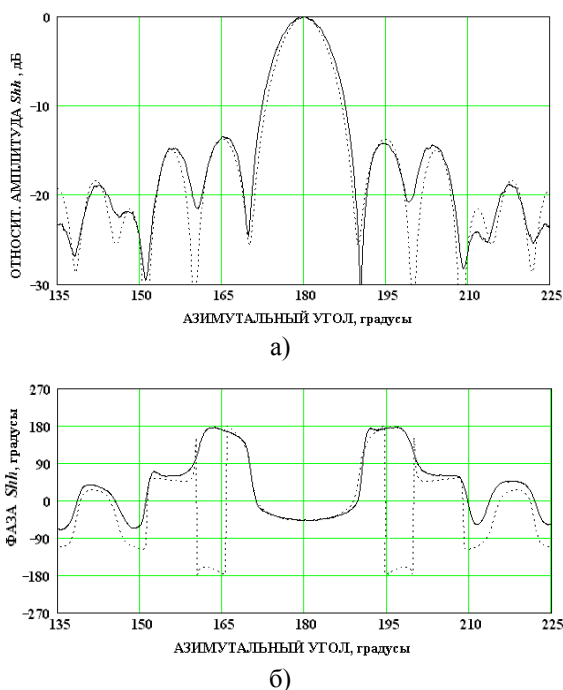


Рис. 12. Амплитудная (а) и фазовая (б) диаграммы обратного рассеяния элемента  $S_{hh}$  матрицы рассеяния металлического цилиндра квадратного сечения в собственном базисе  $H-V$ : — измерение; - - - теория

Как видно из рисунков, имеет место удовлетворительное соответствие измеренных и рассчитанных амплитудных и фазовых ДОР для обеих базисных поляризаций.

Фазовые скачки на  $360^\circ$ , наблюдаемые на рис. 12, б, 13, б и 14, обусловлены чисто аппаратными особенностями применяемых фазометров и могут быть легко устранены при обработке ДОР.

Таким образом, проведенные исследования показали, что предложенный метод КВМ позволяет моделировать и изучать поляризационные характеристики рассеяния физических объектов или их масштабных моделей. Разработанный экспериментальный макет ПМКП может быть использован как основа для создания КО измерителей элементов поляризационной матрицы рассеяния, поляризационных диаграмм рассеяния и других поляризационных характеристик реальных физических рассеивателей или их масштабных моделей в лабораторных условиях в БММ и СММ диапазонах волн.

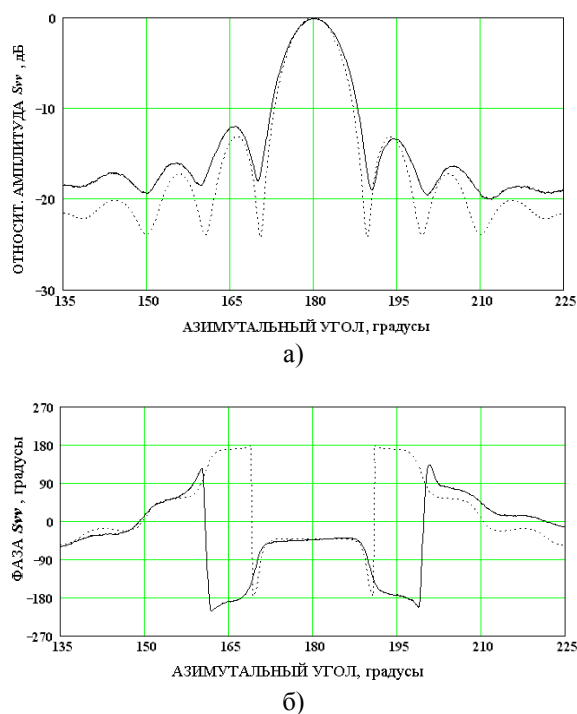


Рис. 13. Амплитудная (а) и фазовая (б) диаграммы обратного рассеяния элемента  $S_{vv}$  матрицы рассеяния металлического цилиндра квадратного сечения в собственном базисе  $H-V$ : — измерение; - - - теория

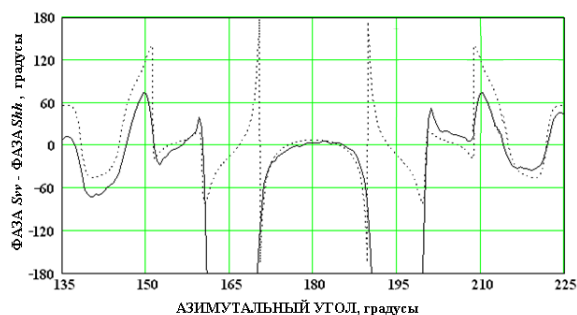


Рис. 14. Дифференциальная фазовая ДОР МРО квадратного цилиндра в собственном базисе  $H-V$ : — измерение; - - - теория

Благодаря прекрасным полосовым свойствам ПДЛ имеется возможность проводить исследования характеристик рассеяния объектов методом КВМ в частотной области. На базе Центра коллективного пользования приборами (ЦКПП) «Терагерцевая квазиоптика» ИРЭ НАН Украины [85] создан экспериментальный макет МКП (рис. 15), позволяющий осуществлять подобные исследования.

Установка включает в себя скалярный анализатор цепей P2-139 фирмы *ELMIKA* [86] для диапазона частот 0,17-0,22 ТГц и КО тракт, выполненный с использованием комплекса широкодиапазонных радиоизмерительных приборов и компонентов, разработанных в ИРЭ НАН Украины на базе ПДЛ с диаметром канала 20 мм [3, 87].



Рис. 15. Экспериментальный макет МКП для измерения ДОР объектов в частотной области 0,17-0,22 ТГц при различных поляризациях

В качестве примера представлены образцы ДОР кругового металлического цилиндра высотой 8 мм и диаметром 6 мм, полученные на этой установке для двух поляризацій – вертикальной (рис. 16, а) и горизонтальной (рис. 16, б).

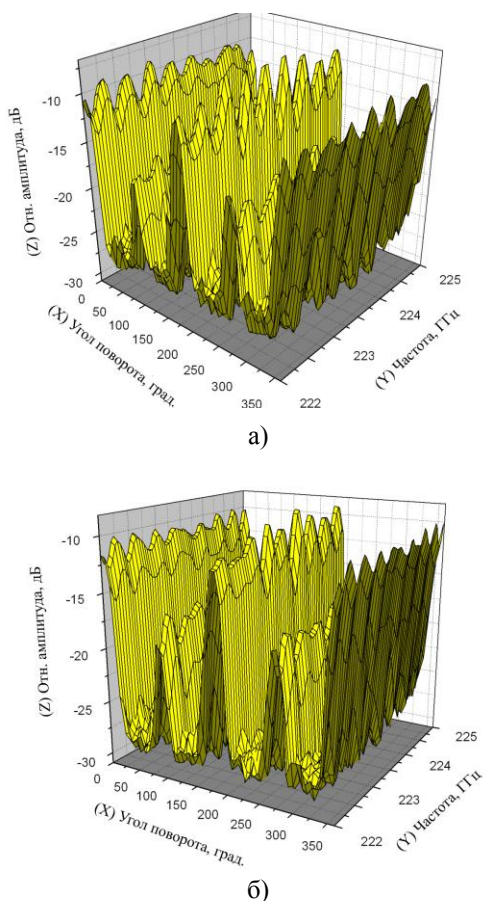


Рис. 16. Частотные зависимости ДОР металлического цилиндра длиной 8 мм и диаметром основания 6 мм, полученные на установке (рис. 15) для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризацій при согласованном поляризаційном приеме

В заключение следует отметить, что благодаря широкополосности ПДЛ, позволяющей не-

прерывно перекрывать диапазон частот в несколько октав, в сочетании с поляризаційной изотропностью и высокой модовой самофильтрацией ПДЛ, появляется возможность проведения широкополосных поляризаційных измерений характеристик рассеяния объектов методом КВМ в ТГц области электромагнитного спектра с помощью ПМКП в сочетании с векторными анализаторами цепей соответствующего диапазона. В частности, появляется возможность моделирования и изучения в широкой полосе частот так называемых «дисперсионных поляризаційных сигнатур» [88] различных радиолокационных, биологических и других объектов, представляющих как научный, так и практический интерес.

Наконец, следует также отметить еще одно ценное качество КО линий передачи класса ПДВ, а именно – возможности передачи по ним больших уровней электромагнитной энергии при высокой степени экологической защиты окружающей среды. В связи с этим открываются большие перспективы использования метода КВМ и соответствующих МКП для проведения научных и прикладных исследований нелинейных эффектов, возникающих при рассеянии электромагнитной энергии большой плотности мощности на некоторых физических объектах, в частности, такие исследования могут представлять интерес для нелинейной радиолокации.

**Выводы.** В работе обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на решение актуальной проблемы физического моделирования процессов электромагнитного рассеяния в ТГц области частот, охватывающей БММ и СММ диапазоны волн. Представлен обзор экспериментальных методов электродинамического моделирования и проведен их критический анализ с точки зрения использования в ТГц области частот.

Изложена научная концепция КВМ характеристик рассеяния физических объектов на основе комплексного использования электродинамических свойств КО направляющих структур класса ПДВ с импедансными границами и фундаментального принципа подобия.

Описан новый научно обоснованный и реализованный метод физического моделирования характеристик рассеяния объектов в КО направляющих структурах класса ПДВ – метод КВМ.

Описаны принципы построения нового класса радиоизмерительных систем для научных и прикладных исследований – КО волноводных МКП, реализующих метод КВМ в БММ и СММ диапазонах волн.

Представлены результаты экспериментального изучения методом КВМ энергетических, амплитудно-фазовых и поляризаційных характеристик рассеяния образцовых физических объектов, полученные с помощью экспериментальных макетов МКП, осуществленных на базе ПДВ и комплексов КО приборов и компонентов, под-

тверждающие основные теоретические предположения, положенные в основу метода КВМ.

Результаты исследований и выработанные рекомендации могут найти практическое применение при создании КО систем физического моделирования характеристик электромагнитного рассеяния в ТГц области частот, а также при экспериментальном изучении рассеивающих свойств различных объектов методом КВМ в указанном диапазоне частот с помощью МКП, которые в ряде случаев являются альтернативой большим, сложным и весьма дорогостоящим системам, используемым для этих целей в настоящее время.

1. Sinclair G. Theory of Models of Electromagnetic Systems // Proc. of the IRE. – 1948. – 36, No. 11. – P. 1364-1370.
2. Стрэттон Дж. Теория электромагнетизма / Пер. с англ. под ред. С. М. Рытова. – М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 539 с.
3. Кулешов Е. М., Яновский М. С., Литвинов Д. Д. и др. Квазиоптические радиоизмерительные устройства миллиметровых и субмиллиметровых волн // Всесоюз. симп. по распространению мм и субмм волн в атмосфере Земли и планет: Тез. докл. – Москва – Горький, 1974. – С. 124-127.
4. Усиков А. Я., Канер Э. А., Трутьев И. Д. и др. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1986. – 368 с.
5. Безбородов В. И., Каменев Ю. Е., Киселев В. К. и др. Квазиоптическая и волноводная радиоизмерительная аппаратура миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн // Междунар. симп. «Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн»: Тез. докл. – Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1994. – 6. – С. 635-637.
6. А.с. 302054 СССР. Диэлектрический лучевод субмиллиметрового диапазона волн / А. Н. Ахизер, А. И. Горюшко, Б. Н. Князьков и др. // Открытия. Изобретения. – 1972. – № 8. – С. 235.
7. Айвазян М. Ц., Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А. Комплект волноводных элементов на основе прямоугольного металлодиэлектрического волновода для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн // III Всесоюз. симп. по миллиметровым и субмиллиметровым волнам: Тез. докл. – Горький, 1980. – С. 53-54.
8. Безбородов В. И., Киселев В. К., Князьков Б. Н. и др. Радиоизмерительные приборы и устройства на основе металло-диэлектрического волновода // Межд. науч.-техн. конф. «Приборы, техника и распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн»: Тез. докл. – Харьков, 1992. – 88 с.
9. Безбородов В. И., Киселев В. К., Князьков Б. Н. и др. Квазиоптическая радиоизмерительная аппаратура коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-92). – Новосибирск, 1992. – 1. – С. 49-53.
10. Безбородов В. И., Киселев В. К., Кулешов Е. М., Яновский М. С. Квазиоптические радиоизмерительные устройства ближнего миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе металлодиэлектрического волновода квадратного сечения // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, № 3. – С. 589-594.
11. Казанцев Ю. Н. Электромагнитные волны в диэлектрических каналах прямоугольного сечения // Радиотехника и электрон. – 1970. – 15, № 6. – С. 1140-1145.
12. Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А. Широкие волноводы прямоугольного сечения с малыми потерями // Радиотехника и электрон. – 1971. – 16, № 6. – С. 1063-1065.
13. Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. – М.: Радио и связь, 1972. – 232 с.
14. Radar reflectivity measurement: techniques and applications // N. C. Currie, editor. – Norwood: Artech House, Inc., 1989. – 754 p.
15. Мицмакер М. Ю., Торгованов В. А. Безэховые камеры СВЧ. – М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.
16. Мицмакер М. Ю. Качество современных безэховых камер и радиопоглощающие материалы // Антенны. – 1980. – вып. 28. – С. 147-164.
17. Emerson W. H. Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers Through the Years // IEEE Trans. – 1973. – AP-21, No. 4. – P. 484-490.
18. Отражательная способность радиолокационных целей (тематический вып.) // Тр. ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон. – 1965. – 53, № 8. – С. 1035-1056.
19. Эффективная площадь отражения сложных радиолокационных объектов (тематический вып.) // Тр. ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон. – 1989. – 77, № 5. – С. 19-29.
20. Варганов М. Е., Зиновьев Ю. С., Астанин Л. Ю. и др. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Под ред. Л. Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1985. – 236 с.
21. Воскресенский Д. И., Воронин Е. Н., Комаров В. М., Нечаев Е. Е. Измерение внешних характеристик антенн с учетом искажающих факторов (обзор) // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1984. – 27, № 2. – С. 4-19.
22. Бескид П. П., Виноградов Е. М., Винокуров В. И. и др. Моделирование и испытания радиооборудования / Под ред. В. И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.
23. System Measurements in Anechoic Chambers // Microwave Journal. – 1980. – 23, No. 2. – 79 p.
24. An Anechoic Chamber for Advanced Research // Microwave Journal. – 1979. – 22, No. 12. – 19 p.
25. Central Target Simulator Facility // Microwave Journal. – 1979. – 22, No. 2. – 19 p.
26. Microwave Anechoic Chamber Kits // Microwave Journal. – 1972. – 15, No. 7. – 54 p.
27. Roll-out chamber checks small antennas from 2-18 GHz // Microwaves. – 1975. – 11, No. 12. – 64 p.
28. Small, high power UHF anechoic shielded chamber // Frequency Technology. – 1970. – 8, No. 6. – 35 p.
29. Аплеталин В. Н., Казанцев Ю. Н., Солосин В. С. Рефлектометры сантиметровых и миллиметровых волн на основе полых металлодиэлектрических волноводов // Радиотехника. – 2005. – № 8. – С. 40-44.
30. Аплеталин В. Н., Казанцев Ю. Н., Зубов А. С., Солосин В. С. Поляризационный рефлектометр // Радиотехника. – 1998. – № 12. – С. 48-51.
31. Sweetman B. Stealth // Interavia. – 1985. – No. 11. – P. 1217-1219.
32. Walton E. K., Young J. D. The Ohio State University compact radar cross-section measurement range // IEEE Trans. Antennas and Propagation. – 1984. – 32, No. 11. – P. 1218-1223.
33. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. – М.: Сов. Радио, 1966. – 475 с.
34. Сидоренко А. И. Применение открытых резонаторов для измерения эффективной площади рассеяния тел // Радиотехника и электрон. – 1969. – 14, № 5. – С. 766-770.
35. Cullen A. L. and Kumar A. The absolute determination of extinction cross-sections by the use of an open resonator // Proc. Roy. Soc. (London). – 1970. – A315. – P. 217-230.
36. Cram L. A. Development of model radar systems between 30 and 900 GHz // The Radio and Electronic Engineer. – 1979. – 49, No. 7/8. – P. 381-388.
37. Waldman J., Fatterman H. R., Duffy P. E. et al. Submillimeter Model Measurements and their Application to Millimeter Radar Systems // Fourth Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and Their Applications. – Miami Beach (USA). – 1979. – P. 49-50.
38. Waldman J., Fatterman H. R., Goodyue W. D. et al. Submillimeter modeling of millimeter radar systems // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. – 1980. – 259. – P. 152-157.
39. Bathe S. E., Prewer B. E., Willis G. Recent advances in the use of submillimeter wave techniques to obtain back scatter information at the UK National Scale Modelling Centre // Proc. 17<sup>th</sup> European Microwave Conf. – Rome. – 1987. – P. 979-990.
40. O'Leary A. D. Millimetrewave systems – past, present and future // IEE Proc. – 1989. – 136, No. 1. – P. 35-52.



41. *Coulumbe M. J., Horgan T., Waldman J. et al.* A 160 GHz polarimetric Compact Range for Scale Model RCS Measurements // 18<sup>th</sup> Antenna Measurement Technical Associating Meeting & Symposium (AMTA'96). – Boston (USA). – 1996. – P. 239-244.
42. Использование лазеров для моделирования работы РЛС миллиметрового диапазона // Радиоэлектрон. за рубежом. – 1981. – № 17. – С. 10-11.
43. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
44. *Greenberg J. M., Pedersen N. E., Pedersen J. C.* Microwave analog to the scattering of light by non-spherical particles // J. Appl. Phys. – 1961. – 32. – P. 233-242.
45. *Вольхин И. Л., Коротаев Н. Н., Мейкляр П. В., Шварц В. М.* Исследование рассеяния света фотографическим слоем методом моделирования на СВЧ // Вестн. Перм. ун-та. Физика. – 1994. – Вып. 2. – С. 203-210.
46. *Вольхин И. Л., Коротаев Н. Н.* Моделирование прохождения света через диэлектрическую частицу с помощью волн СВЧ // 10-я Междунар. Крымская конф. «Микроволны и телекоммуникационные технологии» (СрiMiCo'2000): Материалы конф. – Севастополь. – 2000. – С. 525-526.
47. *Van de Hulst Г.* Рассеяние света малыми частицами. – М.: ИЛ, 1961. – 536 с.
48. *Розенберг В. И.* Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 348 с.
49. *Kiselyev V. K.* Quasi-Optical Installation and Technique for the Measurements of Backward Scattering Characteristics of Radar Targets Models in the Submillimeter Radio Wave Range // The Third International Conf. on Millimeter Wave and Far-Infrared Science and Technology (ICMWFST'94). – Conf. Digest. – Guangzhou (China). – 1994. – P. 504-505.
50. *Kiseliiov V. K., Kushta T. M.* Principles of a New Compact Range Technique for the Submillimeter Wave Region // Proc. 19th Meeting & Symposium AMTA'97. – Boston, Massachusetts (USA). – 1997. – P. 524-528.
51. *Kiseliiov V. K., Kushta T. M., Nesterov P. K.* Investigation of a New Quasioptical Waveguide Modeling Method for Backward and Forward Scattering Study in Millimeter and Submillimeter Wave Bands // Proc. 20th Meeting & Symposium AMTA'98. – Montreal (Canada). – 1998. – P. 78-83.
52. *Kiseliiov V. K., Kushta T. M., Nesterov P. K.* Quasi-Optical Waveguide Modeling Method and Micro-Compact Scattering Range for the Millimeter and Submillimeter Wave Bands // IEEE Transactions on Antennas & Propagations. – 2001. – AP-49, No. 5. – P. 784-792.
53. *Киселев В. К.* Полный диэлектрический волновод – средство формирования поля в методе квазиоптического волноводного моделирования электромагнитного рассеяния // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 1997. – 2, № 1. – С. 134-140.
54. *Кисельов В. К.* Квазиоптичний хвилеводний метод дослідження характеристик розсіяння фізичних об'єктів у субміліметровому діапазоні електромагнітних хвиль // Доп. НАН України. – 1995. – № 11. – С. 60-62.
55. *Kiselyev V. K., Kushta T. M.* Method for Radar Cross Section Measurements in Millimeter and Submillimeter Wave Regions // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1995. – 16, No. 6. – P. 1159-1165.
56. Пат. № 20755 Україна, МПК G 01 R 29/00; G 01 S 13/00. Спосіб вимірювання характеристик розсіяння об'єкта в субміліметровому діапазоні радіохвиль і пристрій для його здійснення / В. К. Кисельов, Т. М. Кушта (Україна). – 2000. – № 4. – 9 с.
57. *Marcatili E. A., Schmeltzer R. A.* Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers // Bell System Tech. Journal. – 1964. – 43, No. 7. – P. 1783-1809.
58. *Казанцев Ю. Н.* Электродинамика широких газовойдиэлектрических и металлодиэлектрических волноводов: Дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. – М., 1973. – 343 с.
59. *Marcatili E. A.* Light transmission in multiple dielectric (gaseous and solid) guide // Bell System Tech. Journal. – 1966. – 45, No. 1. – P. 97.
60. *Мелехин В. Н., Маненков А. Б.* Диэлектрические трубы как волноводы с малыми потерями // Журн. техн. физ.. – 1968. – 38, № 12. – С. 2113-2115.
61. *Marcatili E. A.* Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integral optics // Bell System Tech. Journal. – 1969. – 47. – P. 2071-2102.
62. *Мелехин В. Н., Маненков А. Б.* Диэлектрические трубы – открытые волноводы с малыми потерями и редким спектром // Электроника больших мощностей. – 1969. – Вып. 6. – С. 161-178.
63. *Vershinina L. N., Kazantzev Y. N., Meriakri V. V., Shevchenko V. V.* Submillimetre, quasi-optical transmission lines // European Microwave Conference Handbook. Kent. – 1969. – 174 p.
64. *Казанцев Ю. Н.* Затухание собственных волн в широком волноводе с диэлектрическим покрытием конечной толщины // Радиотехника и электрон. – 1970. – 15, № 1. – 207 с.
65. *Казанцев Ю. Н.* Электромагнитные волны в диэлектрических каналах прямоугольного сечения // Радиотехника и электрон. – 1970. – 15, № 6. – С. 1140-1145.
66. *Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А.* Широкие волноводы прямоугольного сечения с малыми потерями // Радиотехника и электрон. – 1971. – 16, № 6. – С. 1063-1065.
67. *Горошко А. И., Кулешов Е. М.* Исследование полого диэлектрического лучевода миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн // Радиотехника. Харьков. ун-т. – 1972. – Вып. 21. – С. 215-219.
68. *Казанцев Ю. Н., Удалов В. В.* Трубочато-диафрагменный волновод // Известия вузов. Радиофизика. – 1972. – 15, № 10. – С. 1561-1566.
69. *Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А.* Прямоугольные волноводы класса «полый диэлектрический канал» // Радиотехника и электрон. – 1978. – 23, № 10. – С. 2060-2066.
70. *Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А.* Круглые волноводы класса «полый диэлектрический канал» // Радиотехника и электрон. – 1984. – 29, № 8. – С. 1441-1450.
71. *Давидович М. В.* Улучшение самофильтрации мод в полых волноводах с многослойной магнитодиэлектрической оболочкой // Радиотехника и электрон. – 1994. – 39, № 1. – С. 53-61.
72. *Snitzer E.* Cylindrical Dielectric Waveguide Modes // J. Opt. Soc. Am. – 1961. – 51, No. 5. – P. 491-498.
73. *Degnan J. J.* Waveguide laser mode patterns in the near and far field // Applied Optics. – 1973. – 12, No. 5. – P. 1026-1030.
74. *Dragone C.* High-frequency behavior of waveguides with finite surface impedances // Bell System Tech. Journal. – 1981. – 60, No. 1. – P. 89-115.
75. *Dragone C.* Attenuation and radiation characteristics of the HE<sub>11</sub>-mode // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1980. – MTT-28, No. 7. – P. 704-710.
76. *Kiseliiov V. K., Kushta T. M.* A Spherical Scatterer inside a Circular Hollow Dielectric Waveguide // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1997. – 18, No. 1. – P. 151-163.
77. *Киселев В. К.* Оптимизация параметров и расчет квазиоптического волноводного микрокомпактного полигона субмиллиметрового диапазона // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 1998. – 3, № 3. – С. 33-41.
78. *Киселев В. К.* Физическое моделирование электромагнитного рассеяния в квазиоптических направляющих структурах: Дис. докт. физ.-мат. наук. – Харьков, 2002. – 316 с.
79. *Киселев В. К.* Квазиоптическая установка для измерения характеристик обратного рассеяния моделей радиолокационных объектов в субмиллиметровом диапазоне радиоволн // Междунар. науч.-техн. конф. «Современная радиолокация: Тез. докл. – Киев, 1994. – С. 192-193.
80. *Ross R. A.* Radar Cross Section of Rectangular Flat Plates as a Function of Aspect Angle // IEEE Transactions on Antennas & Propagations. – 1966. – AP-14, No. 5. – P. 329-335.

81. *Ross R. A.* Backscattering from Square Plates Illuminated With Vertical Polarization // *IEEE Transactions on Antennas & Propagations.* – 2006. – **AP-54**, No. 1. – P. 272-275.
82. *Киселев В. К., Киселев А. В., Клишко В. А. и др.* Исследование метода квазиоптического волноводного моделирования для измерения элементов матрицы рассеяния в ближнем миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн // *Радиофизика и электроника.* – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2001. – **6**, № 1. – С. 12-21.
83. *Киселев В. К., Мизрахи С. В., Нестеров П. К.* Квазиоптический микрокомпактный полигон для моделирования поляризационных характеристик рассеяния в ближнем миллиметровом диапазоне волн // *Радиотехника.* – 2007. – Вып. 150. – С. 69-74.
84. *Huynen J. R.* Measurement of the Target Scattering Matrix // *Proc. IEEE.* – 1965. – **53**, No. 8. – P. 936-946.
85. [http://www.ire.kharkov.ua/CJU\\_THZ\\_QO-InetPage/index.htm](http://www.ire.kharkov.ua/CJU_THZ_QO-InetPage/index.htm)
86. [www.elmika.com](http://www.elmika.com)
87. <http://www.ire.kharkov.ua/depquasi/quasiuk.html>
88. *Rigger S. and Wiesbeck W.* Wide-Band Polarimetry and Complex Radar Cross Section Signatures // *Proc. IEEE.* – 1989. – **77**, No. 5. – P. 19-29.

**PHYSICAL MODELING  
OF ELECTROMAGNETIC SCATTERING  
IN THE TERAHERTZ RANGE QUASI-OPTICAL  
DIRECTIONAL STRUCTURES**

V. K. Kiseliiov

The paper is devoted to elaboration of the theoretical and experimental basis, methods and recommendations aimed at the development of a new trend in the experimental radiophysics – physical quasi-optical waveguide modeling (QWM) of the

processes of electromagnetic scattering in the near millimeter (NMM) and submillimeter (SMM) wavelength ranges. The methods of experimental research of the electromagnetic scattering processes in the quasi-optical (QO) directional structures of a «low dielectric waveguide» (HDW) type have been developed and generalized. The basis for development of the radio measurement facilities used for physical electrodynamic modeling (EDM) of the object's scattering characteristics in the NMM and SMM wavelength ranges has been elaborated.

**Key words:** terahertz range, quasioptics, quasi-optical waveguide modeling method, microcompact scattering range.

**ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РОЗСІЯННЯ  
У КВАЗІОПТИЧНИХ СПРЯМОВУЮЧИХ  
СТРУКТУРАХ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДІАПАЗОНУ**

В. К. Кісельов

У роботі узагальнено методи експериментального дослідження процесів електромагнітного розсіяння в квазіоптичних спрямовуючих структурах класу «порожнистий діелектричний хвилевід» та наведено основи створення відповідних радіовимірювальних засобів для вирішення проблеми фізичного моделювання характеристик розсіяння об'єктів у терагерцевому діапазоні частот.

**Ключові слова:** терагерцевий діапазон, квазіоптика, метод квазіоптичного хвилеводного моделювання, мікрокомпактний полігон.

*Рукопись поступила 18 июля 2008 г.*