

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ИЗМЕРЕНИЯМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

Я. С. Комиссаров, В. А. Павлюк, Г. Г. Половников
Харьков

1. Экспериментальное изучение свойств дифракционных решеток составляет предмет долголетних и многочисленных исследований, которые проводились, в основном, в оптическом диапазоне длин волн, т. е. в случае, когда длина волны пренебрежимо мала по сравнению с периодом структуры. В настоящей работе обобщен опыт по методике измерений и выбору условий эксперимента при изучении явлений дифракции электромагнитных волн на периодических структурах в случае соизмеримости их периода с длиной падающей волны для систем различной конфигурации. Подобные измерения стали осуществимыми с развитием техники сверхвысокочастотного диапазона и позволяют оценить границы применимости теории, дополнить ее новыми количественными и качественными представлениями. Ряд трудностей, которые возникают при строгом и приближенном аналитическом и численном решении задач дифракции, удается преодолеть экспериментальным путем. В этом случае опыт является связующим звеном между реальными физическими условиями и их теоретической интерпретацией, причем последняя выполняет функцию истолкователя полученных результатов.

2. При постановке и решении задачи дифракции приходится вводить существенные допущения, связанные с идеализацией амплитудного и фазового фронтов падающего поля, условий излучения, протяженности дифракционной структуры, потерь в металле и т. д.

Экспериментальные возможности для осуществления теоретических условий связаны с созданием монохроматического однородного поля и формированием плоского фазового фронта волны на исследуемом объекте, определением размеров структуры и учетом конечной проводимости ее материала. Реализация этих условий может быть осуществлена при проведении экспериментов на измерительной установке, блок-схема которой представлена на рис. 1 (здесь 1 — генератор СВЧ-колебаний; 2 — блок питания; 3 — модулятор; 4 — развязка источника; 5 — волномер; 6 — направленный ответвитель; 7 — излучатель; 8, 14 — детекторные головки; 9 — индикатор; 10 — исследуемый объект; 11 — юстировочное устройство с экраном; 12 — приемная антенна; 13 — аттенюатор; 15 — отсчетное устройство).

Выяснение оптимальных соотношений между электродинамическими, геометрическими и частотными характеристиками экспериментальной уста-

новки в целом и ее элементов необходимо для получения достоверных результатов измерений. Цель данного исследования — дать надежные рекомендации по проведению дифракционных экспериментов и указать на возможность использования простых зависимостей для искомых величин, удобных экспериментатору.

3. Источник высокочастотных колебаний должен иметь монохроматичные генерируемые колебания, стабильную линию излучения, достаточный уровень мощности и широкую полосу перестройки. Монохроматичность излучаемых колебаний должна обеспечивать разрешение по частоте исследуемых величин в пределах точности эксперимента.

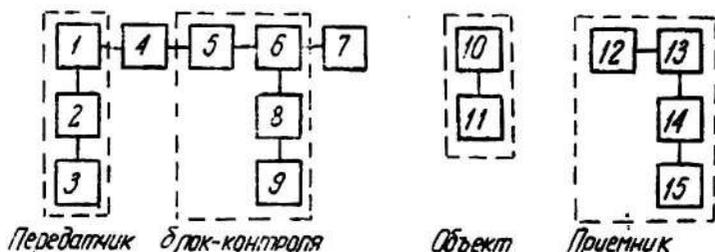


Рис. 1. Блок-схема установки.

Требования стабильности напряжений определяют выбор источников питания генераторов, температурного режима и согласованной нагрузки. Использование высоких напряжений (500—5000 в) и малых токов (10—100 мА) приводит к необходимости устранения многочисленных нестабильностей, связанных с возникновением паразитной амплитудной и частотной модуляций. Коэффициент стабильности по напряжению должен быть не ниже 10^{-3} . Такие высокие стабильности требуют постоянства температурного режима ламп, эффективность которого особенно ощущается с увеличением излучаемой мощности. Этим обеспечивается также постоянство напряженности электромагнитного поля во времени.

Поскольку при исследовании дифракционных явлений объекты обладают резко выраженными резонансными свойствами, что ухудшает стабильность работы генератора, особые требования предъявляются к его развязке. Последняя достигается применением усилителей мощности, ферритовых вентилях и аттенюаторов, степень ослабления которых определяется формулой

$$\frac{|k_r|}{|k_n|} = \frac{1 + \frac{1}{k_n} \operatorname{th} \delta}{1 + k_n \operatorname{th} \delta},$$

где k_r и k_n — соответственно к. с. в. н. со стороны входа и выхода; δ — затухание в неперях [1].

Применение усилителей мощности являлось бы лучшим решением вопроса с точки зрения согласования и передачи мощности. Однако, их использование практически не оправдано. Ферритовые вентили более просты, экономичны и обладают малыми потерями в прямом направлении, не превышающими 1 дБ, а в обратном ослабление достигает 20 дБ и более. Их применение в миллиметровом диапазоне пока ограничено. При достаточной мощности излучателя наиболее доступно и просто по-

лучение требуемой развязки с помощью поглощающего аттенюатора. Ослабитель с затуханием 10—12 дБ снижает к. с. в. н. с 2,5 до 1,08.

Для изучения дифракционных явлений в широком диапазоне частот удобно иметь генератор с большой полосой перестройки. Использование в клистроне принципа управления потоком модуляцией по скорости резко сужает полосу пропускания. Ограниченность его перестройки, обусловленная высоким шунтирующим импедансом нагруженного резонансного контура и связанные с этим перенапряжения уменьшают диапазон перестройки до $1 \div 2\%$. Механическая деформация объема резонатора позволяет изменять частоту в пределах $\pm 10\%$, но не решает вопроса расширения полосы пропускания. Отмеченные трудности преодолены в лампах обратной волны, где использовано длительное взаимодействие электронного пучка с полем замедляющей периодической структуры, малая дисперсия которой определяет ширину полосы генерации [2]. В процессе эксперимента можно пользоваться другими источниками СВЧ. Их тип определяется условиями каждой конкретной задачи. Следует отметить, что монохроматичность генерируемых колебаний клистрона необходима при исследовании резко меняющихся по частоте дифракционных явлений (анамалии, резонансы).

Необходимые соотношения между параметрами исследуемой структуры и длиной падающей волны можно получить, применяя достаточно большое количество решеток с различными геометрическими размерами или используя генератор с широким диапазоном перестройки. С точки зрения экспериментатора последний путь предпочтительней.

В качестве излучателя могут быть использованы различные типы антенн. Однако антенны акустического типа являются наиболее приемлемыми, ввиду их хорошего согласования с внешним пространством, формирования заданной диаграммы направленности, диапазонности и высокого к. п. д. Акустические антенны просты в изготовлении и удобны для работы в миллиметровом диапазоне волн. Соотношение между сторонами прямоугольного рупора определяется из условия равенства диаграмм направленности в E -и H -плоскостях.

Трансформирование фазы для получения плоского фронта и увеличения коэффициента направленного действия удобно осуществлять диэлектрическими линзами. Следует учесть, что в указанном диапазоне для уменьшения вредных отражений целесообразно применять линзы с малым коэффициентом преломления. Фазовому корректору, выполненному в виде металлопластинчатых линз, свойственно увеличение амплитуд боковых лепестков и узкополосность, что ограничивает его применение [3].

Исследуемые объекты можно рассматривать как вторичные излучатели. Важно знать минимальное количество элементов, создающих устойчивую дифракционную картину. Нами была исследована зависимость основных энергетических и поляризационных характеристик поля от размера переизлучателя при наиболее характерных соотношениях между параметрами решетки и длиной падающей волны. Из графиков, приведенных на рис. 2 видно, что при переходе в более длинноволновую область количество элементов, входящих в периодическую структуру, должно увеличиваться. При изменении отношения периода решетки к длине волны в пределах $1,5 \div 0,2$ в случае H -поляризации число его проводников соответственно возрастает от 15 до 40. Этот факт установлен двумя способами: а) применением диафрагмы с плавно изменяющимся размером отверстия; б) использованием структур с различным количе-

ством элементов. Оба способа приводят к одинаковым результатам и могут применяться в соответствии с возможностями эксперимента.

В то время как при строгой постановке дифракционных задач для выполнения граничных условий исследуемые решетки считались идеально проводящими, физические измерения проводятся с материалами, имеющими отличный от нуля поверхностный импеданс. Для реального осуществления теоретических условий наиболее подходящими при изготовлении объекта являются серебро и медь. Возможно использование и других материалов, но в области, где период решетки не превышает длины волны, заметно сказываются активные потери, особенно для структур с явно выраженными волноводными свойствами [4].

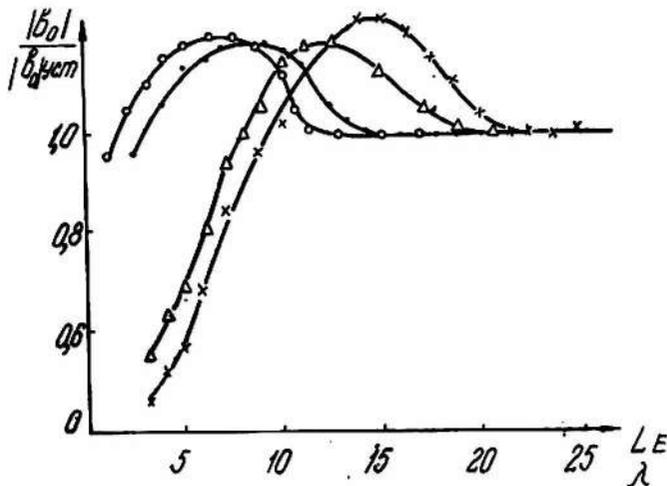


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения от размера структуры (xxx — $\gamma \approx 1,5$; $\Delta\Delta\Delta$ — $\gamma \approx 1,0$; ... — $\gamma \approx 0,54$; 000 — $\gamma \approx 0,26$).

Принято считать, что хорошим материалом для покрытия рабочих поверхностей волноводных элементов миллиметрового диапазона является серебро, ввиду его слабых окислительных свойств. Наибольшей эффективной удельной проводимостью на этих частотах обладает медь, которая сильно подвержена окислению в воздухе. Однако, образующиеся на ней окислы можно рассматривать как тонкую диэлектрическую пленку, не изменяющую существенно поверхностного сопротивления материала. Окислы серебра являются проводящими и определяют его отражательные свойства. Именно поэтому измерения проводились на объектах, изготовленных из бескислородной меди.

Необходимая чистота обработки поверхности периодических структур определяется характером исследуемых дифракционных явлений. Следует иметь в виду, что в том случае, когда шероховатости поверхности равны удвоенной глубине скин-слоя, затухание увеличивается в 1,8 раза. Чтобы приблизиться условиями эксперимента на миллиметровых волнах к теоретически рассчитанным значениям изучаемых величин в длинноволновой области и в случае ярко выраженных резонансных явлений, гладкость поверхности проводников должна соответствовать 11—12 классу. В других случаях степень шероховатости поверхности может определяться 7—8 классом. Допуски на изготовление проводников решеток при

изучении дифракционных резонансов соответствуют точности изготовления открытых резонаторов, поэтому геометрические размеры структур выдерживаются до десятых долей процента [5].

Устранение влияния краевых эффектов на характер дифрагированного поля достигается применением непрозрачного экрана с отверстием. Использование его оправдывается также тем, что реально экспериментальная установка имеет ряд узлов (подставка, юстировочное устройство и др.), воздействие которых на переизлучаемое поле не поддается оценке. Наиболее доступными для практического применения оказываются металлические и диэлектрические экраны и неотражающие поглотители специальных типов. Материал поглотителя должен обладать незначительной

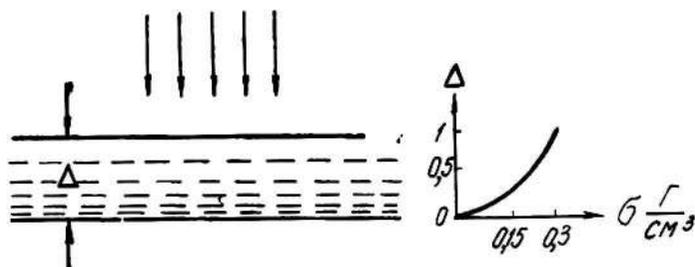


Рис. 3. Распределение плотности аквадага по толщине пенополистирола.

дисперсией и иметь вещественный импеданс, согласованный со свободным пространством. Это условие определяется выражением

$$\sqrt{\mu_b (1 - i \operatorname{tg} \delta_\mu) / \varepsilon_b (1 - i \operatorname{tg} \delta_\varepsilon)} = 1,$$

где δ_ε и δ_μ — значение диэлектрических и магнитных углов потерь [6].

Несмотря на простоту металлических экранов, применение их ограничено из-за наличия взаимной связи с передающей и приемной антеннами. Нанесение на металлическую подложку согласованного диэлектрика с толщиной слоя, равного четверти длины волны электромагнитного поля в материале, обеспечивает отсутствие отражения. При этом омическое сопротивление поверхности должно быть порядка 200 ом/см^2 . Недостатки, присущие отмеченным типам экранов, связанные с трудностью согласования и узкой полосой, в значительной степени устраняются применением экранов из пенополистирола, обработанных аквадагом с размером зерна порядка микрона и экспоненциальным распределением его плотности по толщине листа (рис. 3). Эксперимент, проведенный в миллиметровом диапазоне волн, показал, что изготовленный таким образом экран ослабляет падающее поле на 25—30 дБ при отражении в сторону излучателя не более 20 дБ.

Часть падающей на экран СВЧ-энергии проходит через диафрагму поглотителя и переизлученная исследуемой периодической структурой попадает в приемную антенну. Степень взаимной связи системы объект — приемник качественно определяется соотношением значений амплитуды поля первой и нулевой гармоник или выполнением условий убывания поля как $1/R$ при перемещении рупора приемника вдоль направления

распространения поля. На рис. 4 показана качественная зависимость отношения E_1/E_0 от приведенного расстояния, равного

$$R = \frac{(L_1 + L_2)^2}{\lambda}, \quad (*)$$

где L_1 и L_2 — максимальные размеры апертур антенн [7].

Экспериментальное определение основных характеристик дифрагированного поля неизбежно связано с измерением слабых сигналов. Использование квадратичного детектора наиболее эффективно, когда полное сопротивление его нагрузки составляет 1,5—2,5 ком. Добротность используемых детекторов должна быть порядка 100. К. с. в. н. детектора имеет вид

$$k_d = \frac{1 + |a_0|}{1 - |a_0|},$$

где a_0 — коэффициент отражения.

Для повышения чувствительности приемника удобно использовать импульсную амплитудную модуляцию источника сигналов или синусоидальную модуляцию по амплитуде в приемном тракте.

Для устранения вредной девиации частоты источник СВЧ-излучения должен модулироваться импульсами с крутыми фронтами и плоской вершиной. Более эффективно модуляция в приемном тракте достигается применением модуляторов Холла или помещением в волновод модулирующего диода. Это позволяет использовать резонансные усилители или фазовые детекторы, обладающие достаточной чувствительностью, линейностью амплитудной характеристики и большим коэффициентом усиления. Характеристика детектора и рабочий участок на ней подбирается экспериментально. Это позволяет уменьшить ошибку за счет и детектирования до величины 1—2%.

Взаимная юстировка передающей и приемной антенн производится для получения соосности основных лепестков диаграмм направленности. Пользуясь симметрией диаграмм в E - и H -плоскостях, юстировку системы излучатель — экран — объект — приемник можно считать законченной, если равные угловые линейные перемещения каждого из них приводят к аналогичному отклонению показаний индикатора. При этом расстояние между двумя последовательно расположенными антеннами определяется по формуле (*). Наиболее строгой является юстировка по амплитудам симметрично расположенных высших дифракционных гармоник. Проведенные вычисления показали, что в отдельных случаях отклонение падения волны от нормали решетки на несколько угловых секунд приводит к ошибке в определении их амплитуд на 50% и более. Для исключения частотного сканирования диаграммы направленности передающей антенны юстировка должна производиться в каждой измеряемой точке.

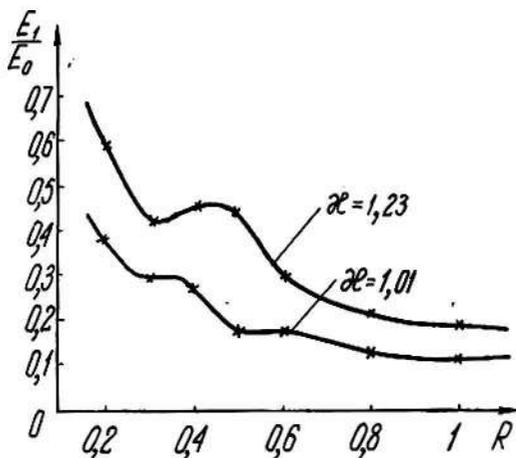


Рис. 4. Зависимость отношения E_1/E_0 от нормированного расстояния решетки — приемник.

Взаимная многократная связь между антеннами описывается выражением

$$M = \left[1 \pm \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi R)^2} \right]^{-2}$$

и не должна превышать 1,5% [8]. Связь считается допустимой, если увеличение расстояния между антеннами уже не приводит к изменению соотношений между амплитудами поля у нулевой и первой гармоники (рис. 4) [9]. Кроме того, оценить связь можно путем перемещения приемного рупора вдоль направления распространения волны до тех пор, пока уровень пульсации напряженности поля составит не более 2—3%.

4. Определение основных энергетических характеристик дифракционного поля сводится к изменению относительной мощности его составляющих. Учитывая квадратичность характеристики детектора, значение коэффициента прохождения n -й гармоники определяется как

$$|b_n| = \sqrt{\frac{E_n}{E_0}} \quad (n = 0, 1, 2 \dots),$$

где E_n — показание индикатора в максимуме поля n -той гармоники; E_0 — показание в максимуме главного лепестка при отсутствии решетки.

Рис. 5. Блок-схема установки для измерения коэффициента отражения (← прямой луч, ← отраженный луч).

Более точно на расстоянии, превышающем параметр Релея для апертуры решетки, коэффициент пропускания n -ой гармоники с учетом к. с. в. н. равен

$$b_n = \frac{b_n' + b_n''}{2},$$

где b_n' и b_n'' — максимальное и минимальное значение указанного коэффициента в двух последовательно идущих экстремумах поля, измеренных при перемещении приемной антенны на половину длины волны в направлении распространения исследуемой составляющей дифракционного спектра.

Измерение коэффициента отражения удобно производить с помощью установки, блок-схема которой показана на рис. 5. Здесь 1 — передатчик; 2 — излучающий рупор; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — экран; 5 — исследуемый объект; 6 — приемный рупор; 7 — индикаторное устройство.

Особенностью схемы является использование полупрозрачного зеркала, расположенного под углом 45° относительно системы излучатель — объект — приемник. В качестве зеркала применяется плоско-параллельная пластина из полистирола или тефлона. Установочным нулем коэффициента отражения σ_0 является показание индикатора в отсутствие решетки. Для определения максимума шкалы σ_1 вместо решетки поме-

щается образцовый отражатель и отклонение измерительного прибора принимается за единицу коэффициента отражения. Тогда

$$|a_0| = \sqrt{\frac{\sigma_i - \sigma_0}{\sigma_1 - \sigma_0}},$$

где a_0 — искомый коэффициент отражения; σ_i — показание индикатора в присутствии решетки.

Изучение дифракционных полей периодических структур будет неполным, если не исследована их поляризация. Поляризационный эллипс определяется его ортогональными компонентами и углами сдвига фаз между ними. Эти величины необходимы для вычисления коэффициента эллиптичности, угла наклона эллипса, поляризационного коэффициента и др. Физические эксперименты в этом случае сводятся к амплитудным и фазовым измерениям. Первые легко осуществимы с помощью одной или двух линейно-поляризованных антенн, вторые — компенсационными методами с использованием измерительных линий или мостовых схем [10]. Рис. 6 иллюстрирует зависимости амплитуд ортогональных компонент дифрагированного поля от угла поворота линейно-поляризованной антенны. Перспективными для подобных измерений являются методы с использованием турникетного устройства. При этом основное требование предъявляется к жесткой стабилизации промежуточной частоты (не менее 10^{-6}), что может быть достигнуто открытыми или сверхпроводящими резонаторами. К достоинствам этого метода можно отнести возможность визуального наблюдения эллипса поляризации.

Систематическое исследование поведения основных энергетических и поляризационных характеристик дифрагированного на периодических структурах поля с учетом всех особенностей эксперимента, о которых говорилось выше, позволяет сделать вывод о том, что измеренные значения совпадают с теоретически рассчитанными величинами с погрешностями, не превышающими $\pm 5\%$. Следовательно, условия эксперимента достаточно правильно учитывают реально осуществимые допущения. В этой связи данная работа может быть полезна при выборе диаграммы направленности излучателя для формирования плоского фазового фронта на объекте,

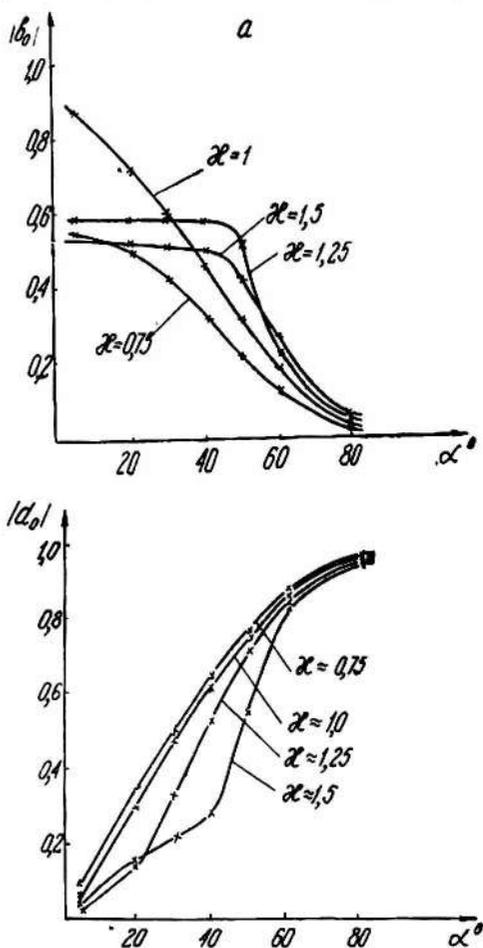


Рис. 6. Зависимость коэффициента прохождения от угла поворота плоскости поляризации. а — E-поляризация; б — H-поляризация.

типа антенны и фазового корректора, размера объекта при заданном соотношении между длиной волны и периодом структуры в случае перехода из длинноволновой области в коротковолновую, материала переносителя, допусков на линейные размеры и чистоту поверхности проводников, непрозрачного экрана, методики юстировки системы и измерений характеристик дифрагированного поля.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность В. П. Шестоपालову за руководство работой и ценные указания при написании данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Л. Гинзтон. Измерения на сантиметровых волнах. Изд-во иностр. лит-ры, 1960.
2. Миллиметровые и субмиллиметровые волны. Сб. статей под редакцией Р. Г. Мирманова. Изд-во иностр. лит-ры, 1959.
3. А. З. Фрадин. Антенны сверхвысоких частот. Изд-во «Советское радио», 1957.
4. Я. Д. Ширман. Радиоволноводы и объемные резонаторы. Связьиздат, 1959.
5. Л. А. Вайнштейн. Открытые резонаторы и открытые волноводы. Изд-во «Советское радио», 1966.
6. А. Ф. Харвей. Техника сверхвысоких частот, т. I, Изд-во «Советское радио», 1965.
7. Техника измерений на сантиметровых волнах под редакцией Г. А. Ремеза. Изд-во «Советское радио», 1949.
8. Ю. В. Шубарин. Антенны сверхвысоких частот. Изд-во ХГУ, Харьков, 1960.
9. Сканирующие антенные системы СВЧ. Перевод с английского, под редакцией Г. Т. Маркова и А. Ф. Чаплина. Изд-во «Советское радио», 1966.
10. Антенны эллиптической поляризации. Сборник статей под редакцией А. И. Шлутова. Изд-во иностр. лит-ры, 1961.