

УДК 621.317.743

ТОЧНОСТЬ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МАЛОГАБАРИТНОЙ КАМЕРЕ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ- И КВЧ- ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

В.А. БОГУШ, М.М. КАСПЕРОВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 7 февраля 2011

Рассмотрены процессы распространения электромагнитных излучений (ЭМИ) сверхвысокочастотного (СВЧ) и крайне высокочастотного (КВЧ) диапазонов в объеме малогабаритной экранированной камеры, изготовленной из композиционных радиопоглощающих материалов. Проведена оценка влияния ее параметров (линейных размеров, коэффициентов отражения материалов) на точность измерений электромагнитных полей в СВЧ- и КВЧ-диапазонах.

Ключевые слова: экранированная камера, электромагнитное излучение, композитные радиопоглощающие материалы.

Введение

СВЧ диапазон на сегодняшний день в мире освоен и активно используется. Актуальным является также вопрос расширения диапазона частот приемно-анализирующей радиоэлектронной аппаратуры в область миллиметровых длин волн (диапазон ММВ или диапазон КВЧ). Интерес к этому диапазону связан с тем, что, с одной стороны, развитие науки и техники, появление новых технологий и материалов сделали принципиально возможным создание в этом диапазоне аппаратуры. С другой стороны, его использование позволяет существенно уменьшить габариты антенных систем, устанавливаемых на подвижные носители, при одновременном сужении ширины их диаграмм направленности, а также расширить полосы частот систем связи.

Актуальной является задача повышения точности антенных измерений в этих диапазонах. Известно, что точность измерений электромагнитных полей повышают за счет применения экранированных помещений, что позволяет исключить влияние внешних помех, электромагнитной обстановки, условий окружающей среды, а также препятствовать излучению самих испытательных сигналов во внешнее пространство, их воздействию на вспомогательное оборудование. В настоящее время изученными и описанными можно считать камеры значительных размеров в диапазоне частот до 18 ГГц: их проектирование, изготовление, калибровка и паспортизация требует больших затрат. В связи с этим возникла необходимость в создании мобильных малогабаритных камер и боксов, при использовании которых оператор и основные измерительные средства размещаются вне камеры.

При разработке небольших камер возникают дополнительные требования к массогабаритным характеристикам экранов электромагнитного излучения, функциональности применяемого материала для обеспечения удобства эксплуатации и получения различных конфигураций, адаптированных для конкретных измерений. Применение используемых в настоящее время пирамидальных радиопоглотителей большого размера приводит к снижению внутреннего рабочего пространства. Кроме того, для монтажа и удержания экранов ЭМИ с большой массой требуются надежные механические каркасы большой прочности. В настоящее время про-

веден ряд исследований в области синтеза композитных материалов по созданию широкодиапазонных высокоэффективных экранов электромагнитного излучения с изменяемым коэффициентом отражения и сниженными массогабаритными характеристиками. При соответствующем подходе возможно и необходимо их применение в технике измерений, в частности для создания малогабаритных камер.

Целью данной работы является анализ процессов распространения ЭМИ в объеме малогабаритной экранированной камеры (ЭК) в зависимости от ее различных параметров в СВЧ- и КВЧ-диапазонах.

Основная часть

На процессы распространения ЭМИ в объеме камеры влияют следующие факторы.

Экранирующие и поглощающие свойства применяемых материалов характеризуют защищенность измерительного сигнала от влияния внешних помех и то, какая часть энергии переотразится внутри камеры и просуммируется с основным сигналом. При моделировании приняты во внимание только единожды отраженные внутри камеры волны (луч 1 на рис. 1), поскольку при многократном переотражении волны (луч 2 на рис. 1) теряется значительная часть энергии за счет ее поглощения, такие волны не могут внести значимых изменений в характер принимаемого сигнала.

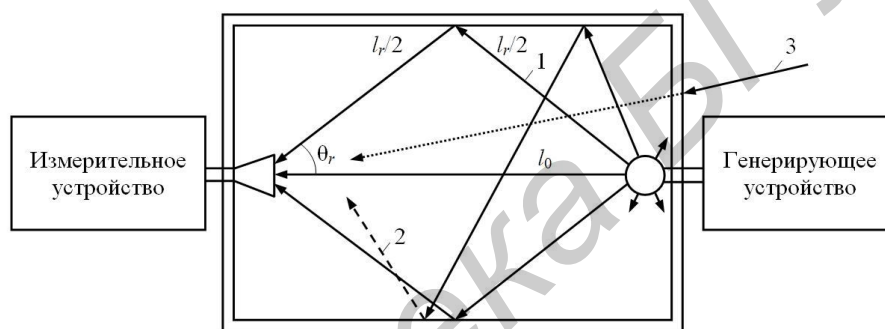


Рис. 1. Модель распространения ЭМИ в объеме камеры

Пути и траектории распространения волн в объеме камеры зависят от ее формы и геометрических размеров, а значит, интерференционная картина в приемной антенне будет различна для различных ее конфигураций. Для описанных исследований и моделирования выбрана прямоугольная форма. Камеры прямоугольной формы наиболее просты в изготовлении, универсальны, пригодны для различных видов измерений.

Размеры испытательного и измерительного оборудования, характеристики измерительных антенн, а также параметры размещения оборудования в объеме камеры характеризуют то, насколько точно будет измерен самый мощный сигнал объекта испытаний (ОИ) с учетом его расположения в объеме камеры. Поскольку в общем случае диаграмма направленности ОИ не известна, в качестве источника электромагнитного поля выбран всенаправленный точечный источник с идеальной круговой диаграммой направленности, что позволяет получить максимум взаимодействия поля с камерой, т.е. наихудший случай при измерениях. В качестве приемной измерительной антенны выбрана широкополосная рупорная антенна с идеальной диаграммой направленности.

Примем, что приемная и испытываемая антенны (ОИ) находятся внутри объема, ограниченного поверхностью камеры, а расстояние между ними соответствует случаю дальней зоны.

Для дальней зоны предполагается, что фазовые различия между компонентами поля, излучаемыми крайними точками антенны, должны быть малы, и поэтому различия в путях прохождения волны для этих точек также должны быть малы по сравнению с длиной волны. Дальняя зона определяется как пространство на расстоянии l_0 больше, чем:

$$l_0 > 2D^2 / \lambda, \quad (1)$$

где D – максимальный размер антенны.

Для удовлетворения требования по мобильности камеры ограничим ее геометрические размеры требованием выполнения критерия (1) и максимумом в 1,5 м; следует учитывать (1) и при выборе приемной антенны и частотных диапазонов.

Для построения модели наиболее применимы формулы, выведенные на основании леммы Лоренца и теоремы взаимности, приведенные в [1]. Учитывая введенное ограничение о том, что источник излучения является всенаправленным, т.е. максимум излучения приходится на любое направление распространения волны, получаем $f_{pr}(\theta_r) = f_{pr}(\theta_0) = A$, где A – амплитуда излучения. В общем виде амплитуда волны, принимаемая антенной при отсутствии ЭМИ извне:

$$D(\theta) \approx A \cdot f_{pr}(\theta_0) \Delta S / 4\pi l_0^2 \left[1 + \sum_{r=1}^N K \cdot f_{pr}(\theta_r) / f_{pr}(\theta_0) (l_0 / l_r)^2 \right], \quad (2)$$

$f_{pr}(\theta_0), f_{pr}(\theta_r)$ – уровень диаграммы направленности приемной антенны в направлении θ_0 на передающую антенну и в направлении θ_r на источник отражения соответственно; $\Delta S = l_0^2 \Delta \varphi \Delta \theta \sin \theta_0$ – апертура приемной антенны; l_0 – расстояние между передающей и приемной антеннами; N – число принятых антенной переотраженных лучей; K – коэффициент отражения материала стенки камеры; l_r – расстояние между передающей и приемной антеннами вдоль кратчайшей ломаной, имеющей с поверхностью общую точку.

Выражение (2) показывает, что искажения амплитуды сигнала, принятого антенной, при наличии отражений пропорциональны произведению коэффициента отражения на уровень диаграммы направленности приемной антенны и сомножителю, учитывающему расхождение поля, связанное с различием пути прямой и отраженной волны. Поле сферической волны, отраженной от поверхности ЭК, в раскрыве приемной антенны, если размеры раскрыва малы по сравнению с расстоянием до точки отражения, по своей структуре совпадает с полем плоской волны. Сферичность сказывается в том, что амплитуда волны пропорциональна отношению площади раскрыва приемной антенны к площади сферы радиуса l_0 .

Ведем величину I , с помощью которой будем оценивать степень влияния различных параметров камеры на измерительный сигнал:

$$I = 20 \lg(D(\theta) / D(\theta_0)) = 20 \lg \left(\left(D(\theta_0) + \sum_{r=1}^N D(\theta_r) \right) / D(\theta_0) \right), \quad (3)$$

где $D(\theta_0)$ – уровень сигнала, принятый антенной при отсутствии искажений; $D(\theta_r)$ – уровень сигнала, принятый антенной при наличии искажений, вносимых измерительной камерой.

Поскольку решено использовать рупорную антенну и расчеты производить для дальней зоны, пришли к простой зависимости, определяющей минимальные размеры камеры L для конкретных размеров рупоров. Независимо от частоты:

$$L_{\min} \geq 7 \cdot l_a, \quad (4)$$

где l_a – длина оптимального рупора, связанная с высотой b и шириной a его раскрыва, как

$$l_a = (1/2) \cdot b^2 / \lambda_0 \text{ и } l_a = (1/3) \cdot a^2 / \lambda_0. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены зависимости степени влияния камеры на измерительный сигнал от коэффициента отражения материала экрана внутри ЭК при отсутствии внешнего ЭМИ. Это случай, при котором форма бокса кубическая – $1 \times 1 \text{ м}^2$, углы падения переотраженных лучей равны 45° . Поле внешних помех отсутствует. Коэффициент отражения не зависит от частоты и угла падения. Размеры идеальной апертурной приемной антенны соответствуют (4) и (5), а диаграмма направленности описывается выражениями

$$\text{для плоскости } xOz : f(\theta_x) = \frac{1 + \cos \theta_x \sin(0,5kb \sin \theta_x)}{2 \cdot 0,5kb \sin \theta_x},$$

$$\text{для плоскости } yOz : f(\theta_y) = \frac{1 + \cos \theta_y \sin(0,5ka \sin \theta_y)}{2 \cdot 0,5ka \sin \theta_y}.$$
(6)

На рис. 2,а представлена зависимость для случая, когда антенна выбрана идеально для основной частоты измерения в соответствии с (5). На рис. 2,б представлена зависимость для случая, когда раскрыв антенны на 10 % шире требуемого в (5), т.е. размеры антенны не оптимальны для измерений на выбранной частоте, что характерно при измерениях в широкой полосе частот.

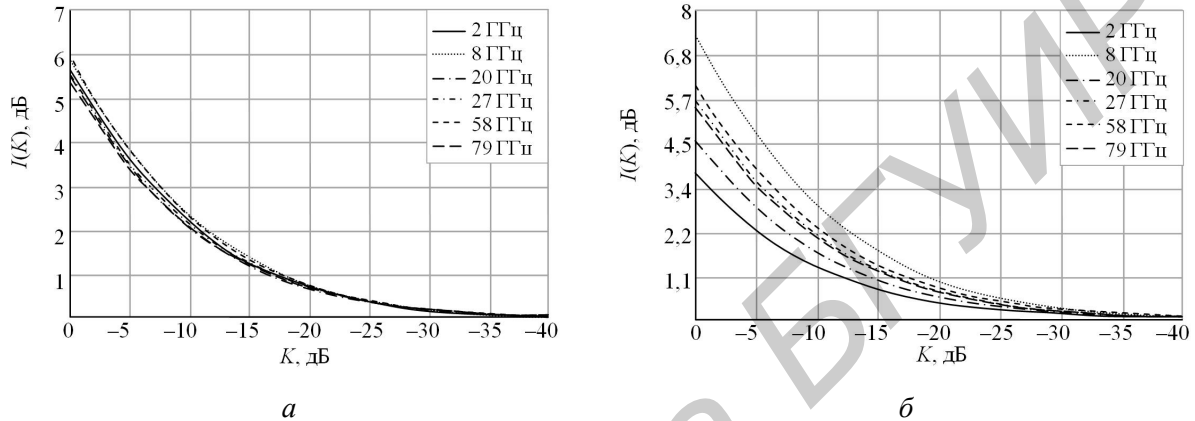


Рис. 2. Влияние коэффициента отражения материала на измерительный сигнал для случая идеальной (а) и неидеальной (б) антенны

При увеличении частоты степень влияния камеры на сигнал не всегда снижается. Данный разброс зависимостей – результат влияния диаграммы направленности приемной антенны. На КВЧ антенны более узконаправленные, и влияние боковых стенок, если они достаточно удалены, становится незначительным. Весомое влияние оказывают ближайшие стенки – за приемной антенной и за ОИ. На СВЧ получить небольшую узконаправленную антенну с синфазной апертурой несколько затруднительно, особенно в широком диапазоне частот, что и приводит к неоднозначным результатам.

Основной целью применения ЭК является защита от внешних полей (луч 3 на рис. 1). Наихудшим будет случай, когда источник помехи находится непосредственно за ОИ вне камеры, имеет ту же частоту и распространяется сонаправлено с измеряемым сигналом. Например, в результате недоброкачественного соединения волноводных или коаксиальных узлов генерирующего устройства и ОИ. Результаты моделирования степени влияния коэффициента передачи материала стенок камеры M приведены на рис. 3, для помехи, которая в $i=0,5(1...5)$ раз мощнее полезного сигнала, частота 20 ГГц, коэффициент отражения внутренней поверхности -20 дБ. В (2) добавляется слагаемое, кратное M .

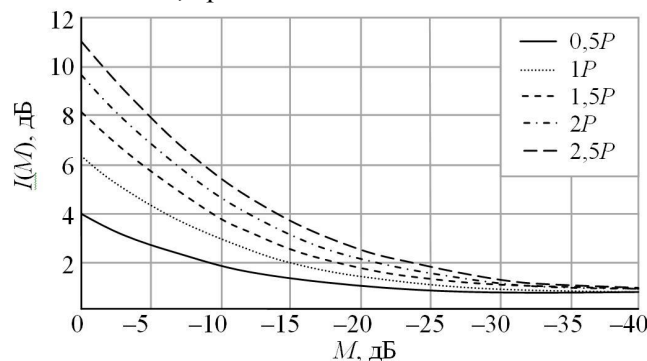


Рис. 3. Влияние коэффициента поглощения на измерительный сигнал

Зависимость, приведенная на рис. 3, отражает случай, когда стенки ЭК состоят из одного слоя материала, выполняющего функцию экрана от внешних полей и поглотителя переотраженных лучей. Применение многослойных конструкций позволяет получить как лучший, так и худший результат экранирования, поскольку применение внешнего экрана с высоким коэффициентом отражения M может привести к ухудшению характеристик внутреннего поглотителя. Так на рис. 4 представлены зависимости, характерные: 1 – для однослойного поглощающего экрана; 2 – двух слоев экранов, внешний из которых имеет высокий коэффициент отражения; 3 – состоящий из двух слоев поглощающих экранов.

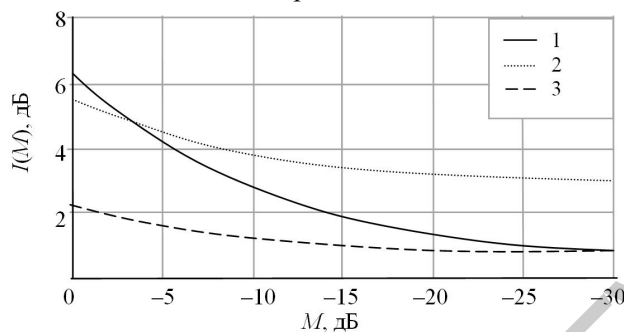


Рис. 4. Зависимости влияния на измерительный сигнал многослойных материалов

Для моделирования влияния геометрических размеров камеры приняли значения высоты и ширины равными друг другу $A=B=\text{const}=1$ м и постоянными, изменяя длину камеры L , которая соответствует расстоянию между ОИ и приемной антенной (см. рис. 5).

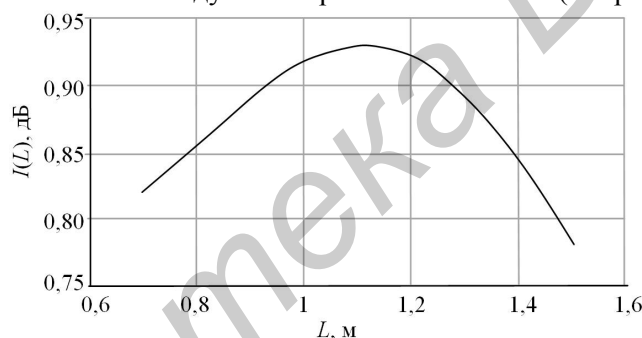


Рис. 5. Влияние геометрических размеров камеры на измерительный сигнал

При увеличении расстояния L улучшаются характеристики антенн как работающих в дальней зоне. В случае, когда A и $B < L$, углы попадания переотраженных лучей θ_r в раскрыв антенны велики и эффективнее подавляются.

В диапазоне ММВ геометрические параметры более весомо влияют на результат измерения. Получено, что при отклонении от общей оси ОИ и измерительной антенны на 1° произойдет изменение только основного сигнала приблизительно на 0,5 дБ в зависимости от антенны и частоты.

Полученные зависимости (рис. 2, 3, 4) позволяют выбрать экранирующие и поглощающие материалы для малогабаритной ЭК для удовлетворения требуемой точности измерений. В настоящее время уже существует ряд материалов, характеристики которых удовлетворяют требованиям, описанным выше [2]. Это могут быть тканые, вспененные, водосодержащие композиционные материалы и некоторые другие, которые наилучшим образом удовлетворяют требованиям обеспечения небольшой массы и размеров малогабаритной мобильной камеры [3]. Также существует ряд материалов, показатели которых не исследовались в ММВ-диапазоне, однако имеют хорошие показатели для сантиметровых волн, что не исключает возможности их использования в КВЧ-диапазоне при дополнительном проведении соответствующих исследований их экранирующих характеристик.

Заключение

Проведенный анализ позволил выявить зависимости влияния различных факторов на качество измерений в малогабаритной ЭК. Что упрощает выбор материалов экранов, размеров, антенн, диапазонов частот измерений при разработке ЭК и измерениях. Ориентируясь на полученные зависимости возможно создание малогабаритной экранированной камеры за счет применения композитных материалов с относительно низкими показателями эффективности экранирования, где снижение влияния камеры на результат измерения достигается за счет применения многослойных экранов, выбора соотношения размеров камеры и применяемых антенн.

ACCURACY OF ANTENNA MEASUREMENTS IN THE SMALL-SIZED CHAMBER FROM COMPOSITE RADIO ABSORBING MATERIALS IN MICROWAVE AND MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

V.A. BOGUSH, M.M. KASPEROVICH

Abstract

Processes of distribution of electromagnetic radiations superhigh-frequency and extremely high-frequency ranges in volume of the small-sized shielded chamber made of composite radio absorbing materials are considered. The estimation of influence of its parameters (linear sizes, reflection coefficient of materials) on accuracy of measurements of electromagnetic fields in microwave and millimeter-range is spent.

Литература

1. *Мицмахер М.Ю.* Безэховые камеры СВЧ. М., 1982.
2. *Лыньков Л.М., Бороботько Т.В., Богущ В.А. и др.* // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, №1. С. 92–101.
3. *Колбун Н.В., Альлябад Х.М., Лыньков Л.М.* // Докл. БГУИР. 2008. №1 (31). С. 87–92.