

УДК 621.37.029.6

**В.В. Бирюков, В.А. Грачев, М.В. Кольцов,  
Г.С. Малышев, А.С. Раевский, В.В. Щербаков**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ЛАБОРАТОРИИ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ НГТУ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены методы расчета электромагнитной обстановки. Лучевым методом исследована электромагнитная обстановка в помещении лаборатории. Показана возможность создания квазибезэховой зоны для проведения антенных измерений. Приведены результаты измерений. Предложена методика математической обработки результатов измерений при наличии переотраженных волн.

*Ключевые слова:* электромагнитная обстановка, безэховая камера, коэффициент безэховости, интерференция.

### **Введение**

Оценка электромагнитной обстановки (ЭМО) (расчет пространственного распределения электромагнитного поля внутри ограниченного пространства) является актуальной задачей. Знать ЭМО нужно для обеспечения норм техники безопасности, решения проблемы электромагнитной совместимости, проведения антенных измерений. Амплитуда поля в каждой точке пространства лаборатории определяется интерференцией большого числа волн, испытавших многократные отражения от различных препятствий, при этом учитывается рассеяние на мелкомасштабных структурах и шероховатых поверхностях, дифракция на острых кромках объектов и т.п. Характер интерференционной картины зависит от частоты излучения, геометрии объектов, расположенных в исследуемом пространстве, электрических и магнитных свойств этих объектов.

В работе исследовалась ЭМО в помещении лаборатории микроволновой электродинамики НГТУ с целью корректного проведения антенных измерений в диапазоне частот 2–12 ГГц. Для правильного проведения антенных измерений в лаборатории микроволновой электродинамики сначала решалась задача определения основных источников помех лучевым методом. После трассировки лучей определялись направления, откуда в приемную антенну приходили наиболее интенсивные отраженные сигналы. Для создания квазибезэховой области в месте расположения приемной антенны эти направления закрывались поглощающим материалом ECCOSORB VHP-4-NRL, свойства которого описаны в [1]. Коэффициент безэховости в области приемной антенны при этом изменялся от -15Дб до -30Дб. Однако полностью исключить влияние переотраженных сигналов нельзя. Поэтому на основе теории интерференции был разработан алгоритм для выделения интересующей нас составляющей принятого сигнала. Алгоритм основан на решении системы нелинейных уравнений. Для решения таких систем использовали возможности пакета Optimization Toolbox среды MATLAB, в частности, функция `fsolve`. Расчеты показывают, что для хорошего совпадения экспериментальных и теоретических результатов достаточно учесть пять отраженных волн.

### **Методы расчета электромагнитной обстановки**

Из многочисленных публикаций, посвященных данной тематике, можно выделить четыре основных метода расчета ЭМО. Первый - статистический, не требующий подробной информации о помещении, кроме общего описания его типа: производственное здание, гостиница, больница, здание старой постройки и т.п. [2]. Здесь задается эмпирическая зависимость потерь  $L_p$  от расстояния  $d$  между антеннами:

$$L_p = L_{p0}(d_0) + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (1)$$

где  $L_{p0}$  – потери в децибелах на расстоянии  $d_0$  от излучателя;  $n$  – показатель степени, который определяется типом здания. Такая модель характеризуется быстротой расчетов, при выполнении которых требуется определить только расстояние между антеннами – все другие параметры и константы относятся ко всему зданию в целом и задаются предварительно.

Второй – эмпирический, основанный на анализе одного или нескольких лучей, соединяющих передающую и приемную антенны [3]. Здесь учитываются потери во всех препятствиях на пути между приемной и передающей антеннами. Модели второй группы основаны на добавлении к (1) потерь во всех стенках на пути между приемной и передающей антеннами. При этом точный поиск точек отражения сигнала не производится.

Третий – лучевой, в котором используется квазиоптическое представление процесса распространения волн и учитывается отражение от стен помещения и дифракция на границах препятствий [4], [5]. Здесь максимально полно учитывается информация о планировке здания и определяются все возможные пути попадания сигнала из антенны передатчика в антенну приемника. Дифракционные потери сигнала вдоль каждого пути рассчитываются с использованием геометрической теории дифракции, а коэффициенты отражения – с помощью формул Френеля. Возможно также использование эмпирических соотношений, откалиброванных при помощи экспериментальных данных. Основным недостатком моделей третьей группы является их чувствительность к точности исходных данных. В случаях, когда неточно указаны данные о параметрах стен или их местоположение, результаты расчета существенно ухудшаются. Поле очень чувствительно к параметрам модели, используемой при расчетах. Небольшие изменения планировки помещения, расположения объектов внутри помещения или электрических свойств строительных материалов приводит к заметным вариациям структуры поля. В связи с этим в ряде случаев достаточно рассчитать некоторые средние характеристики электромагнитного поля, например, среднее значение принимаемой мощности.

Четвертый – численный, основанный на решении уравнений Максвелла. По сравнению с первыми тремя данный метод является более сложным, требующим больших затрат машинных ресурсов, поэтому его применяют, когда лучевой подход не работает (когда размеры объекта соизмеримы с длиной волны).

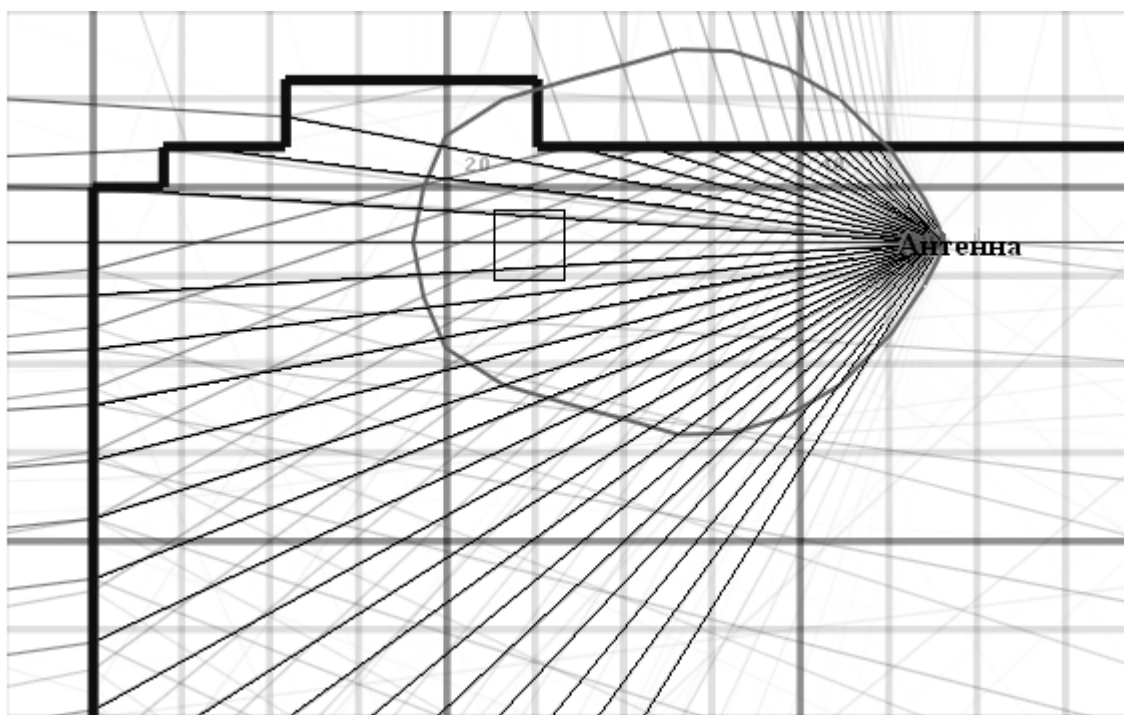
Выбор методики расчета ЭМО зависит от соотношения между длиной волны излучения и размерами исследуемого помещения. Анализ опубликованных результатов теоретических исследований показывает, что в высокочастотной области заданного диапазона частот, когда справедливо приближение геометрической оптики, эффективным методом расчета полей является лучевой. В низкочастотной части диапазона длина волны излучения становится сравнимой с размерами помещения и приближение геометрической оптики не работает. В этом случае целесообразно прибегать к численному решению уравнений Максвелла. В последние годы широкое признание получил метод конечных разностей во временной области (FDTD)[6].

На результаты измерений основных параметров и характеристик антенн оказывает серьезное влияние явление многолучевой интерференции, так как в точку приема помимо основного сигнала приходят волны с различными амплитудами и фазами, отраженные от объектов находящихся вблизи лабораторной установки (пол, потолок, стены, металлические корпуса приборов и т.д.).

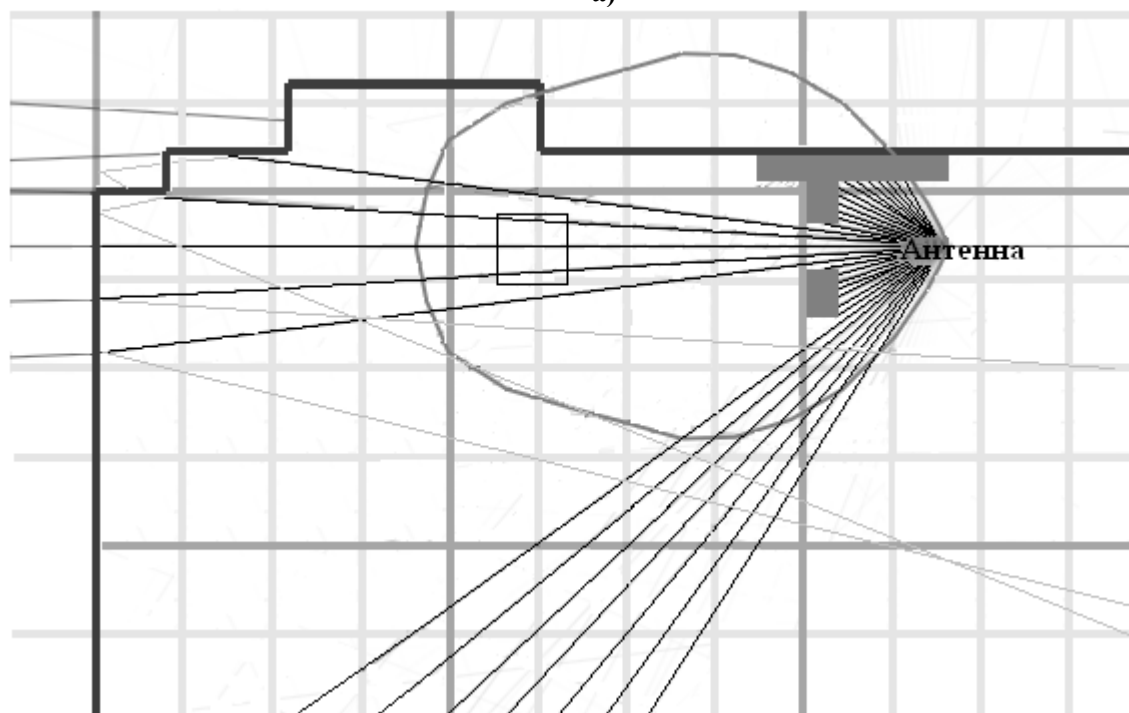
### Использование лучевого метода

На рис. 1, а схематично изображено горизонтальное сечение части лаборатории на уровне расположения передающей антенны. Жирными линиями обозначены стены лаборатории и диаграмма направленности (ДН) передающей антенны, в качестве которой использовался открытый конец прямоугольного волновода. Диаграмма направленности передаю-

щей антенны взята из работы [7]. На основе геометрических законов оптики была разработана программа расчета ЭМО лучевым методом для персонального компьютера. Тонкими яркими линиями изображены лучи, идущие от передающей антенны, тонкими бледными – лучи однократно и двукратно отразившиеся от стен лаборатории. Видно, что через область, выделенную квадратным контуром, в которой располагается приемная антенна, проходят лучи прямой и переотраженных волн.



а)



б)

**Рис. 1. Применение лучевого метода для анализа ЭМО в лаборатории:**  
а – без использования поглощающих материалов; б – с использованием

Применением специальных экранов, а также за счёт грамотной планировки взаимного расположения приборов в лаборатории можно снизить влияние отраженных сигналов в месте расположения приемной антенны. Поэтому на второй стадии экспериментальных исследований важно было расположить приемник и источник в лаборатории таким образом, чтобы свести к минимуму влияние отражающих поверхностей, которые и являются основной причиной возникновения отраженных сигналов. Для этого были применены блоки из поглощающего материала ECCOSORB VHP-4-NRL. На рис. 1, б показан ход лучей при использовании поглощающих материалов. Прохождение переотраженных лучей через область расположения приемной антенны существенно снижено.

Важным параметром, характеризующим антенные измерения, является коэффициент безэховости [8]. Коэффициент безэховости вычисляется как отношение мощностей рассеянной и прямой волн в апертуре приемной антенны:  $КБЭ=10\lg(P_{рас}/P_{пад})$ . Для расчета коэффициента безэховости строится распределение интенсивности поля в лаборатории в плоскости, параллельной поверхности земли на уровне антенн. Эта поверхность разбивается на элементарные площадки, в пределах которых мощность СВЧ излучения считается постоянной. Мощность в каждом элементе находится сложением мощностей пришедших в данную точку переотраженных волн. Число учитываемых переотраженных волн было ограничено тремя, так как интенсивность волны, отразившейся четырежды, настолько мала, что не вносит существенный вклад в суммарный результат [6]. Без учета поглотителей коэффициент безэховости составил -15 дБ, а с учетом -30 дБ.

Практическая реализация рабочего места для антенных измерений приведена на рис. 2.

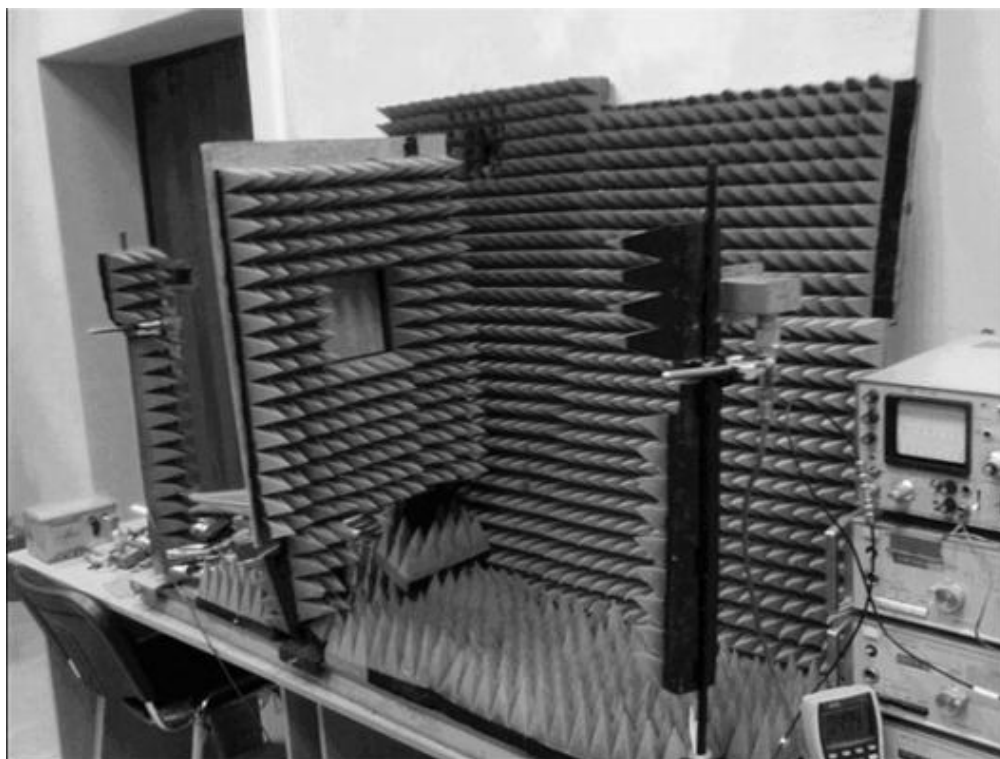


Рис. 2. Рабочее место для антенных измерений в лаборатории

### Методика эксперимента

Схема измерительной установки приведена на рис. 3. СВЧ сигнал, модулированный по амплитуде, от генератора СВЧ 4 через направленный ответвитель 5 поступает на передающую антенну 2 и на вход опорного измерительного канала. Передающая 2 и приемная 3 антенны расположены на оптической скамье 1. Обе антенны могут перемещаться и вращаться в двух взаимноперпендикулярных плоскостях.

Опорный канал необходим для контроля за уровнем и стабильностью выходной СВЧ мощности, подаваемой на передающую антенну. В опорном канале модулированный СВЧ сигнал детектируется с помощью детекторной секции 6. Затем низкочастотный сигнал, пропорциональный выходной мощности генератора поступает на вход линейного малошумящего усилителя (МШУ) 8, где он усиливается до уровня, стабильно регистрируемого универсальным цифровым вольтметром 10.

СВЧ сигнал, принятый приемной антенной 3, поступает на вход основного измерительного канала. Принятый сигнал детектируется с помощью детекторной секции 7. Далее, низкочастотный сигнал, пропорциональный СВЧ мощности в точке приема, поступает на вход линейного МШУ 9, где он усиливается до уровня, стабильно регистрируемого универсальным цифровым вольтметром 11.

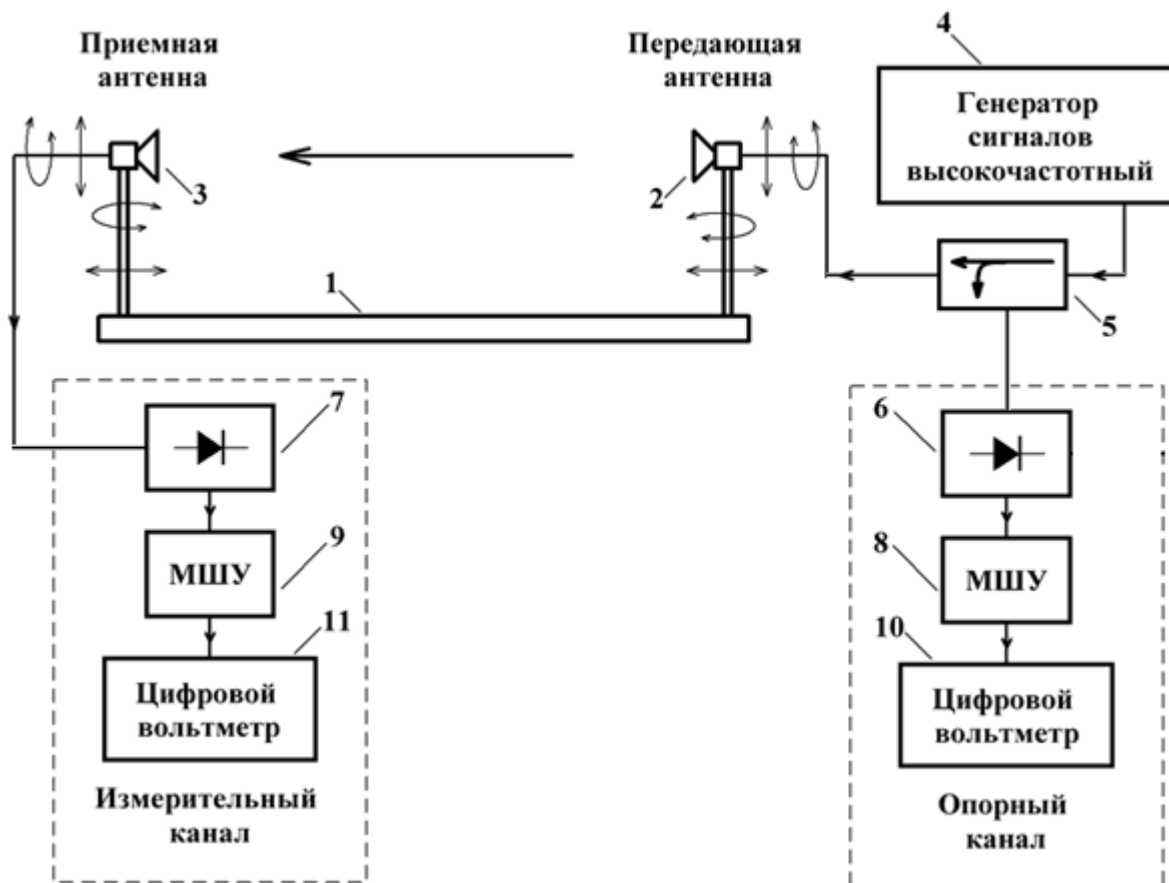
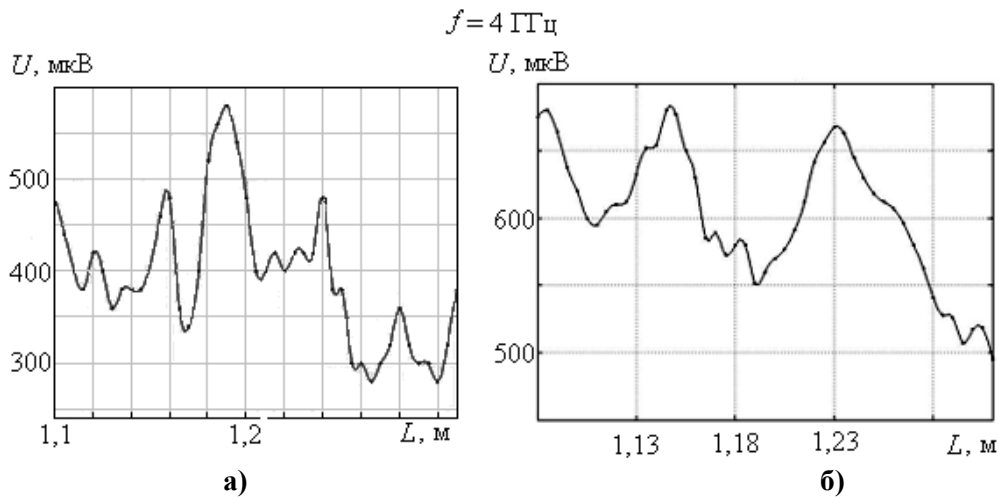


Рис. 3. Схема измерительной установки

Преимущества, которые даёт использование специальных поглощающих покрытий и шторок, становятся ясны из рис. 4 на котором показано распределение интенсивности излучения вдоль измерительной скамьи до и после использования специальных поглощающих и рассеивающих материалов. По оси абсцисс отложено расстояние от источника излучения до приёмника, по оси ординат – напряжение на выходе приёмника, соответствующее интенсивности принятого излучения. Хорошо видно, что использование поглощающих и рассеивающих материалов в лаборатории позволяет получить результаты экспериментальных измерений, близкие к теоретическим. В идеальном случае теоретические кривые должны представлять распределение интенсивности стоячей волны (из-за переотражения волн от приемной и передающей антенн).

Результаты измерения согласуются с результатами лучевого расчета и свидетельствуют о существенном уменьшении коэффициента безэховости при использовании поглощающих покрытий.

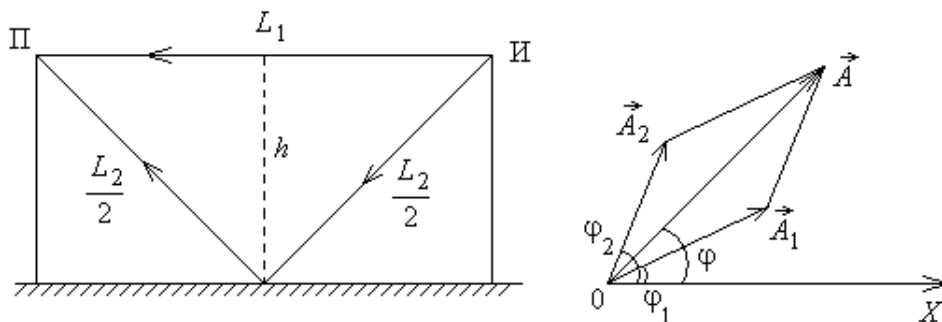
Однако полностью исключить влияние переотражённых сигналов нельзя, поэтому возникает задача разработать на основе теории интерференции численный алгоритм для выделения полезной составляющей принятого сигнала. Попытка представить существующее в области приемной антенны поле как интерференцию двух волн является довольно грубым приближением. Однако данная задача может быть решена аналитически, что позволяет оценить вклад основной волны в результирующее поле. Для более точного решения задачи необходим учёт большего числа волн, что приводит к необходимости решения нелинейных систем с большим числом уравнений. Эти системы могут быть решены только численно и имеют множество решений, в том числе и комплексных. Результат решения таких систем существенно зависит от начального приближения. В качестве такого начального приближения предлагается использовать результаты расчета, полученные при решении задачи о двух волнах.



**Рис. 4. Распределение интенсивности излучения вдоль измерительной скамьи**  
*a* – без поглощающих материалов; *б* – с их использованием

### Метод расчета

Рассмотрим случай интерференции двух лучей – прямого луча, прошедшего от источника к приёмнику по прямому пути, и луча, отражённого от электродинамически более плотной среды, например, от измерительной скамьи рис. 5.



**Рис. 5. Задача об интерференции двух волн**

Согласно методу векторных диаграмм, амплитуда  $A$  волны, полученной при интерференции двух волн с амплитудами  $A_1$  и  $A_2$ , находится по формуле

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi, \quad \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \varphi_1 = kL_x + \pi, \quad \varphi_2 = kL_0, \quad k = \frac{2\pi f}{c}$$

$$A^2 = A_1^2 + A_1^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi, \quad \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2,$$

где  $L_x$  и  $L_0$  - геометрические пути лучей 1 и 2 соответственно. Дополнительный набег фазы, составляющий  $\pi$  для луча 1, объясняется отражением от электродинамически более плотной среды. Учитывая квадратичность приёмника, в дальнейшем, вместо квадрата амплитуды волны, будем записывать напряжение на выходе приёмника. То есть получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} u &= u_{01} + u_{02} + 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \Delta\varphi = u_{01} + u_{02} + 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[ \frac{2\pi f}{c} (L_x - L_0) + \pi \right] = \\ &= u_{01} + u_{02} - 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[ \frac{2\pi f}{c} (L_x - L_0) \right] \\ u &= u_{01} + u_{02} - 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[ \frac{2\pi f}{c} \Delta L \right], \quad \Delta L = L_x - L_0 \\ L_x &= \sqrt{L_0^2 + 4h^2}. \end{aligned}$$

Здесь  $L_x$  и  $L_0$  - геометрические пути лучей 1 и 2 соответственно;  $h$  - расстояние до отражающей поверхности;  $L_0$  - расстояние от источника до приёмника (эта величина нам известна).

Из последнего выражения найдём формулу для координаты  $m$ -го минимума. Запишем систему для двух соседних минимумов:

$$\begin{cases} x_{\min}^{(m)} = \frac{2f}{cm} \left[ h^2 - \frac{c^2 m^2}{4f^2} \right] \\ x_{\min}^{(m+1)} = \frac{2f}{c(m+1)} \left[ h^2 - \frac{c^2 (m+1)^2}{4f^2} \right] \end{cases}$$

Из данной системы можно найти величину  $h$ . Значения  $x_{\min}^{(m)}$ ,  $x_{\min}^{(m+1)}$  координат двух соседних минимумов известны из результатов эксперимента. Зная величину  $h$ , необходимо решить систему:

$$\begin{cases} u_1 = u_{01} + u_{02} - 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[ \frac{2\pi f}{c} (L_{x1} - L_{01}) \right] \\ u_2 = u_{01} + u_{02} - 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[ \frac{2\pi f}{c} (L_{x2} - L_{02}) \right] \end{cases},$$

$$L_x = \sqrt{L_0^2 + 4h^2}.$$

Данная система разрешается относительно неизвестных  $u_{01}$  и  $u_{02}$ .

$$u_{01} = \frac{(u_2 \cos \theta_1 - u_1 \cos \theta_2) \pm \sqrt{-u_1^2 \sin^2 \theta_2 - u_2^2 \sin^2 \theta_1 + 2u_1 u_2 (1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2)}}{2(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}, \quad (1)$$

$$u_{02} = \frac{(u_2 \cos \theta_1 - u_1 \cos \theta_2) \mp \sqrt{-u_1^2 \sin^2 \theta_2 - u_2^2 \sin^2 \theta_1 + 2u_1 u_2 (1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2)}}{2(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}, \quad (2)$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi f}{c} (L_{x1} - L_{01}), \quad \theta_2 = \frac{2\pi f}{c} (L_{x2} - L_{02}).$$

Значения  $L_{01}$ ,  $L_{02}$  и соответствующие им величины  $u_1$  и  $u_2$  напряжений на выходе приёмника известны из эксперимента. При подстановке экспериментальных данных (частоты, положения двух соседних минимумов и соответствующих им напряжений) в выражениях (1) и (2) получаются чисто действительные решения.

Рассмотрим в качестве примера задачу интерференции пяти лучей. Для определённости будем считать, что первый луч является прямым, то есть идёт по прямому пути от источника к приёмнику. Для нахождения фазы и амплитуды возникающих в результате интерференции волн колебаний используем метод векторных диаграмм.

Приведём соотношения, которые определяют зависимость напряжения на выходе приёмника от расстояния между источником и приёмником  $u(L_1)$ :

$$u = u_{123} + u_{45} + 2\sqrt{u_{123}u_{45}} \left[ \cos(\varphi_{45}) \cos(\varphi_{123}) + \sin(\varphi_{45}) \sin(\varphi_{123}) \right],$$

$$\cos \varphi_{45} = \frac{A_{45}^x}{\sqrt{(A_{45}^x)^2 + (A_{45}^y)^2}}, \quad \sin \varphi_{45} = \frac{A_{45}^y}{\sqrt{(A_{45}^x)^2 + (A_{45}^y)^2}},$$

$$A_{45}^x = -\sqrt{u_4} \cos(kL_{x4}) - \sqrt{u_5} \cos(kL_{x5}), \quad A_{45}^y = -\sqrt{u_4} \sin(kL_{x4}) - \sqrt{u_5} \sin(kL_{x5}),$$

$$\cos \varphi_{123} = \frac{\sqrt{u_{12}} \cos(\varphi_{12}) - \sqrt{u_3} \cos(kL_{x3})}{\sqrt{(A_{123}^x)^2 + (A_{123}^y)^2}}, \quad \sin \varphi_{123} = \frac{\sqrt{u_{12}} \sin(\varphi_{12}) - \sqrt{u_3} \sin(kL_{x3})}{\sqrt{(A_{123}^x)^2 + (A_{123}^y)^2}},$$

$$A_{123}^x = \sqrt{u_{12}} \cos(\varphi_{12}) - \sqrt{u_3} \cos(kL_{x3}), \quad A_{123}^y = \sqrt{u_{12}} \sin(\varphi_{12}) - \sqrt{u_3} \sin(kL_{x3}),$$

$$u_{123} = u_{12} + u_3 + 2\sqrt{u_{12}u_3} \left[ \cos(\varphi_3) \cos(\varphi_{12}) + \sin(\varphi_3) \sin(\varphi_{12}) \right] =$$

$$= u_{12} + u_3 - 2\sqrt{u_{12}u_3} \left[ \cos(kL_{x3}) \cos(\varphi_{12}) + \sin(kL_{x3}) \sin(\varphi_{12}) \right],$$

$$\cos \varphi_{12} = \frac{A_{12}^x}{\sqrt{(A_{12}^x)^2 + (A_{12}^y)^2}}, \quad \sin \varphi_{12} = \frac{A_{12}^y}{\sqrt{(A_{12}^x)^2 + (A_{12}^y)^2}},$$

$$A_{12}^x = \sqrt{u_1} \cos(kL_1) - \sqrt{u_2} \cos(kL_{x2}), \quad A_{12}^y = \sqrt{u_1} \sin(kL_1) - \sqrt{u_2} \sin(kL_{x2}),$$

$$u_{12} = u_1 + u_2 + 2\sqrt{u_1u_2} \cos[kL_{x2} + \pi - kL_1] = u_1 + u_2 - 2\sqrt{u_1u_2} \cos[k(L_{x2} - L_1)],$$

$$u_{45} = u_4 + u_5 + 2\sqrt{u_4u_5} \cos[k(L_{x5} - L_{x4})], \quad k = \frac{2\pi f}{c},$$

$$L_{xi} = \sqrt{L_1^2 + 4h_i^2}, \quad i = 2, 3, 4, 5.$$

Все записанные равенства представляют собой фактически одно выражение, которое задаёт зависимость  $u(L_1)$ . Данное выражение содержит девять неизвестных -  $u_1, u_i, h_i, i=2,3,4,5$ . Поэтому нужно записать его для девяти произвольных значений  $L_1$  и соответствующих им напряжений  $u$ , которые должны быть получены экспериментально. В результате будет записана система из девяти нелинейных уравнений. Поскольку луч  $I$  полагается прямым (идущим по прямой линии от источника к приёмнику), величина  $u_1$  представляет собой основную составляющую принятого сигнала. После того, как все девять неизвестных величин будут найдены, можно построить теоретическую кривую  $u(L_1)$  распределения интенсивности вдоль оптической скамьи и сравнить полученный результат с экспериментальными данными.

В качестве начального приближения задавались те данные, которые были получены на предыдущем шаге решения задачи. Так, при решении задачи об интерференции трёх волн использовались данные, полученные при решении задачи о двух волнах. За исходную бралась задача с двумя волнами, которая решается аналитически.

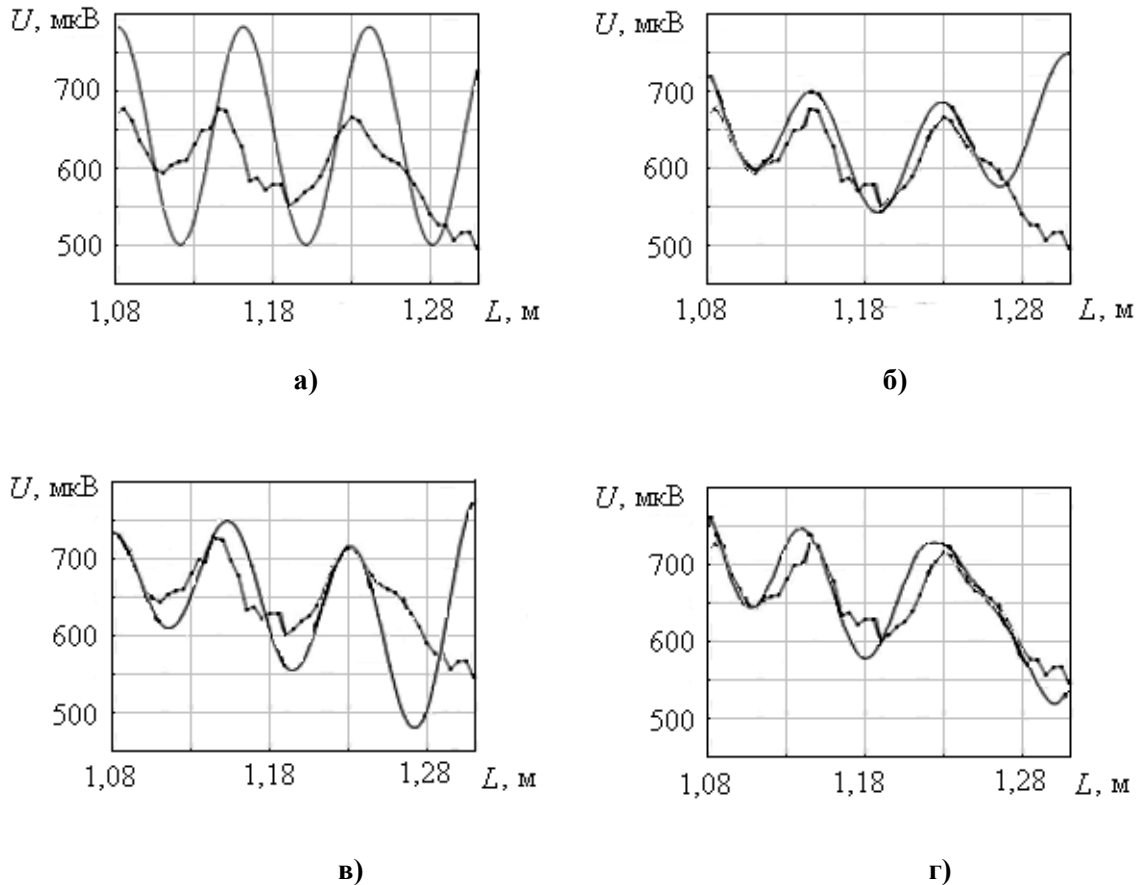
### Результаты расчета

Для решения нелинейных систем использовались возможности пакета Optimization Toolbox среды MATLAB. В частности, функция fsolve, которая находит корни (нули) системы нелинейных уравнений. В качестве примера обрабатывались экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, б.

Результат решения для случая двух интерферирующих волн:  $U_1 = 635,85$  мкВ,  $U_2 = 8,08$  мкВ,  $h_2 = 9,08$  м. Здесь и в дальнейшем напряжение  $U_1$  соответствует основной волне. Под  $h_i$  пони-



мается расстояние до той поверхности, от которой отражается волна с номером  $i$ , интенсивности которой соответствует напряжение  $U_i$ . На рис. 6, а приведено сравнение экспериментального распределения интенсивности (показано точками) с результатами решения задачи об интерференции двух волн.



**Рис. 6. Сравнение экспериментального распределения интенсивности (показано точками) с результатами решения задачи об интерференции волн:**

а – интерференция двух волн; б – интерференция трех волн;  
в – интерференция четырех волн; г – интерференция пяти волн

Для случая трёх интерферирующих волн:  $U_1=641,20$  мкВ,  $U_2=1,29$  мкВ,  $U_3=0,56$  мкВ,  $h_2=9,0$  м,  $h_3=0,50$  м. Результаты решения приведены на рис. 6, б.

На рис. 6, в приведено сравнение экспериментального распределения интенсивности с результатами решения задачи об интерференции четырех волн. Для пяти интерферирующих волн:  $U_1=611,98$  мкВ,  $U_2=127,22$  мкВ,  $U_3=0,19$  мкВ,  $U_4=11,59$  мкВ,  $U_5=84,15$  мкВ,  $h_2=4,15$  м,  $h_3=0,57$  м,  $h_4=1,99$  м,  $h_5=5,99$  м. Результаты решения приведены на рис. 6, г.

Анализ полученных результатов показывает, что по мере увеличения числа учитываемых волн величина интенсивности основной волны сходится к определённому значению, превышая интенсивности переотражённых волн. Рассчитанные в ходе решения задачи расстояния до отражающих поверхностей не превышают максимального расстояния между источником излучения и отражающими поверхностями в лаборатории. Наблюдается хорошее наложение экспериментальной и теоретической зависимостей интенсивности принимаемого сигнала от расстояния между антеннами. Таким образом, в рассмотренном примере основной вклад в формирование интерференционной картины вносят пять волн, а дальнейшее увеличение количества учитываемых переотражённых волн приводит к изменению интенсивности основной волны, не превышающему 1%.

## Выводы

В работе описано исследование ЭМО в помещении лаборатории микроволновой электродинамики НГТУ, проведенное для обеспечения корректных антенных измерений в диапазоне частот 2–12 ГГц. Коэффициент безэховости в области приемной антенны составил -30 дБ на частоте 4 ГГц, благодаря применению поглощающего материала ECCOSORB VHP-4-NRL. Предложен алгоритм для выделения основной составляющей принятого сигнала, позволяющий более точно измерять основные параметры и характеристики антенны в лаборатории, не оборудованной специально для антенных измерений.

## Библиографический список

1. E&C Anechoic Chambers / <http://www.ecantchoicchambers.com>.
2. **Motley, A. J.**, Radio coverage in buildings / A. J. Motley, J. M. Keenan // Bell System Technical Journal. 1990. V. 8. P. 19–24.
3. **Landstorfer, M.**, Dominant paths for the field strength prediction / M. Landstorfer, G. Wolfle // IEEE 48th International conference on vehicular technology. 1998. P. 552–556.
4. **Huschka, T.**, Ray tracing models for indoor environments and their computational complexity // IEEE 5th International symposium on personal, indoor and mobile radio communications. 1994. P. 486–490.
5. Fast Field Prediction Techniques for Indoor Communication Systems / C. Carciofi [at al.] // 2nd European personal and mobile communications conference. 1997. P. 37–42.
6. Finite-difference time-domain modeling of curved surfaces / T.G. Jurgens [at al.] // IEEE Trans. Antennas Propag. 1992. V. 40. P. 357.
7. **Белов, Ю. И.**, Экспериментальное исследование излучающих свойств открытого конца волновода прямоугольного сечения вблизи проводящих объектов / Ю.И. Белов, Е.Л. Варенцов, И.А.Илларионов // Антенны. 2009. Вып. 12(151). С. 18-27.
8. **Белов, Ю. И.**, Экспериментальное исследование отражений в большой радиобезэховой камере / Ю. И. Белов, А. В. Кашин // Антенны. 2006. N 5. С. 49-61.

*Дата поступления  
в редакцию 04.08.2012*

**V. Birukov, V. Grachev, M. Koltsov, G. Malyshev, A. Raevskii, V. Sherbakov**

## RESEARCH OF THE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENTS IN NNSTU MICROWAVE LABORATORY

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev

The study considered different models for electromagnetic environments calculation and compared their computational complexity.

Ray tracing method has allowed to reveal sources of the reflected waves and partly weaken their influence.

It is possible, for example, to reach conditions for antenna measurements execution indoors usual educational laboratory. The study presented examples of measurements results for initial laboratory and quasi anecho one.

Moreover, the study offered the method of the mathematical processing of measurements results for reduction the reflected waves influence. The method is based on multirays interference analysis.

*Key words:* electromagnetic environments, anecho camera, anecho factor, interference.