

**Быков А.Г., Лосев Д.В., Бардашов Д.С.**  
*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

## **Рассеяние электромагнитных волн совокупностью нелинейных объектов**

*Рассмотрена задача о взаимодействии излучения с несколькими нелинейными рассеивателями. Представлены результаты численного моделирования поля, рассеянного двумя включениями с различными нелинейными свойствами, и восстановления на этой основе их вольт-амперных характеристик.*

**Ключевые слова:** нелинейный объект, вольт-амперная характеристика.

В настоящее время в ряде вопросов физики и техники все более актуальными становятся задачи, связанные с нелинейными явлениями при распространении волн в различных средах. Такого рода интерес появился в связи с развитием систем генерации и приема сверхширокополосного и высокоомощного излучения, а также попытками его использования для передачи и получения различного рода информации. Дело в том, что при воздействии высокоомощного излучения на практически любое вещество становятся существенными нелинейные эффекты, заключающиеся в появлении в спектральном составе рассеянного излучения дополнительных составляющих, которые необходимо учитывать. Поэтому для правильного описания распространения волны важно знать характер взаимодействия излучения с веществом и уметь восстанавливать нелинейные свойства среды на основе измерений.

Как правило, эффект нелинейного рассеяния используется для целей инженерной разведки, в основном при обнаружении скрытых радиоэлектронных устройств [1-3]. Методы нелинейной радиолокации применяются также для целей неразрушающего контроля, диагностики и дефектоскопии. Существуют также некоторые среды, которые проявляют нелинейные свойства и при достаточно малых уровнях воздействующего поля. Среди них особое значение для исследования имеют клетки живых организмов [4]. Поскольку развитие многих заболеваний характеризуется изменением обмена веществ на клеточном уровне, то определение нелинейных свойств биологических тканей будет способствовать более ранней диагностике и эффективному лечению заболеваний.

В связи с вышеуказанными приложениями необходимо рассмотреть задачу об рассеянии излучения совокупностью нелинейных включений и, в пределе, сплошной нелинейной средой. При этом важно научиться правильно определять нелинейную характеристику вещества в точке локализации и различать нелинейные свойства соседних включений. Однако существующие подходы ограничиваются анализом случая одиночной нелинейности в частотной [2] или временной [5] областях. В этой статье обобщается развитый в [5] подход.

### ***Уравнение поля в среде с нелинейными включениями***

Исследуем свойства электромагнитного поля, рассеянного несколькими нелинейностями, изолированными и сосредоточенными в некоторых точках пространства. Для определенности будем считать, что нелинейные объекты имеют форму одинаковых

малых цилиндров с центрами в точках  $\vec{r}_i$ , радиусом  $a$  и высотой  $h$  (рис. 1). Пренебрегая эффектами деполаризации излучения, ограничимся скалярным приближением для выделенной проекции вектора напряженности электрического поля  $E(\vec{r}, t)$ .

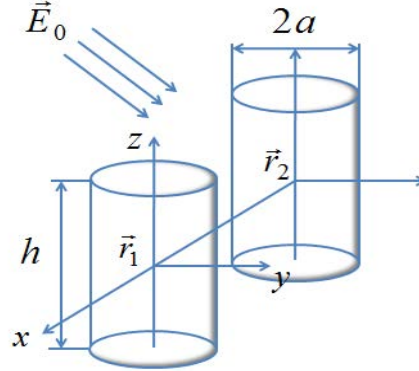


Рис. 1. Геометрия задачи.

Обобщая результаты [5], поле, рассеянное совокупностью нелинейностей, можно получить в результате решения нелинейного уравнения

$$E(\vec{r}_0, t_0) = E_0(\vec{r}_0, t_0) - \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_i \frac{\partial j_i(E(\vec{r}_i, t_i), \vec{r}_i, t_i)}{\partial t_i} I_{0i}, \quad (1)$$

где учтено время запаздывания  $t_i = t_0 - |\vec{r}_0 - \vec{r}_i|/v$  от точки приема  $\vec{r}_0$  до центра  $i$ -ого нелинейного объекта,  $j_i(E(\vec{r}_i, t_i), \vec{r}_i, t_i)$  – его нелинейная вольт-амперная характеристика, а коэффициенты  $I_{0i}$  в приближении тонкого цилиндра  $a \ll \sqrt{\rho_{0i}^2 + z_{0i}^2}$  определяются выражением

$$I_{0i} \approx \pi a^2 \left( \ln \left| \frac{h}{2} - z_{0i} + \sqrt{\left(\frac{h}{2} - z_{0i}\right)^2 + \rho_{0i}^2} \right| - \ln \left| \frac{h}{2} + z_{0i} - \sqrt{\left(\frac{h}{2} + z_{0i}\right)^2 + \rho_{0i}^2} \right| \right), \quad (2)$$

$$\rho_{0i} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}, \quad z_{0i} = z_0 - z_i.$$

Полученная зависимость  $I_{0i}$  может быть отождествлена с полем точечного источника (диполя) и является обобщением традиционных формул для зависимостей от расстояния в ближней, дальней и промежуточной зонах. Например, в случае дальней зоны переизлучателя, когда  $z_{0i} \gg h/2$ ,  $I_{0i} \approx \pi a^2 h / \sqrt{z_{0i}^2 + \rho_{0i}^2}$ .

Подстановка выражения (2) в уравнение (1) дает окончательный вид уравнению прямой задачи зондирования для случая нескольких сосредоточенных нелинейных объектов.

### Численное моделирование и анализ результатов

Решение прямой задачи было реализовано с помощью итерационного процесса. По аналогии с [5], будем рассматривать зависимости в терминах эквивалентных напряжений:  $u_0(\vec{r}_i, t) = E_0(\vec{r}_i, t)h$  – электродвижущая сила (ЭДС), наведенная падающим излучением на нелинейности,  $u(\vec{r}_i, t) = E(\vec{r}_i, t)h$  – эквивалентное падение напряжения, наведенное на  $i$ -ом нелинейном элементе полным полем.

Кроме того, важным отличием данной задачи от рассмотренной в [5] является зависимость сигналов от пространственной и временной переменных. Соответственно, для

правильной реализации итерационной процедуры необходим расчет сигналов, кроме точки приема, еще и во всех точках локализации нелинейностей. Тем самым производится учет многократных переотражений от каждого объекта. Таким образом, временная зависимость рассеянного на нелинейности поля определяется из решения разностного уравнения с помощью итерационной процедуры

$$v_{k+1}(\bar{r}_j, t) = - \sum_i L_{ji} \frac{f_i(u_k(\bar{r}_i, t + \Delta t - t_{ji})) - f_i(u_k(\bar{r}_i, t - t_{ji}))}{\Delta t},$$

где величина  $v_k(\bar{r}_i, t) = u_k(\bar{r}_i, t_1) - u_0(\bar{r}_i, t)$  описывает  $k$ -ую итерацию напряжения на  $i$ -ом объекте, соответствующего рассеянному полю, функция  $f_i$  представляет собой вольт-амперную характеристику  $i$ -ого объекта. В этой формуле учтено запаздывание сигнала при распространении между объектами  $t_{ji} = |\bar{r}_j - \bar{r}_i|/v$ . Использовано понятие эквивалентной индуктивности, определяемой соотношением  $\pi a^2 L_{ji} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_{ji}$ , где величина  $I_{ji}$  вычисляется по формуле (2) с заменой координат точки приема на координаты  $j$ -ого объекта.

Данная итерационная процедура была реализована для случая двух объектов с квадратичной характеристикой  $f_1(u) = u^2$  и вольт-амперной характеристикой полупроводникового диода  $f_2(u) = I_0(e^{\alpha u} - 1)$ . На рис. 2 приведены нормированные зависимости нескольких первых итераций для напряжения, соответствующего рассеянному полю в точке регистрации при различном расположении объектов. На каждом графике оно иллюстрируется схемой. Совпадение кривых для различных итераций позволяет ограничиться учетом только однократного рассеяния.

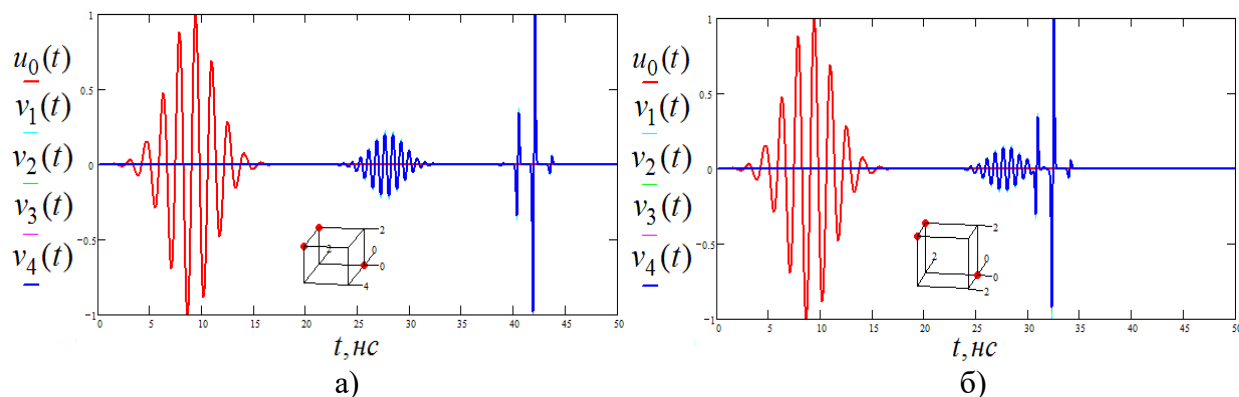


Рис. 2. Временная зависимость поля в случае разнесенных объектов

Рассмотрим решение обратной задачи, заключающейся в разделении вольт-амперных характеристик отдельных объектов. Для упрощения будем считать, что местоположение рассеивателей, а, следовательно, временная задержка сигнала, нам известны. Предлагаемая процедура восстановления заключается в выделении временного окна, длительностью не менее временной протяженности исходного импульса, и сопоставлении рассеянного и падающего сигналов. При этом важно правильно совместить начальные моменты исходного и каждого из рассеянных импульсов. На рис. 3-4 показаны восстановленные зависимости для нелинейных характеристик  $f_1(u)$  и  $f_2(u)$  для случаев различного расположения объектов. Здесь сплошной кривой показаны заданные нелинейные характеристики, а точками – полученные в результате решения обратной задачи значения.

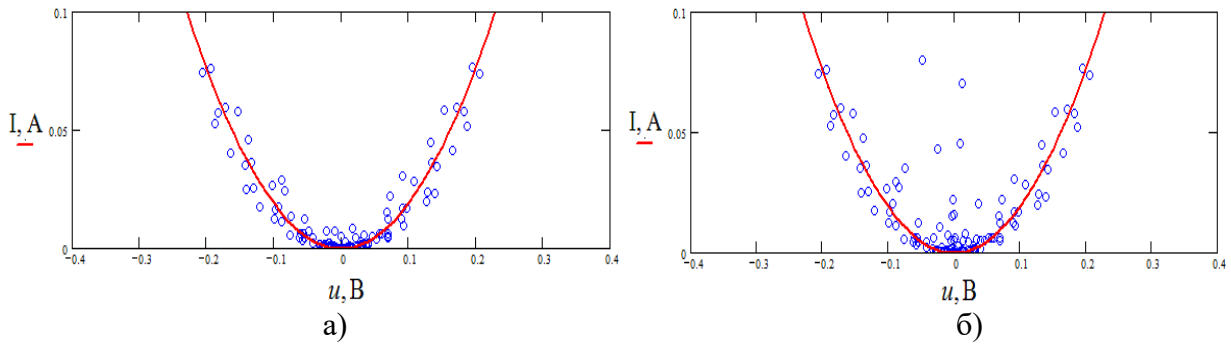


Рис. 3. Восстановленная квадратичная вольт-амперная характеристика при различном расположении объектов

Для адекватного восстановления необходимо, чтобы расстояние между объектами было не меньше половины пространственной длительности импульса. В противном случае восстанавливается комбинированная зависимость.

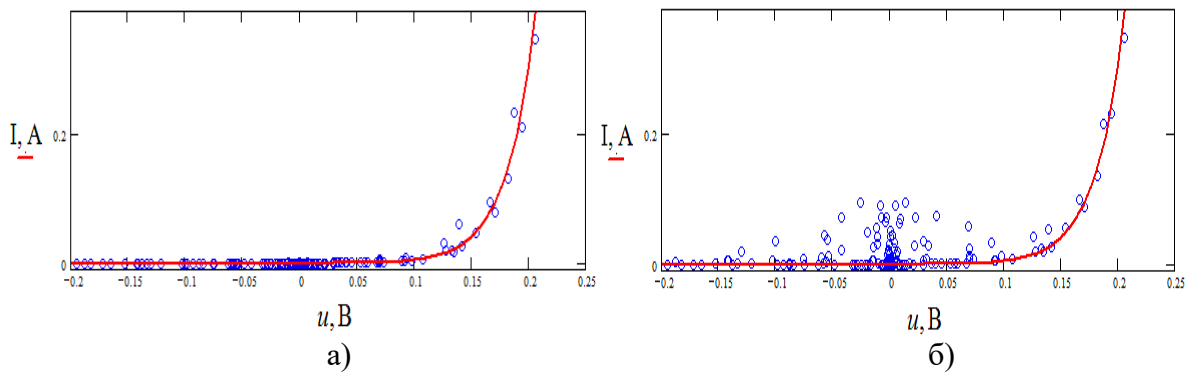


Рис. 4. Восстановленная вольт-амперная характеристика диода при различном расположении объектов

#### Библиографический список

1. Рувинова Э. Нелинейные радиолокаторы. Противодействие радиоэлектронным средствам шпионажа // Электроника: наука, технология, бизнес, 2000, № 4. – С. 28-32.
2. Якубов В.П., Лосев Д.В., Мальцев А.И. Диагностика нелинейностей по возмущениям рассеянного поля // Известия вузов. Радиофизика, 2000, Т. 43, № 7. – С. 645-651.
3. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Юрченко А.В. Дистанционная сверхширокополосная томография нелинейных радиоэлектронных элементов // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 3. С. 122-125.
4. Нелинейные электромагнитные волны / Под ред. П.Усленги. -М.: Мир, 1983. – 312 с.
5. Быков А.Г., Лосев Д.В., Бардашов Д.С. Рассеяние электромагнитных волн полупроводниковым диодом // Материалы VI научно-практической конференции – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015.– С. 213-222.