

УДК 629.73.054:621.396(075.8)
DOI: 10.15827/0236-235X.124.803-807

Дата подачи статьи: 16.03.18
2018. Т. 31. № 4. С. 803–807

Разработка программного инструмента для исследования дифракции электромагнитных волн на нелинейных элементах

В.Н. Пичугин ¹, к.т.н., доцент, vladimir_iii@mail.ru

¹ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

Актуальной областью научных исследований на сегодняшний день является нелинейная радиолокация. Наиболее востребованы нелинейные датчики для обнаружения помечаемых ими объектов и осуществления их идентификации. Такие нелинейные датчики-маркеры устанавливаются на перевозимых объектах и передают до 1 000 бит информации при идентификации.

Объектом исследования в данной работе является дифракция электромагнитных волн в нелинейных излучателях радиоприемных устройств (датчиках), работающих в многоволновом режиме. В ходе исследования проведено моделирование возникающих электродинамических эффектов.

Цель – разработка программного инструмента и моделирование с помощью него дифракционных характеристик электромагнитных волн на решетке нелинейных элементов.

Программный имитатор разработан в интегрированной среде RAD Studio с использованием библиотеки OpenGL на платформе Windows. Все свойства объектов имитатора, доступные для изменения, используются в режиме run-time (времени выполнения), то есть интерфейсная форма и визуальные компоненты создаются в процессе компиляции.

Программный имитатор предназначен для построения модели спектральных характеристик в длинно- и коротковолновой частях волнового спектра. Также он применим для изучения характеристик рассеивания от идеально отражающих и полупрозрачных препятствий, находящихся как в свободном пространстве, так и на протяженной поверхности. Подобные методы дистанционного исследования протяженных поверхностей, основанные на анализе сигналов, которые формируются в результате отражения или излучения электромагнитных волн проходными новообразованиями, позволяют судить об их рельефе, характеристике и типе различных местоположений, размерах различных объектов и т.д.

Основной результат исследования – разработанные программные методы анализа решеток нелинейных излучателей в многоволновом режиме приема, а также программная методика расчета дифракционных характеристик на высоких частотах с учетом неоднородности электромагнитных полей.

Ключевые слова: программа моделирования дифракция, электромагнитные волны, нелинейные датчики, RAD Studio, OpenGL.

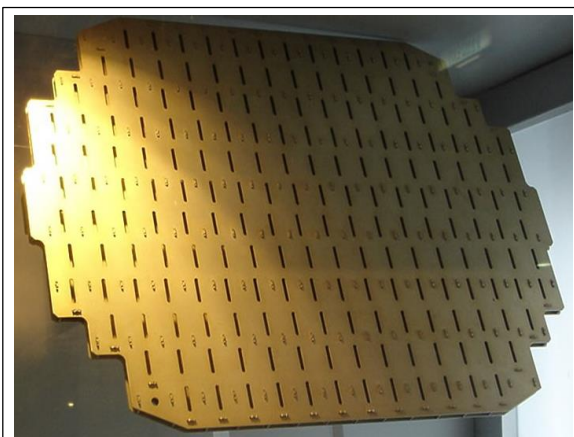
В нелинейных элементах на высоких частотах начинают распространяться несколько типов электромагнитных волн. Это требует учета особенностей характеристик электромагнитных волн при решении различных задач *нелинейной радиолокации* (НРЛ). К числу таких устройств относятся решетки нелинейных щелевых излучателей (см. рисунок). В нелинейной решетке, состоящей из щелей, возникают новые особенности и связанные с ними технические возможности [1].

Наиболее интересны такие щелевые решетки в НРЛ – информационной технологии, в основе которой лежит эффект рассеяния электромагнитных волн на объектах, обладающих нелинейными свойствами. Это направление исследований в технике представляет новую область радиолокации и вызывает большой интерес в научных кругах и у разработчиков программных и аппаратных систем получения информации об окружающей среде [2].

Теоретическому расчету и конструктивному исследованию таких систем посвящен ряд работ, в которых предполагается использовать нестандартные аналитические методы электродинамического анализа, а именно решение интегральных и дифференциальных уравнений высокого порядка при по-

мощи смены системы координат, решения граничной задачи методом разделения переменной на основе разложения плоской электромагнитной волны в ряды по функции Матье, функций Бесселя и Ханкеля [3].

Наиболее современные разработки представлены в работах [4–6], в патентах и исследовани-



Внешний вид нелинейных излучателей в системе
Appearance of nonlinear emitters in the system

ях [7, 8]. Использование способности некоторых объектов не только рассеивать падающие на них радиоволны, но и преобразовывать их спектр, позволяет рассматривать широкий круг задач, решение которых традиционными методами невозможно либо малопродуктивно.

При использовании таких нелинейных систем в многоволновом режиме из-за недоступности надежных средств расчета обычно не обходится без трудоемкого эксперимента. На основании аналитических формул в ряде источников [9, 10] можно почерпнуть возможности разработки программ в интегрированных средах Visual Studio 2017 Professional и RAD Studio на языке программирования C++ для численного расчета распределения дифрагированного поля в антенной системе с целью контроля характеристик.

Основной задачей является разработка программного инструмента, позволяющего моделировать дифракционную картину на плоском нелинейном (щелевом) датчике и таким образом учитывать особенности при их разработке и использовании.

Моделирование с помощью программного инструмента позволит провести строгий анализ работы нелинейных устройств и также оптимизировать их характеристики.

Электромагнитное поле, излучаемое таким нелинейным излучателем, представляет собой результат интерференции первичного поля и вторичного (дифрагированного), создаваемого системой токов, наведенных на поверхности первичным полем. Предполагается, что на нелинейный излучатель падает плоская, определенным образом поляризованная волна. Решение аналитической задачи сводится к системе парных интегральных уравнений относительно спектральных функций для плотностей поверхностных токов, решаемых методом моментов:

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{Z}\tilde{I} + \tilde{M})\tilde{J}^l(\varepsilon)l^{i\varepsilon u} d\varepsilon = -2[\vec{n}, \vec{H}_t^{\text{пад.}}], \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{Z}\tilde{M} + \tilde{I})\tilde{J}^m(\varepsilon)l^{i\varepsilon u} d\varepsilon = -2Z\vec{H}_t^{\text{пад.}}, \\ \vec{J}^l = \vec{x}_0\vec{J}_x^l(\varepsilon) + \vec{y}_0\vec{J}_y^l(\varepsilon), \\ \vec{J}^m = \vec{x}_0\vec{J}_x^m(\varepsilon) + \vec{y}_0\vec{J}_y^m(\varepsilon). \end{cases} \quad (1)$$

Для численного моделирования с использованием разрабатываемого программного инструмента спектральных характеристик при дифракции электромагнитных волн воспользуемся методом моментов [1].

Суть метода заключается в следующем. Известные функции $\tilde{j}^{l(m)}(\varepsilon)$ разлагаются в ряд по системе ортогональных на ширине излучателя функций:

$$\begin{cases} J_x^l(\varepsilon) = \sum_{m=0}^{\infty} \left(C_{2m} \frac{J_{2m+1}(\varepsilon)}{\varepsilon} + C_{2m+1} \frac{J_{2m+2}(\varepsilon)}{\varepsilon} \right); \\ J_y^l(\varepsilon) = \sum_{m=0}^{\infty} (D_{2m}J_{2m}(\varepsilon) + D_{2m+1}J_{2m+1}(\varepsilon)). \end{cases} \quad (2)$$

Решение интегрального уравнения $\int_a^b K(x, y)u(y)dy = \xi(x); x \in [c, d]; (c \leq x \leq d)$ ищем в виде суммы:

$$u(y) = \sum_{n=1}^N a_n \varepsilon_n(y), \quad \sum_{n=1}^N \int_a^b k(x, y)a_n \varepsilon_n(y)dy = \xi(x). \quad (3)$$

Для получения равенства проводим ортогонализацию по системе ортогональных функций. Для минимизации разности потребуем, чтобы уравнение (2) было ортогонально к каждому элементу весовых функций $\{\eta_l\}$ [9].

Правую часть уравнения (3) также представим в виде суммы $f(x) = \sum_{l=1}^L U_l \eta_l(y)$ на отрезке

$x \in [c, d]$, то есть проецируем обе части уравнения на сумму $\{\eta_l\}$.

В результате получаем систему уравнений:

$$\sum_{n=1}^N a_n \int_c^d \left\{ \int_a^b K(x, y)\varepsilon_n(y)dy \right\} \eta_l(x)dx = \int_c^d f(x)\eta_l(x)dx, \quad (4)$$

где $1 \leq l \leq L$.

Таким образом, имеем систему уравнений с неизвестными коэффициентами a_n :

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[z + \frac{k^2 - \varepsilon^2}{wk} + \frac{\varepsilon p_0}{wk} \right] \sum_{m=0}^{\infty} \left(C_{2m} \frac{J_{2m+1}(\varepsilon)}{\varepsilon} + C_{2m+1} \frac{J_{2m+1}(\varepsilon)}{\varepsilon} \right) l^{i\varepsilon u} d\varepsilon = \\ = \cos \theta_0 \cos \Phi_0 l^{iku \sin \theta_0 \cos \Phi_0 + i \frac{y}{a} p_0} z; \\ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[z + \frac{k^2 - \varepsilon^2}{wk} + \frac{\varepsilon p_0}{wk} \right] \{ D_{2m} J_{2m}(\varepsilon) + D_{2m+1} J_{2m+1}(\varepsilon) \} l^{i\varepsilon u} d\varepsilon = \\ = \cos \theta_0 \sin \Phi_0 l^{iku \sin \theta_0 \cos \Phi_0 + i \frac{y}{a} p_0} z; \\ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[1 + z \frac{k^2 - \varepsilon^2}{wk} + z \frac{\varepsilon p_0}{wk} \right] \left(F_{2m} \frac{J_{2m+1}(\varepsilon)}{\varepsilon} + F_{2m+1} \frac{J_{2m+1}(\varepsilon)}{\varepsilon} \right) l^{i\varepsilon u} d\varepsilon = \\ = \sin \Phi_0 l^{iku \sin \theta_0 \cos \Phi_0 + i \frac{y}{a} p_0} z; \\ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[1 + z \frac{k^2 - \varepsilon^2}{wk} + z \frac{\varepsilon p_0}{wk} \right] \{ G_{2m} J_{2m}(\varepsilon) + G_{2m+1} J_{2m+1}(\varepsilon) \} l^{i\varepsilon u} d\varepsilon = \\ = (-) \cos \Phi_0 l^{iku \sin \theta_0 \cos \Phi_0 + i \frac{y}{a} p_0} z; \end{cases}$$

Умножаем на весовые функции и интегрируем.

Получаются следующие интегральные уравнения для спектральной плотности поверхностных токов:

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{Z}\tilde{I} + \tilde{M})\tilde{J}^l(\varepsilon)l^{i\varepsilon u} d\varepsilon = -2[\vec{n}, \vec{H}_t^{\text{пад.}}]; \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{Z}\tilde{M} + \tilde{I})\tilde{J}^m(\varepsilon)l^{i\varepsilon u} d\varepsilon = -2Z\vec{H}_t^{\text{пад.}}; \\ \vec{J}^l = \vec{x}_0\vec{J}_x^l(\varepsilon) + \vec{y}_0\vec{J}_y^l(\varepsilon); \\ \vec{J}^m = \vec{x}_0\vec{J}_x^m(\varepsilon) + \vec{y}_0\vec{J}_y^m(\varepsilon); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} (-)[\vec{n}, \vec{H}_t] = (\bar{x} \cos \theta_0 \cos \Phi_0 + \\ \quad + \bar{y}_0 \cos \theta_0 \sin \Phi_0) l^{juk \sin \theta_0 \cos \Phi_0 + j \frac{y}{a} p_0}; \\ (-)\vec{H}_t = (\bar{x} \sin \Phi_0 - \\ \quad - \bar{y}_0 \cos \Phi_0) l^{juk \sin \theta_0 \cos \Phi_0 + j \frac{y}{a} p_0}. \end{cases}$$

Рассмотрим эти интегралы:

$$\begin{aligned} & \int_{-1}^1 l^{iku \sin \theta_0 \cos \Phi_0} \frac{J_n(u)}{u} du = \\ & = \int_{-1}^1 l^{ik\eta_x u} \frac{J_n(u)}{u} du = \\ & = \frac{1}{ik\eta_x} \int_{-1}^1 \frac{J_n(u)}{u} dl^{ik\eta_x u} = \\ & = \frac{J_n(u)}{u} \cdot \frac{1}{ik\eta_x} l^{ik\eta_x u} - \int_{-1}^1 \frac{l^{ik\eta_x u}}{ik\eta_x} d \frac{J_n(u)}{u} = \\ & = \frac{J_n(u)}{u} \cdot \frac{l^{ik\eta_x u}}{ik\eta_x} \Big|_{-1}^1 - \int_{-1}^1 \frac{l^{ik\eta_x u}}{ik\eta_x} \cdot \frac{J'_n(u) - J_n(u)}{u^2} du = \\ & = (-) \int_{-1}^1 \frac{l^{ik\eta_x u}}{ik\eta_x} \cdot \frac{-J'_{n+1}(u)}{u^2} + \frac{nJ_n(u)}{u^3} - \frac{J_n(u)}{u^4} du; \\ & \frac{dJ_p(z)}{dz z^p} = -\frac{J_{p+1}(z)}{z^p}; \\ & z = kl; \rightarrow J'_p(kl) = -J_{p+1}(kl); \\ & J'_p(z) = -J_{p+1}(z) + \frac{pJ_p(z)}{z}; \\ & J_p(-z) = (-1)^p J_p(z); \\ & J_{n+1}(u) - \frac{2n}{u} J_n(u) + J_{n-1}(u) = 0. \end{aligned} \tag{6}$$

Выражение (6) – разложение по полной системе спектральных функций на ширине излучателя плотностей токов $J^l(u), J^m(u)$.

В качестве таких функций берутся полиномы Якоби $P_n^\alpha(u)$ на интервале $u \in [-1; 1]$. Они имеют весовые функции $(1-u^2)^{-\frac{1}{\alpha}}$, где $\alpha = \frac{1}{2}$. Для полиномов Чебышева 1-го рода – $T_n(u)$; для полиномов Чебышева 2-го рода – $(1-u^2)^{-\frac{1}{\alpha}}$, где $\alpha = \frac{1}{2}$:

$$\begin{aligned} & (1-p)^p (1+q)^q P_k^{(p,q)}(x) = \\ & = \frac{(-1)^k}{k!} \frac{d^k}{dx^k} [(1-p)^{p+k} (1+q)^{q+k}] \end{aligned}$$

при $p = q = 0$ – полиномы Лагранжа;

при $p = q = (-)\frac{1}{2}$ – полиномы Чебышева 1-го рода $T_n(u)$;

при $p = q = \frac{1}{2}$ – полиномы Чебышева 2-го рода $T_n(u)$.

Данные функции должны удовлетворять теореме Винера–Пэли (функция $f(t) = 0$ при $|t| \geq a$, тогда ее преобразование Фурье $\psi(s)\Omega(s) = \int_{-a}^a f(t)l^{-ist} dt$).

Есть целая аналитическая функция экспоненциального типа $\leq \alpha$ ($\rho = 1$; $\delta \leq a$ или $\rho < 1$). Пусть $\psi(s)$ – целая функция экспоненциального типа $\leq \alpha$, такая, что $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx < \infty$ (интеграл берется по действительной оси).

Тогда существует функция $f(t)$, равная 0 при $|t| \geq a$, преобразование Фурье которой равно $\psi(s)$: $T'_n(u) = nU_{n-1}(u)$, где

$$\begin{cases} T_n(u) = \cos(n \arccos(u)), \\ U_n(u) = \frac{\sin((n+1) \arccos(u))}{\sqrt{(1+u)(1-u)}} = \\ = \frac{\sin((n+1) \arccos(u))}{\sqrt{1-u^2}}. \end{cases} \tag{7}$$

Полиномы Чебышева 2-го порядка ортогональны на интервале $u \in [-1; 1]$ с весом $p(k) = \sqrt{1-u^2}$, так что,

$$\frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 U_n(u)U_m(u)\sqrt{1-u^2} du = \begin{cases} 1 \text{ для } n = m, \\ 0 \text{ для } n \neq m. \end{cases}$$

Разложение спектральных функций $J^l(u), J^m(u)$ по полиномам $U_m(u)$ имеет вид

$$\begin{aligned} & J^{l,m}(u) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_m U_m(u); \\ & C_m = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 J^{l,m}(u)U_m(u)\sqrt{1-u^2} du. \end{aligned} \tag{8}$$

Для численного анализа спектральных функций по выражениям (8) в среде разработки RAD Studio написан программный имитатор. Он предназначен для моделирования спектральных характеристик в длинных и коротких волнах спектра. Для разработки выбран интерфейс с визуальными объектами, что предполагает использование событийного программирования и объектного подхода [10]. Для реализации событий выбран язык программирования Object Pascal.

Программный инструмент состоит из следующих частей.

1. Модуль bf – это главный модуль, в котором прописаны все остальные модули и подключаемые ресурсы.

2. Модуль `bfwindow`. Содержит описание главного окна, вкладок, главного и контекстного меню, а также сообщений пользователю, возникающих в процессе работы.

3. Модуль `bfgraph`. Содержит процедуры и функции для вывода графиков, их масштабирования, подписей по осям. Для работы с графикой в этом модуле подключается библиотека `OpenGL`. Также в этом модуле описана функция для работы с растровыми шрифтами (`Lucida Console`).

4. Модуль `bfmethod`. Содержит описание метода для подсчета первого приближения одиночного пика, для подсчета первого приближения (аппроксимация) одиночного пика и пары пиков в соответствии с методом наименьших квадратов. После этого в выделенной области рисуется график первого приближения. Все параметры тестируются, и в случае некорректности данных выдается соответствующая ошибка. Тестирование проводится как для одиночного пика, так и для пары пиков.

Экспериментальные данные о значениях переменных x и y задаются в таблице. Используя метод наименьших квадратов, аппроксимировать эти данные линейной зависимостью $y = ax + b$ (найти параметры a и b). Выяснить, какая из двух линий лучше (в смысле метода наименьших квадратов) выравнивает экспериментальные данные.

Задача заключается в нахождении коэффициентов линейной зависимости, при которых функция двух переменных a и b принимает наименьшее значение. То есть при данных a и b $F(a, b) =$

$$= \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$$

сумма квадратов отклонений

экспериментальных данных от найденной прямой будет наименьшей. Таким образом, решение примера сводится к нахождению экстремума функции двух переменных.

5. Модуль `bfderivator`. Содержит набор функций, позволяющих взять частную производную, использующуюся в аппроксимации методом наименьших квадратов. В данном модуле в массив занесена таблица производных.

6. Модуль `bfspecialfunc`. Содержит специальную функцию для расчета параметра разрешенности пика, соответствующего определенной площади под пиком при конкретизированном значении амплитуды.

7. Модуль `bfsysutils`. Содержит функции преобразования типов и процедуру сортировки.

8. Модуль `bftablefile`. Предназначен для чтения файлов определенного типа (в данном случае файла, содержащего таблицу) с заранее задаваемым предполагаемым количеством колонок (в данном случае две колонки).

9. Модуль `bfdialogs`.

10. Модуль `bfatd`. Содержит абстрактные типы данных и множество операторов над ними для ком-

пилятора и его связи с процедурой поиска наилучшего приближения.

11. Модуль `bfcompiler`. Является компилятором математических выражений любой сложности.

12. Модуль `bfhjtechnique`.

После запуска программного инструмента открывается окно, и далее необходимо загрузить файл со спектром. Спектр дифракции электромагнитной волны отобразится в виде графика на вкладке *Дифракция* (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-4/2018-4-dop/18.jpg>). Затем нужно задать область для анализа, которую можно увеличить.

Заданную область можно анализировать, например, посчитать первое приближение, которое будет построено в виде графика (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-4/2018-4-dop/13.jpg>). Полученные данные отображаются на вкладке *Метод анализа* (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-4/2018-4-dop/12.jpg>).

Разработанный программный инструмент может быть использован для анализа эффектов дифракции в нелинейном излучателе при проектировании в задачах радиолокации [1, 2, 10].

Основной результат исследования можно сформулировать как разработку программных методов анализа решеток нелинейных излучателей в многоволновом режиме приема, а также программной методики расчета дифракционных характеристик на частотах, превышающих основную частоту, с учетом неоднородности электромагнитных полей в данных условиях.

В рамках главного направления исследования решены следующие частные задачи:

- разработана математическая модель дифракции электромагнитной волны на нелинейном излучателе;

- в результате анализа получены формулы для расчета дифракционных зависимостей, которые дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными;

- разработан программный имитатор для исследования эффектов дифракции электромагнитной волны.

Описываемое в данной работе ПО относится к подсистеме вторичной обработки [2]. Первичной называется обработка полученных результатов во время экспериментальных исследований в лаборатории научно-исследовательского центра прикладной электродинамики Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева.

Литература

1. Пичугин В.Н., Пряников В.С., Седельников Ю.Е. Антенная решетка щелевых излучателей в многоволновом режиме приема: монография. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. 116 с.

2. Пичугин В.Н., Бугрова И.Г. Исследование дифракции электромагнитных волн на нелинейных рассеивателях. Вып. 1. М.: Образование. Наука. Научные кадры, 2013. 134 с.

3. Semyonov E., Loschilov A. Measurements of the nonlinearity of the ultra wideband signals transformation. *Ultra Wideband Communications: Novel Trends – System, Architecture and Implementation*. Rijeka, Croatia, InTech, 2011, pp. 3–16. DOI: 10.5772/16867.

4. Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // *Радиотехника и электроника*. 2009. Т. 54. С. 5–31.

5. The Whirlwind. URL: <http://vikhr.ru/product,137> (дата обращения: 13.03.2018).

6. Лошилов А.Г., Семенов Э.В., Малютин Н.Д., Мисюнас А.О., Ильин А.А. Разработка устройств обработки сверхширокополосных импульсных сигналов для исследования нелинейных свойств объектов методом нелинейной рефлектометрии // Докл. Томского гос. ун-та систем управления

и радиоэлектроники. 2010. № 2. Ч. 1. С. 166–170.

7. Лихачев В.П., Усов Н.А. Способ нелинейной радиолокации. Пат. 2382380РФ. МПКG01S13/00. 2008131114/09; заявл. 28.07.2008; опубл. 20.02.2010.

8. Лошилов А.Г., Бибииков Т.Х., Семенов Э.В., Малютин Н.Д. Экспериментальная установка для исследования характеристик нелинейности объектов при воздействии импульсами пикосекундной длительности // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: тр. 22-й Междунар. Крым. конф. Севастополь. 2012. С. 815–816.

9. MGVS Spice models. Aeroflex URL: http://www.aeroflex.com/ams/Metelics/pdfiles/MGV_spice_models.pdf (дата обращения: 13.03.2018).

10. Культин Н.Б. Основы программирования в Embarcadero Delphi. СПб: БХВ-Петербург, 2015. 232 с.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.124.803-807

Received 16.03.18

2018, vol. 31, no. 4, pp. 803–807

Development of a software tool for studying electromagnetic wave diffraction on nonlinear elements

V.N. Pichugin¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, vladimir_iii@mail.ru

¹I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Chuvash Republic, 428015, Russian Federation

Abstract. Nowadays the actual area of scientific research is nonlinear radar. Non-linear sensors for detecting the objects they mark and identifying them are in demand. Such nonlinear sensors-markers are installed on transported objects and transmit up to 1000 bits of information during identification.

The object of the study is the diffraction of electromagnetic waves in nonlinear emitters of radio devices (sensors) operating in multi-wave mode. The research included modeling of arising electrodynamic effects.

The goal is to develop a software tool and simulate diffraction characteristics of electromagnetic waves on a lattice of nonlinear elements.

The software simulator is developed in the RAD Studio integrated environment using the OpenGL library on the Windows platform. All simulator properties that might be changed are used at the run-time mode, i.e. the front-end form and visual components are created during the compile process.

The software simulator is designed to build a model of spectral characteristics in the long- and short-wave parts of the wave spectrum. It is also applicable when studying the characteristics of scattering from perfectly reflecting and semi-transparent obstacles in the free space or on extended surfaces. Similar methods of remote study of extended surfaces are based on the signal analysis that are formed as a result of reflection or electromagnetic waves emission by the pathways. They allow judging their relief, characteristics and type of different locations, sizes of different objects, etc.

The main result of the study is the developed software methods for analyzing of non-linear emitters gratings in multi-wave reception, as well as software methods for calculating the diffraction characteristics at high frequencies taking into account the inhomogeneity of electromagnetic fields.

Keywords: simulation program diffraction, electromagnetic waves, nonlinear sensors, RAD Studio, OpenGL.

References

- Pichugin V.N., Pryanikov V.S., Sedelnikov Yu.E. *Antenna Array of Slot-Hole Emitters in Multi-Wave Reception Mode*. Monograph. Cheboksary, 2013, 116 p.
- Pichugin V.N., Bugrova I.G. *The Study of Diffraction of Electromagnetic Waves on Nonlinear Scatterers*. Iss. 1. Moscow, Obrazovanie. Nauka. Nauchnye kadry Publ., 2013, 134 p.
- Semyonov E., Loschilov A. Measurements of the nonlinearity of the ultra wideband signals transformation. *Ultra Wideband Communications: Novel Trends – System, Architecture and Implementation*. Rijeka, Croatia, InTech Publ., 2011, pp. 3–16. DOI: 10.5772/16867.
- Immoriev I.Ya. Ultrawideband radars. Features and capabilities. *J. of Communications Technology and Electronics*. 2009, vol. 54, no. 1, pp. 5–31.
- The Whirlwind*. Available at: <http://vikhr.ru/product 137> (accessed March 13, 2018).
- Loshchilov A.G., Semenov E.V., Malyutin N.D., Misyunas A.O., Ilyin A.A. Development of devices of processing of UWB pulse signals to study the nonlinear properties of objects by the method of nonlinear reflectometry. *Proc. of TUSUR Univ*. 2010, no. 2, part 1, pp. 166–170 (in Russ.).
- Likhachev V.P., Usov N.A. *Nonlinear Radar Method*. Patent RF no. 2382380. IPCG01S13/00. 2010.
- Loshchilov A.G., Bibikov T.Kh., Semenov E.V., Malyutin N.D. Experimental setup to study the characteristics of nonlinearity objects when exposed to pulses of picosecond duration. *Proc. 22th Intern. Crimea Conf. "Microwave and Telecommunication Technologies" (Computer Vision'2012)*. Sevastopol, 2012, pp. 815–816 (in Russ.).
- MGV Spice Models. Aeroflex*. Available at: http://www.aeroflex.com/ams/Metelics/pdfiles/MGV_spice_models.pdf (accessed March 13, 2018).
- Kultin N.B. *Programming Bases in Delphi Embarcadero*. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2015, 232 p.