

# Моделирование рассеяния сверхкороткого импульса на идеально проводящем цилиндре

А.С. Жабин<sup>1</sup>, С.В. Карамов<sup>1</sup>, А.В. Крисиллов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Целевая поисковая лаборатория прорывных технологий радиосвязи Фонда перспективных исследований, акционерное общество "Концерн "Созвездие", Орджоникидзе 25, Воронеж, Россия, 394006

**Аннотация.** Проведено моделирование рассеяния электромагнитного поля сверхкороткого импульса на проводящей цели цилиндрической формы. Поздневременная часть отраженного сигнала использовалась для определения резонансных частот при помощи обобщенного метода матричных пучков. На основании полученных данных были определены размеры цилиндра. Моделирование проводилось для импульсов различной длительности, после чего была выполнена оценка точности определения параметров цели.

## 1. Введение

В настоящее время активно ведутся работы по созданию технических средств для решения задач обнаружения целей за оптически непрозрачными препятствиями, так называемые системы микроволнового зрения [1]. В качестве радиосигналов для таких систем используются импульсы субнаносекундной длительности. При излучении сверхкороткого импульса (СКИ) электромагнитное поле падающей волны возбуждает ток на проводящей поверхности цели, который генерирует рассеянное поле отраженной волны. Во временной области отраженный радиолокационный сигнал может быть разделен на два интервала: ранневременной (early time response, ETR) и поздневременной (late time response, LTR) [2]. Форма ранневременной части во многом зависит от падающей волны. Спектральный состав поздневременной части отклика [3] определяется формой и размерами облучаемой цели. Таким образом, используя информацию о характерных признаках облучаемого объекта можно определить параметры радиоцели, такие как размер и форма.

В данной работе описано моделирование рассеяния сверхширокополосного импульсного сигнала на проводящем цилиндре в свободном пространстве. Целью работы было определение параметров цели, а именно высоты цилиндра и его диаметра. Для решения данной задачи был проведен частотный анализ поздневременной части отклика методом матричных пучков и определены значения резонансных частот. Моделирование проводилось для импульсов различной длительности, после чего была выполнена оценка точности определения параметров цели.

## 2. Рассеяние сверхкороткого импульса на цели

В приложениях микроволнового зрения используются импульсные сигналы субнаносекундной длительности с полосой от 0.5 ГГц до 5 ГГц по уровню -20 дБ [1]. Так как, эффективная площадь рассеяния зависит от частоты воздействующего сигнала, спектральные составляющие

рассеиваются не одинаково. Существует подход [3], согласно которому можно определить уникальные признаки цели используя информацию, содержащуюся в отраженном сигнале. Отраженный сигнал во временной области принято разделять на ранневременную и поздневременную часть. Момент завершения ранневременной части и начала поздневременной части отклика находится из выражения:

$$T_{LTR} = T_1 + T_2 + 2T_3, \quad (1)$$

где  $T_1$  - время распространения волны от источника сигнала до переднего края цели и от цели до приёмника,  $T_2$  - длительность импульса,  $T_3$  - время прохождения волнового фронта сквозь цель. Поздnevременная часть отклика определяется параметрами облучаемого объекта. Она содержит собственные частоты и может быть записана как сумма затухающих колебаний [4]:

$$x_n = \sum_{k=1}^M b_k z_k^n, \quad (2)$$

где  $b_k = A_k e^{j\varphi_k}$  - комплексные амплитуды,  $z_k = e^{(\alpha_k + 2j\pi f_k)T}$  - комплексные экспоненты,  $\alpha_k$  - коэффициент затухания,  $\varphi_k$  - начальная фаза компоненты сигнала,  $T$  - период дискретизации сигнала,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ ,  $N$  - число отсчетов,  $M$  - порядок модели.  $M$  ограничивает число гармоник, которое учитывается для представления сигнала в виде (2). Его значение зависит от ширины спектра излучаемого сигнала, формы и параметров цели. На практике ограничиваются небольшим порядком модели, так как колебания более высоких порядков быстро затухают.

Используя значения частот комплексных экспонент  $z_k$ , вносящих наибольший вклад в принимаемый сигнал, можно рассчитать линейные размеры цели [5]:

$$f = \frac{c}{2L}, \quad (3)$$

где  $f$  - резонансная частота,  $c$  - скорость распространения волны,  $L$  - линейный размер цели в направлении ориентации вектора напряженности электрического поля падающей волны.

Известно несколько методов для определения резонансных частот в отклике отраженного сигнала. Наиболее известные из них: обобщенный метод Прони [4], обобщенный метод матричных пучков [4], [6] и метод Е-импульса [7]. В [6] показано, что метод матричных пучков позволяет получить наиболее точные оценки параметров радиоцели.

### 3. Применение обобщенного метода матричного пучка для определения частот отраженного сигнала

Метод матричных пучков (ММП) предназначен для нахождения значений  $b_k$ ,  $M$ ,  $z_k$  из выражения (2). Отраженный от цели сигнал, состоящий из  $N$  отсчетов используется для составления вспомогательных матриц  $Y_0$  и  $Y_1$  размером  $N \times (N-L)$  [6]:

$$Y_0 = \begin{pmatrix} y_{L-1} & y_{L-2} & \dots & y_0 \\ y_L & y_{L-1} & \dots & y_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N-2} & y_{N-3} & \dots & y_{N-L-1} \end{pmatrix}, Y_1 = \begin{pmatrix} y_L & y_{L-1} & \dots & y_1 \\ y_{L+1} & y_L & \dots & y_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N-1} & y_{N-2} & \dots & y_{N-L} \end{pmatrix},$$

где  $L$  - параметр метода, значение которого должно удовлетворять условию  $M \leq L \leq N-M$ . Показано в [4], что при  $N/3 \leq L \leq N/2$  дисперсия оценки  $z_k$  минимальна. При этом выполняется равенства:

$$Y_0 = Z_L B Z_R, Y_1 = Z_L B Z Z_R,$$

где  $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_M)$ ,  $Z = \text{diag}(z_1, z_2, \dots, z_M)$ ,

$$Z_L = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ z_1 & \dots & z_M \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-L-1} & \dots & z_M^{N-L-1} \end{pmatrix}, Z_R = \begin{pmatrix} z_1^{L-1} & \dots & 1 \\ z_2^{L-1} & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_M^{L-1} & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

$z_k$  находится как собственные значения матрицы  $Y_0^+ Y_1$ , где "+" обозначает псевдоинверсию Мура—Пенроуза. Комплексные амплитуды находятся решением системы уравнений относительно  $b_k$  методом наименьших квадратов:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_M^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_M \end{pmatrix}$$

Присутствие шума значительно снижает эффективность применения метода матричных пучков [4].

#### 4. Моделирование рассеяния сверхкороткого импульса на проводящем цилиндре

Электродинамическое моделирование рассеяния электромагнитной волны на идеально проводящем цилиндре производилось методом конечных разностей во временной области (FDTD) в САПР CST Studio. Цель находилась в свободном пространстве. Моделирование проводилось для различных высот цилиндра: 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250 и 300 мм. Параметры решателя, определяющие точность расчетов, размер ячеек сетки модели и размер счетной области выбирались из соображений достижения наибольшей точности расчетов, таким образом, что дальнейшее усложнение модели не приводило к существенному изменению результатов.

Трехмерная модель СШП радиолокационной системы представлена на рисунке 1. Источником плоской волны в направлении цели излучался сверхкороткий биполярный гауссовский импульсный. Цель находилась на расстоянии 700 мм. Отраженный от цели сигнал регистрировался датчиком поля, который находился между источником сигнала и целью в точке с координатами (100, 0, 0). Моделирование проводилось для импульсов с длительностями: 0.5, 1.25 и 2.5 нс.

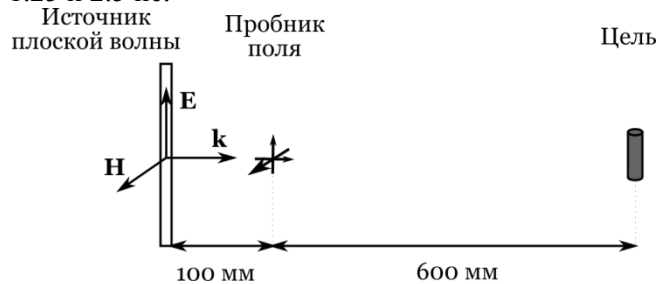


Рисунок 1. Модель радиолокационной системы.

#### 5. Результаты моделирования

Регистрируемый датчиком поля сигнал представлен на рисунке 2. На рисунке хорошо заметна часть сигнала, связанная с падающей волной (от 0.8 нс до 2 нс) и отраженный сигнал (от 4.4 нс). В отраженном сигнале можно выделить ранневременную (от 4.4 нс до 5.7 нс) и поздневременную (от 5.7 нс) часть отклика от цели. Поздневременная часть отраженного сигнала в увеличенном масштабе приведена на рисунке 3. Положение границы ранневременного и поздневременного отклика рассчитывалось согласно формуле (1). Из рисунка 3 видно, что форма сигнал соответствует выражению (2) - сумма затухающих комплексных экспонент. При этом, сигналы с большей амплитудой затухают быстрее, чем колебания с меньшей амплитудой.

Данные, содержащиеся в поздневременной части, использовались для нахождения резонансных частот методом матричных пучков. В таблице 1 представлены рассчитанные значения резонансных частот для импульсов различной длительности и истинное значение резонансной частоты, полученное по формуле (3). Резонансные частоты и погрешности оценки высоты цилиндра при рассеянии импульсов длительностью 0.5 нс, 1.25 нс, 2.5 нс обозначены соответственно -  $f^1$  и  $\Delta L^1$ ,  $f^2$  и  $\Delta L^2$ ,  $f^3$  и  $\Delta L^3$ . Для цилиндров с высотой более 150 мм наблюдается уменьшение относительной ошибки с увеличением высоты цилиндра. Из результатов моделирования можно сделать вывод, что наибольшая точность определения резонансной частоты цели достигается при использовании наиболее короткого импульсного сигнала. Высокие значения ошибки для импульса с длительностью 2.5 нс связаны с тем, что резонансные частоты, соответствующие высотам цилиндра 50 и 75 мм лежат вне полосы сигнала. При наличии априорной оценочной информации о размерах цели можно изменить длительность излучаемого импульсного сигнала таким образом, что центральная частота спектра будет соответствовать резонансной частоте облучаемого объекта. Использование адаптивного подхода в локации позволяет повысить точность оценки параметров цели.

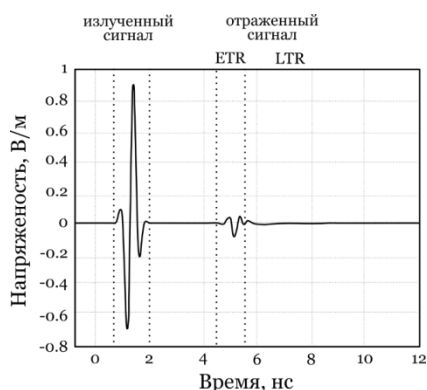


Рисунок 2. Данные датчика поля.

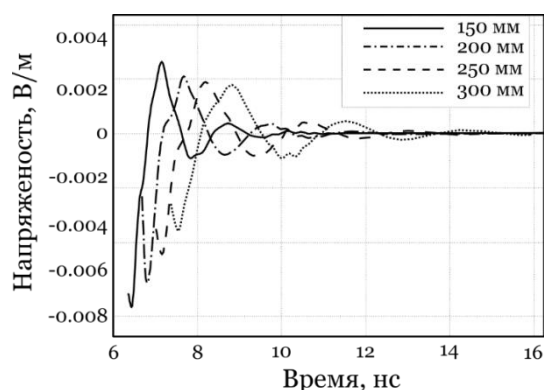


Рисунок 3. Позднеременная часть отклика.

Таблица 4. Результаты обработки данных моделирования методом матричных пучков.

№	L, мм	$f$ , ГГц	$f^1$ , ГГц	$\Delta L^1$ , %	$f^2$ , ГГц	$\Delta L^2$ , %	$f^3$ , ГГц	$\Delta L^3$ , %
1	50	3.0	2.69	10.3	2.55	15	1.19	60
2	75	2.0	2.03	1.3	2.02	1	1.11	45
3	100	1.5	1.33	11.3	1.48	1.3	0.86	42.6
4	125	1.2	0.99	17.2	0.76	36.2	0.65	45.6
5	150	1.0	0.70	29.5	0.63	37.3	0.62	38.2
6	175	0.86	0.61	28.9	0.61	29.3	0.57	33.4
7	200	0.75	0.53	28.5	0.51	32.0	0.51	32.3
8	250	0.6	0.43	27.4	0.41	31.6	0.42	30.2
9	300	0.5	0.38	24.0	0.36	28.0	0.36	28.0

В работе был рассмотрен случай, когда на цели цилиндрической формы рассеивается сверхкороткий импульс длительностью 0.5 нс с перпендикулярной ориентацией вектора напряжённости электрического поля относительно оси цилиндра. Измеренный сигнал датчиком поля анализировался ММП аналогично описанным ранее случаям. Для всех высот цилиндра рассчитанная резонансная частота принадлежала диапазону от 2.26 ГГц до 2.76 ГГц, что соответствует диаметру цилиндра - 60 мм (2.5 ГГц). Таким образом, используя параллельную и перпендикулярную ориентацию вектора  $\mathbf{E}$  падающей волны, можно удаленно определять форму отражающего объекта.

## 6. Заключение

В работе продемонстрирована возможность получения информации о размерах и форме цели по значениям резонансных частот в отклике на воздействие сверхширокополосного электромагнитного импульса. Эти частоты определялись с помощью метода матричных пучков. Показано, что использование импульсов меньшей длительности обеспечивало большую точность оценки размеров цилиндра. Применение СШП радиолокации с использованием сигналов с двумя перпендикулярными поляризациями позволяет формировать двумерные радиоизображения целей.

## 7. Благодарности

Данная работа выполнена в рамках поисковых исследований, по перспективной гиперконвергентной агрегированной радиоплатформы, проводимых Целевой поисковой лабораторией прорывных технологий радиосвязи Фонда перспективных исследований.

## 8. Литература

- [1] Nikolova, N.K. Compact Transmitter for Pulsed-Radar Detection of On-Body Concealed Weapons / A.D. Pitcher, J.J. McCombe, E.A. Eveleigh and N.K. Nikolova // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS, 2018. – P. 919-922.

- [2] Lee, J.H. Natural frequency extraction using generalized pencil-of-function method and transient response reconstruction / J.H. Lee, H.T. Kim // Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – Vol. 4. – P. 65-84.
- [3] Baum, C.E. The Singularity Expansion Method: Background and Developments // IEEE Antenna and Propagation Society Newsletters. – 1986. – Vol. 28(4). – P. 15-23.
- [4] Ибряева, О.Л. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним / О.Л. Ибряева, Д.Д. Салов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2017. – Т. 6, № 1. – С. 26-37.
- [5] Harmer, S.W. Detection of handguns by their complex natural resonant frequencies / S.W. Harmer, D.A. Andrews, N.D. Rezugui, N.J. Bowring // IET Microw. Antennas Propag. – 2010. – Vol. 4(9). – P. 1182-1190.
- [6] Hua, Yi. Method for Estimating Parameters of exponentially Damped/Undamped Sinusoids in Noise / Yi. Hua, T. K. Sarkar // IEEE Trans on Acoustics Speech. and Signal Processing. – 1999. – Vol. 38(5). – P. 814-824.
- [7] Филимонова, Д.В. Синтез и оптимизация посекционного полиномиального е-импульса при решении задачи различения объектов по собственным резонансам / Д.В. Филимонова, Т.Я. Шевгунов // Журнал Радиоэлектроники. – 2015. – № 3. – С. 1-25.

## Simulation of Ultrashort Pulse Scattering by a Conductive Cylinder

A.S. Zhabin<sup>1</sup>, S.V. Karamov<sup>1</sup>, A.V. Krisilov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Target Search Lab of Groundbreaking Radio Communication Technologies of Advanced Research Foundation, JSC «Concern «Sozvezdie», Ordzhonikidze 25, Voronezh, Russia, 394006

**Abstract.** Results of electrodynamic simulations of the ultrashort pulse scattering on a cylindrical conductive target are presented. The late-time response processing within the generalized matrix pencil method was used to evaluate resonant frequencies. The size of the cylinder were determined from the simulation results. Simulations have been conducted for pulse signals with various durations, the accuracy of the parameters quantification of the target was also estimated.