

УДК 621.396.96

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАССЕЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА ОТ АНТЕНН И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

П.В. СУХАЧЕВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 9 января 2018*

**Аннотация.** Приводятся результаты численного исследования огибающих радиоимпульсов, рассеянных от проволочных антенн, цилиндра, ракеты. Используется спектральный метод и метод моментов.

*Ключевые слова:* рассеяние, радиоимпульс, тонко-проволочная модель, интегральное уравнение тока.

**Abstract.** The results of a numerical study of the envelopes of radio pulses scattered from wire antennas, a cylinder, a rocket of class air-to-ground are given. The spectral method and the method of moments are used.

*Keywords:* scattering, radio-frequency pulse, thin wire, integral equation for current.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 111, No. 1, pp. 65-71**

**Numerical analysis of scattering a pulsed signal from antennas and radar objects**

**P.V. Sukhachevski**

### Введение

Изменение спектра и формы огибающей широкополосного сигнала при его рассеянии объектом радиолокации (ОР) может быть использовано для распознавания этого объекта. Подобная задача в известных работах решается с использованием уравнений Максвелла в пространственно-временной форме записи [1]. При этом используется метод конечных разностей во временной области (КРВО). Задача решается с использованием интегральных уравнений электродинамики, записанных в пространственно-временной форме [2]. Возбуждающе воздействие задается в виде сверхкороткого видеоимпульса, в котором максимум энергии сигнала расположен вблизи нулевой частоты. Так решается задача рассеяния в известной программе FEKO [3]. В диапазоне частот работы реального радиолокатора максимум энергии сигнала расположен на заданной несущей частоте  $f_n$ . Необходимо знать признаки в рассеянном сигнале с частотой  $f_n$ . В настоящей работе: используется метод, описанный в работе [4], который иллюстрируется на задаче рассеяния широкополосного сигнала тонкопроволочными моделями антенн, цилиндра и моделью ракеты класса «воздух-земля»; рассматриваются задачи рассеяния единичного импульса (ЕИ) и радиоимпульса. При использовании радиоимпульса можно получить решение задачи, более информативное по признакам распознавания и по критерию использования энергии зондирующего импульса по сравнению со случаем применения видеоимпульса. Расчет численным методом характеристик рассеяния ОР позволил расширить приложение теории рассеяния на объекты произвольных форм. Имеется ряд неизученных вопросов, которые частично рассматриваются в статье.

### Методика решения задачи рассеяния поля проволочным объектом

Задан некоторый объект в виде тонкопроволочной модели. Объект расположен в системе координат  $X, Y, Z$  – рис. 1. Объект облучается электромагнитной волной (ЭМВ)

с амплитудой электрического поля  $E_i$ . Угол между осью  $Z$  и направлением распространения волны –  $\theta_i$ . Угол между осью  $Z$  и направлением на точку наблюдения (точку определения поля)  $P(R, \theta, \varphi)$  равен  $\theta$ . Точка  $P_{xy}$  – проекция точки  $P$  на плоскость  $XY$ . Требуется определить поле рассеяния тонкопроволочного объекта в точке  $P$  с координатами  $(R, \theta, \varphi)$ .

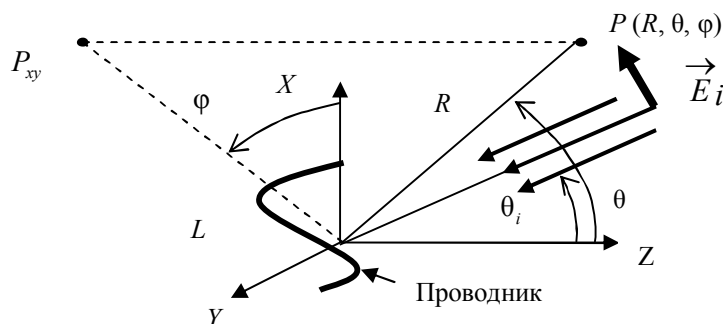


Рис. 1. Тонкопроволочный объект в системе координат

Задача решается в несколько этапов.

1. Заданный облучающий радиоимпульс, длительностью  $\tau$ , раскладывается в конечный ряд Фурье.

2. Решается задача рассеяния каждой гармонической составляющей облучающего сигнала заданным объектом при аппроксимации его системой тонких проводников.

При этом:

2.1. Используется метод моментов: интегральное уравнение для определения тока в тонком проводнике Поклингтона [1], импульсные функции в качестве базисных и весовых.

2.2. По найденному току в тонкопроволочном объекте определяется поле рассеяния с использованием метода векторного потенциала [1, 4].

2.3. По полю рассеяния определяется одно- и двухпозиционная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) как функция частоты.

3. По найденному ряду гармоник рассеянного поля с помощью обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) синтезируется рассеянный радиоимпульс.

Приведенный алгоритм использован в разработанной программе CSC [5]. Для получения частотного спектра рассеянного поля в программе гармоника с номером частоты  $f_m$  умножается на комплексный коэффициент передачи тонкопроволочного объекта  $K_p(f_m)$ . Модуль (амплитудно-частотная характеристика (АЧХ))  $K_p(f_m)$  определяется выражениями:

$$K_p(f_m) = \sqrt{|S(f_m)|}, \quad (1)$$

$$\arg K_p(f_m) = \arg E_s(f_m), \quad (2)$$

где  $S(f_m)$  – ЭПР ОР на частоте  $f_m$ ;  $\arg E_s(f_m)$  – фаза поля рассеяния в точке наблюдения на частоте  $f_m$ .

Программа CSC в части расчета ЭПР на заданной частоте тестировалась с помощью программ FEKO, CST и MathCad – в части использования ДПФ [6].

### Характеристики рассеяния директорной и рамочной антенн

Директорная и рамочная антенны схематически изображены на рис. 2. Размеры указаны в метрах. Центральная рабочая частота антенн 175 МГц. Директорная антенна отмасштабирована и взята из примеров программы MMANNA. Рамочная антенна с управляемой поляризацией взята из статьи [7], антенна включена в режиме горизонтальной поляризации. Расстояние от рамки до экрана 0,5 м. Частотные характеристики (ЧХ) антенн в резонансной области представлены на рис. 3, импульсные характеристики (ИХ) – на рис. 4, огибающие рассеянных радиоимпульсов (ОРР) – на рис. 5, 6. Сферическая система координат показана на рис. 1. Падающая волна распространяется против оси  $X$ :  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , вектор поляризации лежит в плоскости  $ZX$ . Положение передатчика совпадает с положением приемника. Рассеянный сигнал в пространственной области обозначается символом  $U(Z)$  [дБ],

где  $Z = 0,5 ct$  [м] – координата, вдоль которой распространяется электромагнитная волна,  $c$  – скорость света. Представление сигнала в пространственной области – это дальномерный портрет ОР.

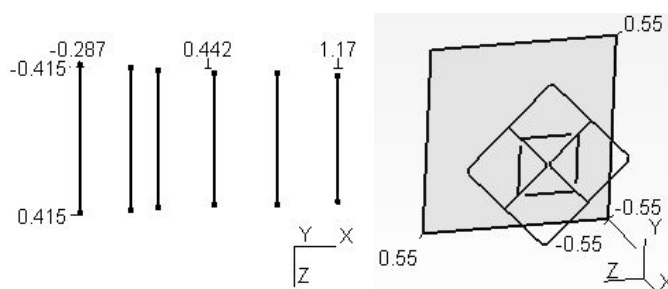


Рис. 2. Тонкопроволочные модели директорной (слева) и рамочной с управляемой поляризацией (справа) антенн

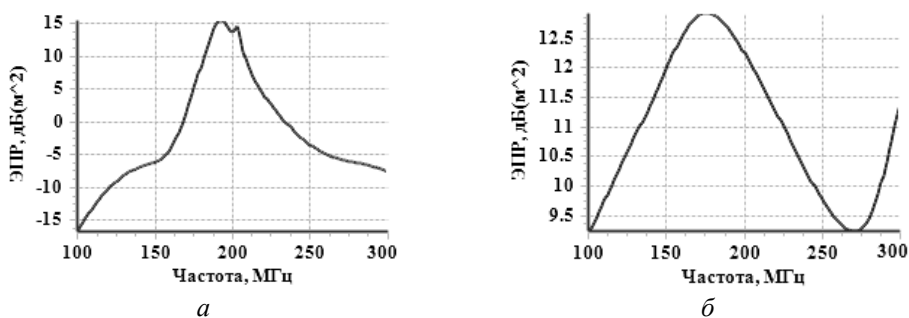


Рис. 3. Зависимость ЭПР [дБ (кв. м)] от частоты [МГц],  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  для директорной (а) и рамочной (б) антенн

Как видно на рис. 3, ЧХ директорной и рамочной антенн существенно отличаются. У директорной антенны ИХ и ОРР (рис. 4, а, 5, а) отличаются незначительно. У рамочной антенны ИХ и ОРР (рис. 4, б, 5, б) также отличаются незначительно. ИХ, как и рассеянный радиоимпульс, рассчитывается путем взятия ОДПФ от спектра рассеянного сигнала. Так как спектр ЕИ равен единице во всей полосе частот, то спектр рассеянного ЕИ, рассчитываемый как произведение спектра ЕИ и  $K_p(f_m)$ , прямо пропорционален АЧХ ОР (1). Поэтому рассчитать нормированную ИХ можно путем взятия ОДПФ от  $K_p(f_m)$ .

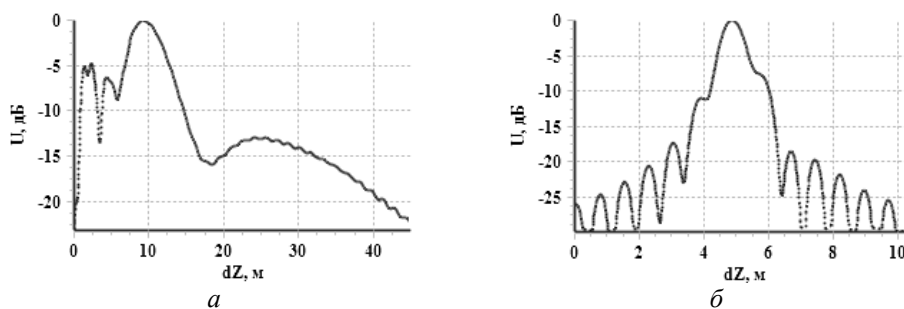


Рис. 4. Нормированная ИХ [дБ],  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  для директорной (а) и рамочной (б) антенн

В реальной радиолокационной обстановке  $K_p(f_m)$  рассчитывается за несколько периодов повторения сигнала: излучается зондирующий радиосигнал с несущей  $f_n$ ; принимается рассеянный от цели сигнал; рассчитывается  $K_p(f_n)$  как отношение спектров рассеянного и зондирующего сигналов на частоте  $f_n$ ; изменяется значение  $f_n$  на требуемый шаг по частоте, и все шаги повторяются. Следовательно, ИХ рассчитываются также за несколько периодов повторения сигнала. Можно использовать сверхкороткие радиоимпульсы [8] для расчета характеристик рассеяния ОР: ОРР рассчитывается за один период повторения сигнала.

ОРР директорной и рамочной на рис. 6 с ракурса наблюдения  $\theta = 270^\circ$  отличаются значительно. Накопив ОРР с различных ракурсов, путем численного моделирования можно создать базу данных для распознавания характеристик рассеяния проволочных антенн.

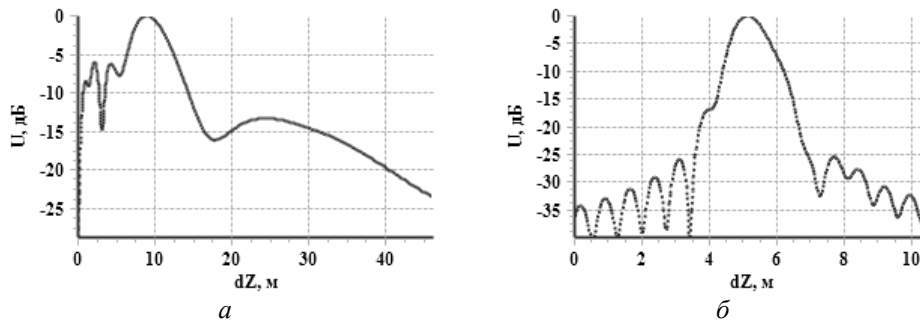


Рис. 5. Нормированные ОРР [дБ],  $f_n = 175$  МГц,  $\tau = 7$  нс,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  для директорной (а) и рамочной (б) антенн

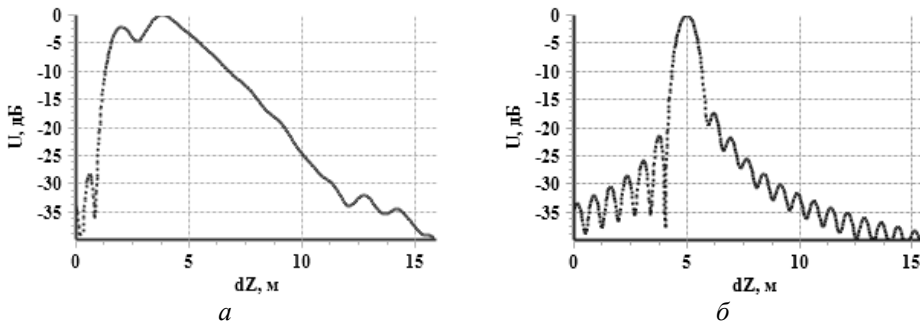


Рис. 6. Нормированные ОРР [дБ],  $f_n = 175$  МГц,  $\tau = 7$  нс,  $\theta = 270^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  для директорной (а) и рамочной (б) антенн

### Характеристики рассеяния от экрана рамочной антенны

Экран рамочной антенны представляет собой пластинку со стороной 1,1 м. На рис. 7 представлены характеристики рассеяния экрана рамочной антенны: ЧХ на рис. 3, б и 7, а отличаются значительно; ОРР на рис. 6, б отличается незначительно от представленных на рис. 7, б. Для распознавания проволочных антенн нужно использовать не только ОРР, но и ЧХ.

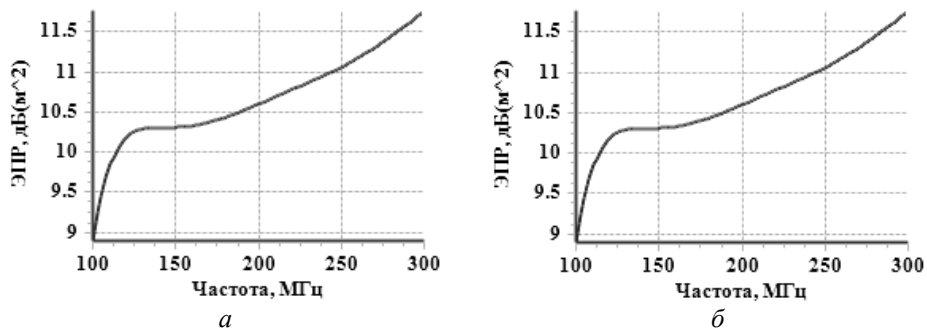


Рис. 7. Длительность зондирующего сигнала  $\tau = 7$  нс,  $f_n = 175$  МГц,  $\theta = 270^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  для ЧХ (а) и ОРР (б) экранов

Максимальное значение ЭХ рамочной антенны без экрана в полосе частот 100–300 МГц равно 7,5 дБ ( $\text{м}^2$ ). Из рис. 7, а видно, что значительный вклад в характеристику рассеяния рамочной антенны вносит рефлектор. Из полученного результата можно сделать вывод, что используя описанный в [9] плазменный экран, который отражает сигнал только в режиме горения плазмы, можно снизить радиолокационную заметность рамочной антенны в составе антенной решетки. В качестве плазменного экрана можно использовать как люминесцентные лампы, так и плазменные поверхности, созданные скользящим разрядом на поверхности диэлектрика. Известно, что при умеренных энергетических затратах с помощью скользящего разряда могут создаваться развитые плазменные поверхности с линейным размером  $\sim 1$  м [10].

Из полученных результатов следует, что ОРР директорной антенны, рамочной антенны с управляемой поляризацией и металлической пластины существенно отличаются между собой. В ОРР содержится информация о признаках для их распознавания.

## Характеристики рассеяния цилиндра и ракеты класса «воздух-земля»

Тонкопроволочная модель цилиндра представлена на рис. 8 слева, а модель ракеты AGM-88 класса «воздух-земля» – справа (1 – крылья, 2 – стабилизаторы; расстояние между ними – 2 м).

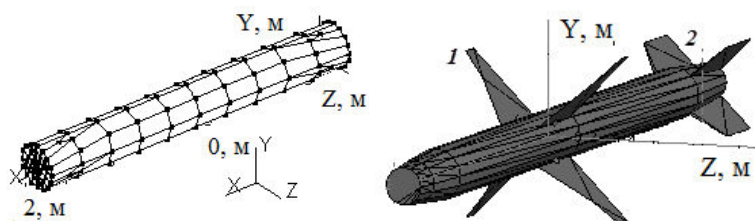


Рис. 8. Модели цилиндра (слева) и ракеты AGM-88 без обтекателя (справа)

Падающая волна распространяется против оси  $X$ :  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , вектор поляризации лежит в плоскости  $ZX$ . Положение передатчика, облучающего цилиндр, фиксированное. Длина цилиндра  $L_c = 4$  м, длина модели ракеты  $L_r = 4$  м. Зависимость ЭПР цилиндра от угла наблюдения – диаграмма обратного вторичного излучения (ДОВИ) – изображена на рис. 9.

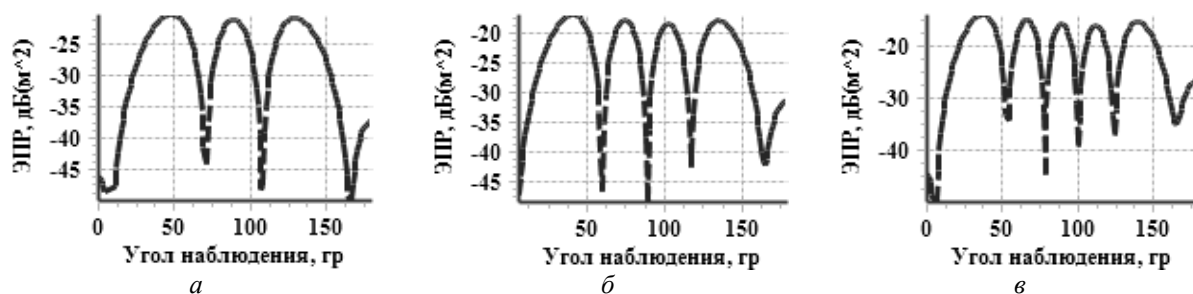


Рис. 9. ДОВИ цилиндра на частоте  $f_0$ , равной 110 МГц (а), 147,5 МГц (б), 185 МГц (в)

Из рис. 9 видно, что через каждые  $dF = 37,5$  МГц у ДОВИ прибавляется один лепесток. Длина волны  $dL_0 = 8$  м – это половина длины цилиндра. Накапливая информацию о движущемся ОР, система из двух радиолокаторов может определить размер ОР. На рис. 10, а показаны ОРР.

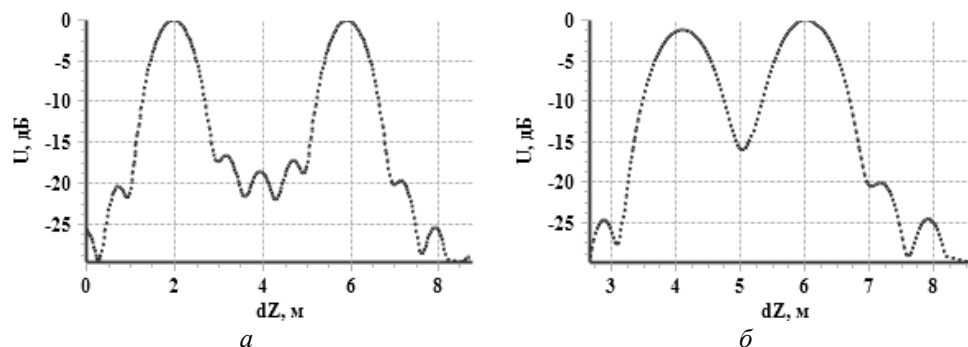


Рис. 10. Нормированные ОРР [дБ],  $\tau = 7$  нс,  $f_n = 200$  МГц:  
 $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  (а);  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$  (б)

На рис. 10, а пространственная задержка  $dZ$  между пиками ОРР соответствует размеру цилиндра, так как разница хода волн  $dL$ , отраженных от оснований цилиндра, равна  $2L_c$ . На рис. 10, б –  $dZ = 0,5 L_c$ , так как  $dL = L_c$  – угол между векторами падающей и отраженной волнами равен  $90^\circ$ . На рис. 11 приведены ОРР ракеты AGM-88. Положение передатчика, облучающего ракету, совпадает с положением приемника. Расстояния между пиками ОРР равны 2 м – это расстояние между крыльями и стабилизаторами: уровень отражения от крыльев больше, чем от стабилизаторов.

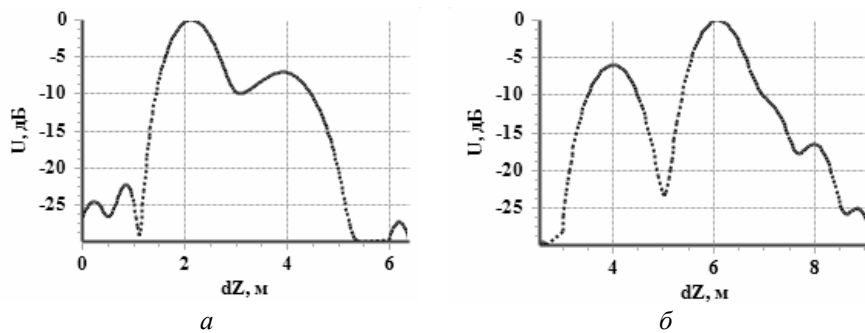


Рис. 11. Нормированные ОРР [дБ],  $\tau = 7$  нс,  $f_n = 200$  МГц:  
 $a - \theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$ ;  $b - \theta = 90^\circ, \varphi = 180^\circ$

### Заключение

Рассмотрены характеристики рассеяния (ЧХ, ИХ, ОРР и ДОВИ) проволочных антенн и ОР, в которых содержится информация о признаках для распознавания ОР. Можно создать базу данных для распознавания ОР по характеристикам рассеяния. Рассмотрена возможность создания рамочной антенны с плазменным экраном [7]. Показано, что такая антенна может быть менее радиозаметной, чем аналогичная с металлическим экраном.

### Список литературы

1. Time-Domen Mhetod for Microwave Structures. Analysis and Design / Ed. by Tatsuo Itoh. IEEE Press, 1998. 517 p.
2. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике. М.: Мир, 1977. 487 с.
3. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучающих структур с помощью FEKO. М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. 246 с.
4. Юрцев, О.А., Сухачевский П.В., Кеда В.В. Рассеяние радиоимпульса линейным диполем // Матер. III Всерос. науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, 2–5 июня 2014 г. Санкт-Петербург, 2014. С. 252.
5. Сухачевский П.В. Численный анализ рассеяния импульсного сигнала от объекта радиолокации цилиндрической формы // Сб. науч. ст. 7-й Междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. Ч. 2. Минск, 20–22 мая 2017 г. Минск, 2017. С. 129.
6. Сухачевский П.В. Рассеяние широкополосного сигнала объектом радиолокации // Сб. трудов X Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 2016. С. 293–297.
7. Кеда, В.В., Бобков Ю.Ю., Юрцев О.А. Рамочная антенна с переключаемой поляризацией // Матер. XIII Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов». Казань, 21–25 сентября 2015 г. С. 60–64.
8. Мощные источники сверхширокополосного излучения с субнаносекундной длительностью импульса / А.М. Ефремов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 77–83.
9. Рухадзе К.З. Антенные устройства на основе плазменных технологий: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2011. 121 с.
10. Ковалев И.О., Кузьмин Г.П., Нестеренко Г.П. Импульсные CO<sub>2</sub>-лазеры с плазменными электродами // Труды ИОФАН. 1996. Вып. 52. С. 3–91.

### References

1. Time-Domen Mhetod for Microwave Structures. Analysis and Design / Ed. by Tatsuo Itoh. IEEE Press, 1998. 517 p.
2. Mitra R. Vychislitel'nye metody v jelektrodinamike. M.: Mir, 1977. 487 s. (in Russ.)
3. Bankov S.E., Kurushin A.A. Raschet izluchajushhih struktur s pomoshh'ju FEKO. M.: ZAO «NPP «Rodnik», 2008. 246 s. (in Russ.)
4. Jurcev, O.A., Suhachevskij P.V., Keda V.V. Rassejanie radioimpul'sa linejnym dipolem // Mater. III Vseros. nauchn.-tehn. konf. «Jelektronika i mikrojelektronika SVCh». Sankt-Peterburg, 2–5 ijunja 2014 g. Sankt-Peterburg, 2014. S. 252. (in Russ.)
5. Suhachevskij P.V. Chislennyj analiz rassejanija impul'snogo signala ot ob#ekta radiolokacii cilindricheskoj formy // Sb. nauch. st. 7-j Mezhdunar. nauch. konf. po voenno-tehnicheskim problemam, problemam

- oborony i bezopasnosti, ispol'zovaniju tehnologij dvojnogo primenenija. Ch. 2. Minsk, 20–22 maja 2017 g. Minsk, 2017. S. 129. (in Russ.)
6. Suhachevskij P.V. Rassejanie širokopolosnogo signala ob'ektom radiolokacii // Sb. trudov X Vseros. konf. «Radiolokacija i radiosvjaz'». Moskva, 2016. S. 293–297. (in Russ.)
  7. Keda, V.V., Bobkov Ju.Ju., Jurcev O.A. Ramochnaja antenna s perekljuchaemoj poljarizaciej // Mater. XIII Mezhdunar. nauchn.-tehn. konf. «Fizika i tehicheskie prilozhenija volnovyh processov». Kazan', 21–25 sentjabrja 2015 g. S. 60–64. (in Russ.)
  8. Moshhnye istochniki sverhshirokopolosnogo izluchenija s subnanosekundnoj dlitel'nost'ju impul'sa/ A.M. Efremov [i dr.] // Pribory i tehnika jeksperimenta. 2011. № 1. S. 77–83. (in Russ.)
  9. Ruhadze K.Z. Antenny ustrojstva na osnove plazmennyh tehnologij: diss. ... kand. tehn. nauk. Moskva, 2011. 121 s. (in Russ.)
  10. Kovalev I.O., Kuz'min G.P., Nesterenko G.P. Impul'snye CO<sub>2</sub>-lazery s plazmennymi jelektrodami // Trudy IOFAN. 1996. Vyp. 52. S. 3–91. (in Russ.)

#### **Сведения об авторах**

Сухачевский П.В., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Information about the authors**

Sukhacheuski P.V., PG student of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-29-826-14-58;  
e-mail: blanc\_aigle@mail.ru  
Сухачевский Павел Вячеславович

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. + 375-29-826-14-58;  
e-mail: blanc\_aigle@mail.ru  
Sukhacheuski Pavel Vyacheslavovich