

УДК 621.396.96

## АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА ОТ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ В VHF-ДИАПАЗОНЕ

П.В. СУХАЧЕВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 26 марта 2018*

**Аннотация.** Приводятся результаты численного исследования огибающих радиоимпульсов, рассеянных от крылатых ракет. Используется спектральный метод и метод моментов.

*Ключевые слова:* рассеяние, радиоимпульс, тонкопроволочная модель, интегральное уравнение тока.

**Abstract.** The results of a numerical study of the envelopes of radio pulses scattered from a cruise missile are given. The spectral method and the method of moments are used.

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

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 116, No. 6, pp. 86-92**

**Spectral method of analysis of scattering a pulsed signal from cruise missiles in VHF range**

**P.V. Sukhachevski**

### Введение

В связи с разработкой в Республике Беларусь радиолокационных станций VHF-диапазона, знать характеристики рассеяния крылатых ракет в этом диапазоне актуально [1]. Крылатая ракета – это беспилотный летательный аппарат однократного запуска, траектория полета которого определяется аэродинамической подъемной силой крыла, тягой двигателя и силой тяжести [2]. Для идентификации радиолокационного объекта могут быть использованы атрибуты, содержащиеся в форме огибающей рассеянного широкополосного сигнала. Задача рассеяния видеоимпульса сверхмалой длительности в известных работах решается с применением уравнений Максвелла в пространственно-временной форме записи [3, 4]. Пучность энергии возбуждающего воздействия находится вблизи нулевой частоты. В признанной САПР ANSYS HFSS [5] анализируется задача рассеяния видеоимпульсов с прямоугольной и гауссовой формой огибающей. В программе [5] реализован метод конечных разностей во временной области (КРВО) [3, 4]. В рабочей полосе частот современных радиолокационных станций максимум энергии зондирующего сигнала находится на заданной несущей частоте  $f_n$ . Требуется выделять особенности в рассеянном сигнале с частотой  $f_n$ . В настоящей статье использован метод моментов и спектральный метод [6–9], который поясняется на задаче рассеяния широкополосного сигнала тонкопроволочными моделями крылатых ракет. Анализируется задача рассеяния радиоимпульса, при использовании которого, в отличие от случая применения видеоимпульса, получается более информативное по признакам распознавания и по критерию использования энергии зондирующего импульса решение задачи. Численный расчет характеристик рассеяния объектов радиолокации дополняет приложение теории рассеяния на объекты произвольной геометрии. Существует ряд малоизученных вопросов, которые частично обсуждаются в работе.

## Параметры расчета

На рис. 1 показаны: сферическая система координат (рис. 1, *a*); модели ракет AIM-120 AMRAAM (рис. 1, *б*) и AGM-88 HARM (рис. 1, *в*). Модели ракет были созданы в среде с открытым кодом GMSH и импортированы в оригинальную программу CSC [6–9]. Длина ракеты на рис. 1, *б*  $L_R=3,3$  м, расстояние между крыльями и стабилизаторами  $L_S=1,6$  м, размах крыльев  $L_K=0,45$  м. Для ракеты на рис. 1, *в* –  $L_R=4$  м,  $L_S=2,1$  м,  $L_K=1,13$  м. Падающая волна распространяется в плоскости  $XY$ :  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=[0^\circ-180^\circ]$ . Положение передатчика совпадает с положением приемника – рассматривается однопозиционная диаграмма рассеяния (диаграмма обратного рассеяния – ДОР [10]). При горизонтальной поляризации электромагнитной волны (ЭМВ) вектор поляризации электрического поля лежит в плоскости  $XY$ , при вертикальной – перпендикулярен плоскости  $XY$ . Аббревиатурами обозначим случаи: НН – излучается и принимается ЭМВ с горизонтальной поляризацией; НВ – излучается ЭМВ с горизонтальной поляризацией, принимается с вертикальной; ВВ – излучается и принимается ЭМВ с вертикальной поляризацией; ВН – излучается ЭМВ с вертикальной поляризацией, принимается с горизонтальной. Рассеянный сигнал в пространственной области обозначается символом  $U(Z)$  [дБ], где  $Z=0,5ct$  [м] – координата, вдоль которой распространяется ЭМВ,  $c$  – скорость света. Представление сигнала в пространственной области – это дальномерный портрет радиолокационного объекта (РЛО).

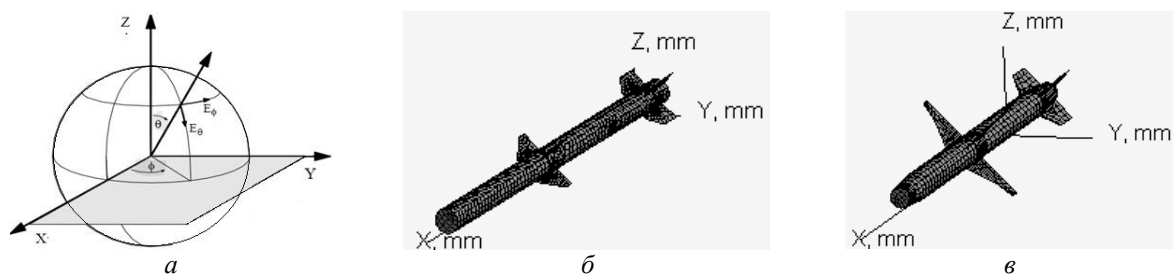


Рис. 1. Сферическая система координат (*a*) и тонко-проволочные модели ракет (*б*, *в*)

## Диаграммы обратного рассеяния крылатых ракет

На рис. 2–4 изображены ДОР крылатых ракет: на рис. *a*, *в* представлены результаты расчета AIM-120 AMRAAM; на рис. *б*, *г* – результаты расчета AGM-88 HARM.

Из рис. 2–4 видно, что чем больше частота, тем больше количество лепестков на ДОР.

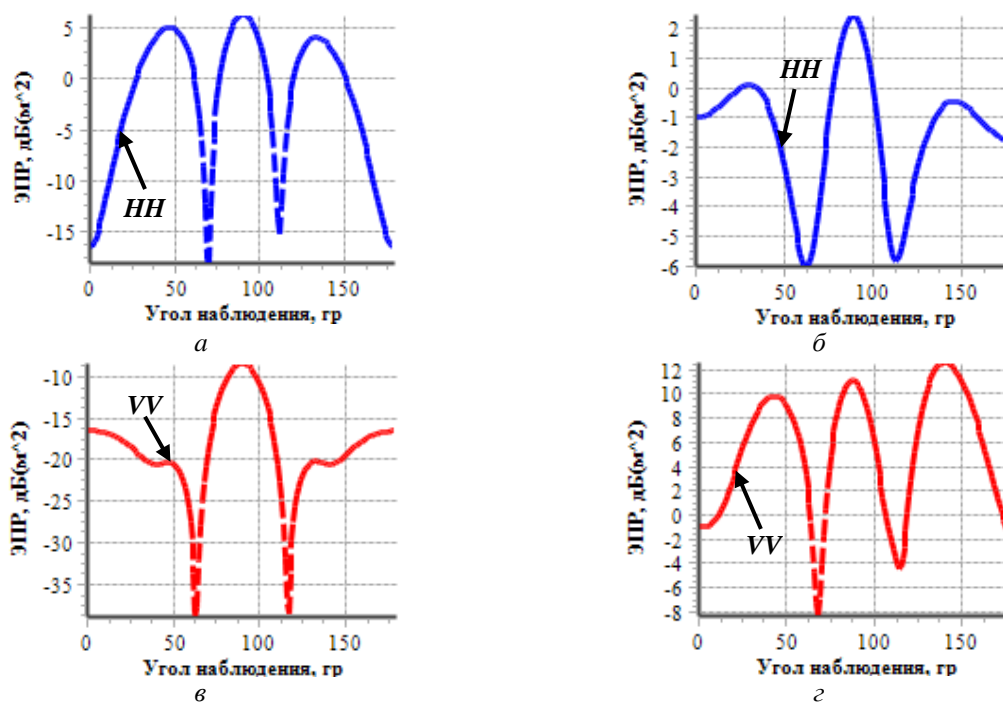


Рис. 2. ДОР на частоте  $f_0$ , равной 100 МГц

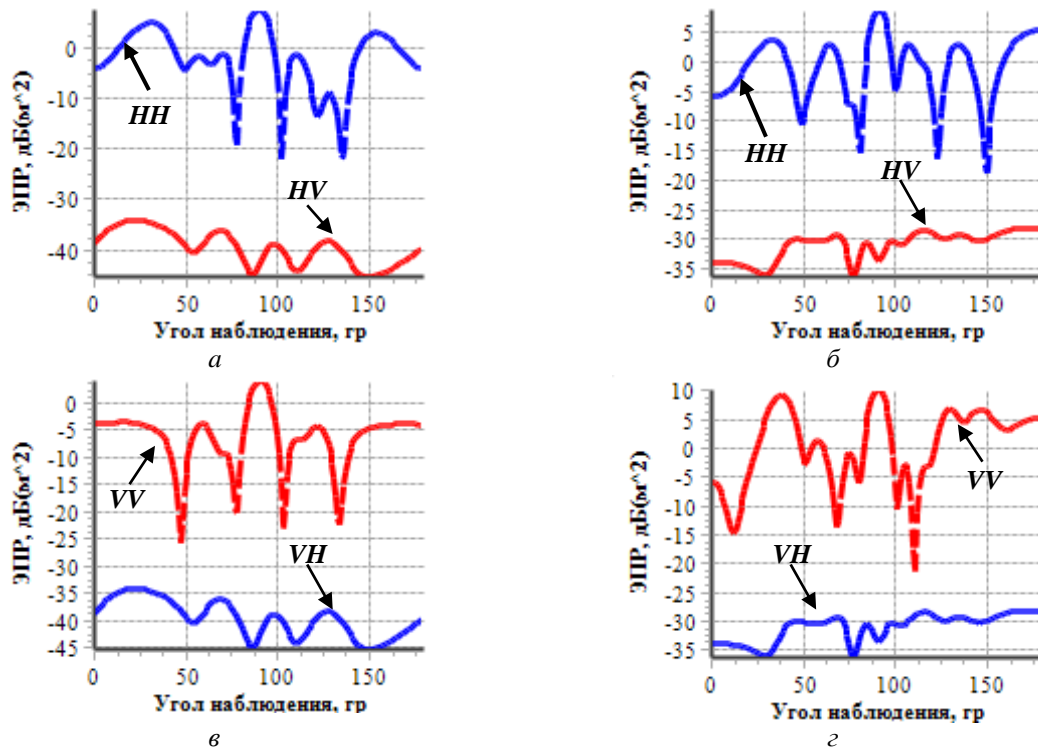


Рис. 3. ДОР на частоте  $f_0$ , равной 200 МГц

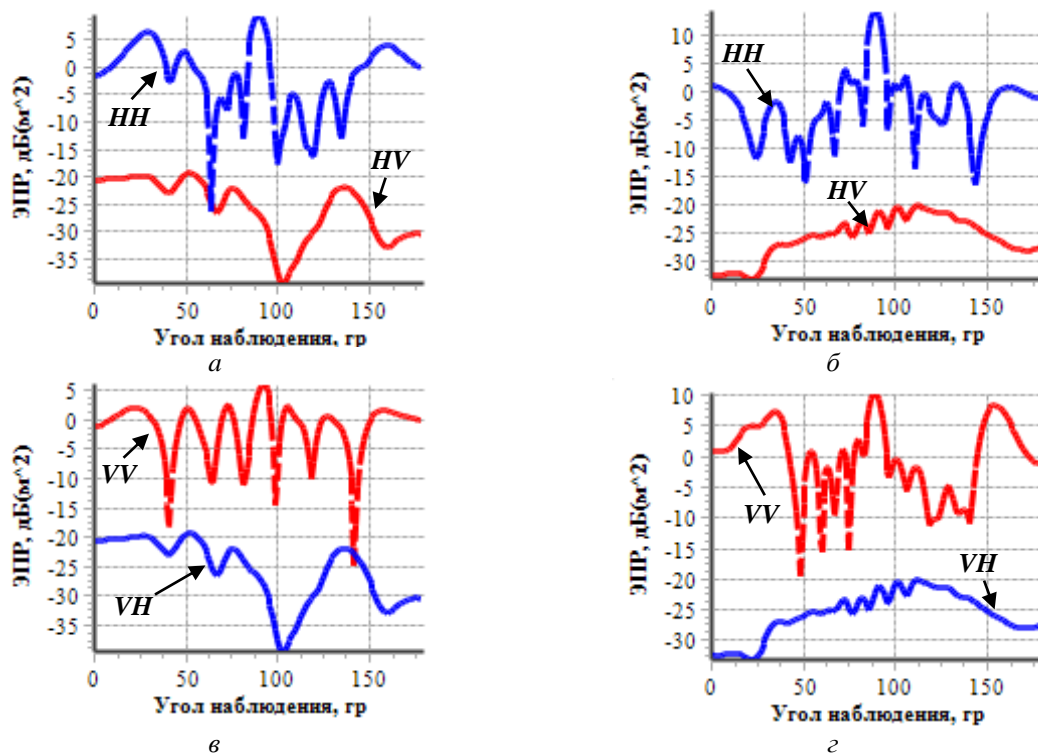


Рис. 4. ДОР на частоте  $f_0$ , равной 300 МГц

В табл. 1 представлены результаты расчета средней ЭПР в диапазоне углов  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = [0-180^\circ]$  в зависимости от частоты, волновых размеров корпуса и размаха крыльев.

Общие выводы из табл. 1.

1. В случае НН значительный вклад в среднюю ЭПР вносит корпус.
2. В случае VV значительный вклад в среднюю ЭПР вносят крылья и стабилизаторы.
3. В случае VH, чем больше частота, тем больше средняя ЭПР.
4. Чем больше волновой размер ракеты, на который проецируется вектор поляризации

падающей ЭМВ, тем больше средняя ЭПР.

5. Зависимость средней ЭПР от длины волны имеет резонансный характер.

Таблица 1. Средняя ЭПР в зависимости от частоты

Параметр\Частота, МГц	$\langle \text{ЭПР}_{\text{HH}} \rangle, \text{ м}^2$	$Lr$	$\langle \text{ЭПР}_{\text{HV}} \rangle, \text{ м}^2$	$Lk$	$\langle \text{ЭПР}_{\text{VH}} \rangle, \text{ дБ(м}^2)$
100	1,38	$1,1\lambda$	0,027	$0,15\lambda$	$< 40$
	0,79	$1,3\lambda$	5,78	$0,37\lambda$	$< 40$
200	1,19	$2,2\lambda$	0,38	$0,3\lambda$	-38,38
	1,38	$2,7\lambda$	2,44	$0,75\lambda$	-30,44
300	1,45	$3,3\lambda$	0,98	$0,45\lambda$	-23,36
	1,58	$4\lambda$	1,92	$1,13\lambda$	-24,4

### Частотные характеристики рассеяния крылатых ракет

На рис. 5, 6 представлены ЧХ AIM-120 AMRAAM (5, а, 6, а) и AGM-88 HARM (5, б, 6, б)

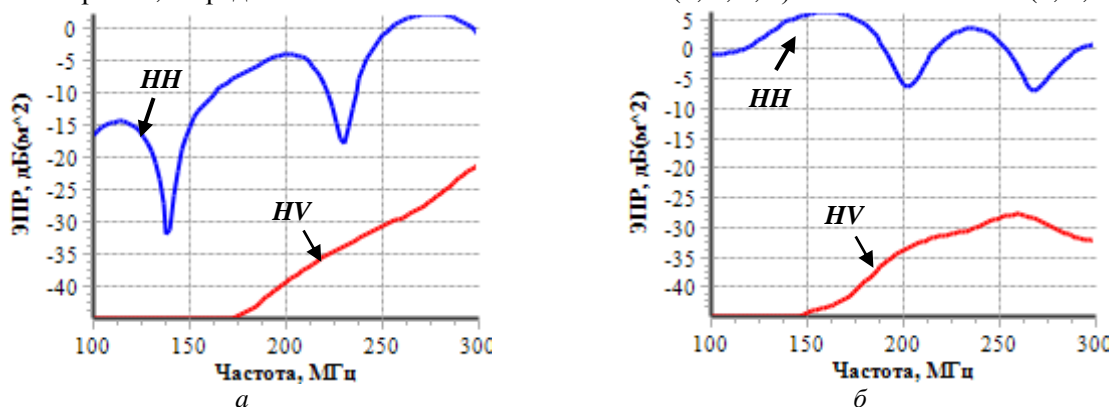


Рис. 5. Зависимость ЭПР от частоты AIM-120 AMRAAM (а) и AGM-88 HARM (б),  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$

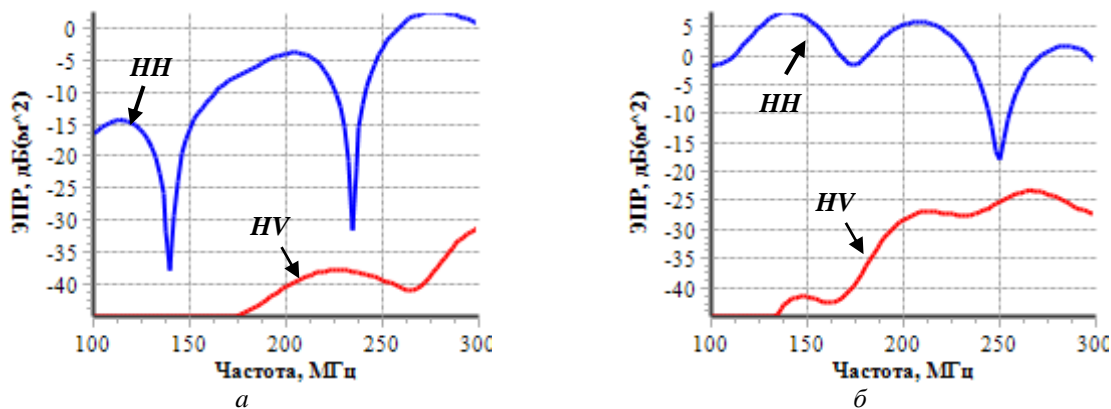


Рис. 6. Зависимость ЭПР от частоты AIM-120 AMRAAM (а) и AGM-88 HARM (б),  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$

В случае НН локальные экстремумы (резонансы) зависимости ЭПР от частоты на рис. 5, а, б, а приблизительно расположены через  $\Delta F_1 \approx 90$  МГц, а на рис. 5, б, 6, б – соответствуют частотам  $\Delta F_2 \approx 70$  МГц.

Связь между геометрическими параметрами ракет и резонансами в случае НН (рис. 5, б) описывается формулой:

$$\Delta F = \frac{c}{2 \cdot L}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $L$  – геометрический параметр.

Формулу (1) можно использовать для определения шага по частоте при настройке электродинамического расчета характеристик рассеяния РЛС.

Для объекта AIM-120 AMRAAM (рис. 5, а, б, а)  $L=1,6$  м – соответствует расстоянию между крыльями и стабилизаторами ракеты  $L_S=1,6$  м. Для объекта AGM-88 HARM (рис. 5, б, 6, б)  $L=2,1$  м – соответствует расстоянию между крыльями и стабилизаторами ракеты  $L_S=2,1$  м.

## Спектры и огибающие рассеянных радиоимпульсов

На рис. 7, а, 8, а показаны огибающие радиоимпульсов; на рис. 7, б, 8, б – спектральные характеристики – модели ракеты AIM-120 AMRAAM для случая НН для углов наблюдения  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ . Длительность зондирующих сигналов по уровню  $0,707 \tau = 10$  нс [11]. Уровень спектра зондирующих сигналов на рис. 7, б, 8, б вне полосы (100–300) МГц меньше  $0,001$  В/Гц, т. е. большая часть энергии выбранных зондирующих сигналов сосредоточена в полосе (100–300) МГц.

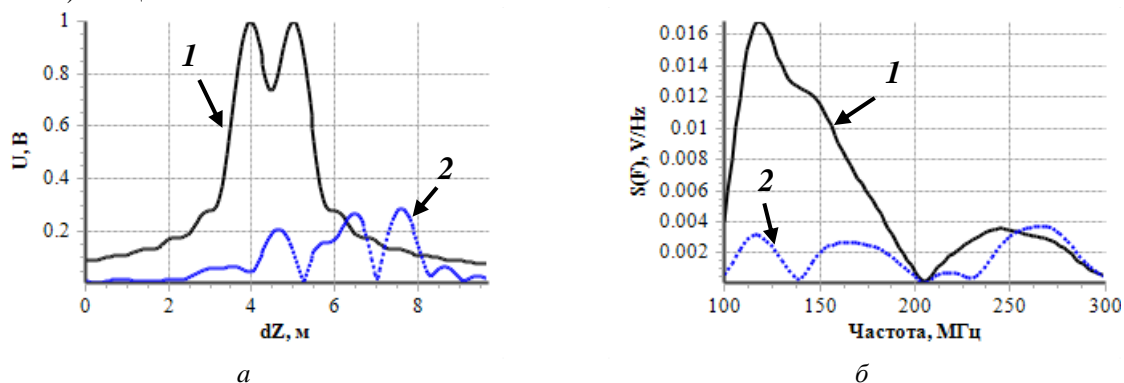


Рис. 7. Огибающие радиоимпульсов (а) и их спектры (б) сигналов:  
1 – зондирующего, 2 – рассеянного.  $f_n = 105$  МГц,  $\tau = 10$  нс,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$

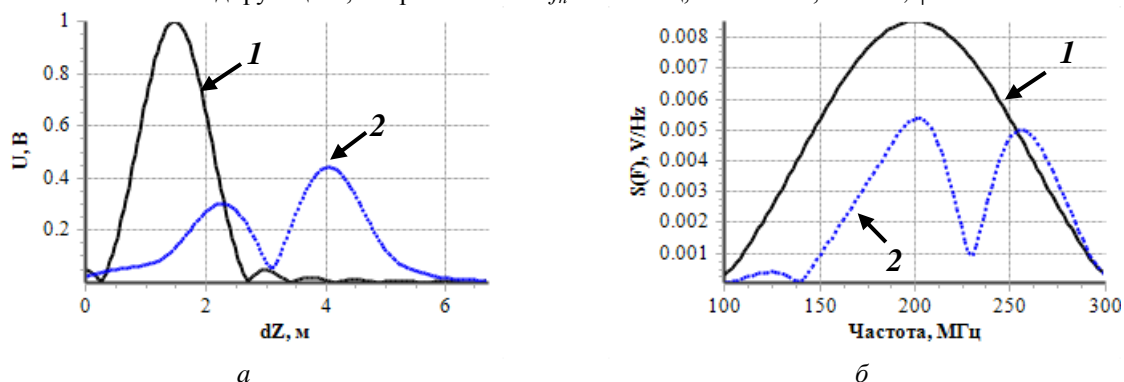


Рис. 8. Огибающие радиоимпульсов (а) и их спектры (б) сигналов:  
1 – зондирующего, 2 – рассеянного.  $f_n = 200$  МГц,  $\tau = 10$  нс,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$

Огибающая рассеянного радиоимпульса (ОРР) на рис. 7, а сильно искажена, и ее максимальный уровень амплитуды меньше, чем максимальный уровень ОРР на рис. 8, а. Это связано с тем, что максимальный уровень спектра зондирующего сигнала на рис. 7, б расположен вблизи нижней частоты, а на рис. 8, б максимальный уровень спектра зондирующего сигнала расположен на центральной частоте анализируемого частотного диапазона. На рис. 7, а 1-й локальный экстремум  $U(Z)$  соответствует пространственной координате  $Z_1 = 4,5$  м, 2-й –  $Z_2 = 6,5$  м, 3-й –  $Z_3 = 7,6$  м. Пространственная задержка между 1-м и 3-м локальными экстремумами равна  $\Delta Z_{13} = 3,1$  м, что приблизительно соответствует размеру ракеты AIM-120 AMRAAM  $L_R = 3,3$  м. На рис. 8, а пространственная задержка между локальными экстремумами  $U(Z)$  равна  $\Delta Z = 1,8$  м, что приблизительно соответствует расстоянию между крыльями и стабилизаторами ракеты  $L_S = 1,6$  м.

Для расчетов, показанных на рис. 9, был использован зондирующий сигнал, изображенный на рис. 8, а. На рис. 9, а пространственная задержка между локальными экстремумами  $U(Z)$  равна  $\Delta Z = 1,7$  м, что приблизительно соответствует расстоянию между крыльями и стабилизаторами ракеты AIM-120 AMRAAM  $L_S = 1,6$  м, уровень локальных экстремумов  $U(Z)$  отличается на 2 дБ, так как размеры стабилизаторов и крыльев ракеты отличаются незначительно. На рис. 9, б  $\Delta Z = 2,1$  м, что соответствует расстоянию между крыльями и стабилизаторами ракеты AGM-88 HARM  $L_S = 2,1$  м. Уровень отраженного от крыльев сигнала превышает уровень сигнала, отраженного от стабилизаторов, потому что размеры крыльев ракеты превышают размеры стабилизаторов в два раза [7].

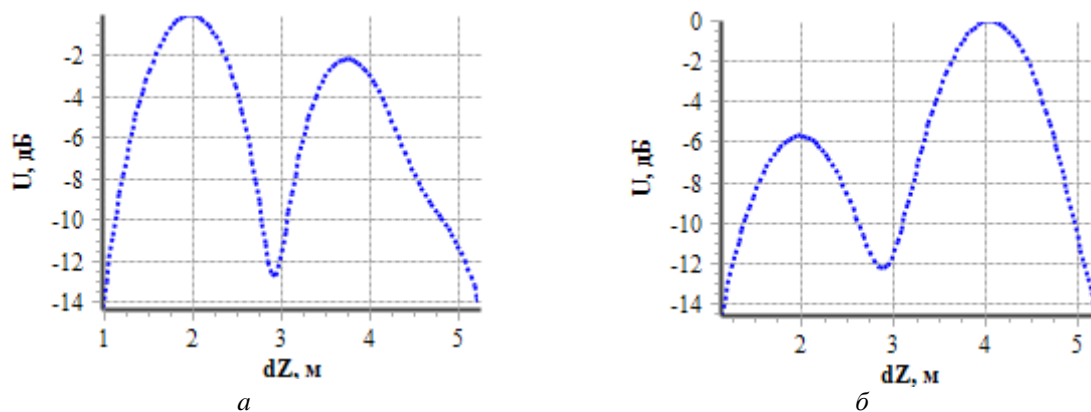


Рис. 9. Нормированные OPP AIM-120 AMRAAM (а) и AGM-88 HARM (б):  
 $f_n = 200$  МГц,  $\tau = 10$  нс,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$

### Заключение

Рассчитаны ДОР крылатых ракет, сделаны выводы по расчету средних ЭПР при различных сочетаниях поляризации передатчика и приемника сигналов. Для частот [100, 200, 300] МГц в табл. 1 рассчитаны значения средних ЭПР. Данные значения можно использовать при распознавании классов РЛО. Рассчитаны ЧХ крылатых ракет. Показано, что ЧХ имеют резонансный характер. Выведена формула (3) для определения параметров электродинамического расчета ЭПР с целью уменьшения затрат по времени на расчет. Количество резонансов на ЧХ для ракет AIM-120 AMRAAM и AGM-88 HARM для углов наблюдения  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$  равно 3 – это свойство может быть использовано для определения класса РЛО в реальной радиолокационной обстановке в VHF-диапазоне. Применен спектральный метод для расчета характеристик рассеяния во временной области. Показано, что по огибающим радиоимпульсов, рассеянным от РЛО, можно оценивать их геометрические параметры. Рассмотренные особенности характеристик рассеяния можно использовать для создания базы данных распознавания классов РЛО.

### Список литературы

1. ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» // Официальный сайт ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kbradar.by> (дата обращения: 21.03.2018).
2. Крылатая ракета // «К-22» – Линейный крейсер / под общ. Н.В. Огаркова. М.: Воен. изд-во М-ва обороны СССР, 1979. 656 с.
3. Time-Domain method for microwave structures. Analysis and Design / Ed. by Tatsuo Itoh. IEEE Press, 1998. 517 p.
4. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике. М.: Мир, 1977. 487 с.
5. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевинг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS. М.: Солон-Пресс, 2004. 283 с.
6. Юрцев О.А. Сухачевский П.В. Кеда В.В. Рассеяние радиоимпульса линейным диполем // Материалы III Всерос. науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, 2–5 июня 2014 г. С. 252.
7. Сухачевский П.В. Численный анализ рассеяния от антенн и радиолокационных объектов // Докл. БГУИР. 2018. № 1 (111). С. 65–71.
8. 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. С. 129.
9. Сухачевский П.В. Рассеяние широкополосного сигнала объектом радиолокации / Сб. трудов X Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 21–23 ноября 2016 г. С. 293–297.
10. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский [и др.] // Харьков: ХУПС, 2009. 468 с.

11. Мощные источники сверхширокополосного излучения с субнаносекундной длительностью импульса / А.М. Ефремов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 77–83.

### References

1. ОАО «KB Radar» – upravljajushhaja kompanija holdinga «Sistemy radiolokacii» // Oficial'nyj sajt ОАО «KB Radar» – upravljajushhaja kompanija holdinga «Sistemy radiolokacii» [Electronic resource]. URL: <http://www.kbradar.by> (date of access: 21.03.2018). (in Russ.)
2. Krylataja raketa // «K-22» – Linejnij krejser / pod obshh. N.V. Ogarkova. M.: Voen. izd-vo M-va oborony SSSR, 1979. 656 s. (in Russ.)
3. Time-Domain method for microwave structures. Analysis and Design / Ed. by Tatsuo Itoh. IEEE Press, 1998. 517 p.
4. Mitra R. Vychislitel'nye metody v jelektrodinamike. M.: Mir, 1977. 487 s. (in Russ.)
5. Bankov S.E., Kurushin A.A., Razeving V.D. Analiz i optimizacija SVCh struktur s pomoshh'ju HFSS. M.: Solon-Press, 2004. 283 s. (in Russ.)
6. Jurcev O.A. Suhachevskij P.V. Keda V.V. Rassejanie radioimpul'sa linejnym dipolem // Materialy III Vseross. nauch.-tehn. konf. «Jelektronika i mikrojelektronika SVCh». Sankt-Peterburg, 2–5 ijunja 2014 g. S. 252. (in Russ.)
7. Suhachevskij P.V. Chislennyj analiz rassejanija ot antenn i radiolokacionnyh ob'ektov // Dokl. BGUIR. 2018. № 1 (111). S. 65–71. (in Russ.)
8. 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. S. 129. (in Russ.)
9. Suhachevskij P.V. Rassejanie širokopolosnogo signala ob'ektom radiolokacii / Sb. trudov X Vseros. konf. «Radiolokacija i radiosvjaz'». Moskva, 21–23 nojabrja 2016 g. S. 293–297. (in Russ.)
10. Rassejanie jelektromagnitnyh voln vozdušnymi i nazemnymi radiolokacionnymi ob'ektami: monografija / O.I. Suharevskij [i dr.] // Har'kov: HUPS, 2009. 468 s. (in Russ.)
11. Moshhnye istochniki sverhshirokopolosnogo izlucheniya s subnanosekundnoj dlitel'nost'ju impul'sa / А.М. Ефремов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 77–83. (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](mailto:blanc_aigle@mail.ru)  
Сухачевский Павел Вячеславович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka, 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. + 375-29-826-14-58;  
e-mail: [blanc\\_aigle@mail.ru](mailto:blanc_aigle@mail.ru)  
Sukhacheuski Pavel Vjacheslavovich