

Научная статья  
УДК 004.021  
DOI: [10.34759/trd-2023-130-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-17)

## РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Артём Николаевич Новиков<sup>1</sup>, Виталий Александрович Хорчев<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup>Военная академия ракетных войск стратегического назначения имени Петра  
Великого, Московская область, Балашиха, Россия

<sup>1</sup>[band31@mail.ru](mailto:band31@mail.ru)

<sup>2</sup>[alfabravo59@mail.ru](mailto:alfabravo59@mail.ru)✉

*Аннотация.* При синтезе алгоритмов обнаружения и распознавания малоразмерных воздушных объектов (МВО) возникает необходимость в расчёте их эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Малоразмерные воздушные объекты, такие как легкие беспилотные летательные аппараты (БЛА), БЛА с электромотором, созданные по формату летающего крыла, кустарно изготовленные БЛА и т.п., в последние годы стали угрозой, представляющей опасность для гражданских и военных объектов [1].

Учитывая, что ЭПР входит в уравнение дальности радиолокации [2], то аналитический её расчёт для МВО позволит определять минимальную дальность, на которой воздушные объекты могут быть обнаружены постами радиоконтроля. В итоге раннее обнаружение подобных летательных аппаратов обеспечит

своевременную выдачу целеуказаний огневым средствам для последующего принятия решения по уничтожению МВО.

**Ключевые слова:** эффективная поверхность рассеяния, малоразмерный воздушный объект, аналитический расчёт, элементарные треугольники

**Для цитирования:** Новиков А.Н., Хорчев В.А. Расчёт эффективной поверхности рассеяния малоразмерных воздушных объектов // Труды МАИ. 2023. № 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-17)

Original article

## **CALCULATION OF THE EFFECTIVE SCATTERING SURFACE OF SMALL-SIZED AERIAL OBJECTS**

**Artem N. Novikov<sup>1</sup>, Vitalii A. Khorchev<sup>2</sup>**✉

<sup>1,2</sup>Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces,  
Moscow region, Balashikha, Russia

<sup>1</sup>[band31@mail.ru](mailto:band31@mail.ru)

<sup>2</sup>[alfabravo59@mail.ru](mailto:alfabravo59@mail.ru)✉

**Abstract.** When synthesizing algorithms for detecting and recognizing small-sized aerial objects (SSAO), it becomes necessary to calculate their effective scattering surface (ESS). Small-sized aerial objects, such as light unmanned aerial vehicles (UAVs), UAVs with an electric motor, created according to the format of a flying wing, artisanal UAVs, etc. in recent years have become a threat that poses a danger to civilian and military facilities [1].

Considering that ESS is included in the radar range equation [2], its analytical calculation for the SSAO will allow determining the minimum range at which air objects can be detected by radio monitoring posts. As a result, the early detection of such aircraft will ensure the timely issuance of target designations to firing means for subsequent decision-making on the destruction of the SSAO.

The article deals with the calculation of the RCS of simple objects and objects of complex shape. It has been established that the RCS of objects of complex shape, which include small-sized air objects, can be calculated analytically. The result of the article is a method for calculating the RCS of the SSAO, which involves the use of the RCS values of individual triangles obtained in the process of approximating the object under study in the modeling environment to calculate the resulting RCS.

The article also presents the results of mathematical modeling obtained using the program «Altair Feko», backscattering diagrams of the UAV at different angles of incidence of an electromagnetic wave. As a result, it was found that the backscattering diagram will take maximum values at normal incidence of an electromagnetic wave, and decreases with a change in the angle of exposure of the object under study, respectively.

**Keywords:** effective scattering surface, small-sized air object, analytical calculation, elementary triangles

**For citation:** Novikov A.N., Khorchev V.A. Calculation of the effective scattering surface of small-sized aerial objects. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-17)

## **Введение**

Эффективная поверхность рассеяния является количественной мерой свойства объекта рассеивать электромагнитную волну [3]. Повышенное значение ЭПР означает большую радиолокационную заметность воздушного объекта, снижение ЭПР затрудняет обнаружение. При этом, если для МВО с ЭПР  $0,1 \text{ м}^2$  расчётные данные и фактические результаты полигонных испытаний практически [4] совпадают по дальности обнаружения, то для МВО с ЭПР  $0,01 \text{ м}^2$  дальности обнаружения практически приближаются к нулевым значениям.

К дополнительным факторам, снижающим уровень ЭПР МВО является использование в конструкции радиопрозрачных материалов, быстрое изменение скорости движения вплоть до «зависания» в воздухе, что приводит к срыву сопровождения цели в связи с выходом значения скорости за границы стробирования по доплеровскому сдвигу в алгоритмах селекции движущихся целей РЛС [5, 6]. Таким образом, несмотря на то, что РЛС является достаточно надёжным средством контроля воздушного пространства, задача обнаружения и идентификации МВО с малыми ЭПР остаётся для них до сих пор нерешённой [7].

### **Аналитический расчёт ЭПР простых объектов**

В литературе имеются данные для ЭПР больших объектов: самолёты, танки, корабли, но в отношении МВО указывается, что их ЭПР близка к нулю. Поэтому, для своевременного обнаружения и, следовательно, предупреждения атаки подобных малоразмерных воздушных объектов [8] необходимо точно рассчитывать соответствующую ЭПР. При этом ЭПР является статистической функцией [9, 10],

меняющейся от угла наблюдения и определяется формой цели, а также отражающими свойствами ее поверхности. Аналитически ЭПР можно рассчитать только для самых простых геометрических фигур [11]. Соотношения для расчета ЭПР простых объектов:

$$\sigma = \pi r^2, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – ЭПР шара;  $r$  – радиус шара.

$$\sigma = \frac{\pi d h^2}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр цилиндра;  $h$  – высота цилиндра;  $\lambda$  – длина волны.

$$\sigma = \frac{4\pi S^2}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь металлической пластины.

Так как ЭПР является величиной интегральной, то аналитический расчёт её для объектов сложной формы, которыми, собственно, и являются малоразмерные воздушные объекты, может быть произведён путём суммирования значений ЭПР, рассчитанных для элементарных участков, из которых состоят данные объекты.

### **Аналитический расчёта ЭПР объектов сложной формы**

Одним из вариантов решения задачи аналитического расчёта ЭПР объектов сложной формы может стать применение для расчёта полигональной модели исследуемого объекта, полученной в результате разбиения объекта на элементарные треугольники (рисунок 1).

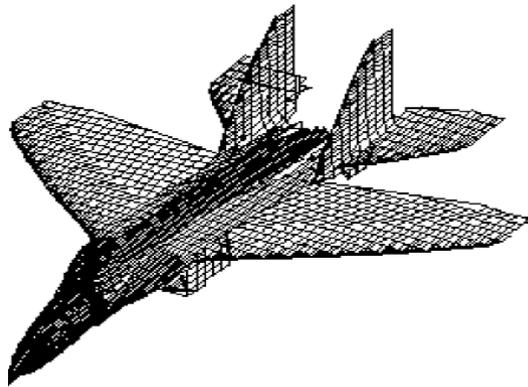


Рис. 1. Модель самолёта, представленная в виде элементарных треугольников, выполненная с использованием средств математического моделирования «ALTAIR FEKO»

При этом стороны полученных в результате моделирования треугольников могут быть не равны (на рисунке 2 приведено изображение падающей  $\vec{R}^0$  электромагнитной волны источника подсвета, излучающего сигналы в интересах их использования для обнаружения воздушных объектов в зоне ответственности, и отражённой  $\vec{r}^0$  электромагнитной волна от единичной поверхности (единичного треугольника) наблюдаемого воздушного объекта, изображённой относительно вектора нормали  $\vec{n}$  к поверхности. Угол  $\theta$  – угол, образованный нормалью и направлением приход электромагнитной волны). Кроме того, при создании полигональной модели объекта необходимо установить максимальный размер элементарного треугольника, который выбирается исходя из электродинамических критериев. Уменьшение размера треугольников по сравнению с исследуемым объектом приводит к увеличению числа треугольников, описывающих его поверхность, что неизбежно потребует значительных вычислительных затрат.

Для выполнения аналитического расчёта ЭПР объекта сложной формы должны быть известны координаты вершин  $(x_{b_i}, y_{b_i}, z_{b_i})$  элементарных треугольников полигональной модели объекта и характеристики материала, из которого изготовлен рассматриваемый объект сложной формы.

Расчет ЭПР производится для конкретной точки наблюдения (приёмной позиции), задаваемой координатами  $(x_{h_i}, y_{h_i}, z_{h_i})$ . Ракурс визирования МВО определяется прямой  $l$ , проходящей через конкретную приёмную позицию и обнаруженный МВО – линия с координатами  $(x_{h_i}, y_{h_i}, z_{h_i}) - (x_{u_i}, y_{u_i}, z_{u_i})$ , где  $(x_{u_i}, y_{u_i}, z_{u_i})$  – координаты МВО, (рисунок 3).

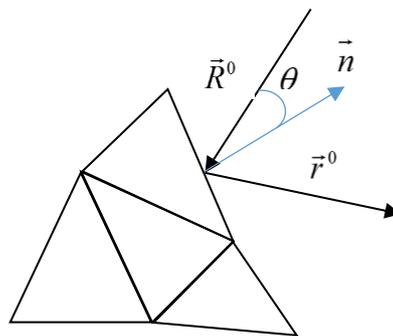


Рис. 2. Отражение электромагнитной волны  $\vec{R}^0$  опорного сигнала источника подсвета от единичного элемента фюзеляжа воздушного объекта

Таким образом, исходными данными являются:

1. Заданная модель МВО  $(x_{u_i}, y_{u_i}, z_{u_i}, h_k)$ , где  $h_k$  – высота полёта соответствующего МВО;
2. Параметры опорного сигнала передатчика,  $f_0$  – частота опорного сигнала;
3. Точка наблюдения – конкретная приёмная позиция  $(x_{h_i}, y_{h_i}, z_{h_i})$ .

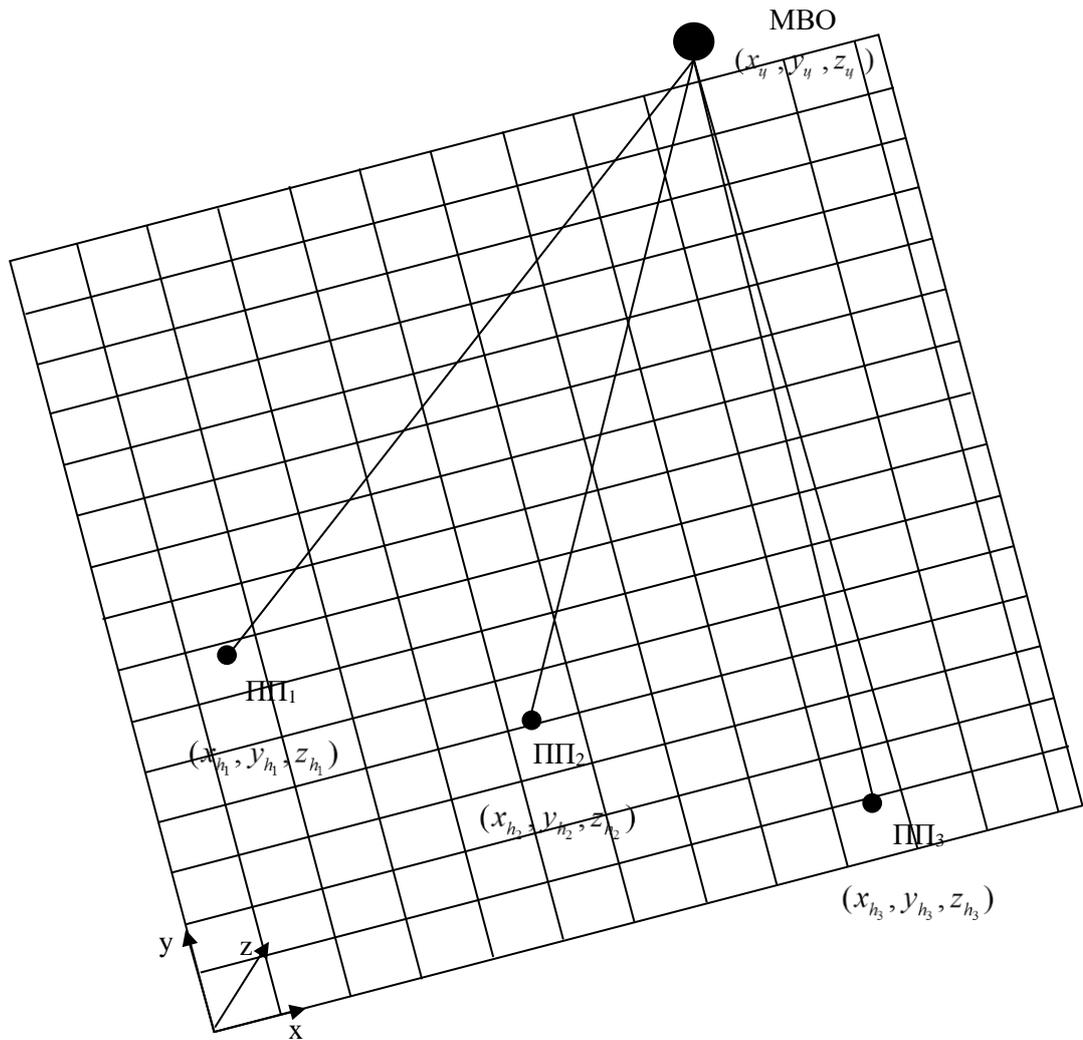


Рис. 3. Система местоопределения малоразмерных воздушных объектов

### Методика расчета ЭПР малоразмерных воздушных объектов

1. По известной модели МВО провести пересчет площадей видимых треугольников воздушного объекта на плоскость, перпендикулярную линии ракурса визирования  $l$   $((x_{h_i}, y_{h_i}, z_{h_i}) - (x_{u_i}, y_{u_i}, z_{u_i}))$ . Фактически получаются новые треугольники – проекции исходных на плоскость.

Пусть  $A_i (x_{a_i}, y_{a_i}, z_{a_i})$ ,  $B_i (x_{b_i}, y_{b_i}, z_{b_i})$ ,  $C_i (x_{c_i}, y_{c_i}, z_{c_i})$  – координаты вершин элементарных треугольников полигональной модели МВО.

Для элементарных треугольников полигональной модели МВО найдём их площади [12]:

$$S_i[m^2] = \sqrt{(p_i \cdot (p_i - a_i) \cdot (p_i - b_i) \cdot (p_i - c_i))}, \quad (4)$$

где  $S_i$  - площадь  $i$ -треугольника.

$$p_i[m] = \frac{a_i + b_i + c_i}{2}, \quad (5)$$

где  $p_i$  – полупериметр  $i$ -треугольника,  $a_i, b_i, c_i$  – длины сторон  $i$ -треугольника.

$$a_i[m] = \sqrt{((x_{b_i} - x_{a_i})^2 + (y_{b_i} - y_{a_i})^2 + (z_{b_i} - z_{a_i})^2)} \quad (6)$$

$$b_i[m] = \sqrt{((x_{c_i} - x_{b_i})^2 + (y_{c_i} - y_{b_i})^2 + (z_{c_i} - z_{b_i})^2)} \quad (7)$$

$$c_i[m] = \sqrt{((x_{c_i} - x_{a_i})^2 + (y_{c_i} - y_{a_i})^2 + (z_{c_i} - z_{a_i})^2)} \quad (8)$$

После чего необходимо найти площадь проецируемого треугольника:

$$S_i^T[m^2] = S_i \cdot \cos \varphi_i, \quad (9)$$

где  $\varphi_i$  – угол между плоскостью Пл1, перпендикулярной линии ракурса визирования  $l$ , и плоскостью Пл2 элементарного треугольника полигональной модели МВО (рисунок 4).

Если вектор  $\vec{v}_1 \{a_i, b_i, c_i\}$  нормаль к плоскости Пл1, а вектор  $\vec{v}_2 \{a_2, b_2, c_2\}$  нормаль к плоскости Пл2 и вектора  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$  являются не нулевыми, то  $\cos \varphi_i$  между плоскостями Пл1 и Пл2 вычисляется по формуле [12]:

$$\cos \varphi_i = \frac{a_{1_i} a_{2_i} + b_{1_i} b_{2_i} + c_{1_i} c_{2_i}}{\sqrt{a_{1_i}^2 + b_{1_i}^2 + c_{1_i}^2} \cdot \sqrt{a_{2_i}^2 + b_{2_i}^2 + c_{2_i}^2}}, \quad (10)$$

Где  $a_{1_i} = x_{2a_i} - x_{1a_i}$ ,  $b_{1_i} = y_{2b_i} - y_{1b_i}$ ,  $c_{1_i} = z_{2c_i} - z_{1c_i}$

$a_{2_i} = x_{2a_i} - x_{1a_i}$ ,  $b_{2_i} = y_{2b_i} - y_{1b_i}$ ,  $c_{2_i} = z_{2c_i} - z_{1c_i}$

1. Проведём расчет длины волны  $\lambda$ [м]:

$$\lambda = \frac{c}{f_o} \quad (11)$$

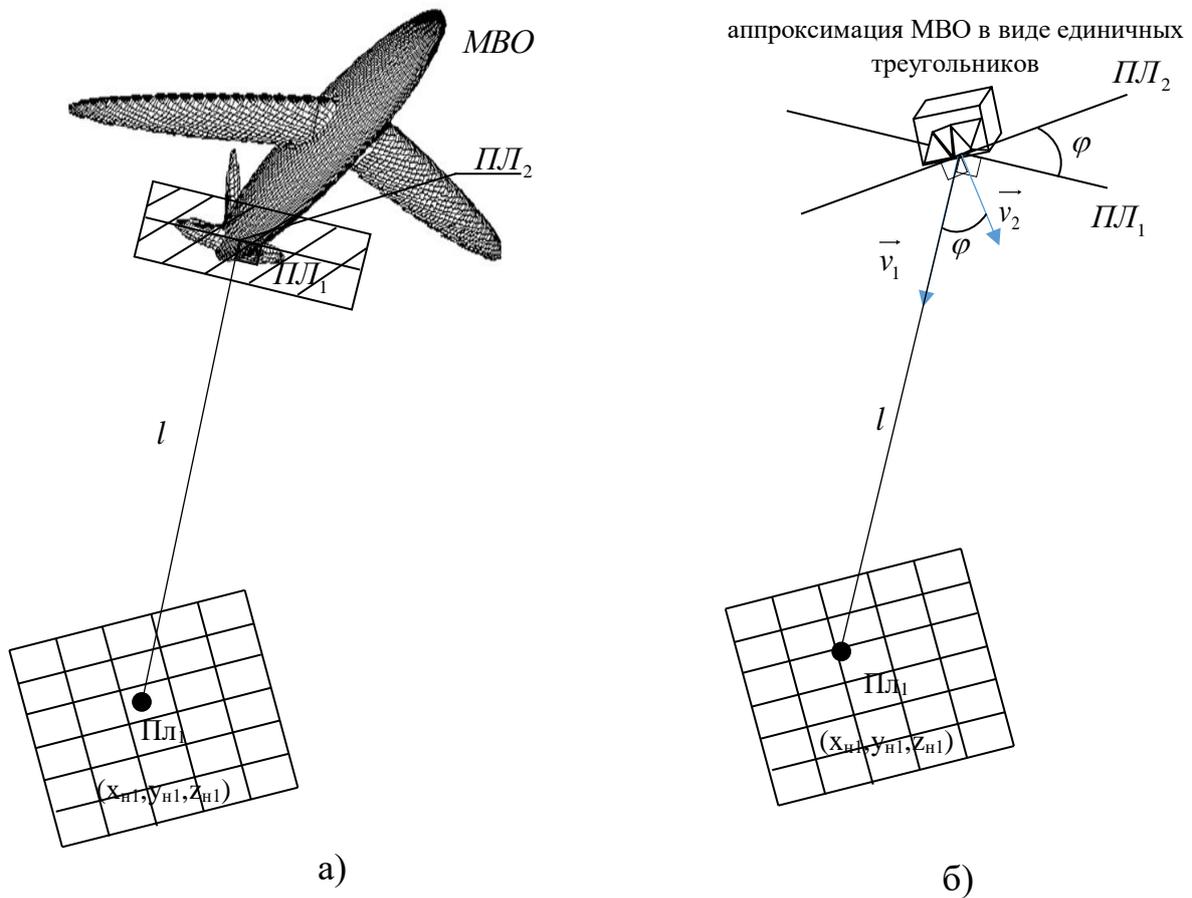


Рис. 4 Визуализация угла  $\varphi$  между  $ПЛ_1$  и  $ПЛ_2$

2. Выберем коэффициент отражательного свойства материала ( $L_i$ ), исходя из таблицы 1.

Таблица 1 – Значение коэффициента отражательного свойства для различных материалов

№ п/п	Материал	$L_i$ [коэф.]
1	Н1 – стекловолокно	0,31
2	Н2 – углепластик	0,23
3	Н3 – пластик	0,29

Стоит учесть, что при проведении расчётов ЭПР цели, как суперпозиции полей рассеяния её элементарных треугольников полигональной модели, следует учитывать только те треугольники, которые освещены со стороны передатчика и не затеняются со стороны приёмника радиолокационной системы. Причём точность расчётов отражённого сигнала будет зависеть от точности описания геометрии цели, т.е. числа элементарных треугольников полигональной модели объекта сложной формы [13,14,15].

Для проведения расчётов ЭПР единичного треугольника воспользуемся формулой для расчёта ЭПР поверхности [16, 17] и преобразуем её:

$$\sigma_{нов} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_n^2} \cdot \left| \int_S \exp\left(-j \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_n^2} \cdot d\right) \cdot \cos \theta dS \right|^2, \quad (12)$$

где  $\lambda_n$  – длина волны передатчика,  $d$  – расстояние от ближайшей точки поверхности объекта, подсвечиваемого РЛС, до искомой поверхности,  $\cos \theta$  – угол между нормалью к поверхности и направлением прихода электромагнитной волны,  $dS$  – рассматриваемая поверхность. В связи с тем, что размеры рассматриваемого

элементарного треугольник много меньше расстояния от РЛС до объекта, то  $d = 0$  и выражение (12) примет вид:

$$\sigma_{\Delta} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_n^2} \left| \int_S 1 \cdot \cos \theta \cdot dS \right|^2, \quad (13)$$

где  $\sigma_{\Delta}$  – ЭПР искомого элементарного треугольника.

В итоге формула для вычисления ЭПР элементарного треугольника будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma_{\Delta} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_n^2} \cdot \cos^2 \theta \cdot (S_i^T)^2 \cdot L_i \quad (14)$$

Результаты математического моделирования диаграммы обратного рассеяния (ДОР) единичного треугольника, полученные с использованием САПР «ALTAIR Феко», полученные при угле места  $\theta$  падения электромагнитной волны (ЭМВ)  $30^\circ$  представлены на рисунке 5:

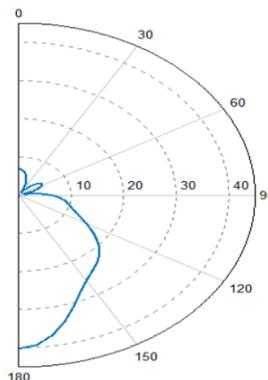


Рис. 5 ЭПР единичного треугольника при угле падения ЭМВ  $\theta = 30^\circ$

3. Проведём расчёт результирующей ЭПР:

$$\sigma[M^2] = \sum_{i=1}^n \sigma_{\Delta} . \quad (15)$$

Результаты математического моделирования ДОР БЛА, полученные с использованием САПР «ALTAIR Feko», при углах падения ЭМВ по углу места от  $\theta = 0^{\circ} - 90^{\circ}$ , при частоте опорного сигнала 6 ГГц представлены на рисунках 6 – 9.

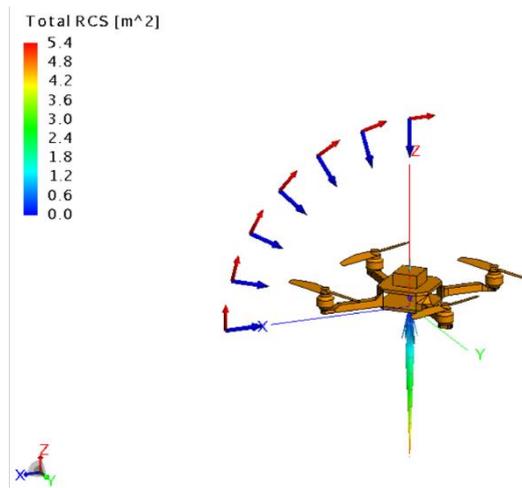


Рис. 6 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 0^{\circ}$ .

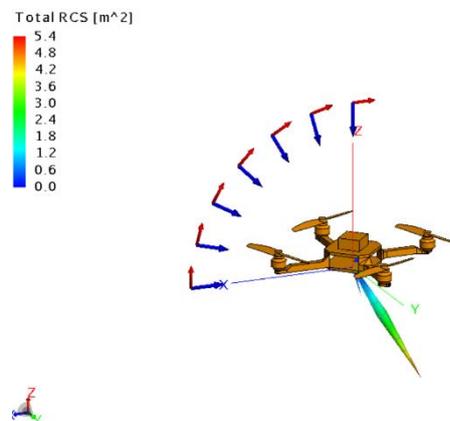


Рис. 7 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 30^{\circ}$ .

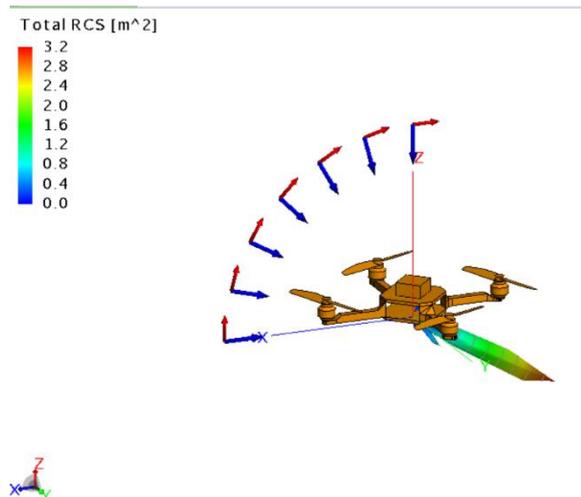


Рис. 8 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 60^\circ$ .

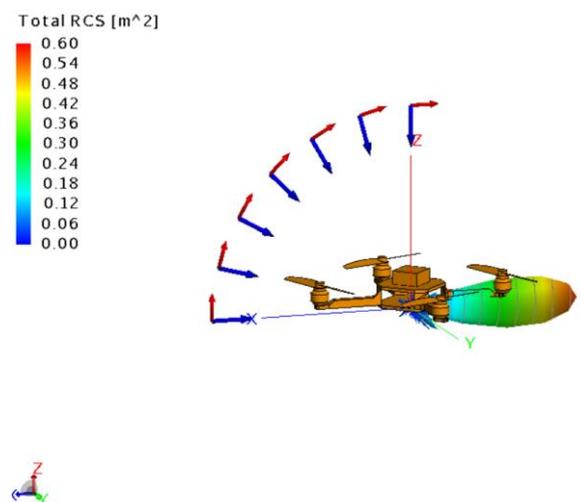


Рис. 9 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 90^\circ$ .

На основании результатов математического моделирования можно сделать вывод о том, что чем больше значение угла места  $\theta$ , тем большую диаграмму обратного рассеяния будет иметь БЛА, находящийся в зоне видимости средств радиолокационного контроля. Следовательно, БЛА легче обнаруживать под углами падения ЭМВ  $\theta = 90^\circ - 45^\circ$ . При угле места  $\theta$ , находящимся в пределах  $\theta = 45^\circ - 0^\circ$ , диаграмма обратного рассеяния БЛА будет более узкой и принимать минимальные значения, что отчётливо видно на рисунках 5 – 6.

Далее возьмём такое значение угла места  $\theta$ , при котором ЭПР БЛА максимальна, и проведём моделирование диаграммы обратного рассеяния БЛА для угла азимута  $\varphi = 0^\circ - 180^\circ$ .

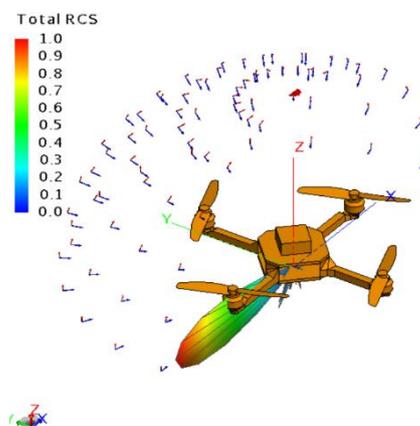


Рис. 10 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 90^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$ .

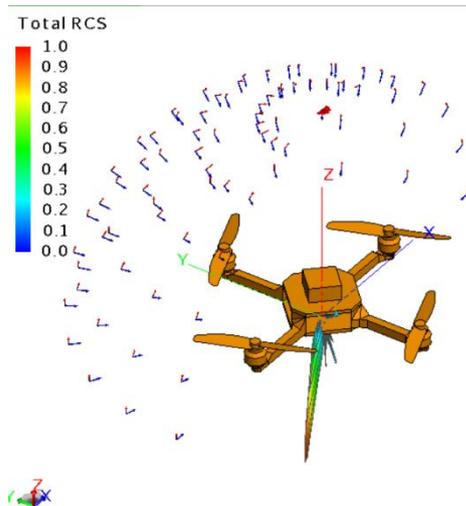


Рис. 11 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 90^\circ$  и  $\varphi = 30^\circ$ .

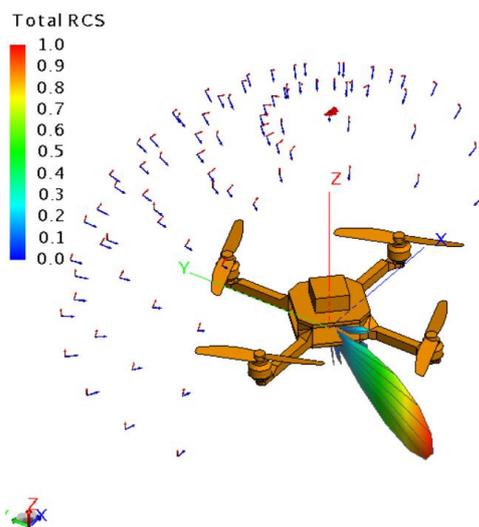


Рис. 12 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 90^\circ$  и  $\varphi = 60^\circ$ .

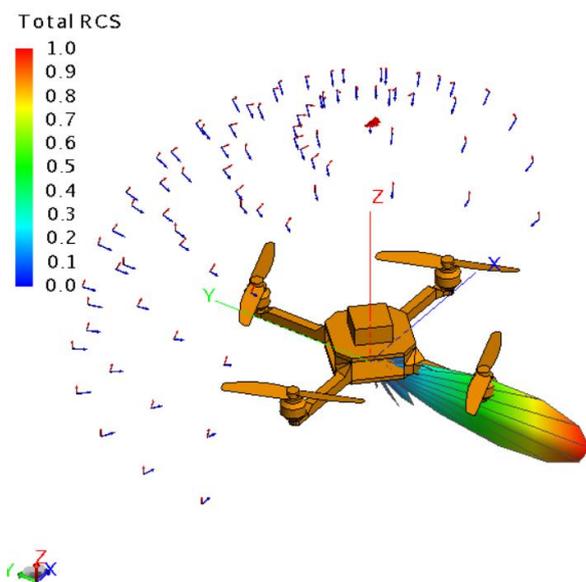


Рис. 13 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 90^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$ .

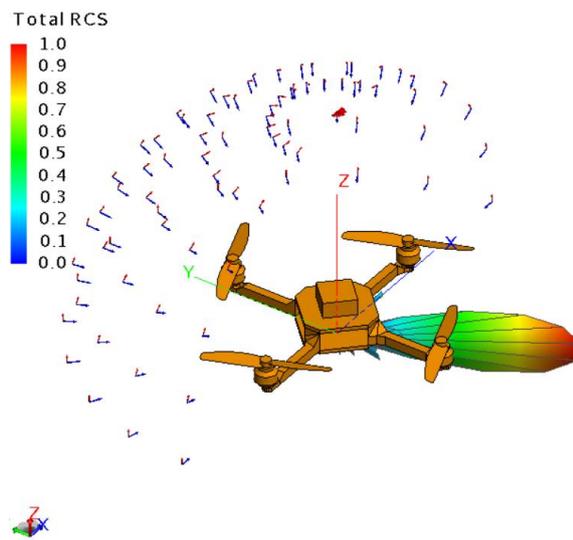


Рис. 14 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 90^\circ$  и  $\varphi = 120^\circ$ .

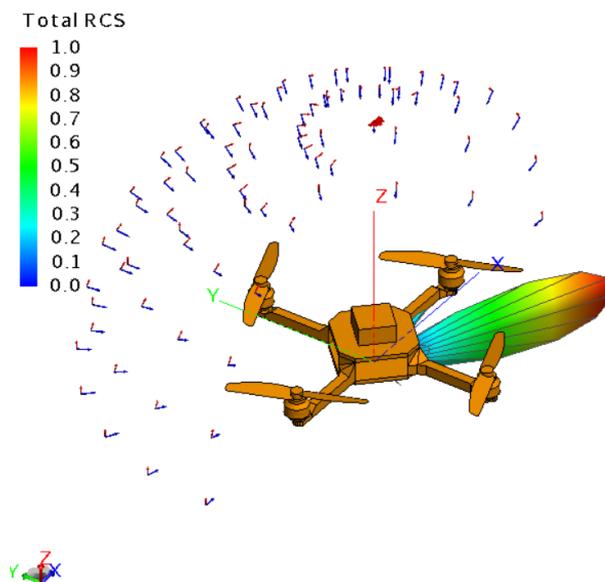


Рис. 15 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 90^\circ$  и  $\varphi = 150^\circ$ .

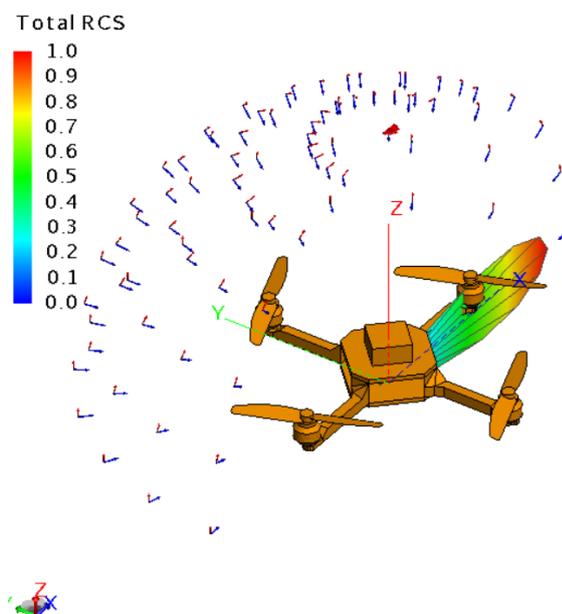


Рис. 16 Диаграмма обратного рассеяния БЛА при  $\theta = 90^\circ$  и  $\varphi = 180^\circ$ .

Таким образом, на основании проведённого математического моделирования, можно сделать вывод о том, что диаграммы обратного рассеяния БЛА не зависят от угла азимута  $\varphi$ , а зависят от угла места  $\theta$  падения ЭМВ. Диаграмма обратного рассеяния будет принимать максимальные значения при нормальном падении ЭМВ и уменьшается с изменением угла облучения исследуемого объекта соответственно.

Для увеличения значений диаграммы обратного рассеяния МВО с низкими показателями ЭПР, одним из вариантов решения задачи может являться разнесение на местности позиций постов радиолокационного контроля, что позволит увеличить энергетику системы местоопределения и более эффективно обнаруживать подобные объекты.

Итоговый алгоритм расчёта ЭПР МВО представлен на рисунке 17.

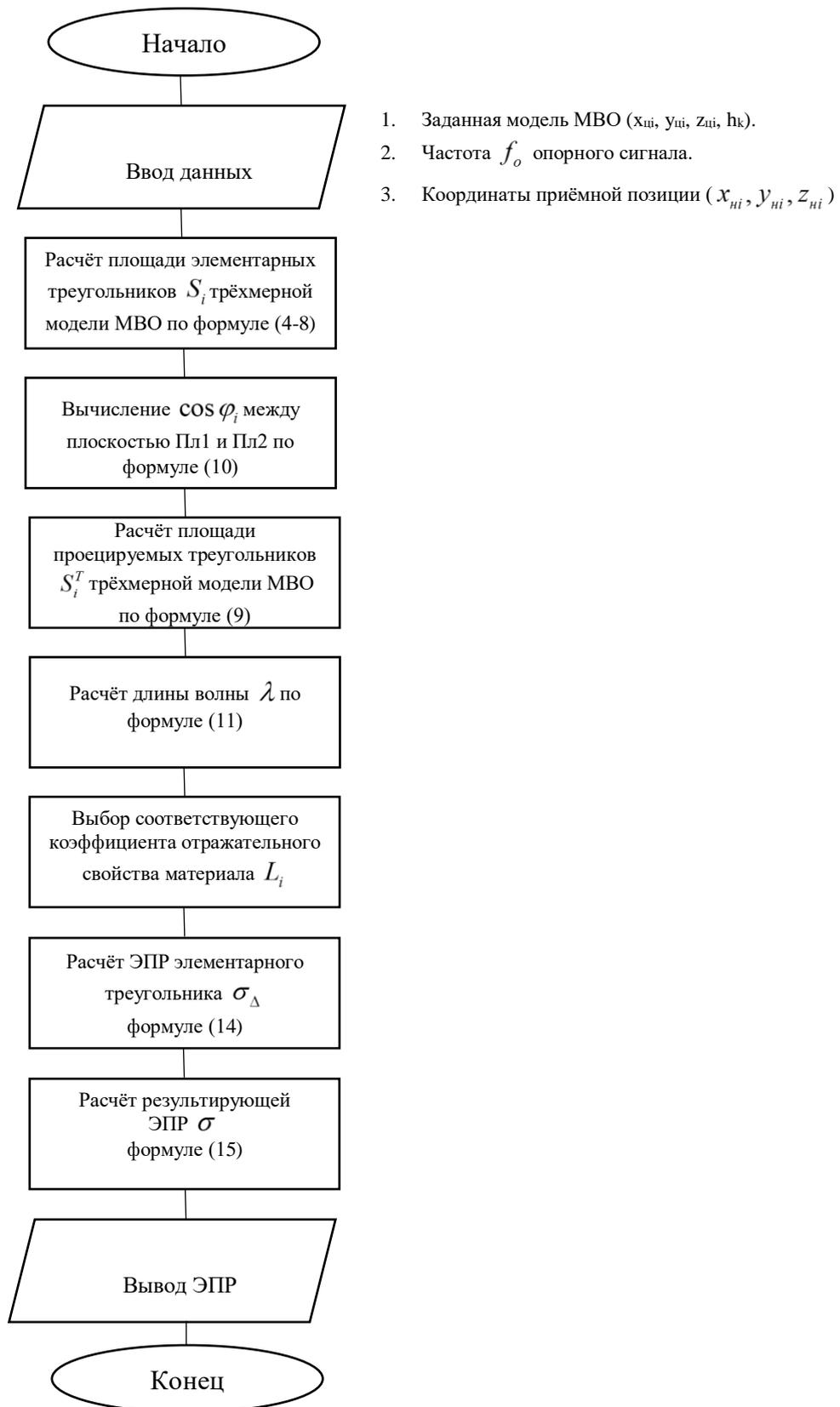


Рис. 17 Алгоритм расчёта ЭПР малоразмерного воздушного объекта

## **Выводы**

В статье рассмотрены вопросы расчёта ЭПР простых объектов и объектов сложной формы. Установлено, что ЭПР объектов сложной формы, к которым относятся малоразмерные воздушные объекты, возможно рассчитать аналитически. Результатом статьи является методика расчёта ЭПР МВО, которая предполагает использование для вычисления результирующей ЭПР значения ЭПР единичных треугольников, полученных в процессе аппроксимации исследуемого объекта в среде моделирования.

На основе разработанной методики возможно рассчитывать ЭПР для любых МВО при достаточной степени ее «калибровки» без проведения натурных экспериментов. Таким образом, реализованное на основе разработанной методики программное обеспечение может быть частью программного обеспечения интеллектуальной радиолокационной системы. Алгоритм расчёта ЭПР малоразмерного воздушного объекта может быть использован при построении многопозиционных радиолокационных систем контроля и обнаружения воздушных объектов, и построении их рабочих зон [18, 19, 20].

### **Список источников**

1. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Соколов П.В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75540>

2. Алмазов В.Б. Методы пассивной радиолокации: учебное пособие. – Харьков: Изд-во ВИРТА им. Говорова Л.А., 1974. – 86 с.
3. Бачевский С.В. Основы радиолокации и радионавигации. – М.: Воениздат, 2010. – 708 с.
4. Мосиенко С.А. Проблема ПВО ВКС РФ: как сбивать группы боевых беспилотных летательных аппаратов // Молодой учёный. 2020. № 32 (322). С. 35–38.
5. Васин В.В., Степанов Б.М. Справочник-задачник по радиолокации. – М.: Советское радио, 1977. – 320 с.
6. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования: монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.
7. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. - М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
8. Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Армейский вестник. 2015. № 6 (14). URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpkvzglyad/malorazmernye-bespilotniki/>
9. Картавов С.А. Математические термины. - Киев: Высшая школа, 1988. – 298 с.
10. Гиголо А.И., Кузнецов Г.Ю. Решение задач рассеяния на протяженных цилиндрических телах различного сечения // Труды МАИ. 2013. № 68. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41691>
11. Сухаревский О.И., Василец В.А., Кукобко С.В. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография. – Харьков: Изд-во ХУПС, 2009. – 469 с.

12. Прохоров Ю.В. и др. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. – 847 с.
13. Blyakhman A.B., Myakinkov A.V., Kostylev V.I. et al. Bistatic radar: principles and practice ed. by M. Cherniakov. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. 504 p.  
DOI:[10.1002/9780470035085](https://doi.org/10.1002/9780470035085)
14. Blyakhman A.B. Forward scattering bistatic radar // PIERS Workshop on advances in radar methods, Baveno, Italy, 1998, pp. 107-113.
15. Blyakhman A.B., Runova I.A. Forward scattering radiolocation bistatic RCS and target detection // Proceedings of the 1999 IEEE radar conference, Waltham, USA, 1999, pp. 203-208.
16. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. - М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
17. Ненашев В.А. Особенности классификации подстилающих поверхностей земли по характеристикам эхо-сигналов бортовых РЛС // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158089>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-11)
18. Ашурков И.С., Лешко Н.А. Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62297>
19. Ашурков И.С., Какаев В.В., Лешко Н.А. Оптимизация пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6 (79). С. 81-85.

20. Griffiths H.D., Baker C.J. *An Introduction to Passive Radar*, New York, Artech House, 2017, 110 p.

## References

1. Ananenkov A.E., Marin D.V., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V., Sokolov P.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75540>

2. Almazov V.B. *Metody passivnoi radiolokatsii* (Passive radar methods), Khar'kov, Izd-vo VIRTA im. Govorova L.A., 1974, 86 p.

3. Bachevskii S.V. *Osnovy radiolokatsii i radionavigatsii* (Fundamentals of radar and radio navigation), Moscow, Voenizdat, 2010, 708 p.

4. Mosienko S.A. *Molodoi uchenyi*, 2020, no. 32 (322), pp. 35–38.

5. Vasin V.V., Stepanov B.M. *Spravochnik-zadachnik po radiolokatsii* (Reference book on radar), Moscow, Sovetskoe radio, 1977, 320 p.

6. Verba V.S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniya. Printsipy postroeniya, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniya* (Aviation complexes of radar patrol and guidance. Principles of construction, development problems and features of functioning), Moscow, Radiotekhnika, 2014, 528 p.

7. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy* (Radar systems), Moscow, Radiotekhnika, 2004, 320 p.

8. Eremin G.V., Gavrilov A.D., Nazarchuk I.I. *Armeiskii vestnik*, 2015, no. 6 (14), URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpkvzglyad/malorazmernye-bespilotniki/>

9. Kartavov S.A. *Matematicheskie terminy* (Mathematical terms), Kiev, Vysshaya shkola, 1988, 298 p.

10. Gigolo A.I., Kuznetsov G.Yu. *Trudy MAI*, 2013, no. 68. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41691>
11. Sukharevskii O.I., Vasilets V.A., Kukobko S.V. *Rasseyanie elektromagnitnykh voln vozdushnymi i nazemnymi radiolokatsionnymi ob"ektami* (Scattering of electromagnetic waves by air and ground radar objects), Khar'kov, Izd-vo KhUPS, 2009, 469 p.
12. Prokhorov Yu.V. et al. *Matematicheskii entsiklopedicheskii slovar'* (Mathematical encyclopedic dictionary), Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1988, 847.
13. Blyakhman A.B., Myakinkov A.V., Kostylev V.I. et al. *Bistatic radar: principles and practice ed. by M. Cherniakov*. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. 504 p. DOI:10.1002/9780470035085
14. Blyakhman A.B. *Forward scattering bistatic radar, PIERS Workshop on advances in radar methods*, Baveno, Italy, 1998, pp. 107-113.
15. Blyakhman A.B., Runova I.A. Forward scattering radiolocation bistatic RCS and target detection, *Proceedings of the 1999 IEEE radar conference*, Waltham, USA, 1999, pp. 203-208.
16. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M. *Radiotekhnicheskie sistemy* (Radar systems), Moscow, Vysshaya shkola, 1990, 496 p.
17. Nenashev V.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158089>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-11
18. Ashurkov I.S., Leshko N.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62297>

19. Ashurkov I.S., Kakaev V.V., Leshko N.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2015, no. 6 (79), pp. 81-85.

20. Griffiths H.D., Baker C.J. *An Introduction to Passive Radar*, New York, Artech House, 2017, 110 p.

Статья поступила в редакцию 23.03.2023

Одобрена после рецензирования 14.04.2023

Принята к публикации 27.06.2023

The article was submitted on 23.03.2023; approved after reviewing on 14.04.2023; accepted for publication on 27.06.2023