УДК 004.94:632.746.3

Динамическая модель пространственно-распределенной воздушной цели

Кузнецов В. А., Амбросов Д. В.

Постановка задачи: в задачах моделирования динамики воздушной обстановки при формировании поляриметрических дальностно-доплеровских портретов воздушной цели необходима априорная информация о поляризационной матрице рассеяния воздушной цели и характеристики ее авиационной силовой установки, исходя из которых, при условии аппроксимации сложной поверхности воздушной цели треугольными фацетами, необходимо с минимальными временными затратами рассчитать эффективную площадь рассеяния каждого фацета с учетом поляризации падающей электромагнитной волны, а также частотные составляющие вторичной доплеровской модуляции зондирующего сигнала, возникающие при отражении падающей электромагнитной волны от вращающихся лопаток компрессора двигателя. Цель работы: формирование поляризационной матрицы рассеяния и спектрально-доплеровского портрета пространственно-распределенной воздушной цели сложной формы с минимальными временными затратами. Используемые методы: метод математического моделирования, метод геометрической оптики, метод анализа видимости массива точек. Новизна: элементами новизны в работе являются расчет поляризационной матрицы рассеяния электромагнитных волн каждым фацетом модели с учетом геометрических свойств его вытянутости при текущих условиях наблюдения, изменяющихся в соответствии с заданными координатами и скоростями цели и носителя бортовой радиолокационной станции, а также применение для решения задач оценки эффективной площади рассеяния радиолокационного объекта сложной формы алгоритма выборки точек из массива при проверке видимых фацетов в комбинации с известным алгоритмом выборки видимых фацетов по углу между векторами нормалей фацетов и направления облучения. Результат: разработана динамическая модель пространственно-распределенной воздушной цели, основанная на модифицированном методе геометрической оптики и математической модели формирования спектра сигнала с учетом эффекта вторичной доплеровской модуляции, позволяющая рассчитать с минимальными временными затратами поляризационную матрицу рассеяния и частотные составляющие вторичной доплеровской модуляции воздушной цели с учетом геометрических особенностей самолета и его авиационной силовой установки. Результаты оценки эффективной площади рассеяния предложенным методом верифицированы известными экспериментальными результатами. Практическая значимость: применение представленной динамической модели пространственно-распределенной воздушной цели дает возможность формировать её поляриметрические дальностно-доплеровские портреты, что позволяет использовать их при разработке алгоритмов селекции и распознавания при различных условиях наблюдения, а также оценивать вероятностные характеристики автоматического обнаружения и распознавания воздушных целей.

Ключевые слова: фацетная модель, эффективная площадь рассеяния, геометрическая оптика, поляризационная матрица рассеяния, дальностно-доплеровский портрет, пространственнораспределенная воздушная цель.

Актуальность

Расчет характеристик рассеяния радиолокационными объектами сложной формы производится, чаще всего, на основании математического описания его

Библиографическая ссылка на статью:

Reference for citation:

Kuznetsov V. A., Ambrosov D. V. Dynamic model of a spatially distributed air target. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 215–235. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10211 (in Russian).

Кузнецов В. А., Амбросов Д. В. Динамическая модель пространственно-распределенной воздушной цели // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 215–235. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10211.

поверхности. Существующие методы численного расчета эффективной площади рассеяния (ЭПР) сложных радиолокационных объектов (СРЛО) позволяют рассчитать только суммарные (не зависящие от разрешающей способности бортовой радиолокационной станции (БРЛС)) характеристики рассеяния статического объекта, единичные для каждого угла облучения, подходящие только для приблизительной оценки дальности обнаружения и соответствующей вероятности правильного обнаружения. При формировании дальностно-доплеровского портрета СРЛО, рассчитываемых известными методами значений ЭПР недостаточно: помимо значений ЭПР в пределах объема разрешения БРЛС, требуется учет вращающихся или вибрирующих составных частей объектов (например, на воздушном судне с турбореактивным двигателем такими частями являются лопатки компрессора низкого давления, на вертолете – лопасти несущего винта и т. п.). Для решения подобных задач необходима динамическая модель СРЛО, представляющая собой совокупность методов точного описания поверхности СРЛО с учетом ее электромагнитных параметров и формирования частот вторичной доплеровской модуляции зондирующего сигнала вследствие отражения электромагнитных волн (ЭМВ) от вращающихся или вибрирующих составных частей СРЛО в условиях взаимного перемещения цели и носителя БРЛС.

В работе [1] представлена созданная авторами динамическая модель истребителя F-22 Raptor, основанная на описании поверхности СРЛО фацетами, каждый из которых характеризуется вытянутостью, что предложено использовать для учета поляризационных свойств фацета, а также на известной модели формирования частот вторичной доплеровской модуляции [2]. Показано, что для получения адекватных результатов оценки ЭПР необходимо исследовать влияние угла видимости фацета. Для уточнения предложенной модификации метода геометрической оптики целесообразно верифицировать расчетные значения ЭПР экспериментальными данными. В данной работе в качестве объекта проверки выбран цилиндр определенных размеров, заданных в работах [3, 4].

Кроме того, интерес представляют поляриметрические дальностнодоплеровские портреты (ПДДП), полученные для цели с большим, в отличие от истребителя F-22 Raptor, числом двигателей, скорости вращения лопаток компрессора низкого давления (КНД) которых несколько отличаются друг от друга. Поскольку для сокращения временных затрат предложен переход от фацетной модели к точечной, имеет смысл при расчете ЭПР, в отличие от рассмотренной ранее модели, учитывать смещение точек в соответствии со скоростью движения воздушной цели и их начальными координатами.

Постановка задачи

В известных математических моделях [5-14], описывающих радиолокационный объект, имеется ряд недостатков. Во-первых, модели не учитывают динамику совместного движения носителя БРЛС и воздушной цели. Во-вторых, полученные расчетные данные при моделировании радиолокационного объекта не позволяют формировать поляриметрические дальностно-доплеровские портреты пространственно-распределенной воздушной цели на четырех поляризациях ЭМВ (двух коллинеарных и двух ортогональных) в масштабе реального времени. В-третьих, время, затраченное на расчеты СРЛО с помощью точных методов оценки ЭПР, реализованных в существующих моделях, занимает часы, а в некоторых случаях, сутки.

В задачах моделирования динамики воздушной обстановки при формировании ПДДП воздушной цели необходима априорная информация о поляризационной матрице рассеяния (ПМР) воздушной цели и характеристиках ее авиационной силовой установки, исходя из которых, при условии аппроксимации сложной поверхности воздушной цели треугольными фацетами, необходимо с минимальными временными затратами рассчитать ЭПР каждого фацета с учетом поляризации падающей ЭМВ, а также частотные составляющие вторичной доплеровской модуляции зондирующего сигнала, возникающие при отражении падающей ЭМВ от вращающихся лопаток компрессора авиационного двигателя.

Расчет характеристик рассеяния пространственно-распределенной воздушной цели производится на основании математического описания её поверхности. Для получения адекватных значений диаграмм обратного вторичного излучения необходимо иметь априорную информацию об электромагнитных параметрах материалов, из которых изготовлены те или иные части пространственно-распределенной воздушной цели. В процессе разработки и совершенствования методик расчета характеристик рассеяния, а также по мере развития вычислительных средств используются всё более точные методы моделирования поверхности СРЛО.

В работах [5-7] рассмотрены методы моделирования поверхности радиолокационных объектов: проволочный метод, метод тел вращения, метод аналитического описания поверхности, метод простейших компонентов, эллипсоидальный метод, методы, использующие описание кубическими сплайнфункциями, метод, основанный на аппроксимации поверхности элементарными участками (фацетами). Выбор описания поверхности радиолокационного объекта сложной формы должен быть тесно связан с используемым методом решения задачи электромагнитного рассеяния, так как точность решения задачи дифракции и точность моделирования геометрии поверхности пространственнораспределенной воздушной цели должны быть согласованы.

Результаты анализа приведенных выше методов моделирования поверхности радиолокационного объекта показали, что наиболее адекватным и широко используемым из них является метод, основанный на аппроксимации поверхности СРЛО элементарными треугольными участками (фацетами). Основным достоинством фацетного представления поверхности СРЛО является отсутствие ограничений на геометрию моделируемого объекта сложной формы. Кроме того, появляется возможность задания электромагнитных параметров каждого фацета. Однако для проведения расчетов необходимы существенные вычислительные ресурсы.

В работах [5-9, 15-17] рассматриваются методы расчета ЭПР радиолокационного объекта, которые делятся на три основные группы: статистические методы, точные методы и приближенные (асимптотические) методы. Статистические методы включают в себя: модели Сверлинга, моделирование статистических законов распределения. Недостатками таких методов являются: отсутствие возможности учета геометрических размеров радиолокационного объекта и возможности получения поляризационной матрицы рассеяния воздушной цели. Точные методы расчета ЭПР радиолокационного объекта основаны на уравнениях Максвелла в интегральной или дифференциальной форме и включают метод моментов (уравнения Стреттона-Чу), метод конечных элементов, метод конечных разностей во временной области, метод конечных интегралов и их гибридные модификации. В настоящее время применение точных методов расчета ЭПР ограничено вследствие больших вычислительных ресурсов. Из асимптотических методов, применяемых в высокочастотной теории дифракции, можно выделить: метод геометрической оптики, метод физической оптики, геометрическую теорию дифракции, физическую теорию дифракции и их модификации. Асимптотические методы не всегда достаточно точны в вычислениях ЭПР, особенно в случаях СРЛО малых размеров.

Наиболее простым в вычислительном смысле из вышеперечисленных асимптотических методов является метод геометрической оптики. Суть этого метода заключается в следующем. Электромагнитная энергия «распространяется» вдоль тонких лучевых трубок, причем оптическая длина пути вдоль этих трубок минимальна. Поведение электромагнитного поля на границах раздела двух сред описывается известным законом Снеллиуса, а амплитуда и фаза отраженного и преломленного лучей определяется коэффициентами Френеля [15]. Однако метод геометрической оптики не учитывает поляризацию ЭМВ отраженных от СРЛО.

Проведенный обзор методов расчета ЭПР показывает, что не существует единого универсального метода, подходящего для расчета ЭПР. Существующие методы так называемого «предсказания» ЭПР СРЛО позволяют рассчитать только суммарные (не зависящие от разрешающей способности БРЛС) обнаружения характеристики рассеяния статического объекта, единичные для каждого угла облучения, чаще всего подходящие только для приблизительной оценки дальности обнаружения и соответствующей вероятности правильного. Вследствие этого, интерес представляет идея учета поляризующих свойств вытянутых фацетов при расчетах методом геометрической оптики для оценки вклада в ПМР каждого фацета модели СРЛО.

Одновременное движение модели носителя БРЛС и модели СРЛО в воздушном пространстве задается через платформы движения, в дискретном времени, соответствующем частоте дискретизации сигнала БРЛС. Предполагается, что платформы испытывают поступательное движение с постоянной скоростью и/или постоянным ускорением на каждом этапе моделирования воздушной обстановки. Пусть R_0 обозначает вектор положения в момент времени 0, а V – вектор скорости.

Вектор положения платформы есть функция времени R(t) [1]:

 $R(t) = R_0 + Vt.$

(1)

В каждый момент времени *t* рассматривается статическая геометрия радиолокационного объекта, соответствующая мгновенным условиям наблюдения.

Расчет ПМР фацетной геометрической поверхности СРЛО сводится к следующему. Основной характеристикой поляризационных свойств объекта в радиолокации является комплексная ПМР [18]:

$$\dot{\mathbf{S}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{S}^{\Gamma\Gamma}(t) & \dot{S}^{\Gamma B}(t) \\ \dot{S}^{B\Gamma}(t) & \dot{S}^{BB}(t) \end{pmatrix},$$
(2)

где: элементы ПМР $\dot{S}^{\Gamma\Gamma}$ и \dot{S}^{BB} являются коэффициентами отражения объекта на согласованной линейной поляризации (горизонтальной и вертикальной соответственно), а элементы $\dot{S}^{\Gamma B}$ и $\dot{S}^{B\Gamma}$ – на кроссполяризации [18].

Матрицу рассеяния можно использовать для определения взаимосвязи между поляризациями падающего и рассеянного поля [18]:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{omp}^{\Gamma\Gamma}(t) \\ \dot{E}_{omp}^{BB}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{S}^{\Gamma\Gamma}(t) & \dot{S}^{\Gamma B}(t) \\ \dot{S}^{B\Gamma}(t) & \dot{S}^{BB}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_{na\partial}^{\Gamma\Gamma}(t) \\ \dot{E}_{na\partial}^{BB}(t) \end{bmatrix}.$$
(3)

Символы w и $v(S^{wv})$ характеризуют параметры рассеяния, причем индекс w задает поляризацию рассеянного поля, а индекс v задает поляризацию падающего поля. Элементы матрицы рассеяния рассчитываются по формуле [1]:

$$S^{wv}(t) = \frac{\sqrt{\sigma_i^{wv}(t)}}{\sqrt{4\pi R^2(t)}}.$$
(4)

Суммарная ЭПР фацетной геометрической поверхности СРЛО вычисляется по формуле [1]:

$$\sigma_{\Sigma}^{wv}(t) = \sum_{p=1}^{P} \sigma_{i}^{wv}(t).$$
(5)

Рассмотрим единичный фацет геометрической поверхности СРЛО, определенный разносторонним треугольником, как показано на рис. 1. ЭПР единичного фацета с учетом взаимного перемещения цели и носителя БРЛС может быть вычислена по формуле [1]

$$\sigma_{i}^{WV}(t) = \frac{4\pi S_{\Delta i}^{2}(t)}{\lambda^{2}} (\cos\theta(t))^{2} \sigma_{i0}^{WV}(t) L_{i}^{WV}, \qquad (6)$$

где: $S_{\Delta i}$ – площадь *i*-го единичного фацета, λ – длина волны, L_i^{wv} – отражающие свойства материала *i*-го единичного фацета, θ – угол в вертикальной плоскости (угол высоты места),

$$\sigma_{i0}^{wv}(t) = \frac{\left[\left(\sin\alpha(t)\right)^2 - \left(\sin(\beta(t)/2)\right)^2\right]^2 + \sigma_{i01}^{wv}(t)}{\alpha(t)^2 - \left(\beta(t)/2\right)^2},$$
(7)

$$\sigma_{i01}^{WV}(t) = 0.25 (\sin \varphi(t))^2 \Big[(2M_i^{WV}(t)/A_{i23}(t)) \cos \varphi(t) \sin \beta(t) - -\sin \varphi(t) \sin 2\alpha(t) \Big]^2, \qquad (8)$$

где: $\alpha = kM_i^{wv}(t)\sin\theta(t)\cos\varphi(t)$, $\beta = kA_{i23}(t)\sin\theta(t)\sin\varphi(t)$, $A_{i23} \in M_i^{wv}$ – основание *i*-го единичного фацета, M_i^{wv} – максимально длинная медиана фацета, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, φ – угол облучения в горизонтальной плоскости (азимутальный угол).



Рис. 1. Схема облучения единичного фацета

Для расчета вклада каждого фацета геометрической поверхности СРЛО в ПМР учитывается вытянутость каждого фацета, т. е. максимально длинная медиана из трех и её проекция на вектор \vec{E} падающей ЭМВ в плоскостях *zox* и *yox*.

Задание координат положения в пространстве точек начала и конца трех медиан каждого фацета (рис. 1) геометрической поверхности СРЛО с учетом динамики движения выполняется в виде:

$$A_{i1}(x_{i1}(t), y_{i1}(t), z_{i1}(t));$$

$$a_{i1}\left(\frac{(x_{i2}(t) + x_{i3}(t))}{2}; \frac{(y_{i2}(t) + y_{i3}(t))}{2}; \frac{(z_{i2}(t) + z_{i3}(t))}{2}\right),$$
(9)
$$A_{i1}(x_{i2}(t), y_{i2}(t), z_{i2}(t));$$

$$a_{i2}\left(\frac{(x_{i1}(t) + x_{i3}(t))}{2}; \frac{(y_{i1}(t) + y_{i3}(t))}{2}; \frac{(z_{i1}(t) + z_{i3}(t))}{2}; \frac{(z_{i1}(t) + z_{i3}(t))}{2}\right),$$
(10)

$$A_{i3}(x_{i3}(t), y_{i3}(t), z_{i3}(t));$$

$$a_{i3}\left(\frac{(x_{i1}(t) + x_{i2}(t))}{2}; \frac{(y_{i1}(t) + y_{i2}(t))}{2}; \frac{(z_{i1}(t) + z_{i2}(t))}{2}\right),$$
(11)

где: x_i, y_i, z_i – координаты вершин *i*-го фацета.

Вычисление длин сторон всех фацетов геометрической поверхности СРЛО осуществляется согласно выражений:

$$A_{i12}(t) = \sqrt{\left(x_{i1}(t) - x_{i2}(t)\right)^2 + \left(y_{i1}(t) - y_{i2}(t)\right)^2 + \left(z_{i1}(t) - z_{i2}(t)\right)^2}, \quad (12)$$

$$A_{i23}(t) = \sqrt{\left(x_{i2}(t) - x_{i3}(t)\right)^{2} + \left(y_{i2}(t) - y_{i3}(t)\right)^{2} + \left(z_{i2}(t) - z_{i3}(t)\right)^{2}}, \quad (13)$$

$$A_{i31}(t) = \sqrt{\left(x_{i3}(t) - x_{i1}(t)\right)^2 + \left(y_{i3}(t) - y_{i1}(t)\right)^2 + \left(z_{i3}(t) - z_{i1}(t)\right)^2}.$$
 (14)

Вычисляются полупериметры всех фацетов геометрической поверхности СРЛО:

$$P_{\Delta i}(t) = \frac{\left(A_{i12}(t) + A_{i23}(t) + A_{i31}(t)\right)}{2}.$$
(15)

Вычисляются площади всех фацетов геометрической поверхности СРЛО через полупериметр:

$$S_{\Delta i}(t) = \sqrt{P_{\Delta i}(t) (P_{\Delta i}(t) - A_{i12}(t)) (P_{\Delta i}(t) - A_{i23}(t)) (P_{\Delta i}(t) - A_{i31}(t))}.$$
 (16)

Длины медиан фацета рассчитываются следующим образом [1]:

$$M_{i1}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{2A_{i13}^2(t) + 2A_{i23}^2(t) - A_{i12}^2(t)},$$
(17)

$$M_{i2}(t) = \frac{1}{2}\sqrt{2A_{i12}^2(t) + 2A_{i13}^2(t) - A_{i23}^2(t)},$$
(18)

$$M_{i3}(t) = \frac{1}{2}\sqrt{2A_{i12}^2(t) + 2A_{i23}^2(t) - A_{i13}^2(t)}.$$
(19)

Определяется максимально длинная медиана из трех возможных медиан каждого фацета геометрической поверхности СРЛО:

$$M_{i\max}(t) = \frac{\left|2M_{i3}(t) - \left|M_{i2}(t) - M_{i1}(t)\right| - M_{i2}(t) - M_{i1}(t)\right| + 4}{4}$$

+2M_{i3}(t) + $\left|M_{i2}(t) - M_{i1}(t)\right| + M_{i2}(t) + M_{i1}(t)\right|.$ (20)

Вклад каждого фацета геометрической поверхности СРЛО в поляризационную матрицу рассеяния производится следующим образом (рис. 2). Вычисляются углы, характеризующие положение медианы в пространстве с учетом взаимного перемещения цели и носителя БРЛС:

$$\angle \varepsilon_i^w(t) = \operatorname{arctg} \frac{\left| M_i^w(t) \left(x_{M_i^w} \right) - K(t) \left(x_K \right) \right|}{\left| M_i^w(t) \left(z_{M_i^w} \right) - K(t) \left(z_K \right) \right|},$$
(21)

$$\angle \varepsilon_i^{\nu}(t) = \operatorname{arctg} \frac{\left| M_i^{\nu}(t) \left(x_{M_i^{\nu}} \right) - K(t) (x_K) \right|}{\left| M_i^{\nu}(t) \left(y_{M_i^{\nu}} \right) - K(t) (y_K) \right|},$$
(22)

где: $x_{M_i}, y_{M_i}, z_{M_i}$ – координаты центральной точки M_i *i*-го фацета, x_K, y_K, z_K – координаты точки наблюдения *K i*-го фацета,

$$\angle \gamma_i^w(t) = 90^0 - \angle \varepsilon_i^w(t), \tag{23}$$

$$\angle \gamma_i^{\nu}(t) = 90^0 - \angle \varepsilon_i^{\nu}(t), \qquad (24)$$

$$\angle \eta_i^w(t) = \operatorname{arctg} \frac{|A_{i1}(t)(z_{i1}) - a_{i1}(t)(z_{i1})|}{|A_{i1}(t)(x_{i1}) - a_{i1}(t)(x_{i1})|},$$
(25)

$$\angle \eta_i^{\nu}(t) = \operatorname{arctg} \frac{\left| A_{i_1}(t)(y_{i_1}) - a_{i_1}(t)(y_{i_1}) \right|}{\left| A_{i_1}(t)(x_{i_1}) - a_{i_1}(t)(x_{i_1}) \right|}.$$

$$(26)$$



Рис. 2. Расчет проекции всех максимально длинных медиан фацетной геометрической поверхности СРЛО на вектор *E* падающей ЭМВ: а) в плоскости *zox*; б) в плоскости *yox*

Вычисляются проекции всех максимально длинных медиан фацетной геометрической поверхности СРЛО на вектор \vec{E} падающей ЭМВ с учетом вза-имного перемещения цели и носителя БРЛС:

$$M_i^w(t) = M_i(t) \cdot \cos\left(\angle \gamma_i^w(t) + \angle \eta_i^w(t) \right), \tag{27}$$

$$M_i^{\nu}(t) = M_i(t) \cdot \cos\left(\angle \gamma_i^{\nu}(t) + \angle \eta_i^{\nu}(t)\right).$$
(28)

В работе [3] представлена экспериментальная диаграмма ЭПР цилиндра полученная при длине волны 0,032 м и положение волнового вектора в плоскости, который проходит через ось цилиндра. С помощью программы [19] и фацетной модели цилиндра диаметром 3λ и длиной 8λ (рис. 3, а) построены расчетные диаграммы ЭПР (рис. 3, б). Представленные расчетные диаграммы ЭПР получены с помощью предложенного авторами модифицированного метода геометрической оптики и комбинированной проверки видимости модели цилиндра алгоритмом НРR и алгоритмом проверки видимости фацетов по углу между векторами нормалей и направления облучения 1°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°.

При проведении сравнительного анализа рассчитанных диаграмм ЭПР цилиндра с экспериментальной диаграммой (рис. 3, б) видно, что наиболее близко описывает экспериментальные данные диаграмма, полученная при значении угла между векторами нормалей и вектором облучения 10° (линия выделена красным цветом, длинными пунктирами).



Рис. 3. Результат верификации расчетных данных результатами эксперимента: а) фацетная модель исследуемого цилиндра длиной 0,256 м и диаметром 0,192 м; б) сравнение расчитанных диаграмм ЭПР цилиндра с диаграммой ЭПР цилиндра полученной экспериментально

В работе [4] представлены экспериментальные данные рассеяния ЭПР (вертикальная и горизонтальная поляризации ЭМВ) длинного металлического прямого круглого цилиндра. По осям абсцисс отложены значения ракурса при вращении относительно оси, перпендикулярной оси симметрии цилиндра, отсчитываемые от боковой стороны (90°) слева, до оси (0°) направо; по осям

ординат отложены значения ЭПР (в децибелах относительно одного квадратного метра). Рабочая длина волны λ = 0,0862 м.

С помощью программы [19] и фацетной модели цилиндра диаметром 4,779λ и длиной 24,265λ (рис. 4, а) построены расчетные диаграммы ЭПР (рис. 4, б). Представленные расчетные диаграммы ЭПР получены при тех же вышеуказанных условиях.



Рис. 4. Результат сравнения опытных и расчетных данных: а) фацетная модель исследуемого цилиндра длиной 0,209 м и диаметром 0,082 м; б) сравнение расчитанных диаграмм ЭПР цилиндра с диаграммами ЭПР цилиндра полученных опытным путем В качестве объекта моделирования динамической модели пространственно-распределенной воздушной цели выбран самолет Ил-76Т, предназначенный для перевозки различных грузов и техники. Самолет представляет собой свободнонесущий планер с высокорасположенным стреловидным крылом и стреловидным оперением. Его длина 46,6 м, размах крыла 50,5 м, высота самолета 14,76 м, диаметр фюзеляжа 4,8 м, площадь крыла 300 м². Под крылом на пилонах установлено четыре турбореактивных двигателя Д-30КП, расстояние между двигателями: внутренними 12,7 м, наружными 21,2 м. Крейсерская скорость 750-850 км/ч [20].

В соответствии с имеющимися данными о геометрической поверхности самолета Ил-76 с помощью программного продукта AutoCAD аппроксимирована комплексная фацетная модель его поверхности, импортирована в формате STL в среду MATLAB для расчета ПМР каждого фацета модели (рис. 5). Для реализации вышеуказанных расчетов в MATLAB широко используется пакет Phased Array System Toolbox.



Рис. 5. Фацетная модель самолета Ил-76Т

На рис. 6 представлены графики параметров фацетов модели самолета Ил-76Т, полученные с помощью выражений (12-20).

Большие, до 40 м², площади фацетов, длина максимальных медиан до 25 м, фацеты преимущественно вытянутые, и отношение $M_{\rm max}/\lambda > 3$ позволяют обосновать применение асимптотических методов расчета ЭПР в высокочастотной области.

Проверка видимости фацетной модели самолета Ил-76Т с текущего ракурса наблюдения осуществляется с помощью комбинации алгоритма Hidden Point Removal (HPR) [21] и известного алгоритма выборки видимых фацетов по углу между векторами нормалей и направления облучения ЭМВ, порядок работы которых изложен в работе [1]. На рис. 7 показан результат комбинированной работы этих алгоритмов при обработке геометрической поверхности самолета Ил-76T (рис. 5).



Рис. 6. Графическое представление вычисления параметров фацетов: а) площади фацетов; б) максимальные из трех медианы фацетов; в) отношение $M_{\rm max}/M_{\rm min}$; г) отношения $M_{\rm max}/\lambda$ для $\lambda = 0,03$ м



Рис. 7. Видимая фацетная геометрическая поверхность самолета Ил-76 при условии наблюдения $\varphi = 0, \theta = 0$

На основе предложенного авторами подхода, реализованного в программах [19, 22], на рис. 8 представлен результат расчета составляющих ПМР динамической модели самолета Ил-76Т при условиях наблюдения $\varphi = 0, \theta = 0$.



Рис. 8. Составляющие поляризационной матрицы рассеяния каждого видимого фацета самолета Ил-76Т при условии наблюдения $\varphi = 0^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$

Для формирования ПДДП пространственно-распределенной воздушной цели необходимо вычислить частотные составляющие вторичной доплеровской модуляции авиационной силовой установки самолета Ил-76Т. В работе используется известная математическая модель спектрально-доплеровского портрета воздушной цели с турбореактивным двигателем с учетом конструкции двигателя [2]. Каждая ступень КНД расположена на валу диаметром 2r, имеет N лопаток длиной L и шириной d. Лопатки двигателя расположены эквидистантно с угловым расстоянием между ними: $\beta = 2\pi/N$. Обычно лопатки имеют достаточно сложную форму и расположены по аэродинамическим соображениям,

так что элементарная площадка лопатки dx, расположенная на расстоянии x от центра вращения, не совпадает с плоскостью вращения вокруг оси ротора. Поэтому можно считать, что ЭМВ падает под углом γ относительно нормали к плоскости вращения. Расстояние от БРЛС до элементарного отражателя $dx \times d$, расположенного на лопатке, равно [2]

$$R_{k}(t) = \sqrt{R^{2}(t) + (x \sin \gamma)^{2} + 2R(t)x \sin \gamma \cos(\Omega t + \beta_{0} + n\beta)} \approx \\ \approx R(t) + x \sin \gamma \cos(\Omega t + \beta_{0} + n\beta),$$
(29)

где: β_0 – начальный угол нулевой лопатки, n = 0, 1, ..., N - 1 – номер лопатки.

Для импульсного зондирующего сигнала с достаточно большой частотой повторения, так что полученный спектр свободен от неоднозначностей частот (или для непрерывного немодулированного излучения), и частотой заполнения f_0 (длина волны λ) сигнал, отраженный от лопаток компрессора, представляет собой суперпозицию отражений от оси ротора вращения и лопаток на первой ступени КНД и имеет вид [2]

$$s(t) = s_{\kappa}(t) + s_{1}(t) = \dot{S}_{\kappa}e^{\left[j2\pi f_{0}\left(t-\frac{2}{c}R(t)\right)\right]} + \sum_{n=0}^{N-1} \int_{r}^{\frac{r+L}{2}} \dot{B}(x)e^{j2\pi f_{0}\left\{t-\frac{2}{c}\left[R(t)-x\sin\gamma\cos(\Omega t+\beta_{0}+n\beta)\right]\right\}}dx,$$
(30)

где: \dot{S}_{κ} – комплексная амплитуда сигнала, отраженная от корпуса двигателя, $\dot{B}(x)$ – распределение электромагнитного поля по поверхности лопаток.

Первое слагаемое (30) соответствует отражению от фюзеляжа самолета, а второе слагаемое характеризует отражение от лопаток первой ступени КНД. Интегрирование поля по поверхности лопатки проводится при допущении равномерного распределения поля вдоль лопатки ($\dot{B}(x) = B$).

Вынося за скобки общий множитель в формуле (30)

$$e\left(j2\pi f_0\left\{t-2/\left[cR(t)\right]\right\}\right) = e\left(j2\pi f_0t - j2\pi\omega_d t - j\varphi_0\right), \text{получим} [2]$$

$$s(t) = \left[\dot{S}_{\kappa} + \sum_{n=0}^{N-1} \dot{S}_n \operatorname{sinc}\left(m\cos\left(\Omega(t-nT_n) + \beta_0\right)\right) \times \left(2 + \frac{i}{\lambda}\left(r + \frac{L}{2}\right)\sin\gamma\cos\left(\Omega(t-nT_n) + \beta_0\right)\right) + e^{j2\pi f_0 t + \omega_d t + j\varphi_0}\right], \quad (31)$$

где: Ω – частота вращения ступени компрессора низкого давления, $S_{\pi} = BLd$ – амплитуда сигнала, отраженного от лопастей, sinc = sin x/x – функция, описывающая огибающую отраженного сигнала, $m = 2\pi L/\lambda$ – величина обратная ширине импульса, $\varphi_0 = 4\pi R_0/\lambda$ – начальная фаза, $\omega_d = 2V_{con}/\lambda$ – доплеровское смещение частоты, $T_n = 2\pi/N\Omega$ – период повторения импульсов.



Рис. 9. Поляриметрические дальностно-доплеровские портреты пространственно-распределенной воздушной цели (фацетная модель самолета Ил-76Т): а) излучение и прием на горизонтальной поляризации ЭМВ; б) излучение на вертикальной, прием на горизонтальной поляризациях ЭМВ; в) излучение на горизонтальной, прием на вертикальной поляризациях ЭМВ; г) излучение и прием на вертикальной поляризация ЭМВ; г) излучение и

Зондирующий сигнал БРЛС после прохождения первой ступени КНД отражается как в сторону БРЛС, так и в сторону второй ступени. Аналогичным образом происходит отражение и от последующих ступеней [2]

$$s_{\Sigma}(t) = s_1(t) + s_2(t) + s_1(t)s_2(t), \qquad (32)$$

где $s_1(t), s_2(t)$ – отраженный сигнал от первой и второй ступени КНД соответственно.

Данная математическая модель полностью сопоставима с моделями, полученными в ходе реальных летных экспериментальных исследований с использованием импульсно-доплеровской БРЛС [2].

На основании выше изложенных расчетов, реализованных в программах [19, 22, 23], и с учетом функционирования БРЛС, как описано в работе [24], получены ПДДП пространственно-распределенной воздушной цели (фацетная модель самолета Ил-76Т) на четырех поляризациях (двух коллинеарных и двух ортогональных) ЭМВ и представлены на рис. 9.

Сравнение ПДДП (рис. 9), полученных при моделировании совместного движения навстречу друг другу носителя БРЛС с радиальной скоростью 142 м/с и пространственно-распределенной воздушной цели с радиальной скоростью 208 м/с на начальной дальности 52 км, показывает, что наиболее информативным является рис. 9, а, отображающий наибольшее число элементов пространственно-распределенной воздушной цели (носовая часть, фюзеляж, авиационная силовая установка и хвостовая часть). Нетрудно заметить, что ПДДП пространственно-распределенной воздушной цели, сформированные на кроссполярицациях (рис. 9, б, в), по виду практически не отличаются друг от друга и отображают носовую часть и авиационную силовую установку модели. ПДДП на рис. 9, г отображает носовую часть, авиационную силовую установку и хвостовую часть. Все четыре изображения, представленные на рис. 9, отличаются друг от друга. Следовательно, представленные отличия ПДДП можно использовать в качестве поляризационного признака селекции и распознавания воздушных целей.

Выводы

Таким образом, разработанная динамическая модель самолета Ил-76Т позволяет исследовать его ПМР и конкретные значения составляющих вторичной доплеровской модуляции с учетом текущей воздушной обстановки, режима работы двигателей и изменяющейся во времени модели воздушной цели. В отличие от работы [1], рассмотрена модель воздушной цели с четырьмя двигателями, скорость вращения которых отличаются друг от друга до 1%. Вместе с тем, представленные ПДДП дают возможность сделать вывод о возможности эффективной селекции реальных воздушных целей и ложных воздушных целей по поляризационному признаку.

Верификация предлагаемого метода геометрической оптики экспериментальными данными позволила определить диапазон значений угла видимости фацетов от 1° до 30°, минимизирующий расходимость расчетных значений от экспериментальных. Применение модифицированного метода при оценке ЭПР позволяет исследовать характеристики рассеяния ЭМВ радиолокационными объектами сложной формы на разных поляризациях, в том числе оценить вклад в суммарную ЭПР элементов авиационной силовой установки: каналов воздухозаборников, лопаток входного направляющего аппарата и КНД.

Литература

1. Кузнецов В. А., Амбросов Д. В. Динамическая модель истребителя F-22 Raptor // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. Т. 3. – С. 126–137.

2. Надточий В. Н., Трущинский А. Ю., Фролов А. Ю., Аврамов А. В. Математическая модель спектрально-доплеровского портрета воздушной цели с турбореактивным двигателем с учетом конструкции двигателя // Радиотехника. 2017. № 12. С. 39–43.

3. Лагарьков А. Н., Погосян М. А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестник Российской академии наук. 2003. Т. 73. № 9. С. 779–787.

4. Сколник М. И. Справочник по радиолокации. Т. 1. – М.: Советское радио, 1976. – 456 с.

5. Борзов А. Б., Быстров Р. П. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения и наведения в условиях естественных и организованных помех. – М.: Радиотехника, 2010. – 376 с.

6. Ширман Я. Д., Горшков С. А., Лещенко С. П., Братченко Г. Д., Орленко В. М. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Научно-технические серии. Серия 2: Радиолокация и радиометрия. 2000. № 3. С. 5–64.

7. Залевский Г. С. Обзор методов расчета вторичного излучения радиолокационных объектов // Системы обработки информации. 2007. № 7(65). С. 16–24.

8. Сухаревский О. И., Василец В. А., Кукобко С. В. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография. – Харьков: Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, 2009. – 468 с.

9. Вождаев В. В., Теперин Л. Л. Характеристики радиолокационной заметности летательных аппаратов. – М.: Физматлит, 2018. – 376 с.

10. French A. Target recognition techniques for multifunction phased array radar. Ph.D. Thesis. – London: University College London, 2010. – 308 p.

11. Park J. H., Yang W. Y., Bae J. W. Extended high resolution range profilejet engine modulation analysis with signal eccentricity // Progress In Electromagnetics Research. 2013. Vol. 142. P. 505–521.

12. Max Chung S. S., Chou Y. H., Chuang Y. C. Radar cross section analysis of stealth fighter design: key factors and limitations of simulation // International journal of electrical engineering. 2016. Vol. 23. No. 6. P. 201–214.

13. Liangliang C., Kuizhi Y. Integration analysis of conceptual design and stealth-aerodynamic characteristics of combat aircraft // Journal of aerospace technology and management. 2016. Vol. 8. No. 1. P. 40–48.

14. Touzopoulos P., Boviatsis D., Zikidis K. C. Constructing a 3D model of a complex object from 2D images, for the purpose of estimating its radar cross section // Journal of computations and modelling. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 15–28.

15. Skolnik M. I. Radar Handbook. – Boston: McGrow-Hill, 2008. – 1350 p.

16. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. Radar cross section. Second Edition. – Boston, London: Artech House, 1993. – 611 p.

17. Штагер Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.

18. Лихачев В. П., Купряшкин И. Ф., Семенов В. В. Поляриметрические и интерферометрические режимы работы РСА в условиях помех: монография. – Воронеж: Военно-воздушная академия, 2014. – 109 с.

19. Кузнецов В. А., Амбросов Д. В., Дятлов Д. В. Динамическая модель пространственно-распределенной воздушной цели // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2018661660. 2018.

20. Шмаков Ю. И., Семенов В. А. Конструкция и летная эксплуатация самолета Ил-76Т: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 1981. – 96 с.

21. Sagi K., Ayellet T., Ronen B. Direct visibility of point sets // Association for computing machinery transactions on graphics. 2007. Vol. 26. No. 3. P. 1–11.

22. Кузнецов В. А., Амбросов Д. В. Программа формирования многочастотных поляриметрических дальностно-доплеровских портретов пространственно-распределенных воздушных целей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2018619398. 2018.

23. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Амбросов Д. В. Программа ДЛЯ реализации квазиоптимального алгоритма автофокусировки изображения энтропии // радиолокационного по критерию минимума Свидетельство государственной регистрации программы ЭBМ. для 0 № 2018663803. 2018.

24. Лихачев В. П., Кузнецов В. А., Амбросов Д. В., Дятлов Д. В. Способ поляриметрической селекции ложных воздушных целей // Заявка на изобретение RU 2018140146, опубл. 14.11.2018.

References

1. Kuznetsov V. A., Ambrosov D. V. Dinamicheskaia Model' Istrebitelia F-22 Raptor. *Radiolokatsiia, navigatsiia, sviaz': sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchnotekhnicheskoi konferentsii* [Radiolocation, Navigation, Communication. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Voronezh, Voronezh State University, 2019, no. 3, pp. 126–137 (in Russian).

2. Nadtochy V. N., Trushchinsky A. Yu., Frolov A. Yu., Avramov A. V. Matematicheskaia model' spektral'no-doplerovskogo portreta vozdushnoi tseli s turboreaktivnym dvigatelem s uchetom konstruktsii dvigatelia [Mathematical Model of Spectral Doppler Portrait Air Targets with a Turbojet Engine, Given the Engine Design]. *Radiotekhnika*, 2017, no. 12, pp. 39–43 (in Russian).

3. Lagar'kov A. N., Pogosian M. A. Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Stels-tekhnologii [Fundamental and Applied Problems of Stealth Technology]. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2003, vol. 73, no. 9, pp. 779–787 (in Russian).

4. Skolnik M. I. *Spravochnik po radiolokatsii* [Radar Handbook]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1976. 456 p. (in Russian).

5. Borzov A. B., Bystrov R. P. *Millimetrovaya radiolokatsiya: metody obnaruzheniya i navedeniya v usloviyakh yestestvennykh i organizovannykh pomekh* [Millimeter Radar: Detection and Targeting Methods in Conditions of Natural and Organized Interference]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 376 p. (in Russian).

6. Shirman Ya. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Bratchenko G. D., Orlenko V.M. Metody radiolokatsionnogo raspoznavaniia i ikh modelirovanie [Radar Recognition and Mathematical Modeling Methods]. *Nauchno-tekhnicheskie serii. Seriia 2: Radiolokatsiia i radiometriia*, 2000, vol. 3, pp. 5–64 (in Russian).

7. Zalevsky G. S. Obzor metodov rascheta vtorichnogo izlucheniia radiolokatsionnykh ob"ektov [Review of Methods for Calculating the Secondary Radiation of Radar Objects]. *Sistemy obrabotki informatsii*, 2007, vol. 7, no. 65, pp. 16–24 (in Russian).

8. Sukharevsky O. I., Vasilets V. A., Kukobko S. V., Nechitaylo S. V., Sazonov A. Z. *Rasseianye Elektromahnytnykh Voln Vozdushnymy y Nazemnymy Radyolokatsyonnymy Obektamy* [The Electromagnetic Wave Scattering By Aerial And Ground Radar Objects]. Kharkiv, Kharkiv national air Force University named after Ivan Kozhedub, 2009. 468 p. (in Russian).

9. Vozhdaev V. V., Teperin L. L. *Kharakteristiki Radiolokatsionnoi Zametnosti Letatel'nykh Apparatov* [Characteristics of Radar Aircraft Visibility]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2018. 376 p. (in Russian).

10. French A. *Target recognition techniques for multifunction phased array radar*. Ph.D. Thesis. London, University College London, 2010. 308 p.

11. Park J. H., Yang W. Y., Bae J. W. Extended High Resolution Range Profile - Jet Engine Modulation Analysis with Signal Eccentricity. *Progress In Electromagnetics Research*, 2013, vol. 142, pp. 505–521.

12. Max Chung S. S., Chou Y. H., Chuang Y. C. Radar Cross Section Analysis of Stealth Fighter Design: Key Factors and Limitations of Simulation. *International Journal of Electrical Engineering*, 2016, vol. 23, no. 6, pp. 201–214.

13. Liangliang C., Kuizhi Y. Integration Analysis of Conceptual Design and Stealth-aerodynamic Characteristics of Combat Aircraft. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 40–48.

14. Touzopoulos P., Boviatsis D., Zikidis K. C. Constructing a 3D Model of a Complex Object from 2D Images, for the Purpose of Estimating its Radar Cross Section. *Journal of Computations and Modeling*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 15–28.

15. Skolnik M. I. Radar Handbook. Boston, McGrow-Hill, 2008. 1350 p.

16. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. *Radar Cross Section*. Boston, London, Artech House, 1993. 611 p.

17. Stager E. A. *Rasseianie radiovoln na telakh slozhnoi formy* [Radio Wave Scattering on Complex Shaped Bodies]. Moscow, Radio i Sviaz Publ., 1986. 184 p. (in Russian).

18. Likhachev V. P., Kupryashkin I. F., Semenov V. V. *Polyarimetricheskiye i interferometricheskiye rezhimy raboty RSA v usloviyakh pomekh* [Polarimetric and Interferometric Modes of Operation of SAR in the Conditions of Interference]. Voronezh, Air Force Academy, 2014. 109 p. (in Russian).

19. Kuznetsov V. A., Ambrosov D. V., Dyatlov D. V. *Dinamicheskaia model' prostranstvenno-raspredelennoi vozdushnoi tseli* [Dynamic Model of a Spatially Distributed Air Target]. Certificate of State Registration (Russia) of the Computer Program, No. 2018661660, 2018.

20. Shmakov Yu. I., Semenov V. A. *Konstruktsiya i letnaya ekspluatatsiya samoleta Il-76T* [The Design and Flight Operation of the Aircraft IL-76T]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 96 p. (in Russian).

21. Sagi K., Ayellet T., Ronen B. Direct Visibility of Point Sets. *Association for Computing Machinery Transactions on Graphics*, 2007, vol. 26, no. 3, pp. 1–11.

22. Kuznetsov V. A., Ambrosov D. V. *Programma formirovaniia mnogochastotnykh poliarimetricheskikh dal'nostno-doplerovskikh portretov prostranstvenno-raspredelennykh vozdushnykh tselei* [The Program for Formation of Multi-Frequency Polarimetric Range-Doppler Portraits of Spatially Distributed Air Targets]. Certificate of State Registration (Russia) of the Computer Program, No. 2018619398, 2018.

23. Kuznetsov V. A., Goncharov S. A. Ambrosov D. V. *Programma dlia realizatsii kvazioptimal'nogo algoritma avtofokusirovki radiolokatsionnogo izobrazheniia po kriteriiu minimuma entropii* [The Program for the Implementation of a Quasi-optimal Autofocusing Algorithm of the Radar Image by the Criterion of Minimum Entropy]. Certificate of State Registration (Russia) of the Computer Program, No. 2018663803, 2018.

24. Likhachev V. P., Kuznetsov V. A., Ambrosov D. V., Diatlov D. V. *Sposob poliarimetricheskoi selektsii lozhnykh vozdushnykh tselei* [The Method of Polarimetric Selection of False Air Targets]. Patent Russia, no. 2018140146, 2018.

Статья поступила 31 мая 2019 г.

Информация об авторах

Кузнецов Виктор Андреевич – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: системный анализ; радиолокация; распознавание образов, фракталы. Е-mail: kuzzviktor@mail.ru

Амбросов Дмитрий Валерьевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. Военный учебно-научный центр Военно-

воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: радиолокация. E-mail: dmitryambrosov@mail.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А.

The dynamic model of a spatially distributed air target

V. A. Kuznetsov, D. V. Ambrosov

Purpose. To solve the air situation dynamics modeling problem you have to resolve some special tasks. First of all, you need to know the information about the polarization scattering matrix of the air target and its power engine characteristics in advance before spectral-Doppler air target portraits formatting process begins. Then you have to calculate the effective scattering area of each facet of the air target surface, provided that this surface had been approximated by triangular facets. Such calculation must take into account the incident electromagnetic wave polarization. Also you have to calculate secondary Doppler modulation frequency components of the probing signal, arising when the incident electromagnetic waves are reflecting from engine compressor rotating blades. Both scattering area calculation and frequency components calculation must be carried out with minimal time cost. The aim of the paper is to create the polarization scattering matrix and spectral Doppler portrait of spatially distributed air target which has complex shape with minimal time costs. Methods: method of mathematical modeling, method of geometrical optics, method of analyzing the visibility of an array of points. The novelty of the paper is the calculation of the polarization scattering matrix of electromagnetic waves by each facet of the model, taking into account geometric properties of its elongation under the current observation conditions, changing in accordance with the given coordinates and speeds of the target. Also the novelty of the paper is joint use of an algorithm for sampling points from the array during visible facets checking process and a popular algorithm for sampling visible facets by the angle between the normal vectors of facets and the direction of irradiation. This joint use of algorithms is to solve problems of estimating the effective scattering area of a radar object of complex shape. Results. The dynamic model of a spatially distributed air target has been developed. The model is based on both a modified method of geometric optics and a mathematical model of signal spectrum formation which takes into account the effect of secondary Doppler modulation. The model allows to compute the polarization scattering matrix and the frequency components of the secondary Doppler modulation of an air target taking into account the aircraft's geometric characteristics and its power engine with minimum time expenditures. All radar cross section estimation results received by the proposed method are verified by known experimental results. Practical relevance. The presented dynamic model of a spatially distributed air target allows to create polarimetric range-Doppler portraits and use them in the development of algorithms for the selection and recognition of air targets in various observation conditions and evaluate their automatic detection and recognition probability characteristics.

Key words: facet model, radar cross section, geometrical optics, polarization scattering matrix, range-Doppler portrait, spatially distributed air target.

Information about Authors

Victor Andreevich Kuznetsov – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior lecturer of Chair of aircraft radioelectronic equipment exploitation. Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh). Field of research: system analysis, radiolocation, pattern recognition, fractals. E-mail:kuzzviktor@mail.ru

Dmitrii Valer'evich Ambrosov – Doctoral Student. The postgraduate student of the Chair of aircraft radioelectronic equipment exploitation. Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh). Field of research: radiolocation. E-mail: dmitryambrosov@mail.ru

Address: Russia, 394064, Voronezh, Starykh Bolshevikov, 54A.