

УДК 531.38

## ДОПЛЕРОВСКАЯ СЕЛЕКЦИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ СО СЛУЧАЙНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ОРИЕНТАЦИИ ВЕКТОРА СКОРОСТИ<sup>1</sup>

© 2021 г. А. В. Бобин<sup>а</sup>, В. М. Лисицын<sup>а,\*</sup>, К. В. Обросов<sup>а</sup>, М. И. Сикачева<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ФНЦ ФГУП “ГосНИИАС”, Москва, Россия

\*e-mail lvm@gosniias.ru

Поступила в редакцию 06.04.2021 г.

После доработки 26.04.2021 г.

Принята к публикации 31.05.2021 г.

Рассматривается задача радиолокационного поиска—обнаружения—классификации наземных объектов, движущихся со случайными изменениями направления вектора скорости. Предложен способ управления ориентацией радиолокационного луча, который максимизирует ширину полосы мониторинга на поверхности земли, обеспечивая при этом на ней максимально возможное разрешение и отсутствие “мертвых зон” слева и справа от направления движения объектов, обычно возникающих при доплеровской селекции движущихся объектов. Создана компьютерная модель, которая позволяет исследовать зависимости вероятностей обнаружения и классификации объектов от скорости их движения при различных сценариях проведения мониторинга путем массового численного эксперимента. Методами моделирования доказаны преимущества предложенного способа по сравнению с традиционными.

DOI: 10.31857/S0002338821050048

**Введение.** Мониторинг земной поверхности часто предполагает необходимость обнаружения и классификации движущихся объектов, например автомобильной техники и кораблей. Для решения такой задачи могут эффективно использоваться барражирующие беспилотные летательные аппараты (БЛА), оборудованные радиолокаторами бокового обзора с синтезом апертуры (РСА) за счет движения БЛА и доплеровской селекции движущихся объектов, которую принято называть селекцией движущихся целей (СДЦ). Однако известные методы использования режима СДЦ предполагают наличие достаточно большой радиальной составляющей вектора скорости движущегося объекта. Это приводит к появлению так называемых “мертвых зон” слева и справа от направления движения объекта, т.е. угловых секторов (часто размером 10–20°), находясь в которых БЛА не может обнаружить объект по доплеровскому сдвигу частоты отраженного излучения.

**1. Постановка задачи.** В статье ставится задача разработки метода решения этой проблемы. Необходимо подтвердить его работоспособность путем математического моделирования процессов поиска—обнаружения—классификации движущихся объектов на барражирующем БЛА с РСА.

При этом должны использоваться следующие свойства современных РСА [1–4]:

антенная система, представляющая собой фазированную антенную решетку (ФАР), обеспечивает возможность безынерционного изменения направления приемопередающего луча в угловом конусе более  $\pm 20^\circ$ ;

РСА способна работать в телескопическом (прожекторном) режиме, при котором диаграмма направленности (ДН) непрерывно следит за заданной на поверхности земли зоной обзора в течение назначенного времени синтезирования  $T_c$  и некогерентных накоплений  $N_n$ -кадров, формируя радиолокационное изображение (РЛИ) с самым высоким по сравнению с другими режимами разрешением;

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-08-00949-а в части обнаружений и № 19-29-06077-мк в части классификации).

протяженность и ширина зоны обзора определяются ДН, ее угловым положением и дальностью до середины зоны обзора;

РСА для БЛА обычно функционируют в диапазоне высот от 1 до 10 км при скоростях полета до 300 км/ч;

при габаритах реальной антенны  $0.55 \times 0.35 \times 0.3$  м ее масса не превышает 50 кг.

**2. Моделируемые процессы и основные соотношения.** Решается задача поиска движущихся объектов в максимально широкой полосе мониторинга на подстилающей поверхности (ПП) при неизвестных изменяющихся ориентациях векторов скоростей объектов. При этом в РСА используется прожекторный режим (*StaringSpotLight* [5]), позволяющий получать РЛИ с максимальным разрешением путем последовательного формирования зон обзора на полосе мониторинга, которая параллельна направлению полета БЛА с боковым смещением  $L$ , т.е. расположена на горизонтальной дальности  $L$  от маршрута полета. Конфигурация каждой зоны обзора определяется формой ДН и представляет собой прямоугольник, вытянутый вдоль радиолокационного луча (РЛ) на горизонтальной дальности от носителя  $L^+$  при отклонении луча на небольшой угол вперед от перпендикуляра к вектору скорости БЛА и  $L^-$  при отклонении назад на тот же угол. Отклонения вперед и назад в предлагаемой системе обеспечивает облучение объектов в двух ракурсах и применяется для того, чтобы гарантировать возможность формирования ненулевой радиальной составляющей вектора скорости объекта, движущегося с неизвестной ориентацией вектора скорости. Такая составляющая позволяет эффективно использовать СДЦ с синтезированием апертуры (СА) в пределах зон обзора для обнаружения объекта при отклонении РЛ вперед или назад и допускает классификацию объекта соответствующую разрешающей способности на ПП  $\delta l$  при СА. При этом азимутальный угол отклонения луча  $\theta^+$  соответствует дальности до середины зоны обзора  $L^+$  при отклонении луча вперед, а угол  $\theta^-$  соответствует дальности  $L^-$  при отклонении назад, причем  $L^+ \approx L^-$ . Углы  $\theta^+$  и  $\theta^-$  отсчитываются от направления вектора скорости ЛА.

Ширина полосы мониторинга определяется по очевидной формуле при укладывании на ПП под углом  $\theta^+$  зон обзора в один ряд (геометрически похоже на одну паркетную полосу с паркетинами, уложенными под углом  $\theta^+$  к полосе, а каждая паркетина имитирует одну зону обзора):

$$\Delta L = \frac{\Delta\theta_{\text{верт}}^{\text{ДН}} R^+ \sin \theta^+}{\sin \varphi_n}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta\theta_{\text{верт}}^{\text{ДН}} = 2\lambda/d_{\text{верт}}$  – угловой размер главного лепестка ДН в вертикальной плоскости ( $\lambda$  – длина волны,  $d_{\text{верт}}$  – вертикальный размер реальной антенны);  $R^+$  – наклонная дальность, соответствующая величине  $L^+$ ;  $\varphi_n$  – угол наклона ДН.

Например, при высоте полета  $H = 10000$  м ширина полосы мониторинга при боковом смещении БЛА от ее середины  $L = 50000$  м составляет в соответствии с (2.1)  $\Delta L = 25000$  м, если вертикальный размер антенны  $d_{\text{верт}} = 0.35$  м. При этом  $R^+ = 60000$  м,  $\theta^+ = 56^\circ$ . Плотное укладывание на земле зон обзора соответствует скорости БЛА  $V = 650$  м/с, если горизонтальный размер антенны  $d_{\text{гор}} = 0.55$  м, время синтезирования  $T_c = 3$  с, число некогерентных накоплений кадров  $N_n = 3$ .

Очевидно, что с уменьшением дальности  $L$  при неизменных  $R^+ \approx R^- \approx R$  ширина полосы мониторинга  $\Delta L$  и разрешения  $\delta l$  при укладывании зон обзора в один ряд будут уменьшаться.

**2.1. Разрешающая способность.** Разрешающая способность, определяющая возможность классификации объектов, рассчитывается по формулам:

$$\delta l = \frac{\lambda R^+}{2VT_c \sin \theta^+ \cos \varphi_n} \quad \text{или} \quad \delta l = \frac{\lambda R^-}{2VT_c \sin \theta^- \cos \varphi_n} \quad (2.2)$$

и, следовательно, улучшается при увеличении скорости полета БЛА за счет увеличения базы синтезирования  $VT_c$ . Время синтезирования  $T_c$  при размещении РЛС на БЛА не рекомендуется увеличивать более 3 с из-за нестабильностей движения БЛА в воздухе.

2.2. Вероятность обнаружения объекта. Вероятность обнаружения объекта при отраженном излучении со случайными амплитудой и начальной фазой вычисляется как [3]

$$P_{\text{обн}} = P_{\text{л.т}}^{\frac{1}{1+q\sqrt{N_n}}},$$

где  $q$  – отношение сигнал/шум,  $N_n$  – число некогерентно накапливаемых кадров РЛИ,  $P_{\text{л.т}}$  – вероятность ложных тревог.

Выражение для  $1/q$  в соответствии с [1, 2, 6] можно представить в виде трех слагаемых:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{\text{внутр}}} + v \frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_{\text{об}}} + vU, \quad (2.3)$$

где  $vU$  – слагаемое, учитывающее влияние организованной шумовой помехи;  $q_{\text{внутр}}$  – отношение сигнал/шум из-за внутренних (тепловых) шумов РСА [1, 2]:

$$q_{\text{внутр}} = \frac{P_{\text{ср}} T_{\text{с}} G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{об}}}{(4\pi)^3 k T F_{\text{ш}} \alpha_n R^4};$$

$\sigma_{\text{об}}$  – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) объекта;  $\sigma_{\phi} = \sigma_{\text{о.п}} \delta l^2 / \cos \varphi_n$  – ЭПР фона в элементе разрешения;  $\sigma_{\text{о.п}}$  – удельная ЭПР поверхности, на которой наблюдается объект;  $v$  – коэффициент, учитывающий смещение спектра объекта при СДЦ в область, соответствующую боковой лепестку ДН (при неподвижных объектах в главном лепестке  $v = 1$ );  $P_{\text{ср}}$  – средняя мощность излучения;  $T_{\text{с}}$  – время синтезирования;  $G$  – коэффициент усиления антенны локатора;  $\lambda = 3$  см – длина волны излучения;  $k T F_{\text{ш}} = 10^{-20}$  Вт/Гц – спектральная плотность мощности внутреннего шума;  $\alpha_n$  – коэффициент потерь;  $R$  – наклонная дальность до объекта.

Величину  $U$  можно рассчитывать по формуле

$$U = \frac{4\pi \psi_{\text{п.п}} \alpha_{\text{п.п}} R^2}{T_{\text{с}} P_{\text{ср}} \sigma_{\text{об}}},$$

где  $\psi_{\text{п.п}}$  – спектральная плотность шумовой помехи на выходе антенны постановщика помех ( $\psi_{\text{п.п}} = G_{\text{п.п}} P_{\text{п.п}} / \Delta f_{\text{п.п}}$ , где  $G_{\text{п.п}}$ ,  $P_{\text{п.п}}$  и  $\Delta f_{\text{п.п}}$  – коэффициент усиления антенны, мощность и полоса частот излучения постановщика помех).

Уровень боковых лепестков в соответствии с [6] составляет  $-46 \dots -60$  дБ, т.е. максимальное значение коэффициента  $v$  в боковых лепестках равно 0.000025. Тогда, даже при больших значениях  $\sigma_{\text{о.п}}$  и  $\delta l$  ( $\sigma_{\text{о.п}} = -14$  дБ,  $\delta l = 4$  м) и малых ЭПР объекта ( $\sigma_{\text{об}} = 0.3$  м<sup>2</sup>), второе слагаемое в выражении (2.3) в 100 раз меньше первого. Поэтому при СДЦ не надо учитывать фоновые шумы, т.е. второе слагаемое в (2.3) [2].

Поскольку выражение (2.3) оценивает отношение сигнал/шум, приведенное к одному элементу разрешения (одному пикселю РЛИ), то для оценки вероятности обнаружения объекта необходимо сформировать воспринимаемое отношение сигнал/шум  $q_{\text{об}}$  с учетом пространственного накопления информации об образе объекта, состоящего из нескольких пикселей. В соответствии с [7] величину  $q$  надо увеличить в  $K$  раз. Коэффициент  $K$  рассчитывается следующим образом:

$$K = \frac{11}{1 + \frac{10}{(xlzr)^{1.2}}}, \quad xl = \begin{cases} l_{\text{об}}/\delta l, & \text{если } \delta l < l_{\text{об}}; \\ 1, & \text{если } \delta l \geq l_{\text{об}}; \end{cases} \quad zr = \begin{cases} w_{\text{об}}/r, & \text{если } r < w_{\text{об}}; \\ 1, & \text{если } r \geq w_{\text{об}}; \end{cases}$$

где  $\delta l$  – разрешение по азимуту, которое определяется по формулам (2.2);  $l_{\text{об}}$  и  $w_{\text{об}}$  – длина и ширина объекта;  $r$  – разрешение по горизонтальной дальности (в метрах).

2.3. Условие возможности применения СДЦ. Используемое в модели условие возможности применения СДЦ для переднего луча имеет вид

$$\left| \frac{\sin \theta^+}{\cos(\varphi - \theta^+)} \right| < \left| \frac{V_{\text{об}} d_{\text{гор}}}{\lambda V} \right|, \quad (2.4)$$

где  $\varphi$  – угол ориентации вектора скорости цели (отсчитывается от направления полета);  $V_{\text{об}}$  – скорость объекта;  $d_{\text{гор}}$  – горизонтальный размер реальной антенны.

Для заднего луча необходимо в (2.4) заменить  $\theta^+$  на  $\theta^-$ .

Формула (2.4) является следствием того, что радиальная составляющая скорости цели не должна попасть в диапазон скоростей сближения с точками на земле, которые находятся в пределах главного лепестка ДН и используются при синтезировании для их пространственного разрешения. Поэтому модуль радиальной составляющей  $|V_{об} \cos(\varphi - \theta^+)|$  должен быть больше, чем  $\Delta\theta_0 |V \sin \theta^+|$ , где  $\Delta\theta_0 = \lambda/d_{гор}$  – угловое отклонение первого нуля в ДН от ее середины (т.е. полная ширина главного лепестка  $\Delta\theta_{ДН} = 2\Delta\theta_0$ ).

2.4. Условие попадания в зону обзора. Условием попадания в зону обзора (при отклонении луча вперед) для  $i$ -го объекта в связанной с БЛА системе координат является выполнение четырех неравенств:

$$\left(L^+ - \frac{\Delta L^+}{2}\right) \sin \theta^+ < z_{об i} < \left(L^+ + \frac{\Delta L^+}{2}\right) \sin \theta^+, \quad (2.5)$$

$$\frac{z_{об i}}{\operatorname{tg} \theta^+} - \frac{\Delta g}{2 \sin \theta^+} < x_{об i} < \frac{z_{об i}}{\operatorname{tg} \theta^+} + \frac{\Delta g}{2 \sin \theta^+}, \quad (2.6)$$

если цель справа и ось  $z$  ориентирована направо, т.е. работает ФАР правого борта. Если же работает ФАР левого борта (цель слева), а ось  $z$  ориентирована направо, то в (2.5) и (2.6) надо все “<” заменить на “>”. Здесь  $\Delta L^+$  и  $\Delta g$  – протяженность зоны обзора на ПП вдоль и поперек луча;  $x_{об i}$ ,  $z_{об i}$  – продольная и поперечная текущие координаты  $i$ -го объекта;  $L^+ = L/\sin \theta^+$  – горизонтальная дальность (в плоскости  $(x, z)$ ) до середины зоны обзора.

Выражения (2.5) и (2.6) получены с помощью простых геометрических построений. Величины  $\Delta L^+$  и  $\Delta g$  соответствуют наиболее информативной области главного лепестка ДН реальной антенны. При отклонении луча назад ( $\theta^- > 90^\circ$ ) в (2.5) и (2.6) необходимо заменить  $\theta^+$  на  $\theta^-$ .

2.5. О р г а н и з а ц и я п о и с к а. Организация поиска имеет два отличия от известных.

1. При каждом азимутальном угле отклонения ( $\theta^+$  или  $\theta^-$ ) на ПП укладываются три, а не одна, полоса, путем последовательного формирования трех зон обзора на разных, но согласованных, дальностях  $L^+$  со значительным перекрытием (рис. 1). Параметр  $\Delta g$  соответствует ширине ДН на уровне 0.8 главного лепестка, которая равна  $\Delta\theta_{азим} \approx \Delta\theta_0$ .

2. Доплеровская селекция осуществляется как при отклонении луча вперед (угол  $\theta^+$ ), так и при его отклонении назад (угол  $\theta^-$ ), причем  $\theta^- = 180^\circ - \theta^+$ . Это позволяет формировать на круговой диаграмме направлений движения объектов непересекающиеся сектора углов  $\varphi$ , в которых СДЦ перестает работать, т.е. приводит к исчезновению “мертвых зон”. Причем выбор угла  $\theta^+ \approx 72^\circ$  не приводит к существенному увеличению дальностей  $L^+$  и  $L^-$  по сравнению с минимальной дальностью  $L$ , т.е. не наблюдается значительного уменьшения вероятностей обнаружения объектов при синтезировании апертуры из-за замены бокового обзора двумя полубоковыми. Зато движущиеся объекты, не обнаруженные в трех передних зонах обзора, обнаруживаются в трех задних, которые последовательно формируются при отклонении луча назад в направлении  $\theta^-$ .

В результате на каждом периоде сканирования формируются шесть зон обзора с когерентным и некогерентным накоплением сигнала. Величина такого периода

$$T_{скан} = 2(3N_n T_c + \Delta T), \quad (2.7)$$

где  $\Delta T$  – время переброса луча из направления  $\theta^+$  в  $\theta^-$  или из  $\theta^-$  в  $\theta^+$ ;  $N_n$  – число некогерентных накоплений при формировании одной зоны обзора;  $T_c$  – время синтезирования антенны. Выбор  $N_n$  и  $T_c$  являлся одной из задач моделирования.

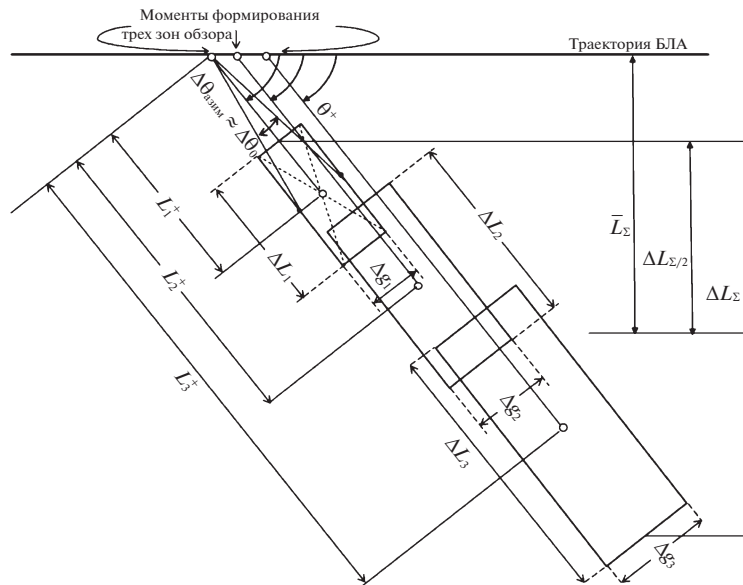


Рис. 1. Зоны обзора, формируемые передним лучом

Таким образом, в статье предложен способ поиска объектов, который будем называть двухкурсовой СДЦ, на основе зондирования поверхности земли в двух направлениях, симметричных относительно перпендикуляра к вектору скорости ЛА. Способ позволяет использовать преимущества синтезированной апертуры при выделении целей, движущихся в любом направлении (без “мертвых зон” в боковых секторах относительно вектора скорости цели).

2.6. К л а с с и ф и к а ц и я н а з е м н ы х о б ъ е к т о в. Классификация наземных объектов на три типа автотранспорта (легкового, грузового и длинномерного) производится путем оценки максимального размера их РЛИ, который соответствует длине объекта. Здесь  $l$  – истинная, но не известная в реальности длина объекта,  $\tilde{l}$  – измеренная. Автоматическая классификация проводится и возможна, если разрешение по азимуту меньше 3.2 м [5]. Результат измерения длины по изображению при пиксельном дискрете  $\delta l$  возможен в диапазоне  $l - \delta l < \tilde{l} < l + \delta l$  и является модулем разности измерений пиксельных координат переднего и заднего краев объекта, определяемых с ошибками  $\zeta_{\text{пер}}$  и  $\zeta_{\text{зад}}$ , которые являются независимыми случайными величинами, распределенными по равномерному закону в диапазоне от  $-\delta l/2 < \zeta < +\delta l/2$ . Тогда функция плотности вероятности случайной величины  $\tilde{l}$  имеет вид равнобедренного треугольника с основанием  $2\delta l$  и высотой  $1/\delta l$ , который расположен симметрично относительно точки  $\tilde{l} = l$  на оси  $\tilde{l}$ . При классификации в реальности сравнивается результат измерения  $\tilde{l}$  с рубежом  $r$ , т.е. определяется  $\tilde{l} < r$  или  $\tilde{l} > r$ . При моделировании такой классификации рассчитываем, с какой вероятностью результат измерения  $\tilde{l}$  будет меньше  $r$ , т.е. интересуемся только событием  $\tilde{l} < r$ , так как предполагаем, что  $\tilde{l} < r$  и  $\tilde{l} > r$  являются гипотезами (образуют полную группу несовместных событий).

П р и м е ч а н и е. Такой подход позволяет провести однозначную классификацию и в случае нескольких рубежей, если между ними расстояние больше, чем  $2\delta l$ . Если же меньше, чем  $2\delta l$ , то необходимо при моделировании интересоваться больше, чем одним событием (например, определять вероятности событий  $\tilde{l} < r_1$  и  $\tilde{l} < r_2$  в результате одного измерения).

Если при моделировании задана длина объекта  $l$  и рассчитано разрешение  $\delta l$ , то при известном рубеже  $r$  по длине объекта, который разделяет классы объектов (1 и 2), можно определить, с какой вероятностью обнаруженный объект будет отнесен к первому и второму типам по результату измерения  $\tilde{l}$ . Для этого достаточно рассчитать площади под функцией плотности вероятности

сти случайной величины  $\tilde{l}$  до и после рубежа  $r$ . Вероятность того, что обнаруженный объект относится к типу, имеющему меньшую длину, может быть рассчитана следующим образом:

$$P_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } r < l - \delta l, \\ \frac{(r - (l - \delta l))^2}{2(\delta l)^2}, & \text{если } l - \delta l < r < l, \\ 1 - \frac{(r - (l + \delta l))^2}{2(\delta l)^2}, & \text{если } l < r < l + \delta l, \\ 1, & \text{если } r > l + \delta l. \end{cases}$$

Используя эти выражения, моделировалась классификация автотранспорта с целью определения типов автомобилей (легковой, грузовой, длинномерный), имея в виду рубежи для отличия по длине легкового от грузового равным  $r = 6$  м, а грузового от длинномерного равным  $r = 12$  м.

Для оценки статистических характеристик результатов применения двухкурсовой СДЦ при мониторинге полосы на поверхности земли был разработан метод моделирования. Этот метод позволяет формировать зависимости статистических оценок вероятностей обнаружения объектов и их классификации от модуля скорости при движении объектов со случайно изменяющейся ориентацией вектора скорости для случаев доплеровской селекции одиночных объектов и колонн автотранспорта при различных параметрах РСА, наземных объектов, кинематики БЛА и организованных помех.

**3. Результаты моделирования.** При выборе времени синтезирования  $T_c$  и числа некогерентных накоплений  $N_n$  сравнивались дальности обнаружения для различных комбинаций величин  $T_c$  и  $N_n$ . Учитывая сочетание малого  $T_{\text{скан}}$  (2.7) и получаемых при этом достаточно больших дальностей обнаружения автотранспорта, были выбраны параметры накопления сигнала  $T_c = 1.7$  с,  $N_n = 1$ ,  $\Delta T = 1$  с, т.е. в каждой зоне обзора изображение формируется в результате одного акта когерентного накопления при времени синтезирования апертуры 1.7 с. Тогда период сканирования (период формирования всех шести зон обзора в процессе мониторинга полосы на ПП) составляет  $T_{\text{скан}} = 12.2$  с. При этом формируются достаточно большие перекрытия зон обзора, которые позволяют использовать для обнаружения колонны (длиной до 0.5 км) результат однократного синтезирования апертуры за время  $T_c = 1.7$  с без слияния изображений на смежных зонах обзора. Вероятности обнаружения и удовлетворения требований по разрешению на колонне оценивались методами моделирования при различных скоростях движения объектов.

Получение адекватных реальности статистических оценок вероятностей обнаружений и классификаций при моделировании возможно, если будут правильно выбраны независимые случайные воздействия при повторении опыта (т.е. последовательного формирования зон обзора в процессе полета, одновременного с движением объектов и розыгрышем расчетных вероятностей обнаружений). В нашем случае такими воздействиями являются начальные условия для имитации движения колонны объектов, отклонения от математических ожиданий случайных величин, сравниваемых при розыгрыше с расчетными вероятностями, и направления движений колонны. В связи с этим в модели генерируются независимые случайные величины, формирующие начальную координату колонны и числа  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$  ( $N$  – число объектов в колонне) для розыгрыша расчетных вероятностей обнаружения и классификации каждого объекта. Статистики формируются в результате множества полетов БЛА и одновременного движения колонны со скоростью  $V_{об}$  под разными углами  $\varphi$  из-за извилистости дорог.

При моделировании ширина полосы мониторинга составляла  $\Delta L_z = 12346.8$  м, а ее середина смещена на горизонтальную дальность  $\bar{L}_z = 19578$  м от проекции на ПП траектории полета. Скорость  $V_{об}$  варьировалась в диапазоне 4–20 м/с (14.4–72 км/ч). БЛА барражирует, формируя последовательно на поверхности земли две полосы мониторинга на выбранном участке местности. В пределах каждой полосы движется колонна автотранспорта. В результате периода барражирования производится обнаружение и классификация объектов для случаев полета БЛА приблизительно в том же и противоположном направлениях по сравнению с направлением движения колонн. Траектории движения колонн соответствуют сильно извилистым грунтовым дорогам на выбранном реальном участке местности, что приводит на многих периодах полета к разбросу углов ориентации векторов скоростей объектов  $\varphi$  в диапазонах  $\pm 80^\circ$  и  $\pm 170^\circ$  при полете вперед и назад соответственно. В результате моделирования формируются статистические оценки

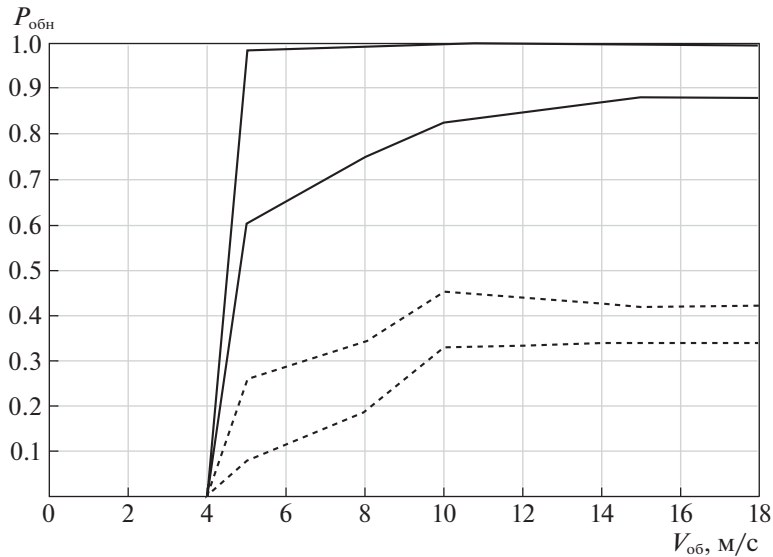


Рис. 2. Области вероятностей обнаружения объекта

вероятностей  $P_{обн}$  обнаружений колонны для различных модулей скоростей объектов  $V_{об}$  при случайных направлениях движения (т.е. углах  $\varphi$ ). Построение графиков зависимостей оценок вероятностей от модуля скорости объектов позволяет определить основную характеристику двухкурсной СДЦ, а именно ее чувствительность по величине выделяемой скорости объектов и зависимость этой чувствительности от различных факторов.

Поиск объектов проводится по РЛИ зон обзора, каждая из которых формируется за время  $T_c = 1.7$  с. Поэтому человек-оператор не в состоянии успевать анализировать последовательность РЛИ. Необходимо использовать для обнаружения автоматическое выделение объектов в результате СДЦ и оценку их максимального размера на изображении (и, следовательно, их длины) для проведения классификации. Задачей оператора при этом является контроль работы автоматической СДЦ по предъявляемым оператору фрагментам РЛИ и нажатием кнопки “отмена” исключение из РЛИ неправильных меток, возникающих из-за ложных срабатываний автоматической СДЦ.

Для проведения моделирования был выбран равнинный участок местности (на левом берегу реки Хабур) протяженностью 70 км, содержащий извилистые грунтовые дороги, пригодные для движения автотранспорта. При этом предполагалась возможность установки на одном из объектов в составе колонны помеховой станции, которая способна создавать шумовую помеху в сантиметровом диапазоне длин волн мощностью  $P_{п.п} = 250$  Вт при энергопотреблении менее 1 кВт. Методами моделирования решалась задача определения коэффициента усиления антенны помеховой станции  $G_{п.п}$ , при котором вероятность обнаружения объекта, движущегося со скоростью более 6 м/с, станет приблизительно в 2 раза меньше, чем при отсутствии помех. Знание коэффициента  $G_{п.п}$  позволяет найти ширину диаграммы направленности антенны и, следовательно, решить вопрос о необходимости применения системы наведения помехового луча на БЛА. Последнее связано со значительным усложнением постановщика помех и его появление на автотранспорте маловероятно. На каждом периоде сканирования моделировались процессы автоматического обнаружения объектов и их классификации, т.е. принятие решений о принадлежности обнаруженного объекта к легковому, грузовому или длинномерному типу автотранспорта. Кроме того, моделировалось обнаружение колонны, под которым понималось обнаружение хотя бы четырех едущих друг за другом автомобилей в составе колонны, состоящей из 10 объектов. Для снижения более чем в 2 раза вероятностей обнаружений потребовался коэффициент усиления антенны станции помех  $G_{п.п} = 30$ , которому соответствует ширина диаграммы направленности, равная  $40^\circ$  при параболической антенне.

На рис. 2–4 представлены некоторые результаты моделирования в виде зависимостей оценок вероятностей обнаружения  $P_{обн}$  и классификации  $P_{класс}$  от модуля скорости движения объектов  $V_{об}$  с изменяющейся ориентацией вектора скорости при движении объектов для случаев наличия

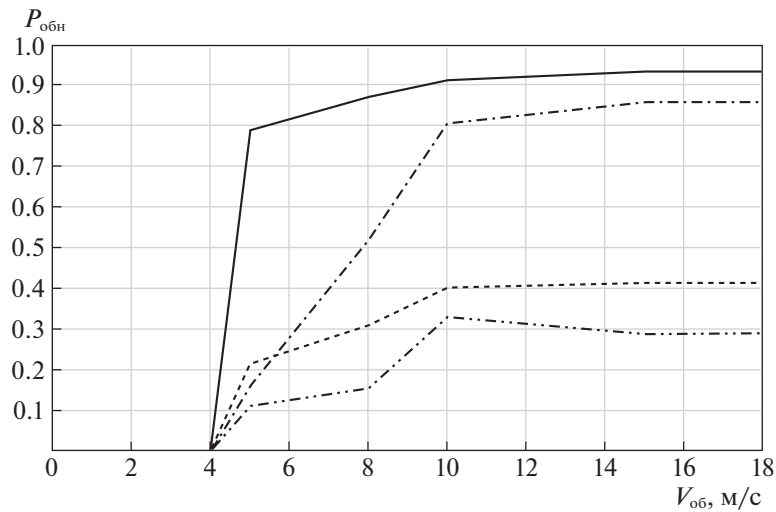


Рис. 3. Результаты обнаружений объектов

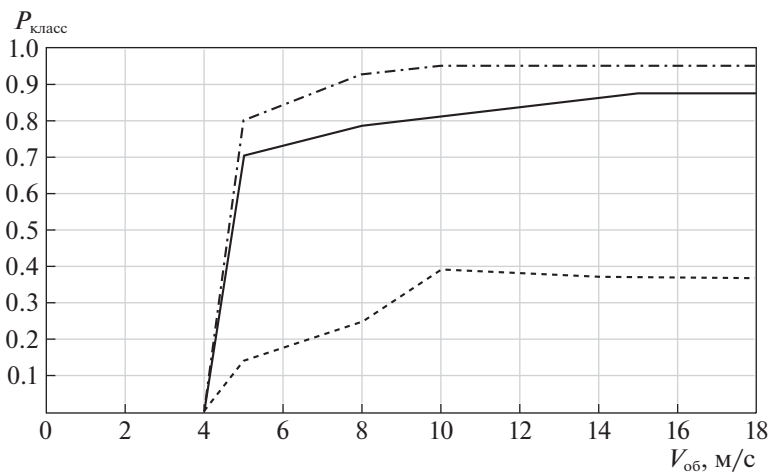


Рис. 4. Результаты классификаций объектов

и отсутствия организованной помехи. Графики на рисунках построены для варианта, когда  $V = 80$  м/с,  $H = 8$  км,  $P = 50$  Вт,  $P_{л.т} = 10^{-7}$ ,  $G = 2000$ ,  $\alpha_{п} = 30$  дБ,  $P_{п.п} = 250$  Вт,  $G_{п.п} = 30$ .

На рис. 2 изображены области, в которые попадали вероятности обнаружения объектов двухракурсной СДЦ при различных траекториях их движения (сплошные линии ограничивают область при отсутствии помех, а пунктирные — при помехах).

На рис. 3 представлены вероятности обнаружения объекта, движущегося в составе колонны по извилистой траектории для случаев применения двухракурсной и одноракурсной (традиционной) СДЦ (сплошная соответствует двухракурсной СДЦ без помех, пунктирная построена при помехах; штрихпунктир соответствует одноракурсной СДЦ без помех, двойной штрихпунктир построен при помехах для одноракурсной СДЦ).

На рис. 4 приведены вероятности классификации, т.е. правильного принятия решения о типе объекта и об обнаружении колонны (сплошная соответствует двухракурсной СДЦ при классификации объектов без помех, пунктирная — при помехах; штрихпунктирная соответствует обнаружению колонны двухракурсной СДЦ без помех).

Эти графики демонстрируют преимущества применения двухракурсной СДЦ по сравнению с одноракурсной при траектории движения объектов, которая соответствует извилистости одной из реальных грунтовых дорог на левобережье реки Хабур. Из графиков на этих рисунках следует,



что в отсутствие организованных помех при объектах с ЭПР  $5 \text{ м}^2$ , движущихся со скоростью  $5 \text{ м/с}$ , вероятность обнаружения объекта равна  $0.8$  при двухракурсной СДЦ и  $0.15$  при однокурсной. При этом двухракурсная СДЦ позволяет правильно проводить классификацию объектов с вероятностью  $0.7$  и обнаруживать колонны автотранспорта с вероятностью более  $0.8$ . При обнаружении объекта и колонны, движущихся со скоростью более  $10\text{--}11 \text{ м/с}$  ( $36\text{--}40 \text{ км/ч}$ ) двухракурсная СДЦ при отсутствии помех обеспечивает вероятность обнаружения более  $0.9$  и классификации более  $0.8$ . Традиционная однокурсная СДЦ в моделируемых условиях не позволяет иметь вероятность обнаружения объекта, движущегося со скоростью  $10 \text{ м/с}$ , более  $0.8$ . Таким образом, двухракурсная СДЦ позволяет обнаруживать с вероятностью  $0.8$  объекты, движущиеся со скоростью  $5 \text{ м/с}$ , а однокурсная – при скорости  $10 \text{ м/с}$ .

При постановке организованных помех в сантиметровом диапазоне длин волн все вероятности не превышают значение  $0.5$ . Однако организация такой помехи на автомобильном транспорте маловероятна из-за необходимости применения системы наведения помехового луча на БЛА при ограничении на энергопотребление, т.е. невозможности использования слабонаправленных антенн для создания эффективных помех.

**Заключение.** Разработанная компьютерная модель поиска движущихся наземных объектов с помощью РСА позволяет определять вероятности обнаружения и классификации наземных объектов при различных сценариях проведения мониторинга путем массового численного эксперимента. Реализация в модели предложенных алгоритмов организации поиска и оценок вероятностей показали эффективность использования двухракурсной СДЦ и прожекторного режима работы РСА при поиске объектов, движущихся с неизвестной изменяющейся ориентацией вектора скорости по реальным извилистым дорогам. При этом двухракурсная СДЦ позволяет обнаруживать объекты, модуль скорости которых в 2 раза меньше, чем при их обнаружении традиционным однокурсным способом СДЦ.

Применение предлагаемого способа на борту беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов не требует изменений аппаратной части РСА и может быть реализовано путем несложной доработки программ управления лучом и вторичной обработки сигналов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов В.Н., Колтышев Е.Е., Кондратенков Г.С. и др. Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей / Под ред. В.Н. Лепина. М.: Радиотехника, 2014. 296 с.
2. Антипов В.Н., Викентьев А.Ю., Колтышев Е.Е. и др. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
3. Дулевич В.Е., Коростелев А.А., Мельник Ю.А. и др. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
4. Koo V.C., Chan Y.K., Gobi V. Anew Unmanned Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar for Environmental Monitoring // Progress in Electromagnetics Research. 2012. V. 122. P. 245–268.
5. Денисов П.В., Зайцев С.Э., Костюк Е.А. и др. Вопросы дешифрирования радиолокационных снимков при радиовидении // Радиотехника. 2014. № 7. С. 7–14.
6. Бородин А.М., Усков Н.В. Аппаратно-алгоритмическая модель получения и обработки данных от информативной подсистемы бортового интегрального радиоэлектронного комплекса // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. Т. 4. № 10. С. 53–60.
7. Овсянников В.А. Системная оценка и оптимизация несканирующих тепловизионных приборов. Дис. ... докт. техн. наук. Казань, 2008. 387 с.