

УДК 621.396

## Применение беспилотных летательных аппаратов для радиолокационного поиска воздушных и морских судов, потерпевших аварию

Баженов А. В., Гривенная Н. В., Исаев А. М., Мельников С. В.

**Постановка задачи:** человеческая жизнь бесценна и когда при аварии воздушных и морских судов люди гибнут не в самой катастрофе, а из-за несвоевременного прибытия спасательных команд, это уже двойная трагедия. Поэтому развитию спасательных служб уделяется большое внимание во всех развитых странах. Одним из ключевых направлений совершенствования технического обеспечения спасательных служб является развитие радиотехнических систем, так как они обладают по отношению к оптическим системам такими ключевыми преимуществами, как всепогодность и возможность круглосуточного использования. Применение различных аварийных радиостанций и пеленгационной аппаратуры, размещенной на поисковых самолетах и вертолетах, значительно уменьшает время поиска места аварии, однако ограниченный ресурс источников питания, а иногда и прямой запрет на использование (например, при посадке на территории, занятой противником) определяют актуальность применения пассивных отражателей и радиолокационных поисковых систем. Другой тенденцией развития поисковых систем является использование беспилотной или дистанционно пилотируемой авиации. Использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) позволяет создавать большие группировки поисковых сил и средств, что, в конечном итоге должно привести к уменьшению времени поиска места аварии. **Целью работы** является обоснование возможности применения БЛА для автоматического поиска места аварии воздушных и морских судов, оснащенных сферическими отражателями по отклику на зондирующий радиолокационный сигнал. Предлагается оснащать воздушные и морские суда не отдельными сферическими отражателями, а конструкцией из трех сферических отражателей, выполненных в виде антенной решетки. **Используемые методы:** решение задачи обнаружения и локализации места аварии воздушного или морского судна за счет максимизации вероятности правильного обнаружения решетки пассивных отражателей при заданном уровне ложной тревоги. Повышение вероятности правильного обнаружения объекта относительно известных уголкового отражателя осуществляется за счет использования осциллирующего характера диаграммы обратного рассеяния сферических отражателей и использования двух частот зондирующего сигнала. **Новизна:** элементами новизны представленного решения является размещение двухчастотной поисковой радиолокационной станции (РЛС) на БЛА, а также обоснование использования на борту воздушных и морских судов вместо отдельного сферического отражателя системы из трех отражателей. **Результат:** использование БЛА с радиолокационной станцией для автоматического поиска сферических отражателей обеспечивает обнаружение места аварии с вероятностью правильного обнаружения свыше 0,9. Рассмотрены три альтернативных варианта обнаружения места аварии: традиционный с использованием поискового вертолета; оператором по информации от дистанционно пилотируемого БЛА; автоматического поиска с помощью двухчастотного поискового радиолокатора, размещенного на борту БЛА. Результаты имитационного моделирования показывают выигрыш от применения поискового радиолокатора, размещенного на борту БЛА, от 20 до 40%. **Практическая значимость:** представленное решение предлагается использовать для оснащения аварийных плотов морских судов, а также носимых (бортовых) аварийных запасов воздушных судов для снижения времени поиска экипажей в условиях неисправности аварийных радиостанций или при необходимости соблюдения радиомолчания.

**Ключевые слова:** поиск потерпевших аварию судов, сферический отражатель, эффективная поверхность рассеяния.

### Библиографическая ссылка на статью:

Баженов А. В., Гривенная Н. В., Исаев А. М., Мельников С. В. Применение беспилотных летательных аппаратов для радиолокационного поиска воздушных и морских судов, потерпевших аварию // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 212-230. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10207.

### Reference for citation:

Bazhenov A. V., Grivennaya N. V., Isaev A. M., Melnikov S. V. Application of Unmanned Aerial Vehicles for Radar Search of Aircraft and Ships Affected by an Accident. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 212-230 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10207.

## Введение

Жизнь человека является самой большой ценностью и это все больше проявляется в тенденциях развития современного общества. Существует большое число угроз жизни как отдельных людей, так и целых народов. Среди них особую роль играют технические и техногенные аварии и катастрофы.

Для поиска экипажей воздушных и морских судов, потерпевших аварию, ключевым является не стоимость спасательных работ, а время, в течение которого необходимо найти людей. В некоторых случаях, например, при поиске экипажей, находящихся в холодной воде, спасательная операция должна проходить за считанные часы. В сложных условиях для организации поисковых работ необходимо максимально увеличивать привлекаемую группировку сил и средств, а также максимально автоматизировать процесс поиска для исключения ошибок так называемого человеческого фактора [1]. Поиск аварийных судов не должен прекращаться при ухудшении метеоусловий, в вечернее и ночное время. Реализация этих требования возможна при использовании беспилотных летательных аппаратов (БЛА), оснащенных радиотехнической аппаратурой поиска [2].

Применение систем с пассивным ответом является предпочтительным по отношению к системам с активным ответом по той причине, что авария судна часто сопровождается ударными перегрузками, способными привести к разрушению аварийных радиосистем и их источников электропитания, да и сами источники питания имеют весьма ограниченный ресурс работы. При этом состояние экипажа не всегда позволяет выполнить настроенные операции с аварийным оборудованием. В некоторых случаях (например, при посадке на территории, занятой противником) применение радиомаяков практически невозможно ввиду того, что поисковые службы находятся в худших условиях, чем расположенное непосредственно в зоне поиска наземное пеленгационное оборудование противника.

Радиолокационные станции для поиска мест аварии по характеру отклика на зондирующие сигналы используются достаточно давно (в частности, для поиска морских судов) [2-5]. Однако в настоящее время обнаружение осуществляется по характеру отраженного сигнала, контрастирующего на фоне окружающих объектов (подстилающей поверхности в случае поиска морских судов). При этом превышение порога может дать любой случайный объект, находящийся в луче диаграммы направленности антенны зондирующей РЛС. Таким образом, этот метод не обладает требуемой однозначностью. Нанесение специальных покрытий на фрагменты одежды экипажа или на части планера (корпуса судна) могли бы увеличить степень однозначности, но при аварийном развитии событий трудно предугадать, как будет располагаться участок со специальным покрытием по отношению к источнику радиолокационного сигнала.

Работа в дальнейшем представлена следующим образом. В первом разделе приводятся формулы для расчета эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) отражателей различного вида. А также выполнен вывод аналитических зависимостей для расчета ЭПР системы из трех сферических отражателей. Во втором

разделе производится обоснование показателя эффективности решения задачи поиска судов, потерпевших аварию, в том числе с использованием БЛА. Затем представлены результаты имитационного моделирования.

### 1. Расчет эффективной поверхности рассеяния отражателей различного вида

В [6] предлагается для оснащения аварийных плотов и носимых аварийных запасов использовать металлизированные сферы, обладающие частотной зависимостью характеристики обратного рассеяния. А также оснащать поисковые самолеты и вертолеты двухчастотными поисковыми радиолокационными станциями [7]. На одной из рабочих частот отклик имеет максимальную амплитуду, а на другой прогнозируемо меньшую.

Обоснование характеристик радиолокационного отражателя производится на основе критерия Неймана-Пирсона [8], при этом в качестве параметра обнаружения используется отношение:

$$q = \frac{\sigma_i}{\sigma_\phi}, \quad (1)$$

где  $\sigma_\phi$  – эффективная площадь обратного рассеяния (ЭПР) от участка поверхности Земли, попадающего в луч диаграммы направленности антенны РЛС (площади отражения);  $\sigma_i$  – ЭПР  $i$ -го варианта радиолокационного отражателя.

Вероятность правильного обнаружения  $P_{ПО}$  с учетом параметра (1) примет вид:

$$P_{ПО} = P_{ЛТ}^{\frac{1}{1+q/2}}, \quad (2)$$

где  $P_{ЛТ}$  – заданный уровень ложной тревоги.

Особенностью ЭПР шара для случая  $r_u < \lambda$  является осциллирующий характер, имеющий ряд резонансных максимумов и минимумов (здесь  $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала,  $r_u$  – радиус сферического отражателя). Первый максимум наблюдается при отношении  $\frac{r_u}{\lambda} \approx 0,17$ , при этом значение ЭПР определяется выражением [5]:

$$\sigma_{u \max} = \sigma_0 \left( 1 + 0,905 \frac{\lambda}{2\pi r_u} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\sigma_0 = \pi r_u^2$ .

Ближайший минимум наблюдается при  $\frac{r_u}{\lambda} \approx 0,27$ . В этом случае ЭПР шара будет равна:

$$\sigma_{u \max} = \sigma_0 \left( 1 - 0,905 \frac{\lambda}{2\pi r_u} \right)^2. \quad (4)$$

На рис. 1 показаны графики зависимости ЭПР сферических отражателей разного диаметра для вариантов максимального и минимального отражения.

Результирующий отраженный сигнал создается неизвестным числом объектов, ЭПР которых превышает фоновое значение (блестящих точек) и множеством элементарных отражателей, собственно и создающих фоновое отражение. В большинстве случаев поверхность Земли имеет неровности, покрыта растительностью и в сантиметровом (несколько меньше в дециметровом) диапазоне обладает свойствами диффузного рассеяния радиоволн. Аналогичные выводы можно сделать и для морской поверхности при волнении более 2 баллов. ЭПР диффузно-рассеивающей поверхности  $\sigma_\phi$  можно рассчитать с учетом удельного значения ЭПР  $\sigma_{y\delta}$  (приведенного к площади в  $1 \text{ м}^2$ ) и площади  $S$  отражающего участка [6]:

$$\sigma_\phi = S\sigma_{y\delta}. \quad (5)$$

Результаты сравнительного анализа ЭПР различных фонов в зависимости от ширины ДНА представлены на рис. 2. Как следует из рис. 2 ЭПР фона в ряде случаях сопоставимо с ЭПР сферического отражателя, что уменьшает вероятность правильного обнаружения.

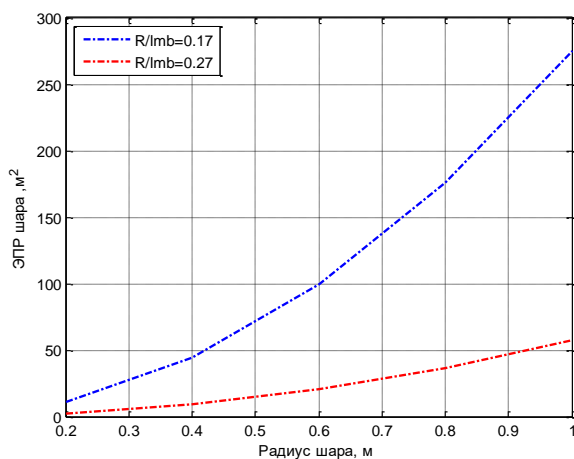


Рис. 1. ЭПР идеального сферического отражателя

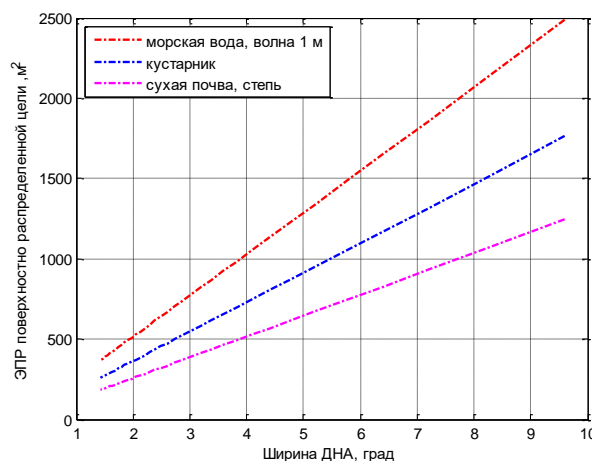


Рис. 2. ЭПР поверхностью распределенных целей (фона)

С целью увеличения вероятности правильного обнаружения радиолокационных отражателей рассмотрим возможность применения сразу нескольких сферических отражателей. Для этого воспользуемся методикой расчета ЭПР антенных решеток [9].

Как известно, для расположенных в ряд  $N$  синфазно возбуждаемых вибраторов суммарная напряженность поля в главном направлении возрастает в  $\sqrt{N}$  раз по сравнению с одиночным излучателем.

Необходимым условием выполнения данного эффекта является то, что расстояние между соседними вибраторами настолько велико, что их взаимным влиянием можно пренебречь.

Для равномерной линейной решетки напряженность поля описывается выражением [2]:

$$\dot{E} = A f_1(\varphi) f_c(\varphi) e^{j\Psi(\varphi)} e^{-jkr},$$

где  $f_1(\varphi)$  – характеристика направленности излучателя;

$$f_c(\varphi) = \frac{\sin\left[\frac{n}{2}(kd_1 \sin \varphi - \psi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(kd_1 \sin \varphi - \psi)\right]}$$
 – множитель системы из  $n$  излучателей, расположенных на расстоянии  $d_1$ ;  $\Psi(\varphi)$  – фазовая характеристика направленности системы;  $A$  – коэффициент, характеризующий амплитуду поля, возбуждающего излучателя;  $k$  – фазовый коэффициент, для вакуума  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Для линейки отражателей коэффициент  $A$  согласно гипотезе о падении на антенную решетку плоской электромагнитной волны принимается равным единице. Фазовые коэффициенты в  $\Psi(\varphi)$  зависят от угла падения и линейных расстояний между отражателями.

В дальней зоне проекции векторов поля на оси сферической системы координат имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{E}_{\Theta} = -ik(Z_c \dot{A}_{\Theta}^{\vartheta} + \dot{A}_{\varphi}^M); \dot{H}_{\varphi} = \frac{\dot{E}_{\Theta}}{Z_c} \\ \dot{E}_{\varphi} = -ik(Z_c \dot{A}_{\varphi}^{\vartheta} + \dot{A}_{\Theta}^M); \dot{H}_{\Theta} = \frac{\dot{E}_{\varphi}}{Z_c} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $Z_c \approx 120\pi$  – характеристическое сопротивление окружающей антенну среды. При этом средний за период вектор Умова-Пойнтинга является действительным и равен:

$$\Pi_1 = \frac{1}{2Z_c} \left( \left| \dot{E}_{\Theta} \right|^2 + \left| \dot{E}_{\varphi} \right|^2 \right) = \frac{1}{2Z_c} \left| \vec{E} \right|^2. \quad (7)$$

С учетом (6) выражение (7) примет вид:

$$\Pi_1 = \frac{k^2 Z_c}{2(4\pi r)^2} f^2(\Theta, \varphi), \quad (8)$$

где  $f^2(\Theta, \varphi) = \left| \vec{f}(\Theta, \varphi) \right|^2$  – диаграмма направленности антенны по мощности.

ЭПР отражающей антенны определяется через отношение плотности потока мощности отраженной и падающей волн  $\Pi_2/\Pi_1$ .

В свою очередь, плотность потока мощности отраженного от антенны сигнала определяется выражением:

$$\Pi_2 = \frac{P_{отр}}{4\pi r^2} S_{эф} f^2(\Theta, \varphi), \quad (9)$$

где  $S_{эф}$  – эффективная площадь антенны;  $P_{отр}$  – мощность отраженного сигнала:

$$P_{отр} = P_{пр} |\Gamma|^2, \quad (10)$$

где  $|\Gamma|^2$  – коэффициент, определяющий отражение от антенной системы объекта поиска падающей на неё энергии.

Мощность, принимаемая антенной:

$$P_{пр} = \Pi_1 D(\Theta, \varphi) = \Pi_1 S_{эф} \frac{4\pi}{\lambda^2} f^2(\Theta, \varphi). \quad (11)$$

С учетом (10) и (11) выражение (9) примет вид:

$$\Pi_2 = \frac{\Pi_1 S_{эф} \frac{4\pi}{\lambda^2} f^2(\Theta, \varphi) |\Gamma|^2}{4\pi r^2} S_{эф} f^2(\Theta, \varphi). \quad (12)$$

Тогда выражение для ЭПР антенны может быть записано следующим образом

$$\sigma(\Theta, \varphi) = 4\pi r^2 \Pi_2 / \Pi_1 = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{эф}^2 f^4(\Theta, \varphi) |\Gamma|^2. \quad (13)$$

Следовательно, диаграмма обратного рассеяния (ДОР), как функция ЭПР от углов  $(\Theta, \varphi)$ , будет определяться диаграммой направленности отражающей антенны, а также взаимным положением источника зондирующего сигнала и отражающей антенны.

При проведении исследований была разработана в среде Matlab математическая модель расчета ДОР на основе представления отражающего объекта однородной плоской антенной решеткой.

На рис. 3 приведены результаты расчета ЭПР прямоугольной решетки сферических отражателей. Расчеты выполнены для сферы радиусом 0,5м и расстоянием между центрами сфер, равном трем радиусам. Длина волны зондирующего сигнала выбрана из соотношения  $\frac{r_{ш}}{\lambda} \approx 0,17$ . Как следует из графиков, использование нескольких сферических отражателей ведет к увеличению максимума ЭПР, который наблюдается при углах зондирования, близких к нормали. При этом происходит сужение диаграммы обратного рассеяния. Что приводит к ухудшению условий поиска.

На основе анализа падения фронта плоской электромагнитной волны были получены основные соотношения, позволяющие выполнить расчет ДОР такой решетки:

$$f(\theta, \varphi) = 3,65\pi a^2 A_n \left[ e^{j\psi_0} + e^{j(\psi_0 + (r \cos \varphi \sin \theta) \frac{2\pi}{\lambda})} + e^{j(\psi_0 + (r \cos(60^\circ + \varphi) \sin \theta) \frac{2\pi}{\lambda})} \right];$$

$$f(\theta, \varphi) = 3,65\pi a^2 A_n e^{j\psi_0} \left[ 1 + e^{j(r \cos \varphi \sin \theta) \frac{2\pi}{\lambda}} + e^{j(r \cos(60^\circ + \varphi) \sin \theta) \frac{2\pi}{\lambda}} \right]. \quad (14)$$

Рассмотрим конструкцию решетки сферических отражателей, размещенных в углах равностороннего треугольника (рис. 4, а, б).

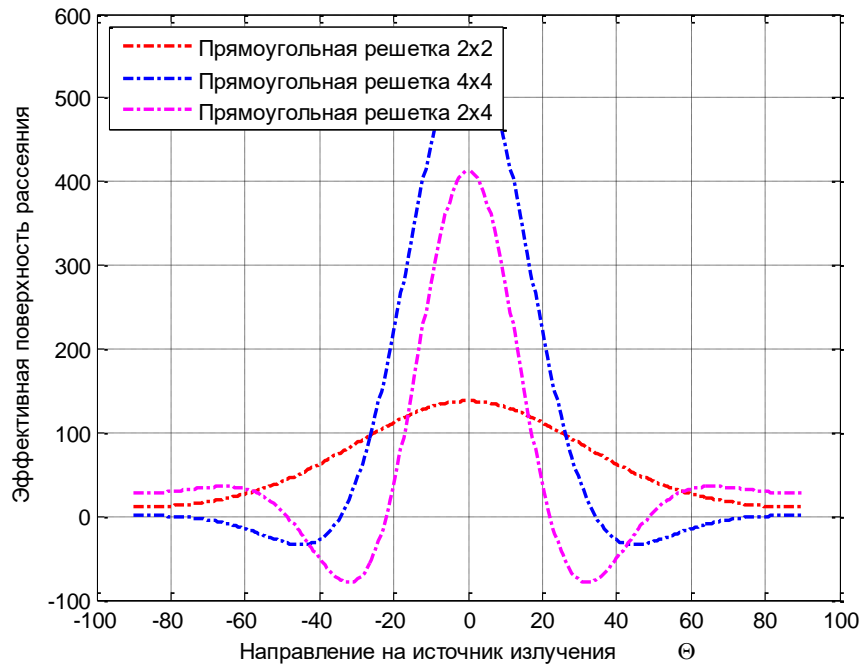


Рис. 3. Диаграммы обратного рассеяния плоских регулярных прямоугольных решеток

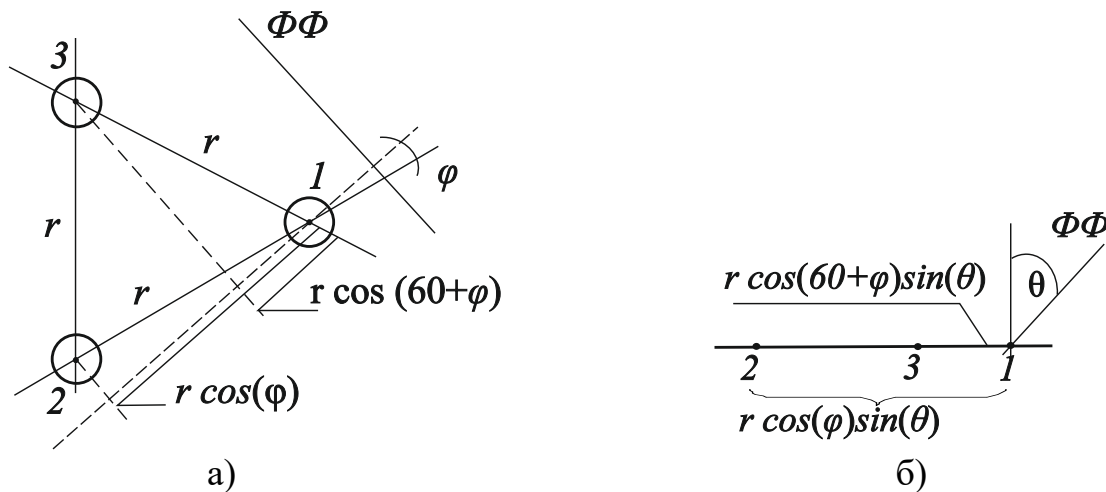


Рис. 4. Решетка из трех сферических отражателей:

- а) прохождение фазового фронта (ΦΦ) с учетом азимута  $\varphi$
- б) прохождение ФФ по решетке с учетом угла места  $\theta$

На рис. 5 показаны сравнительные графики ЭПР одиночного сферического отражателя, прямоугольной решетки сферических отражателей размером 2x2 и решетки из трех отражателей, размещенных в углах равностороннего треугольника.

Как следует из рис. 5 значение ЭПР треугольной решетки больше ЭПР одиночного отражателя более чем в 2 раза практически во всем диапазоне условий наблюдения. Для решетки сферических отражателей сохраняется зна-

чительная зависимость ЭПР от длины волны зондирующего сигнала, что позволяет для резонансного отражения существенно превысить уровень фоновых отражений и сформировать ЭПР, обеспечивающую высокую вероятность правильного обнаружения. На других значениях частоты зондирующего сигнала наблюдается ЭПР на порядок меньше, чем в условиях резонанса. Таким образом, использование двухчастотного поискового радиолокатора и системы из трех сферических отражателей позволяет обнаружить и распознать пассивный ответный сигнал.

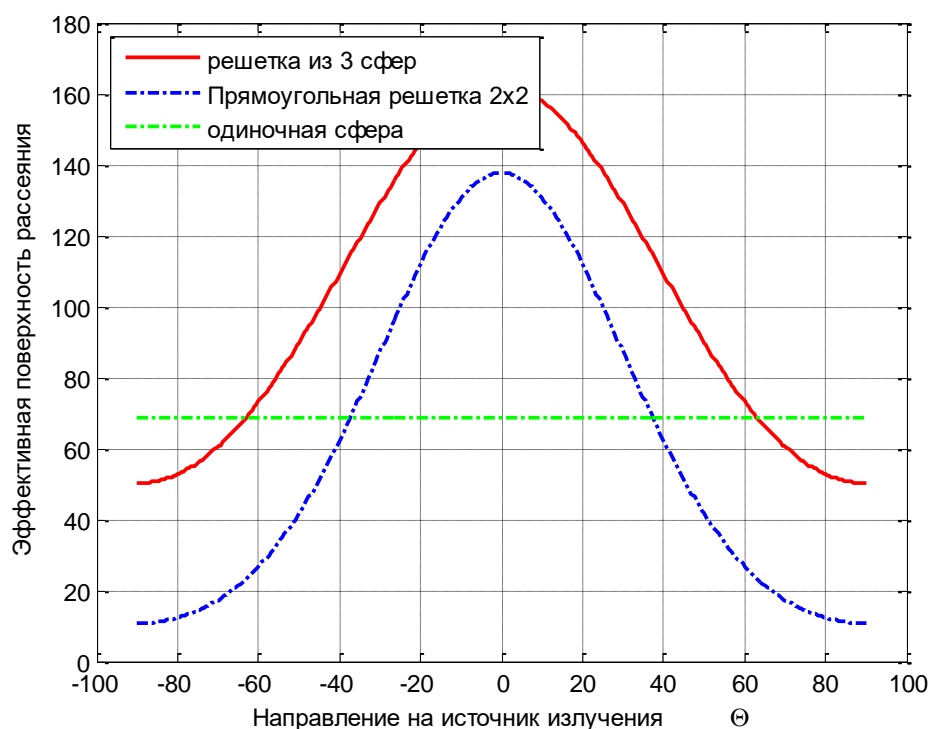


Рис. 5. Сравнительные графики ДОР различных конструкций отражателей

Следует подчеркнуть, что отраженный сигнал на входе поисковой РЛС является суммой вторичного излучения всех отражателей в пределах площади  $S$ . Поэтому для наблюдения малоразмерных целей на фоне отражающей поверхности необходимо путем повышения разрешающей способности станции (уменьшения ширины луча диаграммы направленности антенны и уменьшения длительности импульса зондирующего сигнала) стремиться приблизить значение  $S$  к размерам цели. С другой стороны, уменьшение разрешаемой площади ведет к увеличению времени просмотра всего участка вероятного нахождения судна, потерпевшего аварию, и, как следствие, к увеличению времени спасательной операции.



## 2. Обоснование показателя эффективности решения задачи поиска судов, потерпевших аварию

Для оценки целесообразности размещения поисковой РЛС на БЛА и автоматизированном обнаружении потерпевших аварию судов выполним имитационное моделирование поисковой операции. Рассмотрим три альтернативных варианта: поиск потерпевших аварию судов визуальным оператором по изображению, передаваемому с БЛА; автоматическому обнаружению по отклику от радиолокационного отражателя; визуальному поиску с вертолета.

Определим показатель эффективности в виде вероятности выполнения поставленной задачи, определяемой выражением:

$$W_{\text{вып}} = P_{II} P_{\text{инф}} P_T P_B P_{\text{ПНВ}} P_{\text{вых}} \bar{P}_{\text{обн}}, \quad (15)$$

где  $P_{II}$  – вероятность того, что БЛА (поисковый вертолет) будет исправным в течение всего полета или уровень его исправности не окажет влияния на выполнение поставленной задачи (вероятность безотказной работы);  $P_{\text{инф}} = 1$  – вероятность информационного обмена с пунктом наведения в процессе осуществления полета к месту выполнения поставленной задачи. При полностью автономном полете  $P_{\text{инф}} = 1$ ;  $P_T = 1$  – вероятность своевременного выполнения операций управления БЛА оператором (в автоматическом режиме  $P_T = 1$ ) или вероятность своевременного обнаружения экипажем поискового вертолета места аварии;  $P_B$  – вероятность безошибочного выполнения оператором операций управления БЛА (в автоматическом режиме  $P_B = 1$ );  $P_{\text{ПНВ}} = 1$  – вероятность преодоления неблагоприятных воздействий в исполнительной зоне и при подлете к ней. По аналогии с БЛА военного назначения, где это вероятность преодоления ПВО противника,  $P_{\text{ПНВ}} = 1$  учитывает снижение производительности оборудования от воздействия совокупности неблагоприятных факторов в зависимости от времени выполнения поставленной задачи;  $P_{\text{вых}} = 1$  – вероятность выхода в заданную точку (на заданную линию пути), с ошибкой, не превышающей заданное значение;  $\bar{P}_{\text{обн}}$  – условная вероятность выполнения поставленной задачи (обнаружения места аварии), при условии своевременного и безошибочного попадания в зону её выполнения.

При применении технических средств, позволяющих обрабатывать информацию непосредственно на борту БЛА объем информации, передаваемой наземному пункту управления, существенно уменьшается.

Поиск объекта в заданной исполнительной зоне осуществляется посредством последовательного просмотра пространственной зоны [10], имеющей размеры (по ширине и в глубину), значительно превышающие мгновенную область обзора бортовой аппаратуры (рис. 6, а). Задача навигационного оборудования заключается в построении траектории, исключающей пропуск участка местности мгновенной зоной обзора оборудования. Ограничения на время выполнения задачи с использованием БЛА обычно связаны с ресурсом энергетической установки [11]. Возврат в точку вылета обычно производится по крат-

чайшей траектории. В ходе поиска возможна ситуация, когда объекта в исполнительной зоне нет.

Исполнительная зона может иметь не только прямоугольную форму. На рис. 6, б показан вариант поиска объекта в угловом секторе.

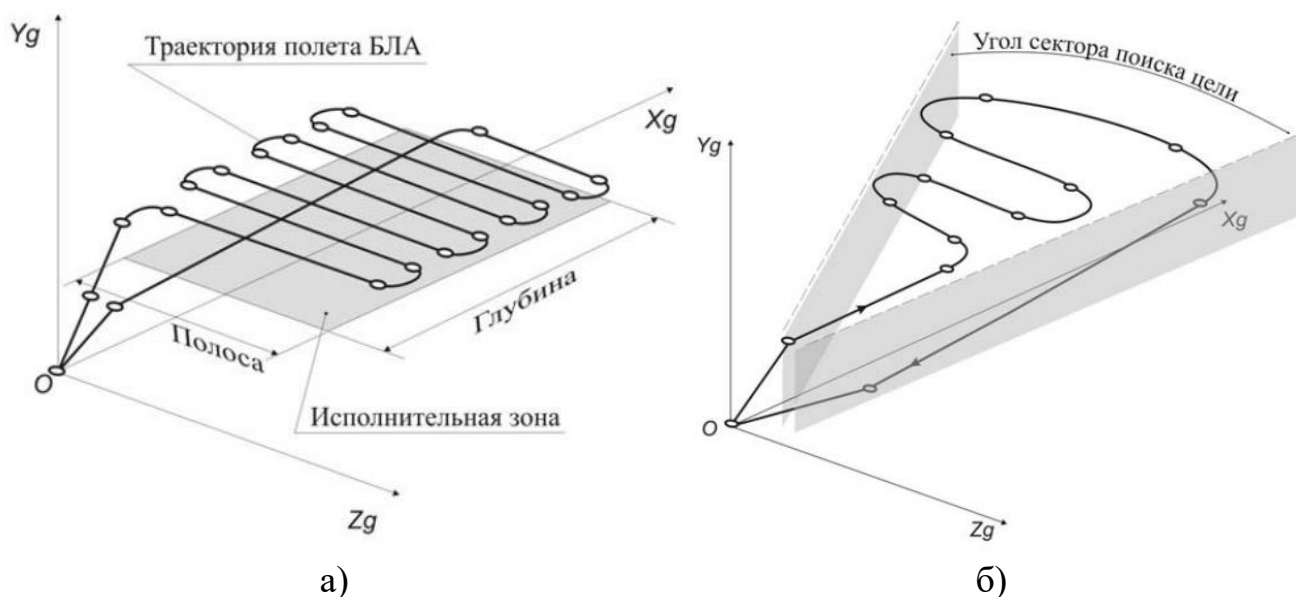


Рис. 6. Поиск объекта в исполнительной зоне

Размер площади  $S$  радиолокационного наблюдения определяется шириной луча ДНА:

$$\Delta\theta = k_p \frac{\lambda}{d},$$

где  $\Delta\theta$  – ширина луча в радианах;  $d$  – размер апертуры;  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $k_p$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от точного распределения энергии по апертуре (в типовом случае значение  $k$  находится между 1,1 и 1,5).

Применительно к визуальному обнаружению наземного объекта с борта пилотируемого летательного аппарата или по визуальной информации, передаваемой на землю аппаратурой БЛА, можно использовать информационную модель последовательного поиска с равномерным законом распределения координат точки обзора. В этом случае вероятность обнаружения рассчитывается по формуле:

$$P_{обн}(t) = 1 - e^{-\alpha t}, \quad (16)$$

где  $\alpha = 1/T_{cp}$  – характеристика объекта наблюдения, определяющая среднее время обнаружения объектов данного типа;  $t$  – время наблюдения.

Время наблюдения:

$$t = \frac{L_0 - L}{V \frac{B}{b_{нд}}},$$

где  $L_0$  – максимальная дальность обнаружения объекта;  $V$  – скорость БЛА;  $B$  – ширина полосы обзора;  $b_{cp}$  – средняя ширина площадки на наземной поверхности, образованной фовеальным лучом:

$$b_{cp} = \left( \frac{L_0 + L}{2} \right) 2\varphi,$$

где  $\varphi$  – угловая ширина фовеального луча зрения и составляет  $10^\circ$ .

Исходя из приведенных соотношений:

$$P_{обн}(L) = 1 - e^{-\alpha\varphi \frac{L_0^2 - L^2}{VB}};$$

$$f(L) = P'_{обн}(L) = -2 \frac{\alpha\varphi L}{VB} e^{-\alpha\varphi \frac{L_0^2 - L^2}{VB}}.$$

Для увеличения дальности обнаружения радиотехническими средствами выход в район бедствия выполняется в диапазоне высот [2]:

- для самолетов – 6000-8100 м;
- для вертолетов – 600-1200 м.

Размер зоны обзора определяется наклоном и шириной диаграммы направленности антенн, при этом для уменьшения времени поиска необходимо увеличивать размер зоны обзора, для снижения вероятности пропуска необходимо обеспечить перекрытие последовательно просматриваемых участков не менее чем на 25%, а также максимально увеличить отношение сигнал/фон.

Формулы для расчета вероятностей, входящих в показатель качества (15), не связанных с обнаружением наземного объекта, подробно рассмотрены, например, в [9, 12].

### 3. Результаты имитационного моделирования

Общепринятая методика расчета показателя эффективности базируется на представлении процесса выполнения задачи в виде совокупности этапов, вероятности выполнения которых рассчитываются с помощью аналитических выражений. Ей присущ ряд недостатков, наличие которых объясняется общим недостатком аналитических моделей как класса – наиболее полное исследование процесса функционирования системы можно провести, если известны явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными системы. Однако такие зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными системы, удастся получить только для сравнительно простых систем. При усложнении систем необходимо существенное упрощение первоначальной модели. При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в опре-

деленные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы.

Для оценки эффективности различных вариантов построения структуры и компонентов авиационных поисковых комплексов (АПК) на основе математического аппарата систем массового обслуживания (СМО) разработана статистическая имитационная модель функционирования АПК при решении задачи поиска аварийного судна (рис. 7).

На рис. 7 приняты следующие обозначения: БИ противодействия – блок имитации противодействия противника; БИ ЛА – блок имитации летательного аппарата – поискового вертолета; БИ БЛА – блок имитации беспилотного летательного аппарата; БИ объекта поиска – блок имитации местоположения и характеристик потерпевшего аварии судна; БИ НСУ – блок имитации наземной системы управления.

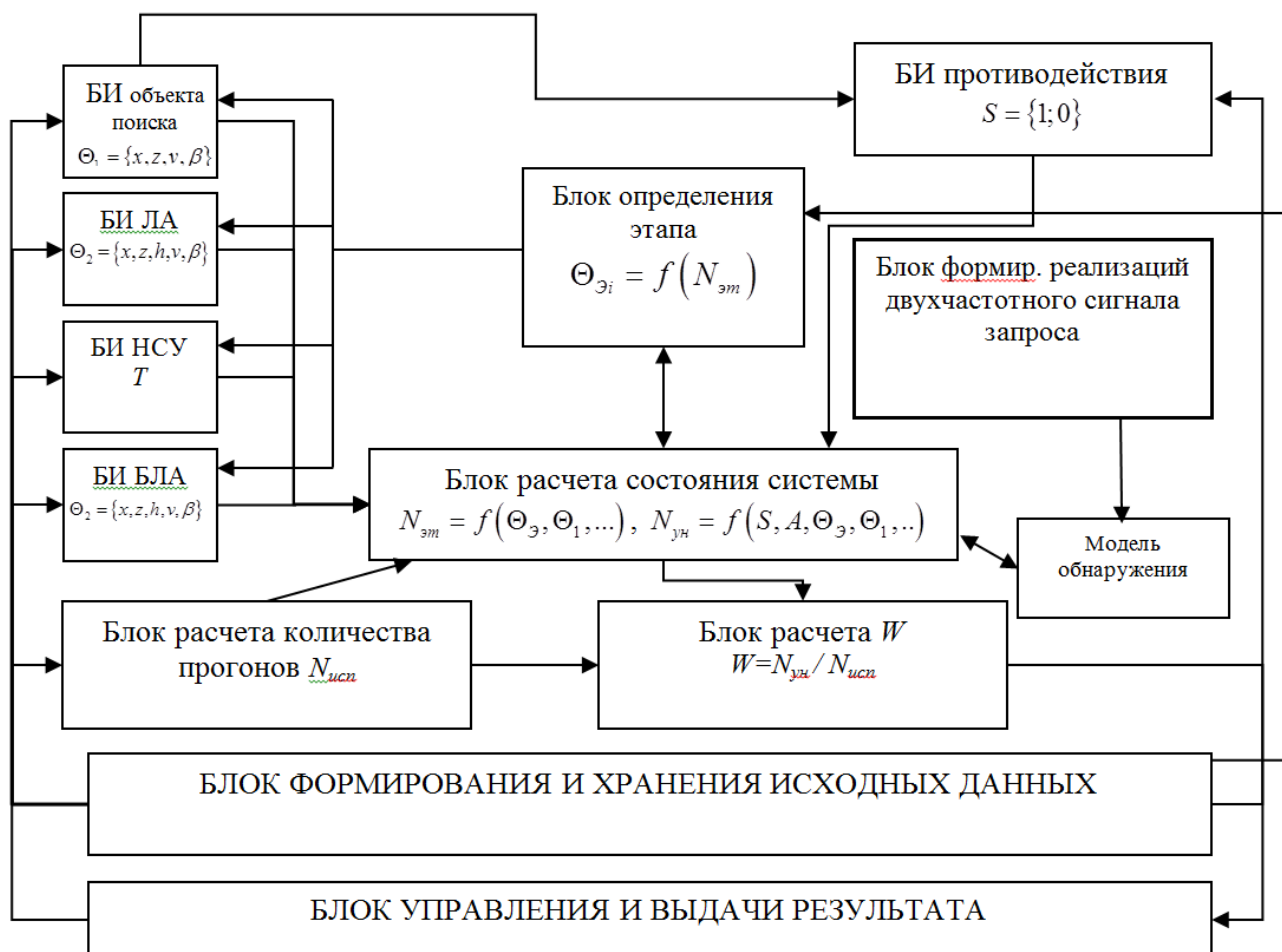


Рис. 7. Блок-схема имитационной модели АПК

На рис. 8-11 представлены результаты расчета показателя (15) с разными условиями выполнения задачи.

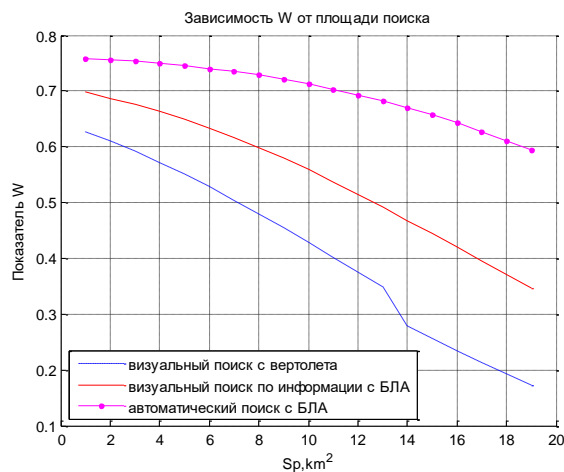


Рис. 8. Графики показателя качества в зависимости от площади зоны обзора (Интенсивность потока неблагоприятных воздействий 0,0001; Условная вероятность выполнения задачи 0,7; Дальность визуального обнаружения 5000 м; Ограниченное время ожидания 120-180 мин)

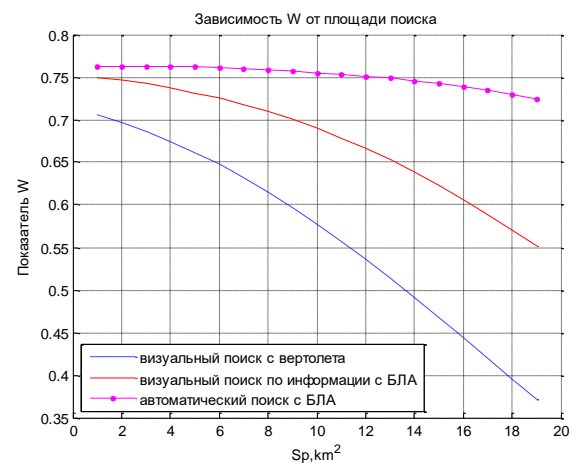


Рис. 9. Графики показателя качества в зависимости от площади зоны обзора (Интенсивность потока неблагоприятных воздействий 0,0001; Условная вероятность выполнения задачи 0,7; Дальность визуального обнаружения 8000 м; Время ожидания 6 ч)

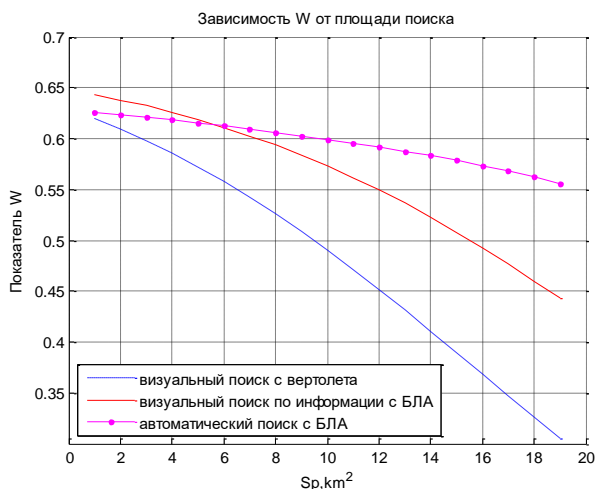


Рис. 10. Графики показателя качества в зависимости от площади зоны обзора (Интенсивность потока неблагоприятных воздействий 0,01; Условная вероятность выполнения задачи 0,8; Дальность визуального обнаружения 8000 м; Время ожидания не ограничено)

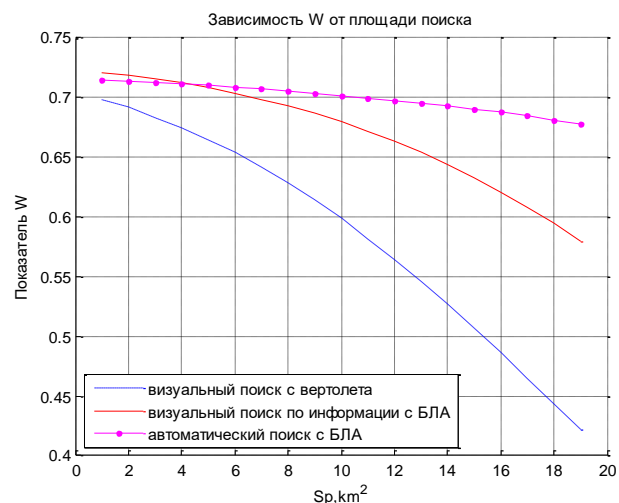


Рис. 11. Графики показателя качества в зависимости от площади зоны обзора (Интенсивность потока неблагоприятных воздействий 0,001; Условная вероятность выполнения задачи 0,8; Дальность визуального обнаружения 8000 м; Время ожидания не ограничено)

Анализ результатов моделирования (рис. 8-11) показал, что, по сравнению с существующей системой поиска аварийных судов, в которой задача поиска и распознавания решается экипажем средствами пассивной радиолокации

или визуально, использование предлагаемой методики обнаружения позволяет обеспечить повышение показателя эффективности на 20...40%. Выигрыш достигается, в основном, за счет повышения дальности и вероятности обнаружения отражателей.

При применении БЛА, оснащенного поисковой РЛС, достигается значительное повышение показателя эффективности по сравнению с другими вариантами построения АПК. Применение поискового БЛА, оснащенного поисковой РЛС для поиска экипажей с допустимым временем ожидания менее 120-180 мин., позволяет повысить показатель эффективности в среднем до 40% (рис. 8). Для поиска мест аварии воздушных судов без ограничения времени и в условиях интенсивного воздействия на информационный канал обмена данными с пунктом наведения и канал коррекции численных навигационных координат выигрыш существенен при больших площадях поиска.

### Выводы

Анализ выполненных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- эффективная поверхность рассеяния сферических отражателей при длине волны зондирующего сигнала  $\lambda \approx \frac{r_{ш}}{0,17}$  в любых условиях наблюдения обеспечивает наилучшие значения вероятности правильного обнаружения;
- при организации поисков в степных условиях или на фоне морской поверхности с волнением порядка 2 баллов размер площади отражения от сферических отражателей должен составлять от 2000 до 10000 м<sup>2</sup>, что достижимо использованием антенных решеток из сферических отражателей;
- в лесистых условиях требуемое значение вероятности правильного обнаружения  $P_{ПО} > 0,9$  обеспечивается при использовании сферического отражателя радиусом 1 м<sup>2</sup>.

Неоднозначность, возникающая при попадании в луч зондирующей РЛС посторонних объектов, имеющих суммарную ЭПР, сопоставимую с ЭПР сферического отражателя, снижается за счет последовательного использования двух частот зондирующего сигнала. Вначале область поиска просматривается

на длине волны зондирующего сигнала  $\lambda \approx \frac{r_{ш}}{0,17}$ . При возникновении отклика,

превышающего установленный порог, длина волны зондирующего сигнала устанавливается равной  $\lambda \approx \frac{r_{ш}}{0,27}$ . При этом отклик от сферического отражателя

(или решетки отражателей) будет значительно ниже, и, соответственно, не обеспечит превышения порога.

Особенностью применения сферических отражателей является всенаправленность их диаграммы обратного рассеяния, позволяющая осуществлять поиск места аварии с любого направления. Использование решетки с располо-

жением сферических отражателей в углах равностороннего треугольника не приводит к существенному сужению ширины ДОР.

Изготовление сферических отражателей из пластичных материалов с металлическим покрытием (напылением) позволяет хранить отражатели в свернутом виде и приводить их в рабочее состояние путем наполнения газом или воздухом автоматически или вручную только после возникновения аварийной ситуации.

Научная новизна исследования заключается в выводе аналитического выражения для расчета ЭПР конструкции из трех сферических отражателей. В отличие от одиночного сферического отражателя конструкция из трех отражателей существенно увеличивает уровень отраженного сигнала в широком диапазоне углов подхода к месту аварии. В свою очередь увеличение отношения сигнал/фон ведет к повышению однозначности радиолокационного поиска отражателей и обеспечивает применение беспилотных летательных аппаратов для радиолокационного поиска аварийных судов.

*Данные исследования выполнены при поддержке научного проекта «Разработка роботизированного беспилотного летательного аппарата мультиторторного типа с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы» Федеральной целевой программы на 2014-2020 годы (уникальный идентификатор RFMEFI57818X0222) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России.*

### Литература

1. Półka M., Ptak S., Kuziora Ł. The Use of UAV's for Search and Rescue Operations // Procedia Engineering. 2017. Vol. 192. P. 748-752. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.129.
2. Наставление по авиационному поиску и спасению в государственной и экспериментальной авиации. Приказ Министра обороны Российской Федерации и Министра промышленности и энергетики Российской Федерации от 12 июля 2004 г. № 206/37 // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. 2020. – URL: [http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc\\_itself=&backlink=1&nd=102131353&page=1&rdk=0#Ю](http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=102131353&page=1&rdk=0#Ю) (дата обращения: 05 июня 2020).
3. Радиолокационный отражатель РЛО-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. [Электронный ресурс]. 05.06.2020. – URL: <http://slsa.ru/radiolokacionnyiotrajatelrlo-1> (дата обращения: 05.06.2020).
4. Lu J.B., Hu W.D., Xiao H., Yu W. Novel cued search strategy based on information gain for phased array radar // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2008. Vol. 19. № 2. С. 292-297. doi: 10.1016/S1004-4132(08)60081-X.
5. Gonzalo P. Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2015. Vol. 81. С. 281-329. doi: 10.14358/PERS.81.4.281.

6. Баженов А. В., Малыгин С. В. Радиолокационная система поиска аварийных судов с использованием сферических отражателей // Системы управления, связи и безопасности». 2015. № 1. С. 16-25.

7. Баженов А. В., Медяный Д. Н., Янковец Ю. Г. О целесообразности расширения задач, решаемых беспилотными летательными аппаратами // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 3. С. 147-149.

8. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

9. Баженов А. В. Методика расчета диаграммы обратного рассеяния однородной антенной решетки // Развитие инновационных направлений в образовании, экономике и технологиях. Межвузовская научно-практическая конференция. – Ставрополь: ООО Издательский дом «ТЭСЭРА», 2011. С. 135-139.

10. Zhen L, Li M., Laporte G., Wang W. A vehicle routing problem arising in unmanned aerial monitoring // Computers & Operations Research. 2019. Vol. 105. P. 1-11. doi: 10.1016/j.cor.2019.01.001.

11. Boukoberine M. N., Zhou Z., Benbouzid M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects // Applied Energy. 2019. Vol. 255. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113823.

12. Финкильштейн М. И. Основы радиолокации. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.

### References

1. Półka M., Ptak S., Kuziora Ł. The Use of UAV's for Search and Rescue Operations. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 192, pp. 748-752. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.129.

2. Nastavlenie po aviacionnomu poisku i spaseniyu v gosudarstvennoj i e`ksperimental`noj aviacii. Prikaz Ministra oborony` Rossijskoj Federacii i Ministra promy`shlennosti i e`nergetiki Rossijskoj Federacii ot 12 iyulya 2004 g. № 206/37 [Counsel for aviation search and rescue in the state and experimental aviation. Decl. by Order of the Ministry of defense Russian Federation from July 12, 2004, no. 206/37]. *Ofitsial'nyi internet-portal pravovoi informatsii* [The official Internet portal of law information], 05 June 2020. Available at: [http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc\\_itself=&backlink=1&nd=102131353&page=1&rdk=0#I0](http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=102131353&page=1&rdk=0#I0) (accessed 05 June 2020) (in Russian).

3. Radiolokacionny`j otrazhatel` RLO-1. Texnicheskoe opisanie i instrukciya po e`kspluatacii. [Radar reflector SART-1. Technical description and operating instructions], 05 June 2020. Available at: <http://slsa.ru/other-slsa-production/rlo-1-detail> (accessed 05 June 2020) (in Russian).

4. Lu J., Hu W., Xiao H., Yu W. Novel cued search strategy based on information gain for phased array radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, vol. 19, pp. 292-297. doi: 10.1016/S1004-4132(08)60081-X.



5. Gonzalo P. Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, vol. 81, pp. 281-329. doi: 10.14358/PERS.81.4.281.

6. Bazhenov A. V., Malygin S. V. Radar system for searching for emergency vessels using spherical reflectors. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 16-25 (In Russian).

7. Bazhenov A. V., Medyanj D. N., Yankovec Y. G. О целесообразности расширения задач, решаемых беспилотными летательными аппаратами [On the feasibility of expanding the tasks solved by unmanned aerial vehicles]. *Информационные технологии*, 2007, vol. 5, no. 3, pp. 147-149 (In Russian).

8. Kondratenkov G. S. *Радиолюбительские радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли* [Radiovision. Radar remote sensing]. Moscow, Radio Engineering Publ., 2005, 368 p. (In Russian).

9. Bazhenov A. C. Methodika rascheta diagrammy obratnogo rasseianiia odnorodnoi antennoi reshetki [Method of calculating charts backscattering uniform antenna array]. *The Development of innovative trends in education, economy and technology. Interuniversity scientific-practical conference*. Stavropol, Publishing house "TESERA", 2011, pp. 135-139 (In Russian).

10. Zhen L, Li M., Laporte G., Wang W. A vehicle routing problem arising in unmanned aerial monitoring. *Computers & Operations Research*, 2019, vol. 105, pp. 1-11. doi: 10.1016/j.cor.2019.01.001.

11. Boukoberine M. N., Zhou Z., Benbouzid M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. *Applied Energy*, 2019, vol. 255. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113823.

12. Finkil'shtejn M. I. *Osnovy radiolokacii* [Basics of radar]. Moscow, Radio and communications Publ., 1983, 536 p. (In Russian).

### Информация об авторах

*Баженов Анатолий Вячеславович* – кандидат технических наук, профессор. Профессор кафедры «Информационные технологии и электроника». Ставропольский технологический институт сервиса (филиал) Донского государственного технического университета. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов. E-mail: a\_bazhenov61@rambler.ru

Адрес: 355000 г. Ставрополь ул. Кулакова, д. 41/1.

*Гривенная Наталья Владимировна* – кандидат технических наук. Начальник управления обеспечения качества основных образовательных программ и информатизации образовательного процесса. Ставропольский государственный педагогический институт. Область научных интересов: моделирование систем, цифровая обработка сигналов, инфокоммуникационные технологии. E-mail: katrinastenton@yandex.ru

Адрес: 355028, Россия, г. Ставрополь, Ленина ул., д. 417а

*Исаев Александр Михайлович* – старший преподаватель межинститутской базовой кафедры. Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: повышение эффективности функционирования беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа. E-mail: isaev@stilsoft.ru

Мельников Сергей Владимирович – аспирант кафедры инфокоммуникаций. Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: повышение эффективности функционирования беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа. E-mail: territoreer@yandex.ru  
Адрес: 355028 г. Ставрополь, пр. Кулакова, д. 2а.

## Application of Unmanned Aerial Vehicles for Radar Search of Aircraft and Ships Affected by an Accident

A. V. Bazhenov, N. V. Grivennaya, A. M. Isaev, S. V. Melnikov

**The problem statement:** human life is priceless, so when people die in an accident, but not in the crash itself, just because of the late arrival of rescue teams, this is a double tragedy. The development of rescue services is given considerable attention in all highly developed countries. One of the key areas for improving the technical support of rescue services is the development of radio engineering systems since they have such crucial advantages as optical systems with all-weather and round-the-clock use. The use of various emergency radio stations and direction-finding equipment, which are located on search planes and helicopters, significantly reduces the time of the search for the scene of an accident, however, the limited number of power sources, and sometimes a direct ban on the use of them (for example, when an aircraft is landing on the territory occupied by the enemy) determine the relevance of using passive reflectors and radiolocation systems. Another trend in the development of search and rescue systems is the use of unmanned aircraft or remotely piloted aircraft systems. The use of remotely piloted aircraft systems (RPAS) allows creating large groups of search and rescue systems and leads to a decrease in the search time for the accident site. **The aim of the research work** is to substantiate the possibility of using RPAS for an automatic search for the accident site of aircraft and ships equipped with spherical reflectors according to the response to the probing radar signal. It is proposed to equip aircraft and ships not with separate spherical reflectors, but with a design of three spherical reflectors made in the form of an antenna array. **The research methods:** the solution of the problem is based on detecting and localizing the accident site of an aircraft or a sea vessel by maximizing the probability of correct detection of the array of passive reflectors at a given level of false alarm. The probability of correct detection of an object with respect to known corner reflectors is increased by using the oscillating nature of the backscattering pattern of spherical reflectors and using two frequencies of the probe signal. **The research novelty:** the novelty of the presented research work is the placement of a dual-frequency search radar station on RPAS, as well as the rationale for using them on board of aircraft and ships instead of a separate spherical reflector system of three reflectors. **The result:** the use of RPAS with a radar station for an automatic search for spherical reflectors ensures the detection of the accident site with a probability of correct detection over 0.9. The three alternative options for detecting the scene of an accident are presented in the study. They include using a search helicopter; using operator information from RPAS and an automatic search using a dual-frequency search radar system located onboard of RPAS. The results of the imitation model show a gain from the use of a search radar system located onboard of RPAS from 20 to 40%. **The practical relevance of the research work:** the presented research work suggests equipping emergency rafts of ships, as well as emergency stocks of aircraft with the three spherical reflectors to reduce the search time for rescue teams in the event of a malfunction of emergency radio stations or, in case of emergency, compliance with radio silence.

**Keywords:** search for emergency aircraft and ships, spherical reflector, effective scattering surface.

### Information about Authors

Anatoly Viacheslavovich Bazhenov – Ph.D. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor at the Department of Information Technology and Electronics. Stavropol Servis Institute of Technology (Branch) Don State Technical University. Field of research: digital signal processing. E-mail: a\_bazhenov61@rambler.ru

Address: Russia, 355000, Stavropol, Kulakova street, 41/1.

*Natalya Vladimirovna Grivennaya* – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of the Department of Quality Assurance of Basic Educational Programs and Informatization of Educational Process. Stavropol State Pedagogical Institute. Area of scientific interests: system modeling, digital signal processing, information and communication technology. E-mail: [katrinastenton@yandex.ru](mailto:katrinastenton@yandex.ru)

Address: Russia, 355028, Stavropol, Lenina str, 417a.

*Alexander Mikhaylovich Isaev* – senior teacher of the interinstitutional basic Department. North Caucasus Federal University. Research interests: improving the performance of multicopter unmanned aerial vehicles. E-mail: [isaev@stilsoft.ru](mailto:isaev@stilsoft.ru)

Address: Russia, 355028, Stavropol, ave. Kulakov, 2a.

*Sergey Vladimirovich Melnikov* – postgraduate student of the Department of Infocommunications. North Caucasus Federal University Research interests: improving the performance of multicopter unmanned aerial vehicles. E-mail: [territoreer@yandex.ru](mailto:territoreer@yandex.ru)

Address: Russia, 355028, Stavropol, ave. Kulakov, 2a.