

УДК 621.396

Радиолокационная система поиска аварийных судов с использованием сферических отражателей

Баженов А В., Малыгин С. В.

Постановка задачи: даже при существующих темпах заселения планеты по-прежнему сохраняются районы Земли, где поиск аварийных воздушных и морских судов происходит недопустимо долго. Использование различных аварийных радиостанций и пеленгационной аппаратуры, размещенной на поисковых самолетах и вертолетах, значительно уменьшает время поиска места аварии, но 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. Недостатком известных искусственных отражателей, используемых в качестве аварийно-спасательных буёв является низкая вероятность правильного обнаружения в случае если фоновая поверхность имеет хорошие отражательные свойства. **Целью работы** является обоснование использования сферических отражателей для создания оптимальной по критерию Неймана-Пирсона системы радиолокационного поиска аварийных воздушных и морских судов. Предлагается применять двухканальную радиолокационную систему поиска, размещаемую на поисково-спасательных вертолетах и самолетах, в сочетании с оснащением всех судов сферическими отражателями различной конструкции. **Используемые методы:** решение задачи обнаружения и локализации места аварии воздушного или морского судов за счет максимизации вероятности правильного обнаружения решетки пассивных отражателей при заданном уровне ложной тревоги. Повышение вероятности правильного обнаружения объекта относительно известных угловых отражателей осуществляется за счет использования осциллирующего характера диаграммы обратного рассеяния сферических отражателей и использования двух частот зондирующего сигнала. **Новизна:** элементами новизны представленного решения являются использование двух частот зондирующего сигнала, на одной из которых отклик от сферического отражателя максимален, а на другой предсказуемо меньше. **Результат:** использование сферических отражателей обеспечивает обнаружение места аварии с вероятностью правильного обнаружения, превышающей значения, полученные как для угловых отражателей, так и для металлической пластины сопоставимых линейных размеров. Проведенное моделирование для различных условий наблюдения (море с волнением 2 и 6 баллов, степь зимой и летом, каменистая пустыня и лес) показывает возможность достижения вероятности правильного обнаружения более 0,9 при ширине луча диаграммы направленности РЛС на уровне половинной мощности 2^0 , высоте полета 6000-8000 м и наклонной дальности 10-12 км. **Практическая значимость:** представленное решение предлагается реализовать 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 аварийных судов, сферический отражатель, эффективная поверхность рассеяния.

Актуальность

В условиях широкого развития авиационно-космических систем поиска воздушных и морских судов, потерпевших аварию, становится актуальным создание радиолокационных поисковых систем с пассивным ответом. Поиск потерпевших бедствие с использованием радиотехнической аппаратуры является основным методом поиска [1]. 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 настроечные 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.

Использование радиолокационных станций для поиска мест аварии по характеру отклика на зондирующие сигналы используется достаточно давно, особенно для поиска морских судов [1, 2]. Однако в настоящее время обнаружение осуществляется по наличию 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. Поэтому 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.

Повышение однозначности обнаружения радиолокационного отражателя возможно, если кроме амплитуды радиолокационного отклика используются иные признаки или отклик от отражателя формируется в различных условиях наблюдения, например, на различных частотах зондирующего сигнала. Частотно зависимой характеристикой обратного рассеяния обладают сферические отражатели, поэтому целью исследования является обоснование основных решений по реализации радиосистемы поиска аварийных воздушных и морских судов на основе сферических отражателей, позволяющих значительно снизить среднее время поиска места аварии, за счет повышения вероятности правильного обнаружения отражателей на максимальной дальности при максимальной площади облучаемого участка.

При этом необходимо:

- обеспечить максимальное значение вероятности правильного обнаружения радиолокационного отражателя независимо от характера подстилающей поверхности;
- максимально расширить зону поиска за счет увеличения ширины диаграммы обратного рассеяния отражателей;
- при выборе диапазона рабочих частот поисковых радиолокационных станций учесть не только требование минимизации отражения от подстилающей поверхности, но и итоговые размеры отражателей и их конструктивное исполнение, позволяющее с минимальными затратами переоснастить аварийные запасы воздушных и морских судов.

Для увеличения дальности обнаружения радиотехническими средствами выход в район бедствия выполняется в диапазоне высот [1]:

- 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, а для снижения вероятности пропуска необходимо обеспечить перекрытие последовательно просматриваемых участков не менее чем на 25 %, а также максимально увеличить отношение сигнал/фон.

Выбор радиолокационного отражателя производится на основе критерия Неймана-Пирсона [3], при этом в качестве параметра обнаружения может быть использовано отношение:

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

где σ_ϕ – эффективная площадь обратного рассеяния (ЭПР) от участка поверхности Земли, попадающего в луч диаграммы направленности антенны РЛС (площади отражения);

σ_i – ЭПР i -го варианта радиолокационного отражателя.

Вероятность правильного обнаружения с учетом параметра (1) примет вид:

$$P_{\text{по}} = P_{\text{лт}}^{\frac{1}{1+q/2}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{лт}}$ - заданный уровень ложной тревоги.

В качестве альтернативных вариантов радиолокационных отражателей для анализа выбраны: сферический отражатель с идеально проводящей поверхностью, уголкового отражателя с треугольными гранями, уголкового отражателя с прямоугольными гранями и плоская металлическая пластина. Линейные размеры отражателей (диаметр шара, длина грани, ширина и высота пластины) имеют сопоставимые значения.

Максимальное значение ЭПР уголкового отражателя с треугольными гранями вычисляется по формуле [3]:

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

где a – сторона шестиугольника, вписанного во внешний контур отражателя; λ - длина волны зондирующего сигнала.

При использовании уголкового отражателя с прямоугольными гранями ЭПР увеличивается в 9 раз и определяется выражением:

$$\sigma_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} (3a^4). \quad (4)$$

Выражение для расчета ЭПР плоской хорошо проводящей пластины с учетом направления облучения имеет вид:

$$\sigma_{pl}(\theta, \varphi) = \frac{4\pi}{\lambda^2} a^2 b^2 \left| \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} b \sin\theta \cos\varphi\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} b \sin\theta \cos\varphi} \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} b \sin\theta \sin\varphi\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} b \sin\theta \sin\varphi} \right|^2, \quad (5)$$

здесь a, b – размеры сторон; θ, φ – угловые координаты, определяющие направление прихода зондирующего сигнала.

Особенностью расчета ЭПР шара для случая $r_{ш} < \lambda$ является наличие ряда резонансных максимумов и минимумов. Первый максимум наблюдается при отношении $\frac{r_{ш}}{\lambda} \approx 0,17$, при этом значение ЭПР определяется выражением:

$$\sigma_{шmax} = \sigma_0 \left(1 + 0,905 \frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2, \quad (6)$$

где $\sigma_0 = \pi r_{ш}^2$.

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

$$\sigma_{шmin} = \sigma_0 \left(1 - 0,905 \frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2. \quad (7)$$

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 можно рассчитать с учетом удельного значения ЭПР $\sigma_{y\partial}$ (приведенного к площади в 1 м^2), площади S , отражающего участка [3]:

$$\sigma_{\phi} = S \sigma_{y\partial}. \quad (8)$$

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, где могут находиться аварийные суда и, как следствие, к увеличению времени спасательной операции.

На рис. 1-4 представлены результаты расчета вероятности правильного обнаружения радиолокационных отражателей в различных условиях наблюдения для сферического отражателя радиусом 0,5 м и других отражателей сопоставимых размеров. При проведении расчетов вероятность ложной тревоги принята равной $P_{лт} = 0,01$.

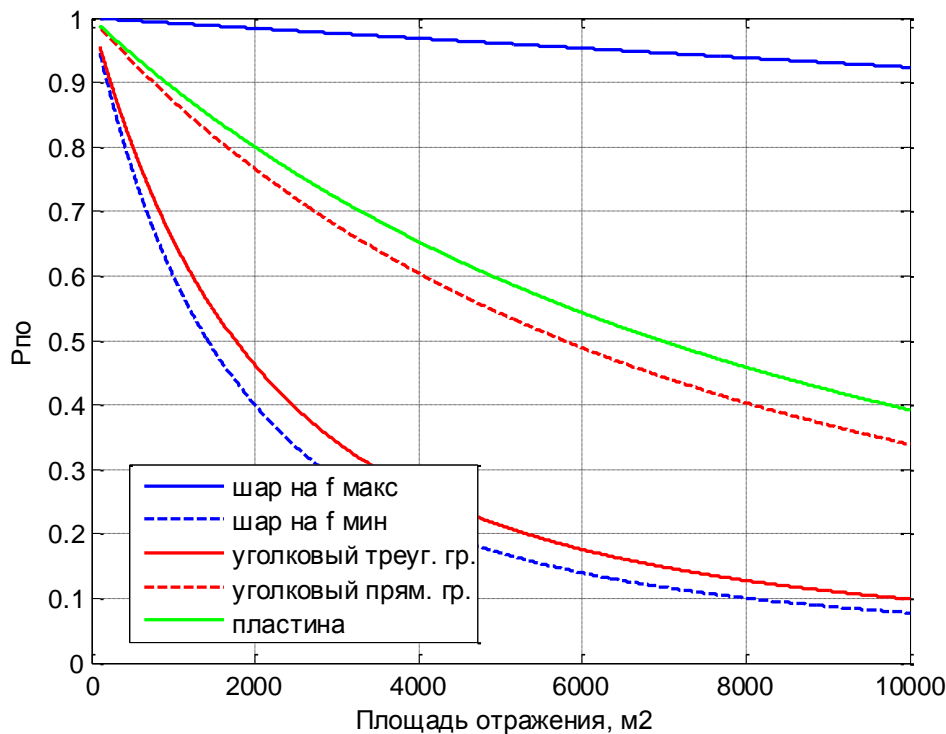


Рис. 1. Графики вероятности правильного обнаружения радиолокационных отражателей на фоне травянистой поверхности

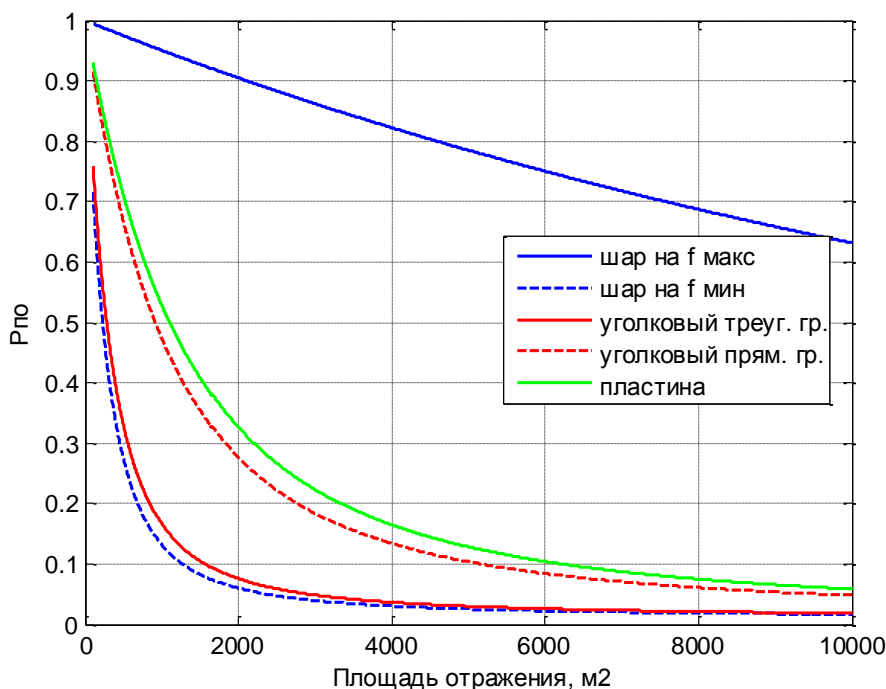


Рис. 2. Графики вероятности правильного обнаружения радиолокационных отражателей на фоне моря с волнением 2 балла

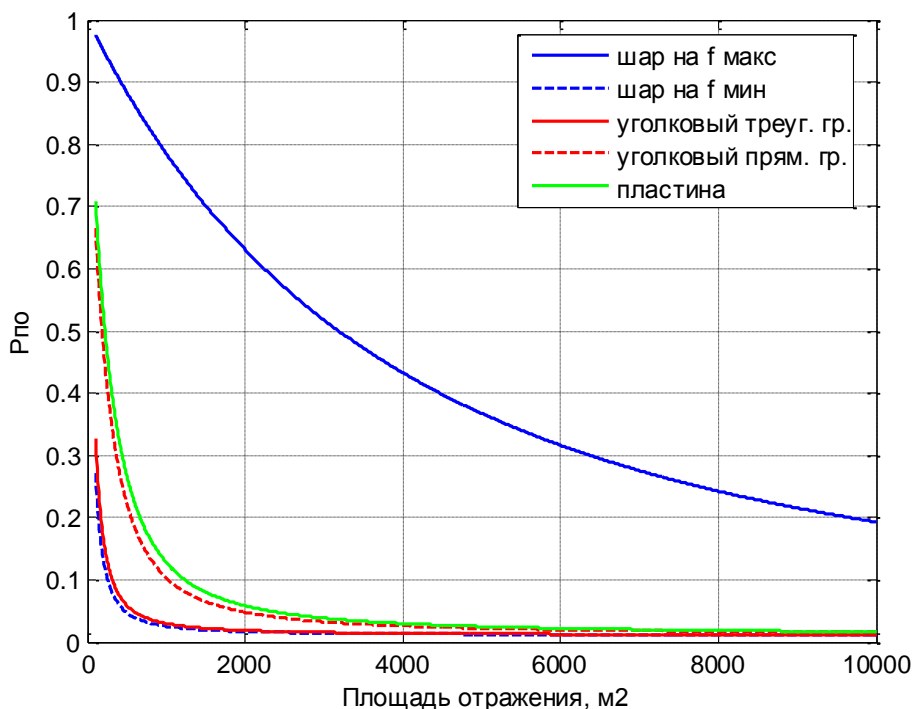


Рис. 3. Графики вероятности правильного обнаружения радиолокационных отражателей на фоне каменистой поверхности

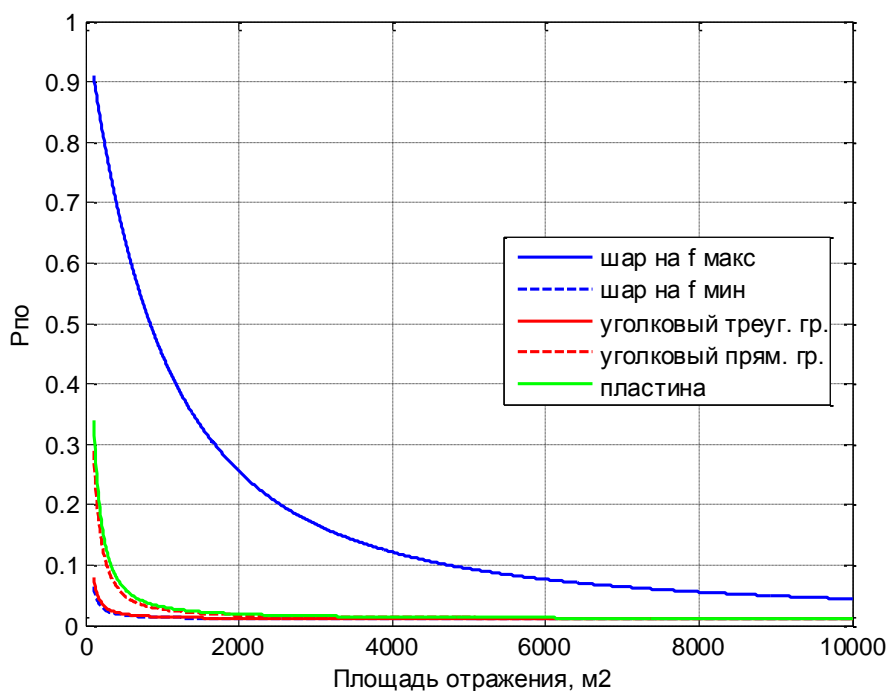


Рис. 4. Графики вероятности правильного обнаружения радиолокационных отражателей на фоне леса

На рис. 5 представлены графики вероятности правильного обнаружения для сферического отражателя радиусом 1 м. для наиболее сложных условий наблюдения – поиск места аварии воздушного судна в лесистой местности.

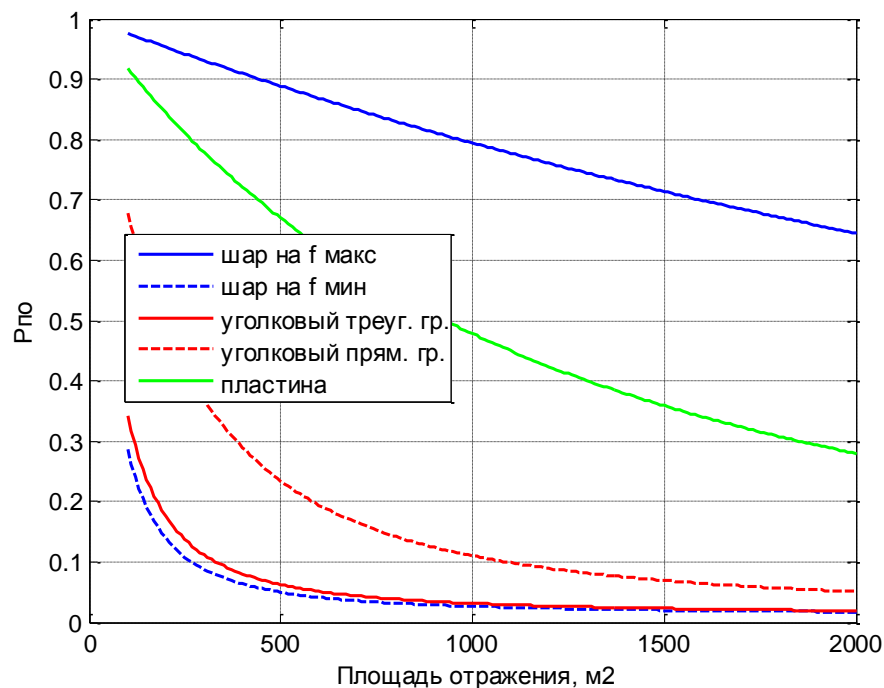


Рис. 5. Графики вероятности правильного обнаружения на фоне леса, линейные размеры отражателей сопоставимы 1 м

Анализ полученных графиков позволяет сделать следующие выводы:

- эффективная поверхность рассеяния сферических отражателей при длине волны зондирующего сигнала $\lambda \approx \frac{r_{ш}}{0,27}$ 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 при использовании сферических отражателей может составлять от 2000 до 10000 м², при этом другие отражатели обеспечивают меньшую мгновенную площадь поиска;
- в лесистых условиях требуемое значение вероятности правильного обнаружения $P_{по} > 0,9$ обеспечивается при использовании сферического отражателя радиусом 1 м².

Неоднозначность, возникающая при попадании в луч зондирующей РЛС посторонних объектов, имеющих суммарную ЭПР сопоставимую с ЭПР сферического отражателя, может быть снижена при последовательном использовании двух частот зондирующего сигнала. Вначале область поиска просматривается на длине волны зондирующего сигнала $\lambda \approx \frac{r_{ш}}{0,27}$. 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 будет в 70 раз ниже, и, соответственно, не обеспечит превышения порога. Незначительные изменения длины волны зондирующего

сигнала не приведут к каким-либо существенным изменениям ЭПР других видов отражателей.

Выводы

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

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. Увеличение ЭПР может быть достигнуто объединением сферических отражателей в группы (решетки) отражателей. В этом случае значение ЭПР увеличивается в 3-5 раз [4].

Таким образом, проведенные в работе исследования показали перспективность использования сферических отражателей для оснащения аварийных комплектов морских и воздушных судов.

Литература

1. Наставление по авиационному поиску и спасению в государственной и экспериментальной авиации / Утв. Приказом МО РФ №206.37 от 12.07.2004. М.: РГ № 3572.
2. Радиолокационный отражатель РЛО-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <http://slsa.ru/other-slsa-production/rlo-1-detail> (дата обращения: 01.03.2015).
3. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. — М.: Радиотехника, 2005. - 368 с.
4. 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.

Reference

1. Counsel for aviation search and rescue in the state and experimental aviation. Decl. by Order of the Ministry of defense Russian Federation, no. 206.37, 12.07.2004. Moscow. (In Russian).
2. Radar reflector SART-1. Technical description and operating instructions. Available at: <http://slsa.ru/other-slsa-production/rlo-1-detail> (accessed 01 Mach 2015) (In Russian).
3. Kondratenkova G. S. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli* [Radiovision. Radar remote sensing]. Moscow, Radio Engineering Publ., 2005. 368 p. (In Russian).
4. Bazhenov A. C. *Metodika 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).

Статья поступила 1 марта 2015 г.

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. Тел.: +7 918 747 47 49. E-mail: a_bazenov61@rambler.ru

Малыгин Сергей Владимирович – старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и электроника». Ставропольский технологический институт сервиса (филиал) Донского государственного технического университета. Область научных интересов: прием и обработка сигналов в условиях помех; системы управления и электропитания телекоммуникационного оборудования. Тел.: +7 928 819 39 00. E-mail: malyginsergei1959@yandex.ru

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

Radar search system emergency vessels using spherical reflectors

Bazhenov A. V., Malygin S. V.

Statement of the problem: even at the current pace of settlement of the planet, there are still places on the Earth where the search emergency aircraft and ships is unacceptably long. The use of various emergency and radio direction-finding equipment, posted on search engine airplanes and helicopters, significantly reduces the search time of the accident, but limited power sources, and, sometimes, outright ban on the use (for example, when landing on the territory occupied by the enemy) determine the relevance of the application of passive reflectors and radar search engines. A disadvantage of the known artificial reflectors used as rescue buoys is a low probability of correct detection if the background surface has good reflective properties. **The aim of this work** is the rationale for the use of spherical reflectors to create optimal according to the criterion of Neyman-Pearson radar search emergency aircraft and ships. It is suggested to use a two-channel radar system search, posted on search and rescue helicopters and aircraft, in combination with equipment of all vessels spherical reflectors of various designs. **Methods used:** a solution to the problem of detecting and localizing the site of the accident aircraft or marine vessels at the expense of maximizing the probability of correct detection of the lattice passive reflectors for a given level of false alarm. Increasing the probability of correct detection of the object relative to the known angular reflectors is carried out through the use of oscillating nature of the graph of the inverse scattering spherical reflectors and the use of two frequencies of the probing signal. **Novelty:** novelty items presented solutions are the use of two frequencies of the probing signal, on one of which the response from the spherical reflector, maximum, and on the other less predictable. **The result:** the use of spherical reflectors provides detection of the scene of the accident with a probability of correct detection, exceeding the values obtained for corner reflectors, and the metal plate comparable to the linear dimensions. The simulation for different observation conditions (sea anxiously 2 and 6 points, steppe in winter and summer, rocky desert and forest) shows the possibility of achieving the probability of correct detection is higher than 0.9 when the width of the beam

pattern of the radar station at the half power level 20 , the height of the flight 6000-8000 m and the slant distance of 10-12 km Practical significance: the solution proposed to equip emergency rafts of sea vessels, as well as wearable (onboard) emergency stocks of aircraft to reduce search time crews in fault conditions emergency radio, or when necessary to protect the radio silence.

Keywords: *search emergency vessels, spherical reflector, the effective surface scattering.*

Information about Authors

Bazhenov Anatoly Viacheslavovich - 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. Phone: +7 918 747 47 49. E-mail: a_bazhenov61@rambler.ru

Malygin Sergey Vladimirovich - Senior Lecturer at the Department Information Technologies and Electronics. Stavropol Servis Institute of Technology (Branch) Don State Technical University. Field of research: reception and processing of signals in noise conditions; system management and supply of telecommunications equipment. Phone: +7 928 819 39 00. E-mail.: malyginsergei1959@yandex.ru

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