

А. В. Кваснов¹, В. Б. Поляков²¹ АО «Заслон», ² СПбПУ

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СКАНИРОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА АФАР РЛС ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПОИСКА НАДВОДНЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Рассматриваются особенности радиоэлектронного поиска различных типов целей с использованием РЛС с активной фазированной антенной решеткой (АФАР). Проводится анализ возможных вариантов решений, позволяющих сократить время мониторинга воздушного пространства. На основании проведенных исследований выбирается критерий эффективности уменьшения времени сканирования для тех или иных типов объектов.

Ключевые слова: поиск аэродинамических целей, диаграмма направленности АФАР, радиолокационный мониторинг.

Введение

В настоящее время радиолокационный мониторинг воздушного пространства является одним из важнейших элементов технического применения РЛС [1]. Это относится как к системам навигации гражданских объектов, так и к комплексам двойного назначения. Создание новых типов самолетов и кораблей привело к росту скоростей целей и уменьшению их эффективной площади рассеяния (ЭПР). По этой причине современные радиолокационные комплексы (РЛК) должны обладать рядом признаков, которые позволяют использовать их в сложных геопозиционных ситуациях по обнаружению и сопровождению подобного класса целей. К таким признакам следует отнести следующие [2]:

- наличие активной фазированной антенной решетки (АФАР);
- наличие интегрированной системы обработки информации многофункционального РЛК.

Данные признаки позволяют обеспечить решение функциональных задач в РЛК. Функциональные задачи РЛК характеризуются:

- видом выполняемой операции (поиск, измерение);
- решаемой целевой задачей (обнаружение, сопровождение);
- типом обслуживаемой цели (низколетящая цель, высоколетящая цель);
- подзоной, в которой работает РЛК;

- способом управления (автоматическое, автоматизированное, ручное);
- наличием сопряжения с другими системами.

Большое количество целей в зоне обзора и ограниченность энергетических ресурсов, а также другие условия могут привести к тому, что перечисленные функциональные задачи не могут быть выполнены РЛК в полном объеме, учитывая время на выполнение всех задач в целом и каждой задачи в частности.

Одним из вариантов решения данной проблемы является сокращение времени на этапе поиска, прежде всего аэродинамических объектов, многофункциональными РЛК. Для этих целей необходимо осуществить анализ методов сканирования и поиска с помощью РЛС с учетом особенностей электронного формирования диаграммы направленности антенны (ДНА) АФАР.

Существует ряд монографий, где частично исследовалась данная задача [3–6]. Современное развитие вычислительных ресурсов предлагает новые пути по усовершенствованию алгоритма сканирования и поиска целей [7–9]. Это касается в первую очередь методики обработки и управления радиолокационной информацией на различных этапах [10].

В этой статье предлагается анализ алгоритмов, направленных на сокращение времени радиолокационного сканирования воздушного пространства, а также методика расчета зон, в которых предлагается производить поиск аэродинамических и надводных объектов.

Цель работы

Целями этой работы являются:

- исследование алгоритмов сканирования воздушного пространства и поиска аэродинамических и надводных целей с использованием многофункциональных радиолокационных комплексов;
- анализ методов сокращения времени мониторинга воздушного пространства;
- выбор оптимального (по тому или иному критерию) способа поиска объектов.

Основная часть

Постановка задачи поиска и сканирования аэродинамических целей

Мониторинг воздушного пространства должен производиться согласно установленным зонам ответственности РЛК. Каждой зоне соответствует свой режим обзора, метод модуляции и тип обращения к цели.

На сегодняшний день можно выделить некоторые характерные зоны, предусматриваемые при поиске аэродинамических и надводных целей и приведенные в таблице [2].

Поиск надводных целей в зоне 1 (рис. 1) является нетривиальной задачей и должен учитывать влияние интерференционного множителя ослабления от подстилающей морской поверхности и влияния рефракции радиоволн. Для объектов в зоне 2 также характерно влияние множителя ослабления, но цель уже рассматривается как точечный объект с заданной ЭПР. Наиболее типичным случаем поиска является поиск аэродинамических объектов в третьей и четвертой зонах, которые отличаются только различными значениями ЭПР целей ($\sigma \approx 60 - 120 \text{ м}^2$ – для пассажирских и транспортных самолетов, $\sigma \approx 5 - 15 \text{ м}^2$ – для легких и сверхлегких самолетов).

Таким образом, первая и вторая зоны характерны для наземных, надводных и низколетящих целей. Особенностью их обнаружения являются специфические алгоритмы распознавания этих

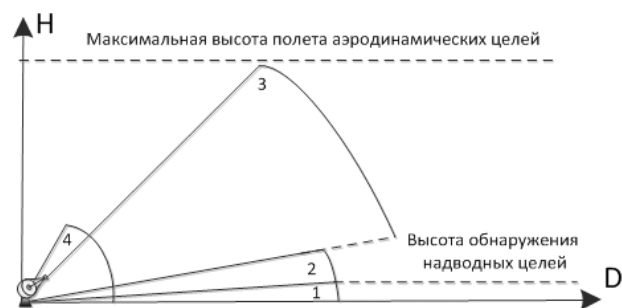


Рисунок 1. Зоны обзора различных типов аэродинамических целей

объектов на границе «земля (море) – воздух». Для третьей и четвертой зон необходимо производить мониторинг в угломестной плоскости с высокой скоростью переключения луча; также для этих зон характерны повышенные требования к времени принятия решения оператором РЛК.

Анализ литературы [7–9] позволяет сделать вывод о том, что наиболее существенными факторами, влияющими на сокращение времени сканирования, являются:

- уменьшение числа позиций в строке обзора при увеличении угла места, возникающее из-за геометрических особенностей поиска целей РЛК;
- взаимное перекрытие зон обзора радиолокационным лучом в различных положениях для обеспечения покрытия всего сканируемого воздушного пространства с равномерной плотностью мощности в любом направлении [8];
- изменение размера луча в результате изменения направления ДНА неподвижной АФАР.

Необходимо осуществить анализ каждого из приведенных выше факторов. Сопоставление полученных результатов может обеспечить сокращение времени на мониторинг воздушного пространства в каждой из четырех описанных зон сканирования. Преимущества того или иного способа предлагается использовать при реализации

Таблица. Зоны поиска аэродинамических и надводных целей

Зона обзора	Тип обнаруживаемого объекта	Объект	Углы обзора, градусы
1	Цели, появляющиеся из-за горизонта	Корабли	0–2
2	Аэродинамические цели над горизонтом	Сверхзвуковые пассажирские самолеты	2–10
3	Аэродинамические высоколетящие цели	Среднескоростные пассажирские и транспортные самолеты	10–45
4	Малоразмерные высоколетящие цели	Легкие и сверхлегкие самолеты	0–60

обобщенного метода по поиску надводных и аэродинамических целей с использованием математического аппарата аналитической геометрии.

Зоны сканирования при изменении угла места цели

Для анализа и расчетов рассматривались следующие ограничения АФАР:

- сектор обзора, составляющий приблизительно $\beta \approx 80 \dots 90^\circ$ – для угла места;
- $\varepsilon \approx 100 \dots 120^\circ$ для азимутального угла;
- время переключения сканирующего луча для АФАР $t_{перекл} \leq 100$ мкс.

Предполагается, что обнаруживаемые объекты находятся на поверхности воображаемой сферы, в центре которой находится РЛК (рис. 2). При увеличении угла места происходит сужение растровой строки поиска в результате сферического характера зоны обзора радиолокатором. Это приводит к сокращению числа позиций, в которых должен находиться сканирующий луч, и, тем самым, уменьшается общее время на поиск цели.

Как известно, площадь сектора, лежащего на поверхности сферы, может быть вычислена согласно следующему выражению [11]:

$$S_{скан} = \pi B D h, \quad (1)$$

где $B = \frac{2\pi}{\varepsilon}$ – размер дуги ε (зоны сканирования) в азимутальной плоскости (в радианах); D – радиус (дальность до цели); h – высота сканируемой зоны в угломестной плоскости.

Преобразовав это выражение для угловых координат, получим:

$$S_{скан} = \frac{2\pi^2}{\varepsilon} D^2 [\sin \beta_{\max} - \sin \beta_{\min}], \quad (2)$$

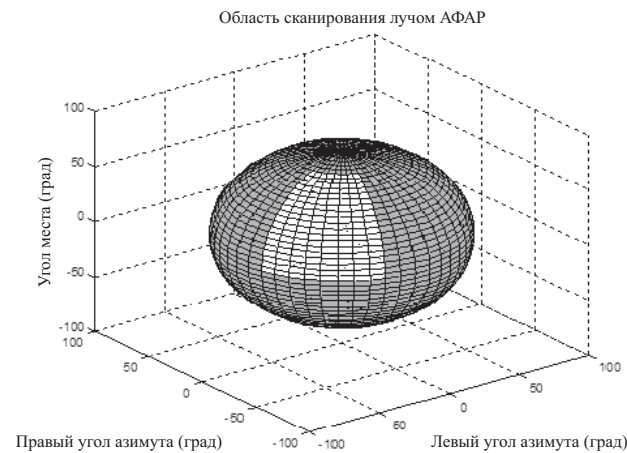


Рисунок 2. Сектор поиска цели, представленный сферической поверхностью

где β_{\max} – угол места для верхней границы зоны сканирования; β_{\min} – угол места для нижней границы зоны сканирования.

Принципиальным моментом является то, что на высоких углах места $\beta \geq 45^\circ$ начинается уменьшение зоны обзора сканирующими лучами. Расчеты показали, что учет сужающейся области дает преимущество до 210 позиций по всему поясу сферы при изменении угла места от 45 до 60°. Для АФАР это может дать выигрыш по времени мониторинга до $t \geq 0,5 \dots 3$ с.

Современные методы сканирования предлагают различные варианты реализации мониторинга воздушного пространства согласно заданному алгоритму управления лучом ДНА. Как правило, используют несколько типичных вариантов сканирования [12]:

1. Круговой обзор, выполняемый лучом ДНА, непрерывно вращающимся с постоянной скоростью $\Omega_{обз}$ вокруг строительной оси РЛС.
2. Секторный обзор, который является частным случаем кругового обзора, когда поиск объекта ведется в указанной области воздушного пространства.
3. Винтовой (спиральный) обзор, применяемый в случае, если луч ДНА вращается вокруг линии визирования и за каждый оборот смещается на заданный угол $\varphi_{шага}$.

Для РЛК, обеспечивающих в первую очередь захват и сопровождение целей, целесообразно выбирать секторный режим, поскольку он требует меньшего времени на обзор в заданной области сканирования. Помимо этого, он более прост в реализации.

Позиция каждого сканируемого луча должна иметь определенный шаг вдоль горизонтальной и вертикальной плоскости, чтобы обеспечить перекрытие всей зоны по заданному уровню мощности. В качестве такого уровня выбирается уровень половины мощности телесного угла ($P_{ск.луч}$), который сформирован сканирующим лучом в угломестной – $\delta\beta = 0,5 P_{азим}$ и азимутальной – $\delta\varepsilon = 0,5 P_{уг.места}$ плоскостях. Произведенный анализ показал, что для луча АФАР шаг перестройки двух соседних позиций сканирования будет равен (рис. 3а и 3б):

$$P_{гориз} = \frac{\sqrt{3}}{2} \delta\varepsilon \approx 0,86\delta\varepsilon, \quad (3)$$

$$P_{верт} = \frac{3}{4} \delta\beta = 0,75\delta\beta. \quad (4)$$

Уменьшение шага сканирования приводит к увеличению числа позиций луча в заданном секторе обзора. Обеспечение заданного уровня мощности

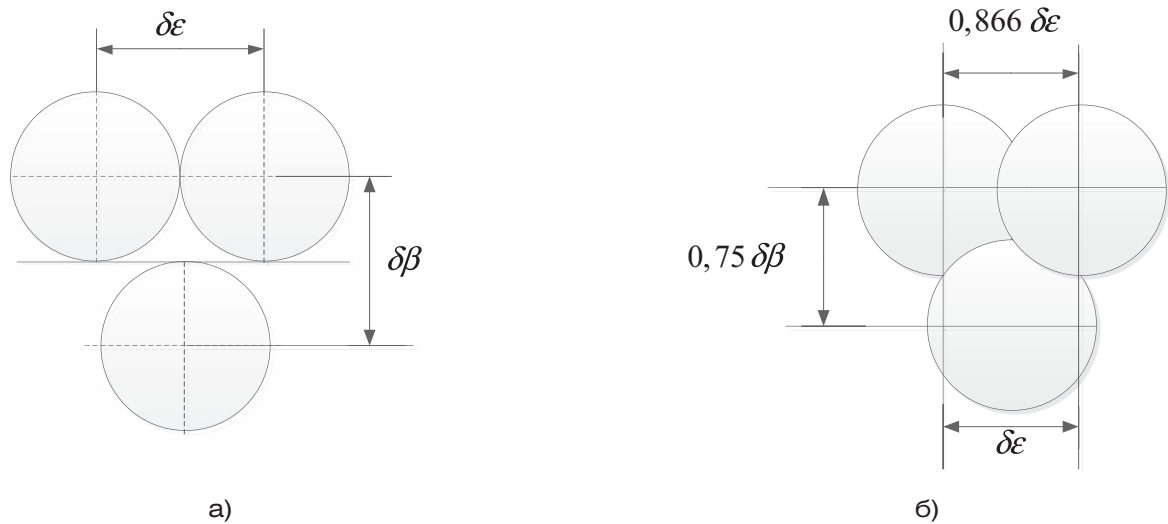


Рисунок 3. Шаг сканирования луча ДНА: а) без перекрытия луча; б) с перекрытием луча

в пределах этого же сектора при фиксированном времени луча в каждой позиции приводит к увеличению времени на поиск целей.

Изменение размера луча в результате изменения направления ДНА

Формирование ДНА неподвижной АФАР имеет ряд особенностей. Прежде всего это зависимость ширины луча на воображаемой сфере сканирования (рис. 2) от направления основного лепестка ДНА (рис. 4). В случае отклонения сканирующего луча от нормали к плоскости антенного полотна АФАР происходит расширение телесного угла ($P_{ск.луч}$).

Конечное число излучателей антенного полотна формируют ДНА с шириной луча по уровню половинной мощности [2]:

$$\delta\epsilon \approx \frac{\lambda}{d_{азим}} \cdot \frac{1}{\cos(\epsilon)}$$

– для азимутальной составляющей;

$$\delta\beta \approx \frac{\lambda}{d_{угл.места}} \cdot \frac{1}{\cos(\beta)}$$

– для угломестной составляющей,

где $\delta\epsilon$ – ширина сканирующего луча в азимутальной плоскости; $\delta\beta$ – ширина сканирующего луча в угломестной плоскости; λ – длина волны, излучаемой АФАР; $d_{азим}$ и $d_{угл.места}$ – ширина и высота антенного полотна АФАР соответственно; ϵ и β – угол поворота основного лепестка ДНА в азимутальной и угломестной плоскости соответственно.

В случае изменения направления сканирующего луча увеличивается величина телесного угла, осуществляющего покрытие зоны этим лучом. Происходит формирование области эллипса обратно пропорционально функции косинуса угла, смещенного относительно нормали к плоскости АФАР (рис. 5).

Таким образом, общая площадь сканируемого пространства может быть представлена как сумма

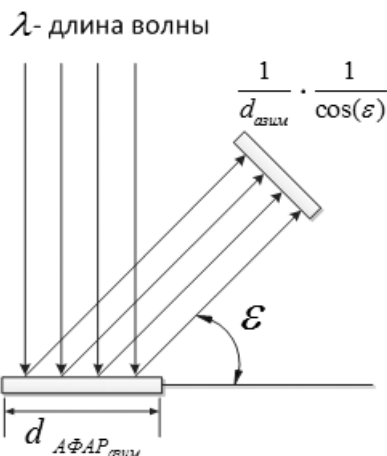


Рисунок 4. Направление сканирующего луча АФАР

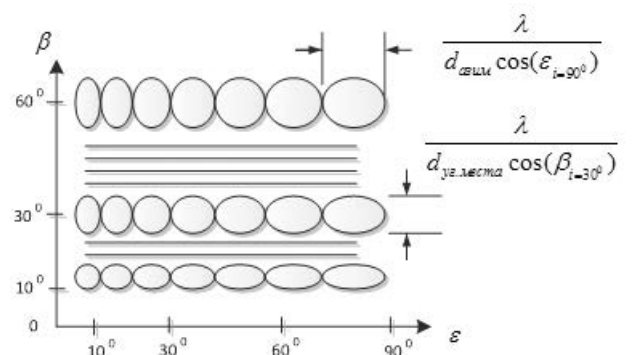


Рисунок 5. Изменение зон сканируемой области

позиций луча, смещенного относительно перпендикулярного направления на плоскую АФАР. Математически это можно записать для азимутальной и угломестной плоскости следующим образом:

$$S_{\text{сканр}} \approx \frac{\lambda^2}{d_{\text{азим}} d_{\text{уг.места}}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\cos(\varepsilon_i)} \sum_{j=1}^m \frac{1}{\cos(\beta_j)}, \quad (5)$$

где ε_i – i -положение, соответствующее повороту луча на ε радиан в азимутальной плоскости; β_j – j -положение, соответствующее повороту луча на β радиан в азимутальной плоскости.

В результате исследования были получены графики, показывающие зависимость увеличения длины строки сканирования в азимутальной плоскости и увеличения ширины столбца в угломестной плоскости от ширины самой зоны сканирования (рис. 6). При заданных углах обзора АФАР ($\beta \approx 80 \dots 90^\circ$, $\varepsilon \approx 100 \dots 120^\circ$) общее время сканирования за счет изменения площади покрываемой поверхности может несущественно сократиться: $T_{\text{азим}} = 0,06$ с и $T_{\text{азим}} = 0,03$ с. Целесообразно не учитывать этот показатель при расчетах времени мониторинга заданного сектора АФАР.

По результатам проведенного анализа был произведен расчет времени мониторинга зон (таблица) для плоской неподвижной АФАР со следующими характеристиками:

- зона сканирования в азимутальной плоскости – $\varepsilon = 90^\circ$;
- зона сканирования в угломестной плоскости – $\beta = 60^\circ$;
- величина апертуры АФАР – $d_{\text{азим}} = d_{\text{уг.места}} = 1$ м;
- ширина сканирующего луча в азимутальной плоскости – $\delta\varepsilon = 1,8^\circ$;

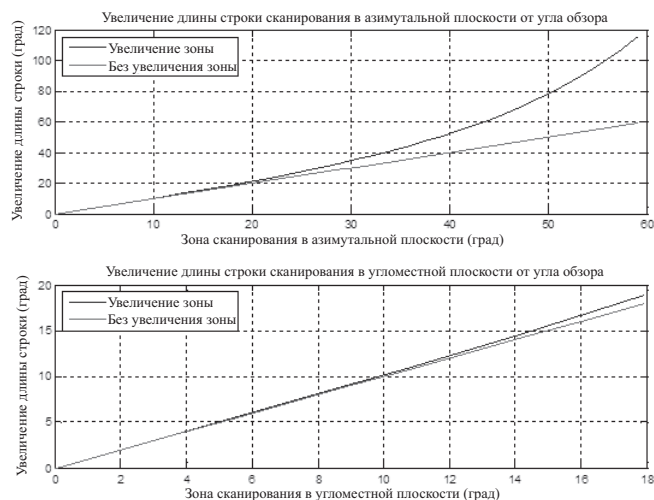


Рисунок 6. Увеличение длины строки сканирования для азимутальной и вертикальной плоскостей

- ширина сканирующего луча в угломестной плоскости – $\delta\beta = 1,8^\circ$;
- время фиксированного положения луча в заданной позиции – $t_{\text{фикс}} \leq 10$ мс;
- время задержки при формировании луча в заданной позиции – $t_{\text{перекл}} \leq 50$ мкс.

На рис. 7 приведены построенные гистограммы, отображающие время сканирования и поиска целей в заданных секторах обзора, соответствующих каждому отдельному типу обнаруживаемых целей.

Итак, эффективным способом сокращения времени сканирования воздушного пространства является учет особенностей мониторинга в различных зонах сканирования. Необходимо учитывать, какой тип целей предполагается отслеживать с помощью АФАР РЛС. В случае обнаружения надводных объектов, появляющихся над горизонтом, следует осуществлять строчное сканирование с заданным шагом для перекрытия всего воздушного пространства. Для высокоподвижных аэродинамических объектов с различными значениями ЭПР необходимо учитывать уменьшение времени сканирования за счет сокращения позиций на углах места $\beta \geq 10 \dots 15^\circ$.

Выводы

По результатам приведенных в статье анализа и расчетов можно сделать следующие выводы, обеспечивающие повышение эффективности сканирования и поиска воздушных целей.

1. Наиболее существенное влияние на время сканирования оказывают следующие факторы:
 - с увеличением угла места происходит уменьшение числа позиций луча в сканируемой строке, отражающей сферический характер поиска и обнаружения целей РЛК;
 - взаимное перекрытие зон обзора сканируемым лучом осуществляется в различных положениях

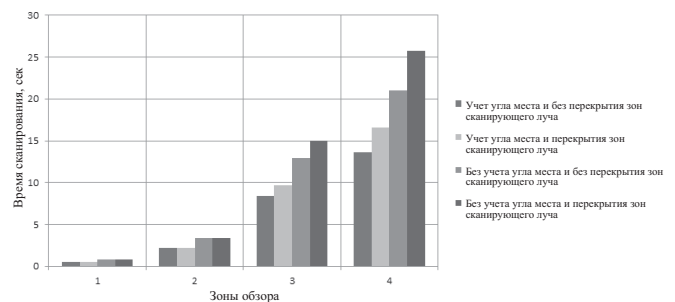


Рисунок 7. Гистограмма времени сканирования и поиска различных типов аэродинамических целей

- для обеспечения равномерной плотности мощности в любом направлении;
- изменение размера луча (вытягивание в горизонтальной или вертикальной плоскости) происходит в результате изменения направления ДНА стационарной АФАР.
2. Для поиска надводных целей с заданным уровнем излучения в данном направлении (не менее половины мощности по главному лепестку ДНА) следует осуществлять перекрытие позиций тремя сканирующими лучами с целью более равномерного распределения плотности потока мощности электромагнитной волны в заданном секторе. Шаг сканирования равен $p_{гориз} \approx 0,86 \delta\epsilon$ ($\delta\epsilon$ – ширина луча в горизонтальной плоскости) – в азимутальной плоскости, $p_{верт} \approx 0,75 \delta\beta$ ($\delta\beta$ – ширина луча в вертикальной плоскости) – в угломестной плоскости.
 3. Для высокоподвижных аэродинамических объектов различных типов (самолеты с различным значением ЭПР) сокращение времени поиска достигается за счет сужения сканируемой строки при увеличении угла места $\beta \geq 10...15^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы. – М.: Радиотехника. – 2004.
2. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Канащенкова. – М.: Радиотехника. – 2004.
3. Небабин, В. Г., Сергеев, В. В. Методы и техника радиолокационного распознавания. – М.: Радио и связь. – 1984.
4. Горелик, А. Л., Барабаш, Ю. Л., Кривошеев, О. В., Эпштейн, С. С. Селекция и распознавание на основе локационной информации / Под ред. А. Л. Горелик – М.: Радио и связь. – 1990.
5. Фарбер, В. Е. Основы траекторной обработки радиолокационной информации в многоканальных РЛС: учеб. пособие. – М.: МФТИ, 2005.
6. Кузьмин, С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь. – 1986.
7. Skolnik, M. Systems Aspects of Digital Beam Forming Ubiquitous Radar // Naval Research Laboratory: Memorandum Report. – 2002. – P. 1–38.
8. Skolnik, M. Radar handbook 3rd edition. – NY: The McGraw-Hill Companies. – 2008. – P. 1327.
9. Lu J. Multifunction Phased Array Radar Resource Management: Real-Time Scheduling Algorithm / Jianbin LU, Hui XIAO, Zemin XI, Mingmin ZHANG // Journal of Computational Information Systems. – 2011. – № 7 (2). – P. 385–393.
10. ГОСТ РВ 5840-002-2010. Средства радиолокационного обнаружения, наведения и целеуказания. Устройства приема и обработки информации – М.: ФГУП «Стандартинформ». – 2011.
11. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике. Для инженеров и учащихся втузов. 10-е изд. – М.: Наука. – 1965. – С. 608.
12. Давыдов, П. С., Сосновский, А. А., Хаймович, И. А. Авиационная радиолокация: справочник. – М.: Транспорт, 1984.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кваснов Антон Васильевич, ведущий инженер, АО «Заслон», 196084, Санкт-Петербург, ул. Коли Томчака, д. 9, e-mail: AntonKV@mail.ru.

Поляков Вадим Борисович, д.т.н., доцент, профессор кафедры системы и технологии управления, Институт компьютерных наук и технологий (ИКНТ), Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: vadim7702@yandex.ru.

For citation: Radiopromyshlennost. – 2016. – № 2. – P. 40–46.
A. V. Kvasnov, V. B. Polyakov

ANALYSIS OF ALGORITHMS OF AIR SPACE SCANNING USING ACTIVE PHASED ARRAY RADAR TO REDUCE TIME OF WATER-SURFACE AND AERODYNAMIC OBJECTS DETECTION

There are considered the features of radio electronic search of various types of objects with use of active phased array radar (APAR). It is performed the analysis of possible solutions allowing to reduce the time of air space monitoring. On the basis of researches performed it is selected criteria of time reduction efficiency for various types of objects.

Keywords: aerodynamic objects search, pattern, radar monitoring.

REFERENCES

1. Bakulev, P. A. Radiolokacionnye sistemy. – M.: Radiotekhnika. – 2004.
2. Aktivnye fazirovannye antennye reshetki / Pod red. D. I. Voskresenskogo i A. I. Kanashenkova. – M.: Radiotekhnika. – 2004.
3. Nebabin, V. G., Sergeev, V. V. Metody i tehnika radiolokacionnogo raspoznavaniya – M.: Radio i svyaz'. – 1984.
4. Gorelik, A. L., Barabash, Yu. L., Krivosheev, O. V., Epshtein, S. S. Selekcija i raspoznavanie na osnove lokacionnoi informacii / Pod red. Gorelik A. L. – M.: Radio i svyaz'. – 1990.

5. Farber, V.E. *Osnovy traektornoi obrabotki radiolokacionnoi informacii v mnogokanal'nyh RLS: uchebnoe posobie*. – M.: MFTI, 2005.
6. Kuz'min, S.Z. *Osnovy proektirovaniya sistem cifrovoi obrabotki radiolokacionnoi informacii*. – M.: Radio i svyaz'. – 1986.
7. Skolnik, M. *Systems Aspects of Digital Beam Forming Ubiquitous Radar* // *Naval Research Laboratory: Memorandum Report*. – 2002. – P. 1–38.
8. Skolnik, M.I. *Radar handbook 3rd edition*. – NY: The McGraw-Hill Companies. – 2008. – P. 1327.
9. Lu, J. *Multifunction Phased Array Radar Resource Management: Real-Time Scheduling Algorithm* / Jianbin LU, Hui XIAO, Zemin XI, Mingmin ZHANG // *Journal of Computational Information Systems*. – 2011. – № 7(2). – P. 385–393.
10. GOST RV 5840-002-2010. *Sredstva radiolokacionnogo obnaruzheniya, navedeniya i celeukazaniya. Ustroistva priema i obrabotki informacii* – M.: FGUP «Standartinform». – 2011.
11. Bronshtein, I.N. *Spravochnik po matematike. Dlya inzhenerov i uchashihsya vtuzov. 10-e izd.* – M.: Nauka. – 1965. – S. 608.
12. Davydov, P.S. *Aviacionnaya radiolokaciya: spravochnik* / P.S. Davydov, A.A. Sosnovskii, I.A. Haimovich. – M.: Transport, 1984.

AUTHORS

Kvasnov Anton, principal engineer, «Zaslou» JSC, Russian Federation, 196084, Saint-Petersburg, Koly Tomchaka st., 9, e-mail: AntonKV@mail.ru.

Polyakov Vadim, Dr. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Chair Systems and control technologies, Institute of computer sciences and technologies, Peter the Great St.Petersburg Politechnic University, Russian Federation, 195251, Saint-Petersburg, Polytekhnicheskaya st., 29, e-mail: vadim7702@yandex.ru.