

Методика расчета зон гарантированного обнаружения воздушных объектов пассивно-активными системами радиолокации

С. А. Батчев, О. В. Король, Д. А. Тимаков

В статье дано описание методики определения зон гарантированного обнаружения воздушных объектов по отраженным от них сигналам сторонних источников пассивно-активными системами радиолокации. Методика, в отличие от известных подходов, учитывает влияние основного сигнала подсвета, условия работы пассивно-активных систем и их приемо-передающих модулей, а также другие факторы, за счет чего обеспечивается повышение точности расчета координат границ зоны контроля воздушного пространства.

Ключевые слова: пассивная радиолокация, обнаружение воздушных объектов, зона контроля воздушного пространства.

1. Введение

Одним из основных показателей эффективности систем радиолокации воздушных объектов является зона контроля воздушного пространства. Данные зоны определяются на этапе проектирования систем с учетом характеристик и энергетического потенциала антенных и приемо-передающих модулей радиолокационной станции [1]. Отличительной особенностью пассивно-активной системы радиолокации является то, что в качестве источника подсвета воздушного объекта используются сторонние передающие устройства, которыми которых могут выступать как активные радиолокационные станции, так и передающие системы связи, передачи данных, аналогового или цифрового телерадиовещания. В этих условиях не представляется возможным определить зону контроля на этапе создания приемных модулей пассивно-активной системы радиолокации, кроме этого, учитывая, что режимы работы источников подсвета могут меняться в процессе их эксплуатации, возникает необходимость постоянного контроля характеристик сигналов передающих источников подсвета и уточнения текущей эффективности системы по дальности обнаружения и типам воздушных объектов.

С этой целью в состав аппаратно-программного комплекса любой пассивно-активной системы радиолокации должна входить модель оценки текущей эффективности системы, предназначенная для расчета зональных, вероятностных и точностных параметров системы с учетом характеристик сигналов источников подсвета и возможностей приемных модулей, входящих в состав системы. Модель позволит формировать и передавать потребителю информации не только траекторные данные по объектам, но и текущее состояние радиолокационного поля сложной разнесенной на местности пассивно-активной системы радиолокации.

Одним из основных элементов модели оценки эффективности пассивно-активной системы радиолокации является методика расчета зон гарантированного обнаружения воздушных объектов, позволяющая для известных характеристик и геометрии построения

пассивно-активной системы радиолокации сформировать границы контроля воздушного пространства по всем типам воздушных объектов с привязкой к карте местности.

Известно [2, 3], что общий принцип пассивной радиолокации основан на двухканальной когерентной обработке опорного сигнала от станции подсвета воздушного объекта и сигнала, отраженного от объекта (рис. 1). При этом можно выделить ряд вариантов приема отраженных сигналов и локализации воздушных объектов:

- прием одним постом сигналов от одной или нескольких передающих станций;
- прием разнесенными постами сигналов от одной или нескольких передающих станций.

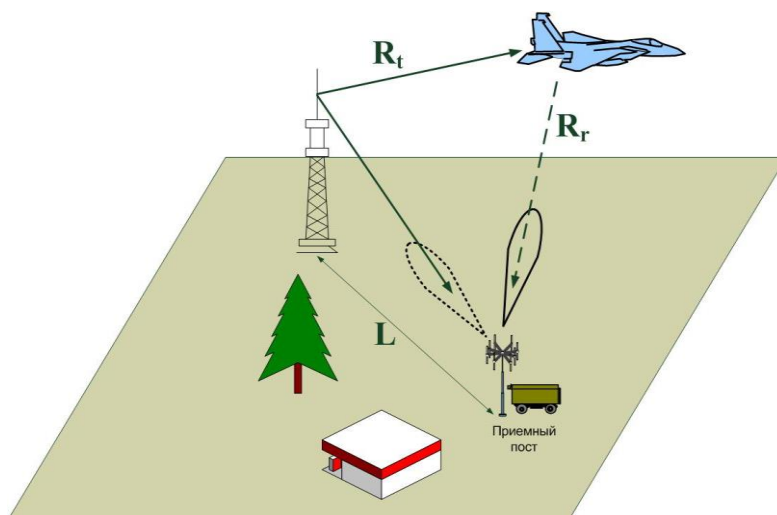


Рис. 1. Схема расположения передающей станции и приемного модуля пассивно-активной системы радиолокации

Данные варианты имеют свои преимущества и недостатки, выбор оптимального осуществляется на этапе проектирования системы с учетом решаемых задач и существующего поля подсвета.

Методика расчета зон гарантированного обнаружения воздушных объектов на основе известных характеристик пассивно-активной системы радиолокации формирует множество вариантов дальностей от передающей позиции до объекта R_t и от объекта до приемного поста R_r с учетом заданной базы L (рис. 1) и рассчитывает координаты точек границ области гарантированного обнаружения воздушных объектов.

2. Исходные данные

Движение воздушного объекта на участке измерений предполагается прямолинейным и равномерным с постоянной скоростью V . Учитывая, что ракурс воздушного объекта относительно приемной и передающей позиций априорно неизвестен, для расчетов выбираются средние значения ЭПР объекта σ_d . Данная методика, в отличие от известных [4, 5], учитывает влияние основного сигнала источника подсвета, проникающего в целевой канал системы, и ориентирована на непрерывные виды передач. Для импульсных типов сигналов задача формирования зон решается аналогично, при этом время накопления и длительность сигналов подсвета устанавливаются с учетом скважности, длительности импульсов и количества импульсов в пачке.

Тогда можно сформировать следующие исходные данные для расчета зон гарантированного обнаружения.

Общие характеристики пассивно-активной системы радиолокации:

B_t, A_t – координаты передающей позиции;

h_t – высота подъема передающей позиции;

B_r, A_r – координаты приемной позиции;

h_r – высота подъема приемной позиции.

Характеристики передающей позиции:

P_t – мощность излучения передающего устройства;

$G_t(a, b)$ – массив значений коэффициентов усиления антенной системы в азимутальной (a) и угломестной (b) плоскостях;

h_t – высота подъема антенны над уровнем моря;

λ – длина волны;

dF – ширина спектра сигнала.

Характеристики приемной позиции:

G_r – коэффициент усиления антенной системы (предполагается, что реализован сектор обзора 360°);

H_r – высота подъема антенны над уровнем моря;

B – ширина полосы пропускания приемного тракта;

T_n – время накопления;

(S/N) – соотношение сигнал/шум, требуемое для обнаружения объектов с заданной вероятностью обнаружения P_o при ограничении на вероятность ложной тревоги $P_{лт}$;

F_n – коэффициент шума приемника.

Характеристики воздушного объекта:

$h_{ц}$ – высота полета объекта;

$\sigma_{ц}$ – ЭПР объекта.

3. Методика

Исходным уравнением для расчета зон гарантированного обнаружения воздушных объектов является известное выражение для расчета дальностей от передающей позиции до объекта (R_t) и от объекта до приемной позиции (R_r) для разнесенных многопозиционных систем радиолокации [6, 8]:

$$R_t^2 R_r^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 P_r \gamma_{PP} \gamma_{AP}}, \quad (1)$$

где P_t, P_r – мощность сигнала на выходе передатчика и на входе приемника; G_t, G_r – коэффициенты усиления антенн передающего и приемного устройств; $\sigma_{ц}$ – ЭПР объекта; γ_{PP} – энергетические потери при распространении сигнала от передающей позиции до объекта и от объекта до приемной позиции; γ_{AP} – потери в аппаратуре передающей и приемной позиций.

В выражении (1) все параметры, за исключением G_t (зависит от направления на объект), известны и могут быть рассчитаны на стадии проектирования системы. В условиях же работы системы в дежурном режиме возникает задача постоянного контроля стабильности характеристик передающей системы. При этом должно оцениваться наличие на заданной частоте сигнала подсвета и соответствие мощности излучения передающей позиции уровню мощности сигнала на входе приемного устройства опорного канала:

$$P_{tr} = \rho A_r, \quad (2)$$

где $A_r = \lambda^2 G_r / 4\pi$ – апертура антенны приемной позиции, ρ – плотность потока мощности на входе приемного устройства:

$$\rho = \frac{P_t G_{tr}}{4\pi L^2}, \quad (3)$$

где L – дальность между приемной и передающей позициями; G_{tr} – коэффициент усиления антенны передающей позиции в направлении приемной позиции.

Значение параметра P_{tr} измеряется на приемной позиции и сравнивается с эталонным значением, соответствующим начальному значению P_t , оцениваемому при развертывании комплекса.

$$P_t = \frac{(4\pi)^2 P_{tr} L^2}{G_{tr} G_r \lambda^2}. \quad (4)$$

Далее подставляем (4) в (1) и после сокращения переменных получаем:

$$R_t^2 R_r^2 = \frac{P_{tr} G_t L^2 \sigma_{\eta}}{4\pi G_{tr} P_r \gamma_{PP} \gamma_{AP}}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что основным и определяющим является соотношение мощностей сигналов, принятых целевым (отраженный сигнал от объекта) и опорным (сигнал от передающей позиции) каналами.

Выражение (5) позволяет построить предварительную зону гарантированного обнаружения пассивно-активной системы, для которой мощность отраженного от объекта сигнала P_r не ниже заданного уровня. В любой плоскости, проходящей через линию, соединяющую приемную и передающую позиции, при различных значениях $R_t^2 R_r^2$ данная зона описывается овалами Кассини (геометрическое место точек, для которых произведение расстояний до двух заданных точек фиксировано [8]). Овал Кассини на плоскости при координатах приемной и передающей позиций $[-1; 0]$ и $[1; 0]$ представляется в декартовой системе координат уравнением:

$$(x^2 + y^2 + 1)^2 - 4x^2 = C^4, \quad C^4 = \frac{R_t^2 R_r^2}{(L/2)^4}. \quad (6)$$

Примеры овалов Кассини для различных значений C [5] представлены на рис. 2а.

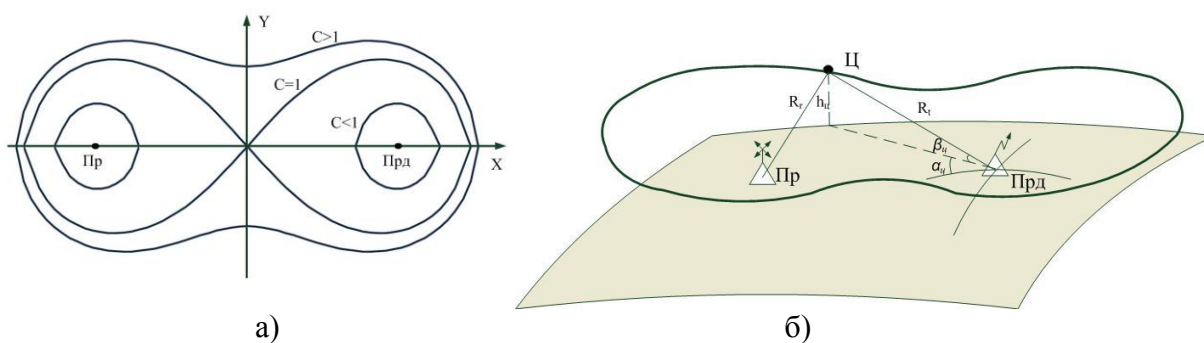


Рис. 2. Схема расположения источника подсвета воздушного объекта и приемного модуля пассивно-активной системы радиолокации

Анализ выражения (5) показывает, что постоянными для всего массива точек границы зоны гарантированного обнаружения являются P_{tr} , P_r (минимальное значение, достаточное для принятия решения о наличии сигнала в элементе разрешения), σ_{η} (используется среднее значение без учета ракурса объекта), L , G_{tr} , γ_{PP} , γ_{AP} . Коэффициент усиления антенны передающего устройства G_t с учетом ее стационарной диаграммы направленности определяется углами визирования на объект в каждой точке границы α_u и β_u (рис. 2б). Также должен учитываться рельеф местности и высота подъема антенны для исключения закрытых зон из массива точек границ гарантированного обнаружения.

С учетом вышесказанного можно определить этапность расчета зон гарантированного обнаружения воздушных объектов в пассивно-активных системах радиолокации.

На первом этапе, в соответствии с (5) и (6), производится расчет постоянного коэффициента C_{max} . Значение P_{tr} для постоянно действующей системы измеряется или, при

моделировании, может рассчитываться в соответствии с (2). Порядок расчета минимального значения P_r , достаточного для принятия решения о наличии сигнала в элементе разрешения, представлен ниже. Потери γ_{PP} , γ_{AP} рассчитываются с использованием известных методов [9]. Коэффициент усиления антенны передающего устройства G_t выбирается максимально возможным для антенной системы передающего устройства.

На втором этапе реализуется алгоритм последовательного расчета координат зон гарантированного обнаружения. Первоначально рассчитываются координаты точек границы зоны или овалы Кассини для постоянного коэффициента C_{max} в местной системе координат, когда приемная и передающая позиции располагаются в точках $[-L/2; 0]$ и $[L/2; 0]$ соответственно. Шаг переменной x определяется требованием по точности формирования зон гарантированного обнаружения. Необходимо учитывать, что слишком малый шаг при расчете границ выбирать нецелесообразно, поскольку на окончательное значение C_{max} влияет большое количество факторов, в том числе априорно неизвестных на момент проектирования системы, например, уровень помех.

Далее для всех точек границы зоны гарантированного обнаружения при постоянном значении высоты объекта h_u определяются массивы углов визирования на объект α_u и β_u .

На третьем этапе выполняется итерационный алгоритм пересчета границ зоны (рис. 3).

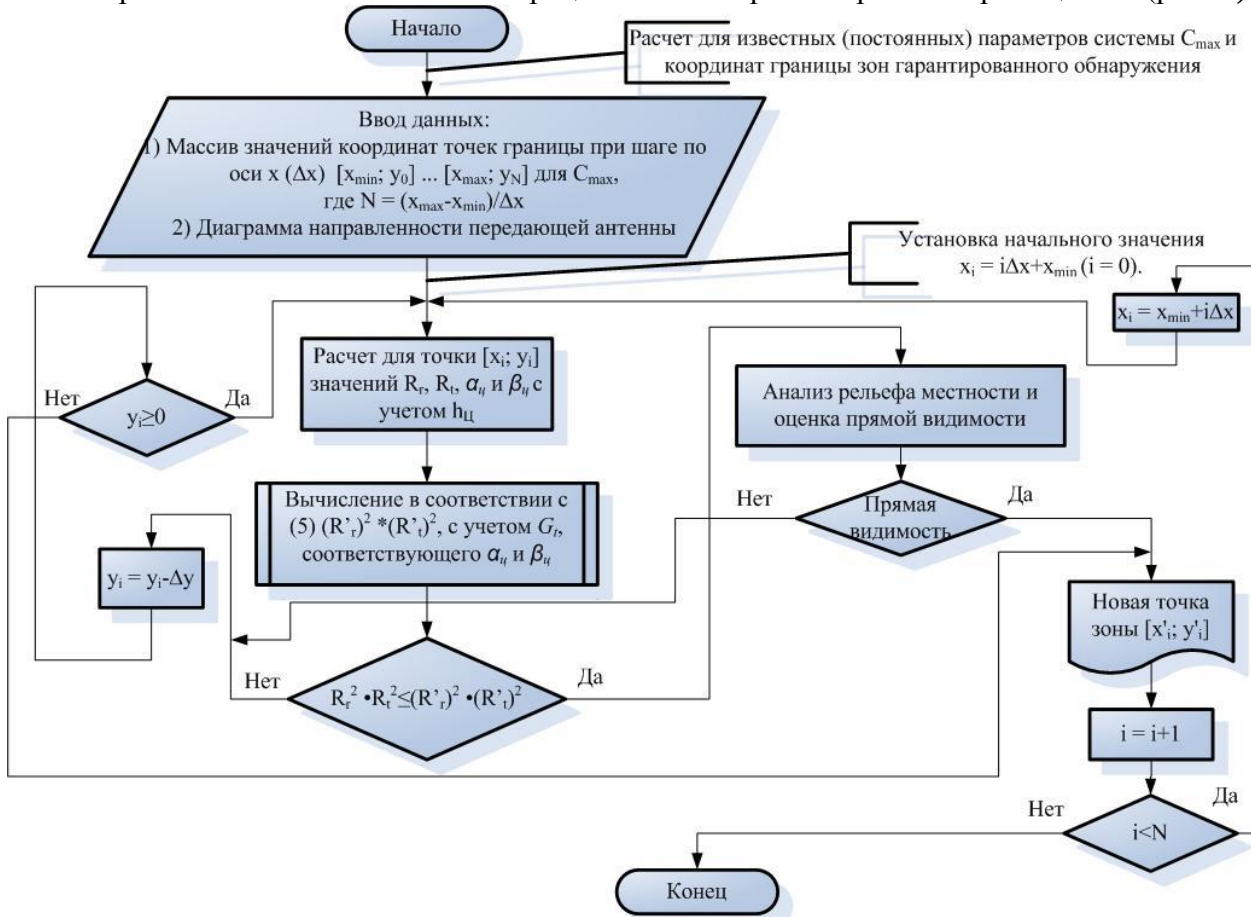


Рис. 3. Итерационный алгоритм пересчета границ зоны гарантированного обнаружения

В соответствии с указанным алгоритмом последовательно от минимального до максимального значения x предварительной границы осуществляется проверка выполнения условия

$$R_t^2 R_r^2 \leq (R'_t)^2 (R'_r)^2, \quad (7)$$

где правая часть неравенства рассчитывается в соответствии с (5) для G_t , соответствующего углам визирования на объект α_u и β_u , а левая – по тригонометрическим формулам:

$$R_t = \frac{\sqrt{(x_i + L/2)^2 + y_i^2}}{\cos(\beta_{ti})}, R_r = \frac{\sqrt{(x_i - L/2)^2 + y_i^2}}{\cos(\beta_{ri})}, \quad (8)$$

где β_{ti} – угол места в направлении на объект относительно приемной позиции.

При невыполнении неравенства (7) производится уменьшение значения y_i и повторяется операция сравнения до тех пор, пока не будет выполняться неравенство или y_i не станет равным 0. Полученное окончательное значение y_i , соответствующее x_i , является окончательной точкой границы зоны гарантированного обнаружения.

Далее, зная координаты передающей и приемной позиций B_t , A_t и B_r , A_r , в соответствии с известными методиками [10] производится пересчет координат точек зоны из местной системы в геоцентрическую.

Одной из основных переменных в (5), влияющих на окончательный результат расчетов, является минимальное значение мощности входного сигнала приемника, достаточное для принятия решения о наличии сигнала в элементе разрешения P_r .

Значение данной переменной зависит от целого ряда факторов [9]:

N_0 – спектральная плотность шума в диапазоне приема;

$(\mathcal{E}/N_0)$ – минимальное допустимое отношение энергии сигнала к плотности шума, определяемое вероятностью обнаружения и вероятностью ложной тревоги [11];

T_n – время накопления сигнала;

F_n – коэффициент шума приемника.

Для непрерывных сигналов одним из основных факторов, влияющих на P_r , является мощность основного сигнала в целевом канале P_{ctr} , определяемая уровнем боковых лепестков приемной антенной системы. Параметр P_{ctr} рассчитывается по аналогии с (2) и (3) для коэффициента усиления антенны, равного уровню боковых лепестков.

В основе обработки, как и для большинства аналогичных зарубежных и отечественных пассивных систем, лежит классический подход свертки сигнала с выхода двух каналов (опорного и целевого) с возможностью измерения доплеровской частоты. Используется свойство комплексно-сопряженного умножения сигналов, представленных в цифровом квадратурном виде [12]. Результатом операции комплексно-сопряженного умножения для идентичных сигналов, в том числе и широкополосных, но сдвинутых по частоте на f_D , является комплексный синусоидальный сигнал, частота которого равна f_D , а амплитуда равна произведению амплитуд сигналов S_o и S_{Σ} . С учетом этого необходимо учитывать, что отношение сигнал/шум – это отношение произведения опорного сигнала и сигнала, отраженного от объекта, к произведению шума опорного канала и смеси шума целевого канала и сигнала подсвета, прошедшего в целевой канал.

Допуская, что каналы являются идентичными, P_r можно представить в виде:

$$P_r = \frac{(kT_0BF_n + T_nP_{ctr}) \cdot (\mathcal{E}/N_0)}{T_n}, \quad (9)$$

где F_n – шум-фактор приемника; T_0 – температура 290° К; k – постоянная Больцмана $1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $(\mathcal{E}/N_0)$ – отношение сигнал/шум; B – ширина полосы пропускания фильтра приемника.

В (9) учитывается время накопления сигнала, поскольку после свертки энергия отклика, имеющего синусоидальную форму, занимает лишь малую часть всего анализируемого спектра.

Выражение (9) является оценочным, поскольку форма свертки сигналов также зависит от качества опорного сигнала, искажений в опорном и целевом канале, искажений, вносимых при переотражении от объекта и от посторонних предметов, ширины спектра сигнала, алгоритмов компенсации основного сигнала. Поэтому в условиях реальной работы должна производиться калибровка модели оценки текущих зон гарантированного обнаружения. По результатам проведенных работ в расчеты вносятся дополнительные калибровочные коэффициенты, обеспечивающие уменьшение ошибок местоопределения точек границ рассчитываемой зоны.

На рис. 4 представлен пример построения зон гарантированного обнаружения воздушных объектов пассивно-активной системы, включающей одну передающую и две приемных позиции с привязкой к карте местности.

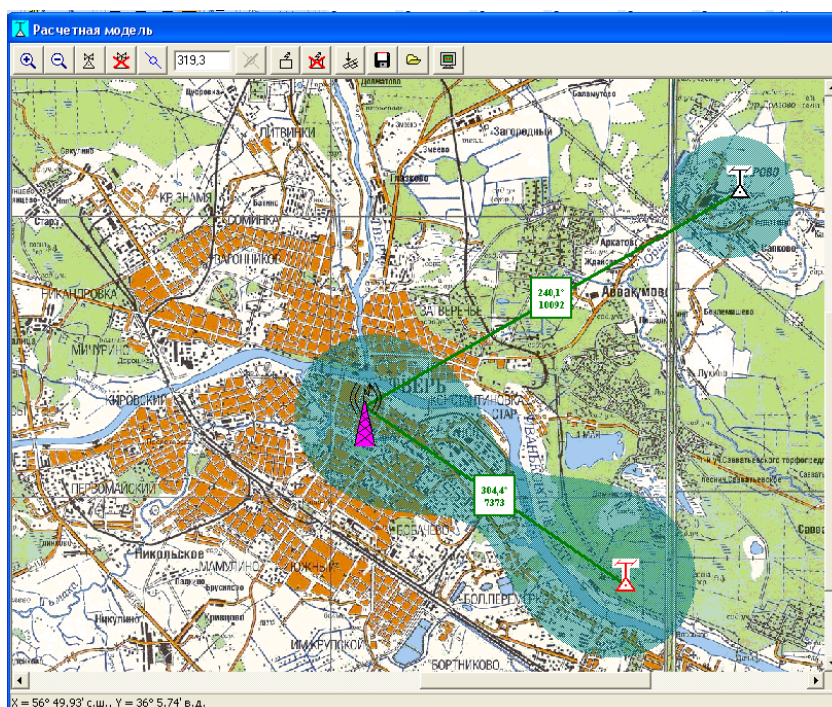


Рис. 4. Пример построения зон гарантированного обнаружения воздушных объектов

4. Заключение

Представленная методика определения зон гарантированного обнаружения воздушных объектов по отраженным от них сигналам сторонних источников пассивно-активными системами радиолокации учитывает влияние основного сигнала подсвета, условия работы пассивно-активных систем и их приемо-передающих модулей и позволяет сформировать границы контроля воздушного пространства по всем типам воздушных объектов.

Для решения данной задачи разработан итерационный алгоритм пересчета границ зоны гарантированного обнаружения с учетом указанных факторов.

Данную методику целесообразно использовать в составе модели оценки текущей эффективности пассивно-активных систем радиолокации, предназначенной для расчета их зональных, вероятностных и точностных параметров с учетом характеристик сигналов источников подсвета и возможностей приемных модулей, входящих в ее состав.

Литература

1. Gumiero F. Multistatic passive radar geometry optimization for target 3D positioning accuracy // IEEE Radar Conference (EuRAD), 2010.
2. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993.
3. Аверьянов В. Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. Минск: Наука и техника, 1978.
4. Рогожников Е. В., Ушарова Д. Н., Убайчин А. В. Использование сигналов современных телекоммуникационных систем в пассивных радиолокационных системах // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323, № 5. С. 44–48.

5. *Семашко П. Г.* Исследование зон радиолокационного наблюдения объектов в электромагнитном поле телевизионных передатчиков. Метод. указания к лаборатор. работе по дисциплине «Радионаблюдение» для студентов специальности «Радиоэлектрон. защита инфор.» днев. формы обучения. Минск: БГУИР, 2012.
6. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Сов. Радио, 1970.
7. Справочник по радиолокации под ред. Н. Сколника Т. 1. М.: Сов. Радио, 1976.
8. *Черняк В. С., Заславский Л. П., Осипов Л. В.* Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. № 1. 1987.
9. *Белоцерковский Г. Б.* Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Сов. Радио, 1975.
10. *Морозов В. П.* Курс сфероидической геодезии. М.: Недра, 1979.
11. *Караваев В. В., Сазонов В. В.* Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987.
12. *Jonas Myhre Christiansen.* DVB-T based Passive Bistatic Radar. Master of Science in Engineering Cybernetics: Norwegian University of Science and Technology, 2009.

Статья поступила в редакцию 10.06.2016

Батчев Сергей Александрович

к.т.н., заместитель начальника факультета по учебной работе Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники (162622, Вологодская обл., Череповец, Советский пр-т, 126), e-mail: bsa2504@yandex.ru.

Король Олег Владимирович

д.в.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (170022, Тверь, ул. Жигарева, д. 50), e-mail: korol950@mail.ru.

Тимаков Дмитрий Аркадьевич

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник НИЦ (г. Тверь) ЦНИИ ВВКО Минобороны России (170026, Тверь, наб. А. Никитина, д. 32), e-mail: dimtim@km.ru.

Calculation procedure of aerial objects guaranteed detection zones via passive-active radar system

Sergey A. Batchev, Oleg V. Korol, Dmitry A. Timakov

This article considers the technique for determining the areas of guaranteed detection of air targets via reflected signals from these external sources with passive-active radar systems. The technique, in contrast to the known approaches, takes into account the impact of the main signal illumination, operating conditions of passive-active systems and its transceiver modules as well as other factors thereby providing improved accuracy for calculating the boundary coordinates of the airspace control zone.

Keywords: passive radar, detection of aerial objects, airspace control zone.