

УДК 621.396.663

МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ БОРТОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОМОЛЧАЩИХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ

С. Ф. Боев¹, А. В. Тимошенко¹, И. В. Чеботарь², М. Т. Балдычев²

¹ОАО «РТИ», 127083, г. Москва, ул. 8-го Марта, 10-11

²Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники,
162622, г. Череповец, Советский проспект, д. 126

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2017 г.

Аннотация. Применяемые в радиотехнических комплексах (РТК) системы распознавания воздушных объектов (ВО), основаны на обработке данных технического анализа излучений их бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Методы и алгоритмы, на которых основано функционирование этих систем, не позволяют осуществлять распознавание неизлучающих (радиомолчащих) ВО. В статье представлен новый метод комплексного применения бортовых радиотехнических и радиолокационных комплексов (РЛК) для распознавания радиомолчащих воздушных объектов в условиях радиоэлектронного подавления. Метод заключается в построении воздушной активно-пассивной системы и последующем выявлении на приемной части этой системы признаков распознавания, ранее не используемых в пассивных радиотехнических комплексах (вектор скорости и эффективная площадь рассеяния ВО). Выявление признаков распознавания осуществляется за счет комплексной обработки пеленговой информации и результатов спектрального анализа параметров внутриимпульсной модуляции сигналов радиолокатора подсвета с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), отраженных от радиомолчащих ВО.

Ключевые слова: воздушный объект, режим «полного радиомолчания», бортовой радиотехнический комплекс, бортовой радиолокационный комплекс, активно-пассивная система, распознавание.

Abstract. The systems of air objects (AO) recognition used in radio engineering complexes (RTK) are based on data handling of the technical analysis of avionics radiations. Methods and algorithms used in these systems don't allow to realize radiationless (radio silent) recognition of AO.

The article discloses the new method based on complex application of onboard radio engineering and radar complexes to recognize radio silent air objects in the conditions of provided radio-electronic suppression. The main idea is to detect the recognition signs, which were not used earlier in passive systems of radio engineering monitoring. That signs are velocity vector and effective scattering AO area, that are received by complex processing of bearing information and by spectrum analysis of intra pulse modulation parameters of sublight radar signals reflected from radio silent AO with the sweep frequency modulation (SFM).

Keywords: air object, radio silent, onboard radio engineering and radar complexes, multiple-stations system, recognition system.

Радиотехнические комплексы обладают высокой степенью скрытности работы, поэтому задача их подавления для противника существенно усложняется. Однако их принципиальным недостатком является невозможность обнаружения неизлучающих (радиомолчащих) воздушных объектов. Радиолокационные комплексы способны обнаруживать подобные объекты, однако они в значительной степени подвержены влиянию преднамеренных активных шумовых помех, формируемых средствами радиоэлектронного подавления (РЭП), что существенно ограничивает их возможности по обнаружению ВО на требуемой дальности.

Результаты экспериментальных исследований и известных научных работ [1, 2, 3, 4] в области активно-пассивной радиолокации в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки показали, что наилучших показателей живучести и скрытности работы можно добиться, используя кооперируемые источники подсвета (ИП), размещаемые на воздушных носителях, в том числе на беспилотных летательных аппаратах (БЛА) (рис. 1).

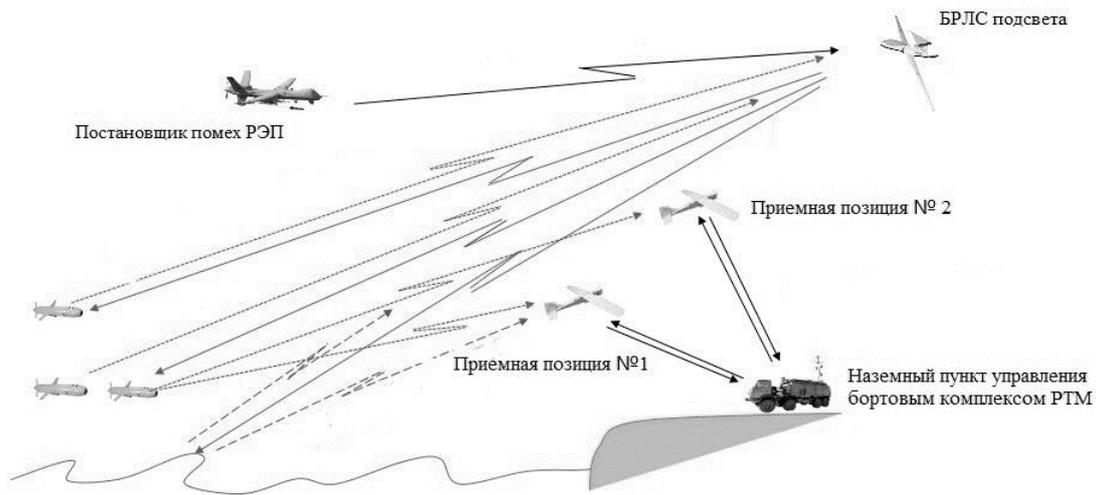


Рис. 1. Обнаружение воздушного объекта бортовыми РТК и РЛК в условиях РЭП

Очевидно, что в случае применения ВО режима «полного радиомолчания», для бортового радиотехнического комплекса единственным источником информации о ВО может являться отраженный от него сигнал бортового радиолокационного комплекса, используемого в качестве подсвета. Таким образом, одним из направлений решения указанной проблемы является объединение возможностей средств радиолокации и радиотехнического мониторинга путем построения активно-пассивных систем.

В перспективных бортовых радиолокационных комплексах в качестве зондирующих сигналов предполагается использование различных типов сигналов сложной структуры, таких как сигналы с линейно-частотной модуляцией [5]. У ЛЧМ сигналов несущая частота изменяется в пределах длительности импульса по линейному закону со скоростью $\Delta f_0 / \tau_u$, где Δf_0 – девиация угловой частоты. При отражении ЛЧМ радиоимпульса от движущегося объекта за счет влияния эффекта Доплера изменяется частота радиоимпульса: $f_0 = \pm 2V_r / \lambda$, где V_r – радиальная скорость объекта, λ – длина волны. Следовательно, меняется и скорость изменения частоты внутри импульса $\gamma = 2f_0 / \tau_u$, где τ_u – длительность отраженного радиоимпульса.

Оценка особенностей параметров внутриимпульсной модуляции зондирующего и отраженного от воздушного объекта ЛЧМ сигнала [6] показала, что скорость изменения частоты γ_2 внутри отраженного от объекта

радиоимпульса, отличается от скорости изменения частоты γ_1 зондирующего радиоимпульса на величину эквивалентную радиальной скорости объекта относительно приемной позиции РТК [6]:

$$V_r = \frac{c}{4} \left[1 - \left(\frac{\gamma_1 - \gamma_{разн}}{\gamma_1} \right) \right] \quad (1)$$

Кроме того, в рамках исследования проведенного авторами статьи в [6,7] установлено, что в результате обработки прямого и отраженного ЛЧМ сигнала на двух и более приемных позициях РТК возможно определение вектора скорости и эффективной площади рассеяния ВО. Эти характеристики в настоящее время успешно используются в качестве признаков распознавания ВО в активных радиолокационных системах, однако задача их измерения и использования в пассивных радиотехнических комплексах с источником подсвета для распознавания радиомолчащих ВО ранее не ставилась и не решалась.

Основные этапы разработанного метода представлены на рисунке 2. Суть разработанного метода заключается в последовательном решении задач по оценке параметров эхо-сигналов, полученных в результате комплексного применения бортовых РТК и РЛК, и построению признакового пространства для распознавания радиомолчащих ВО.

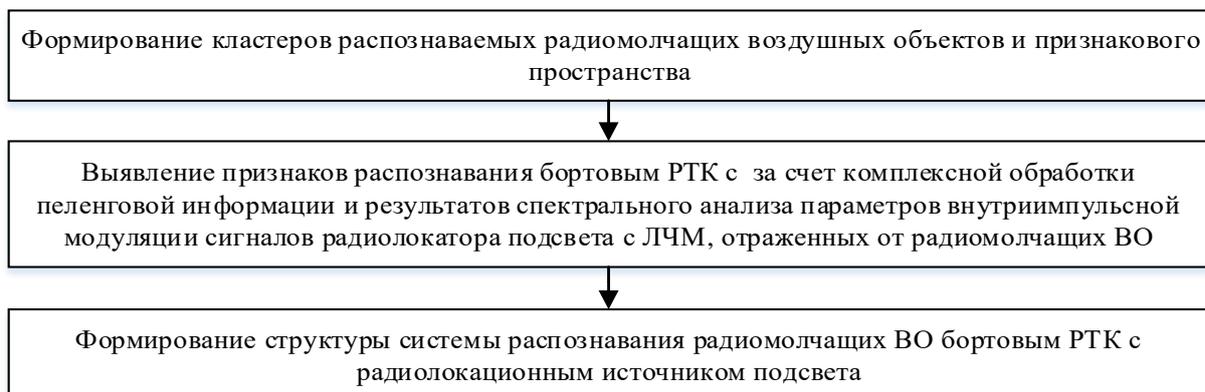


Рис. 2. Метод комплексного применения бортовых радиотехнических и радиолокационных комплексов для распознавания радиомолчащих воздушных объектов в условиях радиоэлектронного подавления

Формирование кластеров распознаваемых радиомолчащих воздушных объектов и признакового пространства.

В качестве первого информативного признака выбрана действительная скорость обнаруженного ВО V_0 [7]. Проведенный в [10,11,12] анализ особенностей применения воздушных объектов над морскими акваториями показал, что для обеспечения скрытности их передвижения, помимо применения режима «полного радиомолчания», возможно совершение маневра на сверхмалых высотах. На рисунке 3 представлена диаграмма скоростных параметров различных воздушных объектов, осуществляющих полет на сверхмалой высоте.

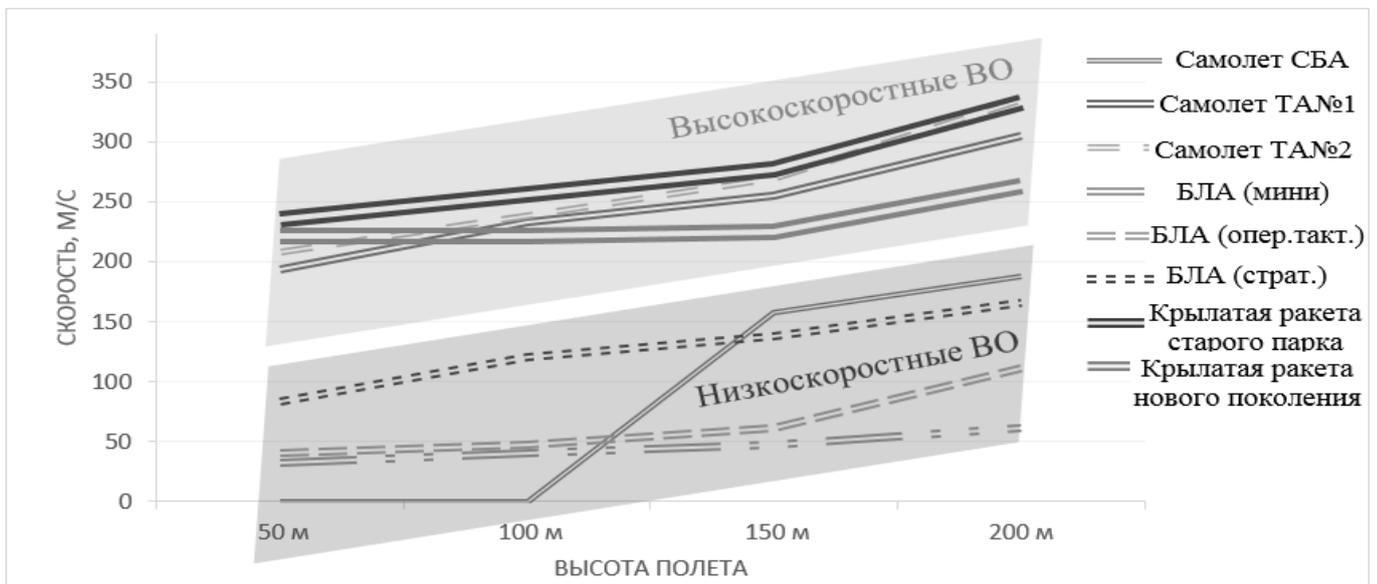


Рис. 3. Зависимость скорости полета воздушных объектов различных кластеров от высоты полета ВО (в эшелоне сверхмалых высот)

Из графика видно, что рассмотренные в качестве примера радиомолчащие воздушные объекты, перемещающиеся на сверхмалых высотах, можно разделить на два условных кластера: высокоскоростные ($V \geq 550 \text{ км/ч}$) и низкоскоростные ($V \leq 550 \text{ км/ч}$).

По причине того, что в полученные кластеры попадают сразу несколько типов объектов, с целью исключения возникающей неоднозначности, в качестве второго информативного признака выбрана амплитуда импульса эхо-сигнала обнаруженного объекта, которая прямо пропорциональна ЭПР

наблюдаемого объекта.

Кроме координатно-информативных параметров, бортовой РТК способен регистрировать информацию об отражающих свойствах объектов – их эффективную площадь рассеяния.

На рисунке 4 приведен пример круговых диаграмм ЭПР крупногабаритного самолета и малоразмерного воздушного объекта типа «крылатая ракета», который наглядно демонстрирует их существенные отличия.

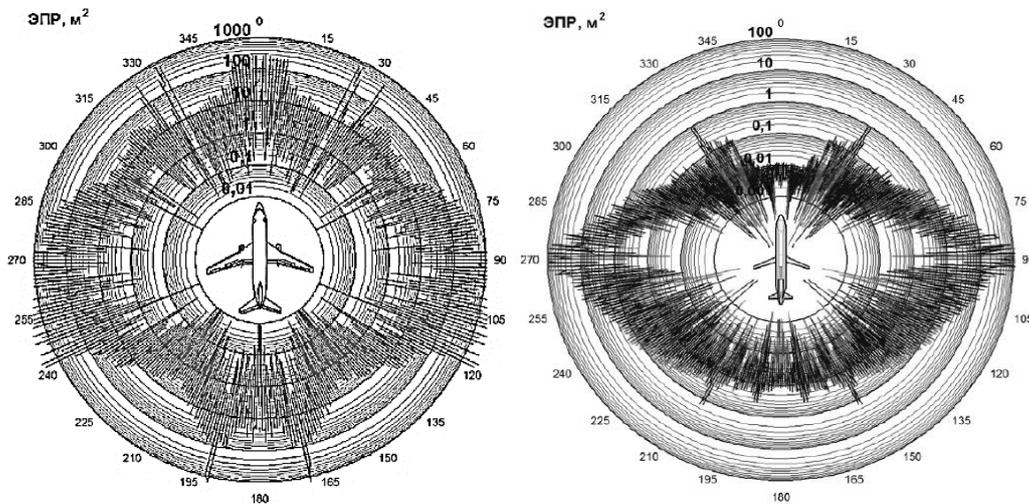


Рис. 4. Круговые диаграммы медианных ЭПР самолета и малоразмерного ВО

Таким образом, на первом этапе метода определена область признаков пространства, включающая два новых для пассивных радиотехнических комплексов признака распознавания: действительную скорость ВО (V_0) и его ЭПР ($\sigma_{\text{ВО}}$). Указанные признаки распознавания позволяют отнести обнаруженный ВО к одному из четырех условных кластеров: «высокоскоростные ВО с малой ЭПР», «высокоскоростные ВО с высокой ЭПР», «низкоскоростные ВО с малой ЭПР» и «низкоскоростные ВО с высокой ЭПР». В контексте настоящей статьи, особый интерес представляет кластер «высокоскоростные ВО с малой ЭПР».

На этапе выявления признаков распознавания (действительной скорости и ЭПР ВО) бортовым РТК осуществляется комплексная обработка пеленговой информации и результатов спектрального анализа параметров

внутриимпульсной модуляции сигналов радиолокатора подсвета с ЛЧМ, отраженных от радиомолчащих ВО.

Для определения действительной скорости ВО в [7] авторами статьи разработан алгоритм (рис. 5), базирующийся на измерении радиальной скорости ВО за счет оценки отклонения скорости линейного изменения частоты (γ) внутри ЛЧМ-импульса, отраженного от движущегося ВО [6].

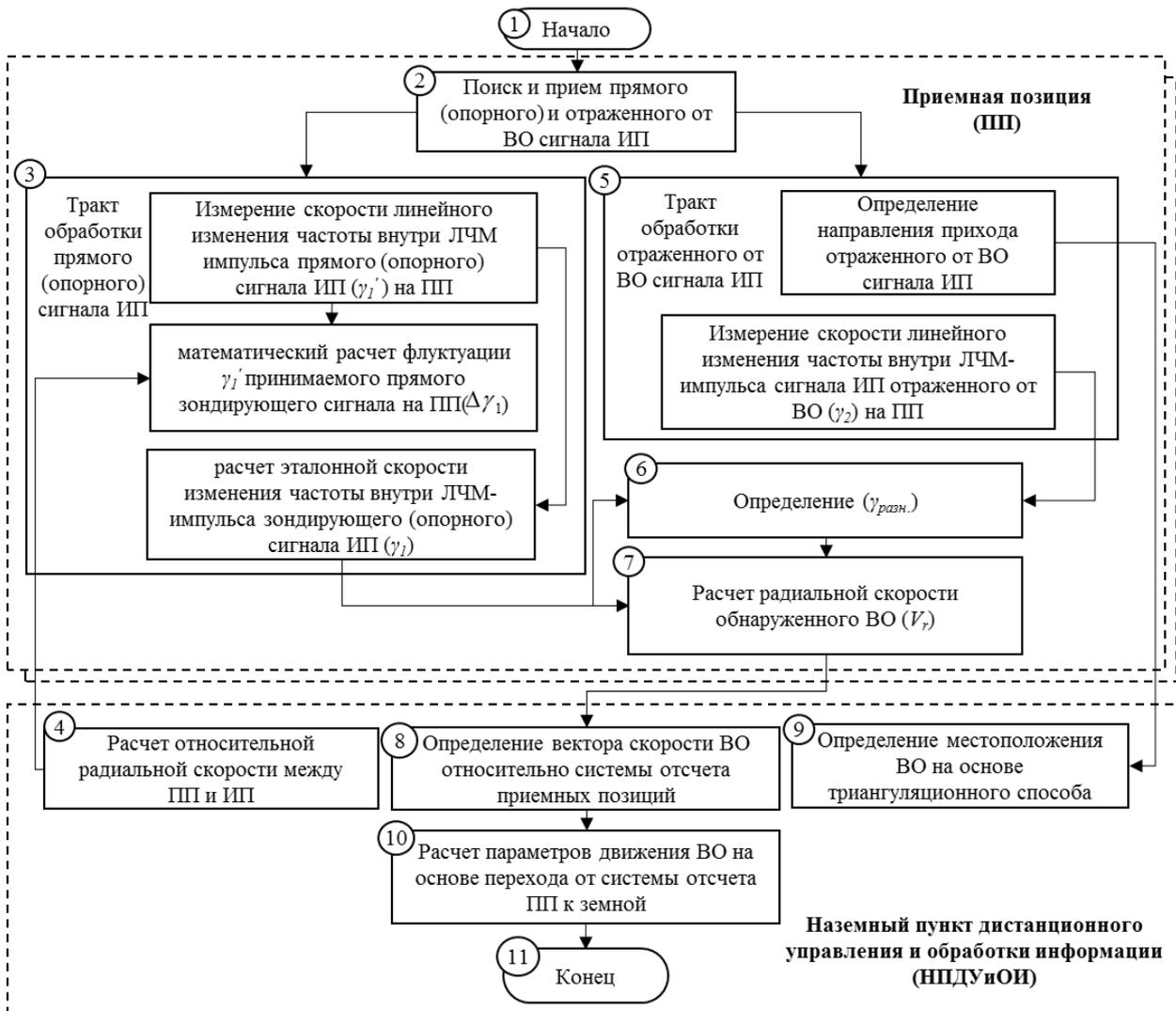


Рис. 5. Алгоритм расчета параметров движения обнаруженного ВО с блоком компенсации флуктуаций γ_i

Вектор скорости обнаруженного ВО определяется путем совмещения радиальных составляющих обнаруженного воздушного объекта, рассчитанных на первой и второй приемной позиции, функционирующих в единой системе отсчета. Совмещение радиальных составляющих возможно, когда γ_1 принятого

ЛЧМ-импульса прямого зондирующего (опорного) сигнала будет одинакова для обеих позиций, т.е. при синхронном по скорости и направлению движения приемных позиций относительно ИП, а также имеющих с ним одинаковый бистатистический угол. Источник подсвета, в свою очередь, должен быть статичен.

Добиться выполнения этого условия на практике сложно, поэтому был разработан блок компенсации (рис. 5) флуктуации γ_1 внутри ЛЧМ-импульса принятого на приемных позициях прямого зондирующего (опорного) сигнала ИП, вызванной асинхронным движением приемных позиций и источника подсвета.

Имея ввиду, что ИП в рассматриваемом бортовом РТК является кооперируемым (т.е. известны его действительная скорость, местоположение и маршрут движения, аналогичные данные для всех приемных позиций (ПП) комплекса), представляется возможным математически рассчитать и оценить флуктуации γ_1 принимаемого прямого зондирующего сигнала на первой ($\Delta\gamma_1$) и второй ($\Delta\gamma_2$) приемной позиции (рис. 6), с целью их последующей компенсации.

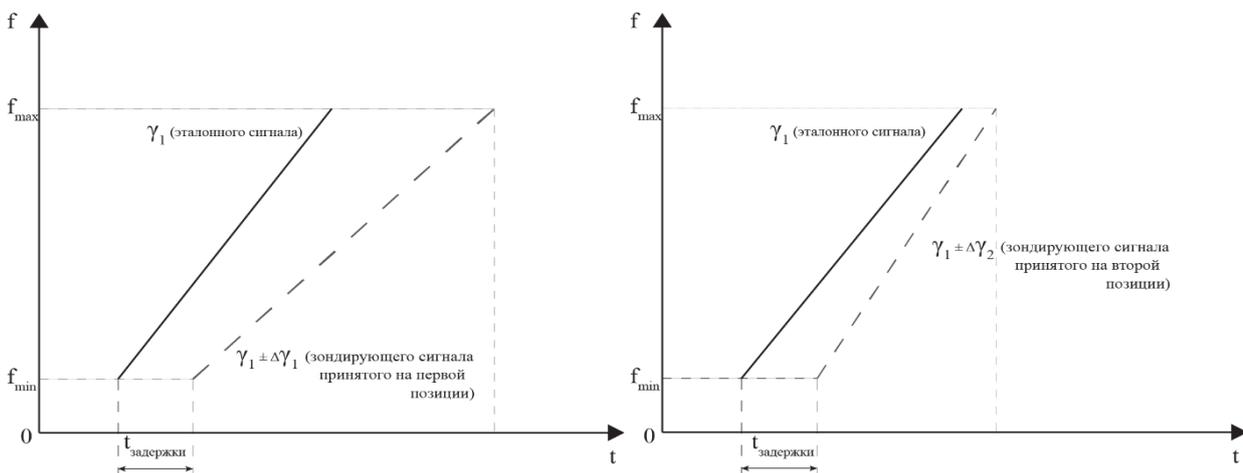


Рис. 6. Иллюстрация отклонения значений скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса зондирующего сигнала ИП, принятого на ПП1 и ПП2

Работа блока компенсации $\Delta\gamma_1$ и $\Delta\gamma_2$ заключается в последовательном выполнении трех шагов.

1. Расчет относительной радиальной скорости между источником подсвета и приемной позицией (рис. 7). Расчет осуществляется на основе анализа направления движения ИП и ПП, а также их действительных скоростей. Для определения радиальной скорости ИП относительно ПП, необходимо найти их радиальные скорости относительно друг друга, поочередно принимая за неподвижный объект ПП и ИП.

Исходя из определения термина «радиальная скорость», который определяется как проекция скорости точки (объекта) на прямую, соединяющую ее с выбранным началом координат, для нахождения относительной радиальной скорости представляется необходимым последовательно выбирать за начало координат ИП и ПП. Затем найденные значения складываются или вычитаются в зависимости от сближения или удаления ПП и ИП относительно друг друга.

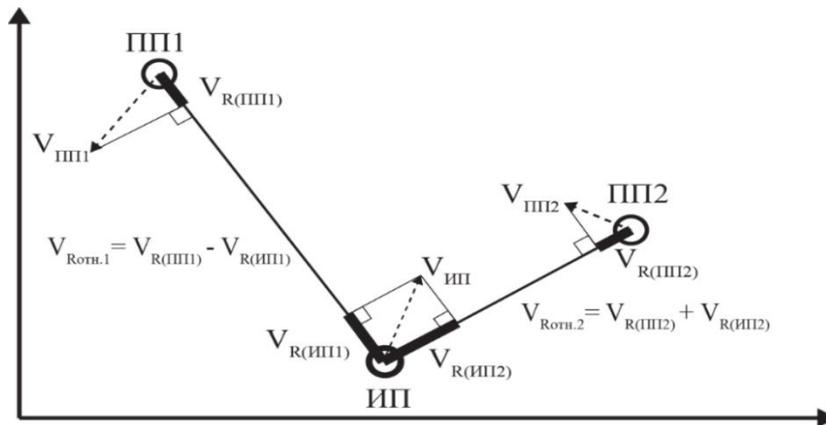


Рис. 7. Расчет относительной радиальной скорости ПП и ИП

2. Расчет $\Delta\gamma_1$ и $\Delta\gamma_2$ для соответствующей позиции. Данная операция осуществляется путем определения γ_1' и γ_2' (скорость изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса прямого зондирующего сигнала ИП принятого на первой и второй ПП).

$$\gamma_1' = 2f_{д1} / \tau \quad (2)$$

$$\gamma_2' = 2f_{д2} / \tau. \quad (3)$$

Зная значение относительной радиальной скорости между ПП1 и ИП, ПП2 и ИП можно найти искомое отклонение $\Delta\gamma_1$ и $\Delta\gamma_2$ по формулам:

$$\Delta\gamma_1 = \pm \frac{2V_{r(\text{отн } 1)}\gamma_1'}{c} \quad (4)$$

$$\Delta\gamma_2 = \pm \frac{2V_{r(\text{отн } 2)}\gamma_2'}{c} \quad (5)$$

3. Расчет эталонной скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса зондирующего (опорного) сигнала ИП за счет компенсации флуктуаций $\Delta\gamma_1$ и $\Delta\gamma_2$ на первой и второй позиции, соответственно. Для этого необходимо из (к) измеренных значений γ_1' и γ_2' вычесть (прибавить) рассчитанные математически (на основе анализа относительного движения ПП и ИП) флуктуации $\Delta\gamma_1$ и $\Delta\gamma_2$:

$$\gamma_1 = \gamma_1' \pm \Delta\gamma_1 \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \gamma_2' \pm \Delta\gamma_2 \quad (7)$$

С целью проверки работы представленного алгоритма было разработано программное обеспечение [14], состоящее из пакета программ с использованием среды LabVIEW 2014, позволяющее моделировать и производить расчет действительной скорости и курса движения обнаруженного объекта в условиях динамичности приемных позиции РТК и ИП.

Результаты имитационного моделирования подтвердили возможность получения с помощью разработанного алгоритма действительной скорости и курса движения ВО с учетом параметров движения бортового РТК и кооперируемого ИП.

Задача определения ЭПР воздушного объекта бортовым РТК решается за счет сопоставления измеренных параметров отраженного от ВО сигнала с параметрами прямого зондирующего сигнала источника подсвета (с учетом дальности до объекта и условий его наблюдения). Параметром сигнала, характеризующим указанный признак распознавания, является амплитуда ЛЧМ радиоимпульса, отраженного от ВО.

При расчетах учитывалось, что уровень сигнала, отраженного от одного и

того же ВО, находящегося на заданном удалении от бортового РТК (при одинаковой мощности и несущей частоте зондирующего сигнала), может иметь существенные различия при различных ракурсах относительно источника подсвета и приемных позиций. Об этом свидетельствует представленная на рисунке 8 зависимость уровня мощности эхо-сигнала на приемной позиции бортового РТК при фиксированной мощности передатчика ИП ($P_{ИП}=10$ кВт) и несущей частоте ($F_{нес}=9$ ГГц) зондирующего сигнала, а также дальности до ВО ($R_1=R_2=20$ км) и угле разноса передающей и приемной позиции в горизонтальной плоскости (бистатический угол, $\theta_б=45^\circ$). Расчеты проведены с использованием программного обеспечения [15], выполненного в среде LabVIEW 2014.

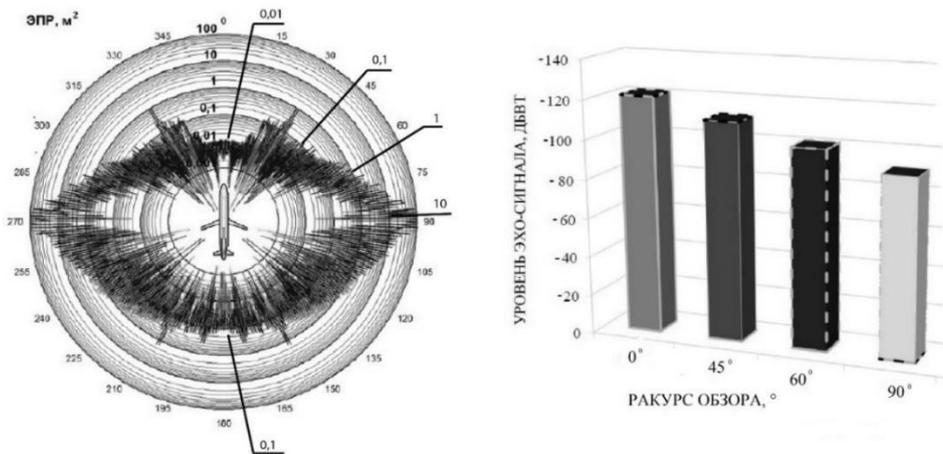


Рис. 8. Уровень эхо-сигнала от ВО на приемной позиции комплекса РТМ при различных ракурсах обзора относительно источника подсвета.

С помощью уравнения бистатической радиолокации, авторами статьи в [15], была выведена формула определения ЭПР ВО ($\sigma_{ВО}$) бортовым РТК (8):

$$\sigma_{ВО} = \frac{CG_2\lambda^2 P_{np} V_1^2(R_1) V_2^2(R_2)}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2}, \quad (8)$$

где $C = P_n \lambda^2 G^2(\varepsilon, \beta) L_{II} / (4\pi)^3$ – энергетический параметр источника подсвета (где $G(\varepsilon, \beta)$ – нормированная ДНА по мощности в свободном пространстве; λ – длина волны зондирующего сигнала; R, ε, β – сферические координаты (ракурс) объекта относительно источника подсвета); $V(R)$ – функция ослабления; R_1 и R_2 – расстояния от ИП до объекта и от объекта до приемной позиции,

соответственно.

В данном случае точность измерения ЭПР будет зависеть от точности измерения амплитуды импульса эхо-сигнала на приемной позиции бортового РТК, а также от точности измерения ракурса объекта и его местоположения.

Таким образом, в рамках разработанного метода предложены новые процедуры, реализация которых в бортовом РТК во взаимодействии с радиолокатором подсвета позволит определять действительную скорость и ЭПР обнаруженного радиомолчащего ВО, являющихся признаками распознавания ВО.

На третьем этапе метода формируется структура системы распознавания радиомолчащих ВО бортовым РТК с радиолокационным источником подсвета.

Система распознавания реализуется аппаратно-программным способом, в соответствии с которым первичные признаки распознавания (параметры прямого и отраженного от ВО ЛЧМ сигнала) измеряются аппаратным методом с помощью измерительной системы (аппаратуры приема и анализа), а на программную часть возложены задачи формирования и хранения эталонных описаний классов, обработки признаков и принятие решения (рис.9).

В системе реализован вероятностный метод распознавания, основанный на теории статистических решений. В целях упрощения процедур формирования эталонных кластеров и экономии вычислительного ресурса ЭВМ приняты следующие допущения:

1. Признаки распознавания являются нормально распределенными статистически независимыми величинами.
2. Априорные вероятности появления ВО различных кластеров считаются неизвестными и в алгоритме принятия решения не используются.

Поскольку в системе распознавания принята упрощенная вероятностная модель, то эталонные описания кластеров представляют собой набор (вектор) математических ожиданий и дисперсий нормальных законов распределения признаков, полученных на этапе обучения системы.

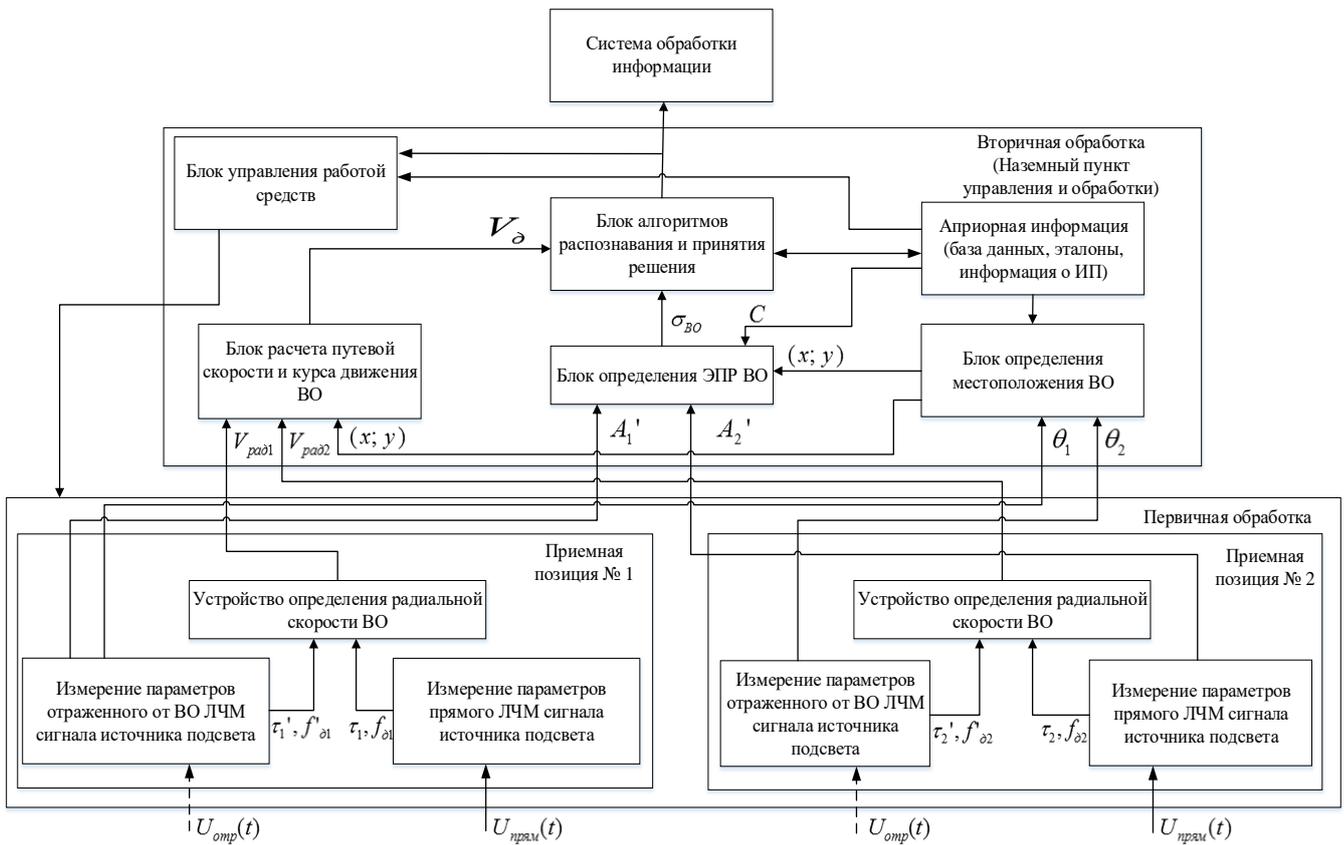


Рис. 9. Система распознавания радиомолчащего ВО бортовым РТК с использованием ЛЧМ сигнала подсвета

Эталонные описания могут вводиться в готовом виде в память ЭВМ оператором, либо формироваться внутри системы по результатам статистической обработки многократных измерений признаков. В качестве первичных параметров распознавания используются типовые характеристики принимаемых сигналов: амплитуда и длительность импульса, ширина спектра, а также азимутальное направление прихода отраженного от ВО ЛЧМ сигнала.

В основу алгоритма распознавания положено статистическое решающее правило, фиксирующее ошибки первого и второго рода.

На этапе обучения системы распознавания вводятся или вычисляются с помощью ЭВМ оценки математического ожидания $\hat{m}_{\alpha_{ЭТ}}$ и среднеквадратическое отклонение $\hat{\sigma}_{\alpha_{ЭТ}}$ по каждому из признаков распознавания, т.е. формируются эталонные образы ВО.

По известным $\hat{m}_{\alpha_{ЭТ}}$ и $\hat{\sigma}_{\alpha_{ЭТ}}$ вычисляются абсолютные значения

пороговых величин признаков

$$\alpha_{\text{пор}} = \hat{m}_{\alpha_{\text{ЭТ}}} \pm k \hat{\sigma}_{\alpha_{\text{ЭТ}}}, \quad (9)$$

где k может принимать значения 1, 2 или 3, что соответствует вероятности ошибки 0,1588; 0,0228 и 0,0014.

Собственно, процесс распознавания ВО включает три этапа.

На первом этапе по каждому признаку распознавания α обнаруженного сигнала последовательно для всех эталонов вычисляется значение функции

$$\varphi(\alpha) = \begin{cases} \Delta, \text{ при } \left| \hat{m}_{\alpha_{\text{ЭТ}}} - \hat{m}_{\alpha} \right| \leq \Delta \hat{\sigma}_{\alpha_{\text{ЭТ}}}; \\ 0, \text{ при } \left| \hat{m}_{\alpha_{\text{ЭТ}}} - \hat{m}_{\alpha} \right| > \Delta \hat{\sigma}_{\alpha_{\text{ЭТ}}}, \end{cases} \quad (10)$$

где \hat{m}_{α} - среднее значение выборки объема N , полученной как результат однократных измерений признака α ВО неизвестного m класса

$$\hat{m}_{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (11)$$

Величина Δ находится из выражения

$$\Delta = 1 + INT \left(\frac{\left| \hat{m}_{\alpha} - m_{\alpha_{\text{ЭТ}}} \right|}{\sigma_{\alpha_{\text{ЭТ}}}} \right), \quad (12)$$

где INT – оператор выделения целой части числа.

Указанная процедура сводится к установлению факта попадания среднего значения результатов измерения признака в один из интервалов, кратный $\sigma_{\alpha_{\text{ЭТ}}}$.

При получении для какого-либо эталона значения функции $\varphi(\alpha)$, равного нулю (т.е. $\hat{m}_{\alpha} > m_{\alpha_{\text{ЭТ}}} + 3\sigma$) по любому признаку α , рассмотрение текущего эталона ВО прекращается и осуществляется переход к следующему эталону.

На втором этапе по всем значениям функции $\varphi(\alpha)$, полученным по

совокупности признаков и эталонов, вычисляется вероятность правильного распознавания $P_{расп}$ класса и типа ВО. Фактически эти вероятности рассчитаны заранее на этапе разработки системы распознавания и хранятся в памяти ЭВМ.

На третьем этапе осуществляется сравнение $P_{расп}$ и $P_{пор}$, где $P_{пор}$ – пороговое значение вероятности правильного распознавания, вычисленное для заданных интервалов Δ при фиксированных вероятностях ошибок.

Вероятности $P_{пор}$ заданы на этапе проектирования системы и хранятся в постоянном запоминающем устройстве ЭВМ.

В случае выполнения равенства $P_{расп} \geq P_{пор}$ принимается решение о присвоении распознаваемому ВО условного номера эталона, для которого происходит сравнение.

Если окажется, что $P_{расп} < P_{пор}$, то процесс распознавания повторяется сначала для следующего по текущему номеру эталона.

Заключение

Таким образом, в статье предложен новый метод комплексного применения бортовых радиотехнических и радиолокационных средств для распознавания радиомолчащих воздушных объектов в условиях радиоэлектронного подавления. Суть разработанного метода заключается в последовательном выполнении этапов по оценке параметров эхо-сигналов, полученных в результате комплексного применения бортовых РТК и РЛК, и выявлении признаков распознавания, ранее не используемых в пассивных радиотехнических комплексах, таких как вектор скорости и эффективная площадь рассеяния ВО. Сформирована система распознавания радиомолчащих ВО, реализуемая аппаратно-программным способом на основе выявленных признаков.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (№ НШ-6831.2016.8)

Литература

1. Кондратьев В.С., Котов Ф.А., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь. 1986. 362 с.

2. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. Минск: Наука и техника. 1978. 184 с.
3. Боев С.Ф., Гудков А.А., Чеботарь И.В. и др. Обеспечение живучести радиотехнических систем за счет повышения их структурной устойчивости // Научные технологии. 2016. № 12.
4. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. М.: Воениздат. 2001. 456 с.
5. Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешников В. С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. М.: Радио связь. 1983.
6. Боев С.Ф., Хазов П.Н., Чеботарь И.В. Метод моноимпульсного измерения радиальной скорости объектов в радиолокационной системе с линейной частотной модуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. №12. С. 48-51.
7. Балдычев М.Т., Коротков В.А., Чеботарь И.В. и др. Алгоритм определения действительной скорости и курса движения высокоскоростных малоразмерных объектов воздушным комплексом радиотехнического мониторинга с источником подсвета // М.: Научные технологии. № 12. 2016.
8. Горелик А.Л., Барабаш Ю.Л., Кривошеев О.В. и др. Селекция и распознавание на основе локационной информации. М.: Радио и связь. 1990. 240с.
9. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа. 2004. 261с.
10. Балдычев М.Т., Ромашов В.А. Анализ существующих подходов к классификации беспилотных летательных аппаратов военного назначения. // М.: ЦВНИ МО РФ. Сборник рефератов депонированных рукописей. Серия Б. Выпуск № 114, 2016.
11. Стратегическая авиация ВВС США: Способы боевого применения: [учеб. пособие] / [Н. П. Тимофеев, Ю. П. Самохвалов, Ю. Ф. Куприянов, С. Г. Чурбанов; науч. ред. Н. П. Тимофеев] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал.федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 104 с.
12. Тактическая авиация ВВС США и НАТО в локальных конфликтах: [учеб. пособие] / [Н. П. Тимофеев, Ю. Ф. Куприянов, Ю. П. Самохвалов, С. Г. Чурбанов; науч. ред. Н. П. Тимофеев]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал.федер. ун-т. - Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. - 176 с.

13. Сухаревский О.И., Василец В.А., Кукобко С.В. и др. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография. Харьков: ХУПС, 2009, 468с.
14. Балдычев М.Т., Чеботарь И.В. Моделирование и расчет параметров движения воздушных объектов // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017610702/. 2017.
15. Балдычев М.Т., Чеботарь И.В. Модель эхо-сигнала от малоразмерных низколетающих объектов на фоне морской поверхности // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016660966. 2016.

Ссылка на статью:

С.Ф.Боев, А.В.Тимошенко, И.В.Чеботарь, М.Т.Балдычев. Метод комплексного применения бортовых радиотехнических и радиолокационных средств для распознавания радиомолчащих воздушных объектов в условиях радиоэлектронного подавления. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr17/8/text.pdf>