

Г. А. Профатилова, Г. Н. Соловьев,  
В. С. Ефремов, А. Г. Соловьев

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СЕЛЕКЦИИ ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ В РЛС УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

*Приведены результаты экспериментального исследования спектров пачек эхо-сигналов на выходе системы селекции движущихся тел и двухкоординатных РЛС серий “Утес” и “Ли́ра-А10Т”. Рассмотрен метод дополнительной спектральной обработки пачек эхо-сигналов на выходе системы селекции движущихся тел, позволяющий повысить помехозащищенность этих РЛС. Результаты испытаний РЛС, модернизированной в соответствии с предложенным методом, показали, что поток помеховых координатных точек, передаваемых на траекторную обработку, снижается в 10–30 раз.*

**E-mail:** solovgrigory@rambler.ru; solovgr@mx.bmstu.ru

**Ключевые слова:** селекция движущихся целей, РЛС, управление воздушным движением, спектр вобулированной пачки, оценка доплеровской скорости.

В последнее десятилетие в составе радиолокационных комплексов (РЛК) системы управления воздушным движением (УВД) нашли применение современные первичные радиолокаторы серий “Утес”, “Ли́ра-А10” с полностью цифровой обработкой сигналов. Эти РЛС имеют косекансную диаграмму направленности антенны (ДНА) в угломестной плоскости от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . Луч таких РЛС неизбежно захватывает подстилающую поверхность. В результате в значительной части зоны обзора приходится использовать системы селекции движущихся целей (СДЦ). Несмотря на большую глубину подавления пассивных помех в зоне режекции (более 60 дБ) число ложных отражений от пассивных помех при работе в тяжелых метеоусловиях приводит к неприемлемо большому числу ложных трасс, завязываемых системой траекторной обработки по остаткам широкополосных пассивных помех. Цель настоящей работы – разработка и исследование метода дополнительной обработки сигналов для снижения числа обнаружений ложных трасс по остаткам широкополосных пассивных помех.

Наличие в зоне обзора кроме отражений от местности и целей еще и отражений от метеобразований приводит к многомодальным спектрам принимаемых эхо-сигналов, усложняющим разработку эффективных систем СДЦ. Большая дальность обнаружения этих РЛС (300...400 км) и достаточно высокий темп обзора (5...10 с) дают мало времени для контакта с воздушным объектом (ВО). Кроме того,

существуют ограничения по быстродействию и объему аппаратуры. Это не позволяет использовать для обработки в системе СДЦ более 4–8 периодов повторения эхо-сигналов.

В рассматриваемых РЛС используется композитный зондирующий сигнал (ЗС). В программе обзора чередуются длинные и короткие периоды повторения ЗС следующим образом: восемь зондирований простым импульсным (ИМ) сигналом с однозначной дальностью 20...30 км без вобуляции, затем пять зондирований ЛЧМ сигналом с вобуляцией периода повторения для однозначного измерения больших дальностей. Для устранения слепых скоростей на короткой дистанции используется межпачечная вобуляция периодов повторения ИМ сигналов.

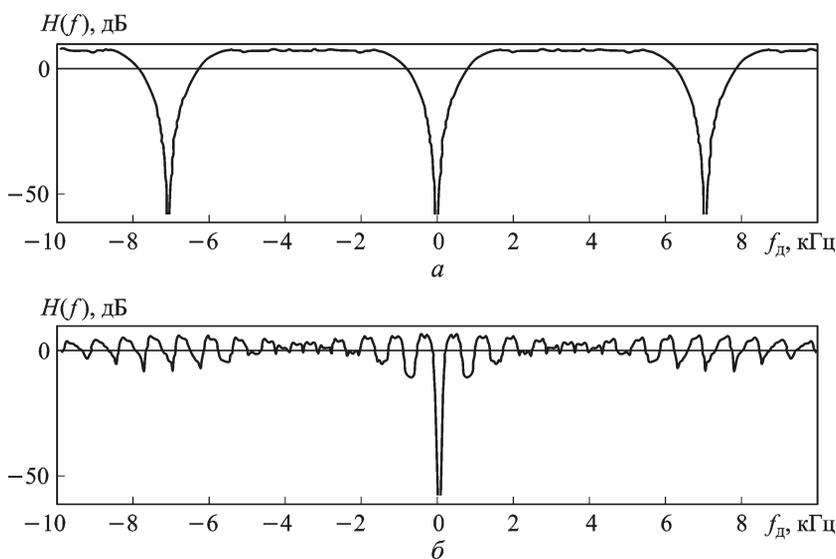
Система СДЦ рассматриваемых РЛС построена по многофильтровой схеме. Вектор  $W$  коэффициентов каждого фильтра синтезируют по известной методике [1], исходя из априори известных корреляционных матриц сигнала ( $R$ ) и помехи ( $B$ ):

$$W = \text{eigenvect}(R^{-1} \cdot B) \Big|_{\max(\text{eigenval}(R^{-1} \cdot B))},$$

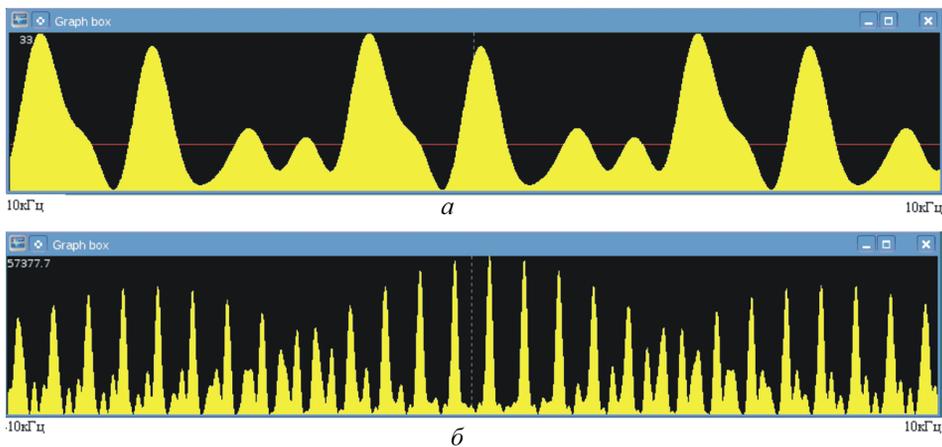
где  $\text{eigenval}()$  — функция определения собственных значений матрицы;  $\text{eigenvect}()$  — функция нахождения собственного вектора матрицы, соответствующего наибольшему собственному значению.

На рис. 1 приведены частотные характеристики  $H(f)$  фильтров СДЦ для 8-импульсной пачки без вобуляции (рис. 1, а) и 5-импульсной пачки с вобуляцией периода повторения (рис. 1, б).

В ходе экспериментальных исследований изучались спектры отраженных сигналов, прошедших систему СДЦ. На рис. 2 приведены



**Рис. 1. Частотные характеристики фильтров СДЦ для пачки без вобуляции (а) и для пачки с вобуляцией периода повторения (б)**



**Рис. 2. Спектры пачек зондирующих импульсов:**

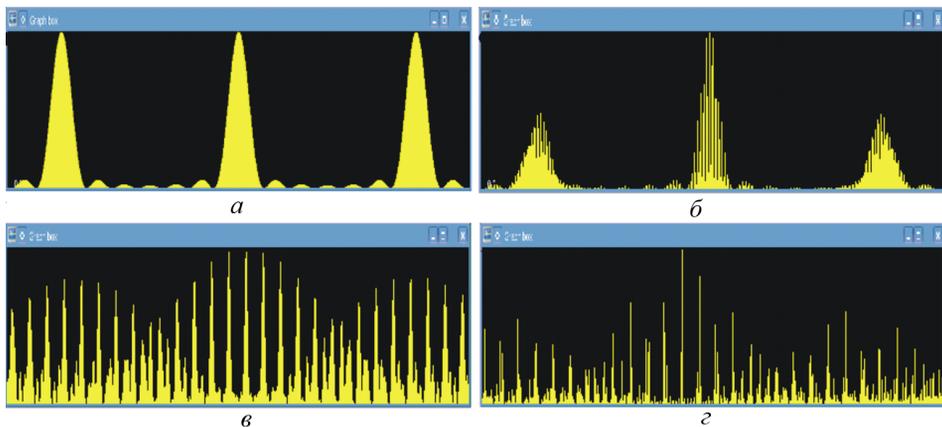
*a* — пачка без вобуляции; *б* — пачка с вобуляцией периода повторения

спектры для 8-импульсной невобулированной и 5-импульсной вобулированной пачек ЗС. Спектры по экспериментальным данным получены с помощью 1600-точечного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и, как видно из рис. 2, имеют весьма сложный характер, особенно в случае вобулированной пачки. Сопоставление спектров с частотными характеристиками СДЦ показывает, что появление остатков на выходе СДЦ обусловлено большой шириной спектра помех на уровнях ниже  $-20 \dots -30$  дБ, т.е. спектр спадает медленнее гауссового, заложенного при синтезе фильтров СДЦ.

Результаты анализа полученных спектров и возможности приемопередающей аппаратуры позволили разработать достаточно простой и эффективный метод дополнительной фильтрации мешающих отражений на этапе первичной (координатной) обработки информации.

Система первичной обработки информации (ПОИ) рассматриваемых РЛС формирует пакеты из отметок обнаружения, поступающих с выхода системы СДЦ. Каждый пакет ассоциируется с одной целью в пределах элемента разрешения по пространству. Эти пределы определяются шириной ДН антенны и длительностью временной корреляционной функции на выходе согласованного фильтра. При этом протяженность пакета по дальности составляет 1–5 отметок, а по азимуту протяженность соответствует 1–5 пачкам ЗС. Каждая отметка обнаружения сопровождается комплексными отсчетами сигнала на входе СДЦ, число которых равно длительности пачки зондирующих импульсов. Высокая долговременная стабильность фазовых характеристик трактов РЛС и когерентность ЗС дает возможность проводить когерентное накопление спектров отраженных сигналов в течение всего времени контакта с целью.

На рис. 3, *a–г* приведены примеры экспериментально полученных спектров ИМ сигналов и вобулированной последовательности ЛЧМ



**Рис. 3. Экспериментальные спектры пачек зондирующих импульсов:**  
*a* и *в* — для одной пачки без вобуляции и с вобуляцией периода повторения; *б* и *г* — для трех пачек без вобуляции и с вобуляцией

сигналов для одной пачки (*a*, *в*) и трех пачек (*б*, *г*) зондирующих импульсов, попавших в пакет. Видно, что с увеличением числа пачек растет контраст основного пика по сравнению с пиками на интервалах неоднозначного измерения. Это позволяет получить однозначную оценку скорости объекта с довольно высокой точностью простым отбором максимального спектрального отсчета.

Основная идея рассматриваемого метода состоит в оценке скорости обнаруженного объекта на основе спектра, рассчитанного по всем комплексным отсчетам в пакете, полученным за время контакта с объектом, с последующей селекцией обнаруженных объектов по скорости.

Данный метод дает неплохие результаты, если в разрешаемом объеме находится только движущийся объект или только пассивная помеха (ПП). В случае наблюдения объекта на фоне мощной ПП возникает необходимость устранения составляющей, обусловленной ПП. С этой целью используется вычитание средних уровней из отсчетов в пакете. Поскольку полученные отсчеты промодулированы ДН антенны, то вычитание средних уровней проводится отдельно для отсчетов, соответствующих одной зондирующей пачке. Для принятия решения о необходимости применять вычитание определяется глубина модуляции отсчетов пачки. Вычитание среднего уровня выполняется в случае малой глубины модуляции, что соответствует присутствию достаточно мощной помехи.

Далее по всем комплексным отсчетам в пакете рассчитывается спектр и максимальный отсчет спектра на частоте  $f_{\max}$ . Для уменьшения числа ложных обнаружений максимальный отсчет сравнивается с порогом. В случае превышения порога рассчитывается оценка  $\hat{V}_d$  доплеровской (радиальной) скорости обнаруженного объекта, соответствующей частоте  $f_{\max}$ .

Шаг расчета спектра по частоте определяется максимальной протяженностью пакета во времени, которая составляет порядка 20...30 мс. При использовании алгоритма с отбором максимального спектрального отсчета шаг по частоте выбирается порядка  $\Delta f = 12,5$  Гц. Число точек спектра определяется максимальной скоростью объектов, которая для систем УВД составляет порядка  $\pm 600$  м/с. Расчет спектра проводится с помощью ДПФ, которое при малом числе отсчетов в пакете оказывается эффективнее широко используемых в спектральной обработке алгоритмов БПФ.

По полученной оценке скорости выполняется селекция объектов: если  $\hat{V}_d$  ниже заданного порога  $V_{\min}$ , то объект считается малоподвижным и информация, соответствующая ему, не передается на систему вторичной (траекторной) обработки (ВОИ).

На рис. 4 и 5 показаны снимки индикаторов кругового обзора ПОИ и ВОИ в штатном режиме работы РЛС (рис. 4, *a* и 5, *a*) и в случае применения рассмотренного алгоритма (рис. 4, *б* и 5, *б*).

Видно, что число координатных точек, обусловленных помехой, значительно уменьшается. Подсчет числа координатных точек, передаваемых на траекторную обработку, показывает, что поток помеховых координатных точек снижается в 10–30 раз.

Помимо снижения потока помеховых координатных точек предложенный алгоритм обеспечивает достаточно высокую точность оценки радиальной скорости ВО. На рис. 6, *a* в качестве примера представлены экспериментально полученные графики оценок доплеровской скорости  $\hat{V}_d$  (сплошная линия) и оценок радиальной скорости  $V_p$  (штриховая линия) в зависимости от номера обзора  $N_o$ . График оценок радиальной скорости  $V_p$  построен путем дифференцирования измеренной радиальной дальности по времени.

Однако, как показывает анализ большого числа траекторий, когда ВО наблюдается на фоне мощных местных отражателей, возможно появление аномальных оценок доплеровской скорости со значениями, близкими к нулю. На рис. 6, *б* в качестве примера показаны графики зависимостей оценок  $\hat{V}_d$  (точки) и  $V_p$  (штриховая) от номера обзора для такой траектории. На графике видны выбросы оценок скорости между 155-м и 160-м обзорами. Однако влияние этих выбросов на качество сопровождения ВО незначительно, так как такие выбросы выходят за границы экстраполированных стробов сопровождения по скорости и просто не используются.

Как показывает анализ экспериментальных данных, в большей части зоны обзора РЛС СКО оценки скорости  $\hat{V}_d$ , получаемой с помощью рассматриваемого алгоритма, составляет 2...3 м/с. Такая высокая точность оценки скорости позволяет своевременно обнаруживать маневры ВО, что повышает устойчивость их сопровождения.

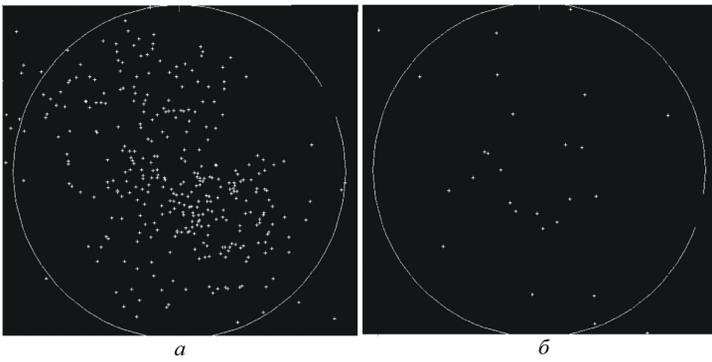


Рис. 4. Снимки индикатора кругового обзора ПОИ в штатном режиме работы РЛС (а) и при дополнительной режекции (б)

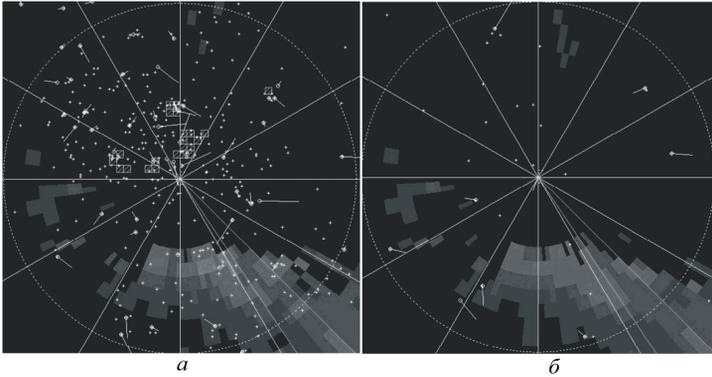


Рис. 5. Снимки индикатора кругового обзора ВОИ в штатном режиме работы РЛС (а) и при дополнительной режекции (б)

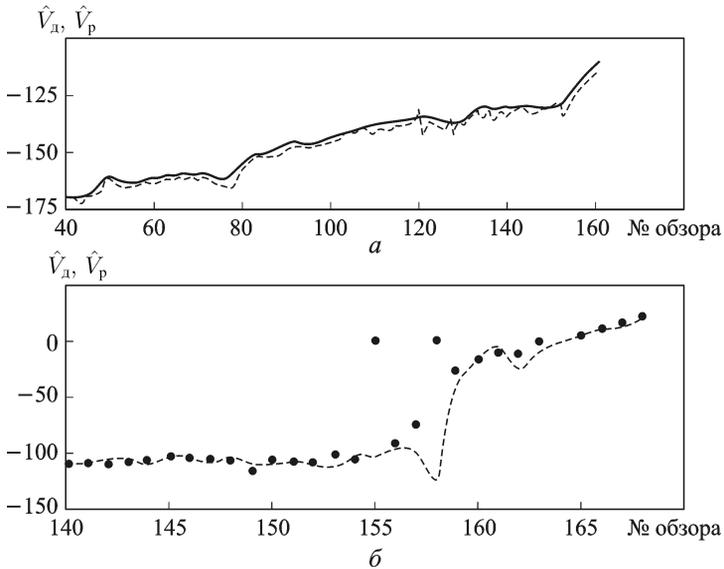


Рис. 6. Графики экспериментальных оценок доплеровской и радиальной скоростей

Таким образом, проведенные исследования выявили высокую эффективность предлагаемого метода при относительно простой его технической реализации, что позволяет существенно улучшить помехозащищенность РЛС серий “Утес”, “Лира-А10” систем УВД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулев П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и связь, 1986 г. – 288 с.
2. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника; Пер. с англ.; Под общ. ред. К.Н. Трофимова. В 4 т. Т. 3. Радиолокационные устройства и системы / Под ред. А.С. Виноцкого. – М.: Сов. радио, 1978. – 528 с.
3. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.

Статья поступила в редакцию 23.01.2012

Галина Анатольевна Профатилова окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 62 научных работ в области обработки радиолокационной информации.

G.A. Profatilova graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), senior researcher of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 62 publications in the field of radar data processing.

Григорий Николаевич Соловьев окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области обработки радиолокационной информации.

G.N. Soloviev graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Ph. D. (Eng.), senior researcher of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications in the field of radar data processing.

Алексей Григорьевич Соловьев окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1997 г. Канд. техн. наук. Сотрудник ОКБ ОАО “Лианозовский электромеханический завод”. Автор шести научных работ в области цифровой обработки радиолокационных сигналов.

A.G. Soloviev graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1997. Ph. D. (Eng.), employee of OAO Lianozovo Electromechanical Plant. Author of six publications in the field of digital processing of radar signals.

Вячеслав Самсонович Ефремов окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, зам. директора по науке ОАО “Лианозовский электромеханический завод”. Автор более 85 научных работ в области обработки радиолокационной информации.

V.S. Yefremov graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Ph. D. (Eng.), senior researcher, deputy director on science of OAO Lianozovo Electromechanical Higher Plant. Author of more than 85 publications in the field of radar data processing.