

УДК 621.396.96

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И СЕЛЕКЦИИ В РЛС ОБЗОРА ЛЕТНОГО ПОЛЯ

А. Е. Ананенков¹, Д. В. Марин¹, В. М. Нуждин¹, В. В. Расторгуев¹, В. Н. Скосырев²

¹Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
125993 Москва, Волоколамское шоссе, 4

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет)
105005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2017 г.

Аннотация. Исследованы специфические свойства эхо-сигналов, отраженных от подстилающей поверхности, в РЛС обзора лётного поля аэродрома с высоким пространственным разрешением. Экспериментально исследованы первые статистические моменты распределений эхо-сигналов. Получены оценки для коэффициентов подавления пассивных помех при использовании СДЦ в рассматриваемой РЛС. Сформулированы рекомендации о структуре алгоритмов обработки эхо-сигналов для перспективных РЛС обзора летного поля с высоким пространственным разрешением.

Ключевые слова: пассивная помеха, коэффициент подавления, РЛС обзора летного поля, селекция движущихся целей, статистические распределения эхо-сигналов.

Abstract. Specific properties of reflected from underlying surface signals in the radar of airfield review with high spatial resolution have been studied. The first statistical moments of echo-signal distribution were researched. Evaluations of clutter rejection ratio with using moving target indication were obtained. Recommendations on the structure of echo-signal processing algorithms for airfield surveillance radar with high spatial resolution were defined.

Key words: clutter, rejection ratio, airfield surveillance radar, moving target indication, statistical distribution of echo-signal.

1. Введение

В последние годы в мире наблюдается тенденция повышения интенсивности авиаперевозок. При этом очевидно возрастают требования к обеспечению безопасности движения воздушного транспорта, системам диспетчирования аэропортов, и, в первую очередь, к обеспечению круглосуточного и всепогодного обзора летного поля и контролю территории аэропорта. Этим требованиям в наилучшей степени удовлетворяют радиолокационные методы контроля и диспетчирования. Перед перспективными радиолокационными системами ставятся новые задачи, не решаемые в полной мере существующей аппаратурой, такие как:

- обнаружение несанкционированного нахождения на взлетно-посадочной полосе (ВПП), рулежных дорожках и территории аэропорта транспортных средств (в том числе неподвижных) и людей;
- обнаружение малоразмерных летательных аппаратов (ЛА) и беспилотных аппаратов, в том числе несанкционированное;
- определение ориентации воздушных судов и автотранспорта относительно ВПП, стоянок самолетов и рулежных дорожек.

Решить эти задачи позволяет применение перспективной РЛС обзора летного поля, с применением сверхкороткого радиоимпульса, за счет формирования радиолокационных изображений (РЛИ) с высокой детальностью [1-4]. Получение высокоинформативных изображений выдвигает ряд вопросов по разработке алгоритмов обработки принятых эхо-сигналов. Эти вопросы обусловлены изменением (при высокой разрешающей способности) статистических свойств сигналов, отраженных как от целей, которые становятся распределёнными, так и от подстилающих поверхностей. Поскольку рост разрешающей способности РЛС эквивалентен уменьшению пространственного сглаживания (функций селекции РЛС), РЛИ окружающей местности перестаёт быть однородным [5]. Указанные выше задачи решены в макетном образце РЛС обзора летного поля [1-4], разработанном в МАИ (НИУ) и относящемся к РЛС малой дальности (МД).

Исследованию свойств эхо-сигналов, отражённых от подстилающих поверхностей и местных предметов, полученных на этом макетном образце РЛС в ходе натурных испытаний, и вопросам селекции посвящена данная статья.

2. Классификация элементов РЛИ наблюдаемой поверхности по статистическим признакам

В работе [5] установлен тот важный факт, что не для всех элементов РЛИ при высоком пространственном разрешении, поражённых пассивной помехой (ПП) от естественных подстилающих покровов, закон распределения мощности отражённого сигнала имеет один и тот же характер. Анализ экспериментальных данных, полученных на макетном образце РЛС, позволил установить, что для стационарных объектов, в том числе объектов искусственного происхождения (ОИП), имеющих, как правило, значительные величины ЭПР, закон распределения амплитуд эхо-сигналов существенно отличается от распределений, формируемых от элементов разрешения, поражённых ПП от естественных покровов Земли.

Экспериментально полученные распределения модуля огибающей амплитуды отраженных сигналов от различных элементов подстилающей поверхности представлены на рис. 1 (трава) и рис. 2 (объект искусственного происхождения). Каждое из этих распределений получены для одного пространственного элемента разрешения (соответствующего типа поверхности) за продолжительное время при априорном отсутствии целей. На рис. 3 представлена шумовая выборка в зоне радиотени, расположенной за высотным объектом.

Проведённый статистический анализа эхо-сигналов в РЛС с высоким пространственным разрешением позволил выделить три типа пространственных элементов зоны обзора, отличающихся характером распределения модуля огибающей амплитуды отраженного сигнала:

Тип 1 – зона свободная от ПП и зона радиотени. Распределение амплитуды сигнала, для этой зоны РЛИ, в отсутствии цели, совпадает с

распределением шумов приёмника (см. рис. 3). В этой зоне задача обнаружения объектов, сводится к обнаружению сигнала на фоне шума (СДЦ не требуется). Отказ от использования в этих областях процедур селекции позволит избежать размножения шума в процедурах СДЦ, (например ЧПК) и исключить потери, обусловленные слепыми скоростями.

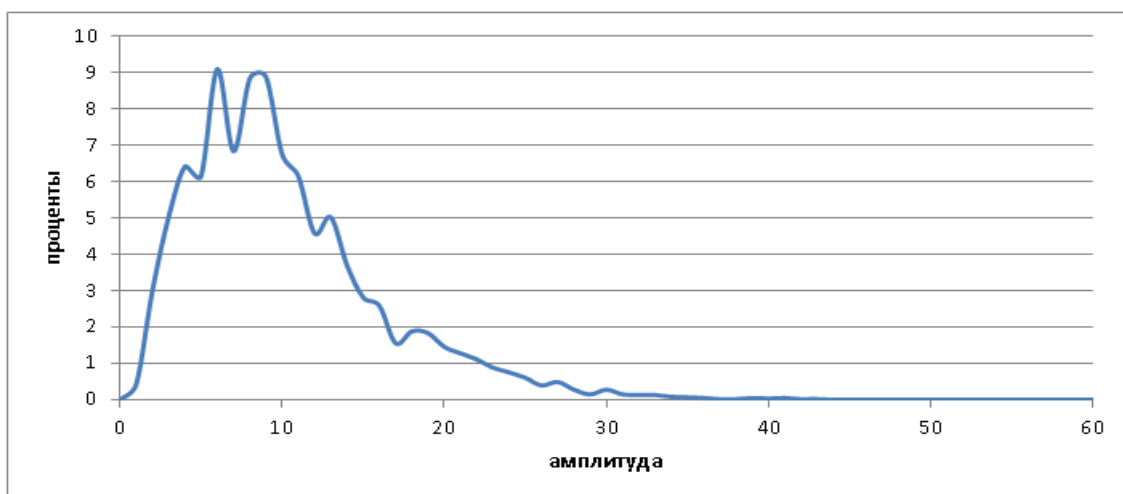


Рисунок 1. Распределение модуля огибающей амплитуды сигнала, отраженного от травы

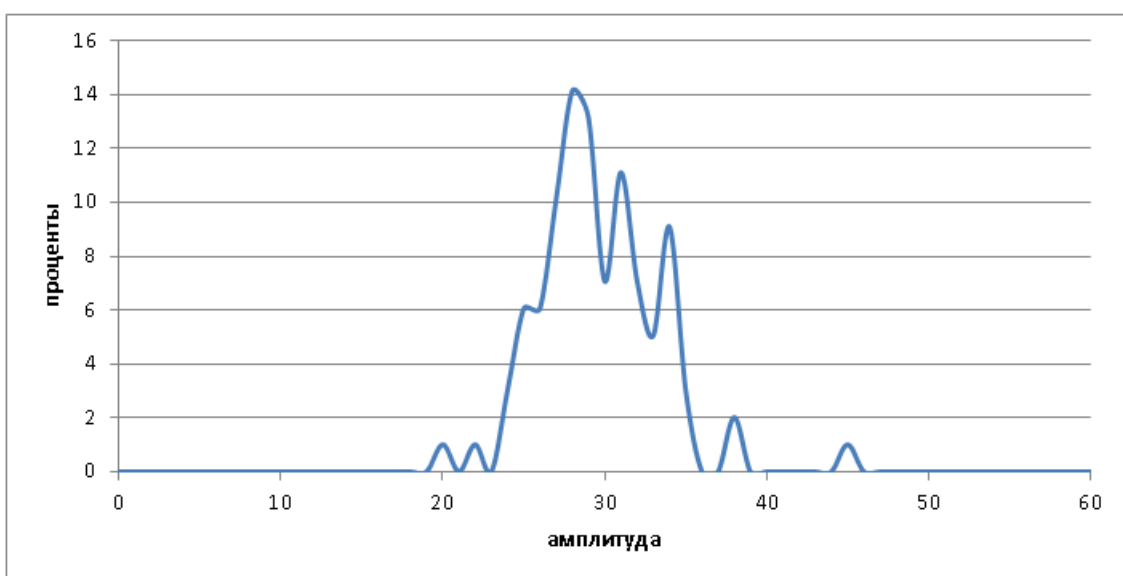


Рисунок 2. Распределение модуля огибающей амплитуды, отраженного от искусственного объекта

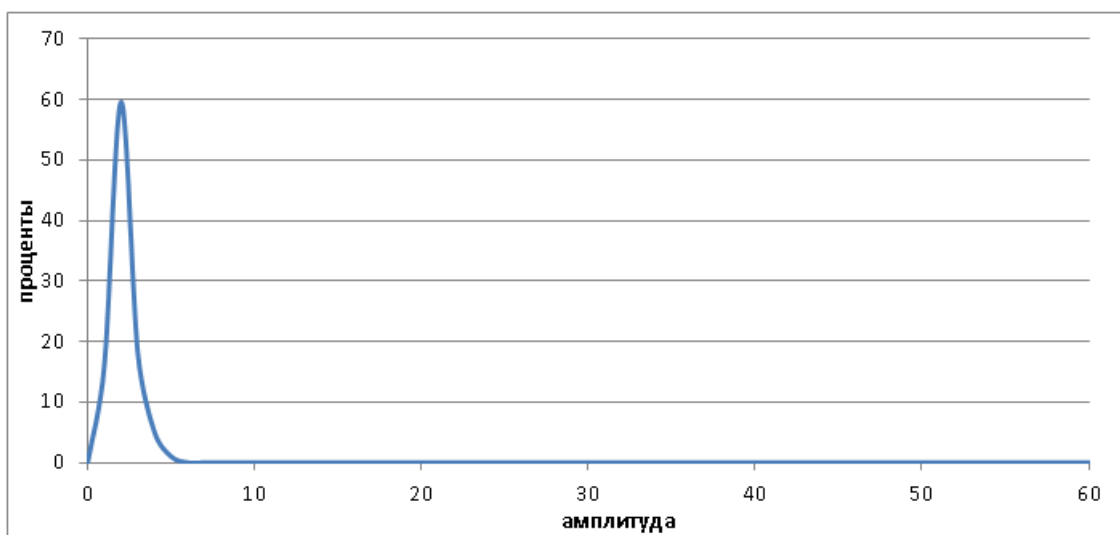


Рисунок 3. Распределение модуля огибающей амплитуды шума (шум приёмника и АЦП)

Тип 2 – стационарные объекты. Характерным примером таких отражателей являются искусственные объекты – здания, опоры мостов, мачты и т.д. Естественные объекты так же могут попадать в эту категорию – например скальные стенки, песчаные насыпи и т.д. Классифицирующий признак для причисления элемента зоны РЛИ к этому типу (по характеристикам закона распределения) – существенное превышение математического ожидания принятого процесса над среднеквадратическим отклонением (см. рис. 2). Такие отражатели, как правило, отличаются высокой временной корреляцией, и при этом имеют значительные ЭПР.

Тип 3 - флюктуирующие объекты (естественные подстилающие покровы). Типичные представители таких объектов: трава, кустарник, лес. Классифицирующий признак – мощность сигнала превышает мощность шумов приёмника, но распределение модуля огибающей амплитуды отраженного сигнала не относится к типу 2 (см. рис. 1). В этих зонах РЛИ сложнее проводить обнаружение малоразмерных и низкоскоростных целей.

Приведённая классификация разрешаемых элементов пространства по типам, предложенным выше, в значительной степени специфична для РЛС с высоким пространственным разрешением и должна учитываться при формировании процедур обработки принятого эхо-сигнала. Проиллюстрируем

разделение элементов разрешения РЛИ по типам результатами натурных экспериментов. На рис. 4 приведено фото лоцируемой сцены (аэродром малой авиации Ватулино, Московская область), а на рис. 5 - РЛИ той же сцены с выделением цветом областей, относящихся к каждому из обсуждаемых типов области наблюдения. На рис. 5 наблюдаются элементы соответствующие всем трём типам.



Рисунок 4. Фото лоцируемой сцены

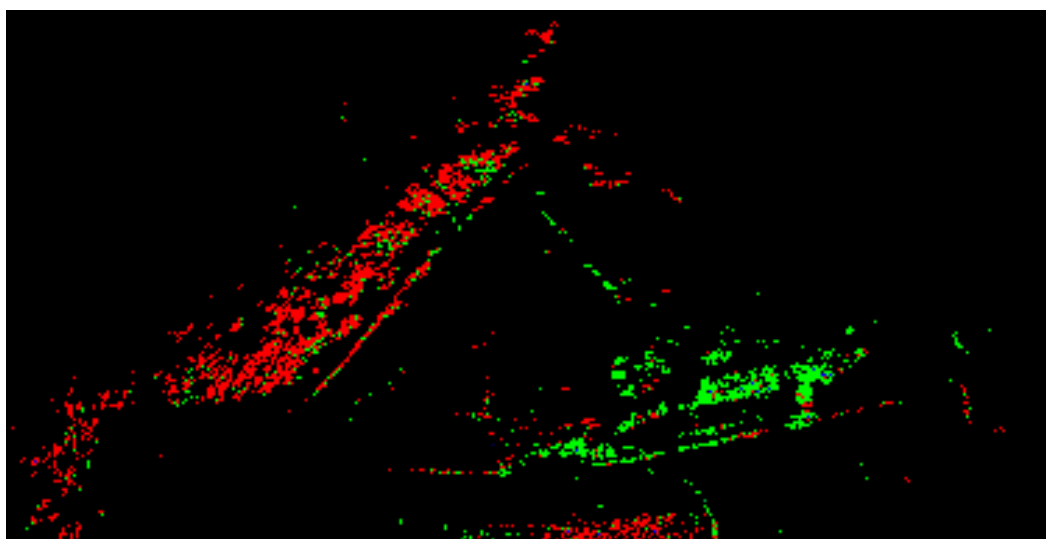


Рисунок 5. Выделение на РЛИ флюктуирующих естественных покровов и стационарных отражателей. Красным показаны флюктуирующие подстилающие покровы. Зелёным – стационарные объекты искусственного происхождения.

Черным – области радиотени и зоны свободные от ПП.

Важным обстоятельством, наблюдаемым на рис. 5, является значительная доля элементов 1 типа [6]. Отказ от проведения процедур СДЦ в этих элементах позволит избежать потерь из-за размножения шумов и связанных со «слепыми» скоростями.

Проведённое разделение по типам позволяет для различных элементов разрешения использовать различные алгоритмы селекции. Недостатком известных алгоритмов селекции, основанных на эффекте Доплера, является невозможность совместить высокий темп обзора пространства (необходимый в РЛС обзора лётного поля) с выделением низкоскоростных объектов. Для элементов типа 2 (стационарные объекты) возможно применение алгоритмов селекции не использующих эффект Доплера [7, 8].

3. Особенности применения процедур селекции без применения эффекта Доплера в РЛС высокого пространственного разрешения.

Одной из задач, которые должна решать перспективная РЛС обзора лётного поля, является обнаружение и селекция малоразмерных и малоподвижных объектов в зоне обзора. В РЛС с высоким пространственным разрешением для решения данной задачи наряду с классическими процедурами селекции, как применение алгоритмов ЧПК различного порядка, возможно построение селектора движущихся целей без использования эффекта Доплера. Причём эта обработка может быть как межпериодной, так и межкадровой (для низкоскоростных целей). Как показано в [6 - 9], метод межобзорного вычитания (МОВ) основан на предположении, что $T_{cp}v > c\tau_n/2$, где T_{cp} – время сравнения, c — скорость света, τ_n — длительность импульса, v – скорость лоцируемого объекта, а отраженные от помех сигналы за это время не претерпевают значимых изменений. Тогда при реализации МОВ сигналы от помех будут скомпенсированы, а сигнал цели выделен.

Структура селектора МОВ приведена на рис. 6 [8] и близка к структуре селектора ЧПК-1, с той разницей, что задержка сигнала осуществляется на период повторения кадра, а не на период модуляции зондирующего сигнала. Вычитаются не комплексные, а действительные сигналы.

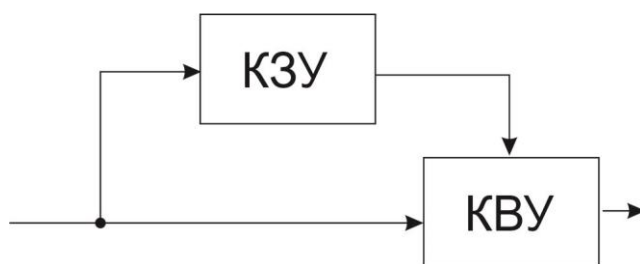


Рисунок 6. Структура селектора МОВ, где КЗУ - кадровое запоминающее устройство; КВУ - кадровое вычитающее устройство.

Нормированный коэффициент передачи такого селектора по отраженному от точечной цели сигналу в зависимости от скорости цели имеет вид трапеции (см. рис 7) и описывается выражением:

$$K(V_r) = \begin{cases} 0, & \text{если } V_r = 0 \\ \frac{T_c}{c\tau_{и}} V_r, & \text{если } 0 < V_r < \frac{c\tau_{и}}{T_c} \\ 1, & \text{если } \frac{c\tau_{и}}{T_c} \leq V_r \end{cases} \quad (1)$$

где: V_r – радиальная скорость цели;

T_c – период сравнения (вычитания);

$\tau_{и}$ – длительность импульса;

c – скорость света.

Вид характеристики (1) представлен на рис. 7.

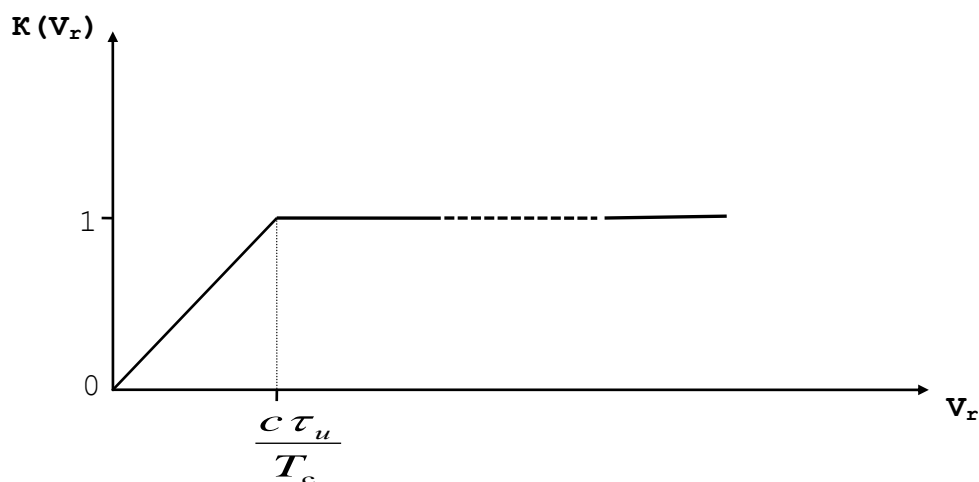


Рисунок. 7. Нормированный коэффициент передачи селектора по положению

Важными достоинствами этого метода являются:

- отсутствие «слепых» скоростей, присущих доплеровским методам селекции;

- способность селективировать весьма низкоскоростные цели.

Так например, при темпе обзора перспективной РЛС ОЛП $T_c=1$ с и длительности ЗС порядка $\tau_{и}=10$ нс, коэффициент передачи селектора равен 1 уже для цели со скоростью 1,5 м/с). Это позволяет обнаруживать на лётном поле низкоскоростные объекты (например человека).

Недостатком метода МОВ, в сравнении с когерентной СДЦ, до сих пор считался низкий коэффициент подавления мешающих отражений от ПП. Причина такого положения вещей заключается в том, что при сильно флюктуирующей ПП (а для традиционной РЛС с низким пространственным разрешением это практически вся ПП) отсчёты принятых эхо-сигналов через интервал наблюдения оказываются слабо коррелированными. Приведённые выше гистограммы распределений амплитуд эхо-сигналов (рис. 2), полученных в РЛС с высоким пространственным разрешением, позволили предположить, что эффективность МОВ будет заметно выше для областей РЛИ, относящихся ко 2 типу ПП. Эта гипотеза была проверена в результате статистической обработки экспериментальных данных.

4. Оценка эффективности алгоритмов МОВ

На первом этапе использованный в ходе обработки экспериментальных данных алгоритм предполагал разделение элементов РЛИ на типы с последующим проведением процедуры МОВ. Данный алгоритм включает следующие этапы:

- 1) По первым N кадрам эксперимента формируются карты математических ожиданий и дисперсий (по всем элементам разрешения зоны обзора):

$$MO_{i,j} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N A_{i,j,k} \quad (2)$$

$$D_{i,j} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N (A_{i,j,k} - MO_{i,j})^2 \quad (3)$$

где N – количество кадров, по которым рассчитывались карты мат. ожиданий и дисперсий;

$A_{i,j,k}$ – амплитуда отраженного сигнала от элемента разрешения для k -го кадра;

$D_{i,j}$ – дисперсия амплитуды отраженного сигнала от элемента разрешения;

k – номер кадра;

$MO_{i,j}$ – мат. ожидание амплитуды отраженного сигнала от элемента разрешений.

2) Классифицируются элементы массива РЛИ по следующему алгоритму:

- если $D_{i,j} < kD_{ш,i,j}$ (где $D_{ш,i,j}$ – дисперсия шумовой выборки, а k – коэффициент меньше единицы, зависящий от величины анализируемой выборки) – это область, свободная от пассивных помех – тип 1 (обозначена на рис. 5 и 8 черным цветом).

- если $MO_{i,j} > 3 \cdot \sqrt{D_{i,j}}$ – это стационарные отражатели – тип 2 (зеленый цвет на рис. 5 и 8)

- в остальных случаях – флюктуирующая подстилающая поверхность тип 3 (красный цвет на рисунках. 5 и 8).

После классификации фрагмент РЛИ имеет вид, показанный на рисунке 8.

Как видно на рисунках 8 и 9, стационарными отражателями (тип 2) являются в основном объекты искусственного происхождения.

Рассчитаем коэффициент подавления по алгоритму межкадрового вычитания:

$$K = 20 \cdot \log(A_c / A_n) \quad (4)$$

A_c – амплитуда отраженного сигнала;

A_n – значение амплитуды после применения межкадрового вычитания.

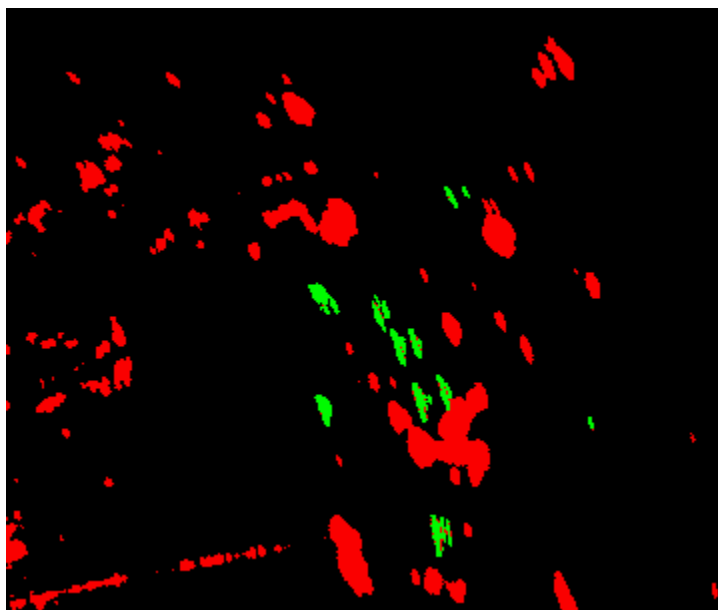


Рисунок 8. Фрагмент РЛИ с разделением подстилающей поверхности по типам
Оптическое изображение этой области приведено на рис. 9.



Рисунок 9. Увеличенное оптическое изображение исследуемой области

Ниже на рис. 10-12 представлены графики зависимости коэффициента подавления от номера кадра для алгоритма МОВ, а также приведены графики, линейно их аппроксимирующие. На этих графиках по вертикальной оси отложена величина коэффициента подавления (дБ), по горизонтальной оси – номер кадра.

Анализ эффективности традиционной процедуры ЧПК для экспериментальной РЛС показал, что величина коэффициента подавления ограничена сверху (на уровне порядка 16 дБ) из-за малой величины пачки зондирующих импульсов, обусловленной высоким темпом кругового сканирования (1 с).

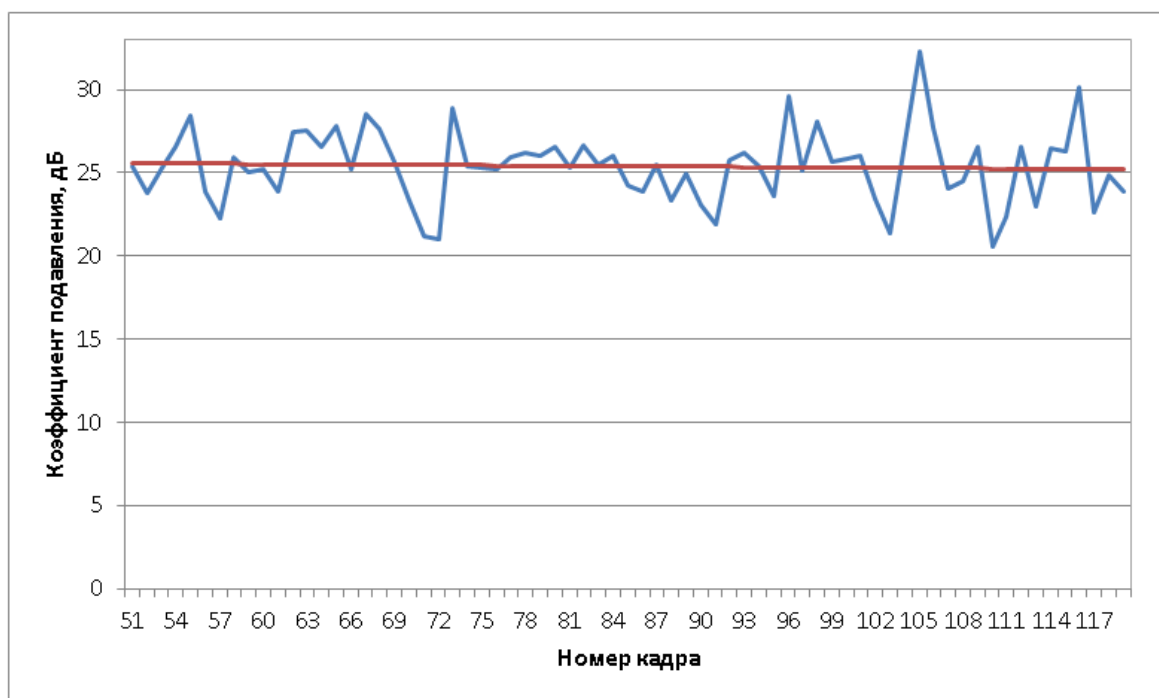


Рисунок 10. Оценка коэффициента подавления для стационарных объектов (синим показан коэффициент подавления, красным – тренд)

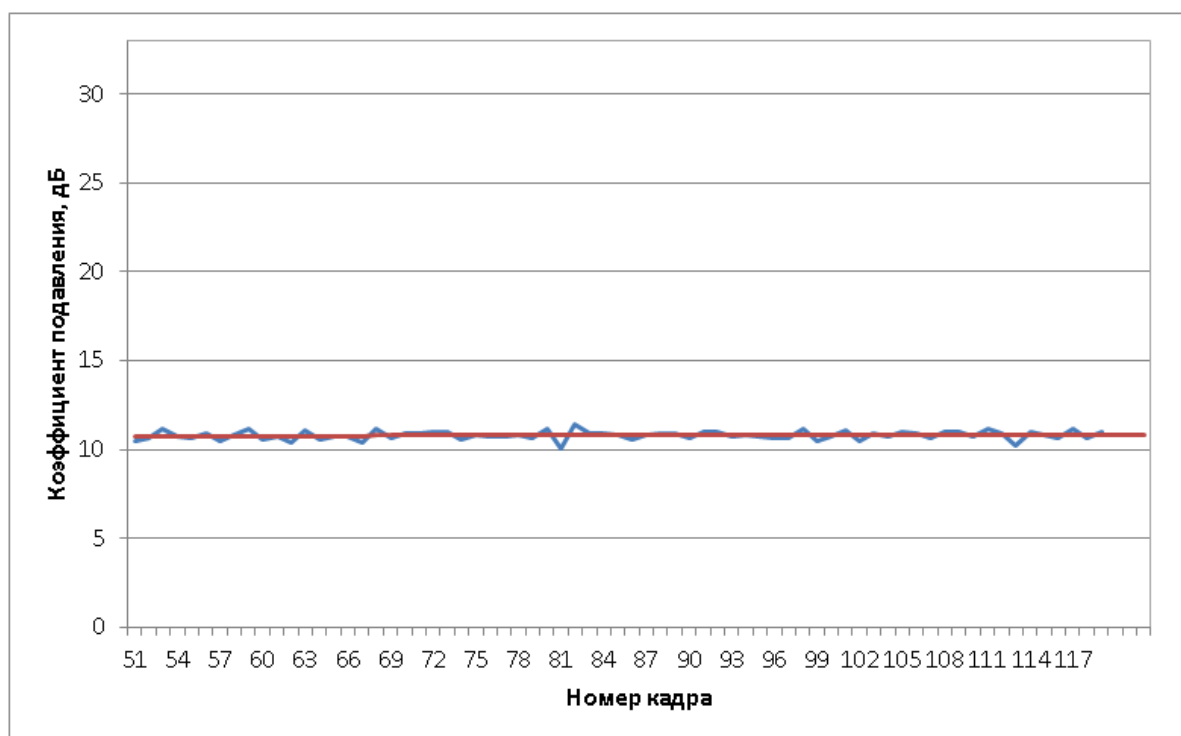


Рисунок 11. Оценка коэффициента подавления для флуктуирующих объектов на примере травы (синим показан коэффициент подавления, красным – тренд)

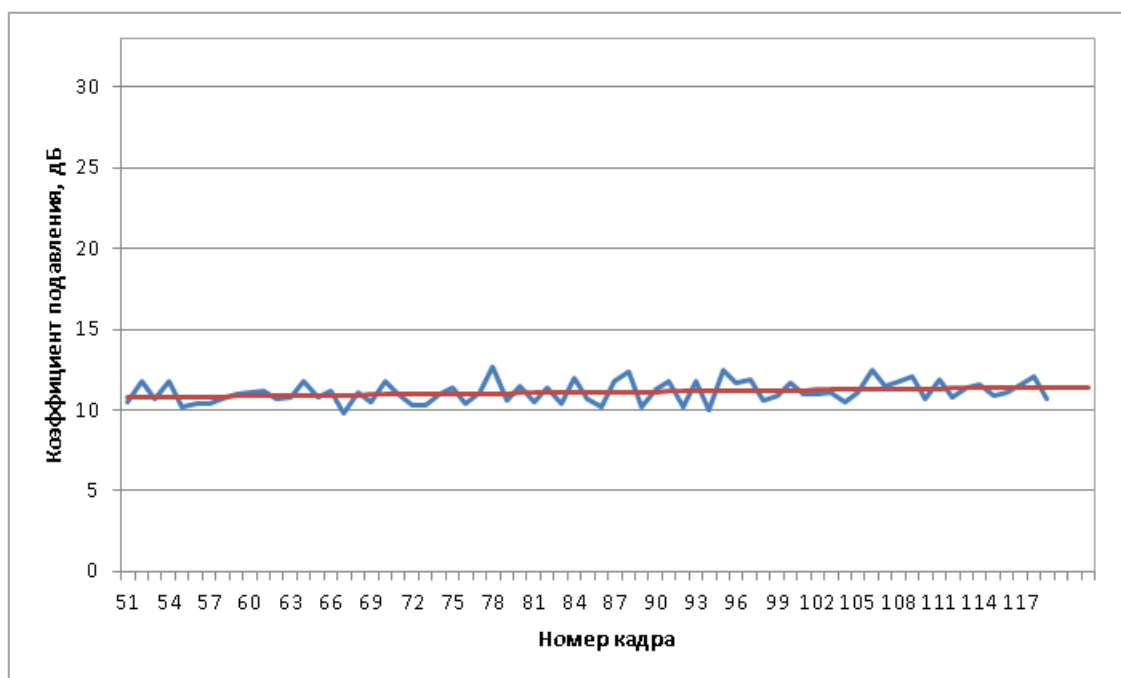


Рисунок 12. Оценка коэффициента подавления для флуктуирующих объектов на примере кромки леса (синим показан коэффициент подавления, красным – тренд)

Анализ представленных результатов экспериментальной оценки коэффициента подавления для различных типов ПП позволяет сделать вывод о заметно лучшей эффективности процедуры МОВ в областях РЛИ, относящихся ко 2 типу. В областях, относящихся к 3 типу, эффективность процедур МОВ несколько ниже, чем эффективность процедур ЧПК.

5. Предлагаемая структура алгоритмов обработки

Опираясь на выше перечисленные особенности эхо-сигналов, целесообразно предложить следующую структуру первичной обработки для РЛС малой дальности (МД) с высоким пространственным разрешением:

Этап 1. Классификация элементов обзора по статистическим характеристикам.

По каждому элементу разрешения полученной области наблюдения необходимо набрать статистику флюктуаций сигнала, достаточную для разделения элементов по предложенным выше типам. В дальнейшем, по мере обзора пространства такая статистика должна периодически обновляться.

Этап 2. СДЦ по положению (алгоритм МОВ). Целесообразно провести в элементах РЛИ типа 2. При этом возможно обнаружение низкоскоростных целей (например, человека, ДПЛА), не выделяемых доплеровскими процедурами при бедных пачках (характерных для РЛС ОЛП). Коэффициент подавления по элементам типа 2 оказывается около 23-25 дБ, что в совокупности с малой площадью элемента разрешения оказывается, как показывает эксперимент, достаточным для обнаружения малоразмерных целей (например человека).

На рис. 13 приведено оптическое изображение фрагмента лоцируемой сцены: человек, который движется вправо под углом $\sim 75^{\circ}$ к направлению визирования.



Рисунок. 13. Фото лоцируемой сцены.

На рис. 14 приведён фрагмент соответствующего РЛИ. Человек движется (с малой радиальной компонентой вектора скорости) по насыпи дороги, хорошо просматриваемой на РЛИ. В левом верхнем углу на рис. 14 наблюдается отражение от местного предмета. Поскольку ЭПР объекта (порядка 1 м^2) меньше отражений от местных предметов, селекция только пороговой обработкой на фоне отражений от подстилающей поверхности и местных предметов невозможна. Низкая скорость движения объекта (менее 4 км/ч) и

малая радиальная компонента вектора скорости не позволяют выделить его процедурами ЧПК. На рис. 15 представлен тот же фрагмент РЛИ после проведения процедуры МОВ с последующим применением порога. Человек наблюдается.

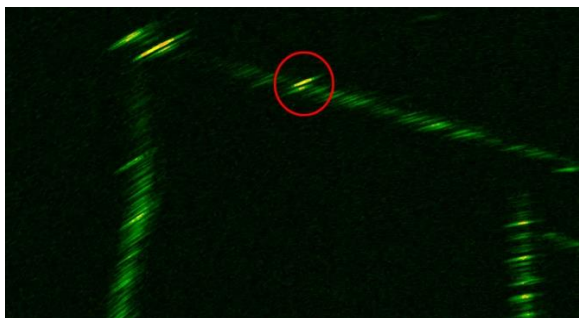


Рисунок. 14. Фрагмент РЛИ с человеком (обведён красным).

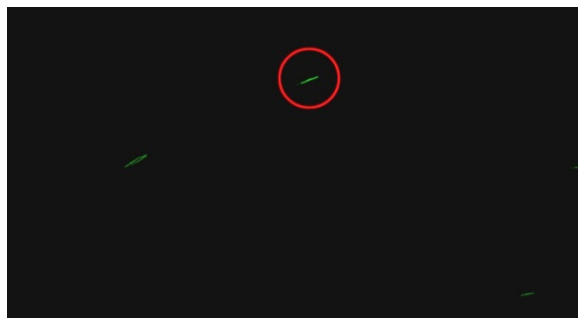


Рисунок. 15. Результат МОВ (движущийся человек обведён красным).

Этап 3. Традиционная СДЦ с использованием эффекта Доплера в зонах РЛИ типа 3. МОВ в этих сильно флюктуирующих областях дадут слишком малый коэффициент подавления (менее 12 дБ). В этих зонах возможно необнаружение (пропуск) низкоскоростных целей.

Этап 4. Адаптивная пороговая обработка.

Использование различных алгоритмов СДЦ в зонах РЛИ, относящихся к различным типам, приводит к разной мощности тепловых шумов в различных элементах РЛИ на входе пороговой обработки. Это требует установки своих уровней порогов в этих областях. Для элементов 1 типа уровень порога должен выбираться аналогично традиционным РЛС при обнаружении на фоне шума (без применения алгоритмов СДЦ).

Предложенная обработка, несмотря на многоканальность, не приводит к росту вероятности ложных тревог, поскольку предполагает не более одного алгоритма обработки для каждого типа элементов РЛИ.

Выводы

На основе статистического анализа экспериментальных результатов, полученных на макетном образце РЛС с высоким пространственным

разрешением, - принятых эхо-сигналов, предложена классификация элементов РЛИ подстилающей поверхности по типам, которая в значительной степени специфична для РЛС данного типа. Выделено три типа пространственных элементов зоны обзора, отличающихся характером распределения модуля огибающей амплитуды отраженного сигнала.

Опираясь на проведенное разделение элементов РЛИ на типы, предложено ввести различные алгоритмы селекции в областях, соответствующих каждому типу РЛИ подстилающей поверхности. В частности, для областей РЛИ, занятых стационарными объектами, предложено применить селекцию, не использующую эффект Доплера, что позволяет обнаруживать низкоскоростные цели и исключить потери, обусловленные эффектом «слепых скоростей».

Получены оценки коэффициентов подавления при применении алгоритмов селекции без использования эффекта Доплера. Для стационарных элементов РЛИ глубина подавления составила 23-25 дБ. Экспериментально продемонстрирована эффективность алгоритмов обработки, обеспечивающая обнаружение человека на фоне отражения от ПП при темпе кругового обзора 1 секунда.

Предложена структура первичной обработки принятых эхо-сигналов в РЛС с высоким пространственным разрешением, обеспечивающая повышение эффективности селекции различного типа целей на фоне мешающих отражений от подстилающей поверхности.

Работа выполняется в рамках государственного задания образовательными организациями высшего образования, подведомственными Минобрнауки России, в сфере научной деятельности по проекту №780 «Высокоинформативные РЛС малой дальности».

Литература

1. Скосырев В.Н., Нуждин В.М., Ананенков А.Е., Коновальцев А.В. – «Технология сверхкороткоимпульсной радиолокации – ключ к повышению информационных возможностей РЛС», Сборник 1-й международной конференции «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике», г. Суздаль, 27-29 сентября 2005 г., стр. 53 – 61.
2. Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Соколов П.В., Скосырев В.Н. «Особенности применения короткоимпульсных зондирующих сигналов в перспективных РЛС обзора пространства». Сборник 2-й Российской научно-технической конференции «Радиовысотометрия – 2007», Каменск-Уральский, октябрь 2007 г., стр. 218 – 227.
3. Ананенков А.Е., Шнайдер В.Б., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Скосырев В.Н. «Отражения от водной поверхности при использовании сверхкороткоимпульсного зондирующего сигнала», Электронный журнал «Труды МАИ», Выпуск № 76, 2014г.
4. Ананенков А.Е. Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Скосырев В.Н. «Многофункциональный аэродромный радиолокатор по технологии СКИРЛ». Конгресс ICAS-2014, Санкт-Петербург, 7-12 сентября 2014г., регистрационный номер 3465-7344.
5. Radar Handbook, Third Edition. Merrill I. Skolnik, Editor in Chief, McGraw-Hill Companies, 2008. 1328 стр.
6. Ананенков А.Е., Скосырев В.Н. «Применение сверхкороткоимпульсных сигналов в РЛС малой дальности», ООО "Эдитус", Москва, 2015, 138 стр.
7. Бакулев П.А., Степин В.М. «Методы и устройства селекции движущихся целей» М: Радио и связь, 1986. 79 стр.
8. Плекин В.Я. Цифровые устройства селекции движущихся целей. Учебное пособие. Москва, САЙНС-ПРЕСС, 2003. 286 стр.
9. Vladimir Rastorguev, Andrey Ananenko, Vadim Skosyrev, Dmitry Marin - EVALUATION OF VISIBILITY PHENOMENON IN CLEARANCES OF

CLUTTER IN THE SHORT-RANGE RADAR. Revue roumaine des sciences techniques - Série Électrotechnique. Vol. 61, 3, pp. 289–292, Bucharest, Romania. 2016.

Ссылка на статью:

А.Е.Ананенков, Д.В.Марин, В.М.Нуждин, В.В.Расторгуев, В.Н.Скосырев. Экспериментальное исследование отражений от подстилающей поверхности и селекции в РЛС обзора летного поля. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/11/text.pdf>