

УДК 621.396.96

К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов

Ананенков А.Е.*, **Марин Д.В.****, **Нуждин В.М.***, **Расторгуев В.В.*****,
Соколов П.В.*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: kaf407@mai.ru*

***e-mail: marindv@gmail.com*

****e-mail: rast@mai.ru*

Аннотация

В статье рассмотрена актуальная проблема наблюдения малоразмерных БЛА, совершающих полет на малых высотах и в пределах мегаполиса, с помощью РЛС малой дальности, способной объективно и независимо контролировать движение БЛА. Приводятся результаты натурных испытаний макета РЛС малой дальности по наблюдению БЛА и экспериментально полученные оценки ЭПР наблюдаемых БЛА.

Ключевые слова: обнаружение БЛА, РЛС малой дальности, сверхкороткоимпульсная радиолокация, селекция движущихся целей.

1. Введение

В последние годы, в связи с расширением географии применения и увеличением количества фирм-производителей, наметился лавинообразный рост

численности используемых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [1]. Кроме того, растёт количество проектов по созданию автоматизированных транспортных систем и систем доставки грузов на базе БЛА. При этом, законодательное регулирование организации полётов малых (до 30 кг взлётного веса) БЛА во всем мире является относительно мягким [7].

Поэтому, по оценке экспертов, принимаемые меры обеспечения безопасности при организации управления движением БЛА явно недостаточны. Вот некоторые примеры: всего за шесть месяцев прошлого года в британских аэропортах было зарегистрировано 23 случая, когда БЛА пролетали в опасной близости от самолетов [3]; в Магаданской области неизвестные попытались передать в исправительную колонию мобильные телефоны с помощью квадрокоптера [4]; на территории Белого дома в Вашингтоне нашли БЛА [5]. Данные примеры являются крайне незначительной выборкой из целого ряда тревожных сигналов, заставляющих незамедлительно обратить внимание на необходимость организации мер контроля и координации воздушного движения БЛА. Поэтому чрезвычайно актуальной становится проблема обнаружения и измерения координат малоразмерных БЛА, совершающих полет на малых высотах и в пределах мегаполиса.

В настоящее время всю координацию работ по управлению движением пилотируемых и беспилотных ЛА планируется осуществлять на базе технологий автоматического зависящего наблюдения (АЗН-В) [4]. Очевидные ограничения такого подхода заключаются в следующем:

1. Данные о координатах ЛА поступают только от законопослушных и

компетентных пользователей воздушного пространства.

2. Корректные данные о координатах ЛА передаются только при правильной настройке аппаратуры и при отсутствии ошибок бортовой навигационной системы (например, БИНС).

Кроме того, имеются ситуации, в которых данные АЗН-В о координатах БЛА отсутствуют, либо не достоверны, а именно:

1. Злой умысел пользователя БЛА (терроризм, контрабанда, нарушение приватности и конфиденциальности, проникновение на охраняемые территории и т.п.) [2].

2. Аварийные ситуации и происшествия, связанные с низкой квалификацией обслуживающих БЛА лиц (при массовом коммерческом и частном использовании).

Очевидна недостаточность такой системы контроля за полётами БЛА, по крайней мере, вблизи аэропортов, мест массового скопления граждан, охраняемых объектов.

Таким образом, возникла необходимость создания независимой объективной системы контроля за БЛА. Поскольку такая система должна быть работоспособной в любых погодных условиях и круглосуточно, то предпочтительно создавать её на основе радиолокационных датчиков.

Задача обнаружения малоразмерных объектов и БЛА, в частности, на фоне отражений от подстилающей поверхности, не нова и многократно поднималась военными специалистами [8, 16]. Зарубежные специалисты её пытаются решать, например, с привлечением армейских модифицированных радаров AN/TPQ-50,

изначально используемых для обнаружения артиллерийских снарядов, ракет и минометных мин. Однако в настоящее решение может быть найдено только при разработке РЛС малой дальности (РЛС МД) для обнаружения и сопровождения БЛА. При этом, такая РЛС МД должна устойчиво обнаруживать БЛА над районами городской застройки с высоким уровнем помеховых отражений от зданий и сооружений.

Поясним этот тезис: задача обнаружения относительно высоко летящего над слабо отражающей поверхностью БЛА решается в настоящее время некоторыми серийными РЛС [17]. Эта ситуация качественно меняется, когда БЛА летит на малой высоте в непосредственной близости от зданий и сооружений. В этом случае при работе РЛС создаётся высокий уровень паразитных фоновых отражений, на несколько порядков превосходящий отражения собственно от БЛА. Поэтому для решения задачи обнаружения малоразмерной динамичной цели в таких условиях необходимо выполнить целый ряд противоречивых требований:

- широкий динамический диапазон приёмных трактов (для отсутствия перегрузок в принимаемых сигналах);
- высокую чувствительность приёмного тракта;
- высокую пространственную разрешающую способность;
- крайне низкий уровень боковых лепестков функции селекции;
- высокий темп обзора пространства;
- значительный уровень подавления фоновых отражений от зданий и поверхности (СДЦ).

При использовании традиционных методов СДЦ, основанных на использовании эффекта Доплера, два последних требования явно противоречат друг другу (требование высокого темпа обзора ограничивает время накопления сигнала). Без эффективной селекции фоновых отражений в традиционных алгоритмах обнаружения цели необходимо повышать уровень порогов обнаружения, что делает не обнаруживаемыми малоразмерные цели (которые были бы обнаружены в более простой помеховой обстановке).

Ещё одно очевидное требование к таким РЛС – это необходимость обеспечить низкий уровень их радиоизлучений для экологической безопасности.

Таким образом, применительно к стационарным наземным РЛС возникает задача обнаружения и измерения координат широкого класса воздушных целей с малыми величинами ЭПР и относительно низкими радиальными скоростями движения.

Эту задачу можно решить, используя известную технологию сверхкороткоимпульсной радиолокации (СКИРЛ). Важными преимуществами данной технологии являются следующие:

- высокая разрешающая способность по дальности за счет малого импульсного объема элемента разрешения и минимального уровня боковых лепестков функции селекции по дальности,

- возможность построения алгоритма селекции движущихся целей без использования эффекта Доплера, а, следовательно, отсутствие «слепых скоростей» в возможном диапазоне скоростей движения цели.

Научным коллективом НИО-407 МАИ (НИУ) был изготовлен экспериментальный образец панорамной РЛС по технологии СКИРЛ (СКИ РЛС), который обладает высокими селективными свойствами и обеспечивает работу в условиях интенсивных отражений от подстилающей поверхности [15].

2. Оценка ЭПР БЛА с использованием макетного образца СКИ РЛС

Чёткое понимание облика РЛС и технических характеристик, необходимых для решения поставленной задачи, невозможно без экспериментальных оценок наблюдаемости (ЭПР) объектов интереса. Встречающиеся оценки ЭПР БЛА на уровне $0,001 \text{ м}^2$ и менее [16] вызывали у авторов ряд сомнений в достоверности. Не акцентируя внимание на специальных военных БЛА (с принятыми мерами по снижению уровня ЭПР), в работе сделана попытка экспериментальной оценки величины ЭПР для серийных (доступных) образцов БЛА. Такие БЛА и могут стать причиной опасных инцидентов из-за неграмотной эксплуатации, аварийных ситуаций или действий террористов.

Для оценки ЭПР БЛА использовался экспериментальный образец СКИ РЛС X-диапазона, внешний вид которого на позиции приведён на рисунке 1.



Рисунок 1. Экспериментальный образец СКИ РЛС X-диапазона

Таблица 1. Технические характеристики СКИ РЛС.

Рабочая частота	$F_0=9,8$ ГГц
Длительность импульсов	$\tau_{\text{и}} = 10$ нс
Период обзора	$T_{\text{обз}} = 1$ с
Частота повторения зондирующих импульсов	$F_{\text{п}} = 10$ кГц
Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости	$\theta_{\text{г}} = 0,7^{\circ}$
Ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости	$\theta_{\text{в}} = 6^{\circ}$

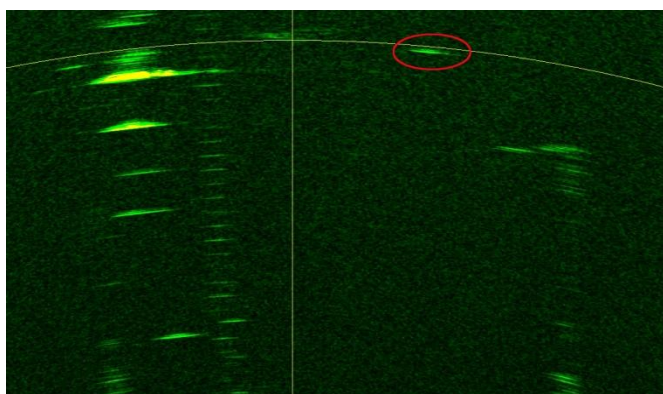
В качестве объектов исследования были использованы доступные quadro- и гексакоптеры: CZ960, Phantom 3, внешний вид которых приведён на рисунке 2.



Рисунок 2. Гексакоптер CZ960 Copterzone, Phantom 3 (справа).

В ходе экспериментов были выполнены пролёты БЛА. Пролёт осуществлялся по прямолинейным траекториям (дальность: не более 1 км, в связи с ограничениями по дальности контроля БЛА с пульта управления, высота: не выше 20м, т.е так, чтобы БЛА все время эксперимента находился в луче РЛС). Регистрировался набор первичных радиолокационных кадров (РЛИ) и соответствующих им оптических изображений с системы видеофиксации эксперимента (см. рис. 3).

БЛА наблюдался на экране РЛС на всём протяжении полёта, при этом из-за бокового ветра траектория полёта отличалась от прямолинейной, что видно на рис. 4. В результате получены оценки ЭПР, усреднённые по нескольким ракурсам, в которых наблюдался БЛА.



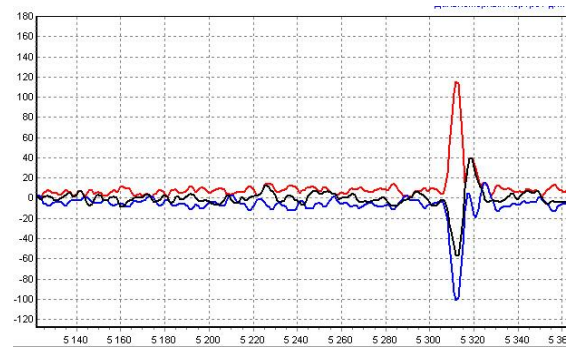


Рисунок 3. Первичное РЛИ, фото и оциллограмма отражённого от гексакоптера сигнала (на удалении 1 км). Синяя и черные кривые на графике – квадратуры, красная – амплитуда сигнала.

Обработка массивов экспериментальных данных состояла из следующих процедур [6]:

1. оценки среднего значения квадратурных компонентов принятых сигналов и компенсации смещений, вызванных уходом нулей квадратурных демодуляторов,
2. вычисления средних значений амплитуды и СКО принятых сигналов,
3. селекция цели
4. оценка средней амплитуды сигнала, отраженного от УО (см. рис. 5),
5. нахождение средней ЭПР цели,

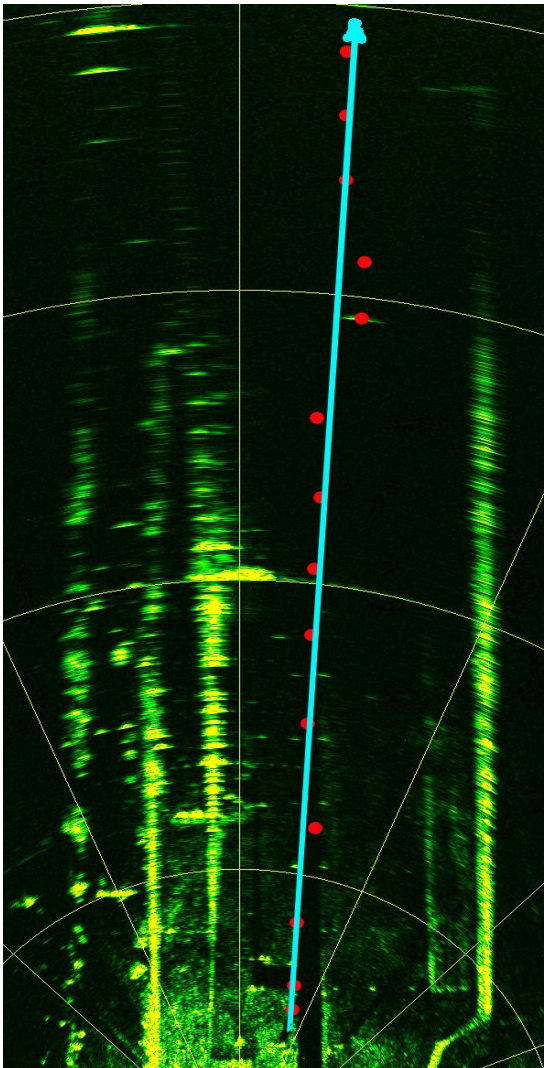


Рисунок 4 – Направление пролёта БЛА (постобработка) (слева) и космический снимок (справа)

Среднее значение ЭПР рассчитывается по формуле:

$$S_{отр}(\tau_{и}, \Theta, R) = \frac{A_{изм}^2(\tau_{и}, \Theta, R)}{A_{yo}^2} \cdot S_{yo} \cdot \frac{K_{yo}}{K_{изм}} \cdot \left(\frac{R_{изм}}{R_{yo}} \right)^4 \quad (2)$$

где $A_{изм}^2(\tau_{и}, \Theta, R)$ – среднее значение квадрата амплитуд отражений от цели,

A_{yo}^2 – среднее значение квадрата амплитуды отражения от УО,

S_{yo} – ЭПР УО,

$K_{изм}, K_{yo}$ – коэффициенты ослабления аттенюаторами в текущем эксперименте

и при калибровке системы,

$R_{\text{изм}}$ – дальность до цели,

$R_{\text{уго}}$ – дальность до уголкового отражателя.

Результирующее значение ЭПР как для БЛА CZ960 Copterzone, так и для Phantom 3 составило величину порядка $0,1 \text{ м}^2$ (в зависимости от ракурса наблюдения). В ходе экспериментов использовался зондирующий сигнал (ЗС) в виде радиоимпульса длительностью 10 нс. БЛА устойчиво обнаруживался на всей дистанции до 1 км (при средней мощности излучения около 45 мВт).

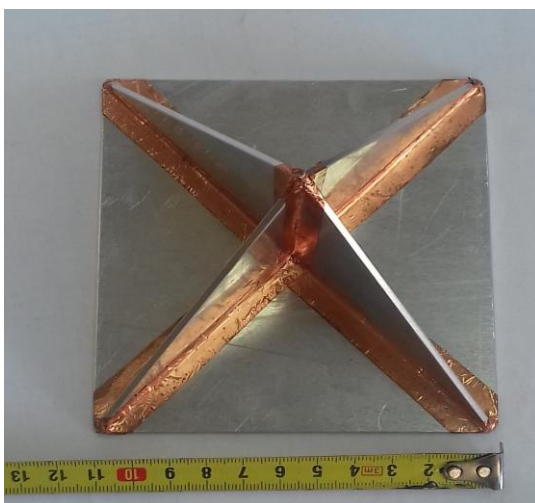


Рисунок 5. Уголок с гранью 75 мм и ЭПР 1.33 м^2 .

Не претендуя на высокую точность измеренных ЭПР, можно, тем не менее, утверждать: для значительного числа БЛА, представляющих потенциальную угрозу, оценки ЭПР занижаются более, чем на порядок.

3. СКИ РЛС для обнаружения малоразмерных воздушных объектов

Если изначально отказаться от дорогостоящих и экзотических пока решений, то для решения задачи выделения малоразмерных воздушных объектов на фоне отражений от подстилающей поверхности (ПП) возможны два подхода:

1. Повышение качества доплеровской фильтрации при росте времени нахождения цели в луче антенны;

2. Снижение мощности помехового сигнала (от ПП) за счёт повышения разрешающей способности РЛС.

Принципиальное ограничение первого подхода связано со снижением темпа обзора пространства, что делает такое решение узкоспециализированным и непригодным для работы с динамичными (воздушными) целями.

Второй подход требует расширения полосы частот РЛС для уменьшения площади элемента селекции, с которого набирается мощность помехового сигнала. Однако не все методы расширения спектра зондирующего сигнала (ЗС) одинаково эффективны для выделения малоразмерных объектов. Известны [13] преимущества расширения спектра ЗС при сокращении длительности импульса для обнаружения малоразмерных объектов. Такой сверхкороткоимпульсный (СКИ) ЗС не имеет боковых лепестков функции селекции (ФС) по дальности. В свою очередь, отсутствие боковых лепестков ФС позволяет наблюдать малоразмерную цель в непосредственной близости от крупной, при перепаде ЭПР на 30 и более дБ [15].

Известно, что использование СКИ ЗС позволяет применять межобзорные методы СДЦ (МОВ) [14], решающие проблему обнаружения объектов при малых значениях радиальных компонентов вектора скорости БЛА и в моменты кратковременного зависания БЛА [12]. Благодаря этим особенностям, СКИ РЛС позволяет обнаруживать БЛА в районах городской застройки, в непосредственной близости от зданий. Кроме того, применение СКИ ЗС позволяет обеспечить

экологическую безопасность РЛС, в том числе и за счёт высокой скважности ЗС [9].

Отмеченные выше особенности СКИРЛ позволяют осуществлять наблюдение малоразмерных БЛА в условиях городской застройки, что не реализовано РЛС с другими типами ЗС.

В ходе натурных испытаний СКИ РЛС располагалась внутри двора - колодца на расстоянии 90 м от железного забора (см. рис.6).



Рисунок 6. Фото лоцируемой сцены с летящим БЛА

Для сравнения качества были сформированы РЛИ одной и той же сцены с длительностями ЗС: 50 нс (рис. 7 слева) и 10 нс (рис. 7 справа).

Мощный эхо-сигнал от объектов застройки при длительности ЗС 50 нс вызывает срабатывание АРУ, что уменьшает чувствительность приёмника.

Неподавленные отражения от местных предметов (МП) зданий и забора заставляют поднимать уровень порога исключая возможность обнаружения

малоразмерных целей.

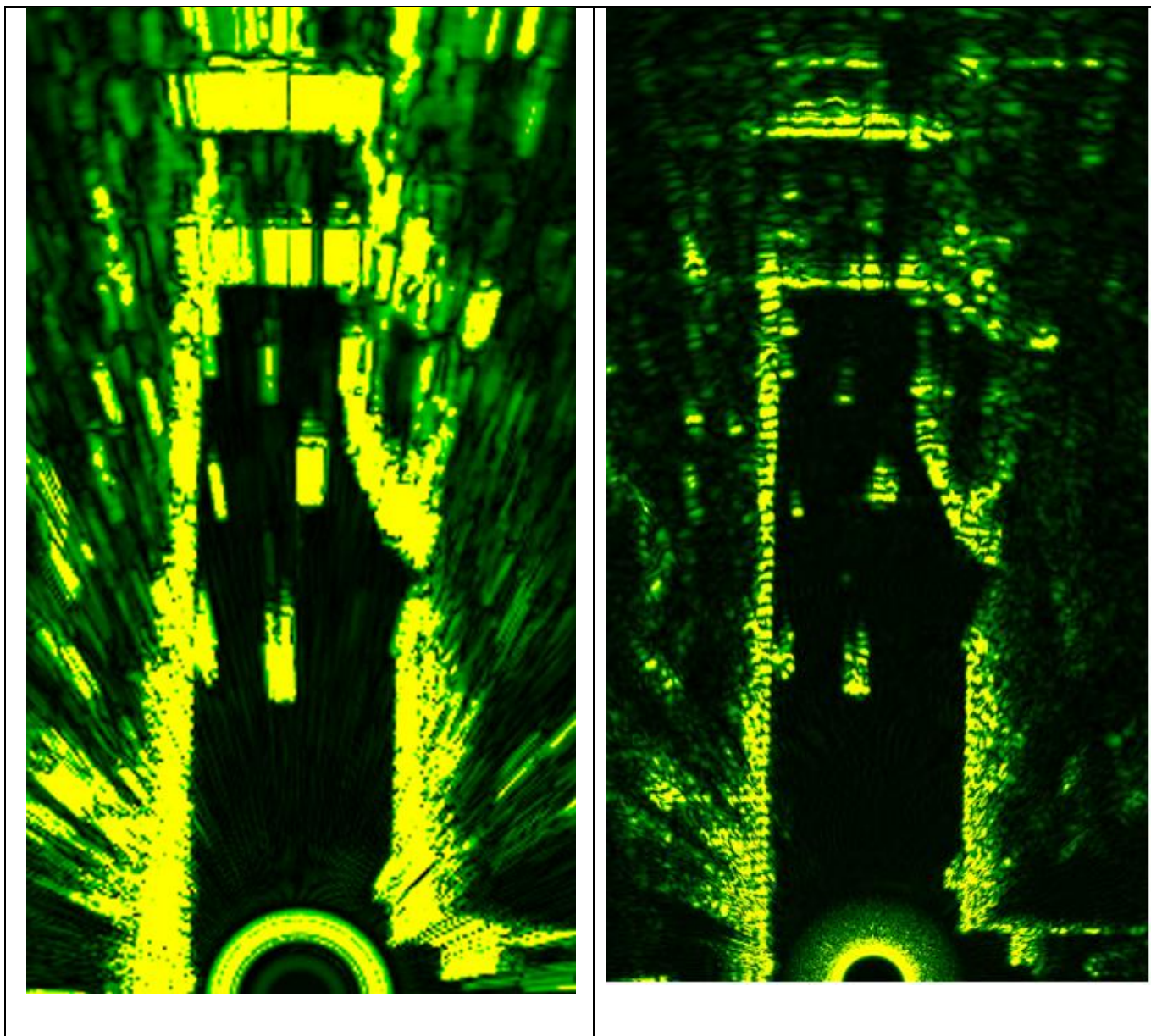


Рисунок 7. РЛИ лоцируемой сцены при длительности ЗС 50 и 10 нс (справа)

Отличительная особенность городской застройки на РЛИ – очень высокий уровень отражений от МП при весьма низком уровне флуктуаций. В этом случае оказываются весьма эффективными алгоритмы СДЦ с МОВ (см. рис.8).

Уменьшение импульсного объёма ЗС длительностью 10 нс позволяет снизить мощность пассивной помехи на входе приёмного устройства. А СДЦ по положению позволяет выделять низкоскоростные и даже зависшие БЛА.

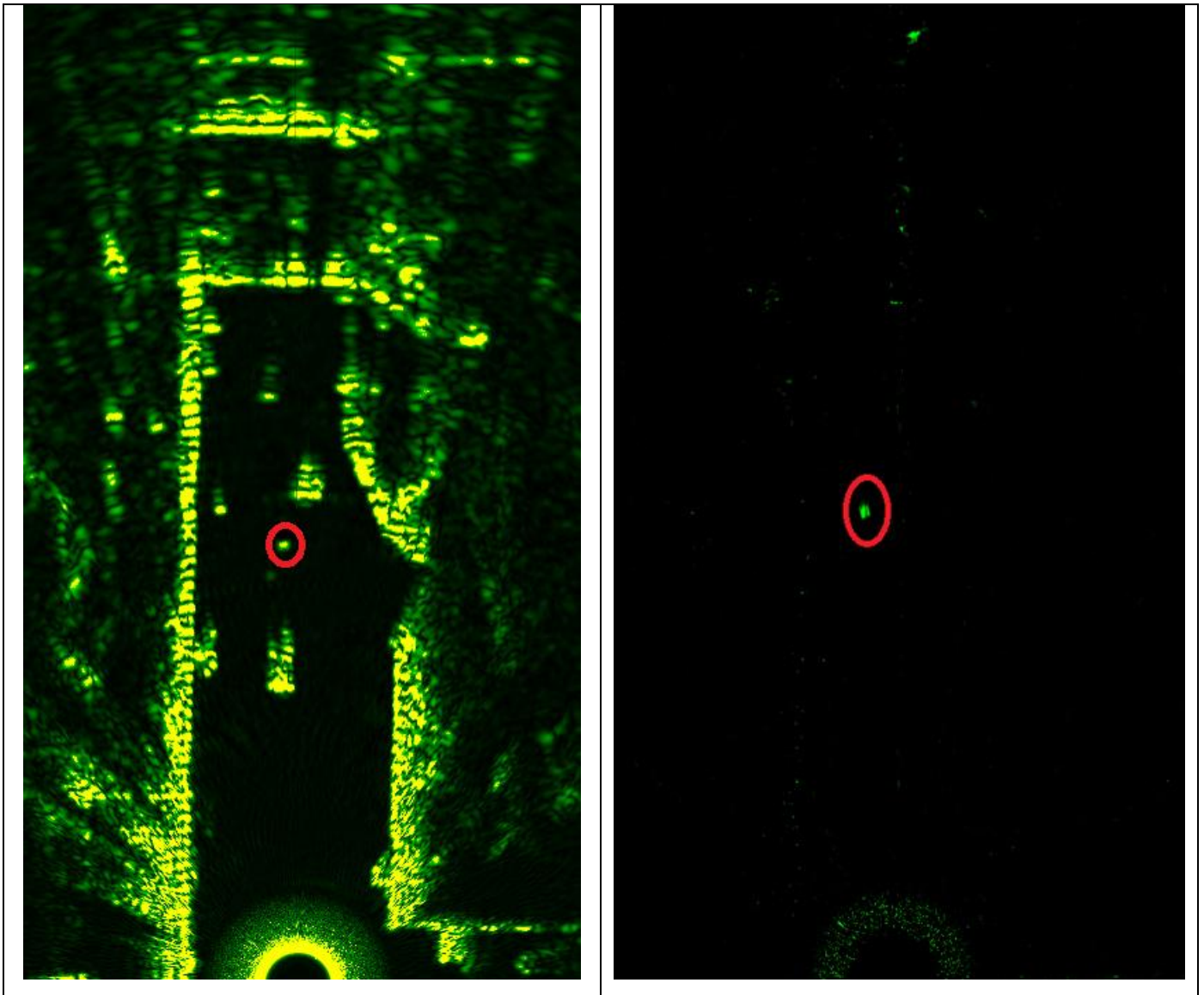


Рисунок 8. Выделение БЛА при использовании процедуры МОВ (слева – исходное РЛИ, справа – РЛИ после МОВ).

Использование поэлементного адаптивного порога, а именно усредненного по некоторому количеству РЛИ значения амплитуды в каждой точке изображения, дает дополнительные возможности по эффективному обнаружению малоразмерных объектов, например БЛА и человека.

4. Заключение

Получены оценки ЭПР для малых БЛА, на основе которых могут быть рассчитаны рубежи обнаружения перспективных РЛС. Экспериментально

измеренные ЭПР имеют величину порядка $0,1 \text{ м}^2$. Такой результат позволяет рассчитывать на создание в ближайшей перспективе относительно дешёвой РЛС для контроля полётов БЛА, в том числе над районами городской застройки.

Широко доступные модели гражданских БЛА могут быть обнаружены СКИ РЛС на дистанциях 3-5 км, что практически достаточно для обеспечения безопасности (принятия решения) охраняемых объектов, массовых мероприятий и т.п.

В процессе испытаний СКИ РЛС X-диапазона по обнаружению и слежению за БЛА, хорошо наблюдались и другие объекты: человек, самолёт, легковой автомобиль, имеющие на порядок большие величины ЭПР.

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

Библиографический список

1. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными авиационными комплексами нового поколения // Труды МАИ, 2011, № 47: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=26769>
2. Чучхейские дроны из авиамodelьного кружка, 2016, URL: <http://www.gazeta.ru/army/2016/01/13/8019047.shtml>
3. Британские пилоты: дроны представляют угрозу самолетам, 2016, URL:

http://www.bbc.com/russian/uk/2016/03/160302_drone_near_miss_plane_research

4. Сотрудники магаданской колонии задержали почтальона-дрона, 2015, URL: <https://rg.ru/2015/07/20/reg-dfo/koloniya-anons.html>

5. На территории Белого дома нашли беспилотник, 2015, URL: http://www.bbc.com/russian/international/2015/01/150126_usa_white_house_drone

6. Merrill I. Skolnik. Radar Handbook. // Third Edition., Editor in Chief, McGraw-Hill Companies, 2008, 1351p.

7. Федеральный закон "О внесении изменений в Воздушный кодекс Российской Федерации" от 03.07.2016 № 291-ФЗ, URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200651

8. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА, 2015, URL: <http://arsenal-otechestva.ru/article/389-antidrone>

9. Ананенков А.Е., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Скосырев В.Н. Особенности оценки характеристик обнаружения в РЛС малой дальности // Радиотехника. 2013. № 11. С. 35 – 38.

10. Скосырев В.Н., Кочкин В.А., Шумов А.В., Ананенков А.Е., Слукин Г.П., Нефедов С.И., Федоров И.Б. Пути создания радиооптического комплекса контроля воздушного и наземного пространства для диспетчерских служб региональных аэропортов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 11. С. 301-321.

11. Федоров И.Б., Слукин Г.П., Нефедов С.И., Скосырев В.Н., Ананенков А.Е., Нуждин В.М. Многофункциональная РЛС малой дальности для удалённой диспетчеризации региональных аэропортов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.

Баумана. 2014. № 12 С. 633-642.

12. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Скосырев В.Н. Экспериментальная оценка подавления отражений от подстилающей поверхности в РЛС с высоким пространственным разрешением. // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции «Радиооптические технологии в приборостроении», Небуг, 20-25 августа 2015, С. 94-100.

13. Ананенков А.Е., Скосырев В.Н. Применение сверхкороткоимпульсных сигналов в РЛС малой дальности. – М: Эдитус, 2015. 138 с.

14. Плекин В.Я. Цифровые устройства селекции движущихся целей. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2003. - 79 с.

15. Скосырев В.Н., Нуждин В.М., Ананенков А.Е., Коновальцев А.В. Технология сверхкороткоимпульсной радиолокации – ключ к повышению информационных возможностей РЛС // Материалы 1-й международной конференции «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике», Суздаль, 27-29 сентября 2005, 360 с.

16. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО, 2015, URL: <http://army-news.ru/2015/02/malorazmernye-bespilotniki-novaya-problema-dlya-pvo/>

17. Радиолокационная станция 1Л122 «Гармонь», 2015, URL: <https://topwar.ru/68472-radiolokacionnaya-stanciya-1l122-garmon.html>