

**ОБЛИК БОРТОВОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ НА
БЕСПИЛОТНОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ ДЛЯ ГУМАНИТАРНОГО РАЗМИНИРОВАНИЯ**

А. М. КИЕВСКИЙ, Д. Н. ПОНЕДЬКО, НГУЕН ХОАНГ ХИЕП, С. В. КОЗЛОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: temkaakievskiy@gmail.com

Аннотация. Обоснован облик бортовой РЛС с синтезированием апертуры для беспилотного летательного аппарата для решения задач гуманитарного разминирования с возможностью обнаружения слабозаглубленных отражающих объектов и объектов, скрытых растительностью. Приведена структурная схема РСА. Указаны особенности выбора диапазона частот, параметров сигналов и антенны. Выполнены оценки производительности РСА при решении типовых задач.

Abstract. The appearance of an on-board radar with aperture synthesis for an unmanned aerial vehicle for solving humanitarian demining tasks with the possibility of detecting poorly buried reflective objects and objects hidden by vegetation is substantiated. A block diagram of the RSA is given. The features of the choice of the frequency range, signal parameters and antenna are given. The estimates of the RSA performance in solving typical tasks have been performed.

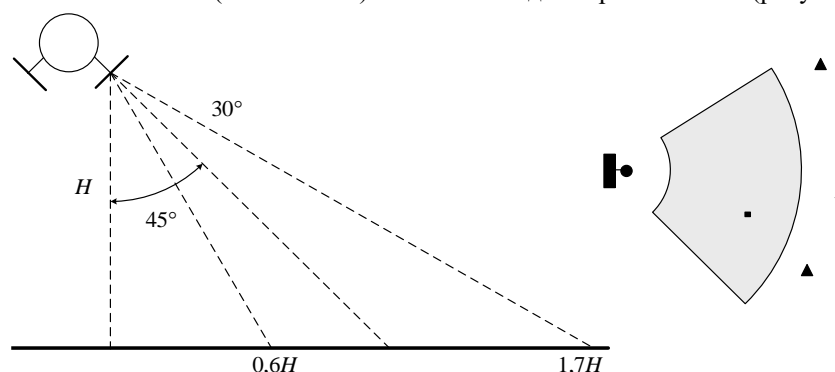
Введение

Задача гуманитарного разминирования ввиду расширения числа и масштабов военных конфликтов в мире является весьма актуальной [1]. Это требует разработки специальных технических средств. Для обнаружения взрывоопасных объектов используются различные миноискатели и радары подповерхностного зондирования [2]. Однако, их применение связано с опасностью до людей, проводящих эти работы, и, в целом, характеризуется низкой производительностью. Повышение производительности и безопасности работ по обнаружению взрывоопасных предметов может быть достигнуто при использовании радиолокатора с синтезированием апертуры на беспилотном летательном аппарате (БЛА) [3-6].

Цель статьи – обоснование технических характеристик РСА на БЛА для гуманитарного разминирования.

Характеристики носителя, диапазон рабочих частот и параметры зондирующих сигналов

Полагаем, что РСА размещается на БЛА произвольного типа (самолетного, вертолетного или мультироторного), способного совершать полет по заданной программе с малым радиусом разворота со скоростью полета $V = 20 \dots 30$ м/с (72...96 км/ч). Основной вид обзора – боковой (рисунок 1).

**Рис. 1.** Геометрия радиолокационного наблюдения

Исходя из необходимости достижения хорошей проникающей способности выберем диапазон частот 500...700 МГц ($\lambda=0,6\dots0,429$ м) В качестве передающей и приемной антенн используем полуволновые вибраторы (на центральную длину волны 0,5 м). Согласование антенны с трактом выполним на основе динамического принципа согласования [10].

Использование диапазона 500...700 МГц в сочетании с вибраторной антенной обеспечивает:

- хорошую проникающую способность зондирующего сигнала под густую растительность;
- возможность синтеза апертуры в широком диапазоне углов по азимуту порядка $\pm 30^\circ$ от бокового направления; это обеспечивает возможности разноракурсного наблюдения одного и того же участка земной поверхности для обнаружения опасных предметов и некогерентного накопления с уменьшением уровня спекл-шума на формируемом радиолокационном изображении (РЛИ);
- отсутствие проблемы азимутальной неоднозначности.

Вибратор ориентируем под углом $(30...45)^\circ$ к горизонту. Тогда, для высоты полета H и ширина главного лепестка ДН вибратора 30° ширина полосы обзора на земной поверхности составит $\Delta L \approx 1,1H$.

В качестве зондирующего сигнала РСА используем непрерывное излучение с частотной модуляцией (FMCW), что позволяет получить высокую разрешающую способность по наклонной дальности при низких требованиях к аппаратуре обработки. Типовые FMCW-радиолокаторы имеют период повторения зондирующего сигнала с частотной модуляцией порядка $T_r = 1...2$ мс, что определяется быстродействием синтезаторов частот [3-6]. Примем $T_r = 1$ мс.

Для РСА при указанной на рисунке 1 геометрии наблюдения максимальная дальность $r_{\max} \approx 1,7H$. Минимальная разрешающая способность по поперечной дальности, которая будет на дальней границе полосы захвата, при времени синтезирования T_c составит

$$r_{\perp} \approx \frac{\lambda H}{2VT_c \cos(60^\circ)}.$$

Отметим, что с учетом выбранного диапазона частот, скорости полета БЛА, периода повторения и ширины главного лепестка ДН антенны азимутальная неоднозначность отсутствует, то есть $\frac{2V}{\lambda} < \frac{1}{2T_r}$

В таблице 1 приведены результаты расчетов основных параметров РСА для различных высот полета. Расчет производительности проведен для доли полезного времени на радиолокационную съемку (с учетом разворотов БЛА и т.д.) в 60% от общего времени полета.

Таблица 1. Основные характеристики радиолокационной съемки в зависимости от высоты полета БЛА

Высота полета, м	Ширина полосы захвата, м	Максимальная наклонная дальность, м	Минимальная Разрешающая способность по поперечной дальности, м	Производительность радиолокационной съемки, км ² /час
50	55	100	0,63	2,4
100	110	200	1,25	4,8
200	220	400	2,5	9,5
400	440	800	5	19

Как следует из таблицы 1, приемлемая разрешающая способность по поперечной дальности, обеспечивающая локализацию металлических отражающих объектов с неопределенностью порядка 1 метра, будет достигаться при высоте полета БЛА 50...100 м. Большая высота полета может быть использована при обзорном режиме.

Исходя из достижения примерно одинаковой разрешающей способности по поперечной и по горизонтальной дальности $\Delta r_{\Gamma} \approx \frac{c}{2\Delta f_0 \sin(30^\circ...60^\circ)} = \frac{(0,6...1)c}{\Delta f_0}$ (на ближней границе полосы захвата)

порядка 1 м, ширина спектра зондирующего сигнала должна быть 200...300 МГц.

Максимальная полоса частот сигнала на выходе смесителя (максимальная разностная частота)

$f_{P_{\max}} \approx \frac{2\Delta f_0}{T_c} \frac{r_{\max}}{c}$ при высоте полета 100 м составит порядка 400 кГц. Частота дискретизации (при

бесквadrатурной обработке) может быть принята $F_s = 1$ МГц.

Требуемая мощность излучения исходя из достижения отношения сигнал/шум на радиолокационном изображении 30 дБ при ЭОП точечного отражателя 0,01 м² должна составлять величину $P_{tr} = 10$ мВт.

Оценим возможность по обнаружению небольших металлических объектов с использованием РСА. Для оценки возможности обнаружения мин и других предметов рассчитывалась ЭОП металлического диска диаметром $d=0,1; 0,2$ и $0,3$ м. Расчеты проводились по формуле

$$\sigma_r \approx \frac{4\pi \pi d^2}{\lambda^2 4} \left(2 \frac{J_1\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \theta\right)}{\frac{2\pi d}{\lambda} \theta} \right)^2.$$

Результаты расчетов для двух длин волн в зависимости от угла падения θ приведены на рисунке 3.

В таблице 2 приведены данные по удельной ЭОП различных типов земной поверхности для выбранной длины волны.

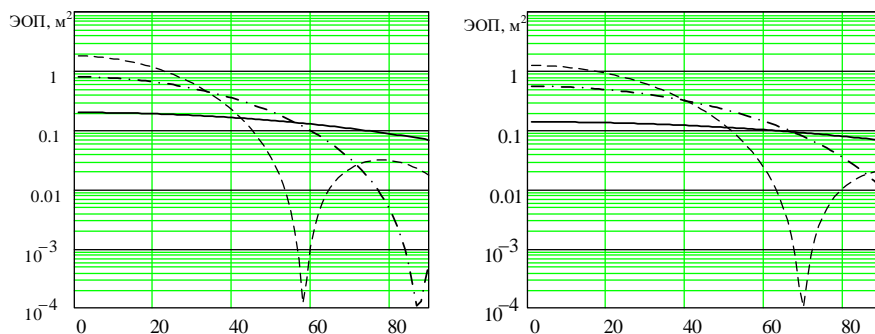


Рис. 2. Зависимости ЭОП металлического диска от угла падения:
а – длина волны 0,5 м; б – длина волны 0,6 м

Таблица 2. Удельные ЭОП основных типов земной поверхности для длины волны 0,5 м

№	Тип поверхности	Удельная ЭПР, дБ/м ²
1	Бетон	-64
2	Пашня	-50
3	Снег	-44
4	Лиственный лес (сухой)	-24
5	Лиственный лес летом после дождя	-19
6	Лиственный лес зимой	-44
7	Хвойный лес зимой и летом	-24
8	Луг с травой, высотой >0,5 м	-25
9	Луг с травой высотой <0,5 м	-29

Для заданной геометрии наблюдения угол падения находится в диапазоне $30...60^\circ$, что обеспечивает ЭОП предмета $0,2...0,1$ м² ($d=0,1$ м), $0,7...0,1$ м² ($d=0,2$ м) и $0,8...0,1$ м² ($d=0,3$ м).

ЭОП площадки земной поверхностью площадью 1 м² для основных типов земной поверхности составляет величину менее 0,01 м². Это свидетельствует о возможности наблюдения указанных объектов на фоне основных типов поверхностей.

Структурная схема РСА

Структурная схема РСА приведена на рисунке 3.

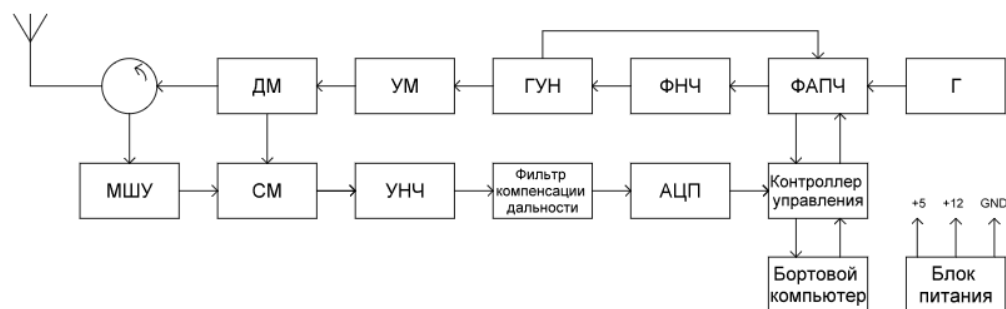


Рис. 3. Структурная схема РСА

На рис.3 обозначены: ДМ – делитель мощности; МШУ – малошумящий усилитель; СМ – смеситель; УНЧ – усилитель нижних частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УМ – усилитель мощности, ГУН – генератор управляемый напряжением, ФНЧ – фильтр нижних частот; ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты, Г – генератор.

Ферритовый циркулятор позволяет использовать одну антенну в качестве приемной и передающей, что облегчает конструкцию и позволяет использовать меньший БЛА.

Управление радиолокатором осуществляется с помощью контроллера управления по командам от бортового компьютера.

В ходе радиолокационной съемки формируемый траекторный сигнал может передаваться на наземный пункт приема и обработки по каналу связи с соответствующей и относительно небольшой (3...4 Мбит/с) пропускной способностью, либо записываться на флеш-память с последующим снятием данных по окончании полета БЛА.

Формирование радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности осуществляется с использованием стандартных вычислительных средств на мобильном наземном пункте обработки информации.

Проблемные вопросы создания РСА и пути их решения

Анализ структуры и смежных по направлению разработок [3-6] позволяет выделить следующие проблемные вопросы создания РСА:

обеспечение излучения и приема сигналов с шириной спектра 200...300 МГц с использованием вибраторной антенны с центральной частотой 600 МГц;

компенсация мощности «просачивающегося» зондирующего сигнала [3];

подавление мощных альтиметровых отражений от участка земной поверхности, расположенных под БЛА-носителем;

обеспечение построения радиолокационных изображений в условиях миграции дальности [3,5,7,8];

компенсация траекторных нестабильностей БЛА [3,5,9].

Кроме того, существенный интерес представляет определение отражательных характеристик объектов радиолокационного наблюдения (мины и другие опасные предметы) в указанном диапазоне частот.

Обеспечение излучения и приема сигналов с шириной спектра 200...300 МГц с использованием вибраторной антенны может быть достигнуто путем использования динамического принципа согласования [5].

Компенсация мощности «просачивающегося» зондирующего сигнала в значительной степени определяется развязкой между одной антенной в режиме приема/передачи или развязкой между отдельными приемными и передающими антеннами.

Использование отдельных приемной и передающей антенн (вибраторов) требует обеспечить достаточно большое, порядка $(3...4)\lambda$, расстояние между вибраторами. При меньшем расстоянии взаимное сопротивление вибраторов оказывается большим, что приводит к низкому уровню развязки и искажению диаграмм направленности. Обеспечение необходимого расстояния между приемной и передающей антенной для БЛА является проблематичным.

При использовании одной антенны необходимо использование циркулятора, обеспечивающего уровень развязки 17...20 дБ. Кроме того, необходимо учитывать коэффициент отражения сигнала от антенны (минус 10...20 дБ). Исходя из этого мощность «просачивающегося» зондирующего сигнала на входе приемника может составлять величину порядка $P_{пр} = 1$ мВт.

Требуемый динамический диапазон

$$D \approx 10 \lg \frac{P_{пр}}{P_{r_{\min}}},$$

где $P_{r_{\min}} = \frac{P_{tr} G^2 \lambda^2 \sigma_{\min}}{(4\pi)^3 r_{\max}^4}$ - минимальная мощность принимаемого полезного сигнала; σ_{\min} -

минимальная ЭОП обнаруживаемой цели. Для $\sigma_{\min} = 10^{-3} \text{ м}^2$, $G = 1,5$ - коэффициент усиления диполя; $r_{\max} = 200 \text{ м}$ - максимальная дальность до цели, получим $D = 117 \text{ дБ}$.

Реализация такого динамического диапазона проблематична. Поэтому, в РСА требуется использование компенсатора просачивающегося сигнала [3] или режекторного фильтра на околонулевые значения разностной частоты [4].

Для компенсации траекторных нестабильностей БЛА традиционно используются навигационные приемники с поддержкой режима RTK или в сочетании с инерциальными навигационными системами. Эти варианты являются достаточно емким в аппаратурном плане. Кроме того, могут быть использованы методы автофокусировки по отдельным отражателям с достаточной амплитудного отраженного сигнала. С учетом относительно небольшой зоны наблюдения наличие таких отражателей не может быть гарантировано.

Поэтому, для рассматриваемого РСА предлагается два варианта компенсации траекторных нестабильностей:

1) по периметру области наблюдения размещаются не менее 3-х активных переотражателей-ретрансляторов с эквивалентной ЭОП порядка 10^4 м²; эти отражатели могут размещаться на безопасных местах на расстоянии 0,5...3 км от текущей области наблюдения; измерение дальности до указанных отражателей обеспечивает возможность определения текущих траекторных параметров носителя РСА;

2) на борту БЛА размещается ретранслятор навигационного сигнала GPS на выделенную частоту, а на станции управления БЛА размещается навигационный приемник (одно- или двухчастотный) с дополнительным каналом приема ретранслированного сигнала; точные координаты БЛА определяются путем обработки ретранслированного сигнала в рамках суммарной дальномерной системы [11].

Заключение

Основные особенности предлагаемой РСА на БЛА для гуманитарного разминирования заключаются в использовании диапазона длин волн около 0,5 м в сочетании с применением легкой дипольной антенны с динамическим принципом согласования в диапазоне рабочих частот. Это обеспечивает высокие возможности по обнаружению опасных предметов и определения их координат с неопределенностью порядка 1 м.

Список использованных источников

1. International Standards for Humanitarian Mine Clearance Operations. – UN-1996, – 75 p.
2. Малевич И.Ю., Лопатченко А.С. Портативный ЛЧМ радар подповерхностного зондирования / Доклады БГУИР, № 1, 2018. – С. 75-81.
3. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. – М.: Радиотехника, 2020. – 280 с.
4. Горбатов, К. Решение «Альфа-прибор» для измерения скорости железнодорожных составов / К. Горбатов, В. Логинов, Ю. Котенев // СВЧ-электроника №3 2020. – С. 10-16.
5. Кузнецов В. А., Гончаров С. А. Структурно-параметрический синтез малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата ближнего действия // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 28-72. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/02-Kuznetsov.pdf>.
6. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Краткий опыт создания и первые результаты практической съемки поверхности малогабаритной РЛС с синтезированием апертуры антенны с борта мультикоптера // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/12/text.pdf>.
7. Moreira A., Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1994. Vol. 32. No. 5. P. 1029-1040.
8. Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing. McGraw-Hill, New York, 2005, 894 p.
9. Каменский К.В. Влияние траекторных нестабильностей и характеристик бортовой навигационной системы на качество радиолокационного изображения при синтезировании апертуры // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: 10.34759/trd-2022-125-14.
10. Киевский А.М. Способ динамического согласования приемо-передающего тракта и антенны радиолокатора с непрерывным излучением и частотной модуляцией / А.М. Киевский, Д.Н. Понедько, С.В. Козлов // в наст. сборнике.
11. Пряничников В.В. Высокоточное оценивание траектории объектов на основе ретрансляции навигационных сигналов GPS / В.В. Пряничников, С.В. Козлов // в наст. сборнике.