

# Построение изображений в бистатистическом радиолокационном комплексе Р-VHF диапазонов высокого разрешения

А.В. Борисенков<sup>1</sup>, О.В. Горячкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Льва Толстого 23, Самара, Россия, 443010

**Аннотация.** В статье описан алгоритм формирования радиолокационных изображений (РЛИ) в бистатистическом двухчастотном радиолокационном комплексе (БиРЛК) Р-VHF диапазонов. Особенностью комплекса является то, что зондирующие импульсы бортового радиопередающего устройства излучаются одновременно в 2-х частотных диапазонах. Предполагается, что за счет одновременной работы в 2-х частотных диапазонах суммарное пространственное разрешение может быть доведено до 2-х метров. В статье приведены результаты натурного наземного эксперимента по построению РЛИ предлагаемого радиолокационного комплекса.

## 1. Введение

В последние годы широко обсуждаются вопросы реализации космических РСА (радиолокатор с синтезированной апертурой) для дистанционного зондирования Земли, работающих в Р и VHF диапазонах частот. РЛИ (радиолокационное изображение) в этих диапазонах несет в себе информацию о распределении коэффициента отражения в толще растительности и почвы.

Широкополосная радиолокация с синтезированной апертурой в диапазонах 20-500 МГц в полосе частот >100 МГц с борта БПЛА и мобильных носителей открывает возможности для новых применений данных систем в задачах ДЗЗ и обороны. Наиболее захватывающие из них связаны с возможностью наблюдать малоразмерные подповерхностные или скрытые растительностью объекты.

Системы подповерхностного радиолокационного зондирования земли с летательных аппаратов появились в конце 80-х годов прошлого века. В 1988 году в JPL стартовал проект многочастотной платформы AIRSAR, предполагавший установку радара в диапазоне VHF. Примерно в то же время начата разработка длинноволновых радаров в Stanford Research Institute и Sweden's Defence Research Agency. В Советском Союзе аналогичные работы начаты в 1989 году в ИРЭ РАН УССР (г. Харьков) и ЦСКБ (г. Самара) под руководством проф. А.И. Калмыкова.

Современное состояние данных систем характеризуют следующие аналоги: CARABAS FOPEN DEMONSTRATOR – РСА на борту БПЛА, разработанная в корпорации Saab (Швеция); FOPEN Reconnaissance, Surveillance, Tracking and Engagement Radar – радиолокатор, предназначенный для разведки целей укрытых листвой; TRACER – РСА в двойной полосе

(UHF/VHF); Boeing A160T – радиолокационная система Р диапазона, размещенная на борту БПЛА.

В период с 2005 по настоящее время научный коллектив центра радиолокационного дистанционного зондирования Земли ПГУТИ (г. Самара) занимается РТС ДЗЗ, которые развиваются не только в направлении создания глобальных, весьма дорогостоящих космических и/или авиационных систем, но и в направлении создания локальных, при этом относительно дешевых технологий, обеспечивающих приемлемый уровень качества решения различных задач ДЗЗ, базирующихся на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), наземном транспорте или некоторой стационарной наземной инфраструктуре [1,2].

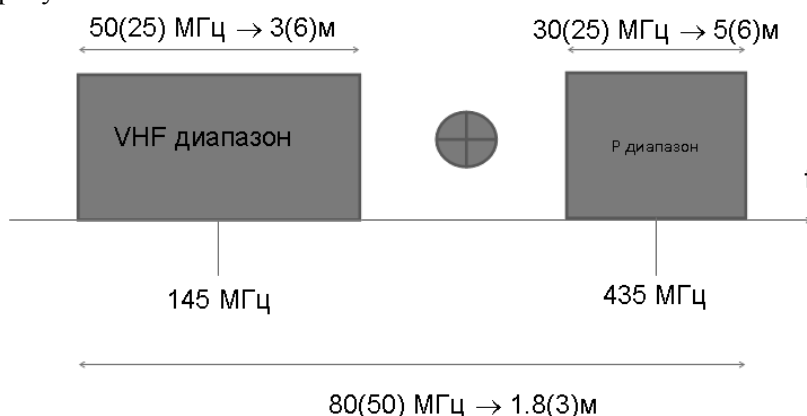
В докладе описаны алгоритмы формирования радиолокационных изображений в бистатическом радиолокаторе с синтезированной апертурой, работающим одновременно (синхронно) в VHF и Р-диапазонах частот. Данный радиолокатор разработан в ЦРДЗЗ ПГУТИ в 2013-2017 гг. Приводятся результаты экспериментальной отработки данного радиолокатора, цель которой была в получении сверхвысокой разрешающей способности, которая обусловлена увеличением полосы частот с 30 МГц в Р диапазоне и 50 МГц в VHF диапазоне до 80 МГц в совмещенном режиме.

## 2. Облик РЛК

Радиопередающая аппаратура БиРЛК представляет собой два импульсных передатчика, обеспечивающих гамму стабильных ЛЧМ (линейная частотная модуляция) и/или ФМП сигналов на несущих частотах 435 МГц и 145 МГц, с полосой частот от 1 до 30 в Р диапазоне и 25-50 МГц в VHF диапазоне. Радиопередающая аппаратура установлена на автомобиле и имеет в своем составе автономный первичный и вторичный источники питания.

Бортовые передающие и наземные приемные антенны представляют собой антенны Уда-Яги. Наземная стационарная приемная аппаратура представляет собой два двухканальных маломощный приемника прямого усиления (до 110 дБ) с цифровой регистрацией 16-разрядных квадратурных компонент на частоте до 200 МГц и последующей цифровой обработкой сигналов. Приемные антенны установлены на мачту, высота которой варьируется от 8 до 12 м.

Данная конфигурация радиолокационного комплекса позволяет не только получить синхронные радиолокационные изображения местности в Р и VHF диапазонах частот, но и получить комбинированные радиолокационные изображения высокого разрешения за счет использования сигнала в полосе 30 и 50 МГц одновременно. Идея этого способа наблюдения иллюстрирует рисунок 1.



**Рисунок 1.** Комбинация частотных диапазонов с целью увеличения разрешения РСА по дальности.

## 3. Алгоритмы формирования РЛИ

В работе рассматриваются особенности реализации алгоритмов формирования радиолокационных изображений в условиях наземного эксперимента. В используемой

модификации БиРЛК отношение сигнал-шум в прямом канале достаточно, для выделения зондирующих импульсов передатчика на фоне шумов и отраженных сигналов простой процедурой фиксации превышения порога, что обеспечивает необходимую синхронизацию независимо в каждом диапазоне частот.

Последовательность этапов формирования радиолокационных изображений (РЛИ) в каждом диапазоне можно представить в виде следующих шагов:

1. Синхронное детектирование и полосовая фильтрация записанных АЦП сигналов отраженного и прямого каналов БиРСА;
2. Сжатие сигнала по наклонной дальности путем проведения цифровой согласованной фильтрации зондирующих ЛЧМ или ФМП импульсов в сигналах отраженного и прямого каналов БиРСА в каждом диапазоне;
3. Синхронизация прямого и отраженного каналов, путем формирования файлов индексов отсчетов сжатых зондирующих импульсов;
4. Формирование файлов двумерных радиоголограмм по сигналам отраженного и прямого каналов в VHF и P-диапазонах частот;
5. Формирование файла суммарной двумерной радиоголограммы при использовании частотного разнесения на величину  $f_s$  (в эксперименте 8-25 МГц).
6. Формирование суммарного 2-х частотного РЛИ в соответствии со следующим выражением

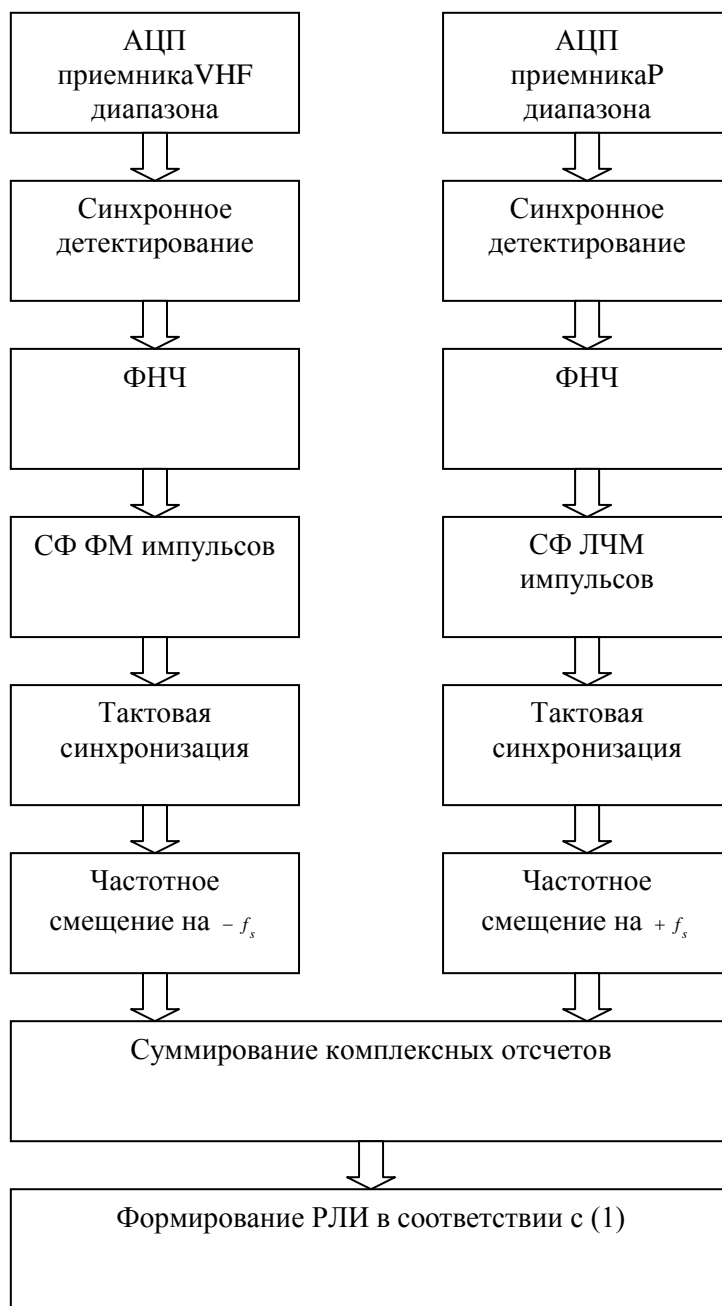
$$\hat{\xi}(x, y) = \int_{t_1}^{t_2} G_{\Sigma}(t, x, y) s_2^*(t - \tau_2(t, x, y) + \tau_1(t)) s_2(t) \cdot \left( e^{-j2\pi(f_P - f_s)\tau_2(t, x, y)} + e^{-j2\pi(f_{VHF} + f_s)\tau_2(t, x, y)} \right) dt \quad (1)$$

где:  $\hat{\xi}(x, y)$  - коэффициент обратного рассеяния (радиолокационное изображение);  $s_2(t)$  - сигнал, зарегистрированный в файле суммарной двумерной радиоголограммы (сигнал представляет собой последовательность отраженных и зондирующих импульсов после предварительной согласованной фильтрации на «нулевой» несущей сдвига по частоте и сложения сигналов в 2-х диапазонах частот);  $\tau_2(t, x, y)$  - временная задержка сигнала в процессе его переотражения от точечной цели на поверхности Земли с координатами  $(x, y)$ ;  $\tau_1(t)$  - временное смещение, вызванное нестабильностью передатчика, оцениваемое в процессе синхронизации;  $G_{\Sigma}(t, x, y)$  - весовая функция, соответствующая движению в пространстве диаграммы направленности (ДН) антенны передающей части и стационарной ДН антенны приемной части БиРЛК.

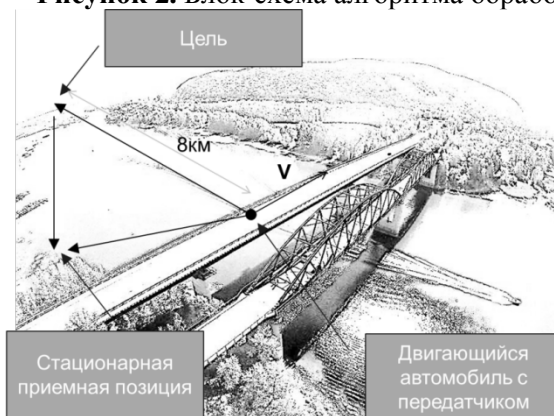
Блок-схема алгоритма обработки показана на следующем рисунке.

#### 4. Результаты наземного эксперимента

В статье приводятся результаты наземного эксперимента по реализации схемы бистатического двухчастотного радиолокационного комплекса. Для работы БиРЛК необходимо, чтобы передающая позиция перемещалась в пространстве. В данном случае для организации процесса перемещения использовался автомобиль,двигающийся по мосту (высота моста примерно 20м). На рисунке 2 показана геометрия съемки.



**Рисунок 2.** Блок-схема алгоритма обработки.



**Рисунок 3.** Геометрия наземного эксперимента.

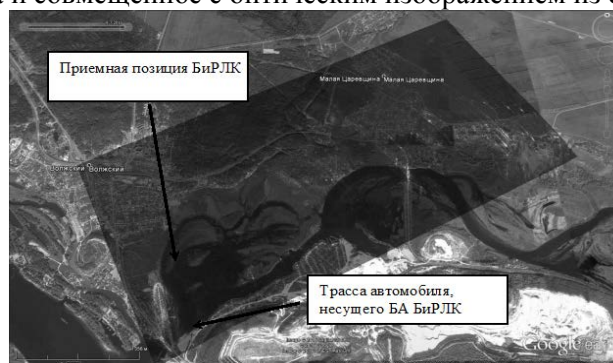


**Рисунок 4.** Стационарная приемная станция, развернутая в полевых условиях.

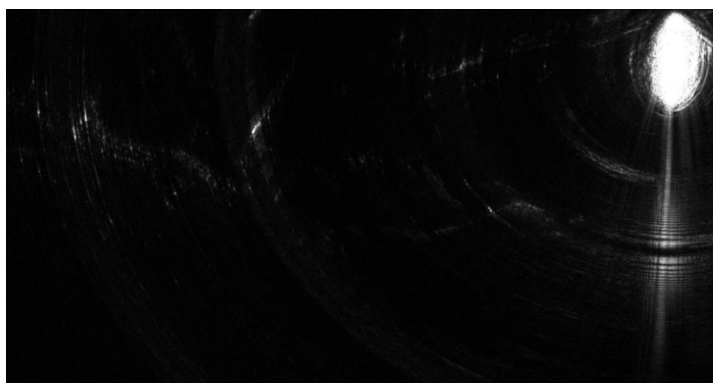


**Рисунок 5.** Передающая позиция, двигающаяся в процессе излучения по автомобильному мосту через реку Сок (см. географию эксперимента на рисунке 5).

На рисунке 6 показано радиолокационное изображение местности (4×8 км), полученное в процессе эксперимента и совмещенное с оптическим изображением из сервиса Googlemaps.



**Рисунок 6.** География эксперимента.



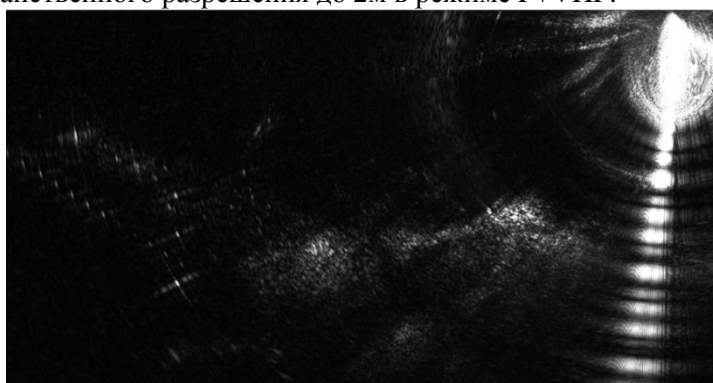
**Рисунок 7.** Радиолокационное изображение (РЛИ) местности в Р диапазоне частот, полоса частот 30МГц, режим излучения ЛЧМ импульсов, шаг пикселей 1.5×1.5м, время синтеза 40с.

На рисунках 7,8 показаны РЛИ местности в Р и VHF диапазонах частот соответственно, полученные в процессе наземного эксперимента, шаг пикселей 1.5×1.5м, время синтеза апертуры 40с. На рисунке 7 использовалась полоса частот 30МГц, что соответствует пространственному разрешению 5м, на рисунке 8 эффективная полоса частот - 25МГц, что соответствует пространственному разрешению 6м по наклонной дальности.

На рисунке 9 показано РЛИ местности в объединенном Р+VHF диапазонах частот, что соответствует пространственному разрешению 3м по наклонной дальности.

На рисунках 10,11 показаны совпадающие фрагменты радиолокационных изображений в VHF, Р, VHF+Р диапазонах частот иллюстрирующие факт улучшения разрешения.

В процессе эксперимента местность наблюдалась под малыми углами места (не более 5-7°), поэтому на радиолокационных изображениях видны в основном высокие объекты: мачты, столбы ЛЭП, высокие здания, одиночные высокие деревья, лесопосадки и т.п. По результатам проведенного эксперимента можно сделать вывод, о возможности реализации комплекса бортовой и наземной аппаратуры, программно-алгоритмического обеспечения БиРЛК, обеспечивающего получение радиолокационных изображений в VHF, Р диапазонах частот и достижение пространственного разрешения до 2м в режиме Р+VHF.



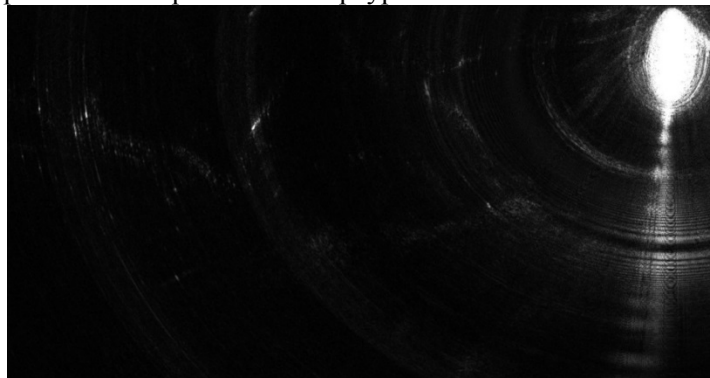
**Рисунок 8.** Радиолокационное изображение (РЛИ) местности в VHF диапазоне частот, полоса частот 25МГц, режим излучения ФМС, шаг пикселей 1.5×1.5м, время синтеза 40с.

В 2018 году планируются аналогичные экспериментальные работы с размещением разрабатываемого мобильного комплекта передающей аппаратуры БиРЛК на БПЛА (октокоптер).

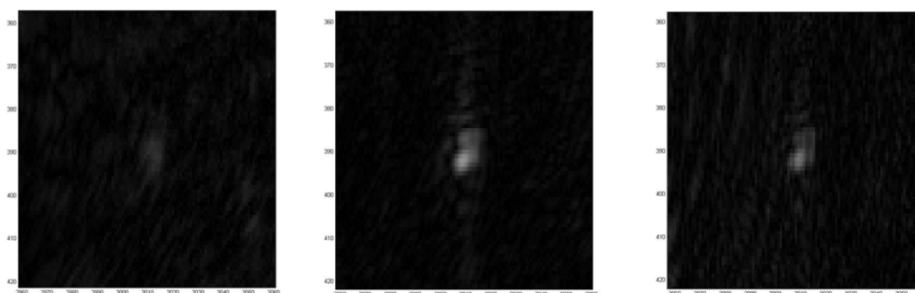
## 5. Заключение

По результатам натурного наземного эксперимента можно заключить, что при фактическом разрешении в VHF диапазоне – 6м, в Р диапазоне – 6м получены РЛИ с разрешением – 3...5м по дальности. Т.о. предлагаемая технология позволяет утверждать о возможности интеграции

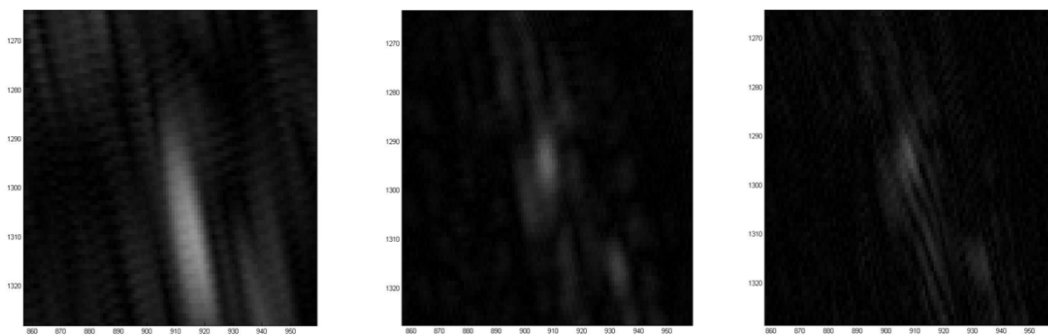
сигналов РЛК Р и VHF диапазонов с целью увеличения разрешающей способности бистатических радаров с синтезированной апертурой.



**Рисунок 9.** РЛИ, полученное объединением спектров в Р и VHF диапазонов, полоса частот 80МГц, шаг пикселей  $1.5 \times 1.5$ м, время синтеза 40с.



**Рисунок 10.** РЛИ объекта, слева направо РЛИ VHF, Р, VHF+P диапазонов, шаг пикселей  $1.5 \times 1.5$ м.



**Рисунок 11.** РЛИ объекта, слева направо РЛИ VHF, Р, VHF+P диапазонов, шаг пикселей  $1.5 \times 1.5$ м.

## 6. Литература

- [1] Горячкин, О.В. Бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой Р-диапазона для МКА «АИСТ-2» / О.В. Горячкин, Б.Г. Женгуров, В.Б. Бакеев, А.Ю. Барабошин, А.В. Невский, Е.Г. Скоробогатов // Электросвязь. – 2015. – № 8. – С. 34-39.
- [2] Горячкин, О.В. Центр радиолокационного дистанционного зондирования Земли ПГУТИ / О.В. Горячкин // Вестник связи. – 2016. – № 2. – С. 24-26.

## Imaging in bistatic sar p and vhf bands with highspatial resolution

A.V. Borisenkov<sup>1</sup>, O.V.Goriachkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volga State University of Telecommunication and Informatics, L. Tolstoy street 23, Samara, Russia, 443010

**Abstract.** In the article the algorithm of radar image formation in bistatic SAR P and VHF bands. Feature of the complex is that sounding onboard devices radiate radio transmitting impulses at the same time in 2 's frequency bands. It is expected that due to the simultaneous 2- x frequency ranges total spatial resolution can be brought up to 2 meters. The article introduced the results of full-scale ground experiment to build a proposed SAR.

**Keywords:** Bistatic synthetic aperture radar (BiSAR), P-band, VHF-band, ground experiment.