

В.А. Ненашев,

*кандидат техн. наук;*

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

## **ПРОЦЕДУРА ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МНОГОЧАСТОТНОМ СЛЕДОВАНИИ ПАЧКИ ЗОНДИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ**

Современные требования, предъявляемым к бортовым малогабаритным радиолокационным системам оперативного мониторинга с каждым годом возрастают. Решение задачи их повышения лежит в области разработки и исследования новых радиолокационных методов и подходов, способных повысить качество формируемого радиолокационного изображения до разрешения, сравнимого с оптическим с целью уйти от ограничений последних и достоверно решать задачи классификации и распознавания. В связи с этим в данной статье рассматривается актуальная задача по разработке способа формирования радиолокационных изображений с высоким разрешением близким к оптическому по азимутальной координате, за счет применения нескольких частот следования зондирующих импульсных пачек сигналов и специальной межпериодной обработки радиолокационных данных. Данный результат позволит уйти от ряда задач применения в комплексе радиолокационных и оптических систем формирования изображений, поскольку оптические не всегда являются всепогодными и всесезонными, а также, их работа затруднена при задымлениях, пожарах и других деструктивных воздействиях.

Ключевые слова: малые летательные аппараты, малогабаритные бортовые РЛС и антенные системы, радиолокационные изображения, высокое разрешение, синтезирование апертуры антенны, радиолокационный обзор земной поверхности.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время все чаще применяются бортовые системы мониторинга земной поверхности, осуществляющие картографирование радиолокационными методами. По ряду причин эти системы базируются на малых летательных аппаратах (МЛА). Во-первых, тактико-технические характеристики МЛА позволяют использовать все большую по массе и габаритам полезную нагрузку. Во-вторых, сами бортовые радиолокационные системы уменьшаются в своих массогабаритных характеристиках. В-третьих, увеличивается время полета МЛА, как самолетного, так и вертолетного типа, для осуществления продолжительного мониторинга земной поверхности. Однако, такие малогабаритные системы имеют ограничения по скорости движения носителя, мощности передатчика и ширине апертуры антенны, что не позволяет реализовать формирование радиолокационных изображений высокого разрешения по координатам «дальность-азимут» в режиме реального времени. Так же считается, что радиолокационным системам присущи недостатки, связанные с проблемами классификации обнаруженных объектов и типов подстилающих поверхностей. Эти недостатки обуславливают тем, что на радиолокационных изображениях обнаруженные объекты, особенно те, размеры которых меньше элемента разрешения радиолокационной системы, видны в виде ярких засвеченных пятен, лишенных каких-либо классификационных признаков, а вопросы классификации и распознавания довольно успешно решаются современными оптико-локационными системами.

Однако, существующие оптико-локационные системы, имеющие упомянутые достоинства, также имеют существенные недостатки для задач оперативного мониторинга, в частности, обладают не очень большой дальностью действия, их работа зависит от атмосферных и сезонных условий, а также от условий, вызванных техногенной катастрофой и, в некоторых случаях, от условий ограниченного времени на решение поисково-спасательных задач средствами бортового мониторинга, например, сугубо в ночное время.

Попытки объединения оптических и радиолокационных систем для формирования комплексного изображения [1-6] также не всегда способны обеспечить требуемое повышение разрешающей способности и информативности при отображении локационной обстановки о наблюдаемых зонах и объектах интереса с бортов малых летательных аппаратов.

Решение данной проблемы лежит в смещении внимания в сторону разработки, развития и исследования новых модификаций радиолокационных методов и подходов, в том числе многопозиционных [7-12], способных качественно заменить преимущества оптических систем авиационного мониторинга при решении задач классификации и распознавания, то есть разработать такой способ формирования радиолокационного изображения высокого разрешения, способного непрерывно работать в условиях различных деструктивных воздействий и ограниченного времени при решении поисково-спасательных задач.

В данной работе исследуется подход, способный формировать радиолокационное изображение с разрешением близким к оптическому. Данный подход реализуем при использовании нескольких периодов следования зондирующих импульсных сигналов, что позволит повысить разрешающую способность за счет применения нескольких шкал измерений для одного объекта или элемента разрешения подстилающей поверхности.

## ЗАВИСИМОСТЬ АЗИМУТАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ОТ УГЛА НАБЛЮДЕНИЯ

Пусть  $\beta$  - азимут луча антенны. Для точек, лежащих на расстоянии  $x$  от центра луча на оси  $OX$ , перпендикулярной к проекции луча на поверхность Земли (ось  $OY$ ), угол отклонения  $\delta$  от азимута в пределах ширины диаграммы направленности с большой точностью равен  $\delta = -x/R$ , где  $R$  - проекция на поверхность Земли расстояния от БРЛС до центра наблюдаемой зоны.

Полоса доплеровских частот отраженного сигнала определяется шириной диаграммы направленности  $\theta$ :

$$\Delta f_{dop} = \frac{2 \cdot V \cdot \sin(|\beta|) \cdot \theta}{\lambda \cdot \cos(\beta)} = \frac{2 \cdot V \cdot \operatorname{tg}(|\beta|) \cdot \theta}{\lambda}.$$

А полоса частот после быстрого преобразования Фурье (БПФ) равна  $1/T_p$ , где  $T_p$  – период повторения импульсов. Следовательно, число отсчетов после БПФ, принадлежащих ширине диаграммы, равно  $N = \Delta f_{dop} \cdot T_p \cdot N_{БПФ}$ . Из них половина относится к отрицательным частотам, а другая половина к положительным частотам. На один отсчет БПФ приходится следующее значение частоты  $\Delta f = 1/(T_p \cdot N_{БПФ})$ . Отсюда значение доплеровской частоты для  $n$  – го отсчета равно

$$f_{dop} = n / (T_p \cdot N_{БПФ}), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N / 2.$$

Положительные значения  $n$  соответствуют первым  $N/2$  отсчетам БПФ, а отрицательные значения  $n$  формируются следующим образом: -1 соответствует  $(N_{БПФ} - 1)$ , -2 соответствует  $(N_{БПФ} - 2)$ , -3 соответствует  $(N_{БПФ} - 3)$  и так далее до  $-N/2$  ( $N_{БПФ} - N/2$ ). Для отрицательных азимутов  $\beta$  положительные частоты соответствуют отрицательным значениям координат  $x$ , а для положительных азимутов положительные частоты соответствуют положительным значениям координат  $x$ . Для этих отсчетов значение координаты  $x$  вычисляется по формуле:

$$x_n = R \cdot \left( \operatorname{tg}(\beta) \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2(\beta) - k \cdot n} \right), \quad k = \lambda / (V \cdot \cos(\beta_0) \cdot T_p \cdot N_{БПФ}).$$

Учет нелинейности  $x_n$  желательно использовать при углах азимута менее  $30^\circ$  (особенно при углах азимута менее  $20^\circ$ ). При углах, равных или превышающих  $30^\circ$ ,  $tg^2(\beta) \gg k \cdot n$  и с большой точностью выполняется соотношение

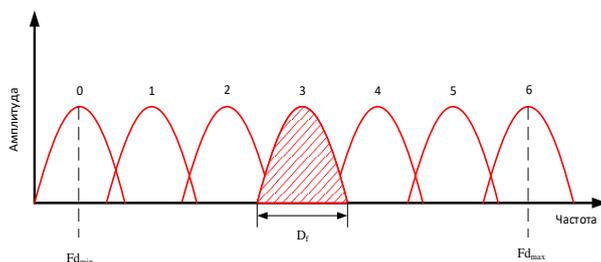
$$\Delta x_{n,m} = \left( R_{n,m} \left( tg(\beta_0) \pm \sqrt{tg^2(\beta_0) - k \cdot n} \right) \right) / n$$

## СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ РЛИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ МНОГОЧАСТОТНОМ СЛЕДОВАНИИ ЗОНДИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

Методом радиолокационного синтезирования апертуры (РСА) можно сформировать радиолокационное изображение (РЛИ) за счет движения носителя БРЛС, в результате чего получается синтезированная антенная решетка для разрешения в поперечной плоскости. Метод формирования РСА-изображений известен [12-17], однако имеет определенные ограничения.

Как известно, разрешение по азимутальной координате при формировании РЛИ методов РСА определяется двумя параметрами. С одной стороны, шириной доплеровского фильтра (рис. 1), что зависит от периода следования зондирующих импульсов. Со второй стороны, скоростью носителя.

Поэтому, в условиях ограничений скорости носителя, и, когда требуется формировать изображения с высоким разрешением, необходимы дополнительные шаги по обработке принятого эхо-сигнала в целях повышения точности определения доплеровской частоты и, соответственно, координаты азимут.



$$F_D = F_{D_{\min}} + \text{номер фильтра}(D_f)$$

Рис. 1. Ширина доплеровского фильтра и связь с азимутальным разрешением

В когерентно-импульсных малогабаритных бортовых РЛС предлагается применять несколько гребенок доплеровских фильтров для повышения точности определения доплеровской частоты, (см. рис. 2) и, соответственно, разрешения по координате дальность.

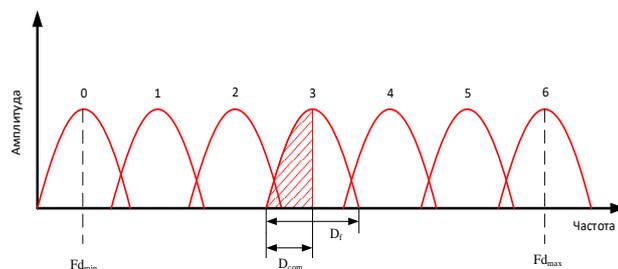


Рис. 2 Сужение полосы доплеровского фильтра  $D_f$  до  $D_{com}$  за счет использования нескольких гребенок цифровых фильтров

Логика такой многоканальной схемы представлена на рисунке 3. Далее рассмотрим суть ее функционирования на примере двухчастотной реализации.

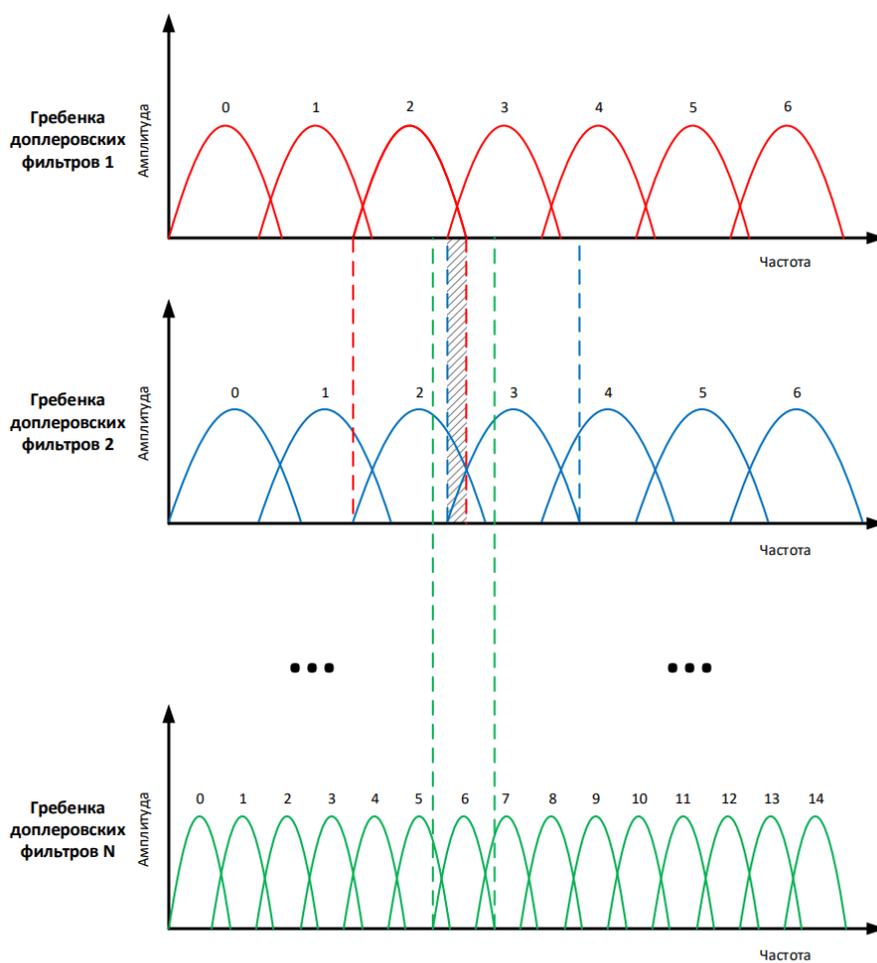


Рис. 3. Логика многоканальной схемы

Предлагаемый способ повышения точности определения доплеровской частоты при двух-частотном следовании пачки зондирующих импульсов реализуется следующим образом. Малогабаритная бортовая РЛС излучает зондирующие импульсы на двух близких друг к другу частотах повторения следования импульсов. При излучении пачки импульсов и обработке их в частотной области, на основе методов спектрального анализа, формируются две гребенки доплеровских фильтров, настроенных на соответствующий диапазон доплеровских частот  $F_1$  и  $F_2$ , как показано на рисунке 2. Следует отметить, что под спектральным анализом эхо-сигналов, реализованным на основе применения «гребенки» узкополосных доплеровских фильтров, понимается программный способ с использованием дискретного или быстрого преобразования Фурье, опираясь на цифровую элементную базу, вследствие применения чего и формируются гребенки доплеровских фильтров.

Полоса пропускания одного полосового фильтра в первом наборе  $F_1/N$ , а во втором наборе соответственно  $F_2/N$ , где  $N$  – количество доплеровских фильтров в наборе.

Таким образом, один и тот же объект или элемент разрешения будет давать 2 разных доплеровских надбавки частоты, для каждой пачки импульсов, излученной на своей частоте повторения, и будет попадать в свой номер из набора фильтров.

Таким образом, на разнице узкополосных доплеровских фильтров двух гребенок формируется суженная область доплеровских частот  $F_{узк}$  и, в результате, на пересечении гребенок можно уточнить значение доплеровской частоты объекта или элемента разрешения.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ СЛЕДОВАНИИ ПАЧКИ ЗОНДИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

Рассмотрим следующий пример, когда для частоты повторения зондирующих импульсов  $F_1$  доплеровская надбавка частоты попала в пятый фильтр набора, а для частоты повторения импульсов  $F_2$  доплеровская надбавка частоты попала в 6 фильтр набора, таким образом за счет использования двух наборов полосовых фильтров искусственно возможно сузить полосу с  $F_1/N$  и  $F_2/N$  до значения  $\Delta F$ , как показано на рисунке 2, и, таким образом, повысить точность определения радиальной скорости подвижного объекта.

Приведем результаты имитационного моделирования (таблица 1), для удобства сведенные в таблицу. Пусть МБРЛС излучает пачки зондирующих импульсов на частотах повторения импульсов (ЧПИ)  $F_1 = 1176$  Гц и  $F_2 = 1111$  Гц, и пусть количество фильтров в наборе  $N = 16$ . Тогда ширина полосы пропускания одного фильтра для ЧПИ  $F_1$  будет равна 74 Гц, а для ЧПИ  $F_2$  будет равна 70 Гц.

*Таблица 1*

**Результаты имитационного моделирования**

Номер фильтра	Полоса пропускания для фильтров ЧПИ $F_1$	Полоса пропускания для фильтров ЧПИ $F_2$	Попадание в фильтры с одинаковыми номерами	$\Delta F$	Попадание в фильтры с разными номерами	$\Delta F$
1	0-74	0-70	1-1	70	1-2	4
2	74-148	70-140	2-2	66	2-3	8
3	148-222	140-210	3-3	62	3-4	12
4	222-296	210-280	4-4	58	4-5	16
5	296-370	280-350	5-5	54	5-6	20
6	370-444	350-420	6-6	50	6-7	24
7	444-518	420-490	7-7	46	7-8	28
8	518-592	490-560	8-8	42	8-9	32
9	592-666	560-630	9-9	38	9-10	36
10	666-740	630-700	10-10	34	10-11	40
11	740-814	700-770	11-11	30	11-12	44
12	814-888	770-840	12-12	26	12-13	48
13	888-962	840-910	13-13	22	13-14	52
14	962-1036	910-980	14-14	18	14-15	56
15	1036-1110	980-1050	15-15	14	15-16	60
16	1110-1184	1050-1120	16-16	10	16-1	64

Таким образом, на основании полученных данных, следует вывод о том, что с увеличением скорости – увеличивается выигрыш при попадании в одинаковые по номеру фильтры, и снижается выигрыш от попадания в разные по номеру фильтры.

Следует отметить, что расширение наборов цифровых фильтров может дополнительно увеличить точность определения радиальной скорости на фоне шумов.

Также следует отметить, что повышать разрешение по координате дальность, которое определяется шириной сжатого импульса, что является пределом разрешения, возможно аналогичным способом в совокупности с интерполяционными методами. В этом случае следует также использовать несколько периодов зондирования импульсов, как и в случае с доплеровскими фильтрами.

Таким образом, в разделе разработан и исследован подход, способный формировать радиолокационное изображение высокого разрешения, сравнимого с оптическим разрешением, и свободного от ограничений последнего.

Следует отметить, что также следует повышать разрешение по координате дальность, которое определяется шириной сжатого импульса, что является пределом разрешения. Поэтому можно применить ту же методологию, как и в случае с доплеровскими фильтрами. В этом случае следует также использовать несколько периодов зондирования импульсов, как и в случае с доплеровскими фильтрами.

#### **Финансовая поддержка**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00303).

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Следует отметить, что расширение наборов доплеровских фильтров может дополнительно повысить разрешение радиолокационных изображений.

Также следует отметить, что повышать разрешение по координате дальность, которое определяется шириной сжатого импульса, что является пределом разрешения возможно аналогичным способом в совокупности с интерполяционными методами.

В работе разработан и исследован подход, способный формировать радиолокационное изображение высокого разрешения, сравнимого с оптическим разрешением, и свободного от ограничений последнего.

#### **Список используемых источников**

1. *Ненашев В.А., Сенцов А.А.* Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга: монография. г. Санкт-Петербург: редакционно-издательский центр ГУАП, 2022. - 191 с. ISBN 978-5-8088-1685-5.
2. *Кондратенков Г.С.* Авиационные системы радиовидения. Монография /Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2015. – 648 с.
3. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования / В. С. Верба. - Москва : Радиотехника, 2014. - 525 с.
4. Дудник П.И. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П.И. Дудник, Г.С. Кондратенков, Б.Г. Татарский, А.Р. Ильчук, А.А. Герасимов. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2006. – 1112 с. Особенности обработки телеметрической информации ракетносителей в реальном времени / В.А. Каргин, Д.А. Николаев, Н.В. Нездоровин, Е.Б. Самойлов // Информация и космос. – 2009. – №4.– С. 77–82.
5. *Верба В.С.* Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч.3. – М.: Радиотехника, 2010. – 472 с.
6. *Дудник П.И., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г.* Многофункциональные радиолокационные системы. – М.: Дрофа, 2007.
7. Пат. 2560082 РФ, МПК G01S 13/90. Способ фронтального синтезирования апертуры антенны земной поверхности с исключением слепых зон в передней зоне с помощью многопозиционной радиолокационной системы / Ю.Ф. Подоплёкин, А.П. Шепета, В.А. Ненашев

(РФ); заявитель и патентообладатель С.-Пб ГУАП. № 2014100672/07; заявл. 09.01.14; опубл. 20.08.15, Бюл. № 23. – 8 с.

8. Зайцев Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. – М.: Радиотехника. 2007, – 96 с.

9. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

10. Пат. 2703996 РФ, МПК G01S 13/90. Способ локации целей в передних зонах обзора бортовых радиолокационных станций двухпозиционной радиолокационной системы / Г.А. Коржавин, В. А. Ненашев, А.П. Шепета, Ю.Ф. Подоплекин, А.Г. Давинчук (РФ); заявитель и патентообладатель АО "Концерн "Гранит-Электрон". № 2019108828; заявл. 26.03.2019; опубл. 06.05.2019, Бюл. №13. 8 с.

11. Пат. 2 756 904 РФ, МПК G01S 13/90. Устройство для определения параметров движения наземных объектов в двухпозиционной системе бортовых малогабаритных РЛС / Ненашев В.А., Григорьев Е. К., Шепета А. П., Подоплекин Ю. Ф. (РФ); заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. заявл. № 2021107671 от 24.08.2020; опубл. 06.10.2021, Бюл. №28. 15 с.

12. *Ненашев В. А., Шепета А.П.* Точностные характеристики определения координат объектов в двухпозиционной системе малогабаритных бортовых РЛС. Информационно-управляющие системы, 2020, № 2, с. 31-36.

13. *Ненашев В.А., Сенцов А.А., Куюмчев Г.В.* Моделирование процесса формирования радиолокационного изображения высокого разрешения в бортовых РЛС с синтезированной апертурой // Вопросы радиоэлектроники, 2013, Т. 2. №3. – С. 48-56.

14. *Ненашев В.А.* Моделирование экспериментального комплекса в среде MATLAB для формирования РЛИ в бортовых РЛС с синтезированной апертурой // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: сб. тр. XXII междунар. науч.-техн. семинара, 18–24 сентября 2013 г., Алушта. – М.: Изд-во МГУПИ. С. 281-282.

15. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС - информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. /Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. - М.: Радиотехника, 2006 - 656 с.

16. *Подоплекин Ю.Ф., Шепета Д.А., Ненашев В.А.* Моделирование входных сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря // Морской вестник. – 2016. – № 4(60). – С. 69-71.

17. *Shepeta A.P., Nenashev V.A.* Modeling Algorithm for SAR Image Based on Fluctuations of Echo Signal of the Earth's Surface. Proc. of SPIE Remote Sensing, Toulouse, France, 2015, vol. 9642, pp. 96420X-1-96420X-8.