

## **Оценка параметров наземных движущихся объектов в режиме однопроходного интерферометра с раскрытием фазовой неоднозначности**

В.Г. Степин

*АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»  
140180, г. Жуковский, ул. Гагарина, 3.  
E-mail: [vitalii.stepin@mail.ru](mailto:vitalii.stepin@mail.ru)*

*Предложен квазиоптимальный алгоритм оценки радиальной скорости с раскрытием фазовой неоднозначности. Проведена экспериментальная отработка и представлены результаты работы интерферометрических алгоритмов с использованием зарегистрированных радиоголограмм.*

*Ключевые слова: движущийся объект, земная поверхность, синтезирование апертуры антенны, однопроходной интерферометр, фазовая неоднозначность, база интерферометра, квазиоптимальный алгоритм.*

### **Estimation of parameters of ground moving objects in single-pass interferometer mode with phase ambiguity disclosure**

V.G. Stepin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> JSC V.V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design

*A quasi-optimal radial velocity estimation algorithm with elimination of phase ambiguity is proposed. Experimental testing was carried out and the results of interferometric algorithms using registered radio holograms were presented.*

*Keywords: moving object, ground surface, synthetic aperture antenna, single-pass interferometer, phase ambiguity, interferometer base, quasi-optimal algorithm.*

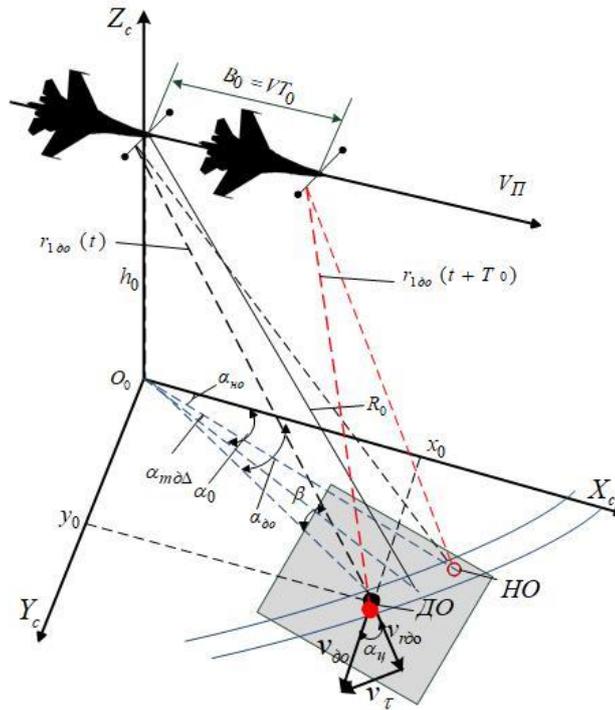
### **Введение**

В настоящее время одна из главных задач мониторинга земной поверхности – это обнаружение движущихся объектов в широком диапазоне скоростей. Стоит отметить, что существует проблема в компенсации отражений от земной поверхности и однозначности измерения параметров малоразмерных движущихся объектов при использовании фазового метода. Цель работы – разработка алгоритма раскрытия фазовой неоднозначности и оценки скорости движущегося объекта с уточнением азимутальной позиции.

### **Модель организации РСА интерферометра**

Для того чтобы восстановить полный вектор движения наземного объекта, необходимо рассмотреть изменение ракурса во времени. Как известно [1], изменения местоположения движущегося объекта приводят к дополнительной временной декорреляцией парных сигналов, но данные искажения можно контролировать и при обоснованном выборе базы интерферометра  $B_0 = VT_0$  (десятые доли времени синтезирования  $T_c$ ), их можно считать незначительными.

Рассмотрим схему обзора земной поверхности авиационным РСА интерферометром (рис.1).



**Рис. 1. Схема организации однопроходного двухсеансного РСА интерферометра**

Облучение земной поверхности производится когерентной электромагнитной волной с длиной волны  $\lambda$  всем полотном антенной решётки, а приём реализован по одному пространственному каналу. В процессе прямолинейного полёта носителя РСА формируются сеансы через интервал  $T_0$ .

Такая схема позволяет варьировать величину базы  $B_0$ , что, в свою очередь, расширяет возможности в совокупности с двухканальным интерферометром при вскрытии неоднозначности по скорости.

Как известно, сигнал от движущегося объекта (ДО) смещается по азимуту, а квадратичное изменение дальности будет отличаться от изменения дальности до неподвижного объекта (НО). Этот эффект можно выразить через изменение фазы следующим образом:

$$\delta\varphi_{do}(t) \approx \frac{4\pi V^2}{\lambda R_0} \left( \sin(\alpha_{do})^2 - \sin(\alpha_{no})^2 \right) \frac{t^2}{2} \approx \frac{4\pi V v_{rdo}}{\lambda R_0} \cos(\alpha_{no}) t^2, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость носителя РСА,

$R_0$  - наклонная дальность,

$\alpha_{do}$  - положение ДО по азимуту,

$\alpha_{no}$  - положение НО по азимуту,

$v_{rdo}$  - радиальная скорость ДО.

Оценивание разности фаз в двухсеансном интерферометре можно получить аналогично алгоритму оценивания многопозиционной космической РСА, используя квазиоптимальный алгоритм по критерию минимума СКО [2], который был получен в работе [3]. Выражение для определения оценки  $\delta\hat{\varphi}_{do}(t)$  при двухсеансной организации интерферометра получает следующий вид:

$$\Delta\hat{\varphi}_{do}(T_0) \approx \arg \left( \int_0^{T_c} \xi_1(t) \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} r_{m1}(t) \right) dt \int_0^{T_c} \xi_1^*(t+T_0) \exp \left( j \frac{4\pi}{\lambda} r_{m1}(t+T_0) \right) dt \right), \quad (2)$$

где  $\xi_1(t)$  - принятый радиолокационный сигнал,

$r_{ml}(t)$  - изменение дальности по азимутальным позициям во времени.

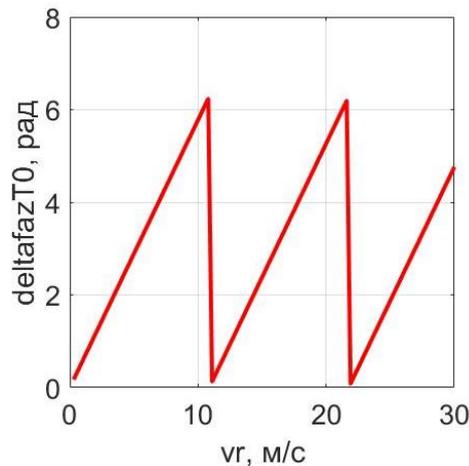
Относительное смещение фазы сигнала от движущейся цели за время между сеансами наблюдения  $T_0$ , с учётом синтезирования апертуры в каждом сеансе можно вычислить так:

$$\Delta\hat{\varphi}_{изм}(T_0) \approx \frac{4\pi VT_0 T_c v_{rdo}}{\lambda R_0} \cos(\alpha_{но}) \approx \frac{4\pi B_0 T_c v_{rdo}}{\lambda R_0} \cos(\alpha_{но}) \quad (3)$$

Далее подставим в формулу (4.24) следующие параметры:

- длина волны –  $\lambda = 3$  см;
- наклонная дальность –  $R_0 = 50$  км;
- азимутальный угол неподвижного объекта –  $\alpha_{но} = 40^\circ$ ;
- время синтезирования –  $T_c = 1$  с;
- время между сеансами наблюдения –  $T_0 = 0.5$  с;
- диапазон радиальных скоростей наземной движущейся цели –  $v_{rdo} = 0.3 \dots 30$  м/с;
- скорость носителя РСА –  $V = 180$  м/с.

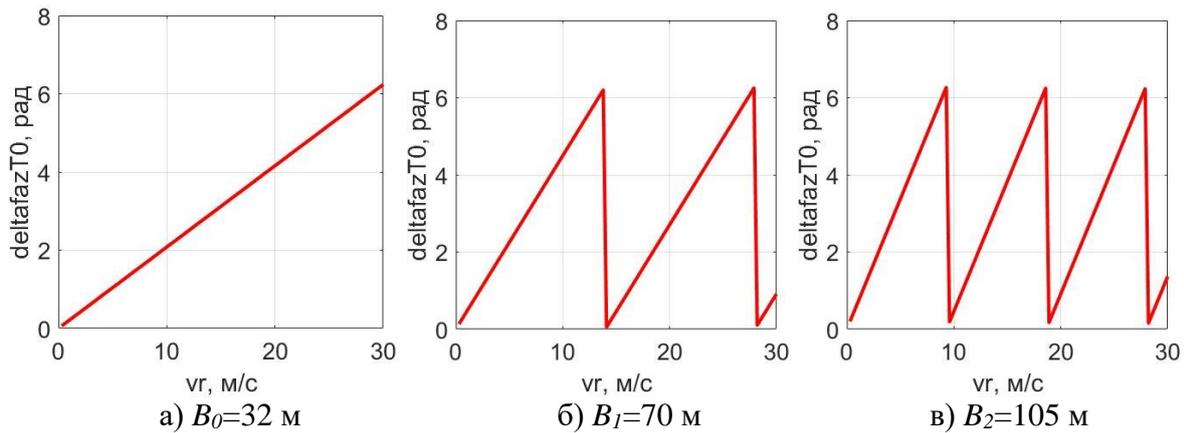
Получим зависимость разности фаз от скорости ДО (рис. 2).



**Рис. 2. Зависимость разности фаз от радиальной скорости наземного движущегося объекта при  $T_0 = 0.5$  с**

Из данного рисунка видно, что оценка радиальной скорости движущейся цели по измеренной разности фаз характеризуется фазовой неоднозначностью. Как заметим, помимо скачкообразных переходов зависимости, наблюдаются провалы практически до нуля. Причём в этих точках скорости:  $v_{rdo} = 11.1$  и  $21.9$  м/с, то есть, если будут в наблюдаемом элементе разрешения ДО с близкими скоростями, то оценка радиальной скорости практически невозможна и наземный объект может ошибочно считаться неподвижным. Решить данную проблему и «вскрыть» фазовую неоднозначность предлагается с помощью перехода к многобазовой обработке, по принципу работы фазовых пеленгаторов и аппаратуры потребителей навигационных спутниковых систем при фазовых измерениях [4].

Пусть скорость носителя РСА за время синтезирования  $T_c$  не изменилась и величину базы интерферометра  $B_0$  изменим посредством перебора значений  $T_0$ . На рисунке 3 показаны зависимости разности фаз от скорости наземного ДО при использовании различных значений  $B_0$ .



**Рис. 3. Зависимость разности фаз от радиальной скорости наземного движущегося объекта при различных значениях  $B_0$**

Из представленных результатов можно заметить, что использование различных значений интерферометрической базы позволяет разрешить фазовую неоднозначность на определённом диапазоне скоростей. При  $B_0=32$  м (рис. 3, а) неоднозначность отсутствует, следовательно, возможно однозначное определение значения радиальной скорости. Однако точность оценки  $v_{rдо}$  в данном случае оказывается низкой из-за наклона зависимости  $\Delta\hat{\varphi}_{изм}(v_{rдо})$ .

#### **Алгоритм разрешения фазовой неоднозначности**

Для повышения точности и однозначного определения  $\hat{v}_{rдо}$  предлагается следующий алгоритм «вскрытия» неоднозначности фазовых измерений:

1. Измерение фазовой разности  $\Delta\hat{\varphi}_{изм}(T_0)$  произвести при  $B_0=32$  м ( $T_0=0.18$  с) – достаточная величина для оценивания радиальной скорости  $\hat{v}_r$  в диапазоне от 0.3 до 30 м/с.

2. Далее произвести увеличение базового параметра на величину  $k \approx 29 / \hat{v}_{rдо}$  при условии неизменности остальных параметров. Следовательно, база равна:  $B_1 \approx kB_0$ .

3. При этом если после изменения  $B_1$  измеренная фаза стала значительно меньше, чем была на первом этапе алгоритма, то необходимо уменьшить  $B_1$  до того момента когда будет выполняться условие  $\Delta\hat{\varphi}_{изм}(T_n) > \Delta\hat{\varphi}_{изм}(T_0)$ .

4. Полученную оценку  $\Delta\hat{\varphi}_{изм}(T_n)$  можно считать оптимальной для приведённых условий и по ней определяется  $\hat{v}_{rдо}$  с точностью выше, чем на первом этапе.

Данный способ разрешения неоднозначности фазовых измерений является дополнением алгоритмов обнаружения и восстановления азимутальной позиции наземного движущегося объекта, отражённые в работах [5,6,7] при организации двухканального двухсеансного интерферометра.

#### **Структура обработки радиолокационного сигнала**

В условиях эксперимента можно не формировать двойной интервал синтезирования, а использовать только один с разбиением на подинтервалы методами цифровой обработки для организации интерферометрических пар, смещённых по времени. Данное утверждение справедливо, по причине достаточно высокой корреляции между радиолокационными сигналами двух сеансов. Этот способ организации имеет ряд преимуществ:

- не требует специальных методов контроля наблюдения за участком земной поверхности;
- возможность перестройки базы интерферометра, чтобы раскрыть фазовую неоднозначность многобазовым методом;
- быстрое получение результатов цифровой обработки, при этом имея только один интервал синтезирования.

В общем виде структуру интерферометрической обработки радиолокационных сигналов при использовании авиационного РСА-интерферометра представим в виде блок-схемы (рис.4) и кратко опишем основные этапы.



Рис. 4. Блок-схема основных этапов цифровой обработки радиолокационных сигналов

На первом шаге происходит открытие и считывание данных с записанных голограмм, полученных в ходе полётов, в результате чего образуется массив комплексных сигналов  $A(k,m)$ , где  $k$  – номер строка по дальности, а  $m$  – номер выборки по азимуту. Информация после компенсации среднего значения подвергается сжатию по дальности (опорный сигнал – код Баркера-13). Далее происходит расчёт фазового набега и его компенсация. Для компенсации выборок, пропущенных в результате попадания их в строб перестройки антенны, используем алгоритм компенсации СПА. После фокусировки произведём квадратичную фазовую коррекцию и гетеродинирование. Чтобы минимизировать воздействие нежелательных сигналов, осуществим операцию подавления боковых лепестков по дальности. Гармонический анализ и дальнейшие этапы повторяются для двух сеансов интерферометра с цифровой базой. Для имитации принятия сигналов с двух подрешёток была использована следующая операция:

$$\begin{aligned}\xi_1(k, m) &= (\xi_\Sigma(k, m) + \xi_\Delta(k, m)) \\ \xi_2(k, m) &= (\xi_\Sigma(k, m) - \xi_\Delta(k, m))'\end{aligned}\quad (4)$$

где  $\xi_\Sigma(k, m)$  - сигнал, принятый по суммарному каналу,

$\xi_\Delta(k, m)$  - сигнал, принятый по разностно-азимутальному каналу.

После дополнительной фокусировки формируется РЛИ. Компенсация неподвижного фона необходима для наилучшего обнаружения ДО. Следующий шаг после раскрытия фазовой неоднозначности реализован с целью «очистки» РЛИ от отражений движущихся целей смещённых по азимуту в результате частотного сдвига. Данный эффект с малоразмерными объектами не так критичен, однако при движении составов поездов или групп ДО будут существенные искажения. Полученные метки движущихся целей дополнительно смещаются в их истинное положение и накладываются на РЛИ.

### Экспериментальная проверка работы РСА-интерферометра

С целью экспериментальной проверки работы интерферометрических алгоритмов были использованы двухканальные радиоголограммы, записанные в цифровом виде на борту авиационного носителя РСА.

Условия регистрации радиолокационного сигнала:

- наклонная дальность –  $R_0 = 20$  км;
- скорость носителя РСА –  $V = 180$  м/с;
- высота  $h_0 = 3$  км;
- азимут зоны обзора -  $40^\circ$ ;
- разрешающая способность по дальности – 30 м;
- разрешающая способность по азимуту – 7 м;
- время синтезирования –  $T_c = 5$  с;
- время между сеансами наблюдения –  $T_0 = 0.01$  с;

На рисунке 5 и 6 представлены результаты интерферометрической обработки голограмм.

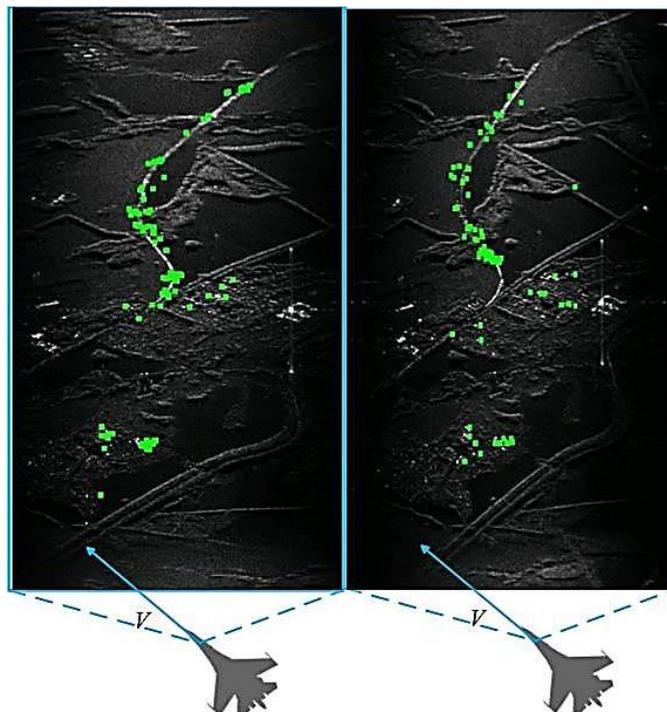
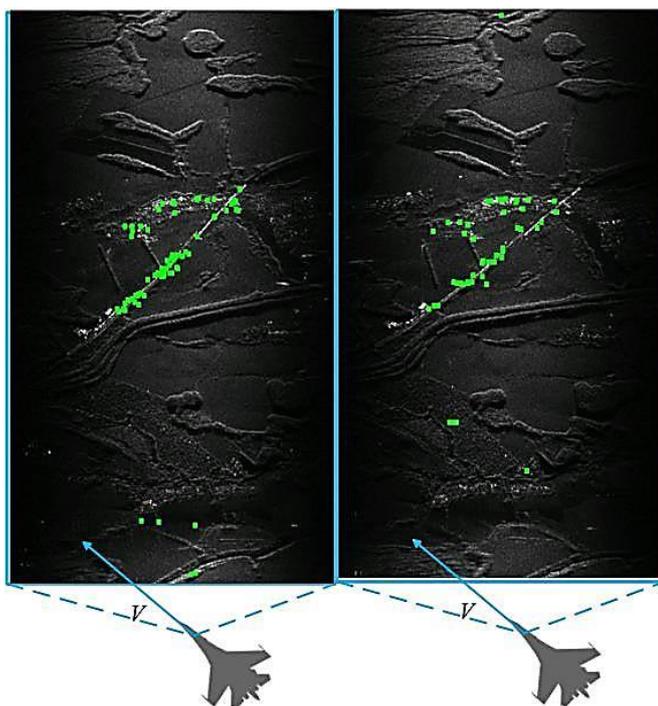


Рис. 5. Иллюстрация работы двухканального двухсеансного РСА-интерферометра



**Рис. 6. Иллюстрация работы двухканального двухсеансного РСА-интерферометра**

Анализируя данные результаты интерферометрической обработки полученных радиолокационных сигналов, заметим, что обнаруженные движущиеся объекты (зелёные метки) сосредоточены на или вблизи автомобильных дорог. Необходимо отметить, что наблюдение проводилось в сложных помеховых условиях, однако процедура компенсации мешающего фона (рис. 4) позволяет улучшить эффективность алгоритма.

### **Выводы**

В ходе экспериментальной проверки на радиоголограммах подтвердилась работоспособность предложенного алгоритма. В результате оптимального подбора базы интерферометра удалось разрешить фазовую неоднозначность при этом увеличить диапазон однозначных скоростей и обнаружить движущиеся объекты. Результаты показали, что восстановление азимутального положения движущихся целей отработало с достаточной точностью.

### **Литература**

1. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре. Радиотехника, №7, 2014, с.16-20.
2. Ярлыков М.С. Марковская теория оценивания в радиотехнике. М.: Радиотехника. 2004.
3. Бабокин М.И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА. М.: Радиотехника, №7, 2009, С. 51-58.
4. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. - М.: Радиотехника, 2008. – 356.
5. Степин В.Г. Обнаружение наземных движущихся объектов с помощью РСА-интерферометра. // Сборник тезисов докладов по материалам XX Всероссийской молодёжной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». 2022. Москва. С. 15-19.

6. Степин В.Г. Восстановление вектора движения наземных объектов с помощью авиационного РСА интерферометра. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №4. С. 19-28.

7. Бабокин М.И., Степин В.Г. Фазовый мониторинг движущихся объектов на земной поверхности с помощью авиационного комплекса РСА // Сборник тезисов докладов IV научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». 2019. Москва. С.45.