

# МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ АНОМАЛЬНЫХ МИКРОНАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИГНАЛОВ ПРИ СУПЕРПОЗИЦИИ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ЗЕМЛИ В РАДАРАХ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Коврегин Валерий Николаевич,**  
Санкт-Петербургский Государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия,  
[kovregin@mail.ru](mailto:kovregin@mail.ru)

**Коврегина Галина Михайловна,**  
Санкт-Петербургский Государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия,  
[g\\_kovregina@mail.ru](mailto:g_kovregina@mail.ru)

**Федоров Вячеслав Александрович,**  
ООО "НПК "Оптолинк", Москва, Зеленоград, Россия,  
[fedorov@optolink.ru](mailto:fedorov@optolink.ru)

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-4-21-29

**Manuscript received** 05 March 2025;  
**Accepted** 10 April 2025

**Ключевые слова:** авиационный радар, квазинепрерывное излучение, отражения от земли, суперпозиция сигналов, микронавигационные измерения, идентификация, восстановление и расширение информативности

Для типовых авиационных радаров при квазинепрерывном излучении в задачах измерения/оценки (микро)навигационных параметров фазового центра антенны радара представлены методы идентификации аномальных частотно-временных измерений/оценок скорости фазового центра антенны и восстановления однозначности выявленных аномальных измерений скорости, обусловленных суперпозицией отражений от участков земной поверхности, находящихся на разных дальностях, кратных выраженному через расстояние периоду повторения импульсов. В совокупности, эти методы на основе процедур первичной внутрипериодной обработки принимаемого сигнала обеспечивают расширение его информативности, повышение помехоустойчивости и потенциальной точности оценок скорости на основе сформированной информационной избыточности одновременных однозначных скоростных измерений и помехоустойчивых процедур их совместной обработки. Представленные методы базируются на критериях: о соответствии расчетных и измеренных отношений доплеровских частот или квадратов доплеровских частот для идентификации "аномальных" частотно-временных измерений и определения совокупности "номинальных" однозначных измерений для оценивания скорости фазового центра антенны; о соответствии расчетных и определенных на основе частотно-временных измерений значений дистанции между полосами земной поверхности, по отражениям от которых в разных дискретах дальности рабочей зоны периода повторения импульсов после процедуры быстрого преобразования Фурье формируются амплитудные максимумы сигнала. Анализ "невязок" указанных дистанций для всех комбинаций измеренных доплеровских частот также обеспечивает идентификацию аномальных измерений, выявление среди них значений, обусловленных суперпозицией отражений от полос земной поверхности с "кратными" наклонными дальностями и определение этих дальностей, что фактически восстанавливает однозначность таких измерений и их информативность в аспекте определения скорости фазового центра антенны. Работоспособность и эффективность применения представленных методов показана на примере обработки типичных "реальных" сигналов от земной поверхности при квазинепрерывном излучении радара, полученных в натурных экспериментах.

#### Информация об авторах:

**Коврегин Валерий Николаевич**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0001-6851-1446.

**Коврегина Галина Михайловна**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия, ORCID: 0000-0003-2091-8786.

**Федоров Вячеслав Александрович**, д.ф.-м.н., профессор, директор Зеленоградского отделения, ООО "НПК "Оптолинк", Россия, ORCID: 0000-0003-2220-7144.

#### Для цитирования:

Коврегин В.Н., Коврегина Г.М., Федоров В.А. Методы идентификации и восстановления информативности аномальных микронавигационных измерений сигналов при суперпозиции отражений от земли в радарх квазинепрерывного излучения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №4. С. 21-29.

#### For citation:

V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, V.A. Fedorov, "Methods of identification and restoration of information content of anomalous micronavigation measurements of signals with superposition of reflections from the ground in quasi-continuous radiation radars," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.4, pp. 21-29. (in Russian)

## Введение

В авиационных многофункциональных радарх (РЛС) при обзоре воздушного пространства [1] и землеобзоре с высоким разрешением [2] актуальна проблема обеспечения требуемой точности измерения траекторных параметров фазового центра антенны РЛС (ФЦА) в традиционных [3-6] инерциально-спутниковых системах микронавигации ФЦА (СМН) при организованных помехах для аппаратуры глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), используемой как высокоточный позиционно-скоростной корректор для инерциальных датчиков СМН. Отмечается устойчивая тенденция к дальнейшему усложнению сигнально-шумовой/помеховой обстановки при работе ГНСС, резко возрастает практическая значимость и обостряется актуальность современных исследований и разработок [7], проводимых в области «неспутниковой» навигации и микронавигации. В этом направлении в работах [8-16] показаны возможности эффективного использования РЛС в качестве скоростного корректора для собственной СМН при отсутствии достоверной информации от ГНСС, предложены методы выполнения микронавигационных радиолокационных (РЛ) измерений в режиме квазипрерывного излучения РЛС (КНИ) и их использования при вторичной комплексной обработке РЛ-инерциальной информации (КОИ) на основе традиционной обобщенной фильтрации Калмана (ОФК) [17]. Натурные эксперименты показали эффективность указанных методов. Однако, в ряде экспериментов до (3...5) % РЛ измерений радиальной скорости ФЦА были «аномальными», с погрешностями, значительно превышающими уровень типичных инструментальных ошибок частотно-временных измерений (ЧВИ). Несмотря на относительно малую «долю» таких измерений, они оказывают существенное негативное влияние на точность ОФК, могут в итоге привести к практической расхожимости ОФК и фактически к потере работоспособности СМН в рассматриваемом РЛ-инерциальном режиме. Очевидно, что «аномальные» РЛ измерения, как неинформативные и «вредоносные», целесообразно исключить дальнейшей обработки, что может быть обеспечено на уровне КОИ, например, базируясь на адаптивно-робастных [15] модификациях ОФК. Однако, реализация микронавигационных РЛ измерений на фоне решения основных функциональных задач РЛС, как правило, осуществляется с интервалом, не менее нескольких секунд, и в условиях такого «дефицита» измерительной информации исключение «аномалий» и, по сути, «срывы» коррекции СМН, может быть критичным. Возникает острая необходимость минимизировать количество случаев «аномальных» ЧВИ, что требует разработки новых методов микронавигационных РЛ измерений при КНИ, реализуемых уже на уровне первичной обработки сигналов и позволяющих, в отличие от типовых методов [8-14], на основе более «тонкого» анализа спектра и первичных ЧВИ сигнала реализовать следующие функции:

- в совокупности имеющихся первичных ЧВИ идентифицировать те измерения, которые потенциально могут приводить к аномальным оценкам радиальной скорости ФЦА и определить множество номинальных ЧВИ;
- среди выявленных «аномальных» ЧВИ определить совокупность неоднозначных ЧВИ, обусловленных произвольной суперпозицией отражений от разных участков земли, восстановить их однозначность и, по сути, практическую

информативность ЧВИ в аспектах измерения/оценки скорости ФЦА.

*Цель работы* – представление нетрадиционных методов для реализации указанных функций идентификации, восстановления информативности /однозначности аномальных ЧВИ в сигналах со сложным спектром, в т. ч. формируемым в результате произвольной суперпозиции отражений от разных участков земной поверхности, удаленных от ФЦА на различных дистанции, кратные выраженному как расстояние периоду повторения импульсов (ППИ). *Прагматическая цель* – расширение информативности принимаемого сигнала, повышение помехоустойчивости оценок скорости ФЦА и уровня их потенциальной точности.

## Результаты исследования

**1. Номинальные и аномальные ЧВИ при традиционном измерении скорости ФЦА при КНИ**

Типовые методы РЛ измерения радиальной скорости ФЦА/дальности до земли при КНИ [9-11] в общем случае предполагают адаптивное управление наклоном оси главного луча (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС – направлением максимума ДНА – с использованием текущих данных СМН, априорной информации о точности СМН, параметрах КНИ, виде и параметрах ДНА. Основные цели управления:

- обеспечить наблюдаемость сигнала по направлению максимума ГЛ в рабочей зоне ППИ, т.е. вне зон бланкирования приемника во время излучения;
- устранить эффект суперпозиции сигналов от нескольких дистанцированных полос земной поверхности (ПЗП) в спектре для дискрета неоднозначной задержки сигнала в ППИ (НЗС) – дискрета дальности (ДД).

В качестве единственного информативного (рабочего) ЧВИ принимаются оценка доплеровской частоты (ДЧ), определяемая по номеру фильтра, в котором после быстрого преобразования Фурье (БПФ) выявлен глобальный максимум амплитуды сигнала (ГМА) среди всех амплитудных максимумов (АМ) с превышением порога по дискретам НЗС/ДД в ППИ. Соответствующая этой ДЧ оценка НЗС в ППИ определяется по номеру дискрета НЗС/ДД с выявленным ГМА. Отметим, что при типовой точности СМН [5-7] управление ГЛ обеспечивает дальность до земли по направлению оси ГЛ в диапазоне дальностей, соответствующем ширине рабочей зоны ППИ (до нескольких км) и индекс ППИ для этого диапазона известен. Далее по тексту этот диапазон, ППИ и индекс ППИ будут обозначаться как «базовые». При этом ЧВИ (ДЧ и НЗС) однозначно связано с конкретной ПЗП в «следе» ГЛ на земле, для которой дальность/угол наклона (угол места) известны. Следовательно, ДЧ обусловлена проекцией скорости ФЦА на однозначно определенное направление в рамках угловой ширины ГЛ, и полученная по ДЧ оценка радиальной скорости является однозначной и ЧВИ на основе ГМА считается номинальным.

На рисунке 1 показан характерный вид реального сигнала от земли после БПФ при «успешном» управлении направлением ГЛ, когда дальности от ФЦА до границ «следа» ГЛ полностью укладываются в базовый диапазон дальностей. При этом ЧВИ по ГМА, как правило, приводят к оценке радиальной скорости ФЦА с номинальной точностью, определяемой инструментальными ошибками измерений.

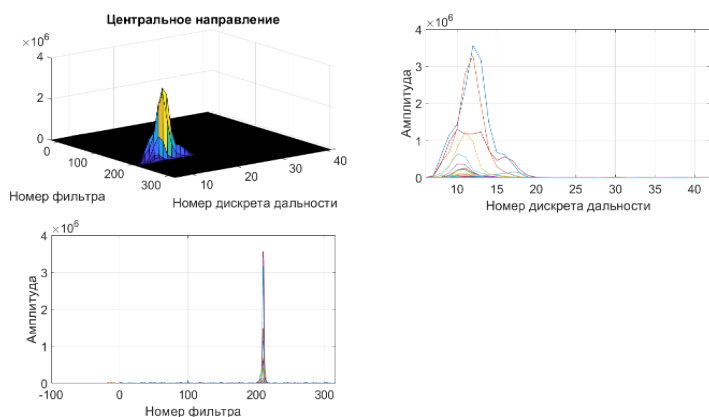


Рис. 1. Амплитуды реального сигнала после БПФ в зависимости от номеров фильтра и ДД в ППИ

Для таких сигналов характерны:

- явно выраженный ГМА по ППИ со значительным превышением над другими АМ в ППИ;
- проявление ГМА и АМ в диапазоне ДД, ширина которого меньше ширины рабочей зоны ППИ;
- относительно узкий спектр в ДД с ГМА и диапазон ДЧ в ППИ.

Однако, в некоторых случаях цель адаптивного управления ГЛ – в аспекте исключения суперпозиции сигналов от ПЗП, соответствующих разным индексам ППИ – не может быть достигнута, что, например, обусловлено:

- аппаратными ограничениями по углам отклонения оси ГЛ от нормали к фазированной антенной решетке РЛС;
- ограничениями по углу наклона оси ГЛ при малой высоте ФЦА;
- протяженностью «следа» ГЛ, соответствующей нескольким ППИ при больших высотах ФЦА;
- «грубыми» ошибками в исходных данных для адаптивного управления ГЛ и другими факторами.

В таких ситуациях реальный сигнал характеризуется:

- близкими значениями ГМА и АМ;
- проявлением ГМА и АМ, превышающих порог, как правило, во всех ДД рабочей зоны ППИ;
- относительно широким диапазоном ДЧ, определяемых по ГМА и АМ в рабочей зоне ППИ.

На рисунке 2 показан типичный вид такого «сложного» реального сигнала после выполнения БПФ.

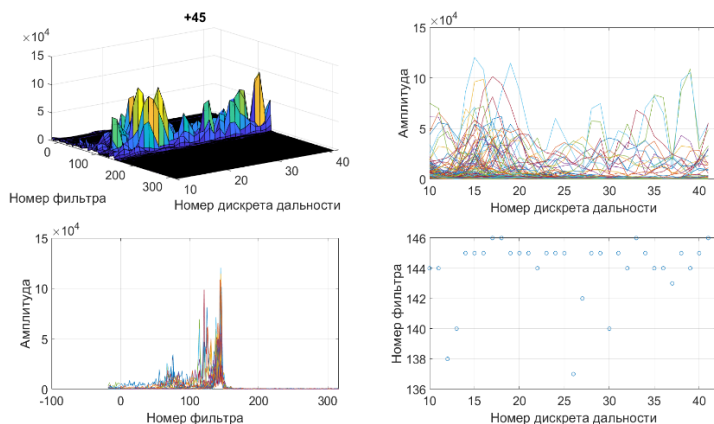


Рис. 2. Амплитуды реального сигнала после БПФ в зависимости от номеров фильтра и/или ДД

В таких ситуациях наблюдаемый сигнал, по сути, может быть результатом суперпозиции отражений от нескольких ПЗП с шириной, соответствующей ширине ДД, пересекающих «след» ГЛ и дистанцированных друг от друга на кратные ширине ППИ расстояния. Если не выполняется режекция сигналов по направлениям боковых лепестков ДНА (БЛ), то такие ПЗП могут быть и в границах «следов» БЛ. При этом ДЧ, определяемая в традиционных методах [9-11] по ГМА в ППИ, фактически может быть «произвольной», не связанной с определенным направлением на ПЗП, отражения от которой обеспечили этот ГМА. Следовательно, измеренная ДЧ неоднозначна и практически неинформативна, поскольку оценка радиальной скорости по этой ДЧ выполняется только для направления к ПЗП в базовом диапазоне дальностей базового ППИ, что может не соответствовать действительному направлению. Как следствие, ЧВИ и оценки радиальной скорости ФЦА могут аномальными, с грубыми погрешностями, значительно превышающими «номинальные» ошибки.

Далее в работе основное внимание уделяется «сложным» сигналам (см. рис. 2), при которых потенциально могут возникать аномальные ЧВИ и оценки скорости ФЦА, обусловленные произвольной суперпозицией отражений от указанных дистанцированных ПЗП в следах ГЛ и БЛ при КНИ и другими факторами, обусловленными видом и ориентацией ДНА.

## 2. Идентификация аномальных ЧВИ при КНИ

Для изложения сути предлагаемого метода идентификации аномальных ЧВИ рассматриваются следующие условия реализации процесса РЛ измерений скорости/дальности при типовом КНИ:

- горизонтальное движение ФЦА с постоянной путевой скоростью  $W$  при определенной в СМН геометрической высоте  $H$  над плоской горизонтальной поверхностью;
- направленный вниз ГЛ при известном угле наклона его оси  $\beta_0 > 0$  (отрицательном угле места  $\theta_0 < 0$ ) и азимутом  $\alpha_0$  относительно продольной оси связанной системы координат (ССК) носителя, совпадающей с ССК антенной решетки РЛС;
- у ол скольжения (сноса)  $A_c = 0$ , т. е. угол  $\alpha_0$  рассматривается относительно вектора скорости  $W$ ;
- типовая ДНА с «крестообразным» положением угломестных и азимутальных БЛ (см. рис. 3), аналогичная ДНА, рассматриваемой в работах [9-11].

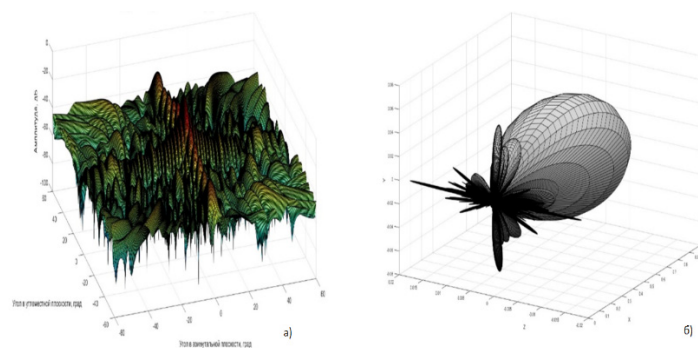


Рис. 3. Распределение амплитуд: а) в зависимости от азимута/угла места; б) вид пространственной ДНА

Как уже отмечалось, базовый диапазон дальностей и индекс  $r$  при ППИ  $T_r$  известны, поскольку при управлении

наклоном оси ГЛ обеспечивается дальность  $R_0$  от ФЦА до точки пересечения оси ГЛ с поверхностью с абсолютной погрешностью  $\delta R_0$ , не превышающей половину ширины  $T_{WZ}$  рабочей зоны ППИ  $T_r$ , выраженной как расстояние, составляющее при КНИ единицы км.

Расчетная дальность до земли по направлению оси ГЛ

$$R_0 = \left(\frac{c}{2}\right)(rT_r + \tau) = \frac{H}{\sin\beta_0}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость радиоволны;  $r$  – известный индекс (номер) ППИ из диапазона  $[0, \dots, r_{max}]$ ;  $\tau$  – НЗС в ППИ. При этом максимальная абсолютная ошибка расчета дальности:

$$\begin{aligned} \delta R_0 &= \delta \left[ \frac{H}{\sin\beta_0} \right] = \left( \frac{H}{\sin\beta_0} \right) \text{ctg}\beta_0 \delta\beta_0 + \left( \frac{\delta H}{\sin\beta_0} \right) = \\ &= R_0 \text{ctg}\beta_0 \delta\beta_0 + \left( \frac{\delta H}{\sin\beta_0} \right) < \frac{1}{2} T_{WZ} \left( \frac{c}{2} \right) \approx \frac{1}{2} T_r \left( \frac{c}{2} \right), \end{aligned}$$

где  $\delta H$  и  $\delta\beta_0$  – максимальные погрешности определения в СМН высоты ФЦА над поверхностью и угла наклона оси ГЛ, соответственно.

В идеальном случае каждому  $k$ -ому ДД в рабочей зоне ППИ, включающей  $K_{дд}$  таких ДД, соответствует ДЧ, обусловленная проекцией путевой скорости ФЦА на направление от ФЦА к центру ПЗП, ширина которой соответствует ширине ДД, а дальность до этой ПЗП определяется выражением вида (1) при  $\tau = \tau_k$ , где  $\tau_k$  – НЗС, соответствующая  $k$ -ому ДД, т. е.

$$\begin{aligned} F_{Dk} &= (2/\lambda) W \cos \varphi_k = (2/\lambda) W \cos \alpha_0 \cos \beta_k = \\ &= (2/\lambda) W_{ГЛ} \cos \beta_k \quad \forall k=1, \dots, K_{дд}, \end{aligned}$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $W_{ГЛ}$  – проекция путевой скорости на азимутальное направление оси ГЛ.

Отношение двух ДЧ  $F_{D(r)i}$  и  $F_{D(r)j}$  при  $i \neq j$ , соответствующих  $i$ -ому и  $j$ -ому ДД с НЗС  $\tau_i$  и  $\tau_j$  в рабочей зоне ППИ с индексом  $r$  и отношение квадратов этих ДЧ имеют вид:

$$\frac{F_{D(r)i}}{F_{D(r)j}} = \frac{\cos \beta_{(r)i}}{\cos \beta_{(r)j}} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i}}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)j}}\right)^2}} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i}}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i} + \Delta R_{(r)ji}}\right)^2}}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{F_{D(r)i}}{F_{D(r)j}}\right)^2 = \frac{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i}}\right)^2}{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i} + \Delta R_{(r)ji}}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $R_{(r)i}$  и  $R_{(r)j}$  – дальности от ФЦА до  $i$ -ого и  $j$ -ому ДД, соответственно;  $\Delta R_{(r)ji} = (R_{(r)j} - R_{(r)i})$  – разность (приращение) дальности, которая в рамках ППИ выражается через соответствующие НЗС  $\Delta R_{(r)ji} = (\tau_j - \tau_i) (c/2)$ ;  $\beta_{(r)i}$  и  $\beta_{(r)j}$  – углы наклона для направлений к ПЗП, удаленных от ФЦА на расстояния  $R_{(r)i}$  и  $R_{(r)j}$ . Отметим, что значения отношений ДЧ вида (2) и квадратов ДЧ вида (3), определяемых для ППИ с любым другим индексом ППИ  $r^* = r + \Delta r$ , будут отличаться:

$$\frac{F_{D(r)i}}{F_{D(r)j}} \neq \frac{F_{D(r^*)i}}{F_{D(r^*)j}}, \left(\frac{F_{D(r)i}}{F_{D(r)j}}\right)^2 \neq \left(\frac{F_{D(r^*)i}}{F_{D(r^*)j}}\right)^2 \quad \forall (r \neq r^*), \quad (4)$$

Поскольку

$$R_{(r)i} = R_{(r)i} + \left(\frac{c}{2}\right) \Delta r T_r. \quad (5)$$

Учитывая (2) – (5), можно утверждать, что каждый анализируемый ППИ с определенным индексом  $r$  априори может характеризоваться уникальной квадратной симметричной матрицей  $\mathbf{K}_{O(r)}$  коэффициентов  $k_{O(r)ij}$ , отражающих теоретически ожидаемые отношения ДЧ, или же матрицей  $\mathbf{K}_{OK(r)}$  коэффициентов  $k_{OK(r)ij}$  для ожидаемых отношений квадратов ДЧ. Элементы этих матриц определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} k_{O(r)ij} &= \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i}}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i} + \Delta R_{(r)ji}}\right)^2}} \quad \forall i=1, \dots, K_{дд}; j=1, \dots, K_{дд}; \\ k_{O(r)ij} &= k_{O(r)ji}; k_{O(r)ij} = 1 \quad \forall i=j. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} k_{OK(r)ij} &= \frac{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i}}\right)^2}{1 - \left(\frac{H}{R_{(r)i} + \Delta R_{(r)ji}}\right)^2} \quad \forall i=1, \dots, K_{дд}; \\ &j=1, \dots, K_{дд}; k_{OK(r)ij} = k_{OK(r)ji}; k_{OK(r)ij} = 1 \quad \forall i=j. \end{aligned} \quad (7)$$

С другой стороны, реальные ЧВИ практически во всех случаях дают множество номеров ДД (оценок НЗС  $\tau_m$  и однозначной дальности  $R_{(r)m}$ ) и доплеровских фильтров (оценок ДЧ  $F_{D(r)m}$  по измерениям), соответствующих ГМА и всем АМ по ППИ. Тогда по измеренным ДЧ получаются элементы полностью или частично заполненных матриц  $\mathbf{K}^*_{O(r)}$  и  $\mathbf{K}^*_{OK(r)}$  размерности  $(K_{дд} \times K_{дд})$ :

$$k^*_{O(r)mn} = \frac{F_{D(r)m}}{F_{D(r)n}} \quad (8)$$

$$\text{и } k^*_{OK(r)mn} = \left(\frac{F_{D(r)m}}{F_{D(r)n}}\right)^2 \quad (9)$$

$$\forall m \neq n; m \in [1; K_{дд}]; n \in [1; K_{дд}],$$

а также соответствующие матрицы  $\Delta \mathbf{K}_{O(r)}$ ,  $\Delta \mathbf{K}_{OK(r)}$  «невязок отношений» – отклонений между вычисленными по формулам (6), (7) и измеренными в виде (8), (9) коэффициентами отношений ДЧ и квадратов ДЧ – с элементами вида

$$\Delta k_{O(r)mn} = k_{O(r)mn} - k^*_{O(r)mn} \quad (10)$$

$$\text{и } \Delta k_{OK(r)mn} = k_{OK(r)mn} - k^*_{OK(r)mn}. \quad (11)$$

Абсолютные погрешности  $\delta k^*_{O(r)mn}$  и  $\delta k^*_{OK(r)mn}$  измеренных коэффициентов (8) и (9):

$$\delta k^*_{O(r)mn} = \frac{F_{D(r)m}(\delta F_{D(r)n}) + F_{D(r)n}(\delta F_{D(r)m})}{(F_{D(r)n})^2} \approx$$

$$\approx \frac{\Delta f_D}{F_{D(r)n}} [k^*_{O(r)mn} + 1],$$

$$\delta k^*_{OK(r)mn} = 2k^*_{OK(r)mn} (\delta k^*_{O(r)mn}) =$$

$$= 2k^*_{OK(r)mn} \frac{\Delta f_D}{F_{D(r)n}} [k^*_{O(r)mn} + 1],$$

где  $\delta F_{D(r)m}$  и  $\delta F_{D(r)n}$  – максимальные абсолютные погрешности измерения соответствующих ДЧ, причем полагается  $\delta F_{D(r)m} = \delta F_{D(r)n} \approx \Delta f_D$ , где  $\Delta f_D$  – ширина доплеровского фильтра.

Расчетные значения коэффициентов отношений вида (6) и (7) далее принимаются как «эталонные». Для «невязок» вида (10), (11) определяются интервалы  $\pm \delta k^*_{O(r)mn}$  и  $\pm \delta k^*_{OK(r)mn}$ , в пределах которых они должны находиться в «номинальном» случае, когда измерения ДЧ формируются сигналами от ПЗП в базовом диапазоне дальностей. Как информативные однозначные ЧВИ для базового ППИ считаются те ДЧ из исходного набора измерений, для которых «невязки» (10), (11) укладываются в границы указанных интервалов («коридоров невязок»), т. е. ДЧ, определенные в комбинациях (парах) ДД с номерами  $n^*$  и  $m^*$ :

$$(n^*, m^*) \leftarrow (|\Delta k_{O(r)mn}| < \delta k^*_{O(r)mn})$$

$$\text{или } |\Delta k_{OK(r)mn}| < \delta k^*_{OK(r)mn}. \quad (14)$$

При одностороннем аномальном смещении измеренных ДЧ в анализируемой паре результат может попасть в указанный коридор допустимых «невязок» и поэтому каждая из ДЧ в этой паре дополнительно рассматривается во всех других комбинациях ДЧ и в результате анализа полного множества пар с рассматриваемым измерением ДЧ подтверждается факт его номинальности или аномальности – в аспекте к базового ППИ. Таким образом, в итоге обработки сигнала определяется набор «рабочих» одновременных однозначных ЧВИ, каждое из которых является информативным для определения радиальной скорости ФЦА. Все другие ЧВИ идентифицируются как аномальные, поскольку остаются неопределенными по направлению/углу наклона к ПЗП.

На рисунке 4 для «сложного» реального сигнала (см. рис. 2) представлены результаты обработки исходных ЧВИ с использованием соотношений (6) – (14) и вышеуказанных дополнительных процедур на всем множестве комбинаций (пар) ДЧ, причем слева показаны все эквивалентные (10) «невязки» вида  $\Delta_j = (\cos \beta_i / \cos \beta_j) - (F_i / F_j)$ , где  $F_i, F_j$  – измеренные ДЧ  $i$ -ом и  $j$ -ом ДД, а справа – все «невязки», соответствующие номинальным ЧВИ для базового ППИ (после исключения комбинаций, приводящих к аномальным «невязкам» вне заданного коридора).

На рисунке 5 показана половина симметричной матрицы «невязок» (а), полученных при аналогичной обработке «хорошего» реального сигнала (б), в котором все амплитудные максимумы (ГМА и локальные АМ) формируются ПЗП, соответствующих базовому диапазону дальностей. При этом «невязок» отношений ДЧ вне расчетного «коридора» не выявлено,

все ЧВИ однозначно связаны с конкретными ПЗП в базовом диапазоне дальностей и идентифицированы как однозначные и, следовательно, информативные в аспекте определения скорости ФЦА.

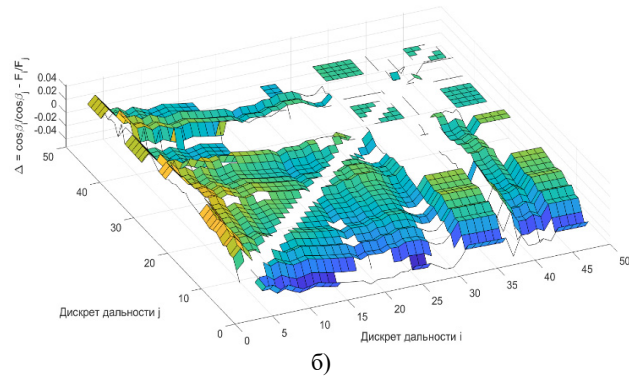
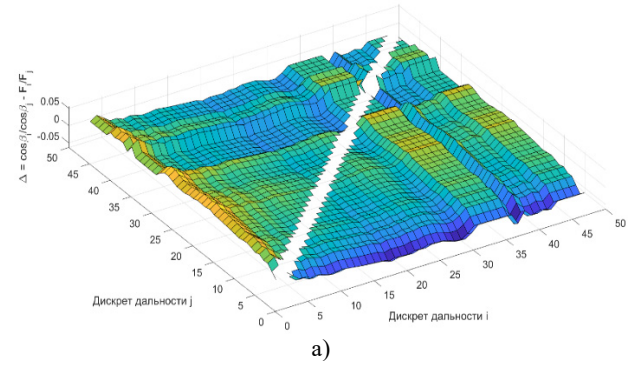


Рис. 4. Невязки расчетных и измеренных отношений ДЧ (а) и номинальные невязки (б)

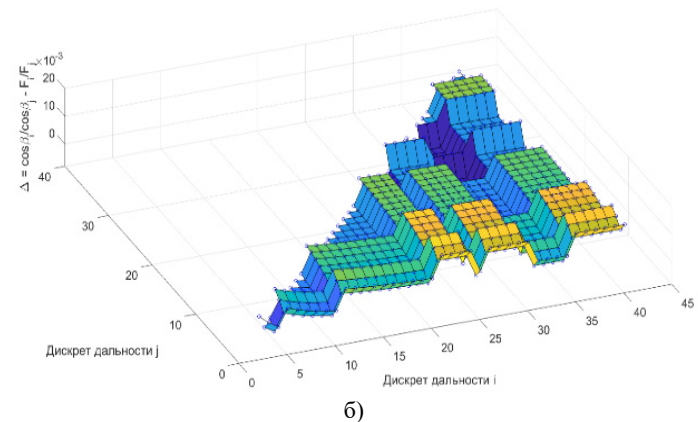
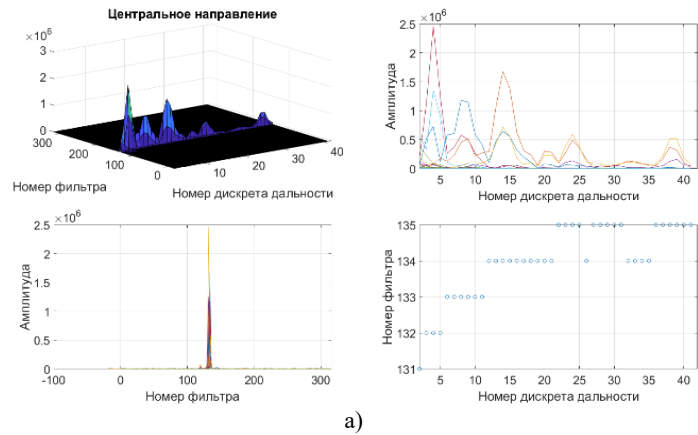


Рис. 5. «Невязки» отношений ДЧ (а) для реального сигнала (б)

Таким образом, предлагаемый метод идентификации аномальных ЧВИ на основе указанных выше «критериев соответствия отношений» ДЧ или квадратов ДЧ в исходном множестве ЧВИ позволяет: с одной стороны, идентифицировать совокупность аномальных неоднозначных ЧВИ, исключение которых из обработки обеспечивает повышение помехоустойчивости формируемых далее оценок скорости ФЦА; с другой стороны, определить рабочую совокупность номинальных ЧВИ, однозначных в рамках базового диапазона дальностей и информативных в аспекте оценок скорости ФЦА.

В отличие от типовых методов измерения/оценивания радиальной скорости ФЦА на основе «привязки» к ГМА в ППИ [9-11], т.е. только по одному ЧВИ, данный метод расширяет информативность сигнала, формируя при этом информационную избыточность по скорости ФЦА, что потенциально обеспечивает возможность повышения точности оценок скорости ФЦА на основе совместной обработки множества одновременных однозначных ЧВИ. В рамках работы процедуры дальнейшей обработки множества таких ЧВИ не рассматриваются.

Традиционное исключение из обработки всей совокупности аномальных ЧВИ может быть нецелесообразным, поскольку в ней «латентно», но все же присутствует исходно безотносительная информация о скорости ФЦА.

**3. Восстановление однозначности/информативности аномальных ЧВИ при КНИ**

Существует возможность для дальнейшего расширения информативности сигнала путем восстановления однозначности ряда аномальных ЧВИ и, следовательно, их информативности.

Рассмотрим множество  $\{F_{D(r)k}\}$  «рабочих» ДЧ, привязанных к базовому ППИ и выявленных, например, по критерию (14) для отношений квадратов ДЧ. Для любых двух ДЧ  $F_{D(r)i}$  и  $F_{D(r)j}$  при известной дальности  $R_{(r)i}$  из выражения (3) можно получить квадратное уравнение относительно приращения дальности  $\Delta R_{(r)ji} = R_{(r)j} - R_{(r)i}$ , которое полагается неизвестным:

$$\begin{aligned} & (\Delta R_{(r)ji})^2 + 2R_{(r)i}\Delta R_{(r)ji} + (R_{(r)i})^2 - H^2 \times \\ & \times \left[ 1 - \left( \frac{F_{D(r)j}}{F_{D(r)i}} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{H}{R_{(r)i}} \right)^2 \right] \right]^{-1} \quad \text{или в виде} \\ & A(\Delta R_{(r)ji})^2 + B\Delta R_{(r)ji} + C = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $A=1$ ;  $B = 2R_{(r)i}$ ;

$$C = (R_{(r)i})^2 - H^2 \left[ 1 - \left( \frac{F_{D(r)j}}{F_{D(r)i}} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{H}{R_{(r)i}} \right)^2 \right] \right]^{-1}. \quad (16)$$

С учетом (16) представим дискриминант

$$\begin{aligned} D &= B^2 - 4AC = (2R_{(r)i})^2 - 4 \times \\ & \times \left( (R_{(r)i})^2 - H^2 \left[ 1 - \left( \frac{F_{D(r)j}}{F_{D(r)i}} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{H}{R_{(r)i}} \right)^2 \right] \right]^{-1} \right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 4H^2 \left( 1 - \left( \frac{F_{D(r)j}}{F_{D(r)i}} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{H}{R_{(r)i}} \right)^2 \right] \right)^{-1} = \\ &= 4(HF_{D(r)i})^2 \left( (F_{D(r)i})^2 - (F_{D(r)j})^2 \left[ 1 - \left( \frac{H}{R_{(r)i}} \right)^2 \right] \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (17)$$

Из (17) следуют ограничения, в рамках которых возможно получение действительных корней уравнения (15), т.е. при неотрицательном дискриминанте:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{H}{R_{(r)i}} \right)^2 > 1 - \left( \frac{F_{D(r)i}}{F_{D(r)j}} \right)^2 \quad \text{или} \quad 1 - \cos^2 \beta_{(r)i} > 1 - \left( \frac{F_{D(r)i}}{F_{D(r)j}} \right)^2, \\ & \text{откуда} \quad \frac{F_{D(r)i}}{F_{D(r)j}} > \cos \beta_{(r)i}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\beta_{(r)i}$  – угол наклона для направления от ФЦА до ПЗП с дальностью  $R_{(r)i}$ . Отметим, что при рассмотрении номеров ДД в ППИ по убыванию (при  $i > j$ ), т.е. при поиске отрицательного приращения дальности  $\Delta R_{(r)ji} < 0$ , ДЧ должна снижаться и тогда  $F_{D(r)i} > F_{D(r)j}$ ,  $(F_{D(r)i} / F_{D(r)j}) > 1$  и условие (18) выполняется.

При номерах ДД «по возрастанию»  $(F_{D(r)i} / F_{D(r)j}) < 1$  и выполнение условия (18) уже не очевидно. Рассмотрим (18) в виде  $(F_{D(r)i} / F_{D(r)j}) = (\cos \beta_{(r)i} / \cos \beta_{(r)j}) > \cos \beta_{(r)i}$ , откуда  $1 / \cos \beta_{(r)j} > 1$  для всех случаев при  $90^\circ > \beta_{(r)j} > 0$ . Следовательно, при «идеальных» ДЧ решение квадратного уравнения (15) приводит к действительным корням вида

$$\begin{aligned} & \pm \Delta R_{(r)ji} = -B \pm (D)^{1/2} / 2A = -R_{(r)i} \pm H \times \\ & \times \left( 1 - \left( \frac{F_{D(r)j}}{F_{D(r)i}} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{H}{R_{(r)i}} \right)^2 \right] \right)^{-1/2} = \\ & = -R_{(r)i} \pm HF_{D(r)i} \left( (F_{D(r)i})^2 - (F_{D(r)j})^2 \left[ 1 - \left( \frac{H}{R_{(r)i}} \right)^2 \right] \right)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (19)$$

При «реальных» измерениях ДЧ  $F_{D(r)i}^*$  и  $F_{D(r)j}^*$  возможно нарушение условия (18), что свидетельствует от том, что одно или два из этих измеренных ДЧ могут быть аномальными, т.е. с ошибками, значительно превышающими ошибки частотных измерений при данной ширине доплеровского фильтра  $\Delta f_D$ . Заметим, что отрицательный дискриминант, по сути, также является критерием «аномальных» ДЧ. Очевидно, что из действительных корней (19) рассматриваются только те, которые имеют физический смысл. Например, не имеют смысла приращения  $\Delta R_{(r)ji}$ , приводящие к отрицательной дальности  $R_{(r)j}$ . Логика, исключая ненужные действительные решения уравнения (15), проста и в работе не рассматривается. Для комбинаций всех «реальных» измерений ДЧ на основе решений (19) формируется матрица измеренных дистанций  $M^*_{\Delta R(r)}$ , элементы которой  $\Delta R^*_{(r)ji}$  определяются по измерениям  $F^*_{D(r)i}$  и  $F^*_{D(r)j}$  для всех  $i \neq j$  по всем комбинациям номеров ДД с выявленными АМ сигнала. С другой стороны, для базового ППИ все комбинации расстояний между ДД известны.

Формируется аналогичная  $M^*_{\Delta R(r)}$  матрица расчетных дистанций  $M_{\Delta R(r)}$  с элементами  $\Delta R_{(r)j/i}$ . Сопоставление измеренных и расчетных значений элементов вышеуказанных матриц также позволяет идентифицировать все комбинации реальных ЧВИ, которые по некоторому критерию соответствия расчетных и измеренных дистанций (например, по соответствию невязок для указанных дистанций расчетному «коридору» в базовом диапазоне дальностей с учетом инструментальных ошибок измерений) однозначно соответствуют ПЗП в пределах базового диапазоне дальностей.

Таким образом, после выполнения процедур (6) – (14) первичной идентификации номинальных ЧВИ может быть реализована процедура их дополнительной (повторной) идентификации по указанному критерию соответствия дистанций – на основе анализа невязок дистанций, определяемых по квадратичной форме измеренных ДЧ. Отметим, что все ЧВИ, «отбракованные» при первичной/повторной идентификации, в общем случае являются аномальными только относительно базового ППИ. Если среди них будут определены ЧВИ, однозначно привязанные к конкретной ПЗП, в т.ч. и вне базового диапазона дальностей, то такие однозначно определенные ЧВИ фактически уже не являются аномальными и могут использоваться при оценивании скорости ФЦА.

При большой протяженности «следа» ГЛ и при отсутствии режекции сигналов от «следов» БЛ эти ПЗП могут быть в диапазонах дальностей, соответствующих другим исходно неизвестным индексам ППИ. При произвольной суперпозиции отражений от ПЗП, дистанцированных друг от друга на расстояния, кратные ППИ, суть предлагаемого метода «восстановления» однозначности и, следовательно, информативности исходно аномальных ЧВИ заключается в следующем.

Рассматриваются все комбинации (пары) измеренных ДЧ  $F^*_{D(r)i}$  и  $F^*_{D(r)j}$ , где  $F^*_{D(r)i}$  – ДЧ, ранее идентифицированная как номинальная для базового ППИ, а  $F^*_{D(r)j} = F^*_{D(r^*)j}$  – ДЧ, определенная как аномальная, приведшая к значению невязки дистанций вне установленного «коридора». Для базового ППИ известны значения  $R_{(r)i}$ ,  $R_{(r)j}$ ,  $\Delta R_{(r)j/i}$ , а также определенная в (19) по измерениям ДЧ аномальная дистанция  $\Delta R^*_{(r)j/i}$  – как приращение относительно дальности  $R_{(r)i}$ , соответствующей  $i$ -му ДД в ППИ с оценкой НЗС  $\tau_i$ . Дистанция относительно  $j$ -го ДД с НЗС  $\tau_j$  и с аномальной ДЧ:

$$\Delta \tilde{R}_{(r)j/j} = \Delta R^*_{(r)j/i} - \left(\frac{c}{2}\right)(\tau_j - \tau_i) = \left(\frac{c}{2}\right)(\Delta r_{j/j} T_r + \delta \tau_{j/j}), \quad (20)$$

где  $\Delta r_{j/j}$  – число соответствующих ППИ расстояний, укладывающихся в эту дистанцию, т. е.

$$\Delta r_{j/j} = \text{int} \left[ \left( \frac{2}{c T_r} \right) \Delta \tilde{R}_{(r)j/j} \right], \quad (21)$$

где  $\text{int} [\cdot]$  – ближайшее целое для числа в скобках;

$$\delta \tau_{j/j} = \text{frac} \left[ \left( \frac{2}{c T_r} \right) \Delta \tilde{R}_{(r)j/j} \right] T_r, \quad (22)$$

где  $\text{frac} [\cdot]$  – дробная часть числа в скобках, причем

$$\delta \tilde{R}_{(r)j/j} = \left(\frac{c}{2}\right) \delta \tau_{j/j} \quad (23)$$

– отклонение от кратного ППИ расстояния ( $\Delta r_{j/j} T_r$ ) в этой дистанции.

Учитывая (20) – (23), из всех указанных комбинаций ДЧ выявляются ДЧ  $F^*_{D(r)j} = F^*_{D(r^*)j}$ , для которых определено приращение индекса  $\Delta r_{j/j} \neq 0$  при малом отклонении (23), которое меньше абсолютной ошибки  $\delta \left[ \Delta \tilde{R}_{(r)j/j} \right]$  определен-

ная в (20) анализируемой дистанции, включая ошибку определения приращения  $\Delta R^*_{(r)j/i}$  по соотношению (19), а также ошибку разности оценок НЗС в ДД, которые, как правило, можно считать несущественными и не учитывать.

Таким образом, для рассматриваемого ДД из всех ДЧ, аномальных относительно базового ППИ, определяются ДЧ, которые соответствуют ПЗП, находящимся на кратных ППИ расстояниях относительно известной дальности до ПЗП в базовом диапазоне дальности, соответствующей рассматриваемому ДД. Для всех таких ДЧ – с «кратными дальностями» – определены соответствующие им приращения индекса ППИ и расстояния до конкретных ПЗП вне базового диапазона дальности. Следовательно, после выполнения вышеуказанных операций все они становятся однозначными/информативными в аспекте радиальной скорости ФЦА, что означает дальнейшее расширение информативности сигнала и, следовательно, возможностью повышения точности оценок радиальной скорости ФЦА.

### Заключение

Представленный метод:

- идентификации аномальных микронавигационных частотно-временных измерений при квазинепрерывном излучении РЛС *позволяет* на уровне первичной внутрипериодной обработки сигнала повысить помехоустойчивость оценок скорости ФЦА, исключая из рассмотрения все аномальные измерения, а также расширить возможности повышения точности оценок скорости ФЦА на основе совместной обработки множества одновременных однозначных измерений, формируемого после исключения выявленных этим методом аномальных измерений;

- «восстановления» однозначности/информативности выявленных аномальных измерений, обусловленных эффектом суперпозиции сигналов, *обеспечивает* дополнительное расширение информативности сигнала, а также и возможностей повышения точности оценок скорости ФЦА за счет возрастающей информационной избыточности.

Эти методы допускают их обобщение и для условий применения, характеризующих наличием вертикальной скорости ФЦА, которые в рамках данной работы не рассматривались.

### Литература

1. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М., Мурзаев А.С. Адаптивно-робастный метод одновременного обнаружения/захвата траектории объекта в радарах квазинепрерывного ЛЧМ-излучения при расширенном диапазоне скоростей // Радиотехника. 2023. Т. 87. №6. С.12-22.
2. Верба В.С., Ильчук А.Р., Лепехина Т.А. Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства. М.: Радиотехника. 2014. 528 с.
3. Chernodarov A.V., Patrikeev A.P., Kovregin V.N., Kovregina G.M. Using an inertial satellite navigation system for determination of motion parameters of the radar antenna phase center // 23rd Saint Petersburg

International Conference on Integrated Navigation Systems, 2016, pp. 315–323.

4. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Коврегин В.Н., Коврегина Г.М., Меркулова И.И. Летная отработка распределенной системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. №20(1). С. 222-231.

5. Chernodarov A.V., Kovregin V.N., Kovregina G.M. Inertial-Satellite Micro-Navigation System for Radar with Synthetic Aperture and Doppler Channel for Measuring Trajectory Velocity // 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2023, pp. 1-3, doi: 10.23919/ICINS51816.2023.10168430

6. Kovregin V., Kovregina G. Adaptive-robust methods for detecting, capturing and tracking hovering, low- and high-speed objects in integrated radar-inertial systems with quasi-continuous radiation // 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/ICINS43216.2021.9470845.

7. Ривкин Б.С. Аналитический обзор состояния исследований и разработок в области навигации за рубежом // ГИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». СПб. 2023. Вып. 8. 92 с.

8. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М. Метод комбинированных микронавигационных измерений в радаре квазинепрерывного излучения при обзоре воздушного пространства на фоне земли // XXXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб. 2024. С. 188-191.

9. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М. Методы и алгоритмы активного адаптивно-робастного сопровождения аэрообъекта и сопутствующих микронавигационных измерений в радарх квазинепрерывного излучения // XXXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2024. С. 192-195.

10. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М., Мурзаев А.С. Адаптивно-робастные методы сопутствующих микронавигационных измерений

по мешающим отражениям при поиске/наблюдении/сопровождении низколетящей цели // Радиотехника. Т.88, №8. 2024. С. 91-103.

11. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М. Оценка и управление параметрами спектра мешающих отражений в радарх с квазинепрерывным ЛЧМ-излучением при адаптивно-робастном наблюдении/сопровождении объекта // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. №7(145). С. 1-6, doi: 10.60797/IRJ.2024.145.45

12. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М. Автономная коррекция микронавигационной системы авиационного радара при организованных помехах спутниковой навигации // Системный анализ и логистика. 2023. №4(38). С. 54-63, doi: 10.31799/2077-5687-2023-4-54-63.

13. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М. Метод одновременных частотно-временных измерений микронавигационных параметров по мешающим отражениям в главном луче радара с квазинепрерывным излучением // Системный анализ и логистика. 2024. №1(39). С. 43-52. doi: 10.31799/2077-5687-2024-1-43-52.

14. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М. Метод определения угла скольжения по инвариантным доплеровским наблюдениям в авиационном радаре при квазинепрерывном излучении // Системный анализ и логистика. 2024. №5(43). С. 67-76. doi: 10.31799/2077-5687-2024-6-67-76.

15. Коврегин В.Н., Коврегина Г.М. Адаптивно-робастная калмановская неоднозначных измерений при дальнометрии в импульсно-доплеровских радарх с адаптивным излучением // «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве». 2021. С. 70-72.

16. Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №4. С. 41-46.

17. Брюмер К., Зифлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси / Пер. с нем. под ред. И.Е. Казакова. М.: Наука. 1982. 200 с.

## METHODS OF IDENTIFICATION AND RESTORATION OF INFORMATION CONTENT OF ANOMALOUS MICRONAVIGATION MEASUREMENTS OF SIGNALS WITH SUPERPOSITION OF REFLECTIONS FROM THE GROUND IN QUASI-CONTINUOUS RADIATION RADARS

**Valery N. Kovregin**, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, [kovregin@mail.ru](mailto:kovregin@mail.ru)  
**Galina M. Kovregina**, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, [g\\_kovregina@mail.ru](mailto:g_kovregina@mail.ru)  
**Vyacheslav A. Fedorov**, Institute of Electronic Technology, Optolink RPC LLC, Moscow, Russia, [fedorov@optolink.ru](mailto:fedorov@optolink.ru)

### Abstract

For typical aviation radars with quasi-continuous radiation in the problems of measuring/estimating (micro)navigation parameters of the radar phase center, methods are presented for identifying anomalous frequency-time measurements/estimates of the phase center velocity and restoring the uniqueness of the identified anomalous measurements caused by the superposition of reflections from areas of the earth's surface located from the phase center at distances multiple of the pulse repetition period. Taken together, these methods, based on the procedures of primary intra-period processing of the received signal, provide for an expansion of its information content, an increase in noise immunity and the potential accuracy of speed estimates based on the generated information redundancy of simultaneous unambiguous speed measurements and their joint processing. The methods presented are based on the criteria: o compliance of the calculated and measured relations of Doppler frequencies or squares of Doppler frequencies for the identification of "abnormal" frequency-temporal measurements and determining the totality of "nominal" measurements for assessing the speed of the antenna phase center; o compliance of the calculated and determined based on frequency-time measurements of the distance between the strips of the earth's surface, according to the reflection from which in different samples of the range of the working zone of the period of repetition of the pulses after the fast transformation procedure, the amplitude maximums of the signal are formed. Analysis of the "miserable" of these distances for all combinations of measured Doppler frequencies also ensures the identification of abnormal measurements, the identification of the values among them due to superposition of reflections from the lanes of the earth's surface with "multiple" tilted ranges and the determination of these ranges, which actually restores the unambiguity of such measurements and their information In the aspect of determining the speed of the phase center of the antenna. The performance and effectiveness of the proposed methods is demonstrated by the example of processing typical "real" signals from the ground in the quasi-continuous radiation mode obtained in field experiments.

**Keywords:** aviation radar, quasi-continuous radiation, ground reflections, signal superposition, micrornavigation measurements, identification, restoration and expansion of information content

## References

- [1] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, A.S. Murzaev, "Adaptivno-robastnyj metod odnovremennogo obnaruzheniya/zahvata traektorii ob"ekta v radarah kvazinepreryvnogo LChM-izlucheniya pri rasshirennom diapazone skorostej", *Radiotekhnika*. 2023, T. 87, vol. 6, pp. 12-22.
- [2] V.S. Verba, A.R. Ilchuk, T.A. Lepekhina, "Radiolokacionnye sistemy aviacionno-kosmicheskogo monitoringa zemnoj poverhnosti i vozdušnogo prostranstva". Moscow: Radiotekhnika. 2014. 528 p.
- [3] A.V. Chernodarov, A.P. Patrikeev, V.N. Kovregin, "Using an inertial satellite navigation system for determination of motion parameters of the radar antenna phase center", *23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. 2016, pp. 315-323.
- [4] A.V. Chernodarov, A.P. Patrikeev, V.N. Kovregin, G.M., I.I. Merculova "Letnaya otrabotka raspredelennoj sistemy inercial'no-sputnikovoj mikronavigacii dlya radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj," *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2017, No.20(1), pp. 222-231.
- [5] A.V. Chernodarov, V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, "Inertial-Satellite Micro-Navigation System for Radar with Synthetic Aperture and Doppler Channel for Measuring Trajectory Velocity," *30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2024, pp. 1-3, doi: 10.23919/ICINS51816.2023.10168430.
- [6] V. Kovregin, G. Kovregina, "Adaptive-robust methods for detecting, capturing and tracking hovering, low- and high-speed objects in integrated radar-inertial systems with quasi-continuous radiation," *28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/ICINS43216.2021.9470845.
- [7] B.S. Rivkin "Analiticheskij obzor sostoyaniya issledovaniy i razrabotok v oblasti navigacii za rubezhom" Konzern "CNII "Elektropribor". SPb, 2023, vol. 8. 92 p.
- [8] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, "Metod kombinirovannyh mikronavigacionnyh izmerenij v radare kvazinepreryvnogo izlucheniya pri obzore vozdušnogo prostranstva na fone zemli," *XXXI Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferenciya po integrirovannym navigacionnym sistemam*, SPb, 2024, pp. 188-191.
- [9] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, "Metody i algoritmy aktivnogo adaptivno-robastnogo soprovozhdeniya aeroob"ekta i soputstvuyushchih mikronavigacionnyh izmerenij v radarah kvazinepreryvnogo izlucheniya," *XXXI Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferenciya po integrirovannym navigacionnym sistemam*, 2024, pp. 192-195.
- [10] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, A.S. Murzaev, "Adaptivno-robastnye metody soputstvuyushchih mikronavigacionnyh izmerenij po meshayushchim otrazheniyam pri poiske/nablyudenii/soprovozhdenii nizkoletyashchej celi," *Radiotekhnika*, vol 88, No.8, 2024, pp. 91-103.
- [11] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, "Ocenivanie i upravlenie parametrami spektra meshayushchih otrazhenij v radarah s kvazinepreryvnym LChM-izlucheniem pri adaptivno-robastnom nablyudenii/soprovozhdenii ob"ekta," *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2024, No.7(145). pp. 1-6, doi: 10.60797/IRJ.2024.145.45.
- [12] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, "Avtonomnaya korekciya mikronavigacionnoj sistemy aviacionnogo radara pri organizovannyh pomekhh sputnikovoj navigacii," *Sistemnyj analiz i logistika*, 2023, NO.4(38), pp. 54-63, doi: 10.31799/2077-5687-2023-4-54-63.
- [13] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, "Metod odnovremennyh chastotno-vremennyh izmerenij mikronavigacionnyh parametrov po meshayushchim otrazheniyam v glavnom luche radara s kvazinepreryvnym izlucheniem," *Sistemnyj analiz i logistika*, 2024, No.1(39), pp. 43-52, doi: 10.31799/2077-5687-2024-1-43-52.
- [14] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, "Metod opredeleniya ugla skol'zheniya po invariantnym doplerovskim nablyudeniyam v aviacionnom radare pri kvazinepreryvnym izluchении," *Sistemnyj analiz i logistika*, 2024, No.5(43), pp. 67-76, doi: 10.31799/2077-5687-2024-6-67-76.
- [15] V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, "Adaptivno-robastnaya kalmanovskaya neodnoznachnyh izmerenij pri dal'nometrii v impul'sno-doplerovskih radarah s adaptivnym izluchением," *Matematicheskie metody i modeli v vysokotekhnologichnom proizvodstve*, 2021, pp. 70-72.
- [16] G.A. Fokin, A. H. Al-Odhari, "Positioning of the moving radiation source using time difference of arrival method," *T-Comm*, 2017, vol. 11, no.4, pp. 41-46.
- [17] K. Bryumer, G. Zifling, "Filtr Kalmana-B'yusi," Moscow: Nauka, 1982, 200 p.

## Information about authors:

**Valery N. Kovregin**, Ph.D.( Tech.), Associate Professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

**Galina M. Kovregina**, Ph.D.( Tech.), Associate Professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

**Vyacheslav A. Fedorov**, Doctor of Physical & Mathematical Sciences, Professor, Moscow, Institute of Electronic Technology, Optolink RPC LLC, Russia