

УДК 528.282::528.281

## РАЗРЕШЕНИЕ ЦЕЛОЧИСЛЕННОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ФАЗЫ НЕСУЩЕЙ ГЛОНАСС В ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СУДНА

**Крит Андрей Александрович**<sup>1</sup>, аспирант, заведующий лабораторией  
e-mail: [qgc89092850880@gmail.com](mailto:qgc89092850880@gmail.com)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** В данной работе рассмотрена архитектура программно-аппаратного комплекса для высокоточного определения пространственной ориентации судов на внутренних водных путях с использованием сигналов системы ГЛОНАСС. Описана структура четырехканального интерферометрического приемного тракта с централизованной генерацией опорных частот, обеспечивающая фазовую когерентность каналов. Особое внимание уделено алгоритмическому обеспечению разрешения целочисленной неоднозначности фазы несущей. Обосновано применение метода LAMBDA (Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment) для эффективного поиска целочисленных решений в условиях коррелированных ошибок измерений, характерных для систем с частотным разделением каналов (FDMA). Приведено математическое описание этапов декорреляции и валидации решений, позволяющее повысить надежность определения азимута, дифферента и крена.

**Ключевые слова:** ГЛОНАСС, пространственная ориентация, интерферометрия, метод LAMBDA, целочисленная неоднозначность, FDMA, многоканальный приемник.

## RESOLUTION OF INTEGER AMBIGUITY OF GLONASS CARRIER PHASE IN THE PROBLEM OF DETERMINING ANGULAR PARAMETERS OF SHIP

**Andrey A. Krit**<sup>1</sup>, Doctoral Student, Head of laboratory  
e-mail: [qgc89092850880@gmail.com](mailto:qgc89092850880@gmail.com)

<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** This paper considers the architecture of a software and hardware complex for high-precision determination of ship spatial orientation on inland waterways using GLONASS signals. A structure of a four-channel interferometric receiving path with centralized reference frequency generation is proposed, ensuring phase coherence of the channels. Special attention is paid to the algorithmic support for resolving the integer ambiguity of the carrier phase. The application of the LAMBDA (Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment) method is justified for efficient search of integer solutions under conditions of correlated measurement errors, typical for Frequency Division Multiple Access (FDMA) systems. A mathematical description of the decorrelation and validation stages is provided, allowing for improved reliability in determining azimuth, pitch, and roll.

**Keywords:** GLONASS, spatial orientation, interferometry, LAMBDA method, integer ambiguity, FDMA, multi-channel receiver.

## **Введение**

Высокоточное определение пространственной ориентации подвижных объектов, в частности судов на внутренних водных путях, является критически важной задачей для обеспечения безопасности навигации и автоматизации процессов швартовки. Традиционные методы определения угловых параметров, основанные на кодовых измерениях глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), характеризуются погрешностью на уровне метров, что недостаточно для решения задач прецизионного маневрирования [1]. В связи с этим перспективным направлением является использование фазовых измерений несущей частоты в многоантенных конфигурациях, позволяющих достичь сантиметровой точности определения базовых векторов антенной решетки. Ключевой проблемой при реализации радиоинтерферометрических методов на базе фазовых измерений является наличие целочисленной неоднозначности фазы. Измеренная разность фаз между антеннами содержит неизвестное целое число полных длин волн, которое необходимо определить для корректного вычисления геометрических параметров системы. Для системы ГЛОНАСС эта задача усложняется использованием частотного разделения каналов, при котором каждый спутник излучает сигнал на уникальной несущей частоте. Это требует от приемного тракта не только строгой фазовой синхронизации всех каналов, но и учета частотно-зависимых инструментальных погрешностей [2]. В данной работе рассматривается программно-аппаратная реализация четырехканального интерферометрического тракта, интегрированного с алгоритмом разрешения целочисленной неоднозначности на базе метода LAMBDA. Предложенный подход позволяет объединить преимущества аппаратной фазовой стабильности специализированного приемного устройства с эффективностью современных математических методов обработки навигационных измерений.

## **Архитектура аппаратной части комплекса**

Архитектура аппаратной части комплекса базируется на принципе централизованной генерации опорных частот. Устройство состоит из четырех антенных модулей, образующих две ортогональные базы, что позволяет однозначно определять полный вектор пространственной ориентации, включающий азимут, дифферент и крен. Каждый антенный канал содержит малошумящий усилитель и смеситель первого преобразования. Формирование локального гетеродина осуществляется путем умножения единой опорной частоты, распределяемой от центрального блока, что обеспечивает жесткую фазовую когерентность всех четырех трактов и исключает взаимный дрейф фаз, характерный для распределенных программно-определяемых радиосистем. Сигналы после первого преобразования частоты поступают в центральный блок, где формируется вторая промежуточная частота. Оцифровка сигналов производится синхронизированными аналого-цифровыми преобразователями, данные с которых передаются в программируемую логическую интегральную схему. В цифровом корреляторе реализуется параллельная обработка сигналов выбранного созвездия спутников ГЛОНАСС. Для каждого канала независимо осуществляются процедуры квадратурного детектирования, накопления и извлечения мгновенных значений фазы несущей. Полученные фазовые измерения подвергаются предварительной фильтрации и калибровке, компенсирующей инструментальные межканальные сдвиги, зависящие от ленточной частоты конкретного спутника в системе FDMA.



### Математическая модель и постановка задачи

Математическая модель радиоинтерферометрических измерений связывает разность фаз для  $k$ -го спутника между  $i$ -й и  $j$ -й антеннами с проекциями базового вектора в геоцентрической системе координат [3]. Система уравнений наблюдений включает в себя геометрические параметры ориентации антенной решетки, целочисленную неоднозначность и остаточные погрешности. В линейном приближении задача сводится к решению системы уравнений вида:

$$\Phi = A \cdot b + \lambda \cdot N + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\Phi$  – вектор измеренных разностей фаз;

$A$  – матрица направляющих косинусов на спутники;

$b$  – вектор компонент базовых линий;

$\lambda$  – длина волны;

$N$  – вектор целочисленных неоднозначностей;

$\varepsilon$  – вектор ошибок измерений.

Традиционные методы поиска целочисленных неоднозначностей, такие как простой перебор или округление вещественного решения, полученного методом наименьших квадратов, оказываются неэффективными при наличии коррелированных ошибок и слабой геометрии спутникового созвездия, что часто наблюдается в условиях речных акваторий с ограниченным небосводом. Корреляция между компонентами вектора неоднозначностей приводит к тому, что область поиска оптимального целочисленного решения имеет вытянутую эллипсоидальную форму, что значительно увеличивает вычислительную сложность прямого перебора [4].

### Алгоритмическое обеспечение на базе метода LAMBDA

Для эффективного решения задачи определения целочисленных неоднозначностей в условиях сильной корреляции измерений, характерной для коротких базовых линий и малых интервалов наблюдения, в программном комплексе реализован метод LAMBDA (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment). Как показано в фундаментальных работах по данной тематике, производительность поиска целочисленных решений критически зависит от формы пространства поиска, которая определяется ковариационной матрицей оценок неоднозначностей [5].

В исходном пространстве двойных разностей фазовых измерений спектр условных дисперсий имеет выраженный разрыв. Это проявляется в том, что первые несколько условных стандартных отклонений имеют большие значения, в то время как остальные стремятся к минимуму. Такая структура приводит к тому, что пространство поиска приобретает сильно вытянутую эллипсоидальную форму. При попытке прямого перебора целочисленных кандидатов в таком пространстве наблюдается эффект «остановки поиска»: на начальных этапах алгоритм генерирует огромное количество кандидатов из-за широких границ поиска, но на последующих этапах, где дисперсии резко падают, большинство из них отбраковывается. Это делает прямой поиск вычислительно неэффективным и нестабильным, особенно при использовании только фазовых данных на коротких временных интервалах.

Метод LAMBDA решает эту проблему путем выполнения целочисленной трансформации  $Z$ , которое декоррелирует оценки неоднозначностей. Процесс алгоритмической обработки строится следующим образом [6].

На первом этапе формируется «плавающее» решение задачи. На основе накопленных фазовых и кодовых измерений от всех четырех антенных каналов строится система



линейных уравнений наблюдений. Решение этой системы методом взвешенных наименьших квадратов дает вещественную оценку вектора неоднозначностей  $\hat{a}$  и соответствующую ей ковариационную матрицу  $Q_{\hat{a}}$ . Весовая матрица формируется с учетом отношения сигнал/шум для каждого спутникового канала и результатов предварительной калибровки инструментальных задержек тракта. Для системы ГЛОНАСС, использующей частотное разделение каналов, весовые коэффициенты корректируются в зависимости от номера частотного канала спутника, что позволяет компенсировать частотно-зависимые искажения.

На втором этапе применяется целочисленная трансформация  $Z$ , приводящая ковариационную матрицу к форме, максимально близкой к диагональной. В результате преобразования исходный вектор неоднозначностей  $a$  переходит в новый вектор  $\tilde{a} = Za$ , компоненты которого становятся практически независимыми друг от друга. Согласно анализу, приведенному в [6], такое преобразование выравнивает спектр условных дисперсий, делая его более «плоским» и низким. Геометрически это означает переход от вытянутого эллипсоида неопределенности к гиперсфере или слабо вытянутому эллипсоиду, оси которого параллельны базисным векторам. Декорреляция существенно сужает пространство поиска и устраняет проблему разрыва дисперсий, обеспечивая равномерное распределение кандидатов.

Третий этап заключается в поиске ближайшего целочисленного вектора в преобразованном пространстве. Размер пространства поиска контролируется параметром  $\chi^2$ , который выбирается на основе статистических свойств оценок. Объем пространства поиска  $V_n$  связан с определителем ковариационной матрицы и служит хорошей оценкой количества целочисленных кандидатов внутри него. Использование декоррелированных переменных позволяет задать размер пространства поиска таким образом, чтобы гарантировать наличие минимального числа кандидатов (например, лучшего и второго лучшего решений) без избыточного перебора. Благодаря снижению уровня корреляции, поиск выполняется эффективно с использованием алгоритма ветвей и границ. Найденное целочисленное решение  $\tilde{a}_{int}$  затем подвергается обратной трансформации  $a_{int} = Z^{-1}\tilde{a}_{int}$  для получения оценок исходных неоднозначностей.

Завершающим шагом алгоритма является процедура проверки достоверности полученного целочисленного решения. Используется тест отношения правдоподобия, сравнивающий квадратичную форму невязок для лучшего найденного целочисленного кандидата и второго лучшего кандидата. Если это отношение превышает заданный порог, решение признается корректным и фиксируется. В противном случае система переходит в режим ожидания накопления дополнительной статистики.

## Вывод

Интеграция алгоритма LAMBDA с описанной аппаратной платформой позволяет реализовать замкнутый цикл обработки данных. ПЛИС обеспечивает высокоскоростное извлечение фазовой информации и передачу пакетов измерений в вычислительный модуль, где выполняется разрешение неоднозначности. Обновление параметров ориентации происходит с частотой, достаточной для отслеживания динамики судна при маневрировании. Использование ортогональных баз в сочетании с эффективным разрешением неоднозначности гарантирует однозначность определения азимута, дифферента и крена даже при использовании ограниченного числа спутников.

Предложенная программно-аппаратная архитектура демонстрирует потенциал создания отечественных высокоточных навигационных комплексов, не зависящих от закрытых технологий зарубежных производителей. Сочетание аппаратной фазовой синхронизации, компенсирующей особенности FDMA-сигналов ГЛОНАСС, и современного



алгоритмического обеспечения на базе метода LAMBDA, создает надежную основу для систем пространственной ориентации судов нового поколения. Дальнейшие исследования планируется направить на адаптацию пороговых значений алгоритма валидации под специфические условия многолучевого распространения сигналов на внутренних водных путях.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки: госзадание FSWR-2026-0011*

#### **Список литературы:**

1. Абросимов В.Н., Алексеева В.И., Гребенко Ю.А., Лукин В.И., Мищенко И.Н., Новиков И.А. Использование системы NAVSTAR для определения угловой ориентации объектов //Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – №1. – С.46.
2. Кокорин В.И. Радионавигационные системы и устройства : учеб. пособие для студентов вузов / В.И. Кокорин ; Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 174 с.
3. Дугин Н. А. Разработка методов и устройств для высокоточных измерений в радиоастрономии и радиоинтерферометрии. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. — Нижний Новгород. – 2007.
4. J.F. Zumberge, M.B. Heflin, D.C. Jefferson, M.M.Watkins, and F.H. Webb, “Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. B3, pp. 5005–5018, 1997. doi:10.1029/96JB03860.
5. X.W. Chang, X. Yang, T. Zhou, “MLAMBDA: a modified LAMBDA method for integer least-squares estimation,” *Journal of Geodesy*, 79, 552–565, 2005, doi:10.1007/s00190-005-0004-x.
6. Teunissen, P., de Jonge, P. & Tiberius, C. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: its performance on short GPS baselines and short observation spans. *Journal of Geodesy* 71, 589–602 (1997). <https://doi.org/10.1007/s001900050127>.

