
ПРИБОРЫ НАВИГАЦИИ
NAVIGATIONAL INSTRUMENTS

УДК 621.396
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-162-170

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ
ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПЕРЕБОРНОГО АЛГОРИТМА РАЗРЕШЕНИЯ
ЦЕЛОЧИСЛЕННОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ
ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО АБСОЛЮТНОГО МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ**

В. С. БАХОЛДИН*, Д. А. ЛЕКОНЦЕВ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
**vka@mil.ru*

Аннотация. Применение фазовых измерений в навигационной аппаратуре потребителя стало основным способом повышения точности навигационных определений. Используемые методы разрешения неоднозначности фазовых измерений требуют дополнительной информации и обладают рядом известных недостатков. Выявлены ограничения при реализации методов синтезированной длины волны и некрatных шкал для разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе ГЛОНАСС. Предложен беспереборный метод разрешения неоднозначности фазовых измерений в спутниковой радионавигационной системе, не требующий избыточного числа измерений. Проведено теоретическое обоснование вычислительных процедур метода некрatных шкал. Предложенный метод использует математическую теорию чисел для определения целого числа фазовых циклов. Разработаны алгоритмы, реализующие данный метод на двух несущих частотах, представлены результаты экспериментальной обработки фазовых измерений псевдодалности в системе ГЛОНАСС. Эти алгоритмы могут быть использованы как при решении задачи местоопределения в режиме позиционирования с прецизионной точностью, так и при определении ориентации высокодинамичных объектов в реальном масштабе времени. На основе рассмотренного метода некрatных шкал могут быть разработаны алгоритмы разрешения неоднозначности фазовых измерений, полученных с помощью зарубежных спутниковых навигационных систем GPS, Galileo, Beidou.

Ключевые слова: разрешение неоднозначности, радионавигационная система, беспереборный метод, фазовые измерения, высокоточное определение местоположения, precise point positioning

Ссылка для цитирования: Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Результаты экспериментальной обработки фазовых измерений системы ГЛОНАСС с использованием бесперебойного алгоритма разрешения целочисленной неоднозначности для высокоточного абсолютного местоопределения // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 162—170. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-162-170.

**RESULTS OF EXPERIMENTAL PROCESSING
OF PHASE MEASUREMENTS OF THE GLONASS SYSTEM
USING A NON-BRUTE FORCE INTEGER AMBIGUITY RESOLUTION ALGORITHM
FOR HIGH-PRECISION ABSOLUTE LOCATION**

V. S. Bakholdin*, D. A. Lekontsev

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
**vka@mil.ru*

Abstract. The use of phase measurements in consumer navigation equipment has become the main way to increase the accuracy of navigation determinations. The methods used to resolve the ambiguity of phase measurements require additional information and have a number of known disadvantages. Limitations are identified in the implementation of methods of synthesized wavelength and non-multiple scales for resolving the phase measurements ambiguity in the

GLONASS system at the present time. A non-brute force method for resolving the ambiguity of phase measurements in a satellite radio navigation system is proposed, which does not require an excessive number of measurements. A theoretical substantiation of the computational procedures of the multiple scale method are carried out. The proposed method uses mathematical number theory to calculate an integer number of phase cycles. Algorithms are developed to implement this method at two carrier frequencies, and the results of experimental processing of phase measurements of pseudo-range in the GLONASS system are presented. These algorithms can be used both when solving the positioning problem in precision-accuracy positioning mode, and when determining highly dynamic objects orientation of in real time. Based on the considered method of non-multiple scales, algorithms for resolving the ambiguity of phase measurements obtained using foreign satellite navigation systems GPS, Galileo, Beidou can be developed.

Keywords: ambiguity resolution, radio navigation system, non-brute force method, phase measurements, high precision absolute positioning, precise point positioning

For citation: Bakholdin V. S., Lekontsev D. A. Results of experimental processing of phase measurements of the GLONASS system using a non-brute force integer ambiguity resolution algorithm for high-precision absolute location. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 162—170 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-162-170.

Введение. Высокоточное определение местоположения в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) широко применяется при строительстве и геодезических работах, геодинамическом контроле лавиноопасных участков и движения тектонических плит, определении границ земельных участков, природных ресурсов и урожая при проведении кадастрового учета, навигационном обеспечении низкоорбитальных космических аппаратов и ионосферном мониторинге. После того как предельная точность кодовых измерений была исчерпана, в ГНСС стал широко применяться метод высокоточного абсолютного позиционирования (*precise point positioning*, PPP) с использованием фазовых измерений (ФИ). Погрешности навигационных определений в режиме постобработки не превышают 1 см для неподвижной навигационной аппаратуры потребителя (НАП) и единиц дециметров — для подвижной. Наиболее часто используется режим *Float PPP* (плавающее решение), при котором целочисленные неоднозначности ФИ включают немоделируемые аппаратурные задержки и оцениваются действительными числами. Режим *Float PPP* обладает недостаточной оперативностью, и в зависимости от требуемой точности и объема полученных измерений поиск решения навигационной задачи может длиться несколько часов.

Использование результатов целочисленного разрешения неоднозначности (РН) ФИ позволяет сократить время решения навигационной задачи и перейти к позиционированию в режиме реального времени. Таким образом, разработка методов РН ФИ для высокоточного позиционирования в абсолютном режиме является актуальной задачей.

Для выполнения процедуры целочисленного РН ФИ при высокоточном позиционировании тем или иным способом [1—7] используют режим, называемый *Integer PPP* (PPP-AR (*ambiguity resolution*)), или фиксированное решение (*fixed solution*). Высокоточное определение местоположения реализуется с использованием корректирующей информации, сформированной ассистирующей системой в результате обработки большого числа измерений, выполняемых сетью наземных станций. В этом случае режимы *Float PPP* и *Integer PPP* не являются автономными, так как используют дополнительные данные от ассистирующих систем.

Неоднозначность измерений порождается, прежде всего, неопределенным начальным значением целого числа фазовых циклов (ФЦ). Проблемы обработки ФИ в ГНСС также увеличиваются при появлении на интервале их измерения „срывов“ слежения за фазами несущих колебаний навигационных сигналов, которые описываются в модели фазовых измерений изменением целого числа ФЦ на неизвестную величину. Обработка ФИ должна учитывать как их неоднозначность, так и возможное скачкообразное изменение их целого числа. Учет неоднозначности целого числа ФЦ в математической модели ФИ сводится к включению числа циклов в состав оцениваемых параметров. Для определения наличия скачков (слипов) в измерениях фазы навигационного сигнала разработаны методы, основанные на применении

линейных комбинаций кодовых и фазовых измерений (кодowo-фазовая безгеометрическая комбинация, кодовая и фазовая безгеометрические комбинации, комбинация Мельбурна—Вуббена) [8, 9]. Их использование позволяет определить наличие скачков в ФИ как на одной, так и на двух частотах. Сдерживающим фактором при РН ФИ в НАП является наличие смещений начальной фазы несущей частоты (НЧ), излучаемой спутником орбитальной группировки, а также фазовой задержки этого колебания в аппаратуре навигационного приемника.

Результативность математических моделей ФИ определяется степенью учета различных влияющих факторов [10]. Применительно к ФИ на НЧ ГНСС данные модели в упрощенном виде могут быть представлены следующим математическим выражением:

$$\varphi(t) = \frac{R(t)}{\lambda} + f(\Delta T(t_{\text{НАП}}) - \Delta T(t_{\text{НКА}})) + \Psi_{\text{ОНКА}} + \Psi_{\text{прдНКА}} + \Psi_{\text{ОНАП}} + \Psi_{\text{прмНАП}} + \Psi_{\text{троп}} + \\ + \Psi_{\text{ион}} + \Psi_{\text{мл}} + \Psi_{\text{шум}} + N,$$

где $R(t)$ — расстояние между фазовыми центрами антенн навигационного космического аппарата (НКА) и навигационной аппаратуры потребителя в момент времени t ; f — НЧ сигнала, излучаемого НКА; λ — длина волны НЧ НКА; $\Delta T(t_{\text{НАП}})$ и $\Delta T(t_{\text{НКА}})$ — смещение шкалы времени НАП и НКА относительно системной шкалы времени ГНСС на моменты времени излучения и приема сигнала; $\Psi_{\text{ОНКА}}$ и $\Psi_{\text{ОНАП}}$ — начальные фазы НЧ НКА и опорного генератора НАП; $\Psi_{\text{прдНКА}}$ — фазовая задержка в бортовом источнике навигационного сигнала и передающем радиотракте, учитывающая положение фазового центра антенны соответствующей радиоволны, $\Psi_{\text{прмНАП}}$ — фазовая задержка в приемном радиотракте НАП, $\Psi_{\text{троп}}$ и $\Psi_{\text{ион}}$ — фазовые искажения, вызываемые влиянием тропосферы и ионосферы; $\Psi_{\text{мл}}$ — погрешности, вызванные многолучевым распространением сигналов; $\Psi_{\text{шум}}$ — погрешности, определяемые тепловыми шумами; N — неопределенное целое число ФЦ, присутствующее в ФИ.

В процессе предварительной обработки, выполняемой перед решением навигационной задачи, происходят компенсация систематических и сглаживание случайных составляющих погрешностей, однако полное их устранение, как известно, невозможно.

Для ускорения сходимости навигационного PPP-решения следует использовать результаты измерений на двух и более НЧ и беспереборные методы РН ФИ. Среди известных методов РН наиболее широко применяется метод синтезированной, или разностной, длины волны (СДВ). Диапазон однозначных измерений СДВ определяется как:

$$\Lambda_{\text{СДВ}} = \frac{c}{f_1 - f_2} = \lambda_1 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

где c — скорость света, f_1 и f_2 — масштабные (несущие) частоты, при этом $f_1 > f_2$, а λ_1 и λ_2 — соответствующие им длины волн. Другим беспереборным методом является метод некрatных шкал [2, 11], основанный на представлении масштабных частот f_i в виде дробей, описывающих их отношение к основной шкале f_0 :

$$\frac{f_0}{f_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} = \frac{P_i}{\Theta_i}, \quad i = \overline{1, n}; \quad \text{НОД}(P_i, P_{j \neq i}) = 1,$$

где λ_0 — основная длина волны, Θ — знаменатель дроби, n — число масштабных шкал, НОД — наибольший общий делитель, P_1, P_2, \dots, P_n — числители дробей. Диапазон однозначных измерений дальности $\Lambda_{\text{НШ}}$ определяется следующим выражением:

$$\Lambda_{\text{НШ}} = \lambda_0 \cdot \text{НОК}(P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n),$$

где НОК — наименьшее общее кратное. Метод некратных шкал обладает преимуществом перед методом СДВ, так как диапазоны однозначных измерений этих двух методов связаны выражением вида:

$$\Lambda_{\text{СДВ}} = \lambda_1 \cdot \frac{\frac{P}{\Theta} \lambda_1}{\frac{P}{\Theta} \lambda_1 - \lambda_1} = \frac{P}{\Theta} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_1}{\lambda_1 \left(\frac{P}{\Theta} - 1 \right)} = \frac{P}{\Theta} \cdot \frac{\lambda_1}{\left(\frac{P - \Theta}{\Theta} \right)} = \frac{\Lambda_{\text{НШ}}}{P - \Theta}.$$

Из полученного соотношения видно, что диапазон однозначности для метода СДВ равен диапазону однозначных измерений метода некратных шкал, если числитель и знаменатель дроби, аппроксимирующей отношение фазометрических шкал, различаются на единицу. Во всех остальных случаях диапазон однозначности при использовании метода некратных шкал будет больше.

Во всех ГНСС для компенсации ионосферных погрешностей предусмотрен двухчастотный метод, который предполагает, что отношение двух НЧ образует простую дробь, что позволяет реализовать метод некратных шкал для РН ФИ. В некоторых ГНСС отношение частот было выбрано таким образом, что для РН возможно использовать метод СДВ. Формирование некратных фазометрических шкал в ГНСС заключается в выборе таких пар НЧ, для которых выполняется условие их согласования для РН:

$$\delta n = \text{int} \left(\sqrt{\left(P_i^2 + \Theta_i^2 \right) \cdot \delta \varphi^2 + 0,5} \right) = 0, \quad i = \overline{1, n},$$

где $\delta \varphi$ — предельная погрешность измерения дробной части ЦФ, принимающая значение от нуля до 1.

Для ГНСС ГЛОНАСС с частотным разделением сигналов НЧ для каждого НКА в частотных диапазонах $L1$ и $L2$ определяются следующими выражениями [12]:

$$f_1 = 1602 + k \cdot 0,5625 \text{ МГц} \quad (\lambda_1 \approx 18,71 \text{ см}),$$

$$f_2 = 1246 + k \cdot 0,4375 \text{ МГц} \quad (\lambda_2 \approx 24,06 \text{ см}),$$

где k — литеры НЧ, указанная в альманахе системы. Ошибка следящей системы за фазой НЧ определяется по формуле:

$$\sigma_\lambda = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{B_{\text{ФАП}}}{P/N_0}},$$

где P/N_0 — отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума на входе приемника, а $B_{\text{ФАП}}$ — эквивалентная шумовая ширина полосы схемы слежения за фазой НЧ [10]. Для современных образцов НАП погрешности ФИ составляют тысячные доли ФЦ. На первоначальном этапе модернизации системы ГЛОНАСС предполагалось использование третьей НЧ $f_3 = 1201,5 \text{ МГц}$ [12, 13], которую, согласно исследованиям, следует рассматривать как удачный пример введения в навигационную систему дополнительной НЧ.

В результате разложения значений НЧ на множители получим:

$$f_1 = 89 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 4 \cdot 10^5 = 1602,0; \quad f_2 = 89 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 10^5 = 1246,0;$$

$$f_3 = 89 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10^5 = 1201,5 \text{ МГц}.$$

Таким образом, можно образовать две пары некратных шкал:

$$\alpha_1 = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{P_1}{\Theta_1} = \frac{9}{7}; \quad \alpha_2 = \frac{f_1}{f_3} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} = \frac{P_2}{\Theta_2} = \frac{4}{3}; \quad \alpha_3 = \frac{f_2}{f_3} = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} = \frac{P_3}{\Theta_3} = \frac{28}{27}.$$

Для каждой пары частот условия согласования принимают вид:

$$|\delta\varphi_{12}| \leq 0,043; |\delta\varphi_{13}| < 0,1; |\delta\varphi_{23}| \leq 0,012.$$

Диапазоны однозначных ФИ для каждой пары частот составляют:

$$\Lambda_{12\text{НШ}} = P_1 \cdot \lambda_1 = \Theta_1 \cdot \lambda_2 \approx 1,68 \text{ м}; \quad \Lambda_{13\text{НШ}} = P_2 \cdot \lambda_1 = \Theta_2 \cdot \lambda_3 \approx 0,75 \text{ м};$$

$$\Lambda_{23\text{НШ}} = P_3 \cdot \lambda_2 = \Theta_3 \cdot \lambda_3 \approx 6,7 \text{ м}.$$

Использование метода некрatных шкал позволяет увеличить диапазон РН на частотах f_2 и f_1 в два раза, по сравнению с методом СДВ. Диапазон однозначных измерений на частотах f_2 и f_3 равен 6,7 м и соответствует диапазону однозначных измерений с использованием трех некрatных шкал, но при значительно меньших (в 3,5 раза) требованиях к точности измерения дробной части ФЦ.

При выборе параметров новых сигналов модернизируемой системы ГЛОНАСС разработчиками учитывались следующие основные ограничительные факторы:

— новые сигналы должны оставаться в полосе частот, отведенной в настоящее время для ГЛОНАСС, по причине длительности и сложности процедур согласования на международном уровне заявки на новый частотный диапазон;

— мощность спектральных составляющих новых сигналов не должна превышать установленные пороговые значения в радиоастрономическом диапазоне;

— технические трудности объединения сигналов в диапазонах $L2$ и $L3$ для излучения через общую антенну;

— несущие и тактовые частоты сигналов с кодовым разделением должны быть кратны частоте $f_b = 1,023$ МГц, которая принята за базовую.

В соответствии с новыми разработанными интерфейсными контрольными документами сигналы открытого доступа с кодовым разделением системы ГЛОНАСС будут излучаться в диапазоне $L1$ на НЧ $f_1 = 1565f_b = 1600,995$ МГц, в диапазоне $L2$ на НЧ $f_2 = 1220f_b = 1248,06$ МГц и в диапазоне $L3$ на НЧ $f_3 = 1175f_b = 1202,025$ МГц [12]. Реализация метода СДВ для данных частот затруднительна, так как в разностной длине волны не укладывается целое число длин волн ни одной из указанных частот. Отношение заданных НЧ представляется дробями:

$$\alpha_1 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{244}{313}; \quad \alpha_2 = \frac{f_3}{f_1} = \frac{235}{313}; \quad \alpha_3 = \frac{f_3}{f_2} = \frac{235}{244}.$$

Условия согласования шкал для указанных пар частот принимают вид: $|\delta\varphi_{12}| \leq 0,0012$; $|\delta\varphi_{13}| < 0,0012$; $|\delta\varphi_{23}| \leq 0,00142$. Такие погрешности измерения дробной части ФЦ в НАП в настоящее время недостижимы, и соответственно реализация метода некрatных шкал невозможна. Необходимо отметить, что реализация переборных алгоритмов также существенно затруднена, поскольку большая высота дроби свидетельствует об очень большом количестве комбинаций неоднозначностей [14]. Таким образом, несмотря на то что некоторые НКА системы ГЛОНАСС излучают сигналы на трех НЧ, в настоящее время возможна реализация только двухчастотных алгоритмов, которые будут рассмотрены далее.

После расчета элементов базиса в соответствии с теоремой о дробных частях вычисляется целое число ФЦ выбранной НЧ и рассчитывается дальность с использованием кодовых измерений R_k , используемых для грубой оценки числа ФЦ, укладываемых в измеряемой дальности [15].

Для пары частот f_1 и f_2 при выборе в качестве основной частоты f_1 математические выражения РН имеют следующий вид:

$$r_{12} = 4 \cdot \text{int} \left(\frac{\varphi_2}{2\pi} \cdot 9 - \frac{\varphi_1}{2\pi} \cdot 7 + 0,5 \right) \text{ mod } 9;$$

$$R_{f_1} = \left(\left(r_{12} + \frac{\varphi_1}{2\pi} \right) + \text{int} \left(\frac{\text{int} \left(\frac{R_K}{\lambda_1} + 0,5 \right) - r_{12}}{9} + 0,5 \right) \cdot 9 \right) \cdot \lambda_1,$$

где R_{f_1} и R_{f_2} — полные вычисленные значения фазовой дальности на соответствующих частотах, r_{12} и r_{21} — число ФЦ в диапазоне однозначности фазовой измерительной системы.

Для пары частот f_1 и f_2 при выборе в качестве основной частоты f_2 математические выражения РН имеют следующий вид:

$$r_{21} = 4 \cdot \text{int} \left(\frac{\varphi_1}{2\pi} \cdot 7 - \frac{\varphi_2}{2\pi} \cdot 9 + 0,5 \right) \text{ mod } 7;$$

$$R_{f_2} = \left(\left(r_{21} + \frac{\varphi_2}{2\pi} \right) + \text{int} \left(\frac{\text{int} \left(\frac{R_K}{\lambda_2} + 0,5 \right) - r_{21}}{7} + 0,5 \right) \cdot 7 \right) \cdot \lambda_2.$$

Результаты моделирования подтверждают устойчивость алгоритмов РН к систематическим погрешностям, вызванным смещением измерительных шкал друг относительно друга, которая определяется периодическим характером интерференционной картины (повторением моментов совпадения дробных частей) и инвариантностью квадрата пространственно-временного интервала при переходе к любой инерциальной системе отсчета [16].

Представленные алгоритмы РН двухчастотных измерений в системе ГЛОНАСС были использованы при экспериментальной обработке результатов измерений. При проведении эксперимента были использованы результаты измерений, записанные в файле формата RINEX v.3.04 от 24 декабря 2021 г. Обработке подвергались данные, полученные по НКА PRN №24 системы ГЛОНАСС. На рис. 1 и 2 представлены выборки из 200 последовательных измерений дальности, доплеровского смещения (f_d), фазы и отношения сигнал/шум (с/ш) сигналов $L1$ — СТ; $L2$ — СТ, которые соответствуют малым значениям доплеровского сдвига частоты на время 11 ч 11 мин 20 с. Результаты обработки в виде зависимости целого числа ФЦ и полной фазовой дальности для соответствующей частоты от порядкового номера измерения в выборке приведены на рис. 3 и 4. Таким образом, результаты экспериментальной обработки полностью подтверждают работоспособность предложенного метода формирования некратных шкал в радиотехнических системах траекторных измерений, использующих ФИ.

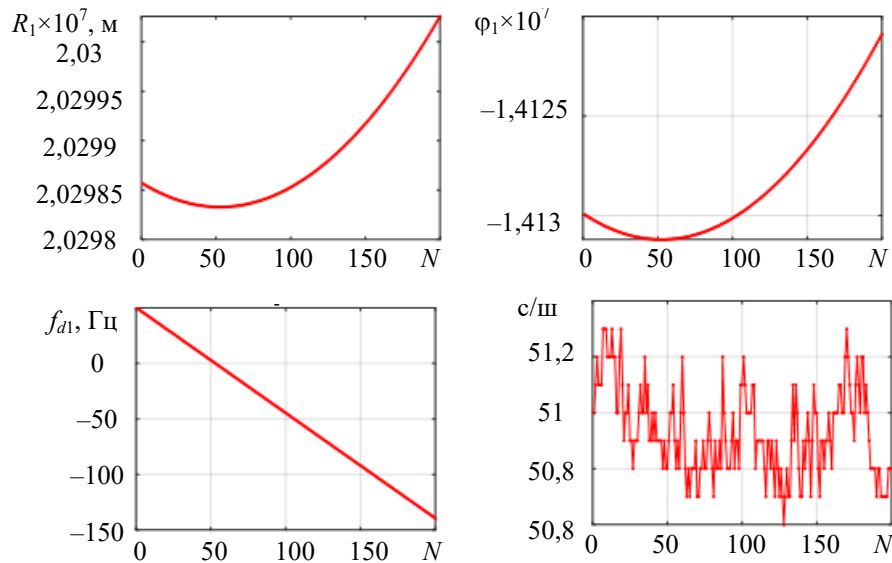


Рис. 1

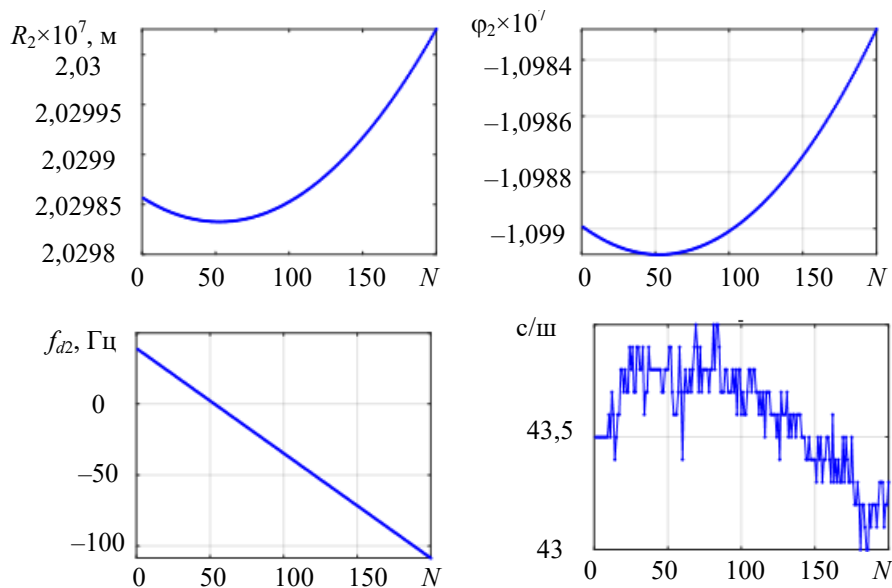


Рис. 2

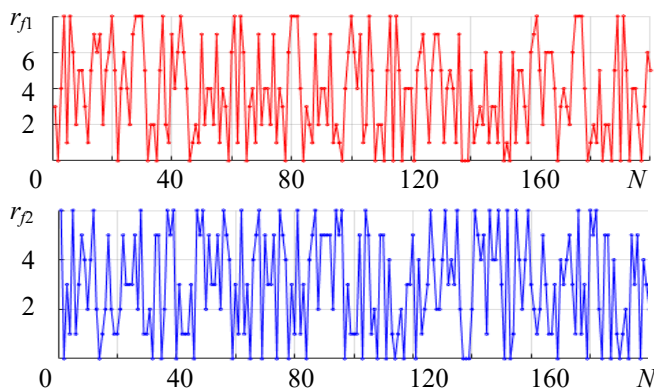


Рис. 3

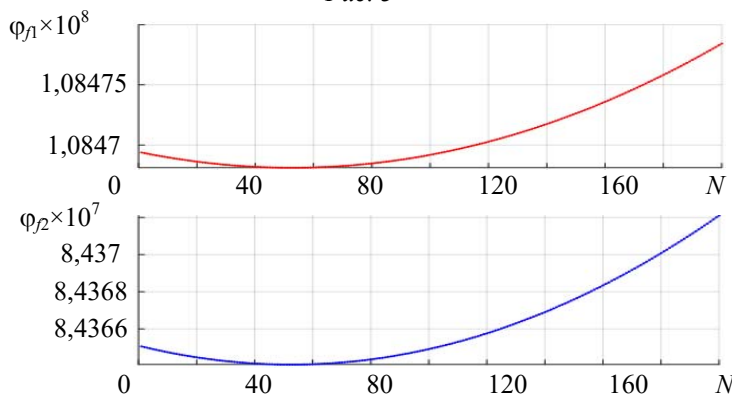


Рис. 4

Таким образом, экспериментальная обработка результатов измерений на двух несущих частотах системы ГЛОНАСС подтвердила работоспособность разработанного метода и алгоритмов разрешения неоднозначности при погрешностях ФИ и наличии межчастотных задержек.

Высокоточное позиционирование обеспечивается при использовании корректирующей информации в виде поправок к координатам спутников и смещениям показаний бортовых часов, однако в отсутствие этих данных повысить точность одномоментных измерений без существенного увеличения времени сходимости навигационного решения возможно, используя методы, уменьшающие влияние целочисленной неоднозначности ФИ. На основе рассмотренного метода некратных шкал могут быть разработаны алгоритмы разрешения неодно-

неоднозначности фазовых измерений в зарубежных спутниковых навигационных системах GPS, Galileo, Beidou [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DeJoune P. J., Tiberius C. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. Delft: Geodetic Computing Centre, 1996. 50 p.
2. Пат. РФ 2157547 С1. Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений / В. А. Пономарев, В. С. Бахолдин. Заявка № 99120425/09 от 24.09.1999. Оpubл. 10.10.2000.
3. Пат. РФ 2213979 С2. Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе GPS / В. А. Пономарев, В. С. Бахолдин. Заявка № 2000132342/09 от 22.12.2000. Оpubл. 10.10.2003.
4. Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., and Liu J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations // Journal of Geodesy. 2008. Vol. 82. P. 389—399.
5. Geng J., Meng X., Dodson A. H. and Teferle F. N. Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison // Journal of Geodesy. 2010. Vol. 84. P. 569—581.
6. Bertiger W., Desai D. Sh., Haines B., Harvey N., Moore W. A., Owen S., Weiss P. J. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data // Journal of Geodesy. 2010. Vol. 84, is. 5. P. 327—337.
7. Laurichesse D. and Mercier F. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results // 23rd Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland, OR, September 21—24, 2010, P. 2534—2544.
8. Tolman B., Harris R. B., Gaussiran T., Munton D., Little J., Mach R., Nelsen S., Renfro B., Schlossberg D. The GPS Toolkit – Open Source GPS Software // Proc. of the 17th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004). Long Beach, California, September 2004.
9. GIPSY-OASIS II. How it works / Ed. by Th. Gregorius. Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne. October, 1996 [Электронный ресурс]: <<http://www.gps.caltech.edu/classes/ge167/file/gipsy-oasisIIHowItWorks.pdf>>.
10. Пономарев В. А., Пономарев А. В., Пономарева Т. М., Бахолдин В. С. Разрешение неоднозначности в информационно-измерительных многошкальных приборах и системах. СПб: ВИКУ, 2001. 164 с.
11. Власов И. Б., Карутин С. Н. Беспереборный метод раскрытия неоднозначности измерений фазы в угломерной навигационной аппаратуре системы GPS // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2004. № 3. С. 62—75.
12. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития / Под ред. А. И. Перова. М.: Радиотехника, 2020. 1072 с.
13. Дубинко Ю. С., Бахолдин В. С. Разрешение неоднозначности фазовых измерений в трехчастотной навигационной аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем // Труды ИПА РАН. 2009. № 20. С. 418—422.
14. Бахолдин В. С. Беспереборный метод разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе ГЛОНАСС // Радиотехника. 2015. № 11. С. 105—111.
15. Гужов В. И., Кабак Е. С., Орлов И. С. Использование модулярной арифметики при фазовых измерениях // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1(11). С. 97—107.
16. Забелин А. В. Математическая модель метода совпадения дробных частей порядка интерференции // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 8—12.
17. Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Результаты моделирования и экспериментальной обработки фазовых измерений системы GPS с использованием беспереборных алгоритмов разрешения неоднозначности // Навигация и гидрография. 2023. № 71. С. 34—46.

Сведения об авторах

- Владимир Станиславович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации; E-mail: vka@mil.ru
- Дмитрий Александрович Леконцев** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации; E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 25.09.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. DeJoungue P.J., Tiberius C. *The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects*, Delft, Geodetic Computing Centre, 1996, 50 p.
2. Patent RU 2157547 C1, *Sposob razresheniya neodnoznachnosti fazovykh izmereniy* (A Method for Resolving the Ambiguity of Phase Measurements), V.A. Ponomarev, V.S. Bakholdin, Patent application no. 99120425/09, Priority 24.09.1999, Published 10.10.2000. (in Russ.)
3. Patent RU 2213979 C2, *Sposob razresheniya neodnoznachnosti fazovykh izmereniy v sisteme GPS* (A Method for Resolving the Ambiguity of Phase Measurements in the GPS System), V.A. Ponomarev, V.S. Bakholdin, Patent application no. 2000132342/09, Priority 22.12.2000, Published 10.10.2003. (in Russ.)
4. Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J. *Journal of Geodesy*, 2008, vol. 82, pp. 389–399.
5. Geng J., Meng X., Dodson A.H. and Teferle F.N. *Journal of Geodesy*, 2010, vol. 84, pp. 569–581.
6. Bertiger W., Desai D. Sh., Haines B., Harvey N., Moore W.A., Owen S., Weiss P.J. *Journal of Geodesy*, 2010, no. 5(84), pp. 327–337.
7. Laurichesse D. and Mercier F. *23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Portland, OR, September 21–24, 2010, pp. 2534–2544.
8. Tolman B., Harris R.B., Gaussiran T., Munton D., Little J., Mach R., Nelsen S., Renfro B., Schlossberg D. *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, Long Beach, California, September 2004.
9. Gregorius Th., ed., *GIPSY-OASIS II. How it works*, October, 1996, <http://www.gps.caltech.edu/classes/ge167/file/gipsy-oasisIIHowItWorks.pdf>.
10. Ponomarev V.A., Ponomarev A.V., Ponomareva T.M., Bakholdin V.S. *Razresheniye neodnoznachnosti v informatsionno-izmeritel'nykh mnogoshkal'nykh priborakh i sistemakh* (Ambiguity Resolution in Information-Measuring Multiscale Instruments and Systems), St. Petersburg, 2001, 164 p. (in Russ.)
11. Vlasov I.B., Karutin S.N. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2004, no. 3, pp. 62–75. (in Russ.)
12. Perov A.I., ed., *GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya* (GLONASS. Modernization and Development Prospects), Moscow, 2020, 1072 p. (in Russ.)
13. Dubinko J.S., Bakholdin V.S. *Transactions of IAA RAS*, 2009, no. 20, pp. 418–422. (in Russ.)
14. Bakholdin V.S. *Radioengineering*, 2015, no. 11, pp. 105–111. (in Russ.)
15. Guzhov V.I., Kabak E.S., Orlov I.S. *Automatics & Software Enginery*, 2015, no. 1(11), pp. 97–107. (in Russ.)
16. Zabelin A.V. *Measurement Techniques*, 2011, no. 7, pp. 750–757.
17. Bakholdin V.S., Lekontsev D.A. *Navigation and Hydrography*, 2023, no. 71, pp. 34–46. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|------------------------------|---|--|
| Vladimir S. Bakholdin | — | PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Space Radiolocation and Radio Navigation; E-mail: vka@mil.ru |
| Dmitry A. Lekontsev | — | PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Space Radiolocation and Radio Navigation; E-mail: vka@mil.ru |

Received 13.09.2023; approved after reviewing 25.09.2023; accepted for publication 17.12.2023.