

Повышение эффективности системы ГЛОНАСС с использованием технологии некротных фазометрических шкал

В. С. Бахолдин[✉], Д. А. Леконцев

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

[✉] vka@mil.ru

Аннотация

Введение. Проведен анализ возможности реализации высокоэффективных беспереборных алгоритмов разрешения неоднозначности фазовых измерений в отечественной и зарубежных глобальных навигационных спутниковых системах. Предложены номинальные значения несущих частот системы ГЛОНАСС с кодовым разделением сигналов, обеспечивающие повышение ее эффективности посредством реализации технологии некротных шкал. Рассмотрены алгоритмы разрешения неоднозначности фазовых измерений, использующие систему остаточных классов для вычисления целого значения числа фазовых циклов несущих частот в полученном диапазоне неоднозначности. Приведены результаты моделирования и показана устойчивость предложенных алгоритмов к систематическим и случайным погрешностям фазовых измерений.

Цель работы. Повышение эффективности глобальных навигационных спутниковых систем при определении местоположения в навигационной аппаратуре потребителей, использующей фазовые измерения.

Материалы и методы. Для обработки фазовых измерений из файлов RINEX использовалась среда моделирования MATLAB. Указанная среда успешно применяется для решения широкого спектра научных задач разной сложности в промышленности и научно-исследовательских организациях. Для решения поставленной задачи в описываемой работе используется математический аппарат теории чисел и системы остаточных классов.

Результаты. Для системы ГЛОНАСС с кодовым разделением сигналов предложены новые номинальные значения несущих частот, разработан и промоделирован высокоэффективный беспереборный алгоритм разрешения неоднозначности фазовых измерений. Показана устойчивость некротных шкал к систематическим ошибкам, вызывающим сдвиг шкал друг относительно друга, и подтверждена работоспособность и надежность алгоритмов разрешения неоднозначности при наличии случайных погрешностей, не превышающих значения заданной предельной погрешности фазовых измерений.

Заключение. Проведенный анализ показал возможность формирования некротных фазометрических шкал в навигационной аппаратуре потребителя, использующей сигналы с кодовым разделением систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, несущие частоты, фазовые измерения, разрешение неоднозначности, технология некротных шкал, система остаточных классов, китайская теорема об остатках

Для цитирования: Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Повышение эффективности системы ГЛОНАСС с использованием технологии некротных фазометрических шкал // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 6. С. 99–107.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-99-107

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; принята к публикации после рецензирования 26.09.2025; опубликована онлайн 29.12.2025



Improving GLONASS System Efficiency Using Non-Multiple Phase Scale Technology

Vladimir S. Bakholdin, Dmitry A. Lekontsev

Mozhaisky Military Space Academy, St Petersburg, Russia

✉ vka@mil.ru

Abstract

Introduction. This article analyzes the possibility of implementing highly efficient fault-tolerant algorithms for resolving the ambiguity of phase measurements in Russian and foreign global navigation satellite systems. Nominal values of the GLONASS carrier frequencies with code division of signals are proposed, which ensure an increase in its efficiency by implementing the technology of non-multiple scales. Algorithms for resolving the ambiguity of phase measurements are considered. These algorithms are based on a system of residual classes to calculate the integer value of the number of phase cycles of carrier frequencies in the obtained unambiguity range. The simulation results are presented, and the stability of the proposed algorithms to systematic and random errors of phase measurements is shown.

Aim. To improve the efficiency of global navigation satellite systems in determining the position of consumer navigation equipment using phase measurements.

Materials and methods. The MATLAB modeling environment was used to process phase measurements from RINEX files. This environment has proven efficient in resolving a wide range of scientific problems of varying complexity in industrial and research settings. To achieve the research aim, the mathematical apparatus of number theory and the system of residual classes were employed.

Results. For the GLONASS system with code division of signals, new nominal values of carrier frequencies are proposed; a highly efficient fault-tolerant algorithm for resolving the ambiguity of phase measurements is developed and simulated. The stability of non-multiple scales to systematic errors causing a shift of scales relative to each other is shown, and the operability and reliability of ambiguity resolution algorithms in the presence of random errors not exceeding the value of the specified limiting error of phase measurements is confirmed.

Conclusion. The conducted analysis has shown the possibility of forming non-multiple phase metric scales in consumer navigation equipment using signals with code division of GLONASS, GPS, Galileo, and BeiDou systems.

Keywords: global navigation satellite systems, carrier frequencies, phase measurements, ambiguity resolution, non-multiple scale technology, residual class system, Chinese remainder theorem

For citation: Bakholdin V. S., Lekontsev D. A. Improving GLONASS System Efficiency Using Non-Multiple Phase Scale Technology. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 6, pp. 99–107. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-99-107

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 24.04.2025; accepted 26.09.2025; published online 29.12.2025

Введение. Анализ перспективных сигналов системы ГЛОНАСС с кодовым разделением показал, что реализация беспереборных методов разрешения неоднозначности (РН) фазовых измерений (ФИ), таких, как метод синтезированной длины волны и метод некрatных шкал, затруднена [1, 2]. При этом известные методы, основанные на использовании избыточного числа измерений, не обеспечивают требуемую оперативность решения задачи определения ориентации высокодинамичных объектов. Сложивша-

яся ситуация обусловлена тем, что при выборе номинальных значений несущих частот (НЧ) $f_1 = 1600.995$ МГц, $f_2 = 1248.06$ МГц и $f_3 = 1202.025$ МГц для новых навигационных сигналов ГЛОНАСС не было уделено должного внимания параллельной разработке высокоэффективных беспереборных методов РН ФИ [3, 4]. В результате отношения выбранных НЧ друг к другу представляются в виде дробей с очень большой высотой (сумма числителя и знаменателя) [5, 6]:

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

Условия согласования некрatных шкал для указанных пар частот НЧ принимают следующий вид: $|\delta\varphi_{12}| \leq 0.0012$; $|\delta\varphi_{13}| < 0.0012$; $|\delta\varphi_{23}| \leq 0.00142$ [7, 8]. Такие предельные значения погрешности (максимально допустимые) измерений дробной части фазовых циклов (ФЦ) в навигационной аппаратуре потребителя в настоящее время не достижимы, а следовательно, реализация высокоэффективных беспереборных алгоритмов РН с помощью технологии некрatных шкал невозможна. Следует отметить, что использование переборных алгоритмов также существенно затруднено, поскольку приведенные высоты дробей свидетельствуют об очень большом количестве возможных комбинаций неоднозначностей [9, 10].

В системе GPS НЧ имеют следующие номинальные значения: $f_1 = 1575.42$ МГц; $f_2 = 1227.6$ МГц; $f_3 = 1176.45$ МГц [11]. Эти частоты позволяют сформировать 3 пары некрatных фазометрических шкал:

$$\alpha_1 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{60}{77}; \quad \alpha_2 = \frac{f_2}{f_3} = \frac{24}{23}; \quad \alpha_3 = \frac{f_1}{f_3} = \frac{154}{115}$$

при существенно менее жестких условиях согласования: $|\delta\varphi_{12}| \leq 0.005$; $|\delta\varphi_{23}| \leq 0.015$; $|\delta\varphi_{13}| \leq 0.0026$.

В интерфейсном контрольном документе (ИКД) европейской системы Galileo указаны 5 значений НЧ, образуемых аналогично системе GPS умножением тактовых частот дальномерных кодов на целочисленные коэффициенты: $f_{E1} = 1575.42$ МГц; $f_{E5a} = 1176.45$ МГц; $f_{E5} = 1191.795$ МГц; $f_{E5b} = 1207.14$ МГц; $f_{E6} = 1278.75$ МГц [12]. Используя указанные частоты, представляется возможным реализовать технологию некрatных шкал для следующих пар НЧ:

$$\alpha_1 = \frac{f_{E5a}}{f_{E6}} = \frac{23}{25}; \quad \alpha_2 = \frac{f_{E5b}}{f_{E1}} = \frac{59}{77};$$

$$\alpha_3 = \frac{f_{E1}}{f_{E5a}} = \frac{154}{115}; \quad \alpha_4 = \frac{f_{E6}}{f_{E5}} = \frac{250}{233},$$

а с учетом условий согласования шкал $|\delta\varphi_{E5aE6}| \leq 0.014$; $|\delta\varphi_{E1E5b}| \leq 0.005$; $|\delta\varphi_{E1E5a}| \leq 0.0026$ и $|\delta\varphi_{E5E6}| \leq 0.0014$ реализовать надежное (безошибочное) РН ФИ на первых двух парах НЧ.

После изменения в 2015 г. частотного плана китайской навигационной системы BeiDou космические аппараты, образующие орбитальный сегмент, излучают навигационные сигналы на НЧ: $f_{B1} = 1575.42$ МГц; $f_{B2} = 1191.795$ МГц; $f_{B3} = 1268.52$ МГц [12], что позволяет образовать 3 пары некрatных фазометрических шкал:

$$\alpha_1 = \frac{f_{B3}}{f_{B1}} = \frac{62}{77}; \quad \alpha_2 = \frac{f_{B2}}{f_{B3}} = \frac{233}{248};$$

$$\alpha_3 = \frac{f_{B2}}{f_{B1}} = \frac{233}{308}.$$

Из них условие согласования шкал $|\delta\varphi_{B1B3}| \leq 0.005$; $|\delta\varphi_{B2B3}| \leq 0.0014$; $|\delta\varphi_{B1B2}| \leq 0.0014$, исходя из достижимой погрешности измерения дробной части ФЦ, выполняется только для первой пары.

Таким образом, с учетом существующих возможностей по формированию некрatных шкал для РН ФИ в зарубежных глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), а также требований по точности и оперативности получения навигационной информации о координатах и ориентации объекта необходимо использовать беспереборные методы РН, основанные на технологии некрatных шкал, и скорректировать номинальные значения НЧ в системе ГЛОНАСС с кодовым разделением сигналов [13].

Высокоэффективный алгоритм РН. В соответствии с утвержденной концепцией развития навигационных сигналов системы ГЛОНАСС с кодовым разделением НЧ должны быть кратны базовой частоте $f_b = 1.023$ МГц, однако фактически в ИКД при формировании data- и pilot-сигналов используется более низкая частота $f_b/2 = 511.5$ кГц [14, 15]. Исходя из этого были вычислены возможные значения НЧ, кратные ей и находящиеся в частотных диапазонах, ранее закрепленных международной комиссией по электросвязи за отечественной ГНСС, а также найдены подходящие дробные

Табл. 1. Отношение несущих частот f_1/f_2
 Tab. 1. Carrier frequency ratio f_1/f_2

f_2/f_1	1599460.5	1600995.0	<i>1602018.0</i>	<i>1604064.0</i>
<i>1243968.0</i>	3127/2432	1565/1216	783/608	<i>49/38</i>
<i>1246014.0</i>	3127/2436	1565/1218	<i>9/7</i>	112/87
1247037.0	59/46	1565/1219	1566/1219	1568/1219
1248060.0	3127/2440	313/244	783/610	392/305

Табл. 2. Отношение несущих частот f_2/f_3
 Tab. 2. Carrier frequency ratio f_2/f_3

f_3/f_2	<i>1243968.0</i>	<i>1246014.0</i>	1247037.0	1248060.0
1199979.0	1216/1173	406/391	53/51	1220/1173
1202025.0	1216/1175	1218/1175	1219/1175	244/235
<i>1203048.0</i>	152/147	<i>29/28</i>	1219/1176	305/294
<i>1205094.0</i>	<i>32/31</i>	609/589	1219/1178	610/589

би, описывающие их отношение. Результаты расчета и выбора номинальных значений НЧ в килогерцах и полученные значения обыкновенных дробей с относительно небольшой высотой приведены в табл. 1 и 2.

Красным цветом (жирным шрифтом) в таблицах отмечены номиналы частот и дроби, соответствующие сигналам с кодовым разделением, описанным в действующих ИКД. Синим цветом (курсивом) выделены частоты, для которых высота дроби не превышает 105 и удовлетворяет условиям согласования измерительных шкал по теореме о дробных частях. Эти значения НЧ могут быть использованы для реализации технологии некрatных шкал при соответствующих ограничениях на погрешности измерений дробной части ФЦ [15].

Зеленым цветом (жирным курсивом) показаны частоты, которые предлагается использовать в системе ГЛОНАСС с кодовым разделением сигналов при ее следующей модернизации. Предлагаемый вариант обеспечивает максимальный диапазон однозначности ФИ с учетом имеющихся ограничений на реализацию алгоритмов РН ФИ в системе ГЛОНАСС [13]. Рассмотренные НЧ вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} f_1 &= 3127 f_b / 2 = 1599.4605 \text{ МГц}; \\ f_2 &= 2437 f_b / 2 = 1247.037 \text{ МГц}; \\ f_3 &= 2346 f_b / 2 = 1199.979 \text{ МГц}. \end{aligned}$$

Указанные частоты не позволят использовать для РН ФИ метод синтезированной длины волны, однако при реализации метода некрatных шкал они обеспечивают диапазон однозначности ФИ более 586 м. Пары приведенных НЧ образуют следующие дроби:

$$\alpha_1 = \frac{f_1}{f_2} = \frac{59}{46}; \quad \alpha_2 = \frac{f_3}{f_2} = \frac{51}{53}; \quad \alpha_3 = \frac{f_1}{f_3} = \frac{3127}{2346}.$$

Выберем в качестве основной частоту f_2 , относительно которой некрatные шкалы представляются в виде следующих обыкновенных дробей:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{P_1}{\Theta_1} = \frac{46}{59}; \quad \frac{\lambda_3}{\lambda_2} = \frac{f_2}{f_3} = \frac{P_2}{\Theta_2} = \frac{53}{51},$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – длины волн и длины измерительных шкал, соответствующие НЧ; $P_1, P_2, \Theta_1, \Theta_2$ – числители и знаменатели указанных дробей. Рассчитаем диапазон однозначности ФИ в ФЦ, а также в метрической мере относительно выбранной основной частоты f_2 :

$$D = \text{НОК}(P_1, P_2) = \text{НОК}(46, 53) = 46 \cdot 53 = 2438;$$

$$\Lambda_{\text{НЧ}} = 2438 \lambda_2 \approx 586.1 \text{ м}.$$

Так как максимальная высота дроби соответствует паре частот f_1 и f_2 , то для нее необходимо оценить требования к точности ФИ:

$$\begin{aligned} \delta n &= \text{int} \left[\sqrt{(P_1^2 + \Theta_1^2)} \delta_{\Phi}^2 + 0.5 \right] = \\ &= \text{int} \left(\sqrt{(59^2 + 46^2)} 0.00668^2 + 0.5 \right) = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, предельная погрешность $\delta_{\Phi} = 3\sigma_{\Phi}$ должна быть меньше 0.00668, а среднеквадратическое отклонение измерений дробной части ФЦ δ_{Φ} соответственно 0.00222. С учетом нормального закона распределения измеренных значений фазы при указанной погрешности обеспечивается выполнение условия согласования шкал с вероятностью не менее $P_{12} = 0.997$. Так как требования к предельной погрешности ФИ для второй пары частот f_3 и f_2 практически идентичны, то можно полагать, что вероятность безошибочного вычисления целого числа ФЦ для нее будет равна

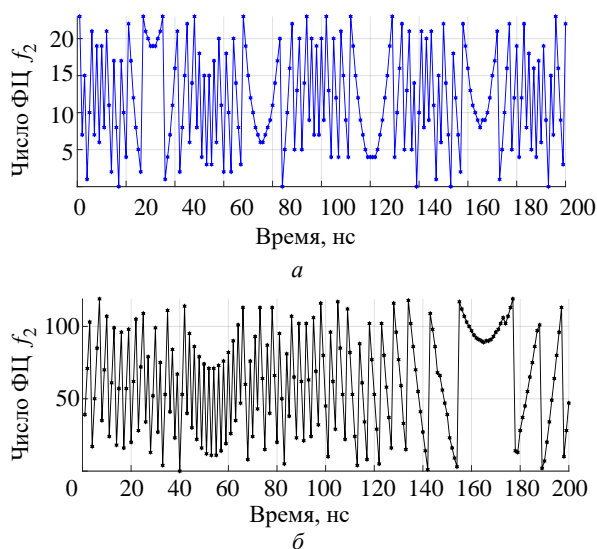


Рис. 1. Результаты РН на несущих частотах системы GPS: а – для двух f_2 и f_3 ; б – для трех f_1, f_2 и f_3

Fig. 1. Results of the RN on the carrier frequencies of the GPS system: а – for two f_2 and f_3 ; б – for three f_1, f_2 and f_3

$P_{23} = 0.997$. Тогда вероятность правильного вычисления целого числа ФЦ (РН) на трех НЧ можно оценить как произведение вероятностей $P_{123} = P_{12}P_{23} = 0.994$. Требования по точности измерения дробной части ФЦ для рассмотренного варианта не превышают требований, предъявляемых в настоящее время к измерениям в системе GPS, в которой максимальная высота дроби НЧ составляет 137. Результаты экспериментальной обработки ФИ, получаемых в системе GPS (рис. 1), показали возможности достижения указанных погрешностей измерений и реализации технологии некратных шкал [17].

Далее рассмотрим подробно расчет констант в системе остаточных классов (СОК) и реализацию алгоритма РН ФИ для трех предложенных НЧ [16, 19]. Так как числители дробей, описывающих отношение НЧ, взаимно простые числа, то $p_1 = P_1$, $p_2 = P_2$ и дополнительные поддиапазоны по теореме о дробных частях вычисляются следующим образом:

$$d_1 = D/P_1 = 2438/46 = 53;$$

$$d_2 = D/P_2 = 2438/53 = 46.$$

Вычислим наименьшие неотрицательные вычеты в СОК:

$$\varphi_1 \equiv d_1 \pmod{p_1} \equiv 53 \pmod{46} \equiv 7;$$

$$\varphi_2 \equiv d_2 \pmod{p_2} \equiv 46 \pmod{53} \equiv 46.$$

Далее найдем обратные им величины без использования таблиц индексов и антииндексов [6, 16]:

$$\varphi_1^{-1} \equiv \frac{1}{\varphi_1} \pmod{p_1} \equiv \frac{1}{7} \pmod{46} \equiv \frac{1+46 \cdot 5}{7} \pmod{46} \equiv 33;$$

$$\varphi_2^{-1} \equiv \frac{1}{\varphi_2} \pmod{p_2} \equiv \frac{1}{46} \pmod{53} \equiv \frac{1+53 \cdot 13}{46} \pmod{53} \equiv 15.$$

Вычислим элементы базиса в китайской теореме об остатках (КТО):

$$B_1 = d_1 \varphi_1^{-1} = 53 \cdot 33 = 1749;$$

$$B_2 = d_2 \varphi_2^{-1} = 46 \cdot 15 = 690.$$

Проведем контроль вычислений элементов базиса в КТО:

$$B_1 \equiv 1749 \pmod{46} \equiv 1; \quad B_2 \equiv 690 \pmod{53} \equiv 1.$$

Итоговый контроль вычислений элементов базиса выполняется в КТО:

$$B_1 + B_2 \pmod{D} \equiv 1749 + 690 \pmod{2438} \equiv 1 \pmod{2438}.$$

Вычислим элементы базиса по теореме о дробных частях:

$$\begin{aligned} G_1 &\equiv \Theta_1^{-1} \pmod{p_1} \equiv \frac{1}{59} \pmod{46} \equiv \\ &\equiv \frac{1+46 \cdot 50}{59} \pmod{46} \equiv 39; \end{aligned}$$

$$b_1 \equiv G_1 B_1 \pmod{D} \equiv 39 \cdot 1749 \pmod{2438} \equiv 2385;$$

$$\begin{aligned} G_2 &\equiv \Theta_2^{-1} \pmod{p_2} \equiv \frac{1}{51} \pmod{53} \equiv \\ &\equiv \frac{1+53 \cdot 25}{51} \pmod{53} \equiv 26; \end{aligned}$$

$$b_2 \equiv G_2 B_2 \pmod{D} \equiv 26 \cdot 690 \pmod{2438} \equiv 874.$$

Осуществим контроль вычислений элементов базиса:

$$b_1 \equiv G_1 \pmod{p_1} \equiv 39 \pmod{46} \equiv 2385;$$

$$b_2 \equiv G_2 \pmod{p_2} \equiv 26 \pmod{53} \equiv 874.$$

В результате выражение для вычисления полного числа ФЦ частоты f_2 в СОК примет вид

$$\begin{aligned} N_0 &\equiv n_1 b_1 + n_2 b_2 \pmod{D} \equiv \\ &\equiv n_1 \cdot 2385 + n_2 \cdot 874 \pmod{2438}, \end{aligned}$$

где компоненты n_1 и n_2 вычисляются по теореме о дробных частях по следующим формулам:

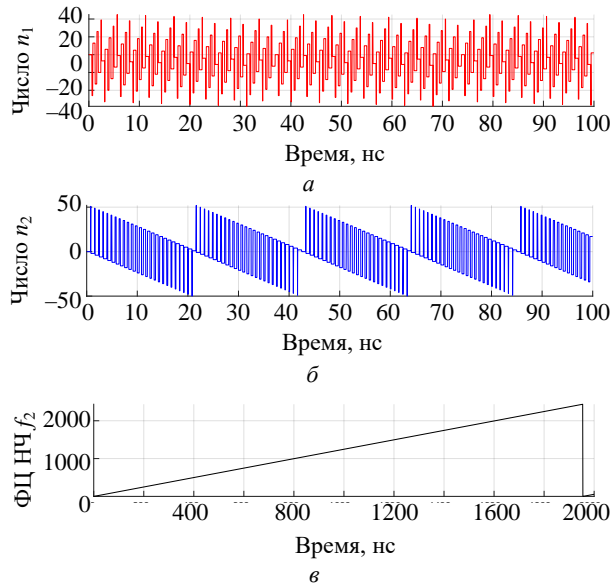


Рис. 2. Результаты РН на несущих частотах:
 а – для двух f_1, f_2 ; б – для двух f_2, f_3 ; в – для трех f_1, f_2, f_3
 Fig. 2. Results of RN on carrier frequencies: а – for two f_1, f_2 ;
 б – for two f_2, f_3 ; в – for three f_1, f_2, f_3

$$n_1 = \text{int}(\varphi_1 \cdot 46 - \varphi_2 \cdot 59 + 0.5);$$

$$n_2 = \text{int}(\varphi_3 \cdot 53 - \varphi_2 \cdot 51 + 0.5).$$

Здесь φ_1 , φ_2 и φ_3 – дробные части ФЦ, измеренные на выбранных частотах.

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма и его устойчивости к систематическим и случайным погрешностям измерений было проведено математическое моделирование с использованием интерактивной системы для выполнения инженерных и научных расчетов MATLAB [20]. На рис. 2 приведены результаты вычисления компонент n_1 и n_2 на парах частот НЧ f_1, f_2 и f_2, f_3 , соответствующие максимальной задержке сигнала 100 нс, а также трех НЧ на интервале времени 2000 нс.

Оценка устойчивости алгоритма РН к случайным погрешностям измерений иллюстрируется рис. 3. Здесь представлены результаты моделирования работы алгоритма в полученном диапазоне однозначности при наличии погрешностей ФИ в ФЦ, распределенных по нормальному закону с $\sigma_\varphi = 0.00222$. Для каждого дискретного значения времени t с шагом 1 пс было сделано по 100 тыс. выборков зашумленных значений фаз φ_1 , φ_2 и φ_3 и проведено РН. При этом подсчитывалось число правильных и неправильных результатов РН. Таким

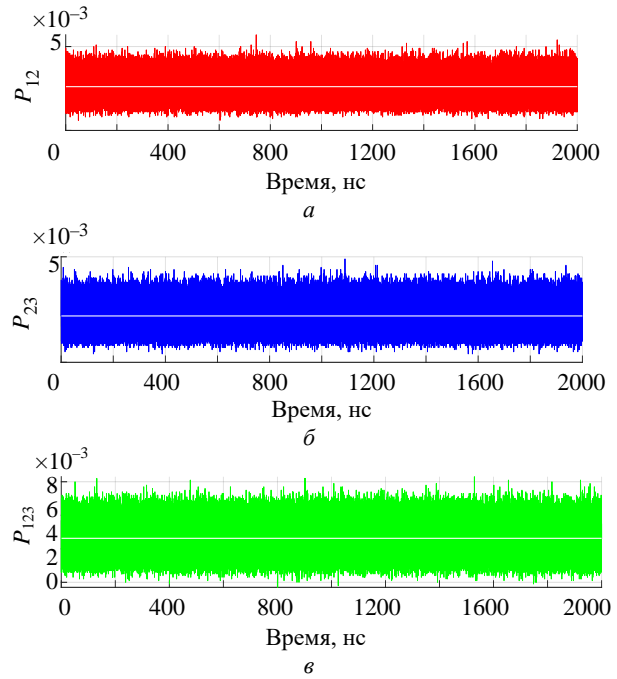


Рис. 3. Вероятности ошибок РН для несущих частот:
 а – для двух f_1, f_2 ; б – для двух f_2, f_3 ; в – для трех f_1, f_2, f_3
 Fig. 3. Probabilities of RN errors for carrier frequencies:
 а – for two f_1, f_2 ; б – for two f_2, f_3 ; в – for three f_1, f_2, f_3

образом, была определена оценка вероятности правильного РН для каждого значения текущей фазы, а затем вычислены средние значения полученных вероятностей P_{12}, P_{23}, P_{123} на интервале 2000 нс, показанные на рис. 3 белой линией. Они соответствуют приведенным ранее теоретическим расчетам вероятностей правильного вычисления целого числа ФЦ.

Устойчивость алгоритма РН к систематическим погрешностям ФИ подтвердили результаты моделирования (рис. 4). При моделировании в ФИ были введены систематические ошибки $\Delta\varphi_1 = 0.11$; $\Delta\varphi_2 = 0.15$; $\Delta\varphi_3 = 0.13$ для каждой НЧ. Результаты моделирования показали, что наличие систематических погрешностей не нарушает работоспособность алгоритма РН, а лишь сдвигает начало отсчета числа ФЦ (нулевого значения). Этот сдвиг можно вычислить аналитически и учесть при последующей обработке результатов. Оценим сдвиг начала отсчета числа ФЦ для указанных значений систематических погрешностей. Вначале вычислим компоненты n_1 и n_2 :

$$n_1 = \text{int}(0.11 \cdot 46 - 0.15 \cdot 59 + 0.5) = -4;$$

$$n_2 = \text{int}(\varphi_3 \cdot 53 - \varphi_2 \cdot 51 + 0.5) = -1.$$

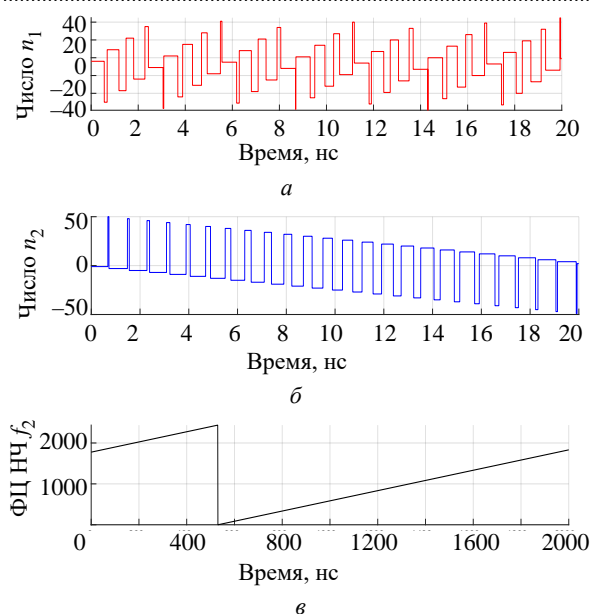


Рис. 4. Результаты РН на НЧ при наличии систематических погрешностей ФИ: а – на двух f_1, f_2 ;

б – на двух f_2, f_3 ; в – на трех f_1, f_2, f_3

Fig. 4. Results of RN on LF in the presence of systematic errors of FI: a – on two f_1, f_2 ;

б – on two f_2, f_3 ; в – on three f_1, f_2, f_3

Далее найдем полное число ФЦ частоты f_2 :

$$N_0 \equiv -4 \cdot 2385 - 1 \cdot 874 \pmod{2438} \equiv -10414 \pmod{2438} \equiv 1776.$$

Полученное число соответствует первому значению числа ФЦ частоты f_2 , приведенному на рис. 3.

Заключение. Анализ показал возможность формирования некрatных фазометрических шкал в навигационной аппаратуре потребителя, использующей сигналы с кодовым разделением систем GPS, Galileo и BeiDou.

Для системы ГЛОНАСС с кодовым разделением сигналов предложены новые номинальные значения НЧ, разработан и промоделирован высокоэффективный беспереборный алгоритм РН ФИ.

Показана устойчивость некрatных шкал к систематическим ошибкам, вызывающим сдвиг шкал друг относительно друга, и подтверждены работоспособность и надежность алгоритмов РН при наличии случайных погрешностей, не превышающих значения заданной предельной погрешности ФИ.

Список литературы

1. Забелин А. В. Математическая модель метода совпадения дробных частей порядка интерференции // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 8–12.
2. Кукушкин С. С. Конструктивная теория конечных полей – основа алгоритмического решения проблем радиотехнических измерений // Двойные технологии. 2007. № 3 (40). С. 67–73.
3. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития / под ред. А. И. Перова. М.: Радиотехника, 2020. 1072 с.
4. Глобальная навигационная спутниковая система. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1.0. М.: АО РКС, 2016. 133 с.
5. Шиханович Ю. А. Введение в современную математику. М.: Наука, 1965. 375 с.
6. Михелович Ш. М. Теория чисел. М.: Высш. шк., 1967. 336 с.
7. Бахолдин В. С. Беспереборный метод разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе ГЛОНАСС // Радиотехника. 2015. № 11. С. 105–111.
8. Пат. RU 2157547 С1 МПК G01S 3/00, 5/00 (24.09.1999). Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений / В. А. Пономарев, В. С. Бахолдин. Оpubл. 10.10.2000.
9. Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС / СФУ. Красноярск, 2012. 259 с.
10. Пат. RU 2591953 С2 МПК G01S 19/04 (22.12.2011). Навигационная система и способ разрешения целочисленных неоднозначностей с использованием ограничения неоднозначности двойной разности / Л. Л. Дай, Р. Р. Хэтч, Ю. Чжан, М. Ван. Оpubл. 20.07.2016.
11. Пат. RU 2213979 С2 МПК G01S 3/00, 11/00 (22.12.2000). Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе GPS / В. А. Пономарев, В. С. Бахолдин. Оpubл. 10.10.2003.
12. Карутин С. Н., Власов И. Б., Дворкин В. В. Дифференциальная коррекция и мониторинг глобальных навигационных спутниковых систем. М.: Изд-во Моск. ун-та "ГАЛЕРИЯ", 2014. 464 с.
13. Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Концептуальная модель радиотехнической системы траекторных измерений на основе технологии формирования некрatных измерительных шкал // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 11. С. 14–21. doi:10.21778/2218-5453-2020-11-14-21
14. Глобальная навигационная спутниковая система. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L1. Редакция 1.0. М.: АО РКС, 2016. 64 с.
15. Глобальная навигационная спутниковая система. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L2. Редакция 1.0. М.: АО РКС, 2016. 15 с.

16. Разрешение неоднозначности в информационно-измерительных многошкальных приборах и системах / В. А. Пономарев, А. В. Пономарев, Т. М. Пономарева, В. С. Бахолдин; ВИКУ. СПб., 2001. 164 с.

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.

18. Власов И. Б., Карутин С. Н. Беспереборный метод раскрытия неоднозначности измерений фазы в угломерной навигационной аппаратуре системы

GPS // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2004. № 3. С. 62–75.

19. Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Результаты экспериментальной обработки фазовых измерений системы ГЛОНАСС с использованием беспереборного 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

20. Дьяконов В. П. Matlab: обработка сигналов и изображений. Спец. справочник. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

Информация об авторах

Бахолдин Владимир Станиславович – доктор технических наук (2023), доцент (2006), доцент кафедры Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов в радиолокационных и радионавигационных системах.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: vka@mil.ru

Леконцев Дмитрий Александрович – кандидат технических наук (2017), доцент кафедры Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – пространственно-временная обработка сигналов; радиолокация; радионавигация, синтез радиолокационных изображений; цифровая обработка радиолокационных сигналов; радиовидение.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: vka@mil.ru

References

1. Zabelin A. V. Mathematical Model of the Exact Fraction Method for the Order of Interference. Measurement Techniques. 2011, vol. 54, no. 7. pp. 750–757. doi: 10.1007/s11018-011-9799-4

2. Kukushkin S. S. Constructive Theory of Finite Fields – The Basis of an Algorithmic Solution to Problems of Radio Engineering Measurements. Dual technologies. 2007, no. 3 (40), pp. 67–73. (In Russ.)

3. GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya [GLONASS. Modernization and Development Prospects]. Ed. by A. I. Perov. Moscow, Radio Engineering, 2020, 1072 p. (In Russ.)

4. Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument. Obshchee opisanie sistemy s kodovym razdeleniem signalov [Global Navigation Satellite System. Interface Control Document. General Description of the Code Division Multiple Access System]. Ed. 1.0. Moscow, JSC RKS, 2016, 133 p. (In Russ.)

5. Shikhanovich Yu. A. Vvedenie v sovremennuyu matematiku [Introduction to Modern Mathematics]. Moscow, Nauka, 1965, 375 p. (In Russ.)

6. Mikhelovich Sh. M. Teoriya chisel [Number Theory]. Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 336 p. (In Russ.)

7. Bakholdin V. S. Non Reboric Method of Resolution of Ambiguity of Phase Measurements in System GLONASS. Radio Engineering. 2015, no. 11, pp. 105–111. (In Russ.)

8. Pat. RF no. 2157547. Ponomarev V. A., Bakholdin V. S. A Method for Resolving the Ambiguity of Phase Measurements. Publ. 10.10.2000. (In Russ.)

9. Tyapkin V. N. Metody opredeleniya navigatsionnykh parametrov podvizhnykh sredstv s ispol'zovaniem sputnikovoi radionavigatsionnoi sistemy GLONASS [Methods for Determining Navigation Parameters of Mobile Facilities Using the GLONASS Satellite Radio Navigation System]. Krasnoyarsk, Sib. Federal University, 2012, 260 p. (In Russ.)

10. Pat. RF, no. 2591953. Dai L. L., Hatch R. R., Zhang Yu., Wang M. Navigation System and Method for Resolving Integer Ambiguities Using the Double-Difference Ambiguity Constraint. Publ. 20.07.2016. (In Russ.)

11. Pat. RF, no. 2213979. Ponomarev V. A., Bakholdin V. S. Method for Resolving Ambiguity of Phase Measurements in the GPS System. Publ. 10.10.2003. (In Russ.)

12. Karutin S. N. Differentsial'naya korrektsiya i monitoring global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem [Differential Correction and Monitoring of Global Navigation Satellite Systems]. Moscow, Moscow University Publishing House GALLERY, 2014, 464 p. (In Russ.)

13. Bakholdin V. S., Lekontsev D. A. Conceptual Model of Radio Engineering System of Trajectory Measurements Based on Technology of Formation of Continuous Measuring Scales. Questions Of Radio Electronics. 2020, no. 11, pp. 14–21.

doi:10.21778/2218-5453-2020-11-14-21

14. Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument. Navigatsionnyi radiosignal otkrytogo dostupa s kodovym razdeleniem v diapazone L1 [Global Navigation Satellite System. Interface Control Document. Open-Access Code Division Multiple

Access Navigation Radio Signal in the L1 Band]. Ed. 1.0. Moscow, JSC RKS, 2016, 64 p. (In Russ.)

15. *Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument. Navigatsionnyi radiosignal otkrytogo dostupa s kodovym razdeleniem v diapazone L2* [Global Navigation Satellite System. Interface Control Document. Open-Access Code Division Multiple Access Navigation Radio Signal in the L2 Band]. Ed. 1.0. Moscow, JSC RKS, 2016, 15 p. (In Russ.)

16. Ponomarev V. A., Ponomarev A. V., Ponomareva T. M., Bakholdin V. S. *Razreshenie neodnoznachnosti v informatsionno-izmeritel'nykh mnogoshkal'nykh priborakh i sistemakh* [Ambiguity Resolution in Multiscale Information-Measuring Instruments and Systems]. SPb., VIKU, 2001, 164 p. (In Russ.)

17. Bakholdin V. S., Lekontsev D. A. Results of Modeling and Experimental Processing of Phase Measurements of the GPS System Using Exhaustive Search

Algorithms for Ambiguity Resolution. Navigation and Hydrography. 2023, no. 71, pp. 34–46. (In Russ.)

18. Vlasov I. B., Karutin S. N. Method of Removal of Phase Measurement Ambiguity in Angle-Metering Navigational Apparatus of Global Positioning System. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2004, no. 3, pp. 62–75. (In Russ.)

19. Bakholdin V. S., Lekontsev D. A. Results of experimental processing of phase measurements of the GLONASS system using an exhaustive integer ambiguity resolution algorithm for high-precision absolute positioning. Journal of Instrument Engineering. 2024, vol. 67, no. 2, pp. 162–170.
doi: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-162-170

20. Dyakonov V. P. *MATLAB: obrabotka signalov i izobrazhenii* [MATLAB. Signal and image processing]. St Petersburg, Piter, 2002, 608 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir S. Bakholdin, Dr Sci. (Eng.) (2023), Associate Professor (2006), Associate Professor of the Department of A. F. Mozhaysky Military Space Academy. The author of more than 70 scientific papers. Area of expertise: digital signal processing in radar and radio navigation systems.

Address: Mozhaysky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya St., Saint Petersburg 197198, Russia

E-mail: vka@mil.ru

Dmitry A. Lekontsev, Cand. Sci. (Eng.) (2017), Associate Professor of the Department of A.F. Mozhaysky Military Space Academy. The author of more than 50 scientific papers. Area of expertise: spatio-temporal signal processing; radar; radio navigation; radar image synthesis; Earth remote sensing; radio vision.

Address: Mozhaysky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya St., Saint Petersburg 197198, Russia

E-mail: vka@mil.ru
