

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.4>

УДК: 621.396.621; 621.396.969.3

МЕТОД ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ПРИЕМНИКА И ИМИТАТОРА СИГНАЛОВ ГНСС

А.Н. Верещагин¹, А.Ю. Тараненко²

¹ Сибирский федеральный университет, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28

² Научно-производственная организация «ЮСТ»,
660001, Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 22а

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2026 г.

Аннотация. В статье рассматривается метод температурной коррекции радионавигационных параметров приемников и имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В большинстве случаев температурная коррекция радионавигационных параметров осуществляется внесением поправок в измеряемую, для приемника, или воспроизводимую, для имитатора, кодовую и фазовую псевдодальность. В свою очередь, температурные зависимости поправок, как правило, вычисляются в процессе калибровки в термокамере. Недостатком метода является невозможность оценить температурные зависимости отдельных элементов, т.к. прибор полностью помещается в термокамеру, а измерения производятся после окончания переходного процесса по температуре. На практике, распределение температур на элементах в приборе в процессе эксплуатации и в процессе калибровки в термокамере может отличаться, что приводит к ошибке температурной коррекции. Ошибка может быть уменьшена, посредством измерения температурных зависимостей задержек отдельных элементов, вносящих основной вклад в результирующую ошибку формирования или измерения радионавигационных параметров. В описываемом методе, измерение температурных зависимостей отдельных элементов предлагается производить за счет применения модулей локального нагрева, расположенных вблизи

термочувствительных элементов. Нагрев элементов в различных комбинациях с одновременной фиксацией температур и радионавигационных параметров, позволяет собрать данные для построения системы алгебраических уравнений температурных зависимостей. Решение этой системы позволяет получить независимые корректирующие коэффициенты. В работе приведены результаты термокомпенсации для одного приемника и одного имитатора сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Предложенный метод обеспечивает более высокую точность измерения (для приемника) и формирования (для имитатора) радионавигационных параметров, а также повышает скорость адаптации к температурным изменениям, в том числе, в условиях переходных процессов по температуре на внутренних компонентах прибора.

Ключевые слова: ГНСС, имитатор, навигационный приемник, повышение точности, термокомпенсация.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2026-0010).

Автор для переписки: Верещагин Антон Николаевич, AVereshagin@sfu-kras.ru

Введение

Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС служит эффективным инструментом для решения задач в области навигации, геодезии и управления движением.

Глобальные навигационные спутниковые системы, такие как GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (ЕС) и BeiDou (Китай), представляют собой критически важную технологическую инфраструктуру современного мира. Их основное предназначение заключается в определении точных координат, скорости и времени для любого объекта, оснащенного приемником навигационных сигналов [1].

Принцип действия всех ГНСС основан на беззапросном методе измерения дальности до нескольких (не менее четырех) навигационных космических

аппаратов (НКА) с известными координатами, которые абонент получают из цифровой информации радиосигнала с НКА. Измеряя временные задержки прохождения радиосигналов, приемник вычисляет свое местоположение в пространстве. Точность определения координат напрямую зависит от стабильности бортовых и наземных опорных генераторов (стандартов частоты и времени), учета поправок из-за распространения сигнала (релятивистского эффекта, преломления сигнала в стратосфере и ионосфере, эффекта многолучевости и др.) и погрешностей навигационной аппаратуры потребителя.

Структурно, ГНСС включают три основных сегмента [2]:

- орбитальную группировку навигационных космических аппаратов или космический сегмент;
- наземный комплекс управления (НКУ) этими аппаратами или сегмент управления;
- навигационную аппаратуру потребителей (НАП) или пользовательский сегмент.

В настоящее время существует ряд актуальных задач, требующих повышенной точности навигационных измерений. К числу таких задач относится обеспечение метрологической точности, как НКУ, так и НАП. Основным методом калибровки и оценки точностных характеристик навигационной аппаратуры из состава НКУ и НАП является применение имитатора навигационных сигналов (ИНС), воспроизводящего сигналы ГНСС с требуемыми уровнями, временными задержками и динамическими параметрами. Как следствие, калибровка и поверка самих ИНС является первостепенной задачей оценки точностных характеристик ГНСС ГЛОНАСС [1, 2, 3].

На функционирование НАП и ИНС негативно влияют внешние факторы, в частности, перепады температуры, что приводит к снижению точности формирования и приема навигационного сигнала [1, 2]. Для уменьшения влияния изменения температуры применяют термостабилизацию, термокомпенсацию или их комбинацию [4]. Каждый из подходов имеет свои преимущества

и недостатки. Например, термостабилизация, как правило, более сложна в реализации, требует значительных энергоресурсов и требует большего времени для выхода на рабочий режим. В данной работе рассматривается метод термокомпенсации.

1. Точность НАП и постановка задачи

Традиционная методика температурной калибровки [5, 6, 7] заключается в следующем: устройство помещают в термокамеру, в составе рабочего места, включают, выводят на режим, после чего для ряда температур фиксируются значения калибруемого параметра в состоянии термобаланса.

На основе этих данных создается компенсационная таблица, которая загружается в устройство. В процессе эксплуатации, прибор считывает показания встроенного термодатчика и применяет соответствующие поправки из таблицы. Однако эффективность данного метода снижается из-за возможного неоднородного распределения температуры внутри корпуса, что не может быть учтено только одним датчиком.

Дополнительным фактором, снижающим точность, является влияние внешних факторов: суточные перепады температуры, работа климатической техники (кондиционеров, обогревателей) и т.п. Эти факторы вызывают изменение распределения температуры внутри прибора, которое не повторяет условия лабораторной калибровки.

Известно [8] что, систематическая инструментальная погрешность измерений псевдодальности для приемно-измерительных устройств НАП может дрейфовать в пределах $\pm 0,1$ м в год. Подобная стабильность достижима для прецизионных образцов в метрологических комплексах только при строгом поддержании температуры окружающей среды в диапазоне 20 ± 2 °С.

Для повышения точности работы навигационной аппаратуры в условиях неконтролируемых температурных воздействий и неравномерного прогрева предлагается метод калибровки, направленный не на прибор, в целом, а на его отдельные термочувствительные компоненты.

2. Описание метода термокомпенсации и проведение исследования

К наиболее чувствительным элементам навигационной аппаратуры можно отнести синтезатор частот, ЦАП и АЦП, цепи синхронизации к внешним синхросигналам, элементы радиотракта.

Для выявления температурных зависимостей предлагается использовать точечный нагрев элементов. Нагревание элементов производится в пределах допустимых рабочих температур, что контролируется встроенными или внешним термодатчиками.

После получения результатов необходимо составить модель применяемых поправок для различных комбинаций температур чувствительных элементов. Такой моделью может быть N -мерная матрица поправок, диапазон значений для каждого элемента которой может быть описан уравнением второго порядка (N – количество термочувствительных элементов).

Применение нескольких термодатчиков позволяет построить модель теплового состояния элементов прибора в реальном времени. Зная температуру в ключевых точках, можно вычислить фактическую поправку к измеряемым или формируемым параметрам прибора на текущий момент и учесть ее.

Использование предлагаемого метода позволит:

1) Повысить стабильность и повторяемость результатов. НАП будет выдавать точные данные, в том числе при резком изменении температуры (в пределах эксплуатационных ограничений);

2) Сократить время до получения точных радионавигационных параметров (РНП). Например, после продолжительного простоя или транспортировки, после включения отпадает необходимость ждать полного прогрева и термобаланса всех внутренних компонентов прибора;

3) Учитывать и эффективней выявлять старение компонентов. Со временем характеристики компонентов меняются [9]. Предлагаемый метод, оперирующий большим количеством параметров, позволит быстрее выявить «устаревший» компонент.

Для проведения эксперимента в качестве навигационного приемника использовался приемник на базе аппаратной платформы «Каспар» [10, 11], разработанный в ООО Научно-производственная организация «ЮСТ»

Для проведения эксперимента по оценке и компенсации температурной зависимости приемника навигационных сигналов собрано рабочее место в соответствии с рис. 1. В качестве ИНС-15 использовался имитатор навигационных сигналов MBPE.468915.001 [12].

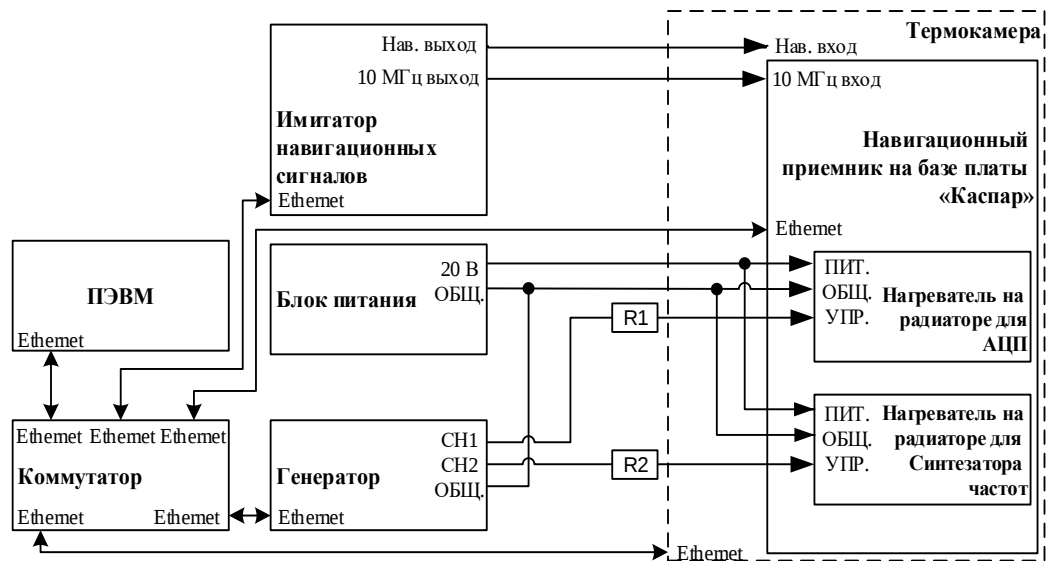


Рис. 1. Структурная схема рабочего места.

Генератор Agilent 33512B совместно с одним из каналов блока питания GWINSTEK GPS-4303 выполняли функцию удаленного управления нагревательными элементами (реализованы на транзисторах J1309), расположенными на радиаторах микросхем АЦП и синтезатора частот.

После сборки рабочего места произведено измерение задержек сигналов навигационным приемником при условно-постоянной температуре в помещении и изменении температуры в термокамере, а также при изменении температуры отдельно на микросхемах АЦП и синтезатора частот в различных комбинациях. Дополнительно контролировалась температура внутри прибора датчиком температуры, размещенным в окрестностях вычислителя. В результате были получены зависимости изменения температур (рис. 2) и задержек (рис. 3).

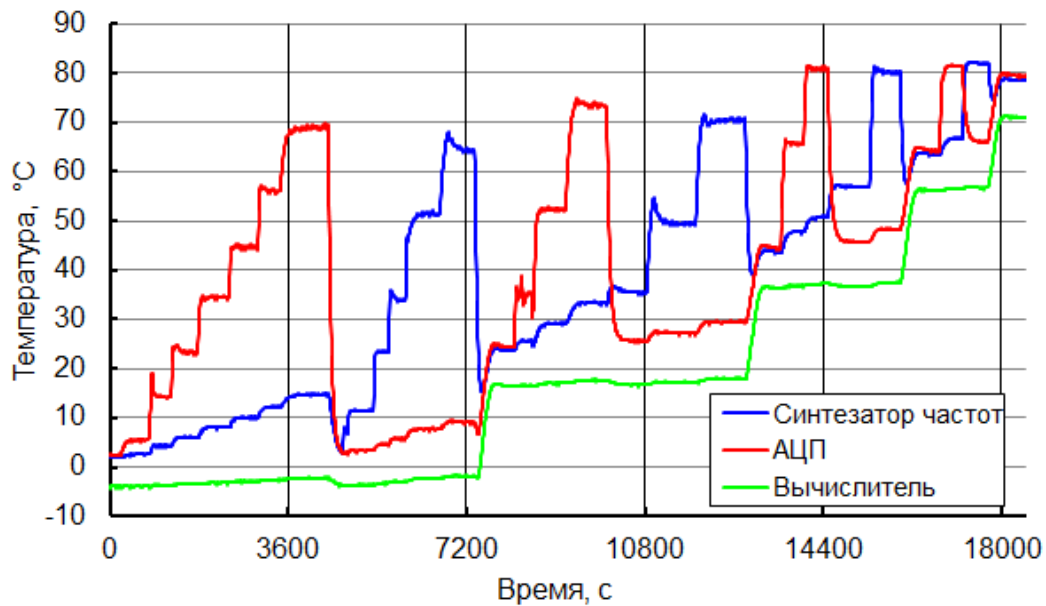


Рис. 2. Графики изменения температур по показаниям датчиков температуры с АЦП, синтезатора частот и вычислителя.

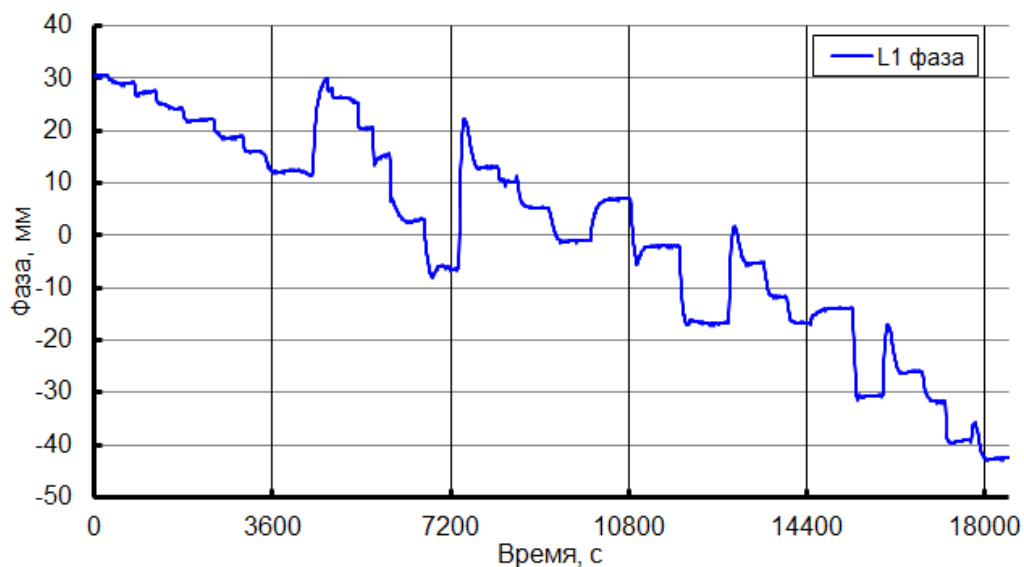


Рис. 3. Графики изменения фазы принимаемого навигационного сигнала в диапазоне частот L1 ГЛОНАСС.

В период проведения измерений изменение температуры в ИНС-15 не превысило $0,9^{\circ}\text{C}$, при этом изменение фазы формируемого прибором сигнала не превысило $0,5^{\circ}$ (около $0,26$ мм диапазоне частот L1 ГЛОНАСС) [12].

Ниже приведено краткое описание математического аппарата для получения калибровочных таблиц для предлагаемого метода многоточечной термокомпенсации.

В исследуемом приборе (навигационный приемник на базе аппаратной платформы «Каспар») установлено $N = 3$ термодатчика вблизи наиболее чувствительных элементов – АЦП, синтезатор частот и вычислитель. Температуру с каждого термодатчика обозначим как T_i , где $i = 1, 2, \dots, N$.

Измеряемый параметр прибора – систематическая инструментальная погрешность задержки $\Delta\tau$ (или эквивалентная ей погрешность псевдодальности $\Delta R = c \cdot \Delta\tau$, где c – скорость света) возникающая при изменении температуры.

Для аппаратной платформы «Каспар» зависимость погрешности от температуры является нелинейной и хорошо описывается полиномом второго порядка. Для других аппаратных реализаций степень полинома должна выбираться из соображений допустимых остаточных погрешностей, вычислительной сложности алгоритма, достаточной устойчивости решения и т.п. Для рассматриваемого случая, общее уравнение для поправки к задержке $\Delta\tau$ в зависимости от температур T_i можно записать следующим образом:

$$\Delta\tau(T_1, T_2, \dots, T_N) = S + \sum_{i=1}^N a_i \cdot T_i + \sum_{i=1}^N b_i \cdot T_i^2 + \xi,$$

где

S – постоянное смещение;

a_i – линейные коэффициенты зависимости для каждого элемента;

b_i – квадратичные коэффициенты, учитывающие нелинейность зависимости;

ξ – шум измерений.

В нашем случае, для 3х рассматриваемых термочувствительных элементов (АЦП, Синтезатор, Вычислитель) уравнение можно представить в развернутом виде:

$$\Delta\tau(T_A, T_S, T_C) = S + a_A \cdot T_A + a_S \cdot T_S + a_C \cdot T_C + b_A \cdot T_A^2 + b_S \cdot T_S^2 + b_C \cdot T_C^2 + \xi.$$

Для вычисления коэффициентов a_i , b_i проводится M калибровочных измерений, при этом M должно быть значительно больше количества коэффициентов в модели. Под калибровочным измерением понимается

измерение задержки для заданной неповторяющейся комбинации температур. Номер измерения обозначим как k (где $k = 1, 2, \dots, M$), тогда пошагово, процедуру измерения можно описать следующим образом:

1) Устанавливается комбинация температур на датчиках нагрева в термокамере и фиксируются показания $T_{A,k}$, $T_{S,k}$, $T_{C,k}$.

2) В ИНС включается формирование сигнала с задержкой $\tau_{ИНС}$, приемником осуществляется измерение задержки сформированного сигнала $\tau_{изм,k}$.

3) Производится оценка погрешности измерения псевдодальности для заданного температурной комбинации по формуле:

$$\Delta\tau_k = \tau_{ИНС} - \tau_{изм,k}.$$

Для расчета калибровочных коэффициентов воспользуемся методами линейной алгебры. Для этого, на основе полученных данных, составим систему уравнений вида:

$$y = X \cdot \beta,$$

где

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_{A,1} & T_{S,1} & T_{C,1} & T_{A,1}^2 & T_{S,1}^2 & T_{C,1}^2 \\ 1 & T_{A,2} & T_{S,2} & T_{C,2} & T_{A,2}^2 & T_{S,2}^2 & T_{C,2}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{A,M} & T_{S,M} & T_{C,M} & T_{A,M}^2 & T_{S,M}^2 & T_{C,M}^2 \end{bmatrix},$$

$$\beta = [S, a_A, a_S, a_C, b_A, b_S, b_C]^T,$$

y – вектор-столбец размером $M \times 1$ измеренных поправок $\Delta\tau_k$.

Каждая строка в матрице X соответствует k -му калибровочному измерению. Шум измерений ξ входит в систему уравнений, как шум измерений поправок k и шум измерений температур $T_{A,k}$, $T_{S,k}$, $T_{C,k}$.

Искомую матрицу β можно выразить как:

$$\beta = X^{-1}y.$$

Однако, составленная система уравнений имеет ряд особенностей:

- количество экспериментов (M) больше количества искомых коэффициентов (a и b), т.е. система уравнений переопределена;
- значения в матрице X могут быть коррелированы, т.к. термозависимые элементы в приборе не имеют идеальной температурной изоляции;
- система может не иметь точного решения из-за наличия шумов измерений ξ .

Таким образом, система уравнений может не иметь точного решения, соответственно, использование прямых методов обращения матриц затруднено высокой вероятностью получения неустойчивого решения. Для получения устойчивого решения возможно применение методов разложения типа LU, LUP и других [13, 14].

По полученным данным была составлена и решена система уравнений для поиска коэффициентов (табл.1).

Таблица 1. Значения коэффициентов для расчета термокомпенсации.

Термодатчик	S, мм	a, мм/град	b, мм/град ²
АЦП (A)	-86,9851	-0,4099	-0,1779
Синтезатор частот (S)		-0,1226	-0,0021
Вычислитель (C)		-0,0009	-0,0009

3. Результаты

Полученные коэффициенты были записаны в навигационный приемник. Затем произведен контрольный замер фазовой псевдодальности при изменении температуры в термокамере от минус 20 до плюс 50 градусов (шаг 10 градусов, выдержка не менее 10 минут по достижении заданной температуры), при условно постоянной внешней температуре и без включения нагревателей на радиаторах. Для сопоставления результатов один канал в приемнике не подвергался термокомпенсации.

График фазовой псевдодальности в диапазоне частот L1 ГЛОНАСС для каналов с/без коррекции представлен на рис. 4. Для наглядности на рис. 5 представлены результаты только для канала с коррекцией по температуре.

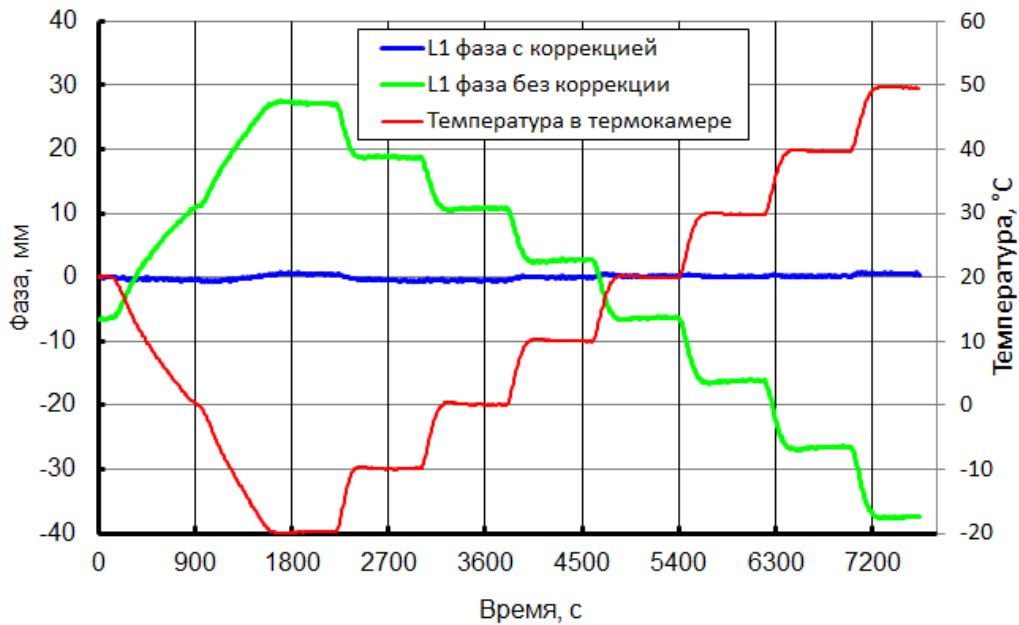


Рис. 4. Графики измерения фазы принимаемого навигационного сигнала без коррекции и с коррекцией по температуре.

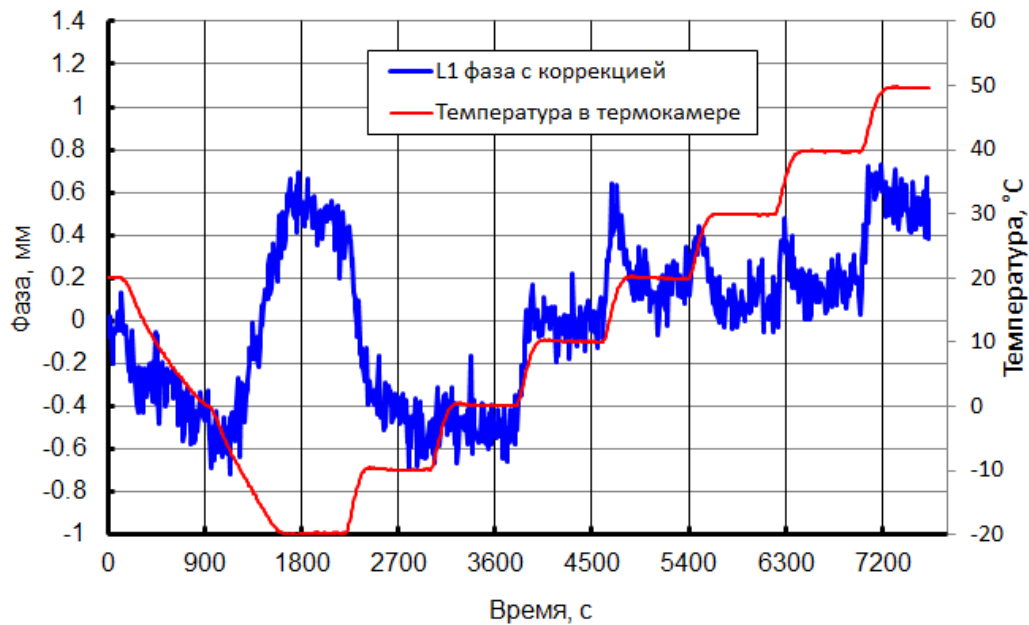


Рис. 5. Графики измерения фазы принимаемого навигационного сигнала с коррекцией по температуре.

При использовании предлагаемого метода термокомпенсации изменение фазы не превысило 3° (1,6 мм в диапазоне частот L1 ГЛОНАСС) при изменении температуры окружающего пространства от минус 20°C до плюс 50°C .

4. Применение метода термокомпенсации для ИНС

Используя предложенный метод точечного нагрева и контроля характеристик термочувствительных элементов, был откалиброван и проверен имитатор навигационных сигналов ИНС-15 МВРЕ.468915.001. Схема рабочего места представлена на рис. 6.

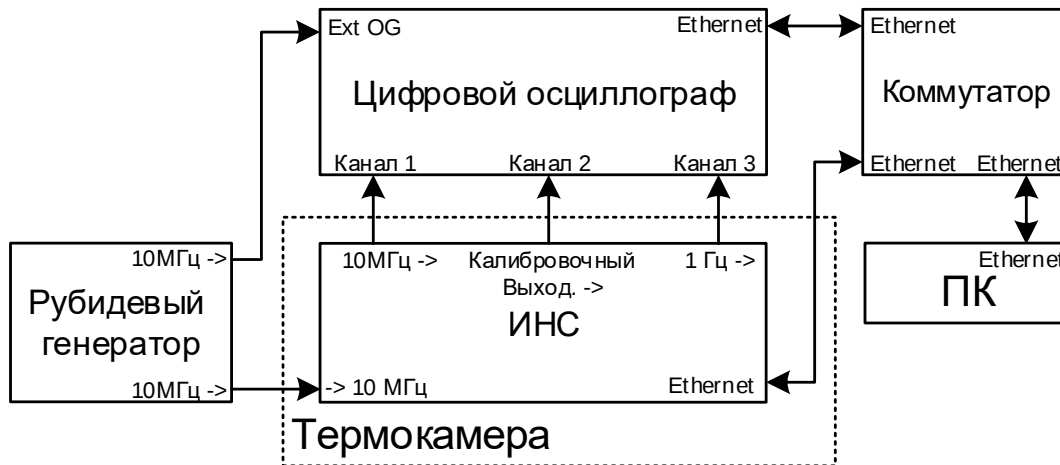


Рис. 6. Рабочее место для исследования задержки имитируемого навигационного сигнала от изменения температуры.

Оценка РНП осуществлялась корреляционным методом [8, 15, 16] по записанным сигналам цифровым осциллографом (ЦО). В качестве цифрового осциллографа использовался Keysight MXR608A с максимальной частотой дискретизации 16 Гвыб/с и объемом памяти, позволяющим осуществить запись навигационного сигнала длительностью 25 мс.

Конструктивно в ИНС-15 расположено 7 датчиков температуры, расположенных в разных частях прибора. Проведя серию экспериментов, было выявлено, что основной вклад вносили элементы, расположенные на плате блока формирования сигнала (БФНС), в окрестностях сумматора и ЦАП. Штатно, изготовитель осуществляет калибровку по показаниям одного датчика температуры («bfns_mixer»). Таблица формируется в диапазоне от +5 до +45 °С с шагом 5° для установившегося режима. Значение поправок к формируемым РНП для текущей температуры осуществляются аппроксимацией по значениям калибровочной таблицы. Для выбранных термочувствительных элементов, осуществлялся нагрев в различных комбинациях с фиксацией изменения РНП.

По полученным показаниям была построена матрица поправок и записана в прибор. В целях демонстрации результатов показания с одного канала корректировались штатной калибровочной таблицей.

На рис. 7 – 8 представлены результаты применения калибровочных таблиц, полученных предлагаемым методом (с отметкой «new» на рисунках) и штатным (с отметкой «orig» на рисунках).

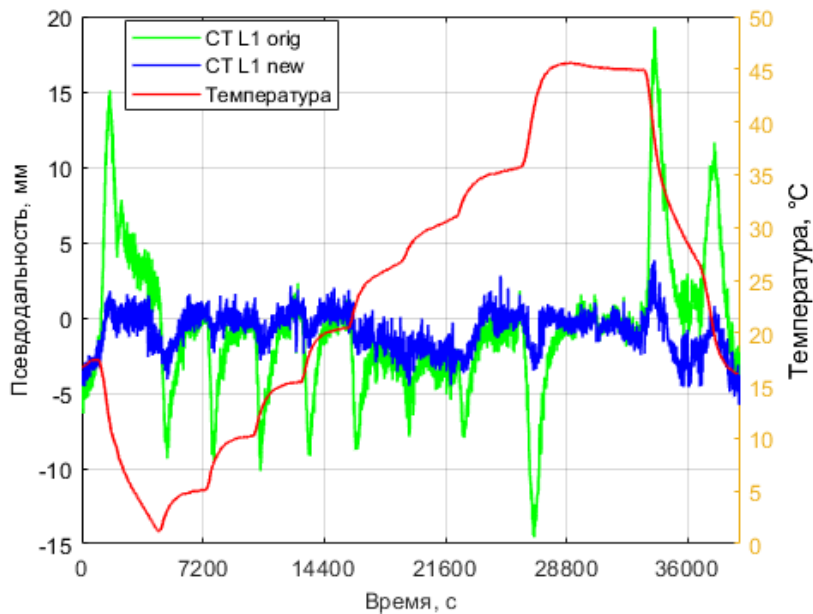


Рис. 7. Графики скорректированной псевдодальности сигнала литеры 1 ГЛОНАСС по коду СТ в диапазоне частот L1.

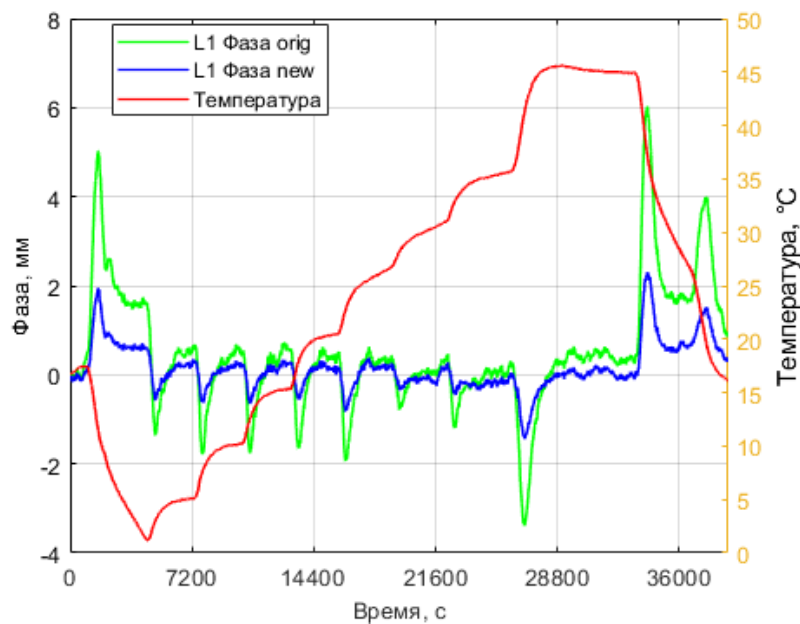


Рис. 8. Графики скорректированной фазы сигнала литеры 1 ГЛОНАСС в диапазоне частот L1 и температуры.

Предложенный метод поправок по термочувствительным элементам показал более эффективный результат, чем метод с компенсацией по показаниям встроенного датчика температуры, по таблице с шагом 5° . Особое внимание стоит обратить на интервалы изменения температуры. На этих интервалах наблюдается запаздывание коррекции от показаний температурных датчиков. В случае коррекции от одного встроенного датчика это объяснимо неравномерным изменением градиента температуры внутри прибора. Следует отметить, что «отставание» коррекции РНП по показаниям нескольких датчиков значительно меньше (в 3 – 6 раз), чем по одному.

Заключение

Существующие методы термокомпенсации приемников и имитаторов сигналов ГНСС зачастую не обеспечивают требуемой точности в условиях градиентов температур. Предложенный в работе метод, основанный на контроле температуры термочувствительных элементов и коррекции РНП по нескольким датчикам, позволяет устранить этот недостаток.

Экспериментально подтверждено, что разработанный метод превосходит традиционные решения по ряду критически важных параметров:

- Точность. Снижение температурной погрешности формирования псевдодальности ИНС-15 в 1,5 раз для кодовой псевдодальности и в 2 раза для фазы в условиях минимального изменения температуры или установившемся режиме;

- Быстродействие. Скорость адаптации к температурным изменениям повышена в 3 – 6 раз для ИНС-15, что минимизирует переходные процессы;

- Универсальность. Метод является аппаратно-независимым и может быть реализован в виде дополнительных датчиков температуры, программного обеспечения или прошивки для существующих платформ без существенных изменений в схемотехнике.

Внедрение предложенного метода позволяет повысить метрологические характеристики контрольно-проверочной аппаратуры на базе имитаторов

сигналов ГНСС, а также расширить эксплуатационный температурный диапазон высокоточных приемников в наземной, авиационной и космической технике. Это напрямую способствует повышению надежности и точности навигационно-временного обеспечения критически важных систем.

Предложенный метод был внедрен при калибровке по температуре приемника и имитатора навигационных сигналов на базе аппаратной платформы «Каспар».

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2026-0010).

Литература

1. Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (Eds.). Handbook of Global Navigation Satellite Systems. – Cham : Springer. – 2017. – 1327 p. – ISBN 978-3-319-42926-7.
2. Донченко С.И., Блинов И.Ю., Сильвестров И.С. Комплекс средств фундаментального и метрологического обеспечения ГЛОНАСС // Мир измерений. – 2012. – №. 4. – С. 12-20.
3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global positioning system: theory and practice. – Springer Science & Business Media, 2012.
4. Данилин А.А., Лавренко И.С. Измерения в радиоэлектронике: учебное пособие // Сибирский федеральный университет. – Красноярск : СФУ. – 2021. – 232 с. – ISBN 978-5-8114-8068-5.
5. Верещагин А.Н. Испытательный стенд имитатора навигационных сигналов МРК-40 / А.Н. Верещагин, А.И. Голенок, В.И. Кокорин // Молодежь и наука: сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск : Сибирский федеральный университет – 2011.
6. Пазычев Д.Б. Температурная калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы, построенной на базе микромеханических чувствительных элементов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 1.

7. Гончаров С.В. и др. Компенсация температурных зависимостей аналоговых трактов угломерных навигационных аппаратур потребителей // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – №. 12. – С. 31-35.
8. Печерица Д.С. Метод калибровки навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС с использованием эталонов, прослеживаемых к государственным первичным эталонам единиц величин : специальность 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д.С. Печерица; ВНИИФТРИ. – Менделеево. – 2018. – 123 с.
9. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности: учебник для студентов инженерно-технических специальностей вузов / С.М. Боровиков. – Минск: Дизайн ПРО. – 1998. – 336 с.
10. Описание аппаратной платформы «Каспар» // НПО «ЮСТ»: официальный сайт. – URL: <http://antenn.ru/store/show/apparatnaya-platforma-kaspar> (дата обращения: 23.03.2026)
11. Верещагин А.Н., Тараненко А.Ю., Валиханов М.М. О проблеме применения цифрового осциллографа для калибровки имитатора навигационных сигналов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – С. 177-181.
12. Имитатор навигационных сигналов ИНС. Руководство по эксплуатации. МВРЕ.468915.001 РЭ: отраслевой документ. – Красноярск. – 2016. – 41 с.
13. Golub, G.H. Matrix Computations / G.H. Golub, C.F.Van Loan. – 4th ed. – Baltimore: Johns Hopkins University Press. – 2013. – 756 p.
14. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – Москва: Наука, 1986. – 288 с.
15. Савин А.А. Контрольно-поверочная аппаратура системы автономной навигации космических аппаратов / А.А. Савин, Н.М. Крат, Г.С. Шарыгин // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1 (31). – С. 28–32.

16. Абдулхаков А.А. Способы повышения точности определения псевдодальности навигационного сигнала цифровым осциллографом / А.А. Абдулхаков, М.М. Валиханов, А.Н. Верещагин, А.П. Глушков // Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы экономики: сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург. – 2021. – С. 176–180.

Для цитирования:

Верещагин А.Н., Тараненко А.Ю. Метод термокомпенсации приемника и имитатора сигналов ГНСС // Журнал Радиоэлектроники. – 2026. – №. 5. https://doi.org/10.30898/1684_1719.2026.5.4