

Вариант региональной навигационной системы на базе псевдоспутников

A variant of a regional navigation system based on pseudo-satellites

Васильев / Vasilyev V.

Валерий Серафимович

(veronbib@mail.ru)

кандидат технических наук.

Филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики» (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

«Научно-исследовательский институт измерительных систем имени Ю. Е. Седакова»

(НИИИС им. Ю. Е. Седакова),

первый заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ,

директор филиала.

г. Нижний Новгород

Воронов / Voronov M.

Михаил Анатольевич

(mvoronov52@yandex.ru)

филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ

«НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,

старший научный сотрудник.

г. Нижний Новгород

Воронов / Voronov S.

Сергей Михайлович

(rupreht1977@mail.ru)

филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ

«НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,

начальник группы.

г. Нижний Новгород

Ключевые слова: локальная навигационная система – local navigation system; региональная навигационная система – regional navigation system; наземный источник навигационных сигналов – ground source of navigation signals.

В целях навигационного обеспечения в условиях нарушения работоспособности глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) или недоступности их сигналов рассматриваются различные альтернативные варианты, в том числе создание региональных навигационных систем с использованием комплексов длинноволновых радионавигационных станций и локальных навигационных систем на базе псевдоспутников. В настоящей статье рассматривается вариант создания региональной навигационной системы с использованием только псевдоспутников.

In order to provide navigation in conditions of malfunction of global navigation satellite systems (GNSS) or unavailability of their signals, various alternative options are being considered, including the creation of regional navigation systems using complexes of long-wave radio navigation stations and local navigation systems based on pseudo-satellites. This article considers the option of creating a regional navigation system using only pseudo-satellites.

Элементы инфраструктуры современного общества, такие как транспорт (наземный, воздушный, морской), энергосистемы, телекоммуникации, финансовые системы, в настоящее время зависимы от технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) – спутниковой навигации и синхронизации шкал времени.

Уязвимость ГНСС делает уязвимой и использующую ее сигналы инфраструктуру.

Вопрос резервирования ГНСС неоднократно рассматривался как в России, так и за рубежом. В числе вариантов резервирования ГНСС рассматривается использование длинноволновых и сверхдлинноволновых радионавигационных систем, сетей телефонной связи, радиомаяков, наземных псевдоспутниковых систем, корреляционно-экстремальных методов навигации по геофизическим полям Земли: поверхностным – по рельефу местности и дна морей и океанов; потенциальным – гравитационному и магнитному [1–4].

Следует отметить, что использование наземных псевдоспутников рассматривается для создания локальных навигационных систем (ЛНС), в том числе являющихся элементами комплексной радиотехни-

ческой системы координатно-временного и информационного обеспечения (КРС КВНО), предложенной ОАО «РИРВ» [5]. При этом в качестве базового варианта в состав ЛНС включаются четыре псевдоспутника – наземных источников навигационных сигналов (НИНС). Рабочая зона таких НИНС определяется дальностью прямой видимости потребителей их сигналов, излучаемых в УКВ-диапазоне частот. Последнее связано со стремлением к повышению точности навигационных определений, поскольку дисперсия оценки максимума правдоподобия времени задержки сигнала, как известно, определяется выражением:

$$D\{\tilde{\tau}|\tau\} = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 q^2}, q \gg 1, \quad (1)$$

где: f_s – эффективная или средняя частота спектра сигнала;

q – отношение сигнал/шум.

Как правило, рабочая зона НИНС, излучающих сигналы в УКВ-диапазоне, составляет несколько десятков километров [6, 7], при этом навигация с использованием такой ЛНС доступна в районе площадью до нескольких тысяч квадратных километров. Так, для системы «Консул», создаваемой АО «НИИМА Прогресс», навигация доступна в районе площадью 1000 кв. км [8].

Очевидно, что для определения собственных координат потребитель должен принимать сигналы не менее трех НИНС.

Вариант размещения НИНС на некоторой территории представлен на рис. 1.

Несложно показать, что при размещении 13 НИНС, представленном на рис. 1, площадь совместной рабочей зоны не менее трех НИНС может быть определена как:

$$S_{\text{раб}} = 3\pi R^2 - 2(\pi R^2 \times \alpha / 360 - R^2 / 2), \quad (2)$$

где: R – радиус рабочей зоны НИНС;

α – угол сектора перекрытия рабочих зон двух НИНС.

В соответствии с известной формулой для дальности прямой видимости:

$$R = 4,12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ [км]}, \quad (3)$$

где h_1 и h_2 – высоты передающей и приемной антенн в метрах, задавшись высотами антенн НИНС не более 50...100 м и высотами антенн потребителей в диапазоне от 3 до 20 м, получим размер рабочей зоны НИНС в диапазоне от 40 до 60 км.

Тогда при радиусе рабочей зоны НИНС $R=60$ км и области перекрытия рабочих зон $O=60$ км рабочая

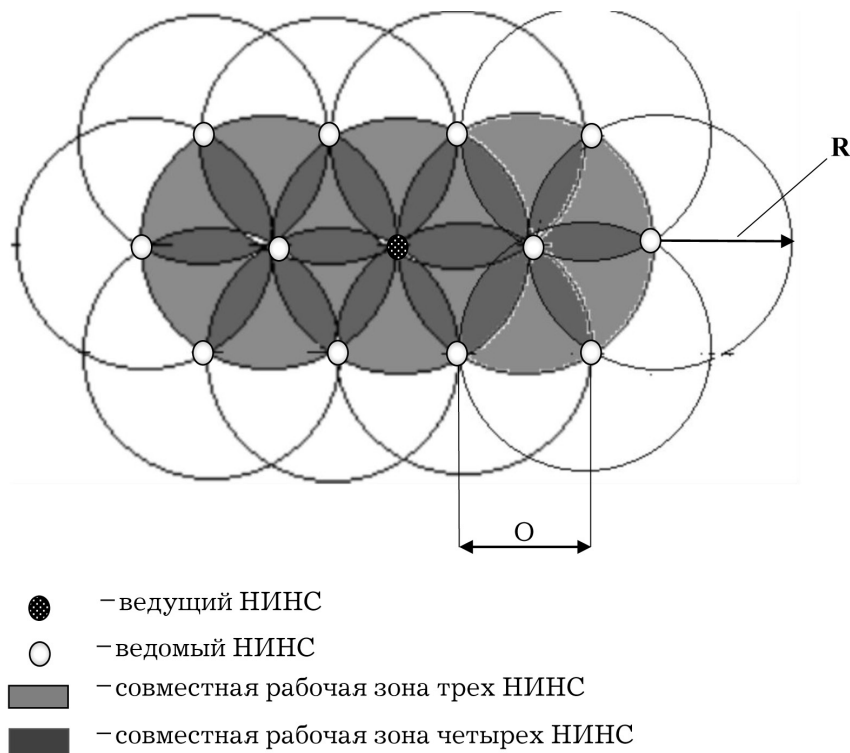


Рис. 1. Схема размещения НИНС локальной сети

площадь сети из 13 НИНС, представленной на рис. 1, составит 29976 км².

Меньшую или сопоставимую площадь имеют 20 (23%) регионов России [9].

Исходя из этого сеть НИНС, представленная на рис. 1, может быть классифицирована как региональная навигационная система (РНС).

В результате проработки технического облика РНС признано целесообразным в ее состав, как и в состав ЛНС, включать [10]:

- ведущий НИНС, совмещенный с пунктом управления РНС (сетью НИНС);
- сеть ведомых НИНС.

Предлагаемая структура РНС представлена на рис. 2.

Так же, как и ЛНС, РНС на базе псевдоспутников может быть использована как в режиме резервной системы ГНСС ГЛОНАСС, так и в режиме ее функционального дополнения. При этом аппаратура потребителей должна иметь возможность принимать и обрабатывать (в т. ч. совместно) как сигналы РНС, так и сигналы ГНСС ГЛОНАСС.

Для того, чтобы РНС выполняла функцию резервирования ГНСС, она должна обеспечить достижение точности навигационных определений потребителем ее сигналов, сопоставимой с точностью их определений по сигналам ГНСС.

Принцип действия РНС – пассивный разностно-псевдодальномерный, основан на беззапросных измерениях разности времен прохождения радиосигналов НИНС до

антенны потребителя и вычисления по этим данным координат места и составляющих вектора его скорости.

При оптимальном размещении НИНС относительно потребителя наибольшее влияние на погрешности навигационных определений оказывают структура и параметры навигационных сигналов, условия их распространения и погрешности синхронизации шкал времени источников навигационных сигналов.

При необходимости оптимальность размещения НИНС относительно некоторых потребителей региона может быть достигнута размещением дополнительных мобильных (перемещаемых) НИНС.

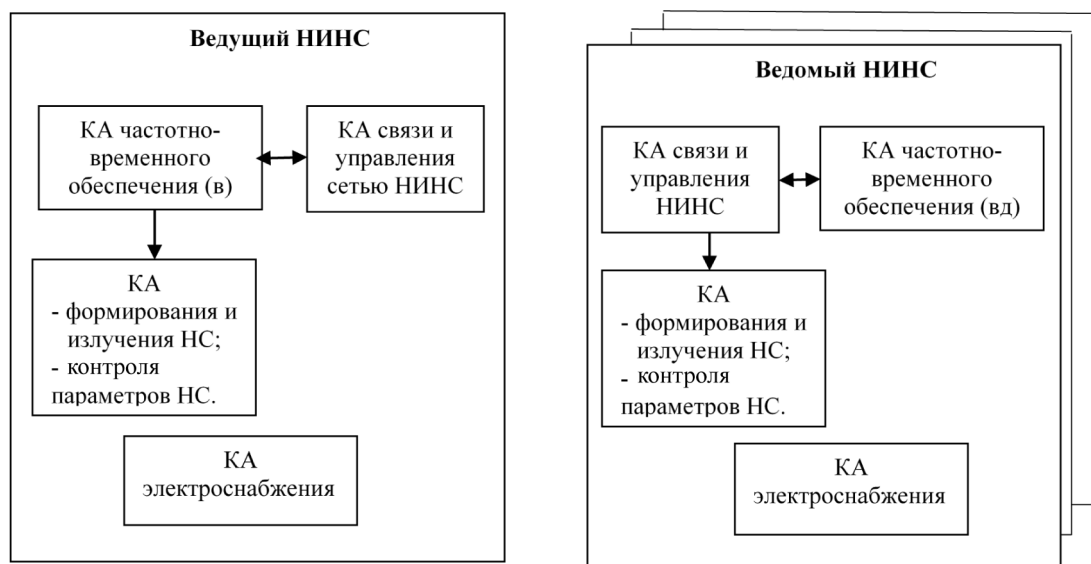
Выбор структуры и параметров навигационных сигналов РНС может быть осуществлен аналогично их выбору для ЛНС, описанному в [7].

Влияние условий распространения сигналов может быть компенсировано вводом поправок в измерения псевдодальноностей, рассчитываемых потребителем с использованием известных моделей атмосферы.

Остановимся на синхронизации шкал времени НИНС в составе РНС.

Среди известных методов синхронизации шкал времени наиболее приемлемыми для рассмотрения возможности их реализации в РНС являются:

- метод, основанный на использовании каналов волоконно-оптических линий связи (ВОЛС);
- метод, основанный на измерении расстояния между двумя пунктами с известными с высокой точностью координатами;



КА – комплект аппаратуры,
НС – навигационный сигнал.

Рис. 2. Предлагаемая структура РНС

– методы, основанные на приеме и обработке сигналов ГНСС.

При использовании выделенных каналов ВОЛС может быть обеспечена погрешность синхронизации шкал времени на уровне 1,2 нс [11].

Однако анализ рис. 1 показывает, что реализация такого метода потребует прокладки не менее 800 км ВОЛС, что представляется экономически невыгодным.

Метод, основанный на измерении расстояния между двумя пунктами с известными с высокой точностью координатами, реализован в ряде ЛНС, созданных фирмой Locata Corporation (Австралия), а также в комплексированной навигационной системе услуг локации (Консул), разработанной АО «НИИМА Прогресс» [8]. Для высокоточных измерений расстояний метод предполагает использование дискретных шумоподобных сигналов и УКВ-диапазона частот. Это ограничивает возможные удаления ведомых НИНС от ведущего дальностью прямой видимости. Используя выражение для дальности прямой видимости (3) и полагая размещение антенн НИНС на одинаковых высотах не более 100 м, получим значение максимальной дальности прямой видимости не более 80 км.

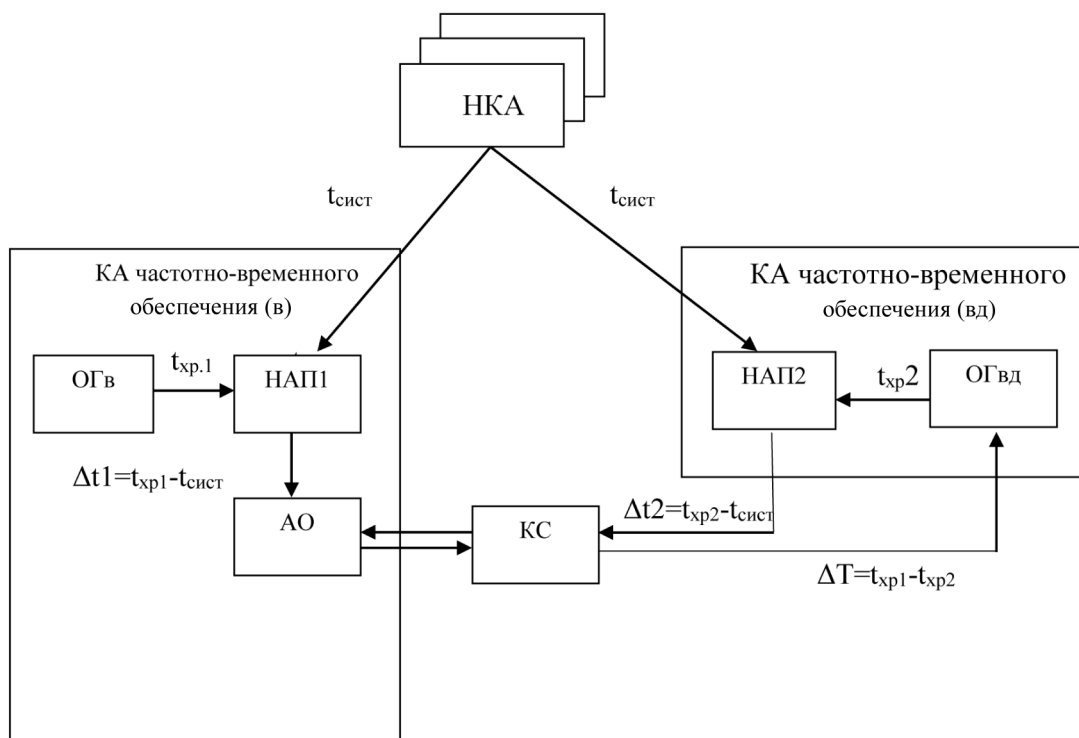
Анализ представленного на рис. 1 размещения НИНС показывает, что 6 из 12 ведомых НИНС удалены от ведущего на расстояния более 100 км.

Таким образом, этот метод неприменим для РНС.

Синхронизация шкал времени на основе приема и обработки сигналов ГНСС может быть реализована одним из двух методов.

Первый метод предполагает:

- использование в составе каждого НИНС аппаратуры потребителя сигналов (НАП) ГНСС геодезического класса;
- использование высокоточных апостериорных эфемерид (финальных) навигационных космических аппаратов (НКА);
- выполнение двухчастотных фазовых и кодовых измерений псевдодальностей до НКА;
- использование высокоточных координат НИНС;
- использование метеоданных для НИНС (температура, давление, влажность);
- внесение в измерения поправок на задержки распространения в атмосфере, рассчитываемых с использованием известных моделей ионосферы [12] и тропосферы [13];



ОГ – опорный генератор
 АО – аппаратура обработки
 КС – канал связи (включая КА связи и управления)

Рис. 3. Структурная схема дифференциальных сличений шкал времени с использованием сигналов ГНСС

– периодическое проведение взаимной калибровки НАП сети НИНС с целью исключения межспутниковых задержек в измерениях псевдодалностей НАП, включающих ошибки эфемеридной информации в части ухода часов НКА от системной шкалы времени ГНСС ГЛОНАСС и межлитерные задержки, обусловленные частотным разделением сигналов НКА ГНСС ГЛОНАСС и отклонением их параметров от своих номинальных значений.

Проведенные оценки показали, что при пренебрежимо малой случайной погрешности метод дает систематическое смещение синхронизируемых шкал времени в 30 нс. В совокупности с другими составляющими погрешностей измерений псевдодалностей это не позволяет обеспечить навигационные определения с погрешностями, получаемыми с использованием сигналов ГНСС.

Второй метод предполагает использование для формирования шкал времени НИНС водородных стандартов частоты и реализацию дифференциальных сличений шкал времени ведомых НИНС со шкалой времени ведущей НИНС с использованием сигналов ГНСС ГЛОНАСС [8, 14].

Возможна реализация двух вариантов этого метода, каждый из которых предполагает осуществление синхронизации шкал времени ведущего и ведомых НИНС в два этапа.

В обоих вариантах на первом этапе в целях обеспечения единства измерений осуществляется синхронизация шкалы времени ведущего НИНС с системной шкалой времени ГНСС ГЛОНАСС.

Синхронизация шкалы времени каждого из ведомых НИНС со шкалой времени ведущего НИНС в первом варианте на этапе ввода ведомых НИНС в эксплуатацию осуществляется с использованием перевозимого квантового стандарта частоты (ПКЧ).

При этом осуществляется [14]:

- сведение частот ПКЧ и опорного генератора КА частотно-временного обеспечения ведущего НИНС;
- сравнение шкал времени ПКЧ и опорного генератора ведущего НИНС – измерение интервала времени между их сигналами 1 Гц $\Delta T_1(t_1) = T_{\text{ПКЧ}} - T_{\text{оп(НИНСв)}}$ и фиксация результата и времени проведения измерений t_1 ;
- перевозка ПКЧ на ведомый НИНС;
- сведение частот ПКЧ и опорного генератора КА частотно-временного обеспечения ведомого НИНС;
- сравнение шкал времени ПКЧ и опорного генератора ведомого НИНС – измерение интервала времени между их сигналами 1 Гц

$$\Delta T_2(t_2) = T_{\text{ПКЧ}} - T_{\text{оп(НИНСвд)}}$$

и фиксация результата и времени проведения измерений t_2 ;

– синхронизация шкалы времени ведомого НИНС со шкалой времени ведущего НИНС – ввод сдвига

выходной шкалы времени КА частотно-временного обеспечения ведомого НИНС на величину

$$\begin{aligned} \Delta T_2(t_2) - \Delta T_1(t_1) &= T_{\text{ПКЧ}} - T_{\text{оп(НИНСвд)}} - T_{\text{ПКЧ}} + T_{\text{оп(НИНСв)}} = \\ &= T_{\text{оп(НИНСв)}} - T_{\text{оп(НИНСвд)}}. \end{aligned}$$

Реализация метода обеспечивает предельную (по уровню вероятности 0,95) погрешность синхронизации шкал времени на уровне 1,855 нс [14].

Поддержание синхронизма осуществляется путем дифференциальных сличений шкал времени ведомых НИНС со шкалой времени ведущей НИНС с использованием сигналов ГНСС ГЛОНАСС.

Укрупненная структурная схема дифференциальных сличений шкал времени ведущего и ведомого НИНС представлена на рис. 3.

Синхронизация шкалы времени каждого из ведомых НИНС со шкалой времени ведущего НИНС и поддержание синхронизма во втором варианте осуществляется путем дифференциальных сличений шкал времени.

При реализации этого варианта достижение точности оценки относительного сдвига шкал времени в 3,5 нс обеспечивается по истечении 2-х суток измерений.

Достоинством метода является то, что при использовании в составе опорных генераторов ведомых НИНС стандартов частоты и времени, таких как Ч1-107, имеющих относительную нестабильность $\pm 2 \times 10^{-15}$ [15], в отсутствии приема сигналов ГНСС ГЛОНАСС возможно поддержание синхронизма шкал времени с погрешностью не более 5 нс в течении 7,9 сут. [7, 14].

Таким образом, представлен вариант создания региональной навигационной системы с площадью рабочей зоны более 29 тыс. км², способной обеспечивать навигационные определения потребителем даже при длительном отсутствии приема сигналов ГНСС.

Литература

1. Пешехонов, В. Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем / В.Г. Пешехонов // Гироскопия и Навигация. – 2022. – Т. 30, № 1 (116). – С. 3–11.
2. Ривкин, Б. С. Навигация без GPS за рубежом / Б.С. Ривкин // Гироскопия и Навигация. – 2024. – Т. 32, № 1 (124). – С. 115–142.
3. Россия запускает свой аналог Starlink. Первые спутники уже заработали // Дзен : [сайт]. – 2023. – URL : <https://dzen.ru/a/ZLok1kxjyRSKhcnp> (дата обращения: 20.05.2025).
4. АО «ГЛОНАСС» создаст локальную навигационную систему для севморпути // Тасс : [сайт]. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/16441019> (дата обращения 21.05.2025).
5. Писарев, С. Б. Комплексная радиотехническая система координатно-временного и информационного обеспечения потребителей как альтернативный инструмент устойчивого навигационного и частотно-временного обеспечения /

С.Б. Писарев // Тезисы докладов на конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2023) (17–21 апреля 2023 г.). – Санкт-Петербург : ИПА РАН, 2023. – С. 159.

6. Военные испытали "неуязвимую" альтернативу GPS / ZoomCNews [сайт]. – URL : http://rnd.cnews.ru/tech/news/line/index_science.shtml?2013/06/17/532424 (дата обращения: 20.05.2025).

7. Васильев, В. С. Локальная псевдоспутниковая навигационная система обеспечения безопасности судоходства в Обской губе / В.С. Васильев, М.А. Воронов, С.М. Воронов // Информация и Космос. – 2021. – № 3. – С. 105–109.

8. ЛНС «Консул» обеспечивает высокую точность и надежность геопозиционирования // Progress [сайт АО «НИИМА «Прогресс»]. – 2022. – URL : <https://i-progress.tech/news/Consul/> (дата обращения: 20.05.2025).

9. Площадь регионов | Россия | 2025 // statbase [сайт]. – URL: <https://sttbase.ru/data/rus-area-by-region-national-stat> (дата обращения 14.04.2025).

10. Баранов, А. В. Отчет "Выбор структуры и параметров навигационных сигналов ЛНС обеспечения безопасности судоходства в Обской губе. Предварительная оценка технических характеристик ЛНС / А.В. Баранов, М.А. Воронов. – Нижний Новгород : Филиал ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ "НИИИС им. Ю.Е. Седакова", 2020. – 52 с.

11. Экспериментальная проверка погрешности сличения шкал времен по каналам волоконно-оптической линии связи / О.В. Миронов, Л.Я. Белов, В.И. Кошелев [и др.] // Труды ИПА РАН. – 2018. – № 44. – С. 107–113.

12. Two-step method or the determination of the differential code biases of COMPASS satellites / Z. Li, Y. Yan, J. Ou, L. Hui // Journal of Geodesy. – 2012. – Vol. 86. – P. 1059–1076.

13. Martellucci, A. Galileo Tropospheric Correction Model / A. Martellucci // ESA navipedia [сайт]. – 2012. – URL : https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Galileo_Tropospheric_Correction_Model&oldid=14512 (дата обращения 01.06.2023).

14. Методика синхронизации шкал времени ППДС со шкалой времени ПКУ СТИ-ПП. ЯКУР.411735.014 Д1.

15. Стандарт частоты и времени водородный Ч1-1007. Руководство по эксплуатации. ЯКУР.411141.016РЭ. – 37 с.