

В. С. БАХОЛДИН, Д. А. ГАВРИЛОВ, И. С. ГЕРАСИМЕНКО,
В. А. ДОБРИКОВ, В. Ф. ИВАНОВ

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОЙ ПРОГРАММНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

В статье рассматривается совместная программная обработка сигналов глобальных (ГЛОНАСС, GPS, BeiDou, Galileo) и региональной (IRNSS) навигационных спутниковых систем.

Представлена обобщенная структурная схема реализованного макета программного мультисистемного навигационного приемника и рассмотрены его возможности по обработке сигналов навигационных систем.

В результате программной обработки получены раздельное и совместное решения навигационной задачи по сигналам 30 космических аппаратов пяти различных навигационных систем, принятым на северо-западе Российской Федерации. Проанализированы точность полученных решений и значения величин геометрического фактора.

Ключевые слова: спутниковая навигационная система, программная цифровая обработка сигналов, мультисистемный навигационный приемник.

Введение

В настоящее время спутниковая навигация интенсивно развивается. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS полностью развернуты. Орбитальные группировки ГНСС Galileo и BeiDou имеют по 14 и 20 навигационных космических аппаратов (НКА) соответственно, и их полное развертывание планируется завершить к 2020 году. Кроме этого, штатно функционирует индийская региональная навигационная спутниковая система (РНСС) IRNSS, имеющая в составе своей группировки семь НКА. Функциональные дополнения SBAS (satellite-based augmentation system: EGNOS – Евро-союз, СДКМ – Россия, WAAS – США) обеспечивают дополнительной информацией и повышают точность навигационных определений. Таким образом, в настоящее время для решения задач навигационного обеспечения потенциально могут использоваться более 100 НКА, при этом в зоне радиовидимости

Бахолдин Владимир Станиславович. Кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (С.-Петербург).

Гаврилов Денис Александрович. Кандидат технических наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского.

Герасименко Игорь Станиславович. Кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского.

Добриков Владимир Анатольевич. Кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского.

Иванов Вадим Федорович. Старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского.

наземного потребителя может находиться около четырех десятков НКА [1]. С учетом того что навигационные системы излучают одновременно несколько сигналов с квадратурным или временным уплотнением в двух или в трех частотных диапазонах, количество одновременно принимаемых сигналов может быть более ста. Это делает актуальным создание мультисистемных, многоканальных, способных работать в различных частотных диапазонах навигационных приемников [2–3].

Решение навигационной задачи в мультисистемном приемнике

На этапе макетирования таких мультисистемных приемников, отладки методов приема новых навигационных сигналов с ВОС-модуляцией (binary offset carrier), квадратурным и временным уплотнением, а также оценки реальных точностных характеристик новых сигналов и характеристик доступности навигационного поля развертываемых навигационных систем целесообразно использовать программный подход к построению навигационной аппаратуры потребителей (НАП), обладающий такими возможностями [4–8], как:

- достижение высоких технических характеристик и их экспериментальное подтверждение до начала серийного производства НАП;
- использование сложных алгоритмов обработки сигналов, не реализуемых традиционными методами;
- быстрая адаптация НАП к специфическим (уникальным) требованиям потребителя, новым навигационным системам (функциональным дополнениям) и их сигналам;
- использование высокоэффективных, в том числе интеллектуальных, алгоритмов обнаружения и подавления помех;
- реализация методов глубокого комплексирования с инерциальными навигационными системами и другими навигационными датчиками;
- возможность изменения алгоритмов обработки сигнала без изменений аппаратной части, то есть ее унификация.

Обобщенная структурная схема используемого макета программного мультисистемного навигационного приемника (ПМНП) представлена на рис. 1. Особенностью макета является использование аппаратной части, изначально предназначенной для приема сигналов в четырех частотных диапазонах [9–12].

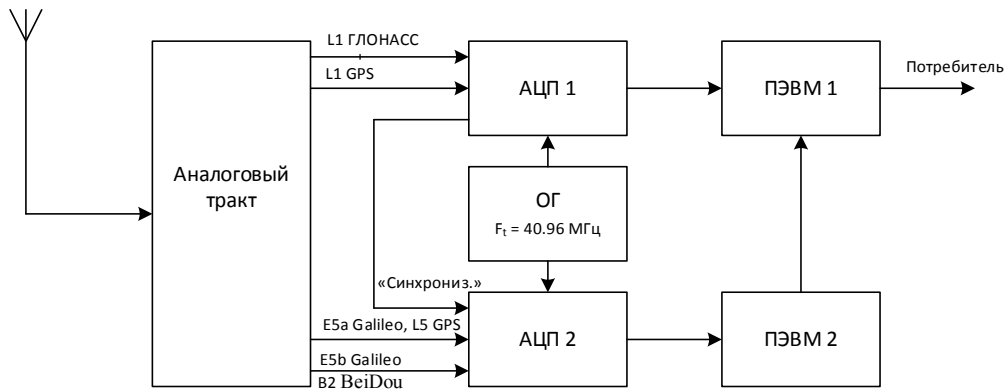


Рис. 1. Обобщенная структурная схема макета ПМНП

Макет ПМНП состоит из следующих основных элементов:

- блока антенного с малошумящим усилителем (производство ЗАО «КБ НАВИС»);
- аналогового тракта, преобразующего сигналы разных диапазонов ГНСС на промежуточные частоты 10...20 МГц (производство ЗАО «КБ НАВИС»);
- АЦП с частотой дискретизации $f_T = 40,96$ МГц (PDA14, производство Signatec);
- опорного генератора, формирующего общую тактовую частоту для каждой платы АЦП;
- двух персональных компьютеров, осуществляющих запись оцифрованных сигналов на RAID-накопители.

Аналоговый тракт макета ПМНП не поддерживает работу с сигналами L2 диапазонов ГЛОНАСС и GPS, поэтому программной обработке подвергались сигналы, указанные в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Принимаемые ПМНП сигналы спутниковых навигационных систем

№ п/п	Навигационная система	Диапазон	Сигнал	Полоса, МГц	Модуляция
1	ГЛОНАСС	L1	СТ	1,023	BPSK
		L3	L3OCd, L3OCp	20,46	QPSK
2	GPS	L1	C/A,	2,046	BPSK
		L5	I5, Q5	20,46	QPSK
3	BeiDou	B2	B2I	4,092	BPSK
4	Galileo	E1	E1-B, C	24,552	CBOC
		E5a	E5a-I, Q	20,46	QPSK
		E5b	E5b-I, Q	20,46	QPSK
6	IRNSS	L5	SPS	2,046	BPSK

В ПМНП запись осуществляется на две ПЭВМ, что вызвано большим цифровым потоком данных от АЦП. Сигналы промежуточной частоты, оцифрованные и записанные при помощи макета ПМНП, обрабатываются программными методами в среде MatLab в соответствии с методикой, изложенной в [9–12].

Поиск сигналов НКА осуществляется по частоте в диапазоне ± 6 кГц с шагом 25 Гц и по задержке в диапазоне от 0 до 1 мс с шагом $1/f_T$. Обнаружение сигналов выполняется по критерию Неймана–Пирсона с использованием алгоритма быстрой свертки и интервалом когерентного накопления, равным 1 мс.

После обнаружения сигналов программный приемник переходит в режим слежения, в котором задействуются программный блок корреляторов и элементы программных схем слежения за задержкой, частотой и фазой. В схеме слежения за задержкой используется некогерентный дискриминатор и фильтр второго порядка с шириной полосы пропускания 10 Гц. Схема частотно-фазовой автоподстройки реализована на основе схемы Костаса и фильтра второго порядка с шириной полосы пропускания 20 Гц.

С целью декодирования навигационных сообщений обрабатывается сигнал протяженностью 60 с, что обусловлено длительностью кадров (субкадров), которая составляет для разных навигационных систем величину от 30 до 60 с. На рис. 2 приведены типовые результаты решения навигационной задачи (НЗ), полученные с частотой 10 Гц по записанному 21.12.2016 г. в 15:26:24 UTC (SU) в Санкт-Петербурге (координаты 30,290 в.д. и 59,960 с.ш.) сигналу. На рис. 3 показано соответствующее указанной выборке расположение используемых в решении НКА в верхней полусфере относительно координат опорной точки.

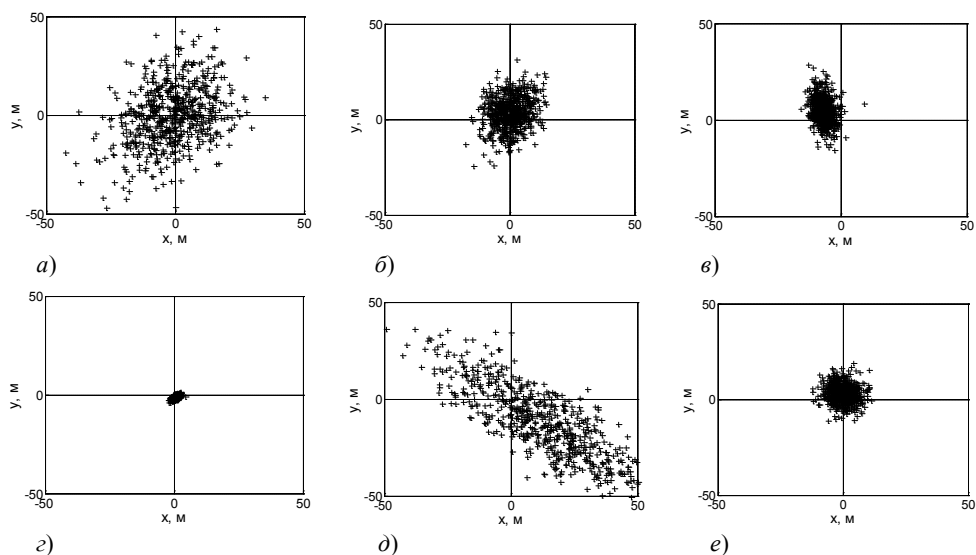


Рис. 2. Результаты решения навигационной задачи:
 а) по ГНСС ГЛОНАСС; б) по ГНСС GPS; в) по ГНСС BeiDou;
 г) по ГНСС Galileo; д) по ГНСС IRNSS; е) при совместном решении (безвесовой МНК)

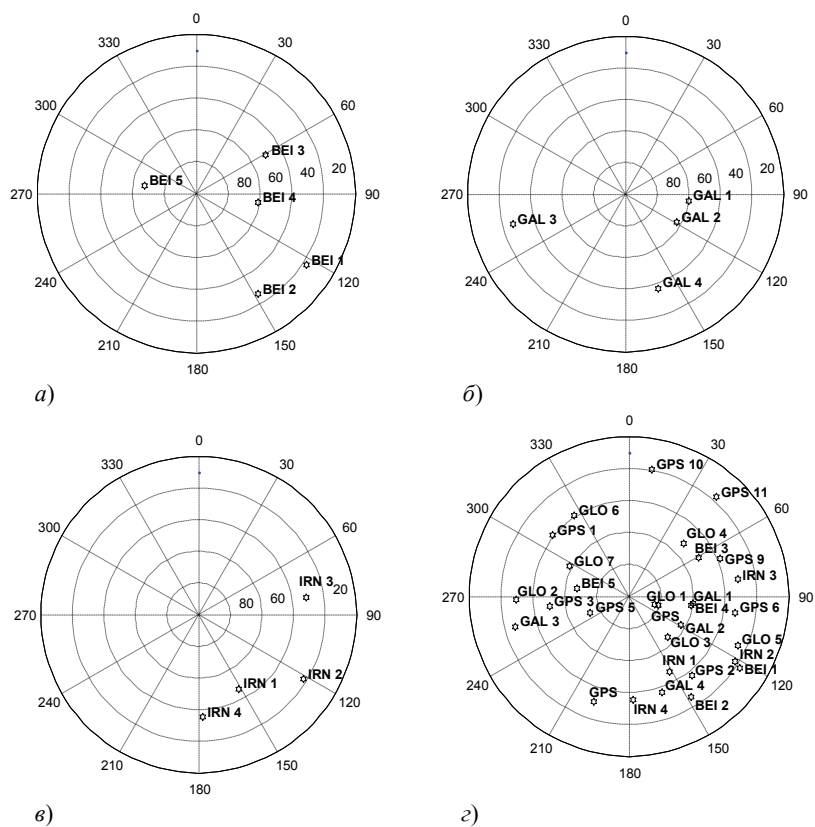


Рис. 3. Расположение НКА в верхней полусфере относительно координат опорной точки:
 а) ГНСС BeiDou; б) ГНСС Galileo; в) ГНСС IRNSS; г) при совместном решении

В различных вариантах решения навигационной задачи использовались сигналы открытого доступа всего от 30 НКА (табл. 2), из которых ГЛОНАСС – семь НКА, GPS – десять НКА, BeiDou – пять НКА, Galileo – четыре НКА и IRNSS – четыре НКА. Следует отметить, что в решении применялись сигналы GPS только L1 диапазона, хотя были обнаружены также сигналы в диапазоне L5 от четырех НКА BLOCK IIF, но в навигационном сообщении этих НКА был установлен признак «L5 HEALTH = 1» – «Signal bad or unavailable».

Т а б л и ц а 2

Результаты решения навигационной задачи

	ГЛОНАСС	GPS	BeiDou	Galileo	IRNSS	Совместное решение (безвес.)	Совместное решение (вес.)
Диапазон, f_0 , МГц	L1 1602	L1 1575,42	B2 1207,14	E5a 1176,45	L5 1176,45		
Сигнал	СТ	С/А	B2I	E5aI	SPS		
Число НКА	7	10	5	4	4	30	30
Сигнал / шум, дБ	18,1	16,8	17,3	21,2	15,5	–	–
ΔP , м	4,2229	3,7454	9,1584	7,3413	24,7383	5,1408	10,4115
σ_P , м	28,7783	16,9229	12,0290	3,8543	47,3354	8,8851	4,0175
PDOP	2,0300	1,6290	3,9319	10,6100	6,3093	0,9242	

В табл. 2, 3 обозначения ΔP , σ_P соответствуют смещению и среднеквадратической погрешности (СКП) полученного решения $[X_i, Y_i, Z_i]$ относительно опорной точки с известными координатами $[X_0, Y_0, Z_0]$:

$$\Delta P = \sqrt{(\bar{X} - X_0)^2 + (\bar{Y} - Y_0)^2 + (\bar{Z} - Z_0)^2},$$

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2},$$

где $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$, $\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$, $\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i$; N – количество решений.

Т а б л и ц а 3

Результаты решения навигационной задачи (продолжение)

	ГЛОНАСС +GPS (безвес.)	ГЛОНАСС +GPS (вес.)	ГЛОНАСС +GPS +IRNSS (безвес.)	ГЛОНАСС +GPS +IRNSS (вес.)	ГЛОНАСС +GPS +IRNSS +BeiDou (безвес.)	ГЛОНАСС +GPS +IRNSS +BeiDou (вес.)
Число НКА	17	17	21	21	26	26
ΔP , м	2,5256	2,1221	1,8313	1,6116	4,1252	5,7571
σ_P , м	16,5634	13,8580	15,4144	12,6839	11,7753	8,7047
PDOP	1,2030		1,1561		1,0010	

Отношение «сигнал–шум» на выходе коррелятора (табл. 2) является средним значением по всем наблюдаемым и используемым при решении НКА одной системы. Величина геометрического фактора ухудшения точности определения пространственного положения (position dilution of precision – PDOP), смещение и СКП, указанные в табл. 2, 3, получены путем осреднения результатов решения навигационной задачи с использованием более двухсот 60-секундных записей навигационного сигнала, сделанных в разное время суток в период с сентября по декабрь 2016 г.

Перед решением НЗ осуществлялась модельная компенсация атмосферных погрешностей измерений. Для компенсации ионосферной погрешности использовалась модель Клобучара с коэффициентами, выделенными из навигационного сообщения ГНСС GPS. Тропосферная погрешность оценивалась с помощью модели Саастаймонена. Использование двухчастотного метода компенсации ионосферной погрешности позволяет существенно повысить точность навигационных определений. Так, например, при навигационных определениях НАП фирмы JAVAD (в составе мобильной контрольно-корректирующей станции) на девятисуточном интервале в апреле 2017 года по системе GPS в двухчастотном режиме величина смещения составила 0,778 м, а СКП – 1,559 м. В одночастотном режиме СКП увеличилось до 2,637 м, а величина смещения – до 3,509 м. Таким образом, реализацию двухчастотного режима следует рассматривать в качестве основного направления при модернизации программного приемника с целью повышения точности навигационных определений.

Навигационная задача решалась двумя способами: безвесовым и взвешенным методами наименьших квадратов (МНК) в системе координат ПЗ-90.11, без дополнительной фильтрации решений. При использовании взвешенного МНК веса рассчитывались как величины, обратно пропорциональные оценкам дисперсий шумов измерений, получаемых из каналов измерений программного приемника. Стоит заметить, что применение безвесового МНК при совместном решении является некорректным, однако он используется во многих образцах современных навигационных приемников [13–17].

Возможность осуществлять прием навигационных сигналов от 30 НКА (табл. 2) обеспечивает преимущество мультисистемной НАП при работе в условиях ограниченной видимости НКА. Для демонстрации такой возможности проведено моделирование условий ограниченной видимости НКА для двух случаев (табл. 4 и рис. 4) и оценено качество решения НЗ. Смещение и СКП, приведенные в табл. 4, так же как и в табл. 2 и 3, получены путем осреднения результатов по множеству 60-секундных записей, а на рис. 4 – по той же записи, что и на рис. 2 и 3. В качестве условий ограниченной видимости выбраны две различные зоны радиовидимости, вытянутые с севера на юг и с запада на восток. В обоих случаях решение по одной системе (не менее четырех НКА) возможно лишь по GPS, причем точность решения (СКП) при мультисистемной обработке улучшается со значений 26,23 до 9,79 м и с 33,22 до 7,90 м для первого и второго случая соответственно.

Т а б л и ц а 4

Результаты решения навигационной задачи в условиях ограниченной видимости

Решение	Зона видимости из рис. 4, в		Зона видимости из рис. 4, е	
	GPS	Совместное (вес.)	GPS	Совместное (вес.)
Число НКА	4	13	5	16
ΔP , м	3,9077	10,7509	8,2224	14,9072
σ_P , м	26,2308	9,7892	33,2202	7,9036
PDOP	2,7741	1,8097	3,8033	1,9442

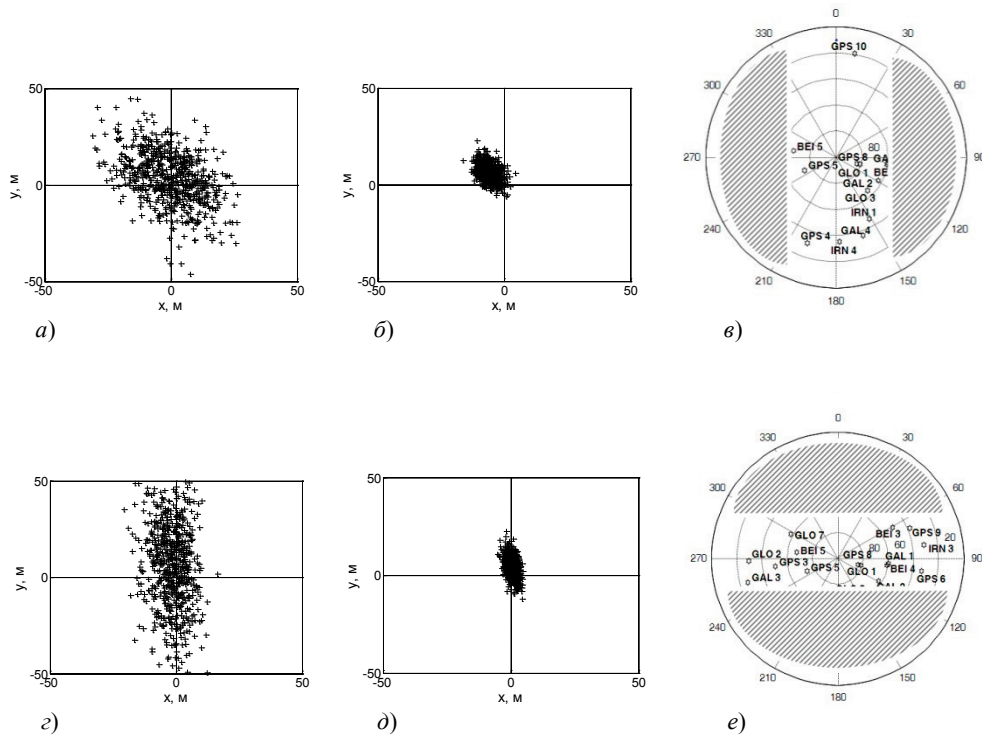


Рис. 4. Результаты решения навигационной задачи при ограниченной видимости: а), с) по ГНСС GPS; б), д) при совместном решении; е), е) расположение НКА

По результатам решения навигационной задачи ПМНП можно сделать следующие выводы.

1. ПМНП позволяет делать оценку реальных характеристик точности позиционирования и доступности навигационных систем как по отдельности, так и в различных сочетаниях. Состав используемых навигационных систем и их функциональных дополнений определяется потребителем в зависимости от характера решаемых задач, возможности приема навигационных сигналов с учетом реальной видимости спутников и помеховой обстановки.

2. Анализ результатов решения навигационной задачи по созвездиям НКА отдельных навигационных систем показывает, что значение погрешности определения местоположения не превышает 10 м за исключением РНСС IRNSS. Повышенная погрешность навигационных определений в РНСС IRNSS ($\Delta P = 24,7$ м) обусловлена большой величиной геометрического фактора, вызванной расположением НКА IRNSS в достаточно узком телесном угле, и значительными погрешностями измерений. Наименьшая среднеквадратическая погрешность навигационного решения обеспечивается ГНСС Galileo ($\sigma_P = 3,9$ м), несмотря на плохой геометрический фактор ($PDOP = 10,6$), что свидетельствует о высокой точности измерения псевдодальностей. Полученный результат объясняется на порядок более широкой полосой принимаемых сигналов ГНСС Galileo ($\Delta f = 20,46$ МГц) по сравнению с принимаемыми сигналами других систем и высокой стабильностью бортовых опорных генераторов.

3. В совмещенном режиме на северо-западе Российской Федерации (на момент проведения эксперимента) наблюдению доступны открытые сигналы 30 НКА различных навигационных систем. Достижимое значение геометриче-

ского фактора на рассматриваемый момент времени составляет 0,92, что на 43% ниже по сравнению с наименьшим геометрическим фактором, полученным по созвездию НКА GPS. Рассматриваемый совмещенный способ приема и обработки сигналов всех наблюдаемых НКА обеспечивает потенциально лучшую доступность навигационного поля даже в условиях ограниченной видимости НКА.

4. Ввиду отмеченных выше особенностей решения НЗ величины смещения и СКП, характеризующие его качество, равные $\Delta P = 5,1$ м, $\sigma_P = 8,9$ м (для безвесового МНК) и $\Delta P = 10,4$ м, $\sigma_P = 4,0$ м (взвешенного МНК), получились несколько хуже по сравнению с минимальными величинами $\Delta P = 3,7$ м (GPS) и СКП $\sigma_P = 3,9$ м (Galileo). Незначительно худший результат по СКП объясняется точностью самих оценок дисперсий случайной погрешности измерений псевдодальностей, получаемых на ограниченном временном интервале в предположении о нормальном их распределении. Увеличение величины смещения по отношению к GPS связано, во-первых, с погрешностями эфемеридно-временного обеспечения различных ГНСС, а во-вторых, с неучтенной погрешностью, обусловленной различной величиной группового времени запаздывания в радиотракте используемых диапазонов частот (L1, L5, B2, E5a).

Необходимо заметить, что использование двухчастотного режима или корректирующей информации от локальных или широкозонных дифференциальных подсистем (ШДПС) потенциально обеспечит уменьшение систематических погрешностей измерений и, соответственно, смещения ΔP в определении координат по сравнению с рассмотренными вариантами решения навигационной задачи. Однако такие способы уменьшения погрешностей позиционирования применяются в основном потребителями немассового сегмента для решения топогеодезических и специальных задач, за исключением использования информации ШДПС. Кроме этого, информация EGNOS имеет ограниченную доступность даже на территории северо-западного региона (корректирующая информация относится только к НКА GPS, а сетка ионосферных задержек формируется до 30 град. в.д.). Навигационное сообщение типа 9 спутников системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), содержащее данные об эфемеридах и частотно-временных поправках, передается для обеспечения совместимости с ранее выпущенным навигационным оборудованием для системы WAAS и не предназначено для навигационных измерений. Поэтому в данной статье использование ШДПС не рассматривается.

5. На северо-западе Российской Федерации возможны навигационные определения по сигналам ГНСС BeiDou и РНСС IRNSS. Использование этих навигационных систем в совмещенном режиме позволяет уменьшить СКП навигационного решения, что особенно заметно при взвешенной обработке.

Заключение

В работе на основе натурных экспериментов с макетом программного мультисистемного навигационного приемника подтверждено, что совместная обработка сигналов глобальных и региональной спутниковых систем позволяет уменьшить значение геометрического фактора и повысить точность навигационных определений, особенно в условиях ограниченной видимости спутников. Технология программной обработки сигналов ГНСС в мультисистемном приемнике позволяет уменьшить общее требуемое число каналов за счет оптимизации их распределения между спутниками различных навигационных систем

с сохранением точностных характеристик навигационной аппаратуры потребителя. Увеличение канальности мультисистемного программного приемника должно обеспечить обработку изменений на дополнительных частотах и данных функциональных дополнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. **Borre K., Akos D.M., Bertelsen N., Rinder P., Jensen S.H.** A Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach, Boston, Birkhäuser, 2007.
3. **Suzuki T., Kubo N.** GNSS-SDRLIB: An Open-Source and Real-Time GNSS Software Defined Radio Library, Tokyo University of Marine Science and Technology, *The 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation ION GNSS+*, 2014.
4. **Lackey R.J. and Upmal D.W.** Speakeasy: The Military Software Radio, *IEEE Communications Magazine*, May 1995, pp. 56–61.
5. **Akos D. M., Normark P. L., and Enge P.** Real-time GPS Software Radio Receiver, Proc. ION-GPS NTM 2001, Jan. 2001, Long Beach, CA.
6. **Tsui J.** Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. Wiley-Interscience, ISBN 0471712574, 2004
7. **Thompson E., Clem N., Loos T., and Renninger I.** Software-Defined GPS Receiver on USRP-Platform. *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 35, no. 4, pp. 1352–1360, July 2012.
8. **Гаврилов А.И.** Программный приемник ГЛОНАСС // *Инженерный вестник*. 2012. № 9.
9. **Бахолдин В.С., Герасименко И.С., Добриков В.А. и др.** Прием и обработка сигналов первого навигационного спутника системы «Galileo» // *Труды ИПА РАН*. 2007. Вып. 17. С. 148–156.
10. **Авдеев В.А., Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А. и др.** Прием навигационных сигналов с кодовым разделением ГНСС ГЛОНАСС в частотном диапазоне L3 // *Труды ИПА РАН*. 2012. Вып. 23. С. 307–310.
11. **Авдеев В.А., Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А. и др.** Программный прием и обработка сигналов навигационной системы «COMPASS» // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2014. Т. 57. № 3. С. 40–43.
12. **Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А., Добриков В.А.** Программный прием и обработка сигналов индийской региональной навигационной спутниковой системы в Санкт-Петербурге // *Радиопромышленность*. № 4. 2016. С. 80–84.
13. **Thombre S., Zahidul M., Bhuiyan H., Sonderholm S., Kirkko-Jaakkola M., Ruotsalainen L., Kuusniemi H.** Tracking IRNSS Satellites for Multi-GNSS Positioning in Finland, *InsideGNSS*, № 11–12, 2014, pp. 52–56.
14. **Hein, G., T. Pany, S. Wallner and J.-H. Won** Platforms for a Future GNSS Receiver, *Inside GNSS*, March 2006, pp. 56–62.
15. **Liu X., Kountouriotis J., Petropulu A., and Dandekar K.** ALOHA With Collision Resolution (ALOHA-CR): Theory and Software Defined Radio Implementation, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 8, pp. 4396–4410, Aug. 2010.
16. **Babu R.** Web-based resources on software GPS receivers, *GPS Solutions*, vol. 9, no. 3, Sept. 2005, pp. 240–242.
17. **Gunawardena S. A.** Universal GNSS Software Receiver MATLAB Toolbox for Education and Research, *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GNSS+*, 2013.

Bakholdin V.S., Gavrilov D.A., Gerasimenko I.S., Dobrikov V.A., Ivanov V.F. (Mozhaiskiy Military Space Academy, St. Petersburg, Russia).

Results of Software-Based Joint Processing of Signals from Global and Regional Navigation Satellite Systems. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2017. Vol. 25. No. 4. P. 84–94.

Abstract. The paper addresses software-based joint processing of signals from global (GLONASS, GPS, BeiDou, Galileo) and regional (IRNSS) navigation satellite systems.

General block diagram of an implemented model of software-based multisystem navigation receiver is presented, and its capability to process the signals from navigation systems are studied.

As a result of software processing, separate and joint navigation solutions were computed for the signals from 30 spacecraft of 5 different navigation systems used in the North-West of the Russian Federation. The accuracy of these solutions, as well as the values of horizontal dilution of precision are analyzed in the paper.

Key words: navigation satellite system, software-based digital processing of signals, multisystem navigation receiver.

REFERENCES

1. **GLONASS.** *Printsiipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of Construction and Functioning), Perov, A.I., and Kharisov, V.N., Eds., Moscow, Radiotekhnika, 2010.
2. **Borre, K., Akos, D.M., Bertelsen, N., Rinder, P., and Jensen, S.H.,** A Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach, Boston, Birkhäuser, 2007.
3. **Suzuki, T., and Kubo, N.,** GNSS-SDRLIB: An Open-Source and Real-Time GNSS Software Defined Radio Library, Tokyo University of Marine Science and Technology, *The 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation ION GNSS+*, 2014.
4. **Lackey, R.J., and Upmal, D.W.,** Speakeasy: The Military Software Radio, *IEEE Communications Magazine*, May 1995, pp. 56–61.
5. **Akos, D.M., Normark, P. L., and Enge, P.,** Real-time GPS Software Radio Receiver, Proc. ION-GPS NTM 2001, Jan. 2001, Long Beach, CA.
6. **Tsui, J.,** Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach, Wiley Interscience, 2004.
7. **Thompson, E., Clem, N., Loos, T., and Renninger, I.,** Software-Defined GPS Receiver on USRP-Platform. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, vol. 35, no. 4, pp. 1352–1360.
8. **Gavrilov, A.I.,** Programmnyi priemnik GLONASS (Software GLONASS Receiver), *Inzhenernyi vestnik*, 2012, no. 9, p. 16.
9. **Bakholdin, V.S., Gerasimenko, I.S., Dobrikov, V.A. et al.,** Priem i obrabotka signalov pervogo navigatsionnogo sputnika sistemy “Galileo” (Receiving and Processing the Signals from the First Navigation Satellite of Galileo System), *IAA RAS Journal*, 2007, no. 17, pp. 148–156.
10. **Avdeev, V.A., Bakholdin, V.S., Gavrilov, D.A. et al.,** Priem navigatsionnykh signalov s kodovym razdeleniem GNSS GLONASS v chastotnom diapazone L3 (Acceptance of Navigation Signals with Code Division GNSS GLONASS in Frequency Range L3), *IAA RAS Journal*, 2012, no. 23, pp. 307–310.
11. **Avdeev, V.A., Bakholdin, V.S., Gavrilov, D.A. et al.,** Programmnyi priem i obrabotka signalov navigatsionnoi sistemy “COMPASS” (Software-Based Receiving and Processing the Signals from COMPASS Navigation System), *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 3, pp. 40–43.
12. **Bakholdin, V.S., Gavrilov, D.A., and Dobrikov, V.A.,** Programmnyi priem i obrabotka signalov indiiskoi regional’noi navigatsionnoi sputnikovoi sistemy v Sankt-Peterburge (Software-Based Receiving and Processing the Signals from Indian Regional Navigation Satellite System in St. Petersburg), *Radiopromyshlennost’*, 2016, no. 4, pp. 80–84.

13. **Thombre, S., Zahidul, M., Bhuiyan, H., Sonderholm, S., Kirkko-Jaakkola, M., Ruotsalainen, L., and Kuusniemi, H.**, Tracking IRNSS Satellites for Multi-GNSS Positioning in Finland, *Inside GNSS*, 2014, no. 11–12, pp. 52–56.
14. **Hein, G., Pany, T., Wallner, S., and Won, J.-H.**, Platforms for a Future GNSS Receiver, *Inside GNSS*, March 2006, pp. 56–62.
15. **Liu, X., Kountouriotis, J., Petropulu, A., and Dandekar, K.**, ALOHA With Collision Resolution (ALOHA-CR): Theory and Software Defined Radio Implementation, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, vol. 58, no. 8, pp. 4396–4410.
16. **Babu, R.**, Web-Based Resources on Software GPS Receivers, *GPS Solutions*, 2005, vol. 9, no. 3, pp. 240–242.
17. **Gunawardena, S.A.**, Universal GNSS Software Receiver MATLAB Toolbox for Education and Research, *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*, ION GNSS+, 2013.

Материал поступил 15.03.2017