

Мультисистемный программный приемник глобальных и региональных навигационных спутниковых систем

**© В. С. Бахолдин, Д. А. Гаврилов, И. С. Герасименко,
В. А. Добриков, В. Ф. Иванов**

ВКА им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

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

Представлена обобщенная структурная схема реализованного макета мультисистемного программного навигационного приемника и рассмотрены его возможности по обработке сигналов навигационных систем в 4 частотных диапазонах: L1 ГЛОНАСС/ GPS, E5a Galileo (L5 IRNSS) и E5b Galileo (B2 BeiDou).

В результате программной обработки получены отдельное и совместное решение навигационной задачи по сигналам 30 космических аппаратов 5 различных навигационных систем, принятым на северо-западе Российской Федерации. Проанализированы точность полученных решений и значения величин геометрического фактора.

Ключевые слова: мультисистемный программный приемник, навигационные сигналы, глобальная навигационная спутниковая система.

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 региональная навигационная спутниковая система (РНСС) IRNSS, имеющая в составе своей группировки 7 НКА. Таким образом, в настоящее время для решения задач координатно-временного и навигационного обеспечения потенциально могут использоваться более 100 НКА, при этом в зоне радиовидимости наземного потребителя имеется возможность одновременного приема сигналов более 40 НКА в двух или в трех частотных диапазонах. Это делает актуальным создание мультисистемных навигационных приемников, способных работать в любом из существующих частотных

диапазонов с различными типами навигационных систем и имеющих в своем составе более 100 каналов.

Для отработки технологии совместной обработки множества сигналов целесообразно использовать программный подход к построению навигационной аппаратуры потребителей (НАП), обладающий несомненными преимуществами [1–3]. Обобщенная структурная схема макета программного мультисистемного навигационного приемника (ПМНП) представлена на рис. 1.

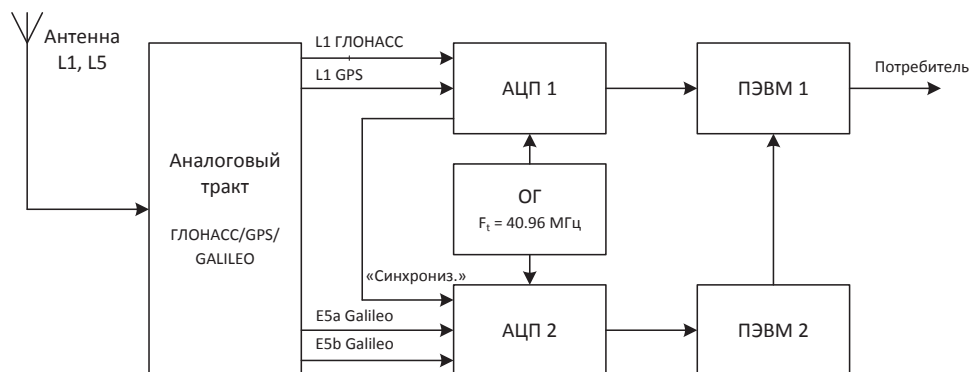


Рис. 1. Обобщенная структурная схема макета ПМНП

Макет ПМНП содержит следующие основные элементы:

- блок антенный с малозумящим усилителем, работающий в частотных диапазонах L1 ГЛОНАСС, L1 GPS, E5a и E5b Galileo (производство ЗАО «КБ НАВИС»);
- аналоговый тракт GPS/GLONASS/GALILEO, преобразующий сигналы каждого из диапазонов на соответствующую промежуточную частоту (ПЧ) 10...20 МГц (производство ЗАО «КБ НАВИС»);
- две двухканальные платы 14-битных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с частотой дискретизации $f_T = 40.96$ МГц (PDA14, производство Signatec);
- опорный генератор, формирующий общую тактовую частоту для каждой платы АЦП;
- два персональных компьютера, осуществляющих запись оцифрованных сигналов на RAID накопители.

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 [2–3] в среде MatLab.

Ниже приводятся результаты обработки сигнала, записанного 21.12.2016 г. в 15:26:24 UTC(SU) в г. Санкт-Петербурге (координаты антенны: 30.29 °в. д. и 59.96 °с. ш.). Поиск сигналов НКА осуществлялся 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 выполнялось 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 использовался 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 обрабатывался сигнал длительностью 60 секунд, что обусловлено длительностью кадров (субкадров), которая составляет для разных навигационных систем величину от 30 до 60 секунд.

Реализованный макет ПМНП позволяет обрабатывать сигналы ГНСС и РНСС [4–7], указанные в табл. 1. Особенностью макета является использование аппаратной части, изначально предназначенной для приема сигналов в 4-х частотных диапазонах.

Результаты решения навигационной задачи (НЗ), полученные с частотой 10 Гц по сигналам открытого доступа, представлены в табл. 2, 3 и на рис. 2.

В различных вариантах решения навигационной задачи использовались сигналы открытого доступа от 30 НКА (табл. 2), из которых ГЛОНАСС — 7 НКА, GPS — 10 НКА, BeiDou — 5 НКА, Galileo — 4 НКА и IRNSS — 4 НКА. Следует отметить, что в решении применялись сигналы GPS только L1 диапазона, хотя также были обнаружены 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».

Таблица 1

Сигналы навигационных спутниковых систем,
прием и обработка которых реализована в ПМНП

№ 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 приведенных в табл. 2, 3 результатах обозначения ΔP , σ_R соответствуют среднему смещению и среднеквадратической погрешности (СКП) полученного решения $[X_i, Y_i, Z_i]$ относительно опорной точки с известными координатами $[X_0, Y_0, Z_0]$; отношение сигнал/шум на выходе коррелятора приведено в дБГц; $\min \sigma_R$, $\max \sigma_R$, $\text{mean } \sigma_R$, — минимальное, максимальное и среднее значения СКП измерений псевдодалности.

Отношение сигнал/шум на выходе коррелятора (табл. 2) является средним значением по всем наблюдаемым и используемым при решении НКА одной системы. Большая погрешность измерений псевдодалности обусловлена использованием кодовых измерений без фильтрации (сглаживания).

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.

Навигационная задача решалась двумя способами: безвесовым и взвешенным методом наименьших квадратов (МНК) в системе координат ПЗ-90.11 без дополнительной фильтрации решений. При использовании взвешенного МНК веса рассчитывались обратно пропорциональными дисперсиям шумов измерений, получаемых из каналов измерений программного приемника.

Таблица 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	C/A	B2I	E5aI	SPS		
Кол-во НКА	7	10	5	4	4	30	30
Сигнал/шум, дБГц	47.49	45.86	46.38	51.03	45.38	—	—
$\min \sigma_R$, м	1.79	0.73	0.41	0.07	1.36	—	—
$\max \sigma_R$, м	19.86	12.68	5.31	1.06	8.76	—	—
$\text{mean } \sigma_R$, м	6.39	3.71	1.76	0.18	3.76	—	—
ΔP , м	4.2229	3.7454	9.1584	7.3413	24.7383	5.1408	10.4115
σ_R , 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	0.9242

Такие способы решения НЗ позволяют проследить влияние на точность определения местоположения первичных факторов: геометрического фактора (ГФ) и погрешности измерения псевдодалности, случайная составляющая которой зависит от ширины спектра сигнала и отношения сигнал/шум на выходе согласованного фильтра.

Дополнительно, для пояснения величин ГФ, на рис. 3 приведено расположение используемых в решении НКА в верхней полусфере относительно координат опорной точки.

Таблица 3

Результаты решения навигационной задачи взвешенным МНК

	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	

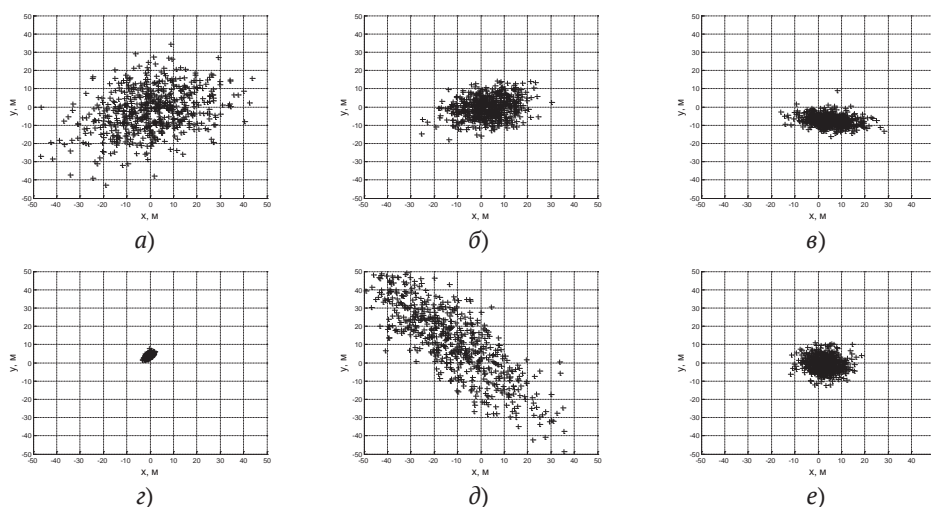


Рис. 2. Результаты решения навигационной задачи:
 а) по ГНС ГЛОНАСС; б) по ГНС GPS; в) по ГНС BeiDou;
 г) по ГНС Galileo; д) по РНС IRNSS; е) при совместном решении

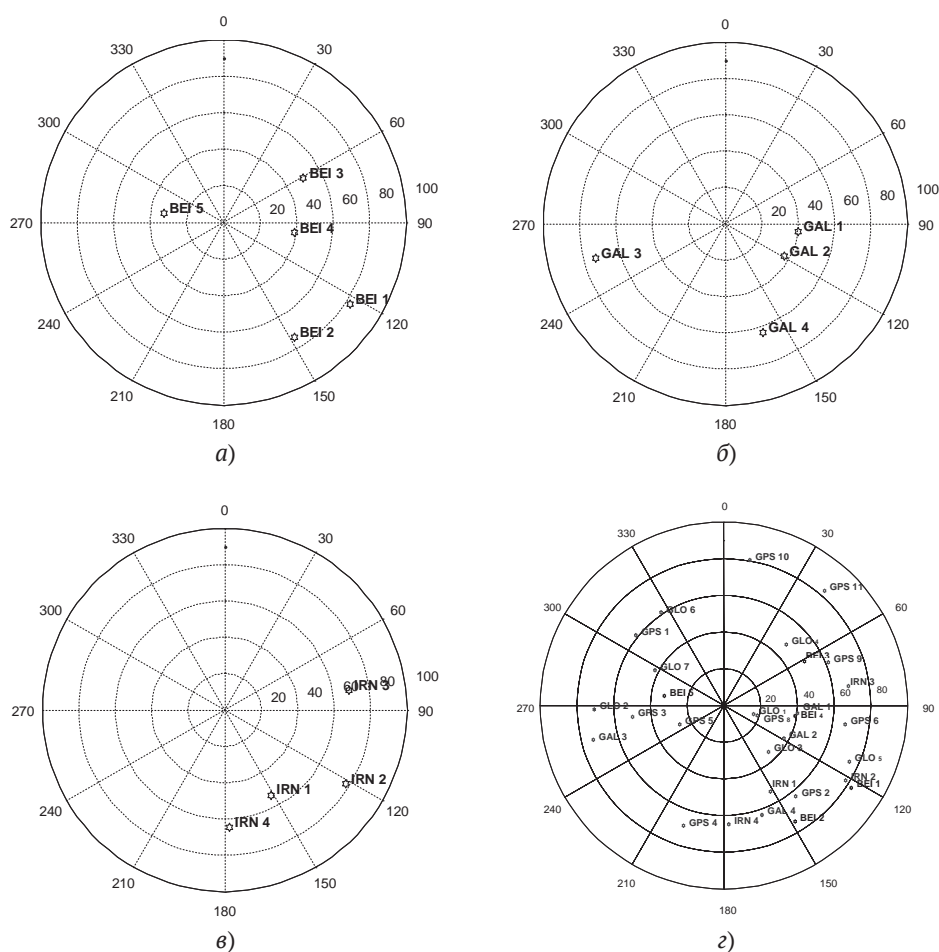


Рис. 3. Расположение НКА в верхней полусфере относительно координат опорной точки: а) ГНСС BeiDou; б) ГНСС Galileo; в) ГНСС IRNSS; г) при совместном решении

По результатам экспериментальных исследований, полученных в ходе написания статьи, можно сделать следующие выводы:

1. Все рассмотренные в статье сигналы успешно принимаются и обрабатываются средствами программного приемника на северо-западе Российской Федерации.

2. Анализ результатов решения навигационной задачи по созвездиям НКА отдельных навигационных систем показывает, что среднее значение абсолютной ошибки определения местоположения ΔP не превышает 10 м, за исключением РНСС IRNSS. Повышенная ошибка навигационных определений в РНСС IRNSS ($\Delta P = 24.7$ м) обусловлена большой величиной геометрического фактора и остаточными некомпенсированными атмосферными погрешно-

стями. Наименьшая среднеквадратическая погрешность навигационного решения обеспечивается ГНСС Galileo ($\sigma_p = 3.9$ м), что при высоком геометрическом факторе (PDOP = 10.6) 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.

3. В совмещенном режиме на северо-западе Российской Федерации на момент проведения эксперимента наблюдению доступны открытые сигналы 30 НКА различных навигационных систем. Достижимое значение геометрического фактора на рассматриваемый момент времени равен 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 (в условиях городской застройки, в горной местности, в лесу и т. д.). Ввиду отмеченных выше особенностей решения НЗ величины смещения и СКП, характеризующие его качество, равные $\Delta P = 5.1$ м и $\sigma_p = 8.9$ м, являются вполне закономерными и сбалансированными несколько больше минимальных величин $\Delta P = 3.7$ м (GPS) и СКП $\sigma_p = 3.8$ (Galileo).

Литература

1. *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. — 135 p.

2. *Гаврилов Д. А., Добриков В. А.* Программный прием и обработка сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. — 2016. — № 652. — С. 16–22.

3. Пат. 2336631 Рос. Федерация, МПК G01S 5/00. Способ программной обработки буферизованных выборок оцифрованных сигналов и мультисистемный многоканальный программный приемник реального времени сигналов спутниковых навигационных систем и систем их поддержек для его осуществления / Бабаков В. Н., Дубинко Ю. С., Лукьяненко Н. В. и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «КБ НАВИС» [Электронный ресурс] // ФИПС. — Заявл. 21.07.06; опубл. 20.10.08, Бюл. № 29. — URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (дата обращения: 20.03.2018).

4. *Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Герасименко И. С. и др.* Программный приемник сигналов спутниковых навигационных систем на базе СБИС K1879KX1Я // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2004. — Вып. 23. — С. 230–235.

5. *Бахолдин В. С., Герасименко И. С., Добриков В. А. и др.* Прием и обработка сигналов первого навигационного спутника системы «Galileo» // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2007. — Вып. 17. — С. 148–156.

6. *Авдеев В. А., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А. и др.* Программный прием и обработка сигналов навигационной системы «COMPASS» // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — СПб.: СПбГУИТМО, 2014. — Т. 57, № 3. — С. 40–43.

7. *Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Добриков В. А.* Программный прием и обработка сигналов индийской региональной навигационной спутниковой системы в Санкт-Петербурге // Радиопромышленность. — М.: АО «ЦНИИ «Электроника», 2016. — № 4. — С. 80–84.

A Multisystem Software Receiver of the Global and Regional Navigation Satellite Systems

**V. S. Baholdin, D. A. Gavrilov, I. S. Gerasimenko,
V. A. Dobrikov, V. F. Ivanov**

A joint software processing the signals received from the global (GLONASS, GPS, BeiDou, Galileo) and regional (IRNSS) navigation satellite systems are considered in this article.

A generalized block diagram of the realized model of the software-defined multisystem navigation receiver is presented. Its possibilities to process signals of the navigation systems are considered in four frequency beams: L1 GLONASS/GPS, E5a Galileo (L5 IRNSS) and E5b Galileo (B2 BeiDou).

Separate and joint solutions are worked out as a result of processing the signals received in the northwest of the Russian Federation from 30 satellites of 5 different navigation systems. The accuracy of the obtained solutions and values of the geometric dilution of precision are analyzed.

Keywords: multisystem software-defined receiver, navigation signals, global navigation satellite system.