

Приемники GNSS

для спутниковых навигационных систем GPS/GLONASS

Федеральный закон ФЗ-78 и приказы Министерства транспорта РФ № 36 и № 285 обя-зывают оснастить определенные категории грузового транспорта системами навигации ГЛОНАСС российского производства. Предполагается законодательно обязать всех частных автовладельцев России установить бортовое оборудование ЭРА-ГЛОНАСС к 2020 г. Возникает закономерный вопрос — а почему нужно использовать именно совмещенный навигатор российского производства ГЛОНАСС/GPS, если есть хорошо зарекомендовавшие себя во всем мире приемники спутниковой навигации GPS/Galileo/GLONASS, которые стоят на порядок дешевле? В статье рассматриваются базовые принципы построения приемников спутниковых сигналов, используемых в системах ГЛОНАСС и GPS.

Виктор Алексеев, к. ф.-м. н.
victor.alexeev@telemetry.spb.ru

Приемники ГНСС для совместной работы различных систем спутниковой навигации

В настоящее время в мире существуют две основные, полностью задействованные спутниковые навигационные системы (СНС):

- GPS (NAVSTAR) — США. Полная функциональность.
- ГЛОНАСС — Россия. Полная функциональность.

Кроме того, четыре СНС сейчас находятся на разных уровнях испытаний и разработки:

- Galileo — ЕЭС. Частичная функциональность (четыре действующих спутника на конец 2012 г.). Планируемая полная функциональность — 2020 г.
- COMPASS (BeiDou -2) — Китай. Частичная функциональность (16 действующих спутников на конец 2012 г.). Планируемая полная функциональность — 2020 г.
- IRNSS — Индия. Состояние разработки.
- QZSS — Япония. Состояние разработки.

В этой статье не рассматриваются другие СНС, кроме ГЛОНАСС и GPS. Принцип работы для всех СНС одинаков и основан на измерении расстояния от исследуемого объекта до спутников, положение которых известно с очень большой точностью. Расстояние вычисляется по времени задержки распространения сигнала от послышки его спутником до получения приемником. В упрощенном варианте, при вычислении координат приемника на основе спутниковых данных решается несложная геометрическая задача, в которой требуется определить параметры многогранника, в узлах которого находятся спутники. Для определения трехмерных координат и высоты приемника нужно знать расстояние, как минимум, до четырех спутников, а также точное мировое время. Для

определения координат необходимо использовать сигналы еще одного дополнительного спутника. Чем больше используется спутников и чем сложнее геометрическая фигура, образованная спутниками, тем точнее можно определить координаты приемника. Эта идея положена в основу концепции глобальных навигационных спутниковых систем ГНСС. Поэтому совмещенная система GPS/Galileo/GLONASS/COMPASS, в принципе, должна быть лучше, чем одна система GPS.

В общем случае процесс определения координат с использованием СНС выглядит достаточно просто. В памяти приемника спутниковых сигналов хранятся данные о его координатах — альманах (информация об орбитах всей группировки) и эфемериды (данные о конкретном спутнике). Задача приемника заключается в том, чтобы расшифровать закодированный сигнал и определить, от какого именно конкретного спутника был принят этот сигнал. На практике дело обстоит несколько сложнее, и необходимо учитывать эффект Доплера, а также многолучевые и атмосферные эффекты.

Системы GPS и ГЛОНАСС разрабатывались с учетом использования в разных регионах мира. Поэтому спутники этих двух СНС расположены на разных орбитах. Полная группировка системы ГЛОНАСС состоит из 24 спутников, размещенных равномерно в трех плоскостях, наклоненных на 63° к экваториальной плоскости и разнесенных по долготе на 120°, на круговых околоосинхронных орбитах. Высота орбит ГЛОНАСС — 19 100 км. Спутники GPS размещены равномерно в шести плоскостях с наклоном 55° к экватору; плоскости разнесены по долготе на 60°. Высота орбит GPS равна 20 200 км. Информация о состоянии группировок ГЛОНАСС и GPS постоянно обновляется на сайте [1].

Основные различия между СНС ГЛОНАСС и GPS заключаются в методах кодировки и формате передаваемого сигнала. В системе GPS используются две частоты передачи сигналов, а в системе ГЛОНАСС — два диапазона частот. К существенным различиям нужно отнести также разные математические модели и методы обработки сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS.

В системе GPS используется кодовое разделение каналов (CDMA) [2, 3]. Принцип кодировки сигналов GPS проиллюстрирован на рис. 1.

Каждому спутнику присваивается свой собственный индивидуальный код. Все спутники передают свою индивидуальную информацию на одних и тех же несущих частотах: $L1 = 1575,42$ МГц и $L2 = 1227,60$ МГц. Последние модели спутников передают дополнительную служебную информацию также на частоте $L5 = 1176,45$ МГц. Частота $L1$ получается путем умножения частоты задающего генератора на 154 и модулируется C/A- и P-кодами. Частота $L2$ получается умножением частоты задающего генератора на 120 и модулируется P-кодом. Обе несущие частоты дополнительно модулируются навигационным сообщением. В процессе модуляции точного дальномерного P(Y) кода одновременно формируются метки времени спутникового сигнала. Полностью открытыми для пользователей всего мира являются сигналы спутников GPS с кодами C/A (Coarse/Acquisition, «коды грубого захвата»).

В системе GPS предусмотрена возможность преднамеренного снижения точности определения координат по коду C/A до уровня 100 м. Такое преднамеренное снижение точности может быть введено только по специальному решению правительства США. Точный P-код является основным дальномерным псевдослучайным кодом и уникален для каждого спутника. Прием и обработка сигналов с этим кодом доступны не всем навигационным GPS-приемникам. Для специальных и военных целей в системе GPS вместо P-кода используется Y-код. Сигналы с этим кодом доступны для расшифровки только лицензированными пользователями, имеющими соответствующий ключ. В целом, процесс шифрования сигналов спутников GSM представляет собой довольно сложную задачу. Подробно этот процесс описан в [4].

В системе ГЛОНАСС используется частотное разделение сигналов (FDMA) [5]. Это значит, что каждый спутник передает информацию на своей собственной частоте в виде двух фазоманипулированных сигналов. Иными словами, полезная информация накладывается на несущую частоту путем инверсии фазы на 180° (рис. 2) [5].

Частота первого сигнала $L1 = 1602$ МГц, а частота второго — $L2 = 1246$ МГц. Эти частоты обычно называют «первая» и «вторая» несущие. Шаг по частоте $L1$ оставляет $9/16 = 0,5625$ МГц, а по частоте $L2$ $7/16 = 0,4375$ МГц. Отношение второй и первой частот равно $7/9$. Сигнал в диапазоне $L1$ аналогичен C/A-коду в GPS и доступен для всех потребителей в зоне видимости группировки спутников. Сигнал в диапазоне $L2$ предназначен для военных и специальных применений,

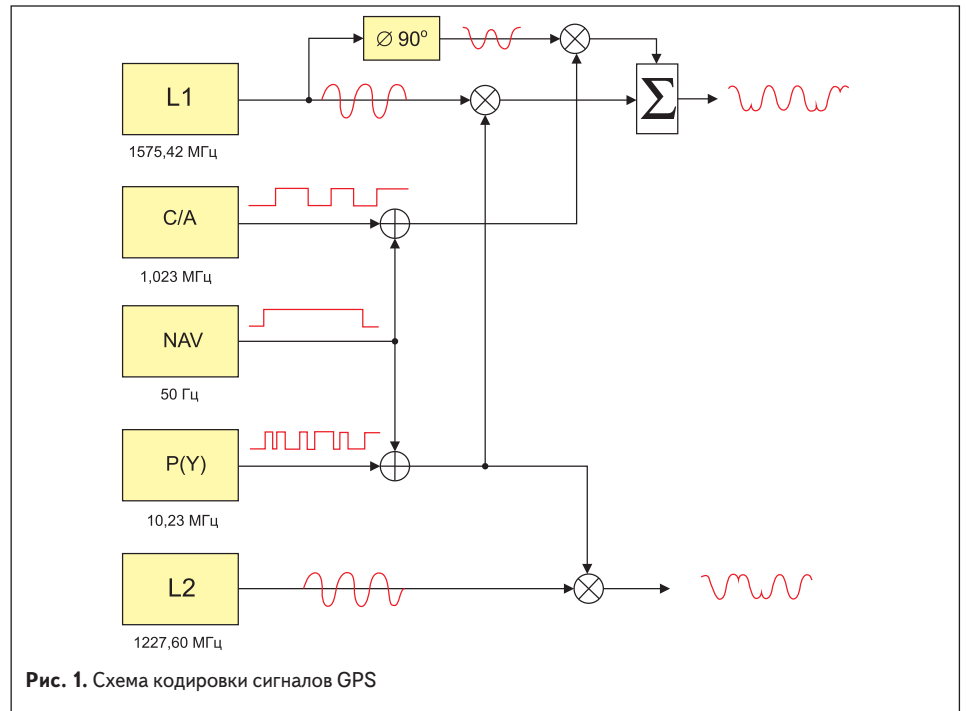


Рис. 1. Схема кодировки сигналов GPS

и его структура не раскрывается. На спутниках ГЛОНАСС последних моделей (серия К) введена дополнительная передача сигнала с кодовым разделением (ПКР) в диапазоне $L3$ (1,2 ГГц). Подробный анализ достоинств и недостатков

ГЛОНАСС и GPS выходит за рамки данной статьи. Важно подчеркнуть, что это две разные системы, для эксплуатации которых необходимо разное оборудование, как наземное, так и космическое.

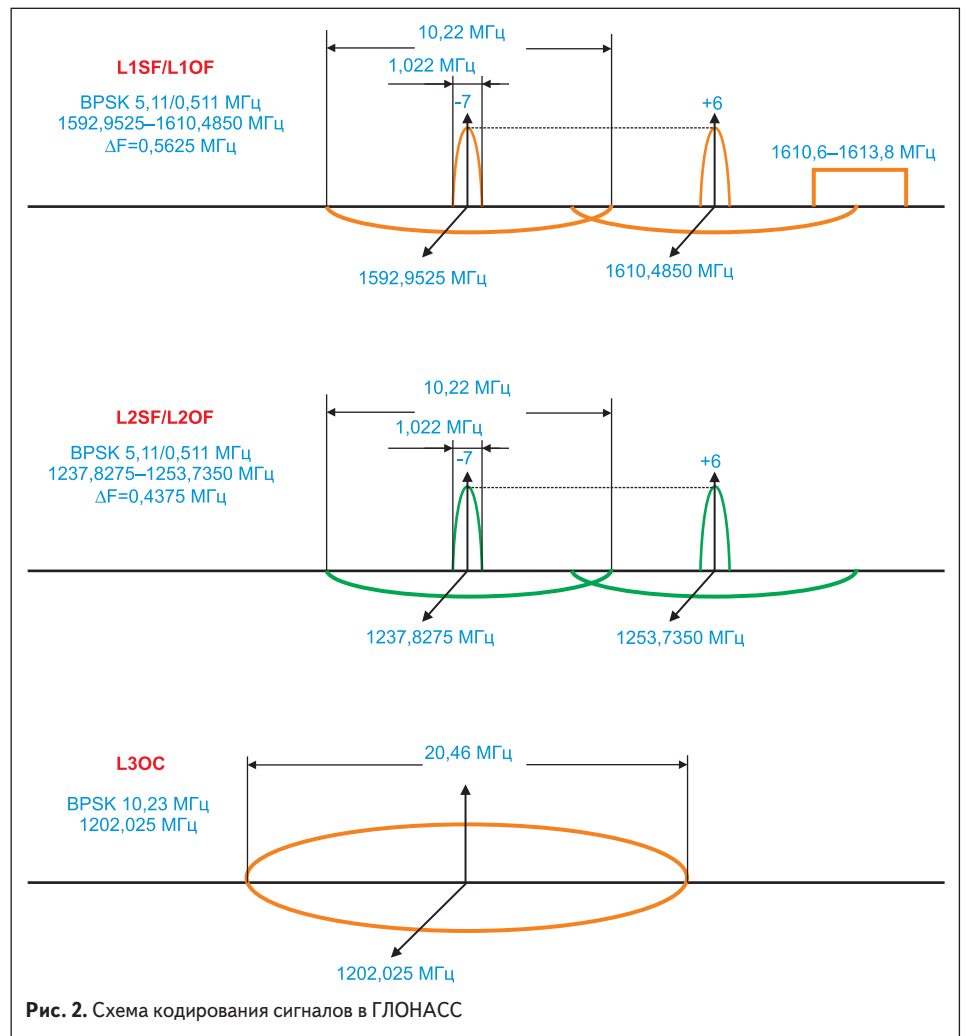


Рис. 2. Схема кодирования сигналов в ГЛОНАСС

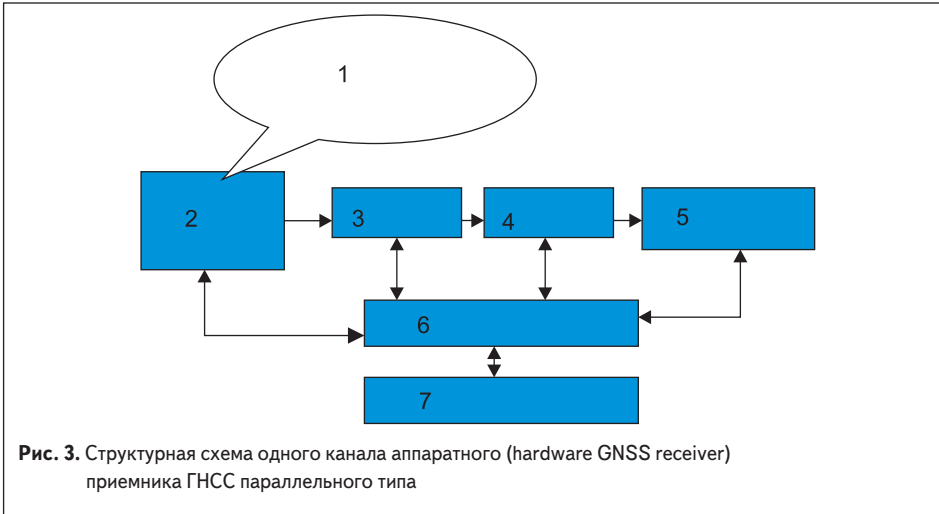


Рис. 3. Структурная схема одного канала аппаратного (hardware GNSS receiver) приемника ГНСС параллельного типа

О системе GPS написано довольно много и подробно, например в [2, 3]. Детальную информацию о системе ГЛОНАСС можно найти в [5]. Детальная информация о сравнительных характеристиках GPS и ГЛОНАСС приведена в [6].

Идея совместного использования различных спутниковых систем была впервые реализована в 1992 г. в рамках создания международной организации IGS (International GPS Service). Позднее появился термин Global Navigation Satellite Systems (GNSS). В русскоязычном варианте вместо GNSS используется сокращение ГНСС — Глобальная Спутниковая Навигационная Система.

В настоящее время International GNSS Service (IGS) представляет собой добровольное объединение более чем 200 организаций, занимающихся сбором данных от спутников различных СНС на постоянно работающих базовых станциях,

расположенных по всему миру, в том числе и в России. Данные с этих станций используются для формирования поправок для работы в режиме дифференциальной коррекции реального времени (DRTK-поправки).

Приемники, используемые в IGS, способные принимать и обрабатывать сигналы различных навигационных спутниковых систем, получили название GNSS-приемников. Все GNSS-приемники работают с ГЛОНАСС- и GPS-сигналами и поддерживают режимы дифференциальной коррекции SBAS (Space Based Augmentation System). Кроме того, существуют DRTK-системы EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service).

В классическом варианте ГНСС-приемник — это электронное устройство, которое получает сигналы от спутников ГНСС, обрабатывает их и выдает цифровые сигналы, необходимые

для вычисления координат, скорости и времени. Первые приемники ГНСС представляли собой простые, чисто аппаратные электронные модули (hardware GNSS receiver), включающие в себя антенну, предварительный усилитель, аналого-цифровой преобразователь и блок обработки сигналов. Упрощенная структурная схема одного канала аппаратного (hardware GNSS receiver) приемника ГНСС показана на рис. 3.

Аналоговый сигнал от спутника, принятый входной антенной (1), поступает на блок приема RF front-end (2), в котором происходит усиление и первичная обработка аналогового сигнала. В блоке промежуточного преобразования (3) частота сигнала понижается с несущей до промежуточной, а затем сигнал передается на АЦП (4), где преобразуется в цифровую форму. Оцифрованный сигнал затем поступает в центральный процессорный блок (ЦПБ) (6). В процессе обработки сигнал подвергается демодуляции и декодированию. Управляющий контроллер (5) координирует работу составляющих ГНСС с внешними устройствами и между собой.

Различают два основных классических типа аппаратных приемников ГНСС — параллельного и последовательного типа. В приемнике параллельного типа сигналы от спутников различных СНС обрабатываются независимо, отдельными блоками. На рис. 3 показан только один канал обработки спутников GPS. Другой канал предназначен для обработки сигналов спутников ГЛОНАСС. Оцифрованный сигнал второго канала (7) поступает на центральный процессорный блок. Структурно оба канала аналогичны. Однако антенна, блок RF front-end, блоки обработки, фильтры и АЦП у параллельных каналов разные.

В приемниках ГНСС последовательного типа используется один универсальный канал, в котором поочередно обрабатываются сигналы GPS и ГЛОНАСС. В таких приемниках используются специальные типы антенн. Общие принципы построения многоканальных высокочастотных антенн довольно хорошо известны [7]. Работой приемников ГНСС последовательного типа управляет внешний контроллер, который переключает как аппаратную, так программную части системы. Контроллер может быть запрограммирован на два основных режима работы. В одном случае задается точность измерения. В этом варианте приемник набирает информацию от максимально возможного числа спутников. Во втором случае основным критерием является время вычисления координат. При этом приемник работает с минимально возможным количеством спутников, но с меньшей точностью.

Современные профессиональные ГНСС-приемники представляют собой сложные технические устройства, к которым предъявляются достаточно жесткие требования. На рис. 4 приведена классическая схема работы GNSS [9]. Приемник принимает сигналы от любого количества спутников разных СНС, находящихся в зоне прямой видимости. Существуют многоканальные приемники, с несколькими десятками каналов. На первом этапе приемник вычисляет соответствующие каждому спутнику значения псевдодалейностей, PR1,

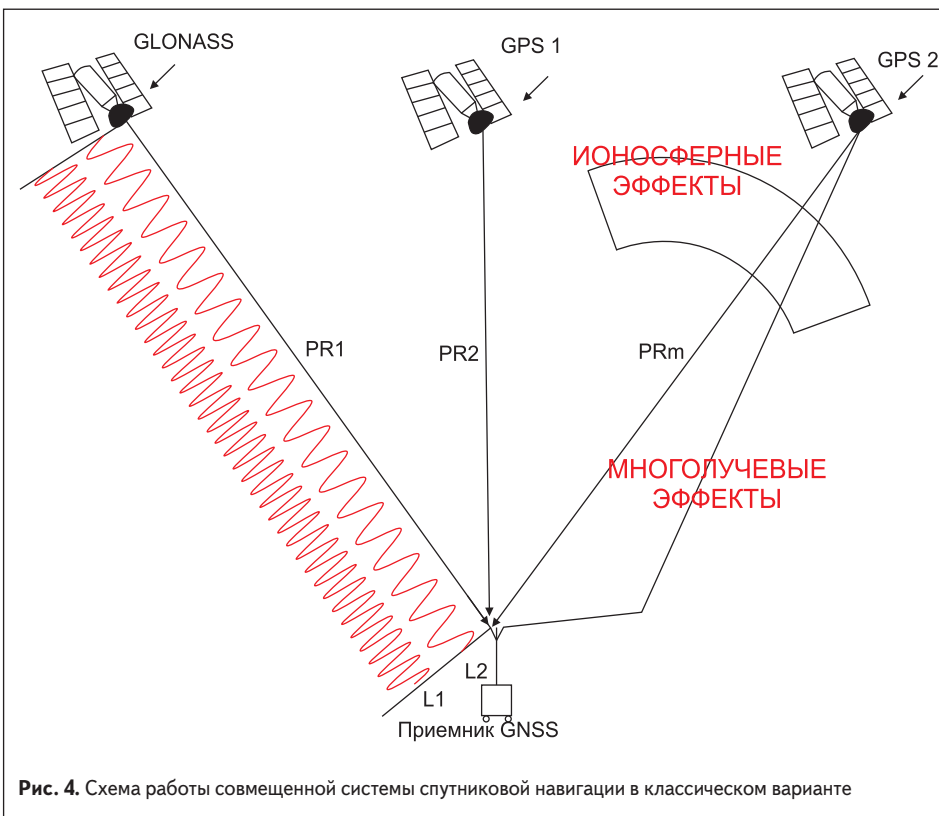


Рис. 4. Схема работы совмещенной системы спутниковой навигации в классическом варианте

PR2, PRm. На следующем этапе вычисляются доплеровские, атмосферные, многолучевые и геометрические поправки.

Без учета эффекта Доплера, атмосферных и многолучевых эффектов точность определения координат не превышает сотен метров. В системе GPS код C/A можно измерить с ошибкой около 1 м. Поэтому гражданский GPS-приемник, не использующий военный код P/Y, определяет координаты и высоту с ошибкой порядка нескольких метров. Оборудование GPS постоянно совершенствуется. Бортовое электронное оборудование GPS дает возможность определять фазу несущих $L1$ и $L2$ с точностью 0,01–0,05 периода. Это позволяет рассчитать значения относительных координат с точностью до миллиметров.

Значительно хуже обстоит дело в системе ГЛОНАСС. Устаревшее бортовое электронное оборудование первого поколения спутников ГЛОНАСС вносит дополнительные погрешности и не позволяет точно определить расстояние между спутниками. В том случае, когда используются только гражданские частоты ГЛОНАСС, ошибка определения координат составляет десятки метров. Возможно, ситуация изменится к лучшему при вводе в эксплуатацию новой серии спутников ГЛОНАСС серии «К» и «КМ».

Чтобы уменьшить погрешности определения координат, обусловленные атмосферными и многолучевыми эффектами, используются как инструментальные, так и вычислительные методы. В качестве основного инструментального метода, позволяющего увеличить точность вычислений координат, применяется так называемый дифференциальный режим работы GNSS. В дифференциальном режиме используются базовые станции (БС), на которых установлены высокоточные приемники

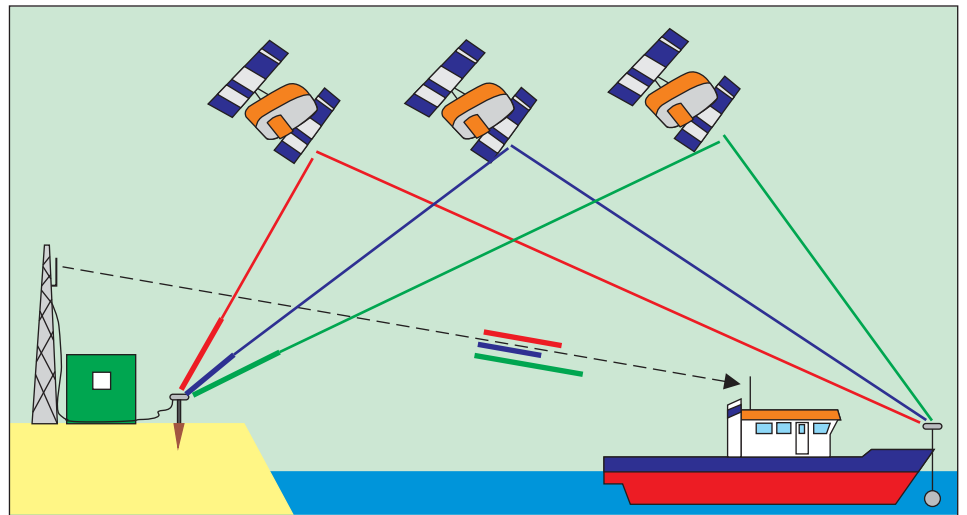


Рис. 5. Схема использования дифференциального режима работы GNSS

GNSS. Координаты этих БС известны с высокой точностью. При приеме сигнала спутника вычисляются поправки между вычисленными мгновенными значениями координат и известными координатами БС. Эти поправки по каналам радиосвязи (FM, GSM/GPRS, Wi-Fi, BT, ZigBee) передаются на удаленный рабочий приемник GNSS (рис. 5) [10].

Для вычисления псевдодалностей и координат используются сложные математические модели. Чем сложнее математическая модель, тем мощнее должен быть вычислительный процессор. Алгоритмы расчетов являются одной из наиболее важных коммерческих тайн и не раскрываются полностью производителями оборудования. В качестве примера можно при-

вести структуру работы GNSS-приемника при совместном использовании сигналов спутников GPS/GLONASS (рис. 6) [9].

Антенны (2505) принимают сигналы модернизированной GPS (частоты $L1$, $L2$, $L5$) и сигналы ГЛОНАСС (частоты $L1$, $L2$). Принятые сигналы обрабатываются малошумящим усилителем (2510) и поступают на делитель сигнала (2515), в котором разделяются на две составляющие. Каждая из частей разделенного аналогового сигнала поступает на соответствующую группу понижающих преобразователей радиочастотного диапазона (2520–2530, сигналы GPS, и 2820–2830, сигналы ГЛОНАСС). Количество радиочастотных преобразователей зависит от выбранной схемы приемника. В данном примере рассмотрены десять

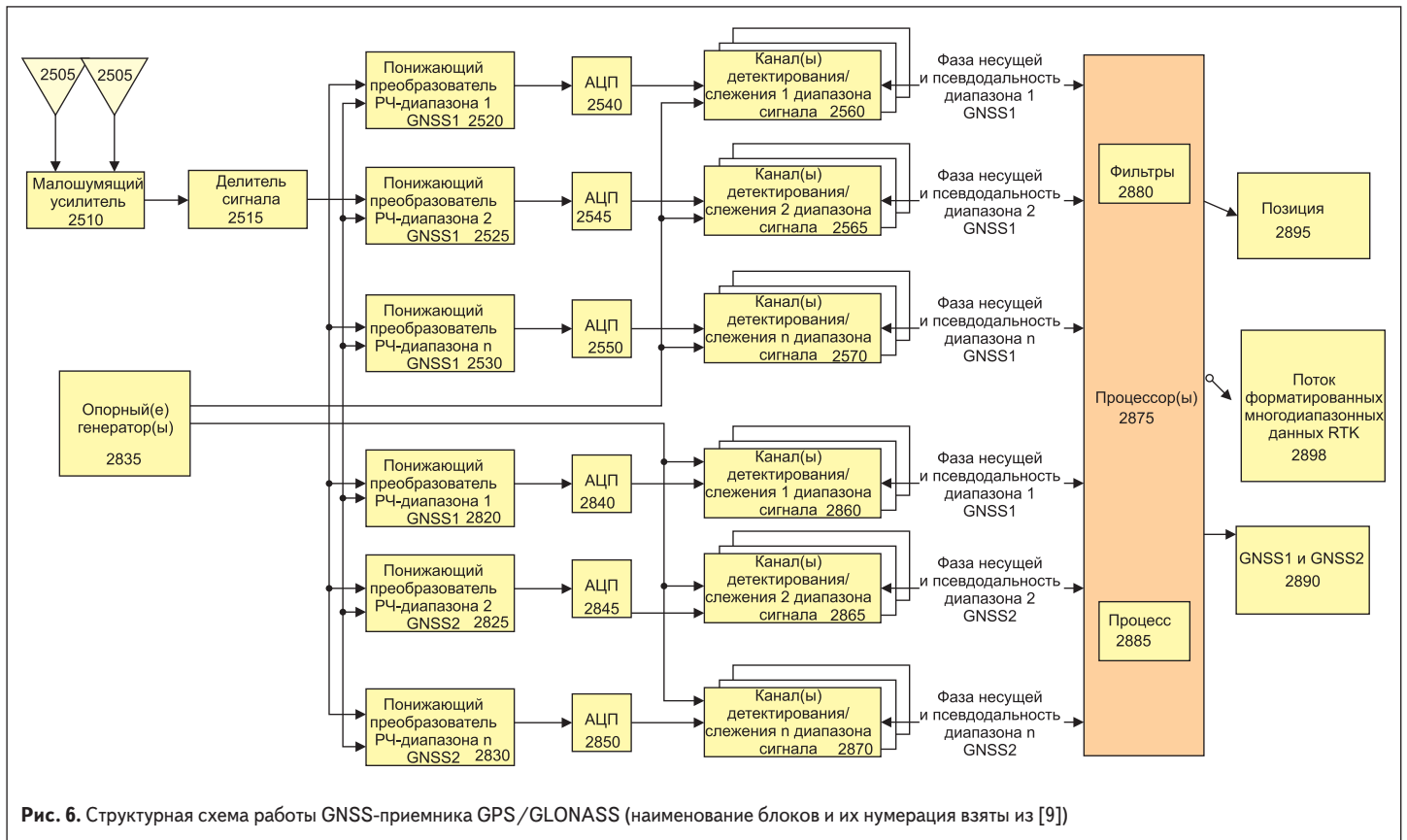
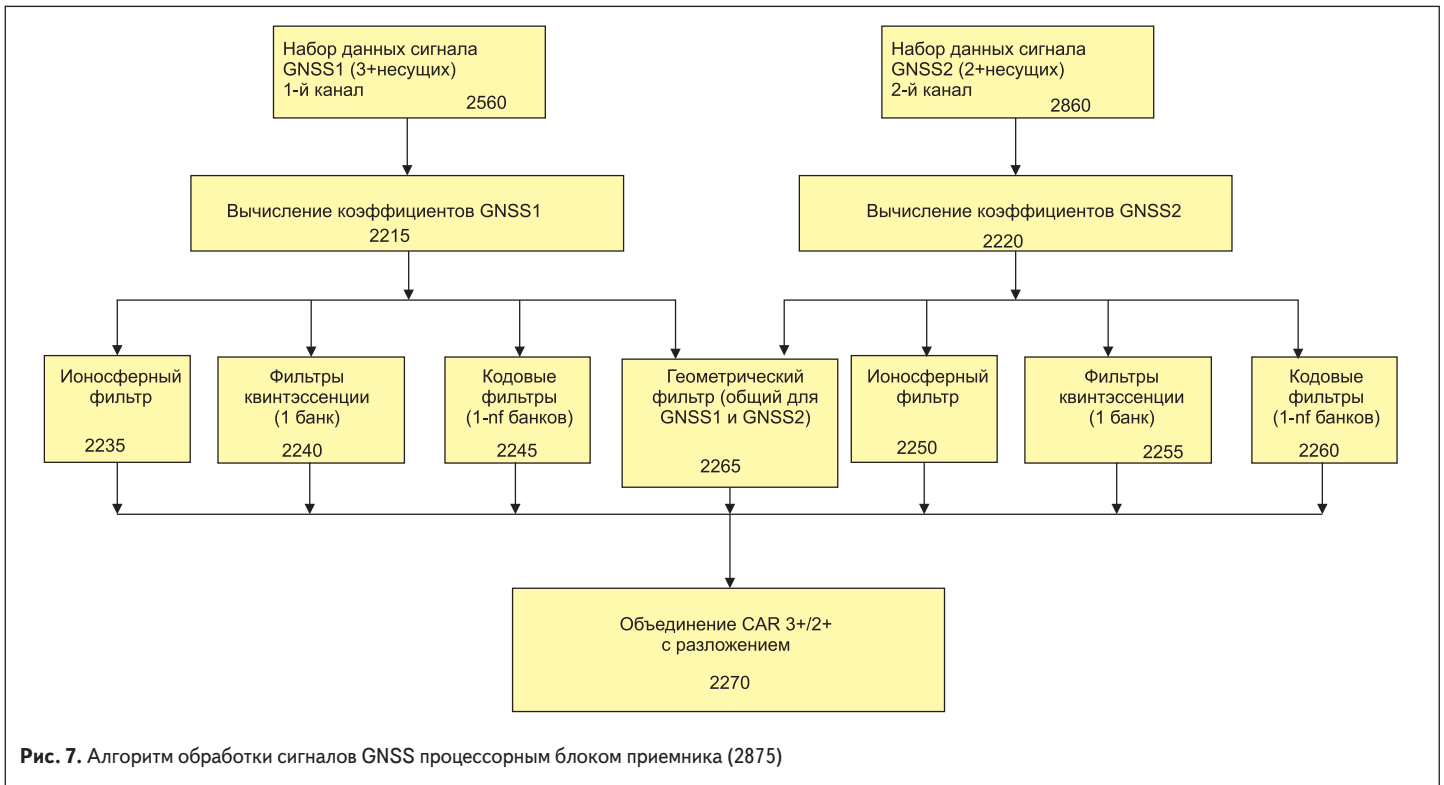


Рис. 6. Структурная схема работы GNSS-приемника GPS/GLONASS (наименование блоков и их нумерация взяты из [9])



понижающих преобразователей для каждого из сигналов. На понижающие преобразователи также поступает опорная частота от генераторов (2835). Понижающий преобразователь (2520) снижает первый радиочастотный диапазон сигналов GPS до низкочастотного сигнала, который затем оцифровывается с помощью АЦП (2540). Понижающий преобразователь (2525) снижает второй радиочастотный диапазон сигналов GPS до низкочастотного сигнала, который затем оцифровывается с помощью АЦП (2545). Аналогичным образом работают все остальные понижающие преобразователи радиочастотного диапазона. Затем оцифрованный сигнал GPS первого радиочастотного диапазона поступает в блок детектирования и слежения (2560). Этот блок содержит десятки параллельных каналов, каждый из которых соответствует одному спутнику группировки GPS или дополнительному псевдоспутнику наземного базирования. На выходе каждого канала формируются числовые последовательности, содержащие информацию о фазе несущей частоты и псевдодальности конкретного спутника для первого диапазона радиочастотного канала. Эти данные обрабатываются с помощью системы фильтров (2880) и группы процессоров (2875). В зависимости от сложности конструкции GNSS вычислительный блок (2875) может быть реализован как единый центральный процессор или как несколько специализированных отдельных процессоров. Оцифрованные сигналы других радиочастотных диапазонов обрабатываются аналогично.

Таким образом, на процессорный блок подается матрица данных, содержащая i столбцов, соответствующих радиочастотным диапазонам, и j строк, соответствующих количеству каналов детектирования (зафиксированных спутников). В процессе обработки (2885) анализируются

данные, несущие информацию о полученных значениях измерения фазы несущей и псевдодальности для каждого из трех диапазонов GPS $L1$, $L2$ и $L5$.

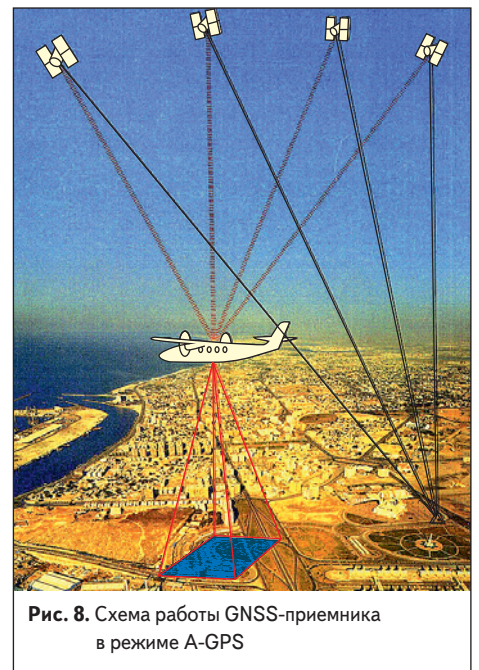
В каналах ГЛОНАСС обработка идет по двум диапазонам $L1$ и $L2$. Для обработки используются достаточно сложные математические методы, обсуждение которых выходит за рамки данной статьи. Подробно процесс вычислений рассмотрен в [9]. В основе вычислительного метода используются так называемые «фильтры Калмана». Алгоритм обработки данных с использованием «фильтров» позволяет убрать шум и фоновую информацию. В «фильтре Калмана» задаются начальные параметры того сигнала, который нужно выделить на фоне множества других. При этом весь спектр разлагается на отдельные составляющие. В сокращенном виде алгоритм обработки сигнала показан на рис. 7 [9].

На первом этапе математической обработки вычисляются коэффициенты разложения для обработанного аппаратной частью массива сигналов GPS (2560). Эти коэффициенты используются для разложения суммарного сигнала на составляющие. Далее эта сумма составляющих проходит через последовательность фильтров (2235, 2240, 2245 и т. д.), на каждом из которых выделяется нужный компонент (рис. 7). В результате обработки данных на выходе приемника GNSS получают следующую информацию:

- координаты с привязкой ко времени (2895);
- набор форматированных многодиапазонных кинематических данных в реальном времени RTK (2898);
- объединенный массив оценок погрешностей результатов измерений (2890).

Большинство современных GNSS-приемников аппаратного типа имеют несколько незави-

симых аналоговых каналов и способны одновременно работать с сигналами от спутников различных навигационных систем (GPS, Galileo, COMPASS, SBAS и ГЛОНАСС). Эти приемники оснащены мощными вычислительными средствами, позволяющими хранить в памяти мгновенные данные, полученные со спутников, и в дальнейшем обрабатывать их повторно с учетом корректирующих сигналов вспомогательных датчиков и системы SBAS. Как правило, такие приемники имеют встроенные модули GSM/GPRS/3G, предназначенные для выхода в Интернет и работы в режиме A-GPS со станциями поддержки (рис. 8) [11].



В последнее время все большую популярность приобретают GNSS, в которых используются дополнительные датчики и модули, позволяющие получать информацию о координатах даже в условиях полного отсутствия сигналов спутников.

По мере развития сетей LAN стало возможным применять Wi-Fi для позиционирования объектов. Принцип действия очень простой: когда приемник попадает в зону действия точки доступа Wi-Fi, ему сразу передаются координаты этой точки доступа. Если приемник находится в зоне действия нескольких точек доступа Wi-Fi, то его координаты вычисляются как взвешенное среднее. В крупных городах России этот метод дает точность определения координат около 10 м [11].

В современных GPS/GSM/GPRS-навигаторах используют встроенные акселерометры и датчики движения, благодаря которым можно определить ориентацию и перемещение устройства в пространстве [12].

Есть примеры использования в навигаторах датчиков атмосферного давления, которые позволяют получать дополнительную информацию о высоте над уровнем моря. Датчик угла поворота на эффекте Холла дает возможность контролировать вращение приемника вокруг своей оси. Достаточно интересна идея использования магнитометров в системах позиционирования, базирующихся на магнитных аномалиях [13, 14].

В последнее время стало появляться все больше и больше так называемых псевдоспутников, которые представляют собой передаточные системы, аналогичные тем, которые установлены на орбитальных спутниках СНС, но находящиеся на поверхности Земли. Эти псевдоспутники передают сигналы из пунктов, координаты которых известны с очень высокой точностью. Использование таких сигналов в качестве дополнительных реперных точек позволяет значительно повысить точность измерения координат.

Профессиональные GNSS-приемники, предназначенные для транспорта, авиации, флота и геодезии, представляют собой очень сложные и дорогие приборы. Например, спутниковый геодезический приемник Trimble R8 GNSS стоит около 500 000 руб. Весит это прибор около 4 кг. Точность определения координат с помощью современных геодезических GNSS-приемников составляет несколько миллиметров (ошибки нет, именно мм). Поэтому и цена у них такая высокая. В геодезическом оборудовании специального и военного назначения используются все перечисленные выше частотные каналы и все доступные сигналы спутников.

Приемники GNSS с цифровой обработкой сигнала

Одним из наиболее интересных и бурно развивающихся направлений в современной электронике является так называемое Software Defined Radio (SDR). Для этого термина нет устоявшегося перевода в русскоязычной литературе. Используются такие словосочетания, как «программно-задаваемое радио», «радио, определяемое программным обеспечением», «программное радио».

Идея SDR, впервые выдвинутая в 1992 г. инженером американской компании E-Systems Джозефом Майтола, проста и элегантна [15]. Суть этой концепции заключалась в том, чтобы создать универсальное устройство, способное работать с максимально возможным количеством различных радиостандартов, в широком диапазоне частот с различными принципами модуляции и кодировки. При этом предполагалось предельно упростить аналоговую часть устройства, а все задачи по декодированию и обработке сигналов возложить на компьютер.

Технология SDR сразу была принята на вооружение, и вскоре военными США был реализован первый проект, получивший название SreakEasy. В результате появилась универсальная радиостанция, которая позволила осуществлять прямую радиосвязь между различными родами войск, использующими принципиально несовместимые друг с другом радиосистемы. Подробнее о технологии SDR можно узнать в работах [16, 17].

Для GNSS-приемников сам принцип SDR, в котором можно использовать единый канал предварительной аналоговой обработки данных, является крайне перспективным и несет неоспоримые преимущества по сравнению с классическими схемами аппаратных GNSS.

Идея полной цифровой обработки сигналов GNSS первоначально была использована при разработке совместного GNSS для систем GPS/Galileo [18]. Поскольку в этих СНС используются одни и те же методы кодировки CDMA и одни и те же частоты, то цифровые приемники GNSS SDR GPS/Galileo были реализованы достаточно быстро. Уже в начале 2000-х годов появились первые образцы цифровых GNSS SDR GPS/Galileo. В дальнейшем направление многосистемных цифровых приемников GNSS развивалось ускоренными темпами. Прежде всего, это связано с тем, что в борьбу за рынок смартфонов и гаджетов, оснащенных системами позиционирования, включились ведущие производители микроэлектроники, такие, например, как Texas Instruments, Broadcom, SM и др.

Следующий этап развития программного обеспечения для цифровых приемников GNSS SDR позволил подключить к GNSS-приемнику каналы сотовой телефонии стандарта UMTS. Поскольку в стандарте UMTS используется тот же принцип кодировки CDMA, что и в системе GPS, то подключение дополнительных каналов не представляло значительной технической проблемы. Вместе с тем использование каналов

сотовой связи в приемниках GNSS GPS/Galileo позволило использовать дополнительный принцип позиционирования, основанный на определении координат по базовым станциям GSM/UMTS [18]. В дальнейшем в приемники GNSS были добавлены функции поддержки других систем беспроводной связи.

В самом простом варианте структурная схема приемника SDR содержит пять основных блоков (рис. 9) [19]:

- приемная антенна;
- блок предварительной обработки данных и АЦП (FE — front end);
- цифровой блок, программируемый пользователем (FPGA field programmable gate array);
- процессорный блок DSP;
- блок ПК.

В первых вариантах программных GNSS-приемников использовались чисто аппаратные блоки FE и FPGA. Сигнал спутника принимается антенной, затем в блоке FE преобразуется до промежуточной частоты и оцифровывается с помощью АЦП. В блоке FPGA происходит разделение сигналов по частоте и фазе, а также выполняются операции сжатия и преобразования массива данных с использованием корреляционных функций. Блок цифровой обработки может быть как чисто аппаратным, так и аппаратно-программным устройством. В процессорном блоке DSP, который управляется с помощью специального программного обеспечения, выполняются базовые операции, связанные с отслеживанием спутников, их захватом, коррекцией сигналов и другие аналогичные операции. Блок ПК предназначен для конфигурирования всей системы и поддержки человеко-машинного интерфейса.

В современных GNSS-приемниках с цифровой обработкой сигнала (GNSS SDR) максимальное число функций реализовано на программном уровне. В таких приемниках блок FPGA выполняет все сервисные функции по передаче данных из блока первичной обработки в вычислительный компьютер. Блок DSP обеспечивает только функции инициализации приемника и конфигурирования его основных параметров. Все процессы обработки вычислений возложены на центральный ПК. В этом типе приемников программное обеспечение является главным элементом системы и практически полностью обеспечивает обработку данных, полученных со спутников, и вычисление на основе этих данных навигационных результатов.

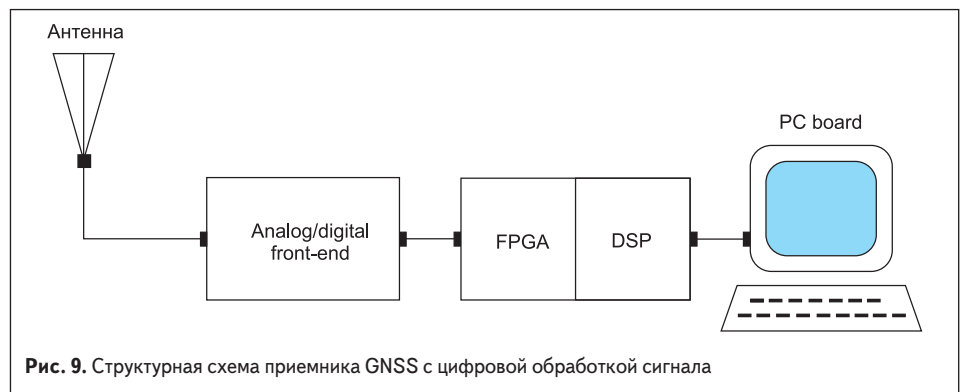


Рис. 9. Структурная схема приемника GNSS с цифровой обработкой сигнала

На рис. 10 [18] показана структурная схема алгоритма программного обеспечения цифрового приемника GNSS. Принцип действия основан на том, что процессор создает математическую модель процесса работы классического приемника GNSS.

На начальном этапе рассчитываются вероятностные значения положения спутников. При первом включении (холодный старт) приемник получает альманахи с помощью ближайших станций A-GPS, а также свои координаты от вспомогательных систем (UMTS, Wi-Fi и др.). При последующих включениях (теплый и горячий старт) используются альманахи и эфемериды последнего измерения. С учетом этих данных рассчитываются вероятностные значения кодов PRN (псевдослучайные шумы) для каждого канала. Базовая математическая модель основана на работе со спутниками GPS. В стандартном варианте используются не менее двенадцати каналов для спутников

GPS плюс два-три канала для вспомогательных систем функционального дополнения Galileo, GLONASS, SBAS, EGNOS, WAAS. Далее для каждого канала рассчитываются вероятностные значения доплеровских кодов задержки, смещения частоты и фазы. Таким образом, на первом этапе вычислений мы получаем канал, в котором теоретически должен находиться спутник, а также вероятностные значения сигнала от него. С другой стороны, блок FE выдает на компьютер оцифрованные сигналы, полученные от реальных спутников. На втором этапе работы теоретические значения, полученные с помощью математического моделирования, сравниваются с реальными сигналами, полученными от спутников. С помощью корреляционной модели из всего спектра выбирается полезный сигнал, наиболее похожий на тот, который был рассчитан теоретически. Когда пик корреляции R пересекает заданный порог точности λ , первый

этап расчетов заканчивается. Это значит, что этап поиска завершен, найден первый спутник, и этот спутник переведен в режим слежения. В процессе слежения навигационная информация от этого спутника постоянно уточняется. Если заданный в корреляционной модели порог точности не будет достигнут, то процесс вычисления повторяется. Количество итераций зависит от заданной точности вычислений. Такой подход позволяет в первом приближении оценить координаты спутника и начать принимать его эфемериды и альманахи с информацией о других спутниках. Процесс поиска спутников продолжается до тех пор, пока не будут выполнены все предварительно заданные параметры обработки.

В работе GNSS можно рассмотреть несколько сценариев:

- Поиск двенадцати спутников GPS и переход к вычислениям координат приемника.
- Поиск спутников GPS и переход к поиску спутников Galileo, до тех пор, пока суммарное количество видимых спутников не достигнет двенадцати. Переход к вычислениям координат приемника.
- Поиск спутников GPS, Galileo и переход к поиску спутников GLONASS, до тех пор, пока суммарное количество видимых спутников не достигнет двенадцати. Переход к вычислениям координат приемника.

На третьем этапе работы GNSS SDR данные, полученные со всех спутников, формируются в единый массив, и вычисляются коды фаз и псевдодальности. Если не достигнута требуемая точность, то проводятся дополнительные вычисления с оценкой мощности радиочастотного сигнала к шуму и проверкой спектрального соотношения C/N_0 . Более подробно работа GNSS SDR рассмотрена в [18].

Базовой частью всех SDR являются микроэлектронные чипы. Лидерами в их производстве признаны американские компании Qualcomm, Broadcom, Texas Instruments, Trimble. Эти фирмы выпускают современные чипы с поддержкой GSM/GPRS/3G/4G, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, GPS/GLONASS/Galileo. В качестве примера последних разработок можно привести такие чипы, как TI WL187x, Qualcomm-Snapdragon, Broadcom BCM47521, ST-Ericsson CG1950. В их производстве используются самые современные технологии. Основное отличие этих моделей заключается в низком энергопотреблении, малых габаритных размерах и современных математических методах обработки сигналов.

Например, фирма Qualcomm в новом чипе Snapdragon S4, изготовленном по технологии 28 нм, использует четырехъядерный Krait ARM Cortex A9. Ядро Krait включает новый 11-ступенчатый конвейер, который может обрабатывать до трех команд за цикл, в результате чего прирост производительности по сравнению с современными процессорами Qualcomm Snapdragon достигает 60%. Напряжение питания и частоты ядер и кэш-памяти второго уровня можно будет выбирать отдельно, что, по оценке компании, позволит снизить энергопотребление на 25–40%.

Texas Instruments (TI) с 2013 г. выпускает новый чип WL189x с сигнальным процессором

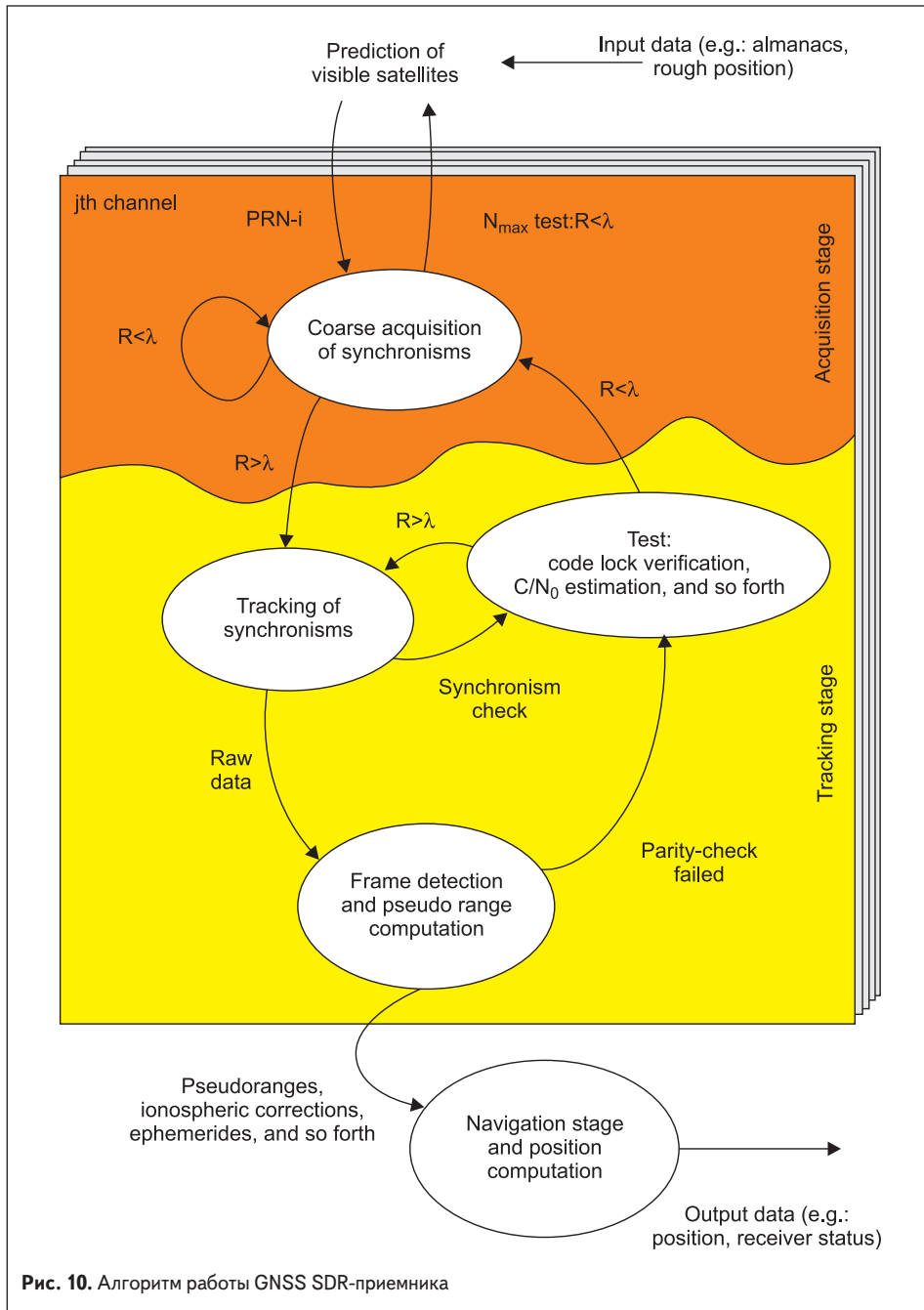


Рис. 10. Алгоритм работы GNSS SDR-приемника

нового поколения WiLink 8.0 и поддержкой Wi-Fi, Bluetooth, FM, NFC, ANT+, а также GPS/GLONASS. Этот новый сигнальный процессор, изготовленный по технологии 45 нм, по словам представителей TI, на 60% дешевле, на 45% меньше и на 30% энергоэффективнее, чем существующие на рынке решения других производителей.

Фирма ST-Ericsson выпускает свой процессор CG1950 с поддержкой GPS/GLONASS. Выполненный по технологии 40 нм чипсет CG2905 предназначен для устройств, работающих под управлением ОС Linux/Android, Windows Mobile и Symbian/S60.

Японская Sony объявила о выпуске микросхем новой серии с поддержкой GPS, GLONASS, QZSS, SBAS, IMES. Эти чипы характеризуются рекордно низкой потребляемой мощностью — 10 мВт. В новой серии реализованы идеи навигации с использованием корректирующей информации, получаемой от вспомогательных датчиков, таких как акселерометры, гироскопы и датчики магнитного поля.

Все перечисленные ведущие мировые производители чипов подчеркивают, что их изделия поддерживают режимы GPS/Galileo/GLONASS/SBAS. Однако при этом производители GNSS-чипов подчеркивают, что основным является режим работы со спутниками GPS. Использование сигналов спутников других систем — только дополнительный канал для базового GPS-чипа. Так, например, старший директор по развитию бизнеса Qualcomm по Восточной Европе Лучано Сплендорини (Luciano Splendorini) объясняет, что сигналы от спутников ГЛОНАСС используются в чипах Qualcomm в качестве вспомогательного канала. При запуске навигаторов, изготовленных на базе такого чипа, GNSS-приемник сначала пытается поймать сигнал GPS-спутников. Только в том случае, когда модуль не нашел достаточного числа GPS-спутников или когда уровень сигнала очень слабый, подключается режим поиска сигналов от спутников Galileo, ГЛОНАСС, SBASS [20].

Производители GNSS-чипов не предоставляют подробной технической информации о том, как именно организована поддержка ГЛОНАСС в их продукции. Поэтому трудно сказать, на какой именно стадии чип переходит к поиску спутников ГЛОНАСС и сколько спутников он должен найти дополнительно к уже обнаруженным GPS- и Galileo-спутникам.

Следует обратить внимание на тот факт, что в подобных чипах и сделанных на их базе модулях есть возможность на программном уровне отключить канал ГЛОНАСС. При этом невозможно отключить GPS. Иными словами, навигатор, изготовленный на базе этих чипов, может работать в режимах GPS или GPS/GLONASS, но не может работать только в режиме ГЛОНАСС.

В заключение целесообразно добавить несколько слов о перспективах развития ГНСС. Наиболее перспективным представляется направление многофункциональных цифровых приемников с использованием мощных сигнальных процессоров. В этих разработках используются новейшие технологии микроэлектроники (28 нм) и современные математические модели обработки сигналов ГНСС. В России это направление в настоящее время не развивается. Ведущие мировые производители по ряду причин не поставляют чипы GNSS SDR в Россию. Поэтому в производстве малогабаритных GNSS-приемников РФ отстала на десятки лет, и при сохранении существующих тенденций развития этот разрыв будет увеличиваться.

Следует обратить внимание на то, что для приемников GNSS SDR, изготовленных на базе чипов американского производства, нет необходимости в сигналах российских спутников ГЛОНАСС. Безусловно, эти сигналы полезны для американской системы, но они не являются необходимыми. С вводом в действие современной системы Galileo и других СНС, разработанных с использованием новейших технологий, значимость устаревшей системы ГЛОНАСС для остального мира будет постепенно уменьшаться. ■

Литература

1. www.sdc.ru/smglo/grupgps?version=rus&site=extern
2. Guochang Xu. Gps: Theory, Algorithms and Applications // Springer. 2003.
3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: theory and practice // Springer-Verlag. 1997.
4. <http://kaf401test.rloc.ru/articles/9/32/>
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4 / Под ред. А. И. Перова, В. К. Харисова. М.: Радиотехника. 2010.
6. Синякин А. К., Кошелев А. В. Физические принципы работы GPS/ГЛОНАСС. Новосибирск: СГТА. 2009.
7. Multiband Antennas for SDR Applications // International Journal of Digital Multimedia Broadcasting. 2009.
9. <http://bd.patent.su/2374000-2374999/pat/servlet/servlet60b1.html>
10. www.trimble.com/gps_tutorial/dgps-how.aspx
11. http://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_positioning_system
12. www.enfora.com/products/integrated-m2m-solutions/mobile-tracking/mt-4000/
13. <http://habrahabr.ru/post/147549>
14. http://gps-club.ru/gps_think/detail.php?ID=45192
15. Mitola J., Zvonar Z. Software Radio Technologies // IEEE Press. 2001.
16. Software defined radio: architectures, systems, and functions. Dillinger, Madani, Alonistioti. Wiley, 2003.
17. Yanming Feng. Combined Galileo and GPS: A Technical Perspective // Journal of Global Positioning Systems. 2003. Vol. 2. № 1.
18. Software-Defined Radio Technologies for GNSS Receivers // International Journal of Navigation and Observation. 2011.
19. www.qualcomm.com/snapdragon/processors
20. www.glonass-portal.ru/articles/2012-03-06/iphone%204s_glonass06mart.avcms