

6 Радионавигация и спутниковые радионавигационные системы

**А. КОРОТОНОШКО, канд. техн. наук,
В. КЛИМОВ, канд. техн. наук, г. Москва**

Применение спутниковых навигационных систем

Информация спутниковых навигационных систем используется для решения двух основных видов задач:

— **навигации** — определения координат и скоростей движения объектов в реальном масштабе времени. Такие задачи необходимы для обеспечения безопасности полетов самолетов, мореплавания, регулирования движения поездов, управления автомобильными перевозками и другими транспортными операциями;

— **координатометрирования** (или позиционирования) — определения координат стационарных естественных или искусственных объектов. Указанная задача, как правило, не ограничена временными рамками проведения измерений и, соответственно, позволяет использовать методы накопления результатов и их последующую статистическую обработку. Для систем координатометрирования в спутниковых навигационных системах предусматриваются более сложные методы измерения дальности, использующие оценку не только времени прихода навигационного сигнала, но также и измерение фазы приходящего сигнала, что позволяет поднять точность измерения координат до уровня долей метра — так называемая "геодезическая" точность.

В соответствии с этими двумя основными задачами пользователи спутниковой навигации образуют две основные группы — навигационную и геодезическую.

Первая группа включает в себя транспортные потребители, которые с использованием НКА решают задачи управления и контроля движения, обеспечения безопасности движения, регулирования потоков транспортных средств и другие.

К этим потребителям примыкают также те, которые используют спутниковую навигацию для своих производственных задач — морские промысловики, сельскохозяйственные потребители, а также пользователи так называемого бытового уровня — путешественники, туристы, охотники, рыболовы, радиолюбители и т. д.

В целом эта группа может включать в себя общее число пользователей, измеряемое миллионами.

Вторая — более узкая профессиональная группа пользователей — это геодезические и картографические службы, строительные организации,

которые решают задачи создания высококачественных карт, обеспечения строительства объектов и магистралей, ведения земельного кадастра, межевания, георазведки и т. д. В число таких потребителей входят также ученые, которые проводят исследования, связанные с Землей, движением материков, прогнозированием землетрясений и других геологических явлений, а также исследователи в области космонавтики и астрономии. Численность второй группы потребителей меньше, чем первой, общее их число составляет десятки тысяч, но для этой группы пользователей требуется оборудование со значительно более высокими точностными характеристиками.

Качество навигационной информации, ее точность, надежность (непрерывность), которые получаются при непосредственном использовании систем ГЛОНАСС и GPS, зачастую не может удовлетворить пользователей, так, например, для многих транспортных применений может потребоваться точность 1...2 метра. В этом случае в системах спутниковой навигации предусмотрено использование так называемых функциональных дополнений, которые применяются, когда точность и непрерывность информации, получаемой непосредственно с космических аппаратов, не позволяет решать какие-либо задачи, например, обеспечение посадки самолетов в условиях отсутствия видимости, заходка крупнотоннажных судов в доки. Такие операции требуют обеспечения значений ошибок навигации на уровне 0,5...1 м.

Функциональные дополнения ГЛОНАСС — это совокупность программно-аппаратных средств наземного и космического базирования, формирующих и передающих потребителю дополнительную информацию для повышения качества решения задач навигационного обеспечения. Эта дополнительная информация включает в себя так называемые дифференциальные поправки и "сообщения целостности".

"Сообщения целостности" содержат признак исправности или неисправности спутника или оценку уровня возможной ошибки измерений.

Дифференциальные поправки и сообщения целостности вырабатываются специальными контрольно-корректирующими станциями (ККС), которые включают в себя измерительный спутниковый навигационный приемник, процессор вычисления поправок и радиолинию для передачи поправок на борт потребителя.

Принцип выработки дифференциальных коррекций следующий.

ККС производит измерение координат своего положения по всем спутникам, находящимся в зоне ее видимости, затем сравнивает значения измеренных координат с априорно известными координатами своего положения. Полученная разность измеренных и априорных координат является навигационной ошибкой, которая затем трансформируется в поправки к дальности до каждого из спутников. Указанные поправки и передаются потребителям, находящимся в зоне, контролируемой ККС. Передача поправок осуществляется по специальным каналам связи. Потребитель, получив эту дифференциальную поправку, вводит ее в дальность до соответствующего спутника, измеренную собственным навигационным приемником. Тем самым исключается значительная часть ошибок измерения и точность информации повышается. Величина ошибок уменьшается до 3 м при нахождении пользователя в зоне радиусом 150 км до ККС и до 10 м при нахождении пользователя в зоне радиусом 400...800 км.

В случае, если ошибка в дальности до какого-либо спутника превосходит определенный предел, ККС выдает потребителю сообщение о нарушении целостности измерений. Потребитель должен исключить данный спутник из решения навигационной задачи и использовать для ее решения другие НКА, находящиеся в зоне видимости.

В тех случаях, когда корректирующая информация передается через наземные радиолинии или по наземным каналам связи, такая дифференциальная система называется локальной. Ее зона обычно имеет радиус 150 км.

В том же случае, если информация ККС передается потребителю по радиолинии через геостационарный спутник, то такая дифференциальная система называется космической широкозонной системой. Зона действия такой системы имеет радиус 300...500 км.

В мире в настоящее время эксплуатируются три таких широкозонных системы — американская WAAS над территорией Северной Америки, европейская EGNOS над Европой, Северной Африкой и значительной частью Атлантического океана и японская MSAS над Восточной Азией и Тихим океаном. Российская Федерация планирует в ближайшие годы развернуть такую систему, совместимую с ее иностранными аналогами.

Индивидуальная аппаратура пользователей

Важнейшим элементом систем спутниковой навигации является индивидуальная аппаратура пользователей спутниковых навигационных систем (НАП).

На рис. 3 представлена функциональная схема индивидуальной аппаратуры пользователей, сокращенно называемая "навигационный приемоиндикатор".

Приемоиндикатор, как правило, включает в себя следующие элементы: антенно-фидерное устройство, радиотехническую часть, включающую в себя высокочастотный аналоговый усилитель и цифровой процессор обработки

Окончание.

Начало см. в "Радио", 2007, № 7

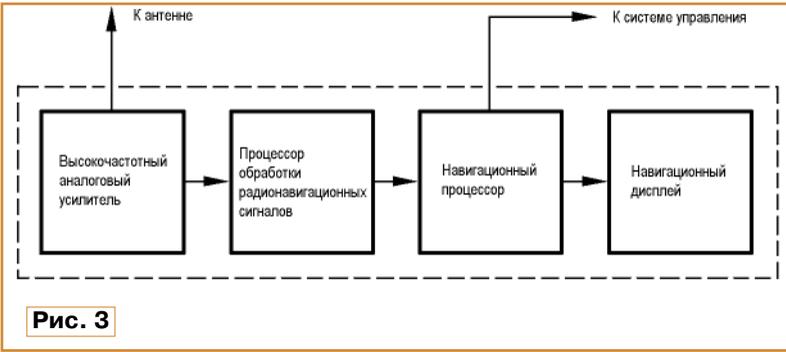


Рис. 3



Рис. 6

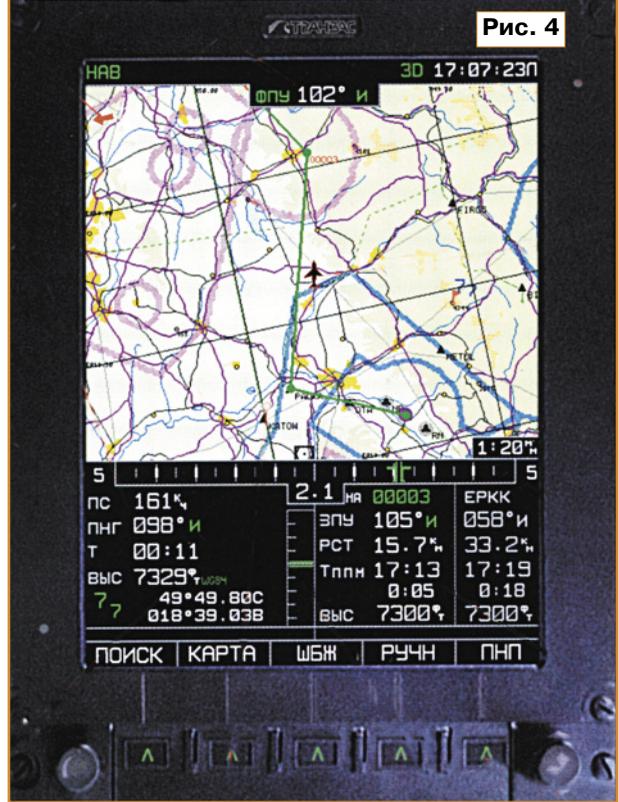


Рис. 4



Рис. 5

сигналов, навигационный процессор и дисплей с элементами управления приемоиндикатором.

Во многих вариантах использования приемоиндикаторов, в частности для транспортных применений, кроме отображения навигационной информации на дисплее, эта информация с навигационного процессора передается в бортовую систему управления транспортным средством или же по радиолинии в наземные диспетчерские и контролирующе-службы.

Какие же основные функции элементов приемоиндикатора?

Радиотехническая часть системы и процессор обработки радионавигационных сигналов решают задачи приема и выделения полезного сигнала из радишума и привязки этого сигнала к конкретному космическому аппарату. Процессор также обеспечивает декодирование информации, содержащейся в этом сигнале, и привязку его к единому времени. На входе радиотехнической части присутствует смесь сигналов всех спутников во всех используемых радиотехнических диапазонах. Энергетический уровень сигналов очень мал — на 150...155 дБ ниже уровня мощности в один ватт. Приемник выделяет из этой смеси сигнал каждого конкретного космиче-

ского аппарата. Существуют разные методы такого выделения. В системе ГЛОНАСС используется частотное разделение, при котором каждый НКА излучает сигналы на своей конкретной фиксированной частоте, что позволяет провести идентификацию спутников, измерив частоту сигнала. В системе GPS используется кодовое разделение каналов. При такой системе каждый космический аппарат излучает широкополосный сигнал во всей полосе диапазона. Этот сигнал модулируется кодовой десятиразрядной последовательностью. Каждому НКА предписывается свой индивидуальный десятиразрядный код. Приемник потребителя производит корреляционную обработку смеси принятых сигналов и выделяет из этой смеси сигналы индивидуальные коды конкретного космического аппарата. Навигационный приемник может быть односистемным, расширяющим сигналы, излучаемые только системой ГЛОНАСС или только системой GPS, и мультисистемным, одновременно принимающим и дешифрующим сигналы двух этих систем. При этом производится обработка обоих частотных поддиапазонов L1 и L2 каждой системы.

На выходе процессора обработки сигналов дешифрованная информация содержит код дальности, номер НКА и информацию о состоянии и положении этого спутника.

Важной характеристикой приемника является число одновременно обрабатываемых космических аппаратов. Современные приемники обычно обрабатывают информацию от 12 до 16 космических аппаратов, т. е. имеют 12—16 каналов обработки. Это позволяет при решении навигационной задачи использовать практически все спутни-

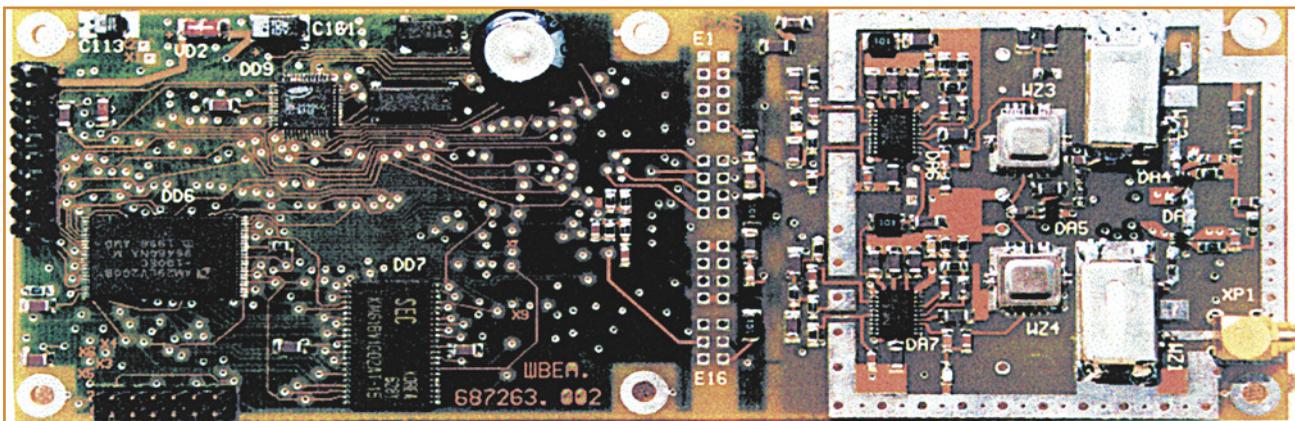


Рис. 7

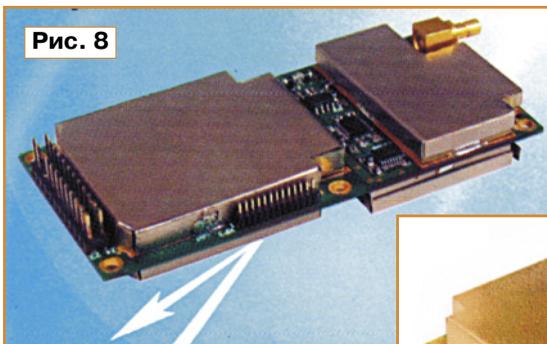


Рис. 8

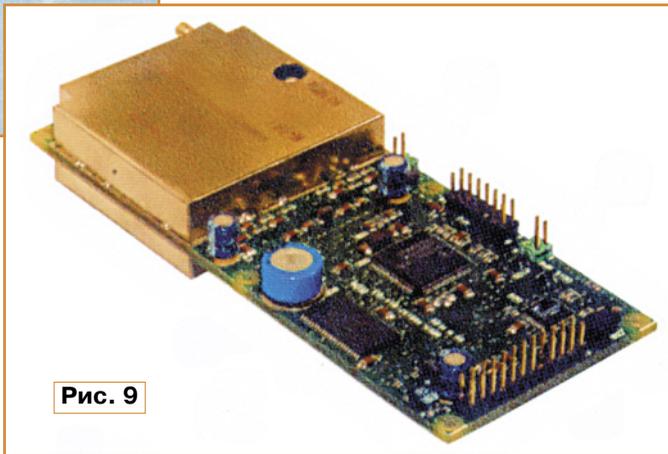


Рис. 9

ки, которые находятся в зоне радиовидимости потребителя.

Задача определения местоположения потребителя решается навигационным процессором, который отбирает из всех наблюдаемых спутников наиболее благоприятные в части обеспечения точности навигации. По векторным уравнениям, приведенным в первой части этой статьи, он решает навигационную задачу, по дальностям до выбранных спутников определяет долготу, широту и высоту потребителя, а также параметры его движения — курс и скорость.

Полученные данные передаются на дисплей потребителя. Вид представления этих данных может быть различным. Простейшей индикацией является табличная цифровая. Широта и долгота в виде значений градусов, минут и секунд отображаются на табличных электронных индикаторах. Для более ответственных применений используются графические дисплеи, на которых, наряду с координатами положения объекта, отображается электронная карта местности с необходимыми ориентирами и объектами. Пример такого дисплея авиационного применения фирмы "Транзас" показан на рис. 4.

В целом приемоиндикатор является сложным радиотехническим устройством, использующим большое число аналоговых и цифровых компонентов. Приемоиндикаторы первого поколения, разработанные в 80—90-х годах прошлого века, представляли блоки весом 20...40 кг и, соответственно, имели весьма ограниченное применение. В дальнейшем прогресс

в области интегральной электроники позволил создать практические конструкции профессионального применения весом 2...3 кг. Набор специальных интегральных схем для таких конструкций соста-

т. е. обеспечение уверенного, надежного радиоприема навигационных сигналов потребителями. Проблема возникла из-за ограниченной мощности передатчиков сигнала на борту НКА и больших расстояний (более 20000 км) между потребителем и НКА. Как уже отмечалось, мощность сигнала на входе приемника потребителя составляет $-150...-155$ дБ по отношению к 1 Вт. Для приема сигнала такого низкого уровня и выделения из него информационного сообщения потребовалось разработать специальные методы обнаружения и обработки сигналов, создать высокочувствительные приемники, корреляционные фильтры с большой базой и другие радиотехнические устройства.

Вторая проблема заключалась в гарантированном обеспечении высокой точности навигации. Решение этой проблемы потребовало создания бортовых хранителей времени со стабильностью до 10^{-12} — 10^{-13} и привязкой к UTC с точностью до наносекунд, создания точных средств орбитографии, учета неоднородности гравитационного поля Земли, возмущений ионосферы и, соответственно, флуктуаций скорости прохождения радиоволн и т. д.

Следует отметить, что до настоящего времени только две страны мира, США и СССР/Россия, смогли практически решить весь комплекс проблем, создать и внедрить действующие системы.

И в заключение следует сказать, что сегодня внедрение спутниковой навигации на транспорте, в строительстве, в науке и производстве, а также для коммерческого и бытового прикладного использования находится в начале своего пути и, следовательно, круг задач и масштабы применения спутниковых средств навигации в будущем будут внедряться все больше и больше.

влял 5—6 единиц. На рис. 5 показан комплект приемоиндикатора для морских и речных судов "Котлин МТ 102", разработанный Российским институтом радионавигации и времени (г. Санкт-Петербург). На рис. 6 показан общий вид комплекта спутниковой аппаратуры для геодезических применений "Землемер Л1М", разработанный той же организацией.

По мере дальнейшего роста степени интеграции микросхем разработчикам удалось создать индикаторы массового применения весом 100...200 г (рис. 7, 8 и 9), что позволило, кроме профессионального использования, широко внедрять спутниковую навигацию в любительскую практику — туризм, охота и рыболовство, радиолубительство и т. д.

При создании системы ГЛОНАСС (аналогично и при создании системы GPS) разработчиками было решено большое число научных, конструкторских и технологических задач. Наиболее сложными из них были две. Первая — это обеспечение доступности системы,