

АНАЛИЗ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИИ, БАЗИРУЮЩИХСЯ НА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ РЕТРАНСЛЯЦИИ

С.Н. Терехин, кандидат технических наук, доцент;
Ю.И. Синешук, доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Проведен анализ систем спутниковой радионавигации, базирующихся на различных методах ретрансляции. Рассмотрены основные методы ретрансляции сигналов для локальных систем позиционирования. Анализ структурных схем и методов обработки первичных навигационных параметров современных моделей показал: подавляющее большинство приемников имеет существенное ограничение на максимальную скорость и особенно величину ускорения объекта, при котором псевдоспутник сохраняет возможность определять координаты с заданной точностью.

Ключевые слова: навигационное поле, псевдоспутник, высокоэллиптические орбиты, наземная аппаратура навигационных сигналов

ANALYSIS OF SYSTEMS OF SATELLITE RADIONAVIGATION, BEING BASED ON DIFFERENT METHODS OF RETRANSMITTING

S.N. Terehin; Y.I. Sineshyk.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The analysis of the systems of satellite radionavigation, being based on the different methods of retransmitting, is conducted. The basic methods of retransmitting of signals are considered for the in-plant systems of positioning. The analysis of flow diagrams and methods of treatment of primary navigation parameters of modern models showed repressing most receivers have a substantial limit on high speed and, especially, size of acceleration of object, at which a pseudocompanion keeps possibility to determine coordinates with the set exactness.

Key words: the navigation field, pseudocompanion, high-elliptic orbits, surface apparatus of navigation signals

Коренное обновление систем и средств внешнетраекторных измерений, используемых при испытаниях как систем вооружения и военной техники (ВВТ) нового поколения, так и модернизированных образцов систем для МЧС России, находящихся в эксплуатации, является одной из наиболее актуальных задач современной техники.

В настоящее время полигонные измерительные пункты, привлекаемые в процессе испытаний летательных аппаратов различных типов и назначений, оснащены следующими средствами траекторных измерений:

- кинофототеодолитами;
- фоторегистрирующими станциями;
- скоростными кинокамерами.

Большая часть перечисленных изделий морально устарела, сильно изношена (срок эксплуатации более 15 лет) и не отвечает не только перспективным, но и современным

требованиям к средствам внешнетраекторных измерений. Принципиальным недостатком перечисленных средств внешнетраекторных измерений (ВТИ) является низкая оперативность обработки измерений. Кроме того, оптические средства ВТИ принципиально не измеряют скорость движения на траектории, что требует привлечения дополнительных радиотехнических средств, и не могут работать в условиях плохой оптической видимости.

Отечественный и зарубежный опыт последних десятилетий показывает, что наиболее перспективный вариант решения задачи ВТИ базируется на комплексировании традиционных средств с современной аппаратурой приема и обработки сигналов спутниковых радионавигационных систем.

С учетом технических возможностей аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), к настоящему времени в ходе развития средств ВТИ, использующих сигналы ГНСС, сформировалось три основных метода ретрансляции навигационных данных.

Метод ретрансляции данных с полной обработкой измеряемых параметров. Этот метод связан с размещением на борту летательного аппарата (ЛА) полного комплекта навигационных аналитических приборов (НАП), которые определяют координаты и параметры движения носителя. Для передачи результатов навигационных измерений требуется соответствующий (специально выделенный или телеметрический) канал связи с пропускной способностью 1–10 кбит/с.

Причем, для возвращаемых объектов возможна регистрация и хранение результатов навигационных измерений непосредственно на борту и их обработка после возвращения летательного аппарата из полета.

Метод ретрансляции данных без обработки измеряемых параметров. Этот метод предусматривает установку на борту объекта приемника сигналов навигационных космических аппаратов (НКА), которые после переноса их спектра на другую несущую частоту передаются по специально выделенному каналу на наземный измерительный пункт (НИП) для дальнейшей обработки. Радионавигационные параметры (РНП) сигналов, принятых на НИП, имеют задержку и частотный сдвиг относительно излучаемых сигналов, обусловленные соответственно суммой дальностей и суммой доплеровских сдвигов частоты, возникающих при движении ЛА относительно НКА и НИП.

Измеряя эти РНП, можно однозначно определить текущее местоположение и параметры движения ЛА.

Прежде чем перейти к сравнительному анализу описанных вариантов построения систем ВТИ, уточним некоторые термины.

В литературе по системам связи различают ретрансляторы без обработки сигналов, в которых осуществляется только перенос сигнала по спектру, а также ретрансляторы с частичной и полной обработкой сигналов. При этом под частичной обработкой понимают согласованную фильтрацию сигнала без принятия решения о переданном символе, а под полной – регенерацию переданных символов с принятием таких решений.

Обработка сигнала НКА, связанная с выделением и коррекцией измеряемых параметров, на борту ретранслятора принципиально невозможна, поскольку РНП ретранслированного сигнала (задержка, фаза, доплеровский сдвиг частоты и т.д.) определяются взаимным положением и относительными перемещениями НКА, ЛА и НИП, формируются в процессе распространения сигнала на трассе «НКА-НИП» или «НКА-ЛА» и фиксируются только в точке нахождения измерительной аппаратуры. По этой причине возможная обработка сигнала в ретрансляторе сводится к некоторым изменениям спектра принятого сигнала, которые могут приводить к искажению или потере некоторых компонент вектора РНП.

Ретранслятор, переизлучающий полный спектр сигнала НКА (для открытых дальномерных кодов – порядка 2 МГц), будем называть широкополосным, а ретранслятор, на борту которого осуществляется значительное сужение этого спектра, – узкополосным.

Метод ретрансляции данных без обработки измеряемых параметров с совмещением их в едином канале с другой измерительной информацией. Этот метод отличается от предыдущего тем, что поток навигационных данных совмещается с данными от других датчиков, например, метеорологических, что требует применения оригинальных технических решений при ретрансляции сигналов ГНСС.

Вышеуказанные методы ретрансляции рассматривались в работах [1–3]. Данные методы имеют свои достоинства и недостатки. Проанализируем их более подробно.

Анализ структурных схем и методов обработки первичных навигационных параметров современных моделей НАП показывает, что практически все приемники отечественной разработки и подавляющее большинство зарубежных имеют существенное ограничение на максимальную скорость и особенно величину ускорения объекта, при котором НАП сохраняет возможность определять координаты с заданной точностью.

Не касаясь искусственных ограничений на максимальную скорость и/или высоту, специально вводимых в некоторые образцы НАП зарубежного производства из соображений национальной безопасности, подробнее остановимся на лимитирующих динамiku измерений факторах, которые связаны с используемыми принципами обработки спутниковых радионавигационных сигналов.

Прежде всего, отметим, что для оптимальной фильтрации сигналов в современной НАП используется корреляционная обработка, в связи с чем большое значение имеет точность предсказания значений основных параметров сигнала – доплеровского сдвига частоты и задержки дальномерного кода.

По этой причине всегда будет существовать нижний предел времени наблюдения, при котором обеспечивается требуемое качество обработки сигнала. Его величина определяется двумя взаимосвязанными факторами:

- временем, необходимым для оптимальной фильтрации и накопления порогового отношения сигнал/шум, обеспечивающего требуемую точность слежения за измеряемыми параметрами и достоверность навигационно-временных определений;
- быстродействием процессоров и сложностью алгоритмов первичной и вторичной обработки.

Как известно, время оптимальной фильтрации импульсного сигнала не может быть меньше его длительности. Длительность дальномерных кодов систем ГЛОНАСС и GPS равна 1 мс, следовательно, максимальная частота обновления информации, при которой выполняется условие оптимальной фильтрации одиночного сигнала, не может превышать 1 кГц. Увеличение частоты сверх указанного предела возможно только ценой потери части энергии сигнала, что вряд ли допустимо, поскольку НАП работает практически на пределе технической реализуемой чувствительности.

Однако даже при оптимальной фильтрации одиночного сигнала отношение сигнал/шум на выходе коррелятора современной НАП не превышает 0 дБ, что существенно ниже пороговой величины, необходимой для устойчивой работы навигационного процессора. Последняя зависит от требуемой точности и достоверности навигационных измерений, а также особенностей используемых алгоритмов и лежит в пределах от 6 до 20 дБ, причем нижняя граница определяется фундаментальными соотношениями теории статистических решений и оценок и не может быть существенно снижена за счет усложнения алгоритмов обработки, по крайней мере, в рамках известных в настоящее время методов.

Отсюда следует необходимость операции накопления сигнала на выходе коррелятора, обеспечивающей повышение отношения сигнал/шум на (20–30 дБ), что при идеальном когерентном накоплении требует объема выборки в 100...1000 отсчетов. Нетрудно заметить, что последняя цифра соответствует стандартной частоте обновления навигационных данных НАП около 1 Гц.

Таким образом, достижимая скорость обновления информации на выходе НАП в значительной степени определяется необходимым объемом накапливаемой выборки,

который, в свою очередь, зависит от заданной величины порогового отношения сигнал/помеха, отношения сигнал/шум на выходе коррелятора, а также от потерь, связанных с неидеальностью алгоритмов и устройств, реализующих функции накопления и последующей обработки. Рассмотрим возможности повышения скорости выдачи информации НАП за счет влияния перечисленных факторов.

Отношение сигнал/шум на выходе коррелятора определяется мощностью сигнала и шума на входе антенны, ее коэффициентом усиления, шум-фактором входных каскадов приемника и качеством выполнения операции согласованной фильтрации (свертки) [4, 5].

Очевидно, что данный параметр является внешним и не может быть изменен за счет совершенствования НАП.

Коэффициент усиления антенны определяется, прежде всего, размером ее апертуры, которая для высокочастотных малоразмерных объектов обычно жестко ограничена конструктивными особенностями. Однако даже если эти ограничения удастся в той или иной мере упорядочить, применение на таких объектах остронаправленных (обладающих большим коэффициентом усиления) антенн остается проблематичным из-за необходимости пространственной ориентации диаграммы направленности антенны. Поэтому рассчитывать на значительное увеличение мощности сигнала за счет повышения усиления антенн в рассматриваемом случае не следует.

Входные малошумящие усилители современной серийной НАП имеют эквивалентную шумовую температуру порядка 500 К (шум-фактор менее 2 дБ), которая сравнима с эквивалентной шумовой температурой антенны, ставящей физический предел улучшению отношения сигнал/шум. Поэтому выигрыш в реальном отношении сигнал/шум за счет уменьшения шум-фактора приемника не может превысить 3–6 дБ, что эквивалентно уменьшению времени накопления в 2–4 раза (при отсутствии дополнительных аппаратурных и алгоритмических потерь).

Потери, связанные с неидеальностью операции фильтрации, порождаются рядом аппаратно-алгоритмических факторов, таких как мультиплексирование сигналов на входе коррелятора, точность слежения за задержкой и доплеровским сдвигом, шумы квантования, ошибки округления результатов вычисления и т.п. Суммарная величина связанных с этими ошибками потерь в эквивалентном отношении сигнал/шум может достигать 3–4 дБ, то есть при полном устранении этих потерь необходимый объем выборки может быть сокращен примерно в два раза.

По-видимому, наибольший резерв сокращения объема накапливаемой выборки, а, следовательно, повышения быстродействия НАП, связан с уменьшением требуемого порогового отношения сигнал/помеха. В современной НАП эта величина составляет примерно 12–20 дБ, нетрудно увидеть, что ее уменьшение до нижнего предела – порядка 6 дБ – дает выигрыш во времени накопления порядка 6–10 раз. Получение такого выигрыша может быть достигнуто за счет применения аппаратуры с большим числом параллельных каналов, более совершенных алгоритмов первичной и вторичной обработки сигналов, а также перехода к одноэтапным алгоритмам, что, в свою очередь, определяется прогрессом вычислительных средств и программного обеспечения НАП. Справедливость данного прогноза подтверждается тенденцией развития НАП, разрабатываемой лидирующими фирмами [6].

В настоящее время серийно выпускаются образцы НАП и инженерных модулей с обновлением данных 10–20 Гц, имеются сообщения о разработке аппаратуры с частотой выдачи данных до 50–100 Гц. Дальнейшее повышение быстродействия будет все более затруднено перечисленными выше факторами. С другой стороны, требования столь высокого быстродействия характерны в основном для специальной аппаратуры, что неизбежно сказывается на ее стоимости. Следовательно, применение такой НАП на борту сравнительно недорогих малоразмерных невозвращаемых объектов вряд ли будет рентабельно.

Другой важной особенностью существующих моделей навигационных приемников является то обстоятельство, что измерение основных параметров сигнала производится не в

многоканальных открытых измерителях, а в замкнутых следящих системах: схема слежения за несущей измеряет доплеровский сдвиг, а, следовательно, и скорость; следящая схема за задержкой сигнала измеряет сдвиг опорного кода относительно принимаемого сигнала, получая псевдодальность. Работа указанных следящих систем проходит в различных режимах (поиск, захват сигнала, некогерентное и когерентное слежение), что в современной многоканальной НАП, как правило, с цифровой реализацией этих функций, предъявляет повышенные требования к процессорам, в которых они реализуются алгоритмически.

В современных моделях НАП дискриминаторы и петлевые фильтры следящих схем формируются программным образом. Однако и в этом случае параметры петлевых фильтров выбираются из условий динамики объекта-носителя. Если режим слежения за сигналом должен сохраняться при движении с ускорением, то в качестве петлевого фильтра схемы слежения за несущей в режиме фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) обычно выбирают фильтр второго или третьего порядка, а в режиме ФАПЧ при тех же условиях порядок фильтра на единицу меньше. Петлевой фильтр в схеме слежения за задержкой может иметь меньший порядок, поскольку динамика здесь обычно учитывается соответствующим пересчетом доплеровского сдвига частоты из кольца слежения за несущей. Следует различать порядок фильтра петли и порядок передаточной функции замкнутой петли регулирования в режиме ФАПЧ [7].

Именно особенности структуры и алгоритмов реализации схем слежения за несущей и, прежде всего, управляемого генератора несущей, будут определять динамические возможности НАП в целом, в частности диапазон цифрового синтеза частот будет определять максимальную измеряемую НАП скорость, а дискрет синтезируемой частоты и тактовая частота выборки схемы слежения определяют максимальное ускорение и скорость его изменения, при которых еще сохраняется слежение за сигналами НКА с заданной погрешностью. Отсюда очевидны повышенные требования к быстродействию и разрядности элементной базы, что, как правило, удорожает массовые модели НАП.

Анализ практически реализованных современных структурных схем показывает, что характерным пределом максимального ускорения для массовых типов НАП является величина 40 м/с^2 ; при разработке специальных алгоритмов обработки измерений и управления, а также специальных ИМС (многоканальных корреляторов) в современной НАП максимальное значение ускорения удается повысить до $100\text{--}120 \text{ м/с}^2$ и более. Данный предел позволяет использовать НАП даже на борту низкоорбитальных КА однако, с вероятностью потери сигналов НКА, находящихся в направлении полета.

Таким образом, использование специальных моделей НАП на борту высокодинамических носителей, особенно одноразового использования, представляется менее эффективным решением по сравнению с бортовым широкополосным ретранслятором.

Литература

1. Иванов А.И., Романов Л.М. Полигонные навигационные измерения с использованием спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR / Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 11. С. 16–29.
2. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич [и др.] / под ред. В.С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
3. Анализ влияния точности координатно-временной привязки носителя псевдоспутника на характеристики навигационного поля СРНС + ПС / Бабуров В.И., Иванцевич Н.В., Васильева Н.В. [и др.]. // тр. XIII Междунар. конф. по интегральным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006.
4. JLENS: рубеж защиты от крылатых ракет // CNews.ru. 2008.
5. Методика и результаты аттестации канала ретрансляции сигналов СРНС / Власов И.Б., Гребенников А.В., Завгородний Д.В. [и др.] // Радиолокация, навигация и связь: сб. тр. Междунар. конф. Воронеж, 2004. С. 1674–1684.

6. Thompson T. Performance of the SATRACK/GPS TRIDENT I Missile Tracking System. IEEE Position, Location and Navigation Symposium. December, 1980. p. 445.
7. Wells L. Translated GPS Real-Time Tracking – IEEE 1983 National Telesystems Conference. November, 1983. P. 260–264.