

Очерк истории создания глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС

В. К. Старцев

*к. т. н., лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники,
директор Историко-технического музея АО «Российские космические системы»*

An Article about Creating the Global Navigation Satellite System GLONASS

V. K. Startsev

*candidate of engineering science,
Award winner of the Government of the Russian Federation in the field of science and engineering,
director of the Historical and technical museum at Joint Stock Company "Russian Space Systems"*

4 октября 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый в истории человечества искусственный спутник Земли. Измерения доплеровского сдвига частоты передатчика этого ИСЗ на пункте наблюдения с известными координатами позволили определить параметры движения этого спутника.

Решение обратной задачи, т. е. определение координат пункта приема сигнала, излученного ИСЗ, движущимся по орбите с известными параметрами, по измерениям доплеровского приращения частоты принятого сигнала, положило развитию спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

Первое научное обоснованное предложение об использовании ИСЗ для навигации родилось еще до запуска первого советского ИСЗ в период проведения под руководством профессора В. С. Шебшаевича в Ленинградской военно-воздушной инженерной академии им. А. Ф. Можайского в 1955–1957 гг. исследований возможностей применения радиоастрономических методов для самолетовождения. Материалы исследований докладывались в 1957 г. на межведомственной конференции.

Научные основы низкоорбитальных СРНС были существенно развиты в процессе выполнения исследований по теме «Спутник» в 1958–1959 гг.,

которые осуществляли НПО ПМ, НИИ-885, ЛБВИА им. А. Ф. Можайского, Институт теоретической астрономии АН СССР, Институт электромеханики АН СССР, НИИ ВМФ и Горьковский НИРФИ. Основное внимание при этом уделялось вопросам повышения точности навигационных определений, обеспечению глобальности, круглосуточности применения и независимости от погодных условий.

Проведенные исследования позволили перейти в 1963 г. к опытно-конструкторским работам над первой отечественной спутниковой навигационной системой, получившей в дальнейшем название «Цикада».

В создании этой системы приняли участие Научно-производственное объединение прикладной механики (сегодня АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева) — головная организация по системе в целом и по разработке навигационного спутника; Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (сегодня АО «РОССИЙСКИЕ космические системы») — головная организация по радиотехническому комплексу системы, разработке бортовой космической

и наземной радиотехнической аппаратуры, а также аппаратуры морских судов, АО «Российский институт радионавигации и времени» — разработчик бортовой космической аппаратуры синхронизации и навигационной аппаратуры ряда типов морских судов, а также другие предприятия космической, радиотехнической и судостроительной отрасли промышленности СССР.

27.11.1967 г. был выведен на орбиту первый навигационный отечественный спутник («Космос-192»). Бортовая, корабельная, навигационная и радиотехническая аппаратуры управления были разработаны в АО «Российские космические системы».

Навигационный спутник обеспечивал в течение всего времени активного существования излучение радионавигационного сигнала на частотах 150 и 400 МГц.

В 1979 г. была сдана в эксплуатацию навигационная система 1-го поколения «Цикада» в составе четырех навигационных спутников (НС), находящихся на круговой орбите высотой 1000 км с наклоном 83° и равномерным распределением плоскостей орбит вдоль экватора. Она позволяла потребителю в среднем через 1,5–2 ч входить в радиоконтакт с одним из ИСЗ и определять плановые координаты своего места нахождения при продолжительности навигационного сеанса до 5–6 мин. Среднеквадратическая погрешность местоопределения по этому спутнику составляла 250–300 м.

В ходе испытаний было установлено, что основной вклад в погрешность навигационных определений вносят погрешности передаваемых спутниками собственных эфемерид, которые определяются и закладываются на спутник средствами наземного комплекса управления. Поэтому, наряду с совершенствованием бортовых систем спутника и корабельной приемоиндикаторной аппаратуры, разработчиками системы было уделено внимание вопросам повышения точности определения и прогнозирования параметров орбит навигационных спутников. Была отработана специальная схема проведения измерений параметров движения навигационных спутников средствами наземного комплекса управления, разработаны методики прогнозирования, учитывающие гармоника высоких порядков в разложении геопотенциала.

Большую роль в повышении точности эфемерид навигационных спутников сыграли результаты работ по программе геодезических и геофизических исследований специальные геодезические спутники «Космос-842» и «Космос-911», которые были выведены на орбиты навигационных спутников.

В результате точность передаваемых в составе навигационного сигнала собственных эфемерид была повышена почти на порядок на интервале суточного прогноза до 70–80 м, а среднеквадратическая погрешность определения морскими судами своего местоположения уменьшена до 80–100 м.

Для оснащения широкого класса морских потребителей была разработана АО «Российские космические системы» и серийно изготавливалась приемоиндикаторная аппаратура «Шхуна».

В дальнейшем спутники системы «Цикада» были дооборудованы приемо-измерительной аппаратурой обнаружения терпящих бедствие объектов, которые оснащаются специальными радиобуями, излучающими сигналы бедствия на частотах 121 и 406 МГц. Эти сигналы принимаются спутниками и ретранслируются на наземные станции, где производится вычисление точных координат аварийных объектов. Эта система разработана АО «Российские космические системы» совместно с американо-франко-канадской системой, получила название «КОСПАС–SARSAT». Она образует единую мировую службу поиска и спасания.

Успешная эксплуатация низкоорбитальных спутниковых навигационных систем морских потребителей привлекла широкое внимание к спутниковой навигации.

В 70-х годах прошлого века при активном участии специалистов АО «Российские космические системы» была создана система нового поколения — среднеорбитальная глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС, удовлетворяющая требованиям широкого круга потребителей.

На рис.1 приведен состав ГЛОНАСС.

Выполнять требования большинства потребителей низкоорбитальные системы типа «Цикада» в силу принципов, заложенных в их построении, не могли.

К таким требованиям относятся:

- глобальность навигационно-временного обеспечения (ГВО) потребителей;



Рис. 1. Состав ГЛОНАСС

- непрерывность НВО, т. е. возможность определять координаты потребителя в любое время суток;
- неограниченность числа потребителей системы;
- высокая точность НВО, т. е. вычисление трех пространственных координат потребителя, трех составляющих его вектора скорости и текущего времени.

Для получения трех координат беззапросным методом требуется проведение измерений навигационного параметра не менее чем до четырех спутников; при этом одновременно с тремя координатами местоположения необходимо определять расхождение собственных часов относительно шкалы времени спутниковой системы.

Исходя из принципа навигационных определений была выбрана структура спутниковой системы ГЛОНАСС, которая обеспечивает в любой момент времени одновременную радиовидимость потребителю, находящемуся в любой точке Земли не менее четырех спутников при минимальном общем их количестве в системе.

Это обстоятельство ограничило высоту орбиты навигационных спутников до 20 тыс. км (дальнейшее увеличение высоты не ведет к расширению зоны радиовидимости и, следовательно, к умень-

шению необходимого количества спутников в системе). Для гарантированной видимости потребителем не менее 4 спутников их количество в системе должно составлять 18, однако оно было увеличено до 24 с целью повышения точности определения собственных координат и скорости потребителя путем предоставления ему возможности выбора из числа видимых спутников 4 оптимальных.

Одной из центральных проблем создания спутниковой системы, обеспечивающей беззапросное определение одновременно по нескольким спутникам, является проблема взаимной синхронизации спутниковых шкал времени с точностью до миллиардных долей секунды (наносекунд).

Решение этой задачи потребовало установки на спутниках высокостабильных бортовых стандартов частоты с относительной суточной нестабильностью 1×10^{-13} и наземного водородного стандарта с относительной нестабильностью 1×10^{-14} , а также создание наземных средств сличения шкал с погрешностью 3–5 нс.

С помощью этих средств и специального математического обеспечения в системе ГЛОНАСС производится определение расхождения бортовых шкал времени с наземной шкалой и их прогнозирование для каждого спутника системы. Результаты прогноза в виде поправок к спутниковым часам

относительно наземных закладываются и передаются в составе цифровой информации навигационного сигнала, формируемого в аппаратуре, созданной АО «Российские космические системы».

Потребителям, таким образом, устанавливается единая шкала времени. Расхождение этой шкалы с наземной шкалой времени не превышает 15–20 нс.

Необходимая точность эфемерид навигационных спутников достигается путем учета факторов второго порядка, таких как световое давление, неравномерность вращения Земли и движения полюсов Земли, а также действие на спутник в полете реактивных сил, вызываемых негерметичностью двигательных установок и газоотделением материалов покрытия.

Для уточнения параметров математической модели движения навигационных спутников на их орбиту были запущены пассивные искусственные спутники «Эталон», позволяющие измерять параметры их движения высокоточными квантово-оптическими измерительными средствами, разработанными и изготовленными также в АО «Российские космические системы».

Летно-конструкторские испытания системы ГЛОНАСС были начаты в октябре 1982 г.

В 1995 г. было завершено развертывание системы до ее штатного состава из 24 ИСЗ.

В 1999–2002 гг. состав орбитальной группировки системы существенно сократился в результате недостаточного финансирования новых запусков.

В настоящее время орбитальная группировка системы ГЛОНАСС восстановлена до требуемой численности ИСЗ.

С 2007 г. в Российской Федерации принят ряд директивных документов, направленных на ускорение развития технологий спутниковой навигации, в т. ч. издан Указ Президента Российской Федерации от 17.05.2007 г. № 638 «Об использовании глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах социально-экономического развития РФ».

В феврале 2008 г. в Российской Федерации принята «Концепция развития навигационных сигналов глобальной навигационной системы ГЛОНАСС».

Работы ведутся в соответствии с требованиями, выдвигаемыми различными потребителями (воздушными, морскими и речными судами, наземными и космическими средствами, топогеодезическими, землеустроительными и другими службами).

Структура построения системы ГЛОНАСС, реализующая методы и подходы по выполнению основных требований к СРНС, включает три подсистемы:

- орбитальная группировка космических аппаратов (космический сегмент);
- система контроля и управления (НКУ) — наземный командно-измерительный комплекс, или сегмент управления;
- навигационная аппаратура потребителей (НАП), или сегмент потребителей.

Спутники системы ГЛОНАСС расположены на орбитах, близких к круговым, с периодом обращения 11 ч 15 мин, высотой 19 100 км и наклоном 64,8°.

Орбитальная группировка включает в себя 24 рабочих спутника (по 8 в трех орбитальных плоскостях).

Спутниками для потребителей постоянно излучаются радиосигналы, несущие навигационные сообщения, позволяющие производить беззапросным методом траекторные измерения и решать навигационную задачу.

Сегодня АО «Российские космические системы» определено головной организацией по созданию, развитию и целевому использованию системы ГЛОНАСС.

Основным направлением развития системы являются:

- повышение точности и достоверности навигационных определений;
- увеличение информативности навигационных сообщений;
- определение целостности навигационного поля;
- повышение помехозащищенности и устойчивости навигационных сигналов;
- повышение надежности и увеличение срока активного существования бортовой аппаратуры навигационных спутников.

Реализация поставленных задач предусматривает создание космических аппаратов нового поколения, модернизацию наземного комплекса управления и создание средств функциональных дополнений для достижения высокой точности навигационных определений.

Начиная с 2009 г. орбитальная группировка системы состоит из космических аппаратов (КА) «ГЛОНАСС-М», которые обладают по сравнению с КА первого поколения увеличенным сроком активного существования до 7 лет.

В рамках дальнейшего развития системы создан космический аппарат третьего поколения «ГЛОНАСС-К» с улучшенными техническими характеристиками и сроком активного существования 10 лет. Летные испытания КА «ГЛОНАСС-К» начались в 2011 г.

АО «Российские космические системы» для КА «ГЛОНАСС-К» создал новый бортовой информационно-навигационный комплекс (БИНК), который не только выполняет прежние функции бортового комплекса БИНС, но и производит решение задач межспутниковых измерений, а также содержит устройства формирования новых радиосигналов с кодовым разделением каналов.

В перспективе в состав бортовой аппаратуры КА «ГЛОНАСС-К» будет включен ретранслятор аварийного сигнала космической системы спасания «КОСПАС-SARSAT» с приборами формирования обратного канала, передающего информацию терпящему бедствие о приеме аварийного сигнала службами спасания.

Бортовой радиокomплекс КА «ГЛОНАСС-К» разработан на новой элементной базе и рассчитан на работу в условиях открытого космоса.

Наземный комплекс управления системы ГЛОНАСС в ходе модернизации претерпел коренную переработку, связанную с переходом на беззапросную технологию измерения параметров движения КА и внедрением новых принципов обработки и формирования информации, закладываемой в бортовую аппаратуру. АО «Российские космические системы» разработало для системы ГЛОНАСС ряд беззапросных измерительных станций (БИС) и закладочно-измерительных станций (ЗИС), которые в плановом порядке устанавливаются на наземных пунктах в России и за рубежом.

Поэтапная реализация мероприятий по совершенствованию бортовых радиокomплексов и модернизации наземного комплекса управления позволяет повысить точность навигационных определений с существующего уровня — 7 м по координатам и 0,02 м/с по скорости до 2,8 м по координатам и 0,01 м/с по скорости в стандартном режиме работы.

Использование системы ГЛОНАСС в стандартном режиме удовлетворяет требованиям широкого круга потребителей. В то же время для ряда приложений (например, заход на посадку самолетов, маневрирование морских судов в «узкостях», решение топогеодезических, гидрографических и других задач) необходимы более высокие точности и достоверности координатного и навигационно-временного обеспечения. Они могут быть получены при использовании специальных режимов работы СРНС, одним из которых является дифференциальный режим (ДР).

Суть ДР заключается в измерении и компенсации коррелированных постоянных и медленно меняющихся во времени и пространстве составляющих погрешностей измерений радионавигационных параметров.

Для реализации ДР штатное оборудование системы дополняется рядом технических средств, совокупность которых составляет дифференциальную подсистему, которая является функциональным дополнением СРНС.

Системы функциональных дополнений могут быть широкозонными, локальными и региональными в зависимости от величины зоны действия, определяемой точностью вырабатываемых дифференциальных поправок.

В АО «Российские космические системы» к решению задач по созданию первых дифференциальных станций приступили в начале 90-х годов XX века. Были созданы контрольно-корректирующие станции (ККС) морской дифференциальной подсистемы (МДПС). В основу алгоритмов работы станций ККС положены принципы передачи потребителю псевдодальности по радиоканалам. При этом обеспечивается повышение точности навигационных определений до уровня 1 м.

Существенным недостатком данной технологии является деградация передаваемой коррек-



Рис. 2. Архитектура СДКМ

рующей информации с увеличением расстояния от дифференциальной станции до потребителя. Зона действия одной дифференциальной станции не превышает 200 км.

Для удовлетворения растущих требований потребителей созданы новые региональные станции в соответствии со стандартами Международной организации гражданской авиации (ИКАО) и Международной морской организации ИМО.

Для выполнения высокоточных топогеодезических работ в 2007 г. создано новое поколение геодезической спутниковой аппаратуры (ГСА) и мобильная дифференциальная станция (МДС). Отличительной особенностью этой аппаратуры является сочетание мобильности и оперативности решения задач высокоточной геодезической привязки объектов. При этом наличие встроенной памяти и модема мобильной связи позволяет потребителю осуществлять обработку данных в апостериорном режиме, а также работать в условиях отсутствия прямой радиовидимости между ГСА и МДС. В результате достигается точность навигационных определений 2–3 см.

Следующий этап развития функциональных дополнений — создание в АО «Российские косми-

ческие системы» широкозонной системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ).

На рис. 2 приведена архитектура СДКМ.

СДКМ решает задачи формирования векторных поправок (уточненной эфемеридно-временной информации) и информации о целостности навигационно-временных полей систем ГЛОНАСС и GPS.

В состав СДКМ входят: комплекс сбора измерений, включающий станции сбора и измерений (ССИ), расположенные на территории Российской Федерации и зарубежных стран; центр дифференциальной коррекции и мониторинга (ЦДКМ) и комплекс средств доставки информации потребителям. Первичная измерительная информация (отсчеты псевдодалности и псевдофазы по радиосигналам в диапазонах L1 и L2) поступает в центр системы, где обрабатывается с целью уточнения эфемеридно-временной информации каждого спутника, определения параметров целостности навигационно-временного поля и формирования сообщений для потребителей.

Станции ССИ в 2010–2012 гг. были размещены на российских антарктических станциях «Беллинсгаузен», «Новолазаревская» и «Прогресс» (рис. 3). В 2013 г. станции ССИ размещены

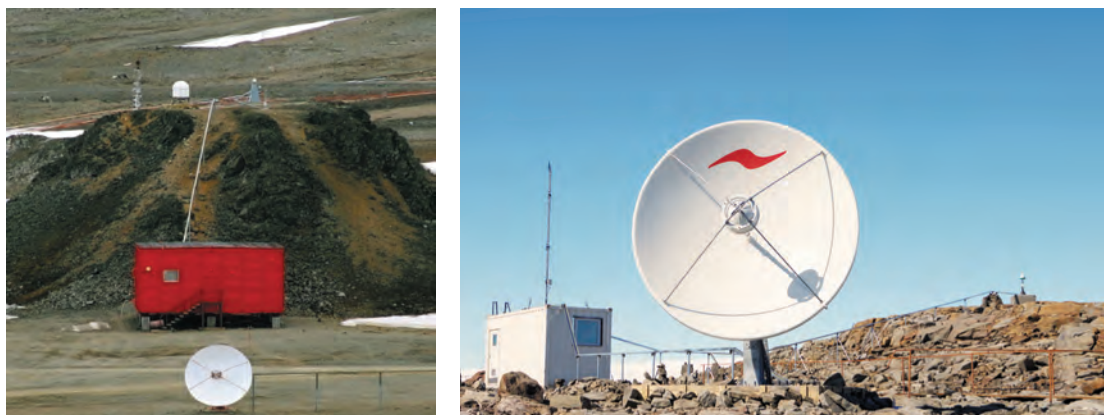


Рис. 3. ССИ, установленные на станциях «Беллинсгаузен», «Новолазаревская»

в Бразилии (г. Бразилиа). Ведутся переговоры об установке станций в других странах.

Станции ССИ оснащены современным 40-канальным навигационным приемником, пассивным водородным стандартом частоты, системой удаленного доступа, позволяющей дистанционно управлять режимами работы ССИ из центра СДКМ. Система термостабилизации станции позволяет устанавливать их в любых закрытых помещениях с температурой внутри от $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Особое место в системе СДКМ занимает обеспечение сбора данных с распределенных ССИ. Данные поступают в центр, расположенный в АО «Российские космические системы», не только со станций ССИ, находящихся в Российской Федерации, но и с самых удаленных районов Земли.

Первая очередь СДКМ введена в эксплуатацию в 2008 г. Доставка информации до потребителя при этом осуществлялась по наземным каналам связи с использованием глобальной сети Интернет.

Вторая очередь развертывания СДКМ включает использование многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) «Луч» для доставки информации потребителям через космические аппараты (КА), расположенные на геостационарных орбитах.

На КА «Луч» установлены бортовые ретрансляторы сигналов СДКМ, разработанные АО «Российские космические системы».

В АО «Российские космические системы» продолжаются поисковые работы по улучшению потребительских свойств средств функциональных дополнений.

При активной государственной поддержке в Российской Федерации была принята нормативная правовая база, предписывающая использование системы ГЛОНАСС в интересах социально-экономического развития страны.

В заключение автор искренне благодарит: Г. Г. Ступака, В. В. Дворкина, Н. М. Волкова, А. С. Селиванова за конструктивные замечания, сделанные ими при обсуждении статьи.

Список литературы

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. История создания и развития АО «Российские космические системы». Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2015. 350 с.
3. *Шебшаевич В. С.* Развитие теоретических основ радионавигации ленинградской радиотехнической школы // Радионавигация и время, 1992, № 1. С. 6–9.
4. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие. Под ред. В. С. Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1987. 376 с.