

КУЛЬТУРНО-СПОРТИВНЫЙ РЕАБИЛИТАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС
ВСЕРОССИЙСКОГО ОБЩЕСТВА СЛЕПЫХ
ОТДЕЛ ПО РАЗРАБОТКЕ И ВНЕДРЕНИЮ
АДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



КАК УСТРОЕНА СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИЯ

СОСТАВИТЕЛИ:
С. А. БОТКИНА, М. В. ОЛЕЙНИКОВ
ПОД РЕДАКЦИЕЙ В. П. БАЖЕНОВА

МОСКВА 2022

Культурно-спортивный реабилитационный комплекс

Всероссийского общества слепых

Отдел по разработке и внедрению адаптивных технологий

Как устроена спутниковая навигация

Учебно-методическое пособие для
преподавателей и слушателей курса
«Спутниковая навигация для незрячих»

Составители:

С. А. Боткина, М. В. Олейников

Под редакцией В. П. Баженова

Москва 2022

Содержание

Аннотация	3
Принципы работы навигационных систем	4
GPS	18
ГЛОНАСС	25
ГАЛИЛЕО	33
Beidou	38
QZSS	43
NavIC	46
Навигационный приёмник в современном устройстве	49

Аннотация

Учебно-методическое пособие предназначено для преподавателей и слушателей курса «Спутниковая навигация для незрячих», а также для всех интересующихся данной тематикой. В пособии рассматриваются принципы работы спутниковой навигации в целом и особенности её функционирования на сенсорных устройствах, рассказывается о самых распространённых навигационных системах.

Данное пособие и другие наши методические материалы вы можете найти на нашем образовательном сайте по ссылке <http://ksrk-edu.ru/>.

Принципы работы навигационных систем

Многие из нас пользуются спутниковой навигацией. Но задумывались ли вы, как это всё устроено и с чего начиналось? Давайте разберемся!

Толчком к началу практических работ в области спутниковой радионавигации послужил успешный запуск в СССР первого искусственного спутника Земли в октябре 1957 года.

В конце 1960-х годов были созданы низкоорбитальные спутниковые радионавигационные системы «Цикада» (СССР) и «Транзит» (США). Успешный опыт их эксплу-

атации подтвердил перспективность спутниковой радионавигации как основной линии развития радионавигации в целом.

ГНСС в том виде, в котором они существуют и используются сейчас, зародились в начале 1970-х годов, когда Советский Союз и США практически в одно время начали разработку глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. В настоящее время каждая из этих систем имеет на орбите полноценную орбитальную группировку навигационных космических аппаратов, которые обеспечивают предоставление услуг в глобальном масштабе.

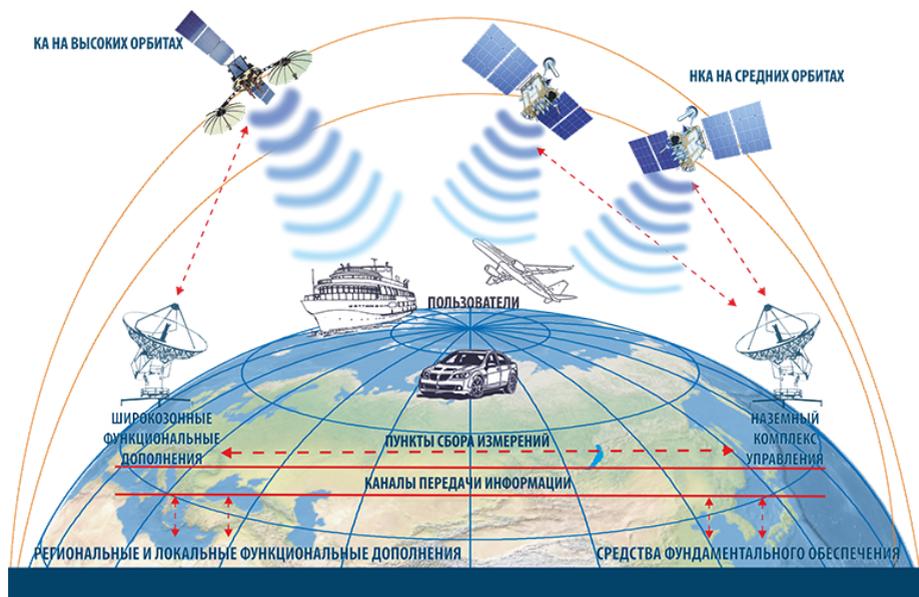
Помимо системы ГЛОНАСС и GPS, работы по развёртыванию глобальных навигационных спутниковых систем проводят Китай — система БЕЙДОУ, и страны Европейского союза — система ГАЛИЛЕО. Япония и Индия разворачивают региональные навигационные спутниковые системы QZSS и NavIC соответственно.

Современные навигационные спутниковые системы состоят из трёх основных элементов.

1. Космический сегмент

Космический сегмент, состоящий из навигационных спутников, представляет собой совокупность источников радионавигационных сигналов, передающих одновремен-

но значительный объём служебной информации. Основные функции каждого спутника — формирование и излучение радиосигналов, необходимых для навигационных определений потребителей и контроля бортовых систем спутника.



2. Наземный сегмент

В состав наземного сегмента входят космодром, командно-измерительный комплекс и центр управления. Космодром обеспечивает вывод спутников на требуемые орбиты при первоначальном развёртывании навигационной системы, а также периодическое восполнение спутников по мере их выхода из строя или выработки ресурса. Главными объектами космодрома являются техническая позиция и стартовый комплекс. Техническая позиция обеспечивает приём, хранение и сборку ракет-носителей и спутников, их испытания, заправку и состыковку. В число задач стартового комплекса входят: доставка носителя с навигационным спутником на старто-

вую площадку, установка на пусковую систему, предполётные испытания, заправка носителя, наведение и пуск.

Командно-измерительный комплекс служит для снабжения навигационных спутников служебной информацией, необходимой для проведения навигационных сеансов, а также для контроля и управления ими как космическими аппаратами.

Центр управления, связанный информационными и управляющими радиолиниями с космодромом и командно-измерительным комплексом, координирует функционирование всех элементов спутниковой навигационной системы.

3. Пользовательский сегмент

В пользовательский сегмент входит аппаратура потребителей. Она предназначена для приёма сигналов от навигационных спутников, измерения навигационных параметров и обработки измерений. Для решения навигационных задач в аппаратуре потребителя предусматривается специализированный встроенный компьютер. Разнообразие существующей аппаратуры потребителей обеспечивает потребности наземных, морских, авиационных и космических (в пределах ближнего космоса) потребителей.

Когда мы запускаем навигационный прибор, то хотим как можно скорее получить результат — точное

местоположение. А ведь определение текущих координат достаточно сложный процесс! Давайте же разберёмся, как всё это происходит.

Самая первая задача навигационного устройства — связаться с навигационным спутником. Как только связь будет установлена, происходит передача альманаха, то есть информации об орбитах спутников, находящихся в рамках одной навигационной системы. Связи с одним только спутником недостаточно для получения точного местоположения, поэтому оставшиеся спутники передают навигатору свои эфемериды, необходимые для определения отклонений, коэффициентов возмущения и других параметров.

А, вообще, навигационное сообщение включает в себя массу информации:

- Эфемеридная информация, необходимая для вычисления координат спутника с достаточной точностью.
- Погрешность расхождения бортовой шкалы времени относительно системной шкалы времени для учёта смещения времени космического аппарата при навигационных измерениях.
- Расхождение между шкалой времени навигационной системы и национальной шкалой времени, для решения задачи синхронизации потребителей.
- Признаки пригодности с информацией о состоянии спутника для оперативного исключения

спутников с выявленными отказами из навигационного решения.

- Альманах с информацией об орбитах и состоянии всех аппаратов в группировке для долгосрочного грубого прогноза движения спутников и планирования измерений.
- Параметры модели ионосферы, необходимые одночастотным приёмникам для компенсации погрешностей навигационных измерений, связанных с задержкой распространения сигналов в ионосфере.
- Параметры вращения Земли для точного пересчёта координат потребителя в разных системах координат.

Полный пакет данных передаётся на устройство около 12 минут. Поэтому, если навигационное устройство включается впервые или после длительного перерыва, то придется подождать получения нужной информации. Навигационное сообщение передаётся не одним пакетом, а отдельными блоками, что позволяет сократить время ожидания.

Время ожидания, или так называемое время холодного старта, зависит от различных показателей — качества приёмника, состояния атмосферы, шумов, количества спутников в зоне видимости и т.д.

Во время холодного старта навигационный приёмник должен проде-

лать следующее:

- Найти спутник и установить с ним связь.
- Получить альманах и сохранить его в памяти.
- Получить эфемериды от спутника и сохранить их.
- Найти ещё три спутника и установить с ними связь, получить от них эфемериды.
- Вычислить координаты.

Данные для альманаха действительны в течение 30 дней, эфемерид — в течение 30 минут. Поэтому, если навигационное устройство выключалось на непродолжительное время, то происходит так называемый горячий старт — в памяти навигатора уже име-

ется актуальный на данный момент альманах и эфемериды, поэтому после установления связи со спутником вычисление местоположения происходит практически мгновенно.

Существует ещё и тёплый старт — в этом случае альманах является актуальным, а эфемериды нужно обновить.

Производители используют различные методы уменьшения фазы поиска спутников и получения навигационных сообщений, например, скачивание и сохранение альманаха и эфемерид по беспроводным сетям передачи данных (метод Assisted GPS или A-GPS), это быстрее, чем извлечение этих данных из сигналов

глобальных навигационных спутниковых систем.

Повысить точность и достоверность определения пространственных координат, скорости движения и времени позволяет дополнительная информация, которую предоставляют пользователю функциональные дополнения ГНСС.

В настоящее время развиваются пять широкозонных систем дифференциальной коррекции: СДКМ (Россия), WAAS (США), EGNOS (Европа), GAGAN (Индия), MSAS (Япония).

GPS

Идея создания спутниковой навигационной системы зародилась ещё в 50-е годы прошлого столетия. Американская группа ученых, наблюдающая за запуском советских спутников, заметила, что при приближении спутника частота сигнала увеличивается и уменьшается при его отдалении. Это позволило понять, что возможно измерить положение и скорость спутника, зная свои координаты на Земле, и наоборот. Огромную роль в развитии навигационной системы сыграл запуск спутников на низкую околоземную орбиту.

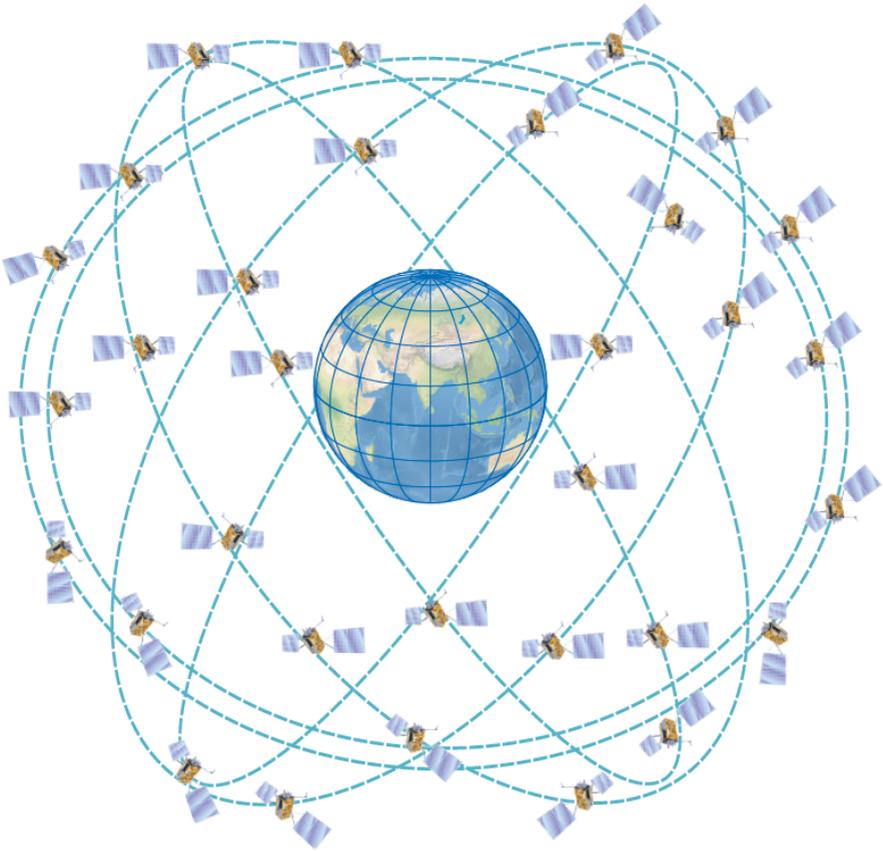


История создания Global Positioning System (GPS) ведёт своё начало с 1973 г., когда Управление совместных программ, входящее в состав Центра космических и ракетных исследований США, получило указание Министерства обороны США разработать, испытать и развернуть навигационную систему космического базирования. Результатом данной работы стала система, получившая первоначальное название NAVSTAR (NAVigation System with Time And Ranging), из которого прямо следовало, что система предназначена для решения двух главных задач — навигации, т.е. определения мгновенного положения и скорости потребителей, и синхронизации шкал вре-

мени. Поскольку инициатором создания GPS являлось Министерство обороны США, то в качестве первоочередных задач предусматривалось решение задач обороны и национальной безопасности. Отсюда ещё одно раннее название системы — оборонительная система спутниковой навигации (Defense Navigation Satellite System — DNSS).

Разработка концепции построения и архитектуры GPS заняла примерно 5 лет, и уже в 1974 году фирма Rockwell получила заказ на изготовление первых восьми космических аппаратов Block I для создания демонстрационной системы. Первый космический аппарат был запущен 22 февраля 1978 г., и в том же

году Rockwell получила контракт на создание ещё четырёх аппаратов.



Первоначально предполагалось, что орбитальная группировка GPS будет насчитывать 24 космических

аппарата в трёх орбитальных плоскостях высотой 20200 км и наклоном 63° . К моменту начала серийного производства в 1989 году космических аппаратов модификации Block II было принято решение об изменении параметров орбиты GPS, в частности, наклонение было изменено на 55° , а количество орбитальных плоскостей увеличено до 6.

Так как система GPS создавалась для применения в военных целях, то до 2000 года искусственные ограничения на определение местоположения существенно сдерживали её возможности использования в гражданских целях.

После отмены ограничений на точность определения координат

ошибка снизилась со 100 до 20 м (в последних поколениях GPS-приёмников при идеальных условиях ошибка не превышает 2 м). Такие условия позволили использовать систему для широкого круга общих и специальных задач:

Штатная орбитальная группировка GPS состоит из 32 основных космических аппаратов, расположенных на шести круговых орбитах, обозначаемых латинскими буквами от А до F. Дополнительно на некоторых орбитах может находиться один или два резервных аппарата, предназначенных для сохранения параметров системы при выходе из строя основных. Наклонение орбитальных плоскостей 55° ,

долготы восходящих узлов различаются на 60° . Высоте орбит 20 200 км соответствует период обращения 11 ч 58 мин, т. е. орбиты космических аппаратов GPS являются синхронными. В настоящий момент используется 30 космических аппаратов.

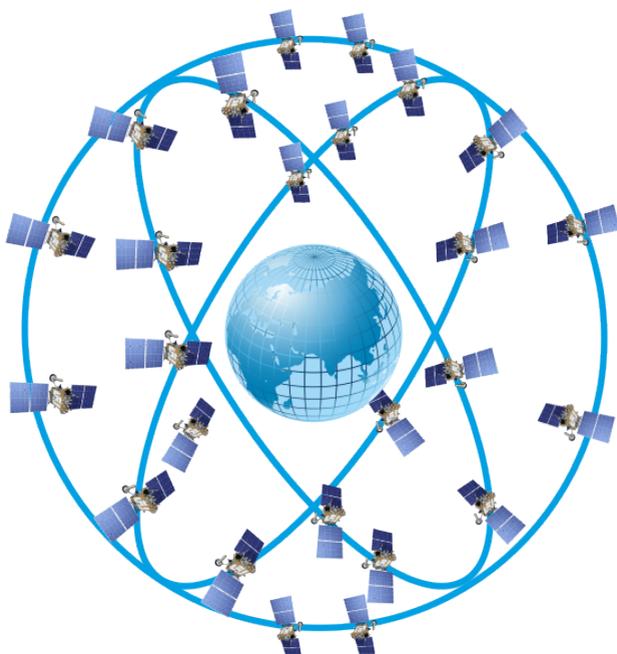
ГЛОНАСС



Впервые предложение по использованию спутников для навигации было сделано проф. В.С. Шебшаевичем в 1957 г. Эта возможность была открыта им при исследовании приложений радиоастрономических методов в самолетовождении. После этого в целом ряде советских институтов были проведены исследования, посвященные вопросам повышения точности навигационных определений, обеспечения глобальности, круглосуточного применения и независимости от погодных условий. Данные исследования были использованы в 1963 г. при опытно-конструк-

торских работах над первой отечественной низкоорбитальной системой «Цикада». В 1967 г. был выведен на орбиту первый навигационный отечественный спутник «Космос-192».

Система «Цикада» была сдана в эксплуатацию в составе четырёх спутников в 1979 г. Навигационные



спутники были выведены на круговые орбиты высотой 1000 км с наклоном 83° и равномерным распределением плоскостей орбит вдоль экватора. Система «Цикада» позволяла потребителю в среднем через каждые 1.5–2 часа входить в радиоконтакт с одним из спутников и определять плановые координаты своего места при продолжительности навигационного сеанса до 5-6 мин. Навигационная система «Цикада» использовала беззапросные измерения дальности от потребителя до навигационных спутников. Наряду с совершенствованием бортовых систем спутника и корабельной навигационной аппаратуры, серьёзное внимание было уделено вопросам повышения точно-

сти определения и прогнозирования параметров орбит навигационных спутников.

В дальнейшем спутники системы «Цикада» были дооборудованы приёмной измерительной аппаратурой обнаружения терпящих бедствие объектов, оснащённых специальными радиобуями. Их сигналы принимались спутниками системы «Цикада» и ретранслировались на специальные наземные станции, где производилось вычисление точных координат аварийных объектов (судов, самолётов и др.). Дооснащённые аппаратурой обнаружения терпящих бедствие спутники «Цикада» входили в систему «Коспас», которая совместно с американско-франко-канадской системой «Сарсат» образу-

ет единую службу поиска и спасения «Коспас-Сарсат», на счету которой уже несколько тысяч спасённых жизней. Создавалась «Цикада» (и её модернизация «Цикада-М») для навигационного обеспечения военных потребителей и эксплуатировалась с 1976 года. После 2008 года потребители системы «Цикада» и «Цикада-М» были переведены на обслуживание ГЛОНАСС, и эксплуатация этих систем была прекращена. Выполнить требования большого числа потребителей низкоорбитальные системы в силу принципов, заложенных в основу их построения, не могли.

Лётные испытания высокоорбитальной отечественной навигационной системы, получившей название

ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система), были начаты в октябре 1982 г. запуском спутника «Космос-1413». Система ГЛОНАСС была принята в опытную эксплуатацию в 1993 г. В 1995 г. развёрнута орбитальная группировка полного состава (24 космических аппаратов «Глонасс» первого поколения) и начата штатная эксплуатация системы. Большим недостатком было практически полное отсутствие гражданской навигационной аппаратуры и соответственно гражданских потребителей системы.

Однако далее орбитальная группировка ГЛОНАСС, как и система в целом, в связи с экономическими проблемами в 90-е годы достаточно быстро деградировала. К 2002 году

орбитальная группировка системы ГЛОНАСС насчитывала только 7 космических аппаратов, что не могло обеспечить территорию России навигационными сигналами системы ГЛОНАСС хотя бы с умеренной доступностью. Точностные характеристики уступали более чем на порядок системе GPS, срок активного существования космического аппарата составлял 3 – 4 года.

Ситуацию с деградацией системы ГЛОНАСС удалось переломить за счет разработки и открытия в 2002 году федеральной целевой программы, благодаря которой ГЛОНАСС возобновил полноценную работу в 2010 году.

В настоящее время штатная орбитальная группировка ГЛОНАСС состоит из 24 спутников, находящихся на средневысотных околокруговых орбитах с номинальными значениями высоты — 19100 км, наклона — $64,8^\circ$ и периода — 11 часов 15 минут 44 секунды. Значение периода позволило создать устойчивую орбитальную систему, не требующую, в отличие от орбит GPS, для своего поддержания корректирующих импульсов практически в течение всего срока активного существования. Номинальное наклонение обеспечивает стопроцентную доступность навигации на территории РФ даже при условии выхода из орбитальной группировки нескольких космических аппаратов.

ГАЛИЛЕО

Глобальная навигационная спутниковая система ГАЛИЛЕО созда-



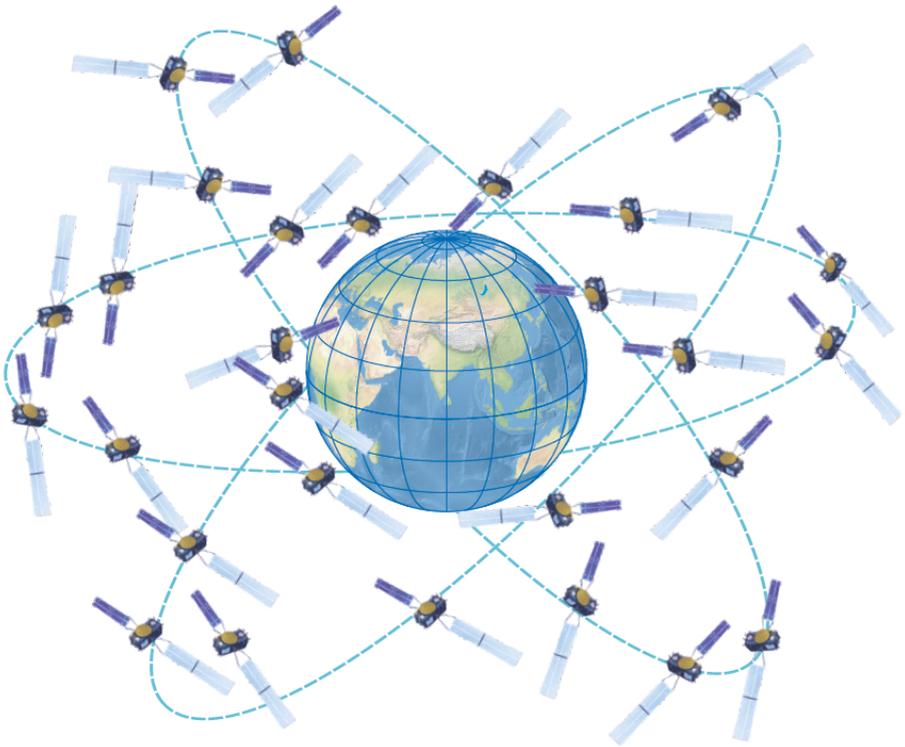
ётся Европейским союзом для обеспечения независимости стран членов в сфере координатно-временного и навигационного обеспечения.

Европейская программа по созданию глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) официально была утверждена в 1994 г., когда Европейский совет потребовал от Европейской комиссии предпринять шаги по развитию информационных технологий, включая и спутниковую навигацию. Было

принято решение развивать два направления. Первое из них — создание систем функциональных дополнений существующих ГНСС GPS и ГЛОНАСС. Эта программа получила название European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS). Второе направление заключалось в создании собственной ГНСС, предназначенной для гражданского применения и построенной на принципах государственно-частного партнёрства. В 1999 г. европейский проект по созданию ГНСС получил условное название ГАЛИЛЕО в честь итальянского астронома Галилео Галилея.

Экспериментальные спутники GIOVE-A и GIOVE-B были запу-

щены на орбиту 28 декабря 2005 г. и 27 апреля 2008 г. соответственно. Основная задача GIOVE-A состояла в оценке точностных характеристик навигационных радиосигналов ГАЛИЛЕО во всех частотных диапазонах, а GIOVE-B — в тестировании навигационной полезной нагрузки.



Два первых навигационных космических аппарата были запущены 20 октября 2011 с помощью ракеты «Союз-СТБ» с космодрома в Куру.

Орбитальное построение ГАЛИЛЕО предполагает, что на орбите будет 30 космических аппаратов на трёх круговых орбитах высотой 23222 км, периодом обращения 14 ч, наклоном 56° . По целевому назначению используются 24 аппарата, по 2 в каждой орбитальной плоскости являются резервными. Такая конфигурация группировки была выбрана, исходя из гарантированного обеспечения требований по точности и доступности при минимальных затратах на коррекцию орбиты за время существования кос-

мического аппарата. В настоящий момент группировка состоит из 26 спутников, используются 21.

Beidou

Beidou (БЭЙДОУ) — китайская навигационная система. В переводе Beidou — Северный Ковш, это китайское название созвездия Большой Медведицы.

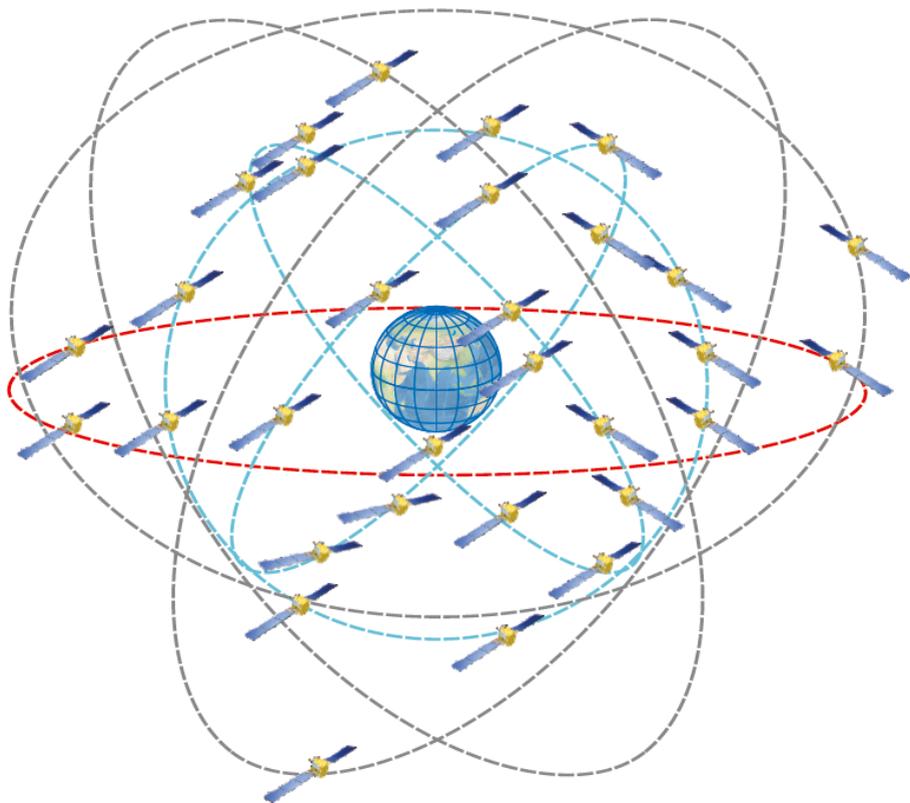


Идея создания китайской национальной региональной навигационной системы была предложена в 1983 году. Концепция системы, использующей два геостационарных космических аппарата (рабочее название системы Twinsat), прошла экспериментальную проверку в 1989 г. Эксперимент проводился на базе двух связных космических аппаратов DFH-2/2A, уже находившихся на орбите.

Первый этап создания системы Beidou был начат в 1994 году. В 2000 году было запущено два геостационарных спутника: космический аппарат (КА) Beidou-1A (30 октября 2000) и Beidou-1B (20 декабря 2000). 15 декабря 2003 китайская система Beidou первого поколения была сдана в эксплуатацию. Запуск третьего геостационарного спутника Beidou-1C в 2003 году улучшил эксплуатационные характеристики системы.

Развитие системы Beidou второго поколения, Beidou-2, началось в 2004 году. К концу 2012 года было запущено ещё 14 спутников (5 геостационарных спутников, 5 спутников на наклонной геосинхрон-

ной орбите и 4 спутника на средних орбитах), что позволило завершить развёртывание орбитальной группировки. Beidou-2 была разработана по принципу совместимости с Beidou-1, с применением схемы пассивного позиционирования, что



позволяло ей обеспечивать пользователей в странах Азиатско-тихоокеанского региона услугами определения местоположения, скорости, времени, широкодиапазонных дифференциальных поправок и отправки коротких сообщений.

Третий этап — это создание системы третьего поколения Beidou-3, начат в 2009 году. Основной целью является предоставление основных услуг для пользователей, находящихся на территории и акватории обоих Шёлковых путей (сухопутного и водного), а также соседних регионов, и завершение развёртывания орбитальной группировки из 35 космических аппаратов, предназначенной для обеспечения глобальных услуг пользователей.

На данный момент космический сегмент Beidou представляет собой орбитальную группировку смешанного типа, состоящую из 30 космических аппаратов на орбитах 3 типов (средняя круговая орбита, геостационарная орбита, геосинхронная наклонная высокая орбита).

QZSS

Японская ква-
зизенитная спут-
никовая система
QZSS (Quazi-Zenith



Satellite System (QZSS) — это реги-
ональная навигационная спутнико-
вая система, предназначенная для
обслуживания потребителей в Ази-
атско-Тихоокеанском регионе.

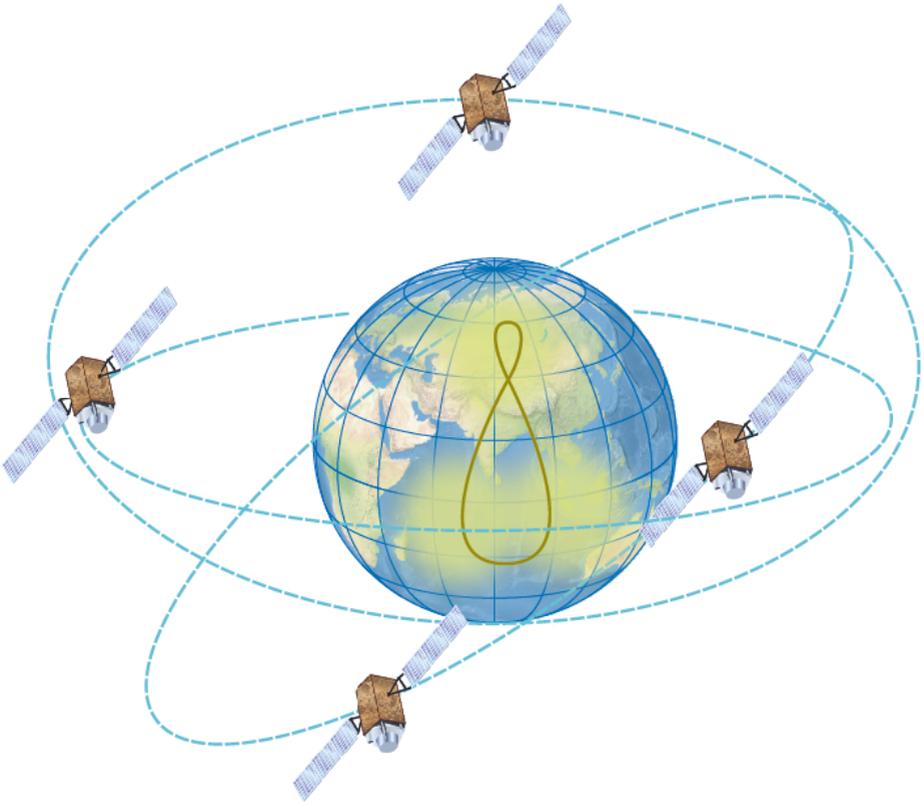
Работы по созданию QZSS нача-
лись в 2003 г. с разработки концеп-
ции, затем в период 2004 — 2005 гг.
было выполнено проектирование
и технико-экономическое обосно-
вание проекта. Разработка рабочей
документации на составные части
QZSS началась в 2006 г., а к их из-

готовлению японские специалисты приступили в 2008 г.

Первый космический аппарат Michibiki был успешно запущен на околоземную орбиту в сентябре 2010 г. Успешное завершение лётных испытаний позволило ввести QZSS в опытную эксплуатацию в июне 2011 г.

Система QZSS предполагает группировку из 4 космических аппаратов, 3 из которых на квазизенитных орбитах (наклонение $43^\circ \pm 4^\circ$ к экватору) в трёх орбитальных плоскостях. При этом орбитальные плоскости разнесены на 120° . Таким образом, каждый космический аппарат находится над территорией Японии в течение 8 часов каж-

дые сутки (угол места составляет минимум 60°). 1 аппарат размещен на геостационарной орбите. В проект создания системы также заложена возможность последующего расширения группировки до 7 космических аппаратов.



NavIC

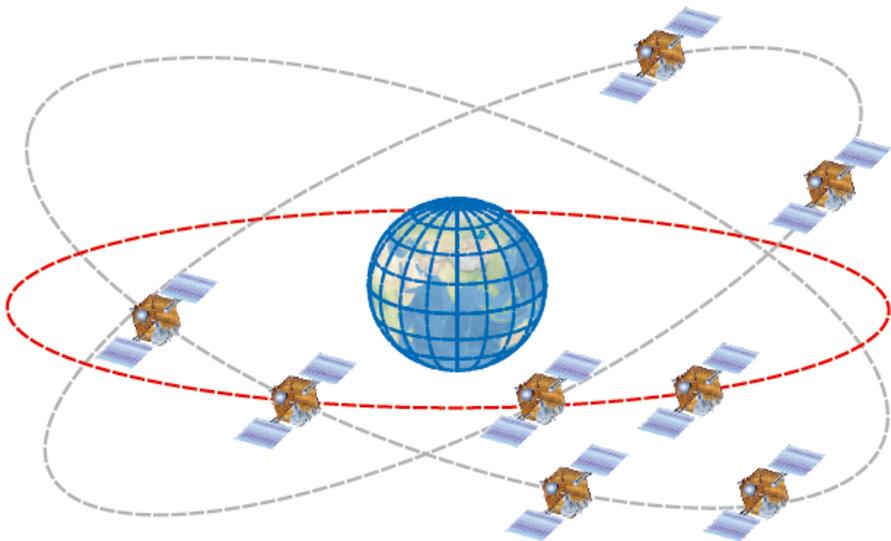
Одна из самых «молодых» систем — индийская навигационная система NavIC.



В мае 2006 г. Индия утвердила программу создания системы региональной навигационной спутниковой системы (Indian Regional Navigation Satellite System — IRNSS), которая должна обеспечить автономное навигационно-временное обеспечение на Индийском полуострове.

Первый космический аппарат IRNSS-1a запущен 8 июля 2013 г. Формирование штатной орбиталь-

ной группировки из 7 космических аппаратов закончено в 2016 году. В том же 2016 году система получила новое название — NavIC.



Конфигурация орбитальной группировки NavIC позволяет осуществлять координатно-временное и навигационное обслуживание зоны в пределах 40° в.д. — 125° в.д. и 40° ю.ш. — 40° с.ш. Таким обра-

зом, зона покрытия системы охватывает всю материковую часть Индии и территорию, простирающуюся на 1 500 км за её пределами, в том числе большую часть бассейна Индийского океана.

Навигационный приёмник в современном устройстве

По оценкам на 2021 год из 6,5 млрд навигационных приёмников, которыми пользуется человечество, около 6 млрд находятся в смартфонах, планшетах, умных часах и подобных устройствах. Такое количественное распределение, несмотря на низкую стоимость приёмников этого типа, приводит к соответствующим финансовым показателям. Ещё недавно около 40% выручки от продаж навигационных приёмников приходилось на компании Qualcomm и Broadcom, специализирующихся на микросхемах для мобильных устройств.

Если ещё несколько лет назад приём ГНСС-сигналов осуществлялся отдельным чипом, то сейчас производители пошли по пути объединения функций в системах-на-кристалле (СНК, англ. System-on-Chip). Такие микросхемы заменяют модули различного назначения: процессоры сигнальной обработки, приёмники, видео акселераторы, процессоры приложений и т.п. Лидерами по производству систем-на-кристалле являются такие компании как Apple (серия А), Qualcomm (серия Snapdragon), Broadcom, MediaTek (серия Helio), Samsung (серия Exynos), Huawei (серия Kirin).

КУЛЬТУРНО-СПОРТИВНЫЙ РЕАБИЛИТАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС
ВСЕРОССИЙСКОГО ОБЩЕСТВА СЛЕПЫХ



НАШ АДРЕС:
125252, Г. МОСКВА, УЛ. КУУСИНЕНА, 19А

ТЕЛЕФОН/ФАКС:
+7 (499) 943-2701

E-MAIL:
INFO@KSRK.RU

САЙТ:
WWW.KSRK.RU

