

BEIDOU — ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА КНР

В.Л. Кашин (27 ЦНИИ МО РФ)

В 1969 г. окончил оптико-механический факультет МИИГАиК по специальности «оптико-механические приборы». После окончания института проходил службу в рядах Вооруженных сил СССР и РФ. В настоящее время — старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра топогеодезического и навигационного обеспечения (до 2011 г. — 29 НИИ МО РФ) 27 ЦНИИ МО РФ. Кандидат технических наук.

Н.В. Новоселова (27 ЦНИИ МО РФ)

В 1993 г. окончила факультет русского языка и литературы Костромского государственного педагогического института им. Н.А. Некрасова по специальности «учитель русского языка и литературы». После окончания института работала на разных должностях в войсковых частях топографической службы ВС РФ. В настоящее время — научный сотрудник Научно-исследовательского центра топогеодезического и навигационного обеспечения (до 2010 г. — 29 НИИ МО РФ) 27 ЦНИИ МО РФ.

Е.А. Субботина (27 ЦНИИ МО РФ)

В 2021 г. окончила факультет землеустройства ГУЗ по специальности «землеустройство и кадастры». В настоящее время — младший научный сотрудник Научно-исследовательского центра топогеодезического и навигационного обеспечения (до 2010 г. — 29 НИИ МО РФ) 27 ЦНИИ МО РФ.

В 2012 г. начала функционировать китайская навигационная спутниковая система с официальным англоязычным наименованием BeiDou. Слово переводится как «Северный Ковш»: так в Китае называют созвездие, известное в России под именем «Большая Медведица». Его звезды служат для определения местоположения Полярной звезды, которая используется в навигации. На нее приблизительно указывает стрелка магнитного компаса. В связи с этим навигационная спутниковая система BeiDou второго поколения получила собственное наименование COMPASS с полным англоязычным наименованием BeiDou Navigation Satellite System. Аббревиатура этого наименования — BDSNSS, а чаще используется BDS [1].

К 2018 г. BeiDou стала полноценной глобальной навигационной спутниковой системой

(ГНСС). Она позволяет передавать зашифрованную в сигналах навигационных космических аппаратов (НКА) информацию в любое место на Земле и в ближнем космическом пространстве. Спутниковые приемники, принимающие сигналы НКА BeiDou, обеспечивают определение местоположения стационарных объектов, а также скорости и времени перемещения подвижных объектов. Все это становится возможным при наличии радиовидимости спутниковыми приемниками не менее четырех НКА BeiDou.

Услугами ГНСС BeiDou, благодаря ее высокой точности, уже пользуются 390 миллионов физических и юридических лиц в 220 странах мира.

Глобальный фактор ухудшения точности оперативного определения местоположения в пространстве (Position Dilution of Precision — PDOP) у BeiDou

лучше, чем 6 единиц при доступности сигналов порядка 99%, измерения скорости подвижных средств лучше 0,05 м/с, а синхронизация времени составляет 9,8 нс при достоверности 95% [2].

Несмотря на это, данные Международной системы мониторинга и оценки ГНСС (International GNSS Monitoring & Assessment System — iGMAS) за 2023 г. указывают на то, что доступность сигналов НКА BeiDou составляет 100%, непрерывность сигнала — 99,996%. Абсолютная точность глобального позиционирования составляет 5 м при ее заметном улучшении в Азиатско-Тихоокеанском регионе.

Практически уже установлено, что точность позиционирования характеризуется средней квадратической погрешностью (СКП), не превышающей 2,4 м в плане и 4 м по вертикали. В то

же время Служба высокоточного позиционирования Китая и близлежащих регионов, используя метод Precise Point Positioning (PPP), обеспечивает решение этой задачи с СКП в плане лучше 20 см и по высоте лучше 35 см с вероятностью 95% при временной задержке, не превышающей 20 минут [1].

В Азиатско-Тихоокеанском регионе зашифрованные сигналы НКА BeiDou позволяют решать задачи позиционирования с погрешностями, не превышающими 10 см [3].

Навигационные данные, полученные без ограничения по времени геодезическими приемниками сигналов BeiDou, позволяют в результате постобработки определить пространственное положение базовой линии D с СКП не более 5 (мм) + 1xD (мм) в плане и не более 10 (мм) + 2xD (мм) по высоте, где D приведено в км.

Такую точность обеспечивает космический сегмент BeiDou, включающий 35 НКА, и это даже без учета резервных и первых модификаций НКА.

Штатный космический сегмент BeiDou включает НКА, находящиеся на трех типах орбит, а именно:

- не менее 24 НКА Beidou-M на средневысотной орбите (Medium Earth Orbit — MEO) с апогеем 21 528 км;

- не менее 6 НКА Beidou-IGSO на геосинхронной орбите (Inclined Geosynchronous Orbit — IGSO) с апогеем 35 786 км и их наклоном относительно эк-

ватора на 55°. Подспутниковые точки НКА на этой орбите перемешаются на поверхности Земли по повторяющимся трассам в форме восьмерки. Центральные точки этих трасс находятся на долоте 118° в. д., а зона, которую в настоящее время обслуживают эти НКА, начинается от 70° в. д. до 140° в. д. и от 5° с. ш. до 55° с. ш.;

- не менее 5 НКА BeiDou-G на геостационарных орбитах (Geostationary Earth Orbit — GEO) на высоте 35 786 км.

На рис. 1 отображены типы орбит НКА BeiDou, а на рис. 2 показаны их подспутниковые точки и трассы [4].

НКА на орбитах GEO и MEO снабжены бортовыми синхронизирующими устройствами (БСУ) с атомными рубидиевыми часами, лазерными отражателями и регистраторами космических частиц.

Характеристики НКА, находящихся на орбитах GEO и MEO, приведены в таблице.

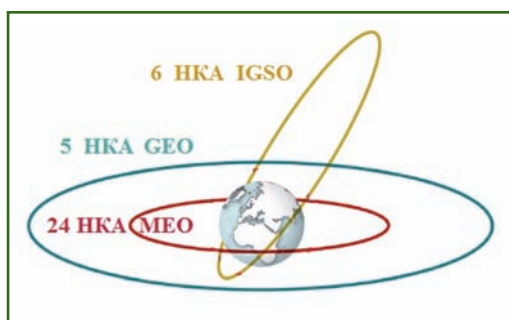


Рис. 1 Орбиты гибридного созвездия НКА BeiDou

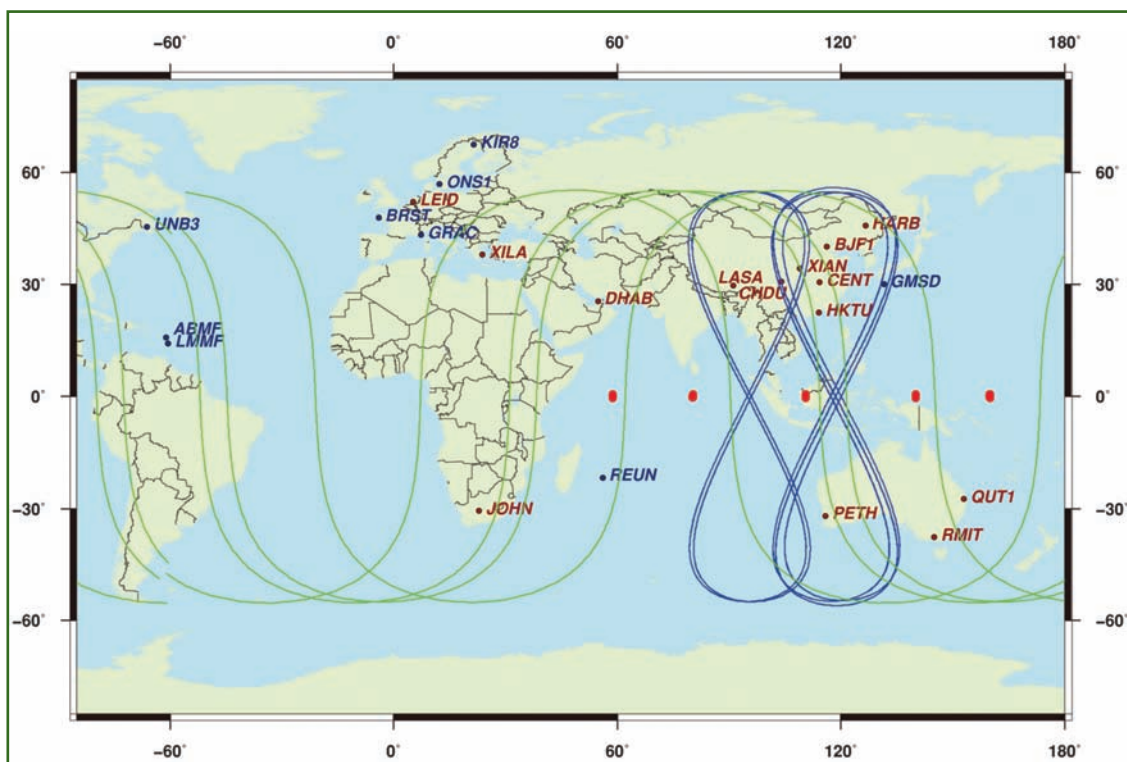


Рис. 2 Подспутниковые точки и трассы НКА BeiDou

Число одновременно наблюдаемых НКА BeiDou по состоянию на 02.10.2023 г. отображено на картограмме (рис. 3) [5].

Передача навигационных данных в ГНСС BeiDou осуществляется посредством навигационных сообщений, которые разделены на блоки D1 и D2, систематизированные по единому принципу. Блок D1 содержит данные об эфемеридах НКА, альманахах системы и параметрах часов спутников. Эти данные транслируются с орбит МЕО и GEO. Блок D2 содержит сведения о целостности радионавигационного поля и ионосферной сетке, которые транслируются геостационарными НКА GEO.

Радиочастотные диапазоны передачи сигналов L3/L5, L2 и L1 с навигационными сообщениями представлены на рис. 4 [6, 7].

Сигналы НКА BeiDou B1i, B3i, B1c, B2a и B2b находятся в открытом доступе, а сигнал PPP-B2b точного позиционирования и военного предназначения зашифрован.

Сигналы B1 и B2 расположены в фазовой квадратуре друг от друга и содержат как навигационные сообщения, так и дальномерные коды. Несущие частоты B1i и B2i когерентные и формируются от общего источника опорной частоты, установленного на борту спутника. Номинальная частота сигнала B1 равна 1561,098 МГц, а сигнала B2 — 1207,140 МГц.

В ГНСС BeiDou задержка сигнала на пути между бортовым источником опорной частоты включена в навигационное сообщение и определяется с погрешностью, не превышающей 0,5 нс, а отличия задержек сигналов B1 и B2 определены с точностью не более 1 нс.

Основой хронометража ГНСС BeiDou является время (Time BDT), регистрируемое в Между-

Характеристики НКА на орбитах GEO и МЕО

Наименование характеристики	Значение	
Модель НКА	DFH-3/3B	DFH-3B
Тип орбиты	GEO	МЕО
Долговечность НКА, лет	15	12
Масса, кг	828	1615
Производитель БСУ	Китай	Евросоюз
Количество БСУ, шт.	2	2

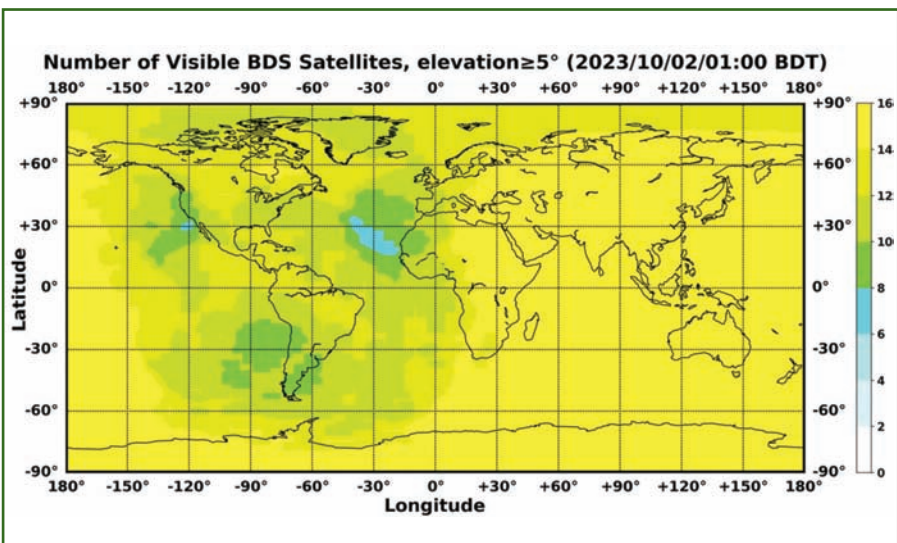


Рис. 3
Число одновременно наблюдаемых НКА BeiDou

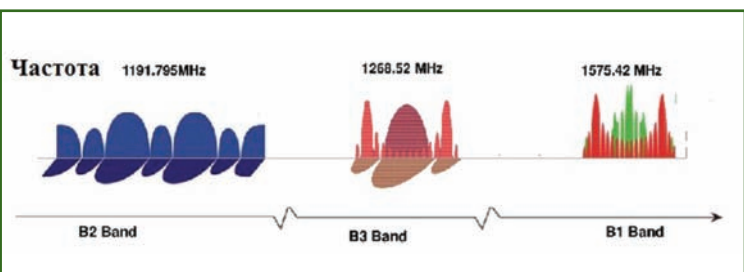


Рис. 4
Радиочастотные диапазоны передачи навигационных сообщений с НКА BeiDou

народной системе единиц (СИ) с отсчетами промежутков времени в секундах. Для согласования этого времени со средним солнечным временем используются високосные секунды (Leap second).

Начальная эпоха для BeiDou BDT 00:00:00 привязана к 1 января 2006 г. по всемирному

координированному времени (UTC). Смещения BDT относительно UTS контролируются в пределах 100 нс. Високосные секунды транслируются в навигационных сообщениях, содержащих навигационную информацию, привязанную к Китайской геодезической системе координат 2000 г. (China Geo-

detic Coordinate System 2000 — CGCS2000).

Отсчетной поверхностью для системы координат CGCS2000 является одноименный эллипсоид. В соответствии с Международной земной опорной системой координат (International Terrestrial Reference System — ITRS) ось Z CGCS2000 направлена в опорный полюс IRP (IERS Reference Pole), ось X лежит в плоскости опорного меридиана IRM (IERS Reference Meridian), ось Y дополняет систему до правой тройки векторов.

Ориентация НКА BeiDou проводится по оси +ZIGS, направленной к Земле.

На орбитах MEO и IGSO НКА ориентируются по рысканию, во время которого они непрерывно вращаются вокруг оси +ZIGS для поддержания оси YIGS в перпендикулярной плоскости, образованной Солнцем, Землей и КА (рис. 5).

Для НКА на орбите GEO ось +XIGS направлена в сторону освещенного солнцем полушария, а ось +YIGS ориентирована перпендикулярно самой плоскости орбиты (рис. 6).

Отсчеты первичных координатных определений в системе координат CGCS2000 формируются на беззапросных измерительных станциях. Эти отсчеты и информация с контрольных станций приема навигационных сигналов с НКА поступают в основной Центр управления группировкой НКА BeiDou, в котором формируются данные, закладываемые на борт НКА посредством земных станций восходящих линий связи. Кроме того, с 2018 г. в Тунисе функционирует дополнительный Центр управления группировкой НКА BeiDou.

Наземный сегмент BeiDou расширяет система GAS (Ground Augmentation Systems). Она состоит из 155 опорных станций и почти 2200 региональных станций на территории Китая. В GAS

BeiDou используются сигналы BDNSS BAS B1c и BDNSS BAS B2a. Они обеспечивают позиционирование в режиме реального времени на уровне нескольких метров, дециметров и даже сантиметров, а при постобработке данных СКП координатных определений составляет не более 5 (мм) + 1xD (мм) в плане и не более 10 (мм) + 2xD (мм) по высоте.

Функциональное дополнение GAS позволяет осуществлять региональную передачу коротких сообщений по восходящему каналу радиосвязи диапазона L, по нисходящему каналу диапазона S и сетям сотовой связи поколений 2G, 3G, 4G и 5G на основе разрабатываемых в Ки-

тае стандартов международной мобильной связи.

В настоящее время Китай реализует программу стандартизации услуг и средств в области ГНСС. Эта программа включает ратификацию стандартов ICAO, ориентированных на использование протоколов вывода результатов позиционирования по стандарту NMEA0183 и форматов обмена данными по стандарту RINEX 3.04 [8–10].

Для совместного использования и расширения возможностей BeiDou Китай сотрудничает на двусторонней основе с Евросоюзом, США, Ираком, Тунисом, Саудовской Аравией и Российской Федерацией.

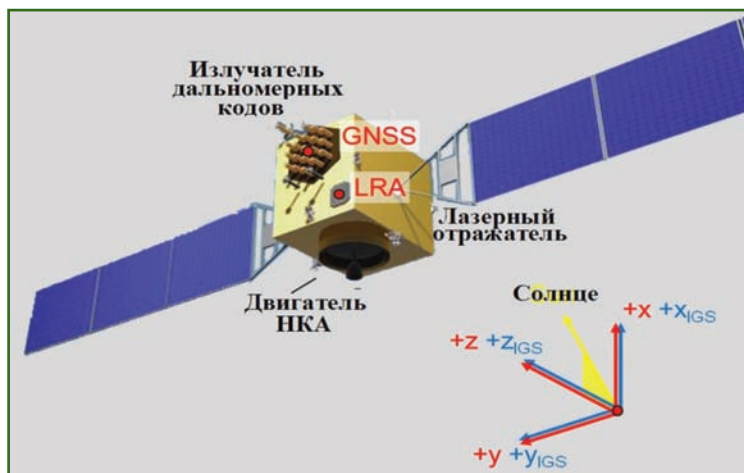


Рис. 5

Системы ориентирования НКА BeiDou на орбитах MEO и IGSO



Рис. 6

Система ориентирования НКА BeiDou на орбите GEO

Главной целью разработки ГНСС BeiDou являлось создание спутниковой навигационной системы мирового уровня, основанной на принципах:

— открытости, подразумевающим, что сведения о возможностях и планах совершенствования системы не скрываются;

— ориентирования на предоставление бесплатных услуг высокого качества их пользователям по всему миру;

— автономности, подразумевающим, что система должна функционировать независимо от других навигационных систем;

— совместимости, подразумевающим, что система должна быть пригодна для совместного использования одновременно с другими ГНСС;

— прогрессивности, подразумевающим, что совершенствование системы должно вестись постоянно, планомерно и с внедрением новейших технологий;

— обеспечения прав Китая на интеллектуальную собственность касательно всех компонентов системы.

В 2022 г. Китай подал более 7000 заявок на получение патентов, связанных со спутниковой навигацией, что подчеркивает его приверженность инновациям и высококачественным разработкам.

Совершенствование BeiDou следует модели быстрого развития региональных сервисных мощностей с последующим постепенным расширением услуг на весь мир. Эта практика и проложила путь к созданию спутниковой навигационной системы с китайской спецификой и одновременно определила направления разработок ГНСС следующих поколений [10].

В мае 2023 г. был успешно запущен первый резервный НКА BDS-3 GEO. В настоящее время в рабочем состоянии на

орбите находится не менее 46 НКА, в том числе 15 в созвездии BDS-2 и 31 в созвездии BDS-3, а в декабре 2023 г. к этому числу добавились еще 2 НКА BeiDou. Это 57-й и 58-й запуски НКА BeiDou [5, 11].

В целом в ГНСС BeiDou уже реализованы методы совместного управления каналов спутник — земля и спутник — спутник, унифицированная передача информации и скоординированная обработка данных наблюдений. В сочетании с искусственным интеллектом, облачными платформами и аналитикой больших данных были обновлены возможности непрерывного глобального мониторинга и оценки возможностей BeiDou как ГНСС.

В настоящее время продвигаются исследования по совершенствованию навигации, основанной на технологиях использования низкоорбитальных КА и их практического применения для повышения точности и целостности системы и удовлетворения современных требований, характеризующихся повсеместным подключением к интеллектуальным устройствам.

Дополнительные усилия Китая уже направлены на совершенствование космических группировок с НКА с различными типами орбит, на разработки основ лунной космической навигации с целью расширения их охвата услугами BeiDou и продолжения исследований в области автономного хронометража с использованием данных наблюдений за пульсарами [5].

Учитывая фундаментальную философию независимых инноваций, открытой интеграции, всеобщего единства и стремления к совершенству, интеграция BeiDou с инновационными областями, такими как 5G, искусственный интеллект и большие данные, будет неуклонно ускоряться с целью формирования национальной системы пози-

ционирования, навигации и хронометража (PNT), которая будет более распространенной, интегрированной и интеллектуальной уже к 2035 г.

▼ Список литературы

1. Ran Chengqi. English Name of BeiDou Navigation Satellite System Issued. China Satellite Navigation Office. 18 Oct 2015.

2. SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems). EoPortal. 6 Apr. 2020.

3. LI Zuobu. BeiDou Navigation Satellite System. Construction and China Satellite Navigation Office a Oct. 10.2022.

4. Lina He, Maorong Ge, Jiexian Wang, Jens Wickert, Harald Schuh. Experimental Study on the Precise Orbit Determination of the BeiDou Navigation Satellite System. Department of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China. Department of Geodesy and Remote Sensing, German Research Center for Geosciences, Potsdam 14473, Germany.

5. Xie Jun. BDS: Enhancing System Operations and Application Development, and Advancing New Technologies // GPS World. December 21, 2023.

6. J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares. GNSS Data Processing, Vol. I: Fundamentals and Algorithms. Publication (ESA TM-23/1), May 2013.

7. John W. Betz. Engineering satellite-based navigation and timing. Global Navigation Satellite Systems, Signals, and Receivers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Published by John Wiley, 2016.

8. GeoS NMEA-2018. ГНСС модули GeoS. Протокол обмена NMEA. Версия 4.0, редакция 1.0.M, ООО ДЦ «Геостарнавигация».

9. ГОСТ Р 53864-2010. Глобальная навигационная спутниковая система. Сети геодезические спутниковые. Термины и определения.

10. Кашин В.Л. Глобальные навигационные спутниковые системы. Итинерарий по российским стандартам. — М.: Грифон, 2023.

11. Zhang Kaiwei, Liang Jun. China launches new satellites to enhance BDS-3 services. People's Daily Online. December 27, 2023.