

# НАВИГАЦИОННЫЕ И ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.78

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ СТРУКТУР НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Г.Г. Ступак, Л.Н. Лысенко, В.В. Бетанов,  
Ф.В. Звягин, К.Г. Райкунов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: sm3@sm.bmstu.ru

*Оценено текущее состояние и перспективы совершенствования существующих и вновь создаваемых глобальных и региональных навигационных спутниковых систем. Приведены их основные характеристики, определяемые баллистической структурой орбитального построения. Сформулированы требования, предъявляемые к структуре орбитальной группировки, и выявлены основные тенденции развития зарубежных систем. На основании выполненного анализа сопоставлены важные тактико-технические характеристики отечественной системы ГЛОНАСС и зарубежных систем на настоящий момент времени и длительную перспективу. Показана принципиальная возможность достижения конкурентоспособного уровня характеристик системы ГЛОНАСС к 2020 г. по реализуемой точности навигационных определений, доступности и составу орбитальной группировки.*

**Ключевые слова:** глобальные и региональные навигационные спутниковые системы, структура орбитального построения, тенденции развития систем и их интеграция, свойства навигационных спутниковых систем.

## STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ORBITAL STRUCTURES OF NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS

G.G. Stupak, L.N. Lysenko, V.V. Betanov,  
F.V. Zvyagin, K.G. Raikunov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: sm3@sm.bmstu.ru

*The current status and development prospects of existing and newly created global and regional navigation satellite systems are assessed. The main characteristics of these systems determined by the ballistic structure of orbital construction are presented. The requirements are formulated, which are imposed on the structure of orbital constellation, and the main trends in development of foreign systems are revealed. Based on the performed analysis, the important performance characteristics of the domestic GLONASS are compared with those of foreign systems at the current moment and in the future. Feasibility is shown to achieve the competitive level of the GLONASS characteristics in the field of implemented accuracy of navigation determinations, the constellation availability and composition by 2020.*

**Keywords:** global and regional navigation satellite systems, structure of orbital construction, trends of development and integration of the systems, behavior of navigation satellite systems.

**Основные характеристики навигационных систем, определяемые структурой орбитальной группировки.** К основным характеристикам навигационных спутниковых систем (НСС) относят: геометрические факторы (ГМФ), являющиеся характеристикой точности навигационных определений; доступность навигации (характеристика непрерывности навигационных определений); устойчивость орбитальной структуры (характеристика стабильности состояния радионавигационного поля (РНП) системы и необходимого запаса рабочего тела спутника для поддержания структуры орбитальной группировки (ОГ) в течение срока ее активного существования).

Геометрические факторы характеризуют то, насколько конкретная геометрическая конфигурация рабочего “созвездия” видимых навигационных космических аппаратов (НКА), определяемая структурой ОГ, ухудшает точности определения навигационных параметров по сравнению с оптимальным “созвездием”. Пространственный ГМФ — это отношение трехмерной погрешности местоопределения в точке нахождения потребителя к погрешности измерения псевдодалности (PDOP) — коэффициент пересчета эквивалентной погрешности псевдодалности в погрешности пространственных навигационных определений потребителя.

Доступность навигации — характеристика, или показатель, отражающая возможность потребителя на заданном временном интервале и в данном регионе воспользоваться РНП для навигации с заданной точностью. Доступность для любой точки в зоне действия системы — процент времени на заданном интервале (сутки, месяц, год), в течение которого значение пространственного ГМФ, рассчитываемое для используемого по целевому назначению НКА, не превышает заданного значения для любой точки в зоне действия системы.

Перечисленные характеристики могут служить критериями анализа состояния и перспектив совершенствования существующих и вновь создаваемых глобальных и региональных спутниковых систем:

- Global Positioning System (GPS) (США), первоначально спланированная как система NAVSTAR;
- глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) “Ураган”;
- глобальная навигационная спутниковая система GALILEO (“Галилео”) (Европейский союз);
- навигационная спутниковая система COMPASS (КНР);
- навигационная система Quasi-Zenith (QZSS) (Япония);
- спутниковая региональная система навигации (IRNSS) (Индия).

**Особенности построения ОГ спутниковых систем.** В основу орбитального построения НСС второго поколения заложен общий

принцип постоянного глобального покрытия поверхности Земли, воздушного и околоземного космического пространства зонами радиовидимости одновременно четырех НКА, чтобы любой пользователь, находящийся в произвольной точке Земли или околоземного пространства, постоянно имел возможность наблюдать одновременно (с вероятностью близкой к единице (0,9999)) не менее четырех таких спутников. Проведенные пользователем дальномерные беззапросные (псевдодальномерные) измерения до каждого из спутников позволяют определить три искомые координаты и расхождение между часами (шкалой времени) пользователя и часами спутников, приведенными к единой системной шкале времени. По скорости изменения измеренных псевдодальностей (радиальным псевдоскоростям) до этих спутников находится и вектор скорости пользователя. Возможность непрерывного слежения за навигационными ориентирами, предоставляемая НСС второго поколения, позволяет по-новому подойти к построению бортовых систем управления различными подвижными объектами (кроме подводных, подземных объектов и объектов, функционирующих в особых условиях) и заменить основанные на применении гироскопов довольно сложные и дорогостоящие автономные средства исчисления параметров движения сравнительно простыми и недорогими навигационными приемниками.

Следовательно, НСС должна быть построена так, чтобы:

— в глобальном масштабе обеспечивалась возможность в любой момент времени обсервации не менее четырех навигационных спутников с оптимальными с позиции точности решения навигационной задачи конфигурациями их “созвездий”;

— навигационные радиосигналы, излучаемые каждым спутником, обеспечивали возможность высокоточного проведения приемниками пользователей дальномерных и радиально-скоростных беззапросных измерений;

— параметры движения каждого спутника (собственные эфемериды) и параметры синхронизации его бортовых часов с единым временем системы (частотно-временные поправки) с высокой (до единиц метров (и менее) и наносекунд (и менее) соответственно) точностью должны быть определены и переданы в составе излучаемых соответствующим спутником навигационных сигналов.

Исходя из перечисленных требований, первоначально американскими и несколько позднее отечественными разработчиками была выбрана трехплоскостная орбитальная структура НСС. Однако в конечном счете в США ее трансформировали в шестиплоскостную с наклоном  $55^\circ$  и резонансной высотой орбит примерно 20 200 км. Существенный недостаток такой структуры — необходимость исполь-

зования “резонансных” орбит, период обращения по которым составляет половину “звездных” суток Земли (11 ч 58 мин 02 с). В результате каждый спутник рассматриваемой НСС движется вокруг Земли относительно своей детерминированной трассы с индивидуальным набором возмущающих ускорений от аномалий гравитационного поля по его тессеральным гармоникам. Неодинаковые (индивидуальные) для каждого спутника возмущения вызывают “рассинхронизацию” их взаимного движения и, соответственно, “расползание” орбитальной структуры, а это, в свою очередь, приводит к необходимости периодического выполнения коррекций движения того или иного НКА орбитальной структуры (возможно до одного-трех одновременно). При проведении коррекции и в течение последующих нескольких суток спутник вследствие возникшего несоответствия реального движения ранее рассчитанным эфемеридам не пригоден для применения его в качестве радионавигационной точки, что ухудшает доступность и точность навигационного поля, образуемого ОГ. Учитывая это, еще в конце 1980-х годов в США (хотя был принят на международном уровне и опубликован стандарт на “минимальные технические характеристики GPS”), были вынуждены, в том числе и по указанной причине, поддерживать орбитальную структуру в увеличенном количественном составе (до 27–30 НКА).

Подобная орбитальная структура НСС независимо, примерно в одно время со специалистами США, предлагалась отдельными исследователями и в России. В силу существовавших условий и ограничений по имеющимся в то время средствам выведения на наклонную круговую орбиту высотой около 20 000 км (только ракета-носитель “Протон” с возможностью группового выведения на такие орбиты одновременно трех НКА), необходимости создания наилучших геометрических условий наблюдаемости навигационных “созвездий” в средних и высоких широтах, территориальным ограничениям по размещению измерительных средств наземного комплекса управления (НКУ), а также в силу минимизации общего числа функционирующих и резервных НКА в структуре (в шестиплоскостной структуре в орбитальном резерве следовало бы использовать не три, а шесть спутников по числу орбитальных плоскостей) был принят первоначальный вариант построения орбитальной группировки ГЛОНАСС, включающий в себя 24 навигационных спутника, которые расположены в трех орбитальных плоскостях с наклоном их к плоскости экватора  $64,8^\circ$  и абсолютными долготами восходящих узлов, равномерно разнесенными через  $120^\circ$  вдоль экватора Земли. В каждой орбитальной плоскости равномерно (через  $45^\circ$ ) обращаются восемь спутников на околокруговых орбитах высотой примерно 20 000 км (позднее, исходя из условий

обеспечения устойчивости орбитальной структуры и точности эфемерид, высота орбит была уточнена баллистиками и принята равной 19 140 км с номинальным периодом обращения спутника вокруг Земли 11 ч 15 мин 44 с).

Общие данные на 1 января 2013 г. по орбитальным структурам существующих и перспективных глобальных НСС приведены ниже:

	ГЛОНАСС	GPS	GALILEO	COMPASS
Число орбитальных плоскостей .....	3	6	3	3
Число КА в ОГ (номинальное / фактическое) .....	24/29	24/31	27/4	27/4
Структура орбитального построения .....	Жесткая	Условно-произвольная	Жесткая	Жесткая
Наличие орбитального резерва .....	Есть	Нет	Есть	Нет

Под понятиями “жесткая” и “условно-произвольная” структура орбитального построения понимаются, прежде всего, “не изменяющееся” или частично “изменяющееся” структурное построение системы в процессе орбитального полета НКА.

Достоинства жесткой структуры орбитального построения НСС:

- удобство формирования и поддержания структуры ОГ;
- обеспечение эквивалентного уровня возмущений, обусловленных действием гравитационного поля Земли (ГПЗ), как наиболее значимого для движения НКА (одинакового для всех спутников) ОГ;
- уход от гравитационного резонанса для реализации более благоприятных условий эфемеридного обеспечения при региональных (ограниченных) схемах построения НКУ.

В связи с изложенным структура орбитального построения НКА с ГЛОНАСС должна оставаться “жесткой” и при модернизации системы.

Тем не менее следует отметить, что орбитальная структура ГЛОНАСС, хотя и удобна с позиции формирования и поддержания орбитальной структуры, однако, будучи замкнутой (ограниченной по количественному составу 24 НКА), все же требует дальнейшего совершенствования.

Разработчики НСС GALILEO и COMPASS при выборе орбитальных структур, как и GPS, опираясь на возможности имеющейся глобальной сети станций слежения, все же остановились на принципах орбитального построения этих систем, в том числе и в “жестких” структурах, заложенных в ГЛОНАСС, косвенно признав достоинства орбитального построения отечественной системы.

Значения номинальных параметров ОГ НСС ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, COMPASS приведены в табл. 1.

## Значения номинальных параметров ОГ НСС

Параметр ОГ	ГЛОНАСС-24	GPS*	GALILEO	COMPASS	
Число КА / число плоскостей	24/3	31/6	27/3	27/3- МЕО+5 ГЕО	3 ГСНО
Большая полуось $a$ , км	25 509	26 560	29 600	27 908 42 166	42 166
Период $p$ , с	40 544	43 077	50 670	46 400 86 170	86 170
Наклонение $i$ , град	64,8	53...56	54,7	55	55
Разность восходящих узлов соседних плоскостей $\Delta\Omega$ , град	120	60	120	120	120
Расстояние по аргументу широты между соседними НКА в плоскости $\Delta u$ , град	-45	Неравномерное	-40	-40	—
Угол межплоскостного фазирования (разность аргументов широты соответствующих спутников ( $i + 1$ )-й и $i$ -й плоскостей ( $i = 1, 2$ )) $\Delta\varphi$ , град	15	—	13,3	13,3	—

\* В качестве ОГ GPS рассматривалась реальная ОГ из альманаха от 30.09.2012.

Распределение КА орбитальных группировок GPS по аргументу широты в каждой плоскости приведено в табл. 2, ОГ GALILEO и COMPASS – в табл. 3.

Согласно приведенным данным, основные действующие системы ГЛОНАСС и GPS существенно отличаются по структуре. ГЛОНАСС – трехплоскостная регулярная система с равномерным распределением узлов по экватору и НКА в плоскостях, устойчивая к возмущениям, GPS – шестиплоскостная нерегулярная система, спутники которой подвержены резонансным возмущениям за счет периода, кратного периоду обращения Земли. Для компенсации уходов спутников вследствие неустойчивости системы GPS в ней предусмотрено проведение регулярных коррекций орбит спутников.

На рис. 1 приведено распределение НКА GPS для реального состояния ОГ; некоторые спутники расположены рядом, например, пара НКА в плоскости С 6 и 3, а также пара НКА в плоскости Е 32 и 20.

Вновь развертываемые НСС GALILEO и COMPASS создаются как регулярные трехплоскостные ОГ.

**Основные тенденции развития зарубежных НСС.** В период 2010–2012 гг. в GALILEO был реализован “этап орбитальных проверок” (In Orbit validation, IOV) – демонстрационные испытания

**Распределение КА орбитальных группировок GPS по аргументу широты, град, в каждой плоскости A–F**

A $\Omega =$ $= -16^\circ \dots -9^\circ$	B $\Omega =$ $= 38^\circ \dots 47^\circ$	C $\Omega =$ $= 96^\circ \dots 110^\circ$	D $\Omega =$ $= 147^\circ \dots 164^\circ$	E $\Omega =$ $= -130^\circ \dots 138^\circ$	F $\Omega \approx$ $\approx -77^\circ \dots -70^\circ$
6*/110	11/271	2/81	0/339	4/135	12/178
7*/79	15/138	5/94	1/205	9/181	13/302
8*11	24/243	16/308	3/240	17/41	14/48
23*/340	27/210	18/54	10/354	19/270	22/205
30*/228	29/169	28/179	20/100	21/11	25/77
—	—	—	—	31/286	—

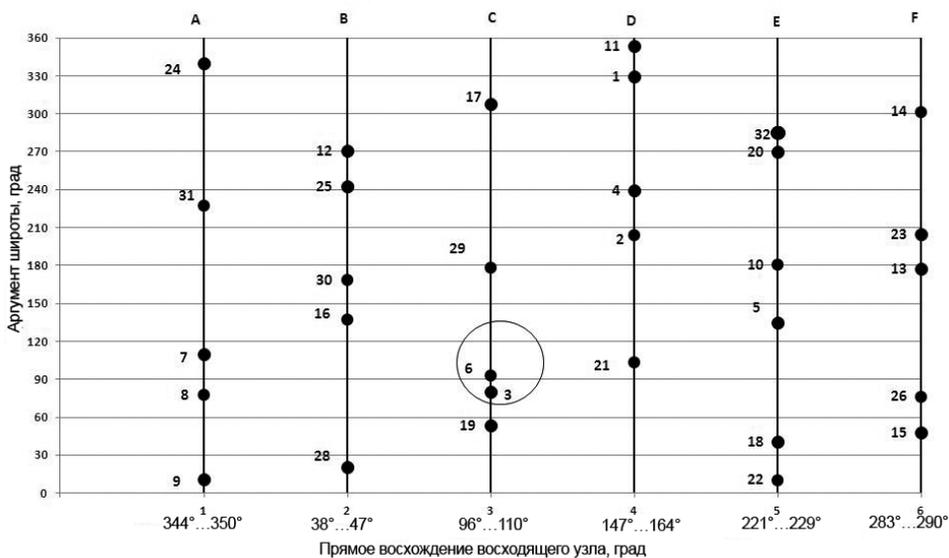
Пр и м е ч а н и е. В числителе указан номер КА, в знаменателе — аргумент широты.  
\* Номер КА взят из альманаха (№ ПСП-1).

**Распределение КА орбитальных группировок GALILEO (числитель) и COMPASS (знаменатель) по аргументу широты, град, в каждой плоскости**

Номер КА в плоскости	$\Omega$ , град		
	0/60	120/180	240/300
1	0/0	13,3/13,3	26,7/26,6
2	-40/-40	-26,7/-26,7	-13,3/-13,3
3	-80/-80	-66,7/-66,7	-53,3/-53,3
4	-120/-120	-106,7/-106,7	-93,3/-93,3
5	-160/-160	-146,7/-146,7	-133,3/-133,3
6	-200/-200	-186,7/-186,7	-173,3/-173,3
7	-240/-240	-226,7/-226,7	-213,3/213,3
8	-280/-280	-266,7/-266,7	-253,3/253,3
9	-320/-320	-306,7/-306,7	-293,3/-293,3

четырёх летных образцов. В 2011–2012 гг. были запущены четыре КА GIOV, доработанные по итогам запуска и эксплуатации первых двух КА GIOVE-A и GIOVE-B. Цель их запуска — летные испытания, проверка функционирования наземной инфраструктуры (НКУ и комплекса средств эфемеридно-временного обеспечения).

Штатная ОГ GALILEO включает в себя 30 КА (27 штатных КА и три резервных) на квазикруговых орбитах высотой примерно 23 222 км в трех плоскостях с наклоном  $56^\circ$ . Один из КА в каждой орбитальной плоскости является резервным [1]. Поэтому для проводимых ниже оценок характеристик РНП ОГ GALILEO принята трехплоскостная



**Рис. 1. Распределение НКА реальной орбитальной группировки GPS по плоскостям А–F и аргументам широты (по данным на 3 февраля 2013 г. 0 ч по декретному московскому времени)**

ОГ с девятью равномерно распределенными КА в каждой плоскости и полюсью 29 600 км. При выборе значения полуоси учитывалось, что КА GALILEO, выведенные на орбиту в 2011–2012 гг., имели большую полуось эллиптической орбиты, равную приблизительно 29 600 км, в отличие от первоначального варианта ОГ GALILEO, в которой большая полуось составляла 29 993 км.

В первоначальной ОГ КА имели три разные трассы и испытывали резонансное влияние соответствующей гармонике ГПЗ.

Рассматриваемая ОГ более устойчива к влиянию ГПЗ, хотя и не является однотрассовой. Орбитальная группировка из 30 КА и 10 КА, равномерно расположенными в каждой плоскости (с повторяемостью трассы 17 витков за 10 сут.) — однотрассовая с большой полуосью 29 600 км. Однако характеристики такой ОГ без одного КА в каждой плоскости хуже, чем ОГ из 27 КА, равномерно распределенных в трех плоскостях (большая полуось 29 600 км).

Активно ведутся работы по созданию НСС COMPASS (Beidou-2). Кроме глобальной составляющей COMPASS-M в составе 27 средне-орбитальных КА (на середину июля 2013 г. запущено четыре КА) в COMPASS дополнительно будет входить еще две региональные НСС COMPASS-G и COMPASS-I: COMPASS-G на базе пяти навигационно-связных КА на геостационарных орбитах (запущено пять КА); COMPASS-I в составе пяти КА на круговых геосинхронных орбитах (запущено пять КА). Всего в системе COMPASS будет использоваться в

целях координатно-временного и навигационного обеспечения 37 КА (по первоначальным данным 35 КА).

Региональная квазизенитная НСС QZSS будет состоять из 3–7 КА на геосинхронных эллиптических орбитах. Спутники этой системы выводятся на высокую эллиптическую орбиту (около 12 ч в сутки угол возвышения спутника будет обеспечиваться более  $70^\circ$ , т.е. спутники располагаются практически в зените, отсюда и название системы). Орбиты выбраны так, чтобы их подспутниковые точки описывали одну и ту же трассу с одинаковыми временными интервалами. Таким образом, гарантировано постоянное нахождение как минимум одного аппарата в зените, что очень важно для гористой местности и для городов с высокими зданиями. Система позволяет только уточнять данные, полученные с помощью GPS, что ставит ее в некоторую зависимость от системы США.

В табл. 2–3 указаны параметры орбит ОГ НСС, по которым моделировались приведенные далее навигационные характеристики.

Индия, как Китай и Япония, намерена развернуть региональную спутниковую систему, полноценное функционирование которой планируется достичь в 2014 г. Спутниковая группировка IRNSS будет состоять из трех спутников на геостационарных орбитах ( $34^\circ$  восточной долготы,  $83^\circ$  восточной долготы,  $132^\circ$  восточной долготы) и четырех спутников на геосинхронных орбитах с наклоном  $29^\circ$ .

**Выводы по тенденциям развития зарубежных ОГ.** Главное направление развития глобальных НСС в мире таково, что основные мировые державы и объединения (США, Россия, Европейский союз, Китай) создают собственные НСС, причем так, чтобы обеспечить наибольшую доступность на своей территории при сложных условиях навигации (высоком уровне затенения). Для этого число НКА в ОГ доводится минимум до 27–30. Это позволяет сохранить странам экономическую самостоятельность и навигационную независимость при любых тенденциях развития мировой политики в ближайшей и отдаленной перспективе.

Имеет место и другая, на первый взгляд, противоречащая тенденция — объединение по возможности всех ОГ в единую ОГ мировой навигационной системы (GNSS). Для этого в навигационном мировом пространстве осуществляются различные мероприятия, связанные с развитием взаимодополняемости отдельных НСС (в части сигналов, шкал времени, систем координат), тем более, что существующая в настоящее время политическая ситуация этому способствует.

Интеграция различных НСС (ОГ) в единую систему дает существенный выигрыш как по точности, так и по доступности навигации. В частности, интеграция ГЛОНАСС и GPS обеспечивает практически стопроцентную глобальную доступность навигации при высоких

углах затенения и потенциально может повысить точность навигации на 50 %. Для интеграции различных НСС на высоком уровне точности необходимо обеспечить требования:

- по совместимости интегрируемых НСС в части систем координат, шкал времени;

- совместимости НСС по системной точности навигации, так как эффективное повышение точности навигации за счет интеграции НСС целесообразно только для систем с близким уровнем системной точности. Интеграция систем, отличающихся по точности в 3 и более раз, практически не дает эффекта даже при соответствии априорной информации о точностных характеристиках систем их реальному уровню. Отсутствие такого соответствия может даже привести к ухудшению точности навигации интегрированной системы по сравнению с единой.

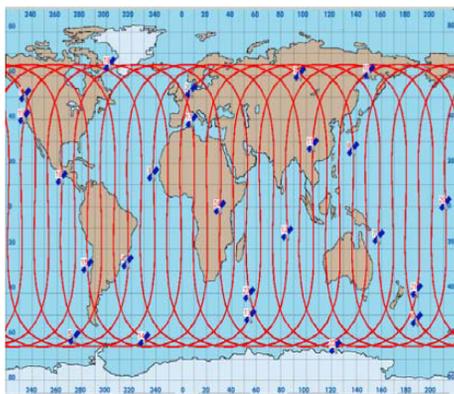
Еще одна тенденция — дополнение глобальных НСС региональными на базе НКА на геостационарных и геосинхронных орбитах.

**Повторяемость трассы ОГ.** В целом орбитальное построение ГЛОНАСС вполне соответствует схеме, называемой в западной литературе Walker (по фамилии ученого из США, исследовавшего системы соответствующей структуры), с тремя равнонаклонными к экватору плоскостями и равномерным распределением восьми спутников в каждой плоскости. Отношение периода орбиты НКА ГЛОНАСС к звездным суткам составляет  $8/17$ . Такое построение обеспечивает изотраснность, что уменьшает деградацию структуры ОГ за счет аномалий ГПЗ, сводя интегрально их воздействие на все спутники структуры как одинаковое.

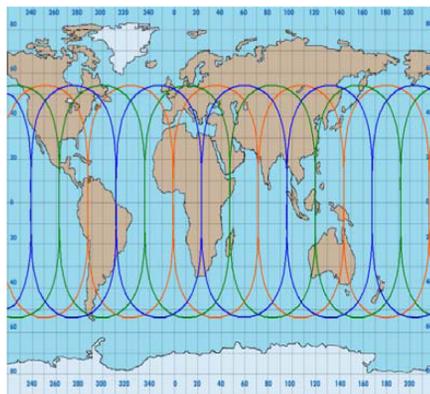
Полное прохождение всей трассы (единой для всех НКА) осуществляется каждым спутником ровно за 8 звездных суток (17 витков). Это определяет период полной повторяемости навигационной ситуации для наземного потребителя с учетом различия точностных характеристик КА с разными номерами. Периоды повторяемости трасс для НКА ОГ ГЛОНАСС, GPS и GALILEO со штатными параметрами орбит:

- для ОГ ГЛОНАСС — 17 витков за 8 сут. (единая трасса для всех КА);
- для ОГ GPS — 2 витка за 1 сут. (для каждого КА своя трасса);
- для ОГ GALILEO — 17 витков за 10 сут. (единая трасса для последнего варианта параметров ОГ, с которыми запущены четыре НКА GALILEO, и три различные трассы для первоначального варианта ОГ GALILEO).

Параметры орбит четырех НКА GALILEO соответствуют изотрассной трехплоскостной ОГ с 10 КА в каждой плоскости (один



*a*



*б*

**Рис. 2. Трассы полета НКА ГЛОНАСС (*a*) и GALILEO (*б*) (для первоначального варианта)**

из КА резервный), а для ОГ GPS имеет место своя, но практически единая трасса для каждого КА.

Единая трасса для ОГ ГЛОНАСС и три трассы для ОГ GALILEO для первоначального варианта параметров орбиты ( $a = 29\,994$  км) изображены на рис. 2.

Изотрасность — один из факторов, обеспечивающих естественную устойчивость параметров ОГ ГЛОНАСС, что в достаточной мере сокращает требуемые затраты топлива на НКА, упрощает и удешевляет управление орбитальным положением НКА ГЛОНАСС.

Анализ орбитального построения GPS показывает, что структура этой системы фактически является “условно-произвольной” с позиции нестабильного размещения спутников в системных слотах в течение времени. Вследствие отмеченного фактора периодически положение каждого спутника приходится корректировать (иногда значительно) для поддержания оптимального с позиции доступности и точности состояния системы.

Из изотрасности ОГ следует повторяемость в пространстве и во времени характеристик РНП позиционирования, но не наоборот: из повторяемости не всегда следует изотрасность. Например, ОГ GPS и первый вариант ОГ GALILEO не изотрасны, однако имеет место повторяемость характеристик РНП с периодом, кратным звездным суткам (23 ч 56 мин) для GPS и трем суткам для GALILEO.

В общем виде навигационные характеристики  $F_L(\mathbf{r}_B, t)$  потребителей ( $\mathbf{r}_B$  — вектор положения некоторого потребителя В) являются глобально (пространственно) периодическими по времени с периодом  $\Delta T$ , если для потребителя В и моментов времени  $t$  имеет место повторение их значений в момент времени  $t + \Delta T$ , т.е.  $F_L(\mathbf{r}_B, t) = F_L(\mathbf{r}_B, t + \Delta T)$ , где  $t, \mathbf{r}_B$  любые.

Периодичность, не являющуюся глобальной (справедливой только для отдельных точек и областей), обнаружить не удалось.

Обозначим период вращения Земли (звездные сутки)  $S_Z = 86\,164$  с; период изменения географической долготы узла, который отличается от периода вращения Земли  $S_Z$  на 8 с вследствие прецессии плоскостей орбит ОГ за счет сплюснутости Земли  $S_W = 86\,156$  с; номинальный драконический период НКА ГЛОНАСС  $T = 40\,544$  с. С учетом введенных обозначений отметим, что период орбит НКА ГЛОНАСС выбран проектировщиками системы (как указывалось ранее) так, что:  $S_W/T = 17/8 = 2,125$ .

Навигационные характеристики симметричны, если для потребителя В и моментов времени  $t$  их значения совпадают с такими же значениями для потребителей, расположенных в пространстве симметрично.

Повторяемость характеристик ОГ ГЛОНАСС с периодом 8 сут. имеет место как в абсолютной, так и в гринвичской системах координат, т.е. она достигается для потребителя, “привязанного” к абсолютному пространству и к поверхности Земли. Очевидно, что для абсолютного пространства (без учета прецессии, составляющей примерно  $1^\circ$  в месяц) повторяемость составляет 1 виток с учетом различия в состоянии НКА и  $1/8$  витка — при условии, что параметры всех спутников идентичны. Анализ повторяемости в абсолютном пространстве применим для космических потребителей, а в гринвичском — для потребителей, находящихся на поверхности Земли.

В гринвичской системе (для точек, вращающихся вместе с Землей) одно и то же видимое созвездие возникает с периодом  $T/3$ , если не учитывать номера НКА. Полностью идентичное созвездие образуется, как уже было отмечено, с периодом 8 сут. В абсолютной системе (актуальной для НКА) одно и то же видимое созвездие возникает с периодом  $T/8$ , если не учитывать номера КА. Полностью идентичное созвездие в абсолютном пространстве также образуется с периодом 8 сут.

Повторяемость характеристик РНП, с одной стороны, упрощает проведение анализа характеристик РНП, с другой — приводит к появлению зон “ненаблюдаемости” НСС для потребителя.

Номинальный драконический период НКА ГЛОНАСС ( $T = 40\,544$  с), выбранный разработчиками системы, позволил создать исключительно устойчивую изотрассную ОГ, не требующую (в отличие от GPS) проведения компенсирующих коррекций. Поэтому период орбит существующей ГЛОНАСС целесообразно использовать и для модернизированной ОГ [2].

**Основные тактико-технические характеристики ГЛОНАСС и зарубежных НСС.** Основные тактико-технические характеристики ГЛОНАСС и зарубежных НСС на начало функционирования системы в 2012 г. и к 2020 г. приведены в табл. 4.

**Основные тактико-технические характеристики ГЛОНАСС  
и зарубежных НСС**

Характеристика НСС	ГЛОНАСС (2012)	GPS (2012)	ГЛОНАСС (2020)	GPS-III (2020)	GALILEO (2020)	COMPASS (2020)
Число КА в составе системы	24	24*	30	32	27...30	35
Доступность навигационного поля системы (на открытой местности), %	99,997	99,98	100	100	100	100
Составляющая вычислительной погрешности, м	1,4	0,6	0,3	0,35	< 0,5	< 0,5
Погрешность навигационного определения идеальным приемником, м	2,8	1,2	0,6	0,7	< 1,0	< 1,0

\* Во всех официальных документах в качестве номинального состава ОГ используется 24 КА, остальные КА считаются резервными.

**Сравнительный анализ основных характеристик точности и доступности ОГ по результатам численного моделирования и данные интегральных оценок.** Не останавливаясь на математической постановке и методах решения задач баллистического синтеза оптимальных ОГ, рассмотренных, например в работе [3], ограничимся приведением данных сравнительного анализа по результатам прямого численного моделирования, полученным для известных проектных параметров сопоставляемых НСС.

Сравнение проводилось по следующим показателям точности (PDOP) и доступности ГЛОНАСС [4]:

- доступность по условию  $PDOP \leq 6$  на открытой местности с ограничениями по углу места  $5^\circ$ ;
- среднее значение пространственного ГМФ PDOP для угла места  $5^\circ$ ;
- доступность по условию  $PDOP \leq 2$  на открытой местности с ограничениями по углу места  $5^\circ$  (для контроля обеспечения требований повышенной точности);
- доступность по условию  $PDOP \leq 6$  в городской и горной местностях с ограничениями по углу места  $25^\circ$ .

Характеристики усреднялись на суточном интервале времени по поверхности Земли (мира) и России. Результаты приведены ниже:

Доступность по условию PDOP $\leq$ 6 на открытой местности с ограничениями по углу места 5° .....	1/1	1/1	1/1	0,99991/1,0
Среднее значение пространственного ГМФ PDOP для угла места 5° .....	1,63/1,68	1,71/1,68	1,74/1,68	1,94/1,74
Доступность повышенной точности по условию PDOP $\leq$ 2 на открытой местности с ограничениями по углу места 5° .....	0,901/0,859	0,872/0,883	0,840/0,871	0,614/0,842
Доступность по условию PDOP $\leq$ 6 в городской и горной местностях с ограничениями по углу места 25° .....	0,840/0,780	0,852/0,807	0,808/0,794	0,492/0,786

В числителе указаны значения для мира, в знаменателе — для России.

Подводя итоги изложенному, сделаем следующие общие выводы:

— при малых углах затенения (при угле места сигналов  $\geq 5^\circ$ ) ОГ ГЛОНАСС-24 обеспечивает стопроцентную доступность навигации, кроме небольших зон на широтах  $\pm(28 \dots 30)^\circ$ , но по точности (PDOP) уступает GPS на 20 %;

— при больших углах затенения (угол места  $\geq 25^\circ$ , что соответствует городским и горным местностям) ОГ ГЛОНАСС-24 в 1,5–2 раза уступает по глобальной доступности другим НСС;

— для обеспечения конкурентоспособности ГЛОНАСС в части ОГ требуется увеличение ее ОГ до 30 КА и более;

— при реализации основных положений принятой Федеральной целевой программы достижения конкурентоспособного уровня характеристик ГЛОНАСС по составу ОГ, точности и доступности навигационных определений следует ожидать к 2020 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zandbergen R., Dinwiddy S., Hahn J., Breeuwer E., Blonski D. Galileo orbit selection.
2. ION GNSS 17th International technical meeting of the satellite division, 21–24 Sept. 2004, Long Beach, CA.
3. Ступак Г.Г., Куришин В.В., Бетанов В.В. Орбитальное перестроение системы ГЛОНАСС // Известия РАРАН. № 1. 2013 (75). С. 34–41.
4. Лысенко Л.Н., Разумный Ю.Н. Прикладная баллистика спутниковых систем. Состояние и перспективы. Сб.: Баллистика вчера, сегодня, завтра. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2006. С. 98–110.
5. Федеральная целевая программа “Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы” (утверждена постановлением Правительства РФ 03.03.2012). М.: Роскосмос, 2012.

## REFERENCES

- [1] Zandbergen R., Dinwiddy S., Hahn J., Breeuwer E., Blonski D. Galileo orbit selection. *Proc. 17th Int. Tech. Meeting of Sat. Div.*, Long Beach, CA, 2004, pp. 616–623.
- [2] Stupak G.G., Kurshin V.V., Betanov V.V. Orbital rebuilding the GLONASS. *Izv. RARAN [Bull. Russ. Acad. Missile and Artillery Sci.]*, 2013, no. 1 (75), pp. 34–41 (in Russ.).
- [3] Lysenko L.N., Razumnyy Yu.N. Applied ballistics of satellite systems. State of the art and prospects. *Sb. "Ballistika vchera, segodnya, zavtra"*. [Collect. Pap. "Ballistics yesterday, today and tomorrow"]. St. Petersburg, VKA im. A.F. Mozhayskogo Publ., 2006, pp. 98–110 (in Russ.).
- [4] Federal'naya tselevaya programma "Podderzhanie, razvitie i ispol'zovanie sistemy GLONASS na 2012–2020 gody" [Federal Program "Maintenance, development and use of GLONASS for 2012–2020"]. Moscow, Roskosmos Publ., 2012 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 24.09.2013

Григорий Григорьевич Ступак — д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора — первый заместитель генерального конструктора ОАО "Российские космические системы". Профессор кафедры "Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Действительный член Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. Автор более 160 научных работ и изобретений в области баллистики, динамики полета и управления движением ракет и КА. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

G.G. Stupak — Dr. Sci. (Eng.), professor, deputy general director, the first deputy general designer in the ОАО "Russian Space Systems", professor of "Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts" department of the Bauman Moscow State Technical University, full member of the Russian Cosmonautics Academy n.a. K.E. Tsiolkovskii. Author of more than 160 publications and inventions in the field of ballistics, flight dynamics and motion control of rockets and spacecrafts.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Лев Николаевич Лысенко — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки, заслуженный изобретатель РФ, лауреат премии Президента РФ. Действительный член и член президиума Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН). Профессор кафедры "Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ и изобретений в области баллистики и динамики движения беспилотных летательных аппаратов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

L.N. Lysenko — Dr. Sci. (Eng.), professor of the "Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts" department of the Bauman Moscow State Technical University, Honorary Science Worker of the RF, Honorary Inventor of the RF, Winner of the Prize of the RF President. Acting member and Presidium member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Author of more than 300 publications and inventions in the field of ballistics and dynamics of motion of unmanned aerial vehicles.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Владимир Вадимович Бетанов — д-р техн. наук, профессор, советник заместителя генерального директора – первого заместителя генерального конструктора ОАО “Российские космические системы”. Профессор кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Член-корреспондент РАН. Автор более 300 научных работ и изобретений в области баллистики, динамики полета и управления движением ракет и КА.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.V. Betanov — Dr. Sci. (Eng.), professor, adviser of the deputy general director, the first deputy general designer of the OAO “Russian Space Systems”, professor of “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” department of the Bauman Moscow State Technical University, corresponding member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Author of more than 300 publications and inventions in the field of ballistics, flight dynamics and rocket and spacecraft motion control.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Феликс Валерьевич Звягин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда работ в области баллистики, динамики полета и управления движением ракет и КА, а также приложений теории динамических систем.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

F.V. Zvyagin — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications in the field of ballistics, flight dynamics and motion control of rockets and spacecrafts, applications of theory of dynamical systems.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Константин Геннадьевич Райкунов — аспирант кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области системного анализа и управления, экспериментальной баллистики летательных аппаратов, автоматизированных систем управления космическими объектами.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

K.G. Raikunov — post-graduate of “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” department of the Bauman Moscow State Technical University. The sphere of scientific interests includes system analysis and control, experimental ballistics of flying vehicles, types of support of automated control systems for space objects.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.