

Пространственный геометрический фактор и развитие ГЛОНАСС

С. И. Ватутин, к. т. н., с. н. с., vatutin.si@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Необходимость решения проблемы повышения точности навигации в городских условиях и в горной местности неизбежно ведет к наращиванию орбитальной группировки ГЛОНАСС. В данной работе обоснована целесообразность наращивания глобальной навигационной спутниковой системы на трех орбитальных плоскостях ГЛОНАСС в рамках кинематически правильной орбитальной структуры (по Г. В. Можаяеву) в нотации Дж. Уолкера–Балларда $64,8^\circ:48/3/1$. Предложена стратегия наращивания, повышения точности и доступности системы ГЛОНАСС в условиях затенения. Показано, что удвоенная по составу система ГЛОНАСС из 48 НКА с двумя ансамблями сигналов, один с двумя M -последовательностями и разнесением по частотам, второй с чисто кодовым разделением сигналов на одной несущей частоте, обеспечит как минимум увеличение в 2,77 раза точности местоопределения по сравнению с существующей системой при гарантированных допустимых углах затенения на территории России в $32\text{--}35^\circ$ и сохранении PDOP < 6.

Ключевые слова: пространственный геометрический фактор, навигационный космический аппарат, НКА, орбитальная структура, точность местоопределения

Position Dilution of Precision and GLONASS Development

S. I. Vatutin, *Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, vatutin.si@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The need to solve the problem of improving navigation accuracy both in urban conditions and in mountainous areas inevitably leads to an increase in the GLONASS orbital grouping. In this paper, the feasibility of building up a global navigation satellite system on three orbital planes of GLONASS in the framework of a kinematically correct orbital structure (according to G. V. Mozhaev) in the notation of J. Walker–Ballard $64.8^\circ:48/3/1$. A strategy for building up, improving the accuracy and availability of the GLONASS system in the conditions of shading is proposed. It is shown that the double composition of the GLONASS system of 48 satellites with two ensembles, one of two M -sequences and spacing frequencies, the second with pure code division signals at one carrier frequency will provide, as a minimum, an increase of 2.77 times the precision positioning compared to the existing system with guaranteed valid angles of shading in Russia to $32\text{--}35^\circ$ and maintaining a PDOP < 6.

Keywords: Position Dilution of Precision, navigation spacecraft, orbital structure, positioning accuracy

Введение

Первые глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), GPS и ГЛОНАСС, вполне успешно обеспечивали решение навигационных задач на просторах морей и океанов. Однако с течением времени на первый план стала выдвигаться проблема повышения точности решения навигационных задач в городских условиях и в горной местности, где имеет место затенение находящихся низко над горизонтом навигационных космических аппаратов (НКА) зданиями и горами. Единственный способ решения этой проблемы — наращивание плотности НКА на небосклоне путем увеличения количества равномерно разнесенных НКА в системе. И если в GPS с единой для всех НКА несущей и 24 дальномерными уникальными кодами Голда сделать это несложно — достаточно дополнительным НКА присвоить разрешенные уникальные коды [1], то в ГЛОНАСС [2], использующей частотное разнесение сигналов и единый дальномерный код в виде M-последовательности, нарастить группировку невозможно из-за существующих международных соглашений по ограничению частотного диапазона ГЛОНАСС. В результате было принято решение [3] о реализации в системе ГЛОНАСС второго ансамбля сигналов с кодовым разделением на единой несущей частоте в каждом из диапазонов L1, L2 и L3. Следует учитывать, что существующая ГНСС ГЛОНАСС с орбитальной группировкой из 24 НКА является классической большой системой, на которую давит груз десятков миллионов уже существующих пользователей. Следовательно, при наращивании группировки НКА ГЛОНАСС необходимо сохранить неизменным существующий ансамбль сигналов с частотным разнесением. Поэтому новые НКА ГЛОНАСС-К будут излучать два ансамбля сигналов: с кодовым разделением на одной частоте и с частотным разнесением при единой M-последовательности в каждом из диапазонов L1, L2 и L3.

В работе оценивается влияние на точность местоопределения только геометрических свойств системы НКА и не принимается во внимание имеющаяся в настоящее время лучшая точность оценки координат потребителя в ансамблях сигналов с кодовым разделением на единой несущей частоте

по сравнению с ансамблем сигналов с частотным разнесением из-за различия систематических ошибок на разных несущих частотах. Поэтому все полученные в работе оценки точности местоопределения следует отнести к оценкам снизу.

Эффект замены НКА ГЛОНАСС-М на НКА ГЛОНАСС-К

Нетрудно показать, что уже на этапе замены НКА ГЛОНАСС-М с одним ансамблем сигналов на НКА ГЛОНАСС-К с двумя ансамблями сигналов точность ГЛОНАСС за счет геометрического фактора повысится минимум в $\sqrt{2}$ раз. Действительно, пусть на небосклоне видно не менее 4 НКА ГЛОНАСС. Тогда матрица направляющих косинусов от потребителя на НКА с одним ансамблем сигналов будет иметь вид:

$$H1 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{i1} & h_{i2} & h_{i3} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{j1} & h_{j2} & h_{j3} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_{k1} & h_{k2} & h_{k3} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Нулевые строки соответствуют невидимым НКА и не влияют на вычисление геометрического фактора. Пространственный геометрический фактор рассчитывается по формуле: $PDOP1 = \sqrt{G1_{11} + G1_{22} + G1_{33}}$, где матрица $G1 = (H1^T \times H1)^{-1} = P1^{-1}$.

Для НКА с двумя ансамблями сигналов матрица направляющих косинусов будет равна: $H2 = \begin{bmatrix} H1 \\ H1 \end{bmatrix}$. Транспонированная матрица двух ансамблей сигналов $H2$ равна $H2^T = [H1^T \ H1^T]$. Произведение транспонированной и исходной матриц двух ансамблей равно: $P2 = H2^T \cdot H2 = [H1^T \ H1^T] \cdot \begin{bmatrix} H1 \\ H1 \end{bmatrix} = 2 \cdot H1^T \cdot H1 = 2 \cdot P1$. Матрица, обратная $P2$, равна $G2 = (P2)^{-1} = (2 \cdot P1)^{-1} = \frac{1}{2} \times P1^{-1} = \frac{1}{2} \cdot G1$.

Отсюда геометрический фактор для ГНСС из НКА ГЛОНАСС-К через геометрический фактор ГНСС из НКА ГЛОНАСС-М:

$$PDOP2 = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot G1_{11} + \frac{1}{2} \cdot G1_{22} + \frac{1}{2} \cdot G1_{33}} = \sqrt{\frac{G1_{11} + G1_{22} + G1_{33}}{2}} = \frac{PDOP1}{\sqrt{2}}.$$

То есть точность местоопределения в ГНСС на НКА с двумя ансамблями сигналов как минимум в $\sqrt{2}$ выше точности ГНСС на НКА с одним ансамблем сигналов. Но при этом в ГНСС из 24 НКА ГЛОНАСС-К с двумя ансамблями сигналов при повышении угла затенения проявляется тот же недостаток, что и в исходной ГНСС из 24 НКА ГЛОНАСС-М с одним ансамблем сигналов, а именно: когда в зоне радиовидимости (ЗРВ) остаются 4 НКА, геометрический фактор устремляется в бесконечность, а точность местоопределения падает до нуля. Этот эффект показан на рис. 1–4. На рисунках для краткости исходная ГНСС из 24 НКА ГЛОНАСС-М с одним ансамблем сигналов с частотным разнесением на базе единой М-последовательности обозначена 1М, а ГНСС из 24 НКА ГЛОНАСС-К с двумя ансамблями сигналов (с частотным разнесением на базе единой М-последовательности и с 24 уникальными кодовыми сигналами на одной несущей частоте) обозначена 1М1К. На рис. 1 представлены графики изменения во времени количества НКА, видимых из точки наблюдения 50° с. ш., 40° в. д. при угле

затенения $E = 12^\circ$ над горизонтом. Из графиков видим, что при этих условиях в худшем случае видны 5 НКА на двух орбитальных плоскостях. При этом нет моментов времени, когда все НКА лежат в одной плоскости, что обеспечивает «хорошие» значения PDOP не выше 3,3 (см. рис. 2).

Из рис. 2 видим, что размещение на НКА исходной ГНСС ГЛОНАСС источников навигационных сигналов с 24 кодами на одной несущей в $\sqrt{2}$ раз повышает точность местоопределения.

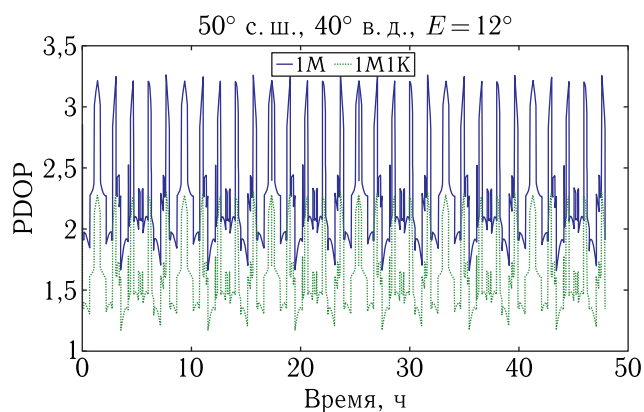


Рис. 2. PDOP систем 1М и 1М1К в точке 50° с. ш., 40° в. д. при затенении 12°

На рис. 3 представлены графики изменения во времени количества НКА, видимых из точки наблюдения 50° с. ш., 40° в. д. при угле затенения $E = 15^\circ$ над горизонтом. Из графиков видим, что при этих условиях в худшем случае видны только 4 НКА на двух орбитальных плоскостях. При этом появля-

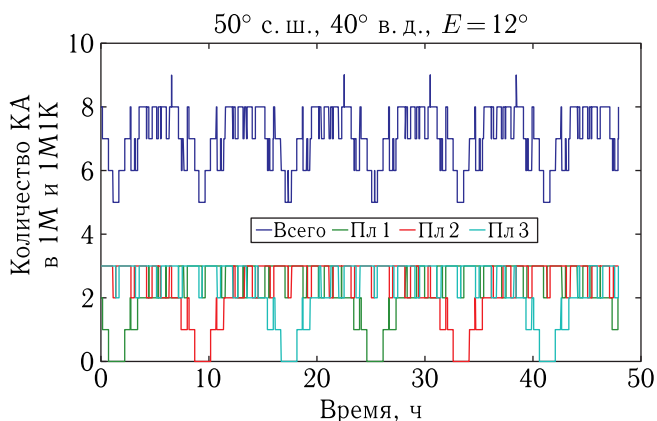


Рис. 1. Количество видимых НКА в исходной системе ГЛОНАСС (1М) и после переоснащения (1М1К)

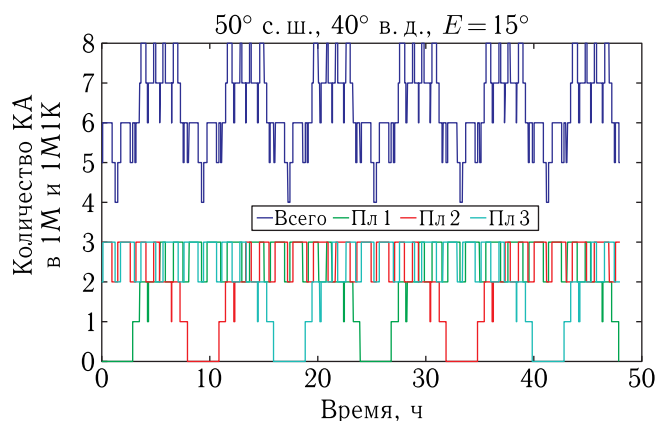


Рис. 3. Количество видимых НКА в исходной системе 1М и после переоснащения 1М1К при затенении 15°

ются моменты времени, когда все 4 видимые НКА лежат в одной плоскости и значения PDOP стремятся к бесконечности, а точность местоопределения соответственно стремится к нулю (см. рис. 4). Наличие моментов времени, когда все 4 видимых НКА находятся в одной плоскости, обусловлено тем, что два из них расположены на восходящем участке одной орбиты, а два других — на встречном нисходящем участке соседней орбиты. Из сопоставления рис. 3 и 4 видим, что при 5 и более видимых НКА PDOP системы 1M1K по-прежнему в $\sqrt{2}$ ниже PDOP системы 1M, а при четырех видимых НКА PDOP обеих систем стремится к бесконечности при том же соотношении в $\sqrt{2}$.

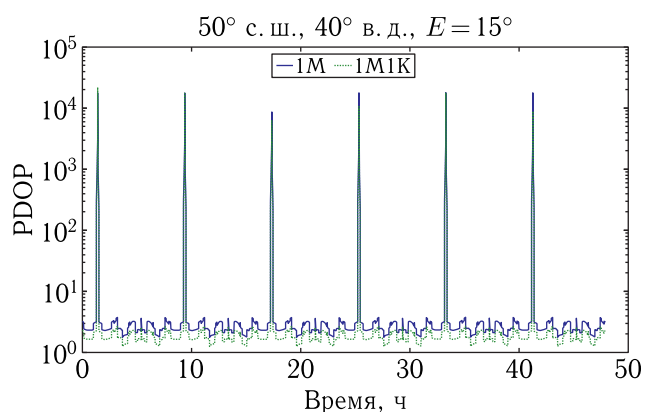


Рис. 4. PDOP систем 1M и 1M1K в точке 50° с. ш., 40° в. д. при затенении 15°

Как показано на рис. 5, снижение PDOP в системе 1M1K приводит также к увеличению допустимого угла затенения (повышению доступности НКА) на широтах России выше 50° с. ш.

Конкурирующие орбитальные структуры при наращивании ГЛОНАСС

После замещения НКА ГЛОНАСС-М на НКА ГЛОНАСС-К наступит этап наращивания группировки НКА ГЛОНАСС-К. При этом неизбежно встанет вопрос, в направлении какой орбитальной конструкции следует идти. В работе [4] предложена стратегия перестроения существующей орбитальной группировки из 24 НКА ГЛОНАСС-М

в группировку из 30 НКА ГЛОНАСС-К с последующим наращиванием до 48 НКА путем расположения их на шести орбитальных плоскостях в 48 слотах кинематически симметричной структуры типа «розетка» или «дельта-конфигурация», обозначаемой в соответствии с нотацией Дж. Уолкера [5] и Балларда [6] 64,8°:48/6/1, что означает 48 НКА в шести плоскостях с расстановкой восходящих узлов орбит по дуге экватора 0–360°. Обозначим предложенную в [4] структуру системы двойной ГЛОНАСС через S1. Орбитальное перестроение с трех на шесть плоскостей с последующим наращиванием группировки НКА ГЛОНАСС до 48 НКА — это весьма дорогостоящая процедура. Поэтому надо быть уверенным, что предложенная орбитальная конфигурация является наилучшей по критерию обеспечения наивысших углов затенения при допустимой точности местоопределения. В своей фундаментальной работе [7] Г. В. Можжев показал, что розеточные структуры Уолкера–Балларда являются частным случаем исследованных им на основе теории групп и теории симметрии орбитальных структур, причем в [7] на с. 15 он прямо указывает на то, что «...одна симметрия еще не гарантирует высокого качества системы». Поэтому имеет смысл оценить по критерию обеспечения наивысших углов затенения при допустимой точности местоопределения и другие возможные орбитальные структуры. При этом важно сохранить нетронутой исходную орбитальную структуру ГЛОНАСС 64,8°:24/3/1 из 24 НКА на трех плоскостях.

В мировой практике при формировании орбитальных многоспутниковых систем на круговых орбитах для одно- или многократного покрытия Земли наибольшее распространение получили две орбитальные структуры: во-первых, уже упомянутая структура типа розетка (по Балларду [6]) или дельта-конфигурация (по Уолкеру [5]) для наклонных орбит и, во-вторых, орбитальная структура типа звезда (по Уолкеру [8, 9]), разработанная для околополярных орбит. Примерами структуры типа розетка с равномерной расстановкой плоскостей по долготе восходящего узла на дуге 0–360° являются системы GPS, ГЛОНАСС, Globalstar, SkyBridge, структурами типа звезда с равномерной расстановкой плоскостей по долготе восходящего узла

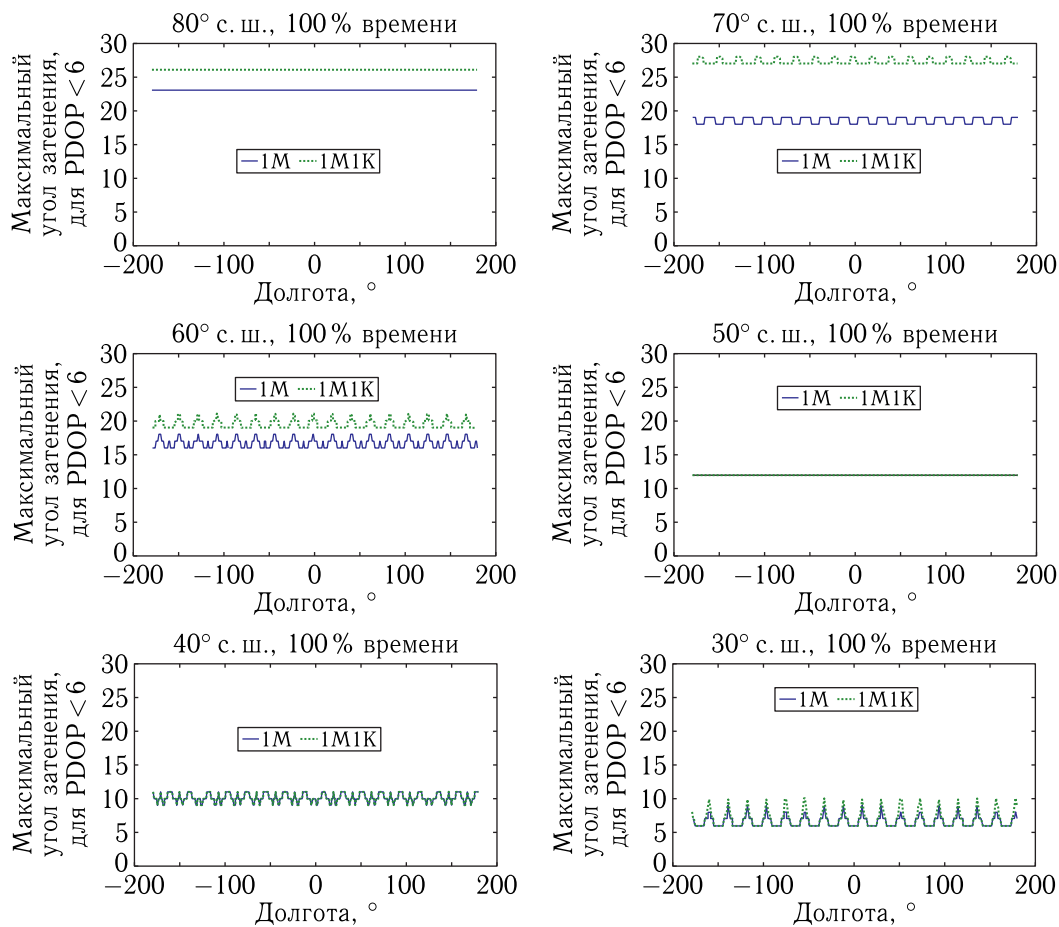


Рис. 5. Максимально допустимый угол затенения для разных широт и долгот наземного наблюдателя при PDOP < 6 в системах 1М и 1М1К

на дуге 0–180° являются системы Iridium, Boeing Teledesic, Гонец [10, 11].

Расстановка трех плоскостей розетки ГЛОНАСС на дуге 0–360° представлена на рис. 6, вид на экватор со стороны северного полюса N. Видим, что при нечетном количестве плоскостей (три для ГЛОНАСС) восходящие (точки) и нисходящие (крестики) узлы не накладываются и расположены равномерно по экватору. По Можяеву [7, с. 17] ГЛОНАСС является системой с группами симметрии N первого типа, компоненты которых (восходящие и нисходящие узлы) являются группами вращений вокруг одной оси вида С3.

Расстановка шести плоскостей розетки на дуге 0–360° дает взятую в [4] за основу при наращивании системы ГЛОНАСС орбитальную структуру из 48 НКА в нотации Уолкера–Балларда 64,8°:48/6/1,

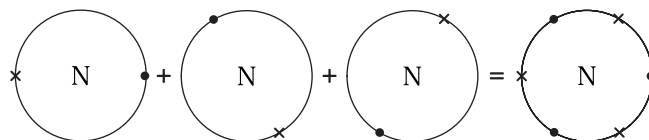


Рис. 6. Расстановка трех плоскостей розетки ГЛОНАСС на дуге 0–360°

представленную на рис. 7. Видим, что при четном количестве плоскостей в орбитальной структуре типа розетка имеет место наложение симметрично расположенных восходящих и нисходящих узлов, что, собственно, и вызывает сомнение в оптимальности данной структуры с точки зрения равномерного распределения НКА по небосклону и минимума PDOP. И это несмотря на то, что по Можяеву [7, с. 41] розетка двойной ГЛОНАСС на рис. 7 является кинематически симметричной системой,

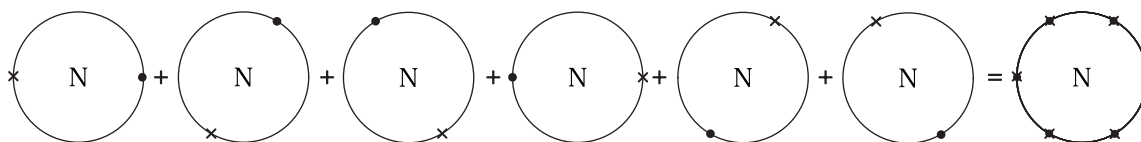


Рис. 7. Расстановка шести плоскостей розетки двойной ГЛОНАСС1 на дуге 0–360°

поскольку представляет из себя объединение двух кинематически правильных систем ГЛОНАСС с общей группой симметрии вращения S_6 .

Отметим, что структура S_1 розетки двойной ГЛОНАСС получается добавлением к исходной розетке ГЛОНАСС второй розетки ГЛОНАСС, повернутой по экватору на 60° , что и приводит к наложению восходящих и нисходящих узлов в структуре S_1 . Для исключения такого наложения было бы логично повернуть вторую розетку на 30° по экватору, как показано на рис. 8, и получить орбитальную структуру S_2 без наложения восходящих и нисходящих узлов. По Можаяеву в структуре S_2 восходящие и нисходящие узлы также являются группами вращений вокруг одной оси вида S_3 , как и в орбитальной структуре исходной системы ГЛОНАСС, т.е. структура S_2 также является кинематически правильной и может претендовать на конкуренцию с предложенной в [4] структурой S_1 . Структура S_2 получается также путем обобщения правила Уолкера расстановки орбитальных плоскостей в звезду по дуге 180° между восходящим и нисходящим узлами орбитальной плоскости на расстановку в звезду двух и более одинаковых орбитальных розеток по дуге между ближайшими восходящим и нисходящим узлами розетки. Для орбитальной розетки системы ГЛОНАСС это будет дуга в 60° . Отметим, что та же структура S_2 может быть получена путем расстановки двух розеток ГЛОНАСС по дуге $0-(-180^\circ)$ в полном соответствии с правилом расстановки Уолкера.

То, что из двух звезд можно образовать розетку, подметил в своей диссертации 2001 г.

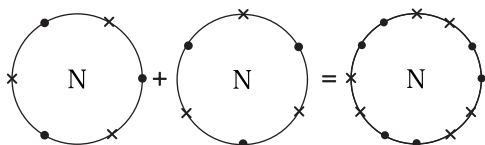


Рис. 8. Структура S_2 из двух розеток ГЛОНАСС, повернутых на 30°

Ллойд Вуд [11], хотя и без привязки к правилу Уолкера по расстановке на дуге $0-360^\circ$. На рис. 8 показано, как из двух розеток ГЛОНАСС можно образовать звезду двойной ГЛОНАСС путем расстановки розеток ГЛОНАСС по дуге 60° . Очевидно, правило расстановки плоскостей распространяется на расстановку орбитальных структур, составленных из таких же орбитальных плоскостей, поскольку орбитальная плоскость является вырожденной орбитальной структурой и типа «звезда» и типа «розетка».

Еще одним достойным конкурентом для структуры S_1 $64,8^\circ:48/6/1$ является структура S_3 в нотации Уолкера–Балларда $64,8^\circ:48/3/1$, т.е. двойной ГЛОНАСС на трех плоскостях, у которой в каждой орбитальной плоскости имеется 16 равномерно расставленных НКА. В этой структуре также сохраняется исходная группировка ГЛОНАСС. Достоинством ее является существенное упрощение формирования и поддержания группировки на трех плоскостях по сравнению с группировкой на шести плоскостях.

Наконец, для полноты картины имеет смысл рассмотреть структуру типа «звезда» на шести плоскостях, представленную на рис. 9 как структура S_4 . Достоинством этой структуры является существенное упрощение реализации в экваториальном широтном поясе линий связи между спутниками, движущимися в одном направлении на соседних орбитах. Недостаток — необходимость полной реорганизации орбитальной структуры ГЛОНАСС: из трех плоскостей на месте остаются только две. Орбитальные структуры четырех конкурирующих вариантов системы двойной ГЛОНАСС сведены воедино на рис. 9.

Что касается расфазировки НКА на орбитах, то, как указано в [12], «по мнению Дж. Уолкера, каждая конкретная дельта-система определяется тройкой целых чисел T, P, F , где T — количество спутников в системе; P — количество плоскостей

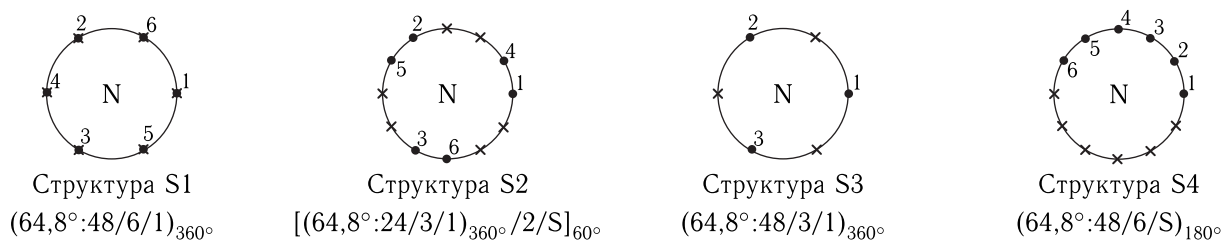


Рис. 9. Конкурирующие орбитальные структуры ГНСС двойной ГЛОНАСС

орбит (один из делителей числа T); F — коэффициент расфазировки спутников в соседних плоскостях, $F = 0 \dots (P - 1)$. Начальные фазовые состояния (НФС) спутников дельта-системы, т.е. значения прямого восхождения восходящего узла Ω и аргумента широты u каждого спутника, вычисляются следующим образом:

$$\Omega = \Omega_1 + \frac{2\pi}{P}(j - 1); \quad (1)$$

$$u = u_1 + \frac{2\pi}{T}[F(j - 1) + P(l - 1)], \quad (2)$$

где Ω_1 , u_1 — НФС первого спутника; j — номер орбитальной плоскости, $j = 1 \dots P$; l — номер спутника в плоскости, $l = 1 \dots T/P$. Соотношения (1) и (2) описывают расфазировку в розетках структуры Уолкера S1 с нотацией $(64,8^\circ:48/6/1)_{360^\circ}$ и S3 с нотацией $(64,8^\circ:48/3/1)_{360^\circ}$ на рис. 9. Нижний индекс расстановки на дуге 360° здесь использован потому, что идентичная нотация использовалась Уолкером и для расстановки на дуге 180° для структур типа звезда, подобных структуре S4 на рис. 9. Однако для структур типа звезда больше подходит расфазировка трасс, известных в англоязычной литературе как «street-of-coverage», или «полоса (дословно: улица) покрытия» применительно к круговым полярным орбитам [13]. Нетрудно заметить, что при движении спутников на соседних полярных орбитах в одну сторону наиболее равномерным покрытие в наиболее критичной экваториальной широтной полосе будет при разнесении одноименных спутников на соседних орбитах по аргументу широты на угол $360^\circ/(T/P)/2$, то есть при 48 спутниках на шести орбитальных плоскостях, как у двойного ГЛОНАСС, структур S2 и S4 при разнесении на угол $360^\circ/(48/6)/2 = 22,5^\circ$. Однако ГЛОНАСС имеет наклонные орбиты, для которых покрытие в экваториальной широтной полосе будет

наилучшим, когда ортогональная проекция точки размещения спутника на соседнюю орбиту будет находиться ровно посередине между спутниками соседней орбиты. В структурах S2 и S4 плоскости с односторонним движением НКА разнесены по дуге экватора на $DP = 30^\circ$, следовательно, ортогональная проекция точки НКА на экваторе на соседнюю орбитальную плоскость будет смещена по аргументу широты на $DP \cdot \cos(64,8^\circ) = 30^\circ \times 0,416 = 12,48^\circ$. Чтобы эта точка была посередине между НКА соседней орбитальной плоскости, их аргумент широты должен быть смещен на $u = DP \cdot \cos(64,8^\circ) - 360^\circ/16 = 12,48^\circ - 22,5^\circ = -10,02^\circ$. Таким образом, для структур S2 и S4, в отличие от формулы Уолкера (2), мы приходим к дробному коэффициенту расфазировки $F = u \times T/360^\circ = -10,02^\circ \cdot 48/360^\circ = -1,336$, подобно Балларду [6, 12].

Для структуры S2 нотация $[(64,8^\circ:24/3/1)_{360^\circ}/2/S]_{60^\circ}$ означает здесь расстановку на дуге 60° с расфазировкой по принципу «street-of-coverage» двух структур ГЛОНАСС с нотацией по Уолкеру–Балларду $(64,8^\circ : 24/3/1)_{360^\circ}$ расстановки на дуге 360° 24 НКА в трех плоскостях с наклоном $64,8^\circ$ и коэффициентом расфазировки $F = 1$.

Итак, имеем стандартную задачу синтеза системы через анализ вариантов ее построения. На рис. 10 для конкурирующих структур представлены графики зависимостей максимально допустимого угла затенения от долготы при обеспечении $PDOP < 6$ на широте 50° . Поскольку спутники ГЛОНАСС возвращаются на свой прежний след ровно через 17 витков [3, 14], то по долготе от -180° до $+180^\circ$ на графиках для геометрического фактора наблюдаются 17 повторяющихся участков. Поэтому во избежание перегрузки восприятия при сопоставлении конкурирующих структур на рис. 11 представлены только по два участка

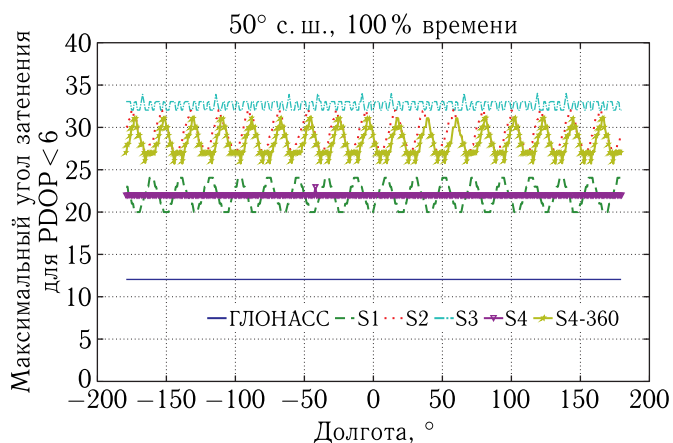


Рис. 10. Зависимости максимально допустимого угла затенения от долготы при обеспечении PDOP < 6 на 50° с. ш.

каждого графика на долготах от 30° до 70° в северных широтах от 0° до 80° через 10°. Сравнение графиков показывает, что наиболее стабильный показатель угла затенения по долготе на всех этих широтах имеет структура S3. На широтах России от 40° до 80° структура S3 имеет наилучший показатель допустимого угла затенения, за исключением широты 70°, где незначительное преимущество имеет структура S1, которая существенно уступает структуре S3 по гарантированному углу затенения при повышении широты до 80° и при снижении от 60° до 40°.

Структура S2 успешно конкурирует со структурой S1 на всех широтах, но также имеет существенно больший разброс допустимого угла затенения по сравнению со структурой S3. Структура S4 типа звезда с расстановкой шести плоскостей по дуге 180° имеет хорошие показатели угла затенения только в экваториальном поясе широт. В северных широтах структура S4 явно уступает структурам S1, S2 и S3. Объясняется это тем, что спутники структуры S4 обходят полюс с одной стороны. В результате с другой стороны полюса образуется некое «декольте» из встречных трасс спутников, которое смыкается только возле противоположного полюса. Это приводит к существенной неравномерности показателя пространственного геометрического фактора PDOP по долготе и снижает максимально допустимый угол затенения при непрерывном обеспечении PDOP < 6. Однако при увеличении дуги расстановки плоскостей от 180° до 360°

в пределе структура S4-360 становится близкой к структуре S1, но имеет разные показатели качества с S1 за счет иного принципа расфазировки спутников по аргументу широты.

Следует отметить, что шаг сетки расчетов в 10° по широте слишком груб в силу большой изменчивости геометрического фактора в зависимости от широты. К тому же имеются периодические изменения геометрического фактора по долготе, что усложняет сравнительный анализ орбитальных структур с целью выбора наиболее рациональной. Поэтому предлагается ужесточить критерий отбора лучшей структуры, приняв за показатель качества гарантированный, то есть минимальный на периоде изменения по долготе, допустимый угол затенения для PDOP < 6, графики которого приведены на рис. 12 с сеткой расчетов в один градус по долготе и широте в зависимости от широты.

Сопоставление графиков рис. 12 показывает, что структуры S4 и S4-360 в целом проигрывают кинематически правильным структурам S1, S2, S3, которые в экваториальном широтном поясе имеют соизмеримые гарантированно допустимые углы затенения, а на широтах России предпочтение следует отдать структуре S3 с тремя орбитальными плоскостями, как у исходной системы ГЛОНАСС, при 16 НКА на каждой плоскости. Этот результат интересен тем, что существенно снижает затраты на развертывание и поддержание группировки НКА двойной ГЛОНАСС в работоспособном состоянии, требуя к тому же вдвое меньше резервных НКА (3 резервных для 3 плоскостей вместо минимум 6 резервных НКА для 6 плоскостей).

Эффект наращивания орбитальной группировки ГЛОНАСС на исходных трех орбитальных плоскостях

Итак, наиболее рациональной является орбитальная структура S3 в нотации $(64,8^\circ : 48/3/1)_{360^\circ}$ с 48 НКА по 16 равномерно разнесенных НКА на каждой из трех орбитальных плоскостей существующей системы ГЛОНАСС.

На рис. 13 приведены графики зависимости пространственного геометрического фактора PDOP

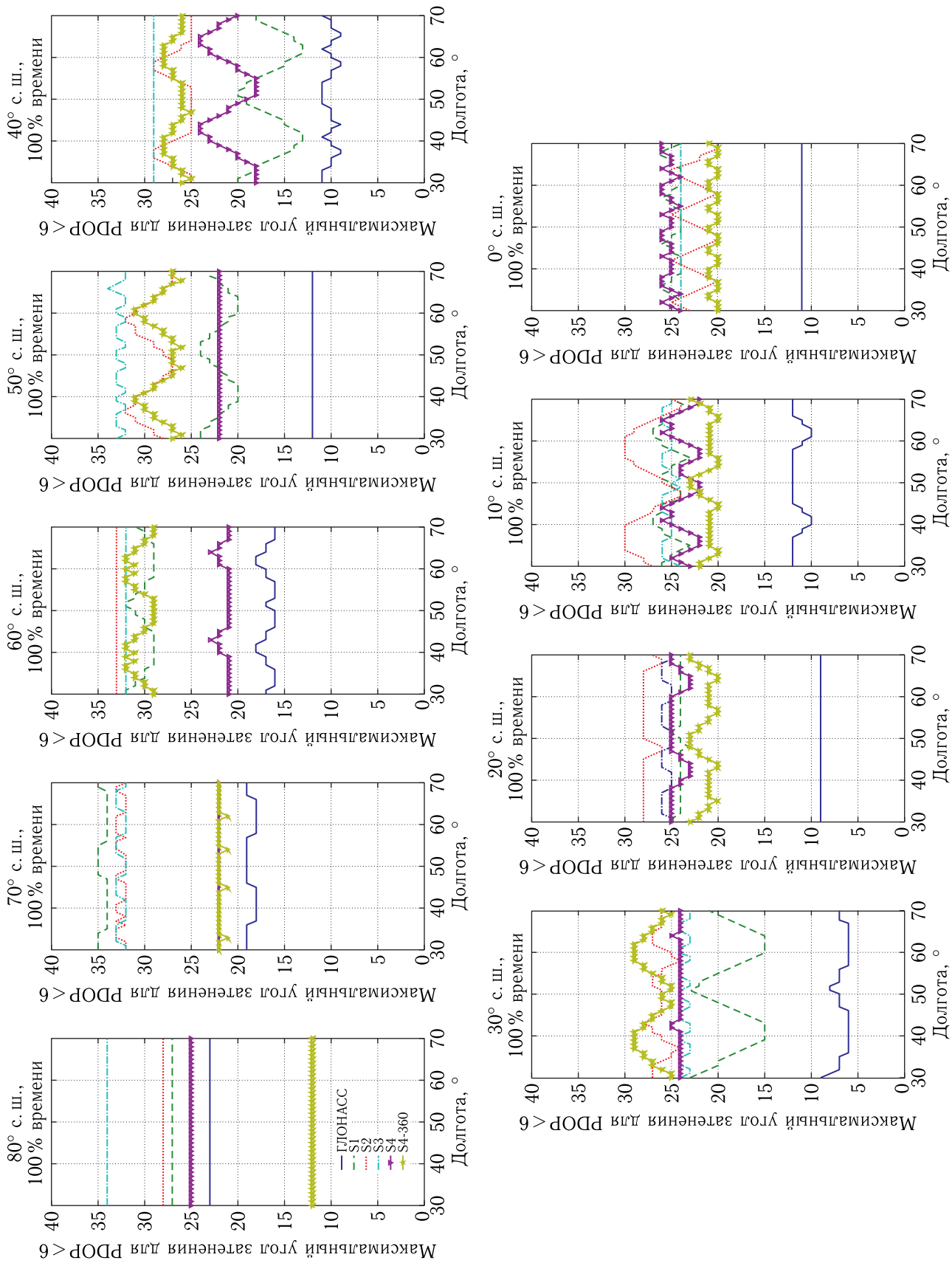


Рис. 11. Зависимости максимально допустимого угла затенения от долготы при обеспечении PDOP < 6 в северных широтах от 0° до 80° через 10°

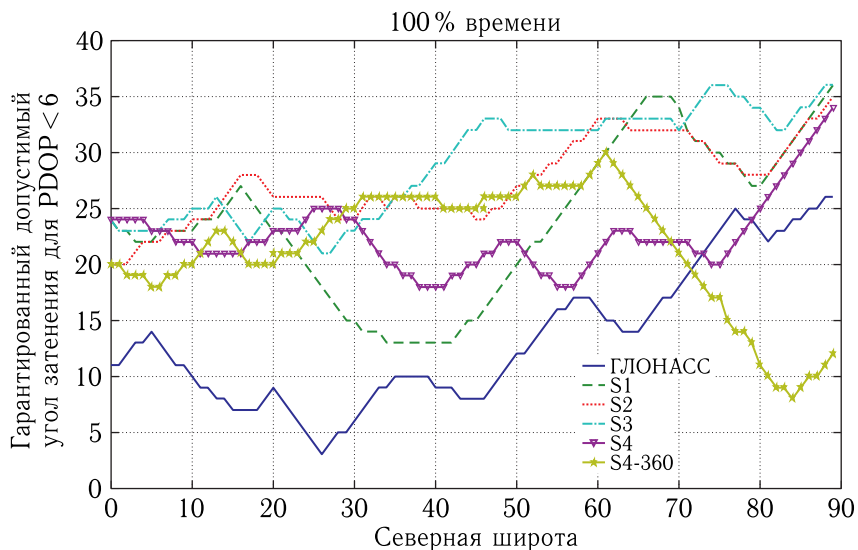


Рис. 12. Гарантированный допустимый угол затенения для PDOP < 6 в зависимости от северной широты пользователя

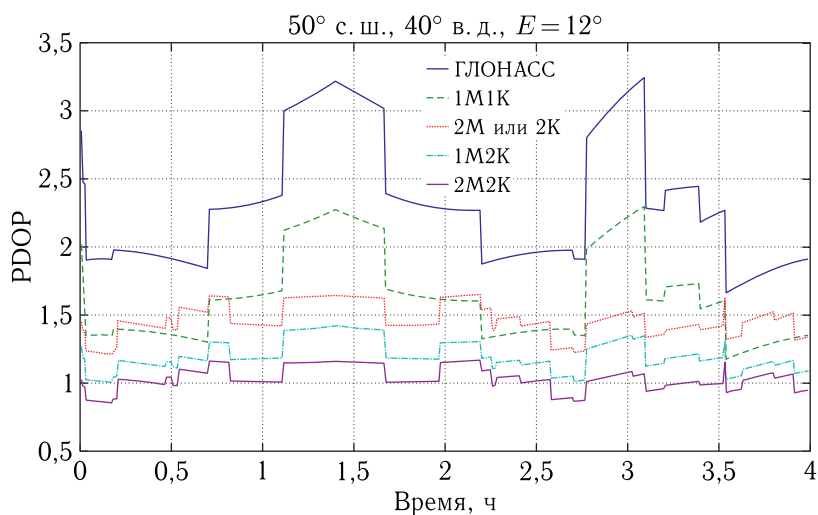


Рис. 13. Зависимость PDOP от времени для сигнальных систем ГЛОНАСС (1М), 1М1К, 2М или 2К, 1М2К и 2М2К

систем ГЛОНАСС (1М), 1М1К, 2М или 2К, 1М2К и 2М2К от времени для точки 50° с. ш. и 40° в. д. при затенении $E = 12^\circ$ на участке, включающем первый выброс PDOP на рис. 2, соответствующий 5 видимым НКА на двух орбитальных плоскостях ГЛОНАСС примерно с 1,1 до 1,7 ч по времени.

Исходная система ГЛОНАСС из 24 НКА ГЛОНАСС-М с одним ансамблем сигналов с частотным разнесением на базе единой М-последовательности обозначена 1М. ГНСС орбитальной структуры исходной системы ГЛОНАСС из

24 НКА ГЛОНАСС-К с двумя ансамблями сигналов (с частотным разнесением на базе единой М-последовательности и с 24 уникальными кодовыми сигналами на одной несущей частоте) обозначена 1М1К. В системе 1М2К орбитальной структуры S3 24 НКА ГЛОНАСС-К на позициях орбитальной структуры исходной системы ГЛОНАСС по-прежнему реализуют два ансамбля сигналов (с частотным разнесением на базе единой М-последовательности и с 24 уникальными кодовыми сигналами на одной несущей частоте), а дополнительные 24 НКА ре-

Таблица 1. PDOP систем ГЛОНАСС (1М), 1М1К, 2М или 2К, 1М2К и 2М2К

PDOP 1М	PDOP 1М1К	PDOP 2М или 2К	PDOP 1М2К	PDOP 2М2К
3,2119	2,2712	1,4619	1,4202	1,1610

Таблица 2. Повышение точности ГНСС

PDOP 1М/PDOP 1М1К	PDOP 1М/PDOP 2М или 2К	PDOP 1М/PDOP 1М2К	PDOP 1М/PDOP 2М2К	PDOP 2М или 2К/PDOP 2М2К
1,4142	1,9562	2,2616	2,7665	1,4142

лизуют второй кодовый ансамбль сигналов из дополнительных 24 уникальных кодов на той же несущей частоте, что и у первого ансамбля кодовых сигналов. В системе 2М2К орбитальной структуры S3 на дополнительных 24 НКА дополнительно ко второму кодовому ансамблю сигналов используется ансамбль сигналов со второй М-последовательностью на тех же частотах, что и ансамбль сигналов с применяемой в настоящее время в системе ГЛОНАСС М-последовательностью. Выбор второй М-последовательности обоснован в работе [15]. В системе 2М орбитальной структуры S3 на исходных 24 НКА ГЛОНАСС-М используется ансамбль сигналов с частотным разнесением и первой М-последовательностью, а на дополнительных 24 НКА ГЛОНАСС-М используется ансамбль сигналов с тем же частотным разнесением и второй М-последовательностью. Наконец, в системе 2К орбитальной структуры S3 на всех 48 НКА используется ансамбль сигналов с кодовым разделением на одной несущей частоте. С точки зрения геометрического фактора системы 2М и 2К идентичны. Значения PDOP на пике рис. 13 в районе 1,4 ч представлены в табл. 1.

В табл. 2 показано, во сколько раз увеличится точность местоопределения при наращивании системы ГЛОНАСС. Как уже указывалось выше, замена всех 24 НКА ГЛОНАСС-М на НКА ГЛОНАСС-К, т.е. переход от системы 1М к системе 1М1К, повысит точность местоопределения в 1,4142 раза или в $\sqrt{2}$. Применение на дополнительных 24 НКА только кодового разделения при реализации системы 1М2К повысит точность в 2,2616 раза. Реализация на дополнительных 24 НКА в системе 2М2К двух ансамблей сигналов с двумя М-последовательностями и частотным раз-

несением и кодовым разделением на одной несущей позволит достичь максимально возможного повышения точности местоопределения за счет снижения PDOP в 2,7665 раза. И это при гарантированных допустимых углах затенения на территории России в 32–35°.

Реализация на 48 НКА ансамбля сигналов с частотным разнесением и двумя М-последовательностями даст выигрыш в точности местоопределения в 1,9562 раза. Тот же выигрыш как минимум даст реализация на всех 48 НКА ансамбля сигналов с кодовым разделением на одной несущей частоте. Применение на всех 48 НКА совместно ансамбля сигналов с частотным разнесением и ансамбля сигналов с кодовым разделением на одной несущей частоте вместо одного из них даст выигрыш в 1,4142 раза, т.е. в $\sqrt{2}$, как и при переходе от системы из 24 ГЛОНАСС-М к системе из 24 ГЛОНАСС-К.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующую стратегию наращивания, повышения точности и доступности системы ГЛОНАСС в условиях затенения: по мере выхода из строя существующих НКА ГЛОНАСС-М они заменяются на НКА ГЛОНАСС-К с ансамблем сигналов с частотным разнесением на основе используемой в настоящее время М-последовательности и со вторым ансамблем сигналов кодового разделения на единой несущей частоте. НКА ГЛОНАСС-К, изготовленные до выхода из строя очередного существующего НКА ГЛОНАСС-М, выводятся в позиции посередине между позициями НКА суще-

ствующей системы ГЛОНАСС, причем реализуют ансамбль сигналов кодового разделения на единой несущей частоте и ансамбль сигналов с частотным разнесением на основе второй M -последовательности, для реализации которой, как показано в [15], достаточно в 9-разрядном регистре сдвига, формирующем M -последовательность, вместо двух обратных связей, как сейчас, использовать четыре обратные связи. На трех резервных НКА, по одному для каждой орбитальной плоскости, должно быть предусмотрено переключение обратных связей регистра сдвига для возможности формирования любой из двух M -последовательностей.

Список литературы

1. Global positioning system wings (GPSW) systems engineering & integration. Interface Specification IS-GPS-200. Revision E. Navstar GPS Space Segment // Navigation User Interfaces. 8 June 2010. 185 p. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200E.pdf> (Дата обращения 14.07.2020).
2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). Москва, 2008. 74 p. http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (Дата обращения 14.07.2020).
3. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1.0. Москва, 2016. 133 p. <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKD.-Obshh.-opis.-Red.-1.0-2016.pdf> (Дата обращения 14.07.2020).
4. Ступак Г.Г., Куршин В.В., Бетанов В.В. Орбитальное перестроение системы ГЛОНАСС // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2013, № 1. С. 44–51.
5. Walker J.G. Comments on “Rosette constellations of earth satellites” // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1982, vol. 18, no. 4. P. 723–724.
6. Ballard A.H. Rosette Constellations of Earth Satellites // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, vol. 16, no. 5. P. 656–673.
7. Можжев Г.В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем (теоретико-групповой подход). М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
8. Walker J.G. Some circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage // Journal of the British Interplanetary Society, 1971, vol. 24. P. 369–384.
9. Walker J.G. Satellite constellations // Journal of the British Interplanetary Society, 1984, vol. 37. P. 559–571.
10. Степанов А., Акимов А., Гриценко А., Чазов В. Особенности построения и эксплуатации орбитальных группировок систем спутниковой связи // Спутниковая связь и вещание, 2016. С. 72–86.
11. Wood Lloyd. Internetworking with satellite constellations. Thesis submitted to the University of Surrey for the degree of Doctor of Philosophy // Centre for Communication Systems Research, School of Electronics, Computing and Mathematics, University of Surrey, Guildford, United Kingdom. 2001. 230 p. <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/publications/PhD-thesis/wood-phd-thesis.pdf> (Дата обращения 14.07.2020).
12. Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи. О задаче оптимизации орбитальной структуры многорульных спутниковых систем непрерывного обзора околоземного пространства // Известия высших учебных заведений, 2018, № 4 [697]. С. 68–79.
13. Adams W.S., Rider L. Circular Polar Constellations Providing Continuous Single or Multiple Coverage Above a Specified Latitude // The Journal of the Astronautical Sciences, 1987, vol. 35, no 2. P. 155–192.
14. Ступак Г.Г., Лысенко Л.Н., Бетанов В.В. и др. Состояние и перспективы совершенствования орбитальных структур навигационных спутниковых систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2014, № 1. С. 3–18.
15. Ватутин С.И., Бирюков А.А., Курков И.К. Сравнительный анализ глобальных дополнений системы ГЛОНАСС // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 4. С. 3–14.