

УДК 621.396.99

С. Н. К а р у т и н

## МЕТОД КОСВЕННОГО СИНТЕЗА НАВИГАЦИОННОГО РАДИОСИГНАЛА НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ВЫСОКОЙ ОРБИТЕ

*Рассмотрены вопросы совершенствования методов формирования навигационных радиосигналов космических аппаратов системы ГЛОНАСС. На основе анализа методов оценки величины задержки радиосигнала на трассе Земля–космический аппарат предложен метод косвенного синтеза навигационного радиосигнала космического аппарата на высокой орбите за счет прямой ретрансляции радиосигнала, сформированного земной станцией. Проведена оценка возможности выполнения требований к взаимной синхронизации несущих и огибающих колебаний навигационного радиосигнала при использовании различных диапазонов частот, подтверждающая возможность практического построения системы формирования навигационного радиосигнала на основе предложенного метода. Показаны перспективы развития орбитальной группировки навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС.*

**E-mail:** [sergey.karutin@rniikp.ru](mailto:sergey.karutin@rniikp.ru)

**Ключевые слова:** ГЛОНАСС, доступность, точность, навигационный радиосигнал.

Одним из наиболее приоритетных направлений развития системы ГЛОНАСС является повышение точности и доступности навигационных определений. Для количественной оценки влияния геометрии рабочего созвездия навигационных космических аппаратов (НКА) на точность навигационного обеспечения введено понятие геометрического фактора (ГФ) как отношения среднеквадратической погрешности (СКП) определения координат потребителя к СКП измерения псевдодальности [1, 2]. Геометрический фактор также используется для оценки доступности услуг ГЛОНАСС, которая определяется как процент времени на заданном интервале (сутки, месяц, год, . . .), в течение которого пространственный ГФ, рассчитываемый по НКА, используемым по целевому назначению, не превышает заданного значения для любой точки в зоне действия системы.

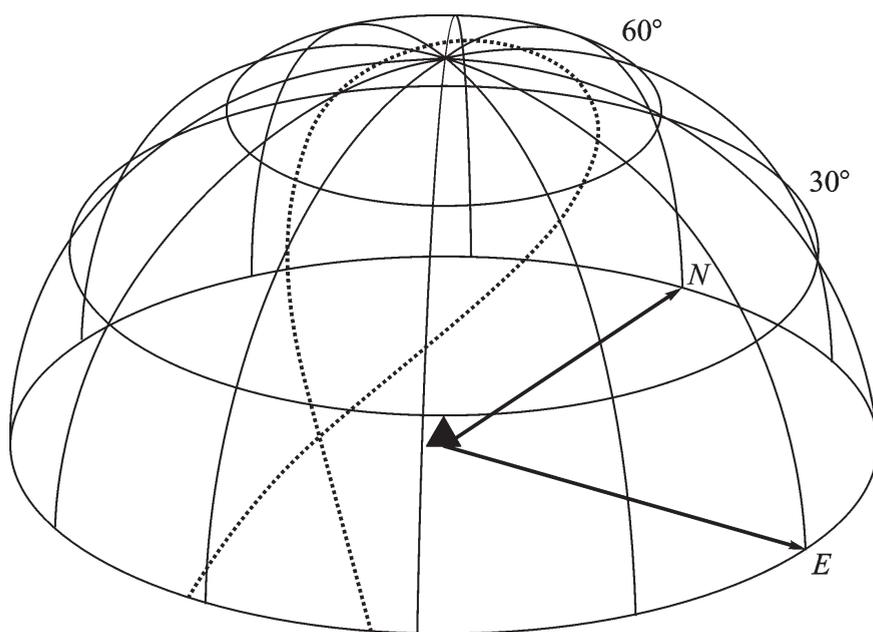
Результаты исследований [3, 4] показывают, что, например, в горной местности или в условиях плотной городской застройки число НКА, доступных для наблюдения, часто не обеспечивает требуемых значений ГФ, соответственно, и нужного качества точности и доступности навигационного обеспечения. В ряде случаев в [4] число види-

мых НКА оказывается менее трех, что исключает возможность даже определения плановых координат потребителя.

Эффективным методом решения данной проблемы является увеличение числа НКА в составе орбитальной группировки. Однако прямое увеличение числа НКА на средних орбитах наталкивается на ряд серьезных ограничений: существующая сетевая структура орбитальной группировки ГЛОНАСС не позволяет увеличить число НКА без радикального изменения структуры цифровой информации навигационных радиосигналов, что влечет за собой невозможность использования системы ГЛОНАСС всем существующим парком навигационной аппаратуры потребителя; увеличение числа НКА на средних орбитах позволит улучшить доступность навигационного обеспечения в основном в экваториальной области, а не на территории РФ, которая является приоритетной зоной обслуживания ГЛОНАСС.

Альтернативным вариантом развития орбитальной группировки ГЛОНАСС является использование НКА на высоких орбитах (геостационарной (ГСО) или геосинхронных наклонных околокруговых (ГСНО)), которые имеют ряд преимуществ.

Во-первых, НКА ГСО постоянно находится над зоной обслуживания (до  $70^\circ$  с.ш.), а видимость НКА ГСНО зависит от наклона орбиты. На рис. 1 приведена траектория движения НКА ГСНО по орбите с наклоном  $64,8^\circ$  относительно потребителя, расположенного в Москве, при этом ось  $N$  направлена на север, ось  $E$  — на восток, а направление в зенит дополняет систему координат до правой тройки. Расположение на данной орбите трех НКА, разнесенных на  $120^\circ$  в плоскости орбиты, обеспечивает непрерывное наблюдение потребителем как минимум одного НКА под углом места более  $30^\circ$  [5]. Наличие



**Рис. 1. Траектория движения НКА ГСНО по орбите с наклоном  $64,8^\circ$  относительно потребителя в Москве**

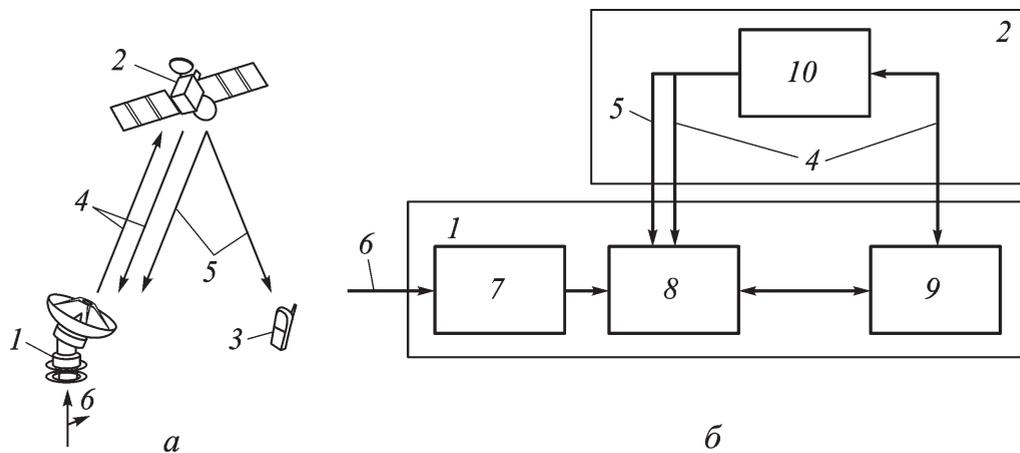
шести НКА в двух плоскостях, разнесенных на  $60^\circ$  по долготе, позволяет уменьшить на территории РФ, расположенной от  $30^\circ$  до  $180^\circ$  в.д. и севернее  $40^\circ$  с.ш., среднее значение ГФ на 30–40 %.

Во-вторых, для дальнейшего повышения точности определения местоположения [6] потребителю необходимо оперативно доставлять высокоточную эфемеридно-временную информацию (ЭВИ). Для уменьшения СКП навигационных определений до уровня менее 0,1 м периодичность обновления частотно-временных параметров не должна превышать нескольких минут. Существующие технические средства наземного комплекса управления и бортовой аппаратуры межспутниковой связи НКА на средних орбитах не позволяют решить данную задачу, поскольку число, географическое расположение и параметры радиолинии управления обеспечивают передачу на борт НКА исходных данных для прогнозирования ЭВИ один раз за виток, период которого составляет 11 ч 15 мин. Напротив, индивидуальные земные станции (ЗС) могут обеспечить непрерывную передачу данных на борт НКА ГСО/ГСНО.

Таким образом, для реализации указанных преимуществ НКА на высоких орбитах при развитии орбитальной структуры системы ГЛОНАСС необходимо обеспечить: излучение с борта НКА ГСО/ГСНО навигационного радиосигнала, когерентного с радиосигналами НКА ГЛОНАСС; оперативное обновление цифровой информации навигационного радиосигнала НКА ГСО/ГСНО.

Опыт создания бортовых источников навигационных радиосигналов НКА ГЛОНАСС показывает, что построение сложного БРТК с обработкой на борту, включающего в себя бортовое синхронизирующее устройство с относительной суточной нестабильностью  $10^{-14}$ , является чрезвычайно дорогостоящим, а также требует значительно больших габаритных размеров, массы и потребляемой мощности от бортовой сети космического аппарат. В качестве возможного альтернативного варианта построения бортовой аппаратуры, предъявляющего меньшие требования к платформе космического аппарата, будем рассматривать вариант построения БРТК прямой ретрансляции.

**Архитектура системы.** При использовании метода прямой ретрансляции (рис. 2) ЗС обеспечивает формирование навигационного радиосигнала на служебной частоте путем модуляции несущих колебаний двоичными символами периодической дальномерной псевдослучайной последовательности (ПСП) и цифровой информации, а также обеспечивает синхронизацию символов метки времени радиосигнала ЗС с меткой времени системы ГЛОНАСС. Источником цифровой информации и сигнала точного времени является центр управления ГЛОНАСС. Полученный сложный фазоманипулированный радиосигнал излучается с помощью остронаправленной антенны в направлении НКА ГСО/ГСНО. Для оценки полного времени распространения



**Рис. 2. Схема синтеза навигационного радиосигнала:**

1 — земная станция; 2 — НКА; 3 — аппаратура потребителя; 4 — служебные радиосигналы; 5 — потребительский радиосигнал; 6 — сигнал системы синхронизации и ЭВИ из центра управления; 7 — опорный генератор; 8 — детектор; 9 — управляемый генератор; 10 — делитель

БРТК, включающий в себя бортовой ретранслятор без обработки и антенно-фидерные системы приемного и передающего трактов, должен осуществить перенос принятого радиосигнала ЗС на другую несущую частоту, усилить и излучить его в обратном направлении.

Данная схема является распределенной системой косвенного синтеза навигационного радиосигнала, в которой детектор, опорный и управляемый генераторы располагаются на земле, а делитель — на борту НКА (рис. 2, б).

Отличительной особенностью рассматриваемой распределенной системы формирования радиосигнала является наличие случайно-неоднородной среды распространения радиосигналов между элементами системы, поэтому при разработке архитектуры и параметров системы необходимо учитывать следующие обстоятельства:

— радиосигналы на радиолиниях “земля–космос” и “космос–земля” проходят через ионосферу, которая характеризуется различными значениями фазовой и групповой скоростей распространения радиосигналов, что приводит к нарушению взаимной синхронизации несущих колебаний и огибающей, при этом фаза несущих колебаний опережает фазу огибающей;

— тропосферная и ионосферная рефракция приводят к флуктуациям фазы радиосигналов, которые возрастают с увеличением значения частоты несущих колебаний, а также зависят от гидрометеорологических условий.

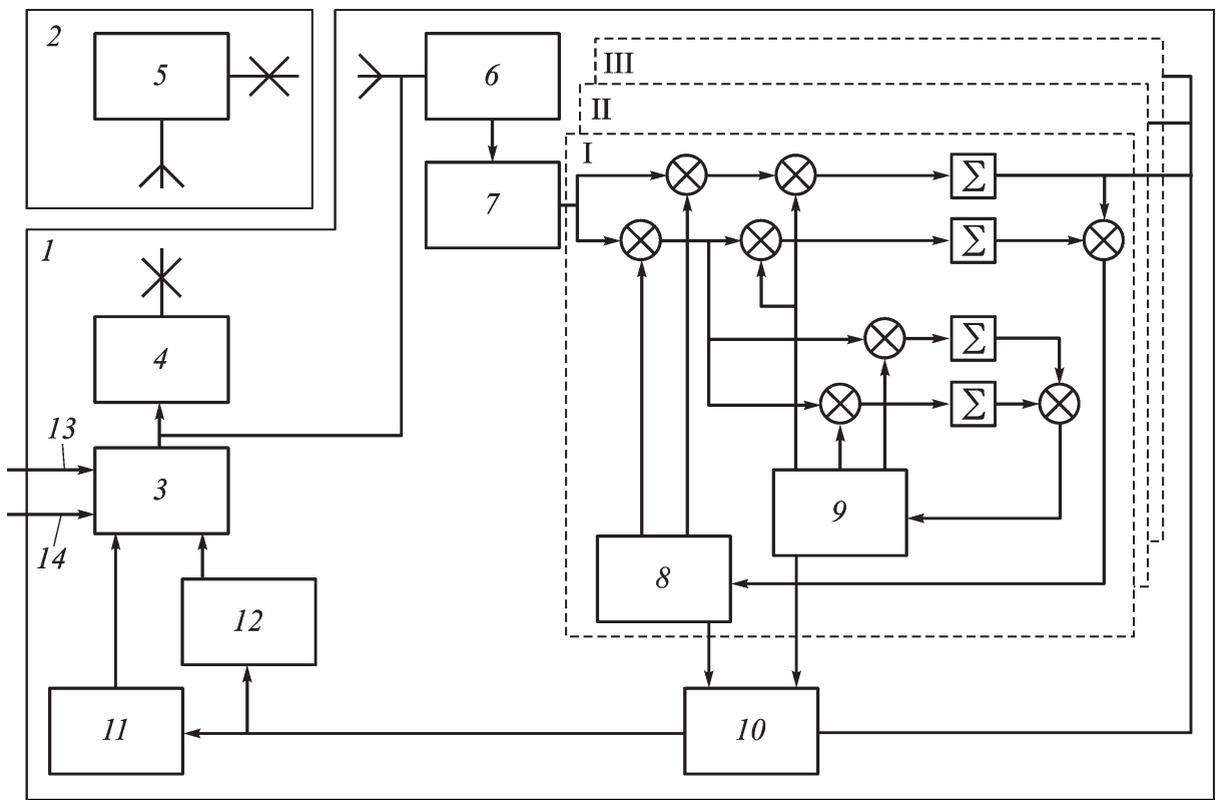
С учетом сказанного для обеспечения когерентности фазы дальномерной ПСП и фазы несущих колебаний потребительского радиосигнала, излучаемого с борта НКА, при формировании навигационного радиосигнала в ЗС необходимо учитывать доплеровский сдвиг частоты, задержки на распространение и в аппаратуре БРТК и ЗС,

а также влияние ионосферной рефракции. Оценить общую задержку на распространение можно запросным измерением дальности в одном частотном диапазоне с помощью служебных радиосигналов, а значение задержки, вызванной ионосферной рефракцией, — двухчастотным методом [7], используя при этом служебный и потребительский радиосигналы на радиолинии НКА–ЗС. Поэтому в БРТК из принятого радиосигнала должно быть сформировано два радиосигнала — один для потребителей, другой для служебных задач. Последний сигнал должен иметь несущую частоту в том же диапазоне, что и радиосигнал ЗС, поскольку в этом случае спектр флуктуаций фазы сигнала не превышает десятков герц [8], а процесс переноса пространственного распределения поля неоднородностей предполагается стационарным [9], что позволит приемнику ЗС оценить запаздывание сигнала в радиолинии. Потребительский радиосигнал совместно со служебным на радиолинии НКА–ЗС может быть использован для оценки влияния ионосферной рефракции.

В соответствии с рекомендациям RTCA [10] для обеспечения унификации навигационной аппаратуры потребителя, способной принимать радиосигналы НКА ГЛОНАСС и GPS, а также НКА ГСО/ГСНО, БРТК должен обеспечить излучение потребительского радиосигнала с шириной спектра 22 МГц на одной из используемых в настоящее время частот в *L*-диапазоне. В соответствии с Регламентом радиосвязи [11] для излучения подобных служебных широкополосных радиосигналов на радиолинии ЗС–НКА можно использовать частоты в *C*- и *Ku*-диапазонах.

На рис. 3 приведена структурная схема системы синтеза навигационного радиосигнала на борту НКА. Формирователь навигационного сигнала принимает цифровую информацию и сигнал точного времени из центра управления ГЛОНАСС, сигналы управляемого генератора (УГ) схемы слежения за задержкой (ССЗ) фазы периодической дальномерной ПСП и УГ системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) несущих колебаний. С выхода формирователя навигационного сигнала радиосигнал поступает на вход усилителя мощности ЗС, а затем с помощью направленной антенны излучается в направлении на НКА, который формирует из него два ответных сигнала.

Одновременно радиосигнал с выхода передающего устройства поступает на вход высокочастотного тракта многоканального приемника, который позволяет параллельно принимать, сопровождать и обрабатывать все три радиосигнала в независимых цифровых каналах. Каждый канал следит за несущими колебаниями и огибающей принимаемых радиосигналов, что позволяет формировать в навигационном процессоре отсчеты первичных измерений навигационных параметров для оценки времени распространения и ионосферной задержки.



**Рис. 3. Структурная схема системы синтеза навигационного радиосигнала:**  
 1 – ЗС; 2 – НКА; 3 – формирователь навигационного сигнала; 4 – усилитель мощности; 5 – БРТР; 6 – высокочастотная часть приемного устройства; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – управляемый генератор ФАПЧ; 9 – управляемый генератор ССЗ; 10 – навигационный процессор; 11 – управляемый генератор несущих колебаний; 12 – управляемый генератор огибающих колебаний; 13 – ЭВИ; 14 – сигнал точного времени; I, II, III – каналы цифровой обработки

Полученные в результате обработки оценки времени распространения и задержки радиосигналов в ионосфере используются для управления генераторами несущих и огибающих колебаний ЗС.

**Метод оценки времени распространения и ионосферной задержки.** Для оценки времени распространения радиосигнала  $\tau_{ГСНО}$  от ЗС до НКА будем использовать следующую модель первичного измерения запросной дальности:

$$S_{ГСНО} = 2(R + \delta_{ион} + \delta_{троп}) + \delta_{КА} + \delta_{ПРМ} + e_S, \quad (1)$$

где  $R = \sqrt{(x_{НКА} - x)^2 + (y_{НКА} - y)^2 + (z_{НКА} - z)^2}$  – геометрическая дальность между НКА с координатами  $x_{НКА}$ ,  $y_{НКА}$ ,  $z_{НКА}$  и потребителем с координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $\delta_{ион}$  – задержка распространения сигнала НКА в ионосфере;  $\delta_{троп}$  – задержка распространения сигнала НКА в тропосфере;  $\delta_{КА}$  – аппаратная задержка БРТК;  $\delta_{ПРМ}$  – аппаратная задержка радиосигнала в приемнике;  $e_S$  – шумовые погрешности измерений псевдодальности.

Поскольку связь между ЗС и НКА осуществляется в пределах прямой видимости, а среда распространения является изотропной, то использование БРТК без обработки на борту НКА позволяет измерить

время распространения радиосигнала  $\tau_{\text{ГСНО}}$  без учета ионосферной рефракции:

$$\tau_{\text{ГСНО}} = \frac{S_2 - \delta_{\text{КА}} - \delta_{\text{ПРМ}} - 2\delta_{\text{ион}}}{2c}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света.

Как следует из выражения (2), для оценки времени распространения помимо первичного измерения запросной дальности  $S_{\text{ГСНО}}$  необходимо оценить задержку радиосигнала в ионосфере  $\delta_{\text{ион}}$ . Ранее отмечалось, что наиболее распространенный метод оценки ионосферной задержки основан на использовании двухчастотных измерений дальности в разных диапазонах частот [7]:

$$\delta_{\text{ион}} = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} (S_1 - S_2), \quad (3)$$

где  $f_i$  — значение  $i$ -й несущей частоты;  $S_i$  — первичное измерение псевдодальности на  $i$ -й частоте.

Поэтому для оценки ионосферной задержки необходимо использовать измерения служебного и потребительского радиосигналов.

**Оценка погрешности синхронизации радиосигнала на борту НКА.** Одним из важнейших параметров распределенной системы формирования навигационного радиосигнала является взаимная синхронизация фаз несущих колебаний и огибающей, кратковременное (на интервале  $\tau = 10$  с) расхождение которой, согласно требованиям к широкозонным системам функциональных дополнений [12], не должно превышать  $5 \cdot 10^{-11}$  (СКП):

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{ПСП}}}{f_{\text{ПСП}}} - \frac{\Delta f_{\text{нес}}}{f_{\text{нес}}} \right| \leq 5 \cdot 10^{-11}, \quad (4)$$

где  $f_{\text{ш}}$ ,  $f_{\text{ПСП}}$  — номинальные значения частот несущих и огибающих колебаний;  $\Delta f_{\text{нес}}$ ,  $\Delta f_{\text{ПСП}}$  — отклонения реальных значений частот несущих и огибающих колебаний от реальных значений.

Оценить значения возможных отклонений можно, используя значения погрешностей измерения первичных навигационных параметров. С учетом (3) нестабильность формирования частоты огибающих колебаний можно определить следующим выражением:

$$\frac{\Delta f_{\text{ПСП}}}{f_{\text{ПСП}}} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{ПСП1}}^2 + \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} (\sigma_{\text{ПСП1}}^2 + \sigma_{\text{ПСП2}}^2)}}{\tau c}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{ПСП}i}^2 = \sigma_{\text{ш}i}^2 + \sigma_{\text{д}i}^2 + \sigma_{\Delta\phi i}^2$  — погрешность измерения псевдодальности по радиосигналу на  $i$ -й частоте;  $\sigma_{\text{ш}i}$  и  $\sigma_{\text{д}i}$  — шумовая и динамическая погрешности измерения псевдодальности;  $\sigma_{\Delta\phi i}$  — погрешность фазирования.

Шумовая погрешность оценивается согласно следующей формуле [7]:

$$\sigma_{\text{ш}} = \Delta\tau \sqrt{\frac{4k_1 d^2 B_{\text{ССЗ}}}{P_c/N_0} \left[ 2(1-d) + \frac{4k_2 d}{TP_c/N_0} \right]}, \quad (6)$$

где  $\Delta\tau$  — длительность символа дальномерной ПСП (для радиосигнала с тактовой частотой 1,023 МГц  $\Delta\tau = 2,99792458 \cdot 10^8 / 1,023 \times 10^6 = 293,05$  м);  $k_1, k_2$  — постоянные, зависящие от выбранного технического решения ССЗ (для схемы с двумя расстроенными по задержке каналами  $k_1 = 0,5, k_2 = 0$ );  $d$  — расстройка между каналами коррелятора (для схемы с двумя расстроенными по задержке каналами  $d = 0,5$ );  $B_{\text{ССЗ}}$  — эквивалентная шумовая полоса ССЗ (для навигационного приемника измерительной станции  $B_{\text{ССЗ}} = 1$  Гц);  $P_c/N_0$  — отношение мощности сигнала к спектральной плотности шума на входе приемника ( $10^{\frac{P_c/N_0}{10}}$ , если  $P_c/N_0$  задается в дБ/Гц).

Использование для передачи и приема радиосигналов направленной антенны позволяет значительно повысить отношение сигнал/шум  $P_c/N_0$  на входе приемника. Коэффициент усиления  $G$  направленной антенны ЗС можно определить по формуле из работы [10]:

$$G = 10 \log \left[ p \left( \frac{2\pi r}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (7)$$

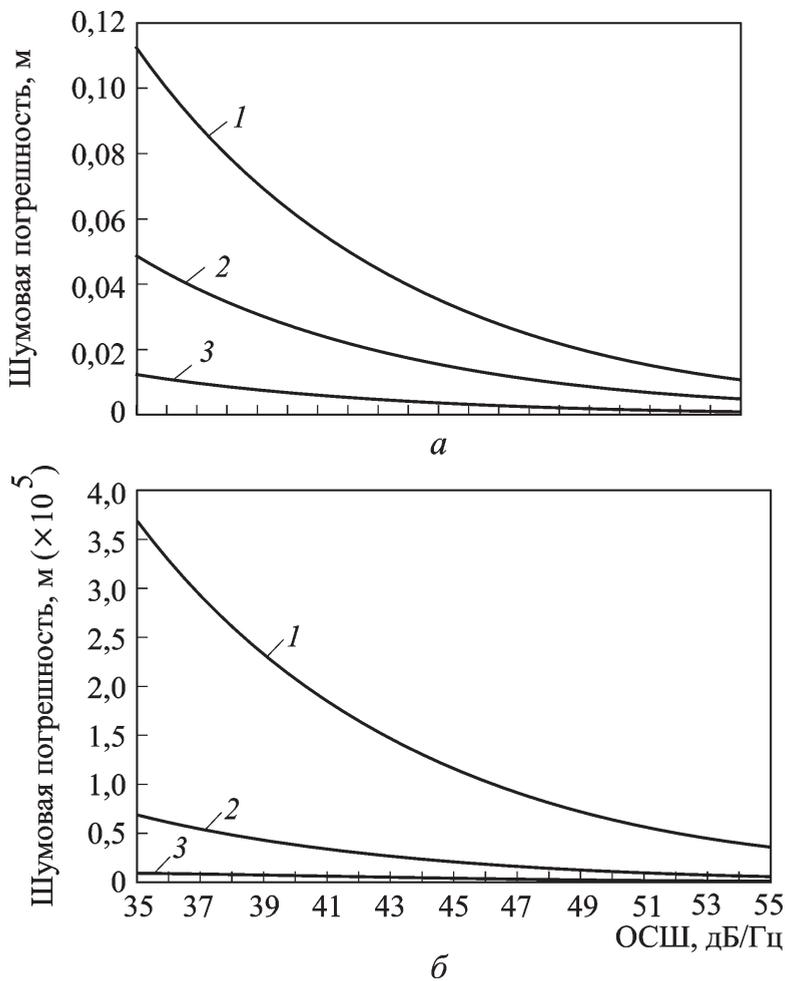
где  $p$  — коэффициент использования поверхности антенны (для зеркальных антенн 0,5);  $\lambda$  — длина волны несущих колебаний.

Рассмотрим случай использования зеркальной антенны с радиусом апертуры 5 м. При работе с радиосигналами в диапазонах L ( $\approx 1,6$  ГГц), С ( $\approx 3$  ГГц) и Ku ( $\approx 14$  ГГц) коэффициент усиления данной антенны будет равен 30, 38 и 50 дБ соответственно. В соответствии с расчетом энергетики навигационной радиолинии [7] уровень навигационного радиосигнала на входе приемного устройства при использовании ненаправленной антенны с равномерной диаграммой направленности в верхней полусфере изменяется от 35 дБ/Гц (при работе по пригоризонтному НКА) до 55 дБ/Гц (при приеме радиосигналов НКА, расположенного в зените). Результаты расчета шумовой погрешности при выбранных параметрах приведены на рис. 4, а.

Зависимость шумовой погрешности измерения при приеме радиосигналов в диапазонах L (1), С (2) и Ku (3) от отношения сигнал/шум при использовании антенны с радиусом апертуры 5 м приведены на рис. 4, б.

Для ССЗ третьего порядка динамическая погрешность измерения псевдодальности определяется по формуле [7]:

$$3\sigma_4 = 0,4828 \frac{d^3 R/dt^3}{B_{\text{ССЗ}}^3}, \quad (8)$$



**Рис. 4.** Зависимость шумовой погрешности измерения псевдодальности (а) и псевдофазы (б) при приеме радиосигналов в диапазонах L (1), С (2) и Ku (3) от отношения сигнал/шум при использовании антенны с радиусом апертуры 5 м

где  $d^3R/dt^3$  — скорость изменения ускорения (для статической ЗС  $dR^3/dt^3 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^3$ ).

При эквивалентной шумовой полосе ССЗ, равной 1 Гц, максимальное значение динамической погрешности согласно (7) равно  $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , а СКП —  $2 \cdot 10^{-6}$  м.

Вопросам оценки ошибки синхронизации разнесенных генераторов, обусловленной нестабильностью радиолинии, посвящено большое число работ. Например, в работах [8, 9] получены выражения для оценки среднего значения дисперсии ошибки фазирования  $\sigma_{\Delta\phi}^2$ :

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = 2\sigma_{\phi}^2 \left[ 1 + \frac{t_k}{2\tau_0} \left( e^{-\frac{2\tau_0}{t_k}} - 1 \right) \right], \quad (9)$$

где  $\sigma_{\phi}^2 = 2k\sigma_{\Delta n}^2 l_0 L$  — дисперсия фазы радиосигнала, прошедшего в неоднородной среде путь  $L$ ;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число;  $\sigma_{\Delta n}^2$  — дисперсия отклонения коэффициента преломления среды от среднего значения;  $l_0$  — средний характеристический размер неоднородности;  $t_k$  — время корреляции;  $\tau_0$  — среднее время распространения радиосигнала от ЗС до НКА.

Выражение (8) справедливо как для тропосферы, так и для ионосферы, отвечающих модели замороженного поля [8]. При оценке величины  $\sigma_{\Delta\phi}^2$  принято рассматривать два крайних состояния — удовлетворительные и неблагоприятные условия распространения [9]. В нашем случае наибольший интерес в оценке потенциально достижимых характеристик представляют случаи сильной солнечной активности и наличия дождевых облаков при сильном ветре. Дисперсия ошибки фазирования вследствие ионосферной рефракции при размере неоднородности  $l_0 \approx 1$  км, длине пути  $L \approx 55$  км и времени корреляции  $t_k = 2,4$  с составит  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  (в С-диапазоне) и  $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  (в Ку-диапазоне). В случае дождевых облаков при скорости ветра  $V = 12$  м/с, размере неоднородности  $l_0 \approx 6$  м, длине пути  $L \approx 1,5$  км и времени корреляции  $t_k = 0,5$  с дисперсия тропосферной ошибки фазирования составит  $7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  (при использовании С-диапазона) и  $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  (при использовании Ку-диапазона).

Относительную нестабильность формирования частоты несущих колебаний можно определить следующим выражением:

$$\frac{\Delta f_{\text{нес}}}{f_{\text{нес}}} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{нес}1}^2 + \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} (\sigma_{\text{нес}1}^2 + \sigma_{\text{нес}2}^2)}}{\tau c}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{\text{нес}i}^2 = \sigma_{\text{ш}i}^2 + \sigma_{\text{д}i}^2 + \sigma_{\Delta\phi i}^2$  — погрешность измерения псевдофазы по радиосигналу на  $i$ -й частоте;  $\sigma_{\text{ш}i}$  — шумовая погрешность измерения псевдофазы;  $\sigma_{\text{д}i}$  — динамическая погрешность измерения псевдофазы;  $\sigma_{\Delta\phi i}$  — погрешность фазирования.

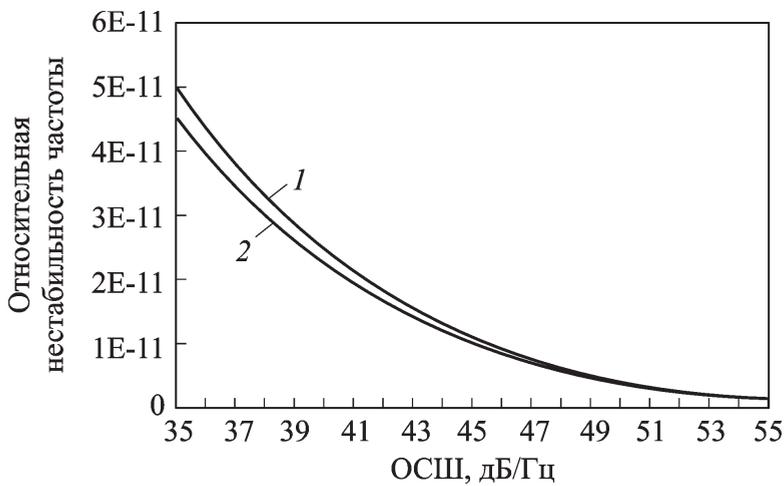
Значение шумовой погрешности измерения фазы оценивается по формуле [1, 7]

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{B_{\text{ФАПЧ}}}{P_c/N_0} \left(1 + \frac{1}{2TP_c/N_0}\right)}, \quad (11)$$

где  $B_{\text{ФАПЧ}}$  — эквивалентная шумовая полоса схемы ФАПЧ (для навигационных приемников измерительных станций  $B_{\text{ФАПЧ}} = 5$  Гц);  $T$  — время накопления (10 мс).

На рис. 4, б приведена зависимость шумовой погрешности при приеме с помощью антенны с радиусом апертуры 5 м радиосигналов в различных частотных диапазонах.

Максимальное значение динамической погрешности  $3\sigma_{\text{д}}$  определяется шириной эквивалентной шумовой полосы и порядком кольца слежения за несущей частотой. Для обеспечения слежения за сигналом НКА используют схемы ФАПЧ с астатизмом третьего порядка, которые обеспечивают слежение за радиосигналом объекта, движущегося



**Рис. 5.** Зависимость относительной нестабильности взаимной синхронизации частот несущих и огибающих колебаний при использовании радиосигналов на линии вверх в С- и Ku-диапазонах (кривые 1 и 2)

с постоянным ускорением. Однако, схемы третьего порядка не являются структурно устойчивыми при полосе более 18 Гц [3], поэтому для оценки динамической погрешности будем исходить из значения эквивалентной шумовой полосы 5 Гц:

$$3\sigma_d = 0,4828 \frac{d^3 R / dt^3}{B_{\text{ФАПЧ}}^3}. \quad (12)$$

Из выражения (11) следует, что максимальное значение динамической погрешности составит 0,018 м, а СКП соответственно 0,006 м. Погрешность, вызванная ошибкой фазирования, при расчете нестабильности несущих колебаний также рассчитывается с помощью выражения (8).

Используя полученные значения погрешностей измерения навигационных параметров, а также выражения (4), (5) и (9), для оценки нестабильности получаем зависимость разности значений нестабильности несущих и огибающих колебаний в зависимости от отношения сигнал/шум при использовании различных частотных диапазонов (рис. 5).

Результаты расчетов подтверждают возможность выполнения требований по взаимной синхронизации несущих и огибающих колебаний в навигационной радиолинии при использовании как С-, так и Ku-диапазонов.

**Выводы.** Повышение точности и доступности навигационного обеспечения требует совершенствования орбитального построения системы ГЛОНАСС и построения оперативных каналов передачи высокоточной ЭВИ потребителям. Метод косвенного синтеза навигационного радиосигнала на борту НКА ГСО/ГСНО позволяет решить указанные задачи без построения сложного БРТК. Обеспечить выполнение требований потребителей к взаимной синхронизации несущих и

огibaющих колебаний навигационных радиосигналов можно как при использовании С-, так и Ku-диапазона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С е т е в ы е спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
2. Г л о б а л ь н а я спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010. – 688 с.
3. W u F., K u b o N., Y a s u d a A. Performance evaluation of GPS augmentation using quasi-zenith satellite system // Aerospace and Electronic Systems. Vol. 40, issue 4, 2004. – P. 1249–1260.
4. K u b o N., K o g u r e S. Improvement of the GPS performance in urban canyon using QZSS // The first Asia Oceania regional workshop on GNSS, January 25–26 2010, Bangkok, Thailand. – 19 p.
5. U r l i c h i c h Y., S u b b o t i n V., S t u p a k G., D v o r k i n V., P o v a l i a e v A., K a r u t i n S. GLONASS developing strategy // Proc. of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010), Portland, OR, September 2010. – P. 1566–1571.
6. Д в о р к и н В. В., К а р у т и н С. Н., Г л у х о в П. Б. Анализ состояния и перспектив развития технологии высокоточного местоопределения по сигналам ГНСС // Радиотехника. – 2011. – № 3.
7. E l l i o t t D. K a p l a n. Understanding GPS. Principles and applications. – London: Artech House, 1996. – 555 с.
8. Т а т а р с к и й В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
9. Т ю б а л и н В. В. Ошибка синхронизации разнесенных генераторов, обусловленная нестабильностью радиолинии // РК техника. Сер. VI. Вып. IV (18), – 1974. – С. 163–166.
10. M i n i m u m operational performance standards for global positioning / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA/DO-229D, prepared by SC-159, RTCA Inc., Washington, D.C., December 13, 2006.
11. Р е г л а м е н т радиосвязи. Т. 1. – Международный союз электросвязи, 2008. – 428 с.
12. S p e c i f i c a t i o n for the wide area augmentation system (WAAS). FAA-E-2892b Change 1 August 13, 2001 (including Change 2). – 156 p.

Статья поступила в редакцию 25.07.2011

Сергей Николаевич Карутин родился в 1975 г., окончил в 1999 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заместитель начальника центра ОАО “Российские космические системы”. Автор 27 научных работ в области радионавигации.

S.N. Karutin (b. 1975) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1999. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University, deputy head of center of ОАО Russian Space Systems. Author of 27 publications in the field of radio navigation.

