

УДК 621.396.99

С. Н. Карутин

ВЫСОКОТОЧНОЕ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЕ ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УТОЧНЕННОЙ ЭФЕМЕРИДНО-ВРЕМЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены вопросы совершенствования метода высокоточного местоопределения по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем с использованием уточненной эфемеридно-временной информации, сформированной системами функциональных дополнений глобальной навигационной спутниковой системы. Предложен алгоритм определения координат потребителя и приведены результаты экспериментальных исследований, на основе которых сделаны выводы о перспективах развития систем функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем.

E-mail: sergey.karutin@rniikp.ru

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, GPS, система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), точность.

За последние десятилетия навигационная аппаратура потребителя (НАП) глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) нашла применение при решении широкого круга прикладных задач. Помимо традиционных задач определения местоположения при перемещении людей, транспортных средств или грузов НАП используется в строительстве, межевании земли, научных исследованиях. Для решения последних задач необходима повышенная точность навигационных определений. В начале 1990-х гг. широкое применение при решении данных задач нашли методы дифференциальной навигации [1]. Ставший уже классическим метод дифференциальной коррекции, при котором контрольно-корректирующая станция (ККС) формирует скалярные поправки к первичным измерениям псевдодалности, позволяет потребителю, находящемуся на расстоянии до 200 км от ККС, уменьшать погрешность измерения псевдодалности до единиц метров.

Дальнейшее развитие методы дифференциальной навигации получили с разработкой алгоритмов относительного местоопределения объекта с использованием методов фазовой интерферометрии [2]. Использование для решения задач относительной навигации измерений

фазы псевдодоплеровской частоты позволило выйти на миллиметровый уровень точности. Однако значение базы подобного интерферометра, которое и определяет дальность действия метода, не превышает нескольких десятков километров, в первую очередь, из-за возрастающей неидентичности трасс распространения сигналов от навигационных космических аппаратов (НКА) до опорной станции и НАП через атмосферу.

Параллельно с методами относительного местоопределения развивался метод широкозонной дифференциальной коррекции, который заключался в передаче потребителю векторных поправок к информации о параметрах движения и шкале времени НКА, а также параметров модели ионосферы, что также обеспечивает потребителю возможность осуществлять навигационные определения с погрешностью (СКО) менее метра. По данному принципу реализованы широкозонная система WAAS (США), Европейская геостационарная навигационная служба (EGNOS) и создаваемая в настоящее время отечественная система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ).

Таким образом, в настоящее время разработаны и нашли широкое применение методы навигации, при которых потребитель имеет возможность либо осуществлять высокоточные навигационные определения (с погрешностью порядка единиц сантиметров) на небольших расстояниях от опорных станций, либо проводить абсолютные навигационные определения с метровой точностью.

Однако в последнее время создана серьезная основа для дальнейшего развития технологий местоопределения по сигналам ГНСС. Во-первых, системы ГЛОНАСС и GPS прошли этап серьезной модернизации — на орбите появились НКА нового поколения, которые излучают гражданские навигационные радиосигналы в диапазонах L1 и L2, что позволяет оценивать и компенсировать задержку сигнала в ионосфере двухчастотным методом [3]. Во-вторых, Международная служба ГНСС — IGS (International GNSS Service) — в результате масштабных исследований разработала алгоритмы оценки эфемеридных параметров движения НКА и частотно-временных поправок к бортовым шкалам времени НКА, которые позволяют оценивать данные параметры с погрешностью в единицы сантиметров [4]. Данные обстоятельства позволили разработать алгоритмы высокоточных абсолютных навигационных определений по сигналам системы GPS [5, 6], существенным недостатком которых является невозможность их использования при высокоточных навигационных определениях по радиосигналам системы ГЛОНАСС, а также при проведении совместной обработки измерений, полученных по радиосигналам систем ГЛОНАСС и GPS.

В связи с тем, что работы по восстановлению орбитальной группировки системы ГЛОНАСС завершаются стадии (в апреле 2010 г. на орбите находился 21 НКА, используемый по целевому назначе-

нию, и до конца 2010 г. предполагается осуществить два групповых запуска по три НКА каждый), число пользователей системы ГЛОНАСС неуклонно растет, особенно при решении задач высокоточной навигации, задача совершенствования алгоритма высокоточного абсолютного местоопределения представляется чрезвычайно актуальной.

Модели первичных измерений. Потребитель имеет в настоящее время возможность использовать при навигационных определениях первичные измерения навигационных параметров — псевдодальности S_i и фазы псевдодоплеровской частоты Φ_i [1, 3]:

$$S_i = R + \delta R + c(\delta t - \delta T) + \delta_{\text{ион}} + \delta_{\text{троп}} + \delta_3 + \delta_{\text{рел}} + \delta_{\text{мнл}} + \delta_{\text{ап}} + e_S, \quad (1)$$

$$\lambda_i \Phi_i = R + \delta R + c(\delta t - \delta T) + \lambda_i N_i - \delta_{\text{ион}} + \delta_{\text{троп}} + \delta_3 + \delta_{\text{рел}} + \delta_{\text{мнл}} + \delta_{\text{ап}} + e_\Phi, \quad (2)$$

где $R = \sqrt{(X_{\text{НКА}} - x)^2 + (Y_{\text{НКА}} - y)^2 + (Z_{\text{НКА}} - z)^2}$ — геометрическая дальность между НКА с координатами $(X_{\text{НКА}}, Y_{\text{НКА}}, Z_{\text{НКА}})$ и потребителем с координатами (x, y, z) ; δR — погрешность эфемеридной информации; c — скорость света; δt — расхождение между шкалами времени потребителя и используемой навигационной системы; δT — расхождение между шкалами времени НКА и его системы; $\delta_{\text{ион}}$ — задержка распространения сигнала НКА в ионосфере; $\delta_{\text{троп}}$ — задержка распространения сигнала НКА в тропосфере; δ_3 — погрешность измерения дальности, обусловленная влиянием приливов мирового океана на изменение гравитационного поля Земли; $\delta_{\text{рел}}$ — погрешность измерения дальности, обусловленная релятивистским эффектом; $\delta_{\text{мнл}}$ — погрешность, обусловленная многолучевым характером распространения сигнала НКА; $\delta_{\text{ап}}$ — аппаратурная погрешность, обусловленная неидентичностью и неравномерностью характеристик группового времени запаздывания радиосигналов НКА на приемном тракте НАП; λ_i — длина волны несущих колебаний сигнала НКА, индекс i обозначает частотный диапазон ($i = 1$ для диапазона L1 и $i = 2$ для диапазона L2); N_i — целочисленная неоднозначность измерения фазы; e_S, e_Φ — шумовые погрешности измерений псевдодальности и фазы соответственно.

Как уже отмечалось ранее, наличие измерений первичных навигационных параметров в двух частотных диапазонах позволяет формировать измерения, свободные от погрешности, связанной с распространением сигнала в ионосфере. Подобные измерения формируются путем линейного комбинирования измерений (1) и (2), полученных по сигналам в диапазонах L1 и L2 [3]:

$$S = \frac{f_1^2 S_1 - f_2^2 S_2}{f_1^2 - f_2^2} = A S_1 - B S_2; \quad (3)$$

$$\lambda \Phi = \frac{f_1^2 \lambda_1 \Phi_1 - f_2^2 \lambda_2 \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} = \Lambda (f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2), \quad (4)$$

где S — отсчет псевдодальности, сформированный путем комбинирования измерений S_1 и S_2 , полученных при измерениях на частотах в диапазонах L1 и L2; f_i — несущая частота сигнала НКА в диапазоне i ; A, B — масштабные коэффициенты, которые соответственно принимают значения 2,54 и 1,54 для системы GPS, а также 2,53 и 1,53 — при обработке измерений по сигналам системы ГЛОНАСС; $\lambda\Phi$ — отсчет фазы псевдодоплеровской частоты, сформированный путем комбинирования Φ_1 и Φ_2 , полученных при измерениях на частотах в диапазонах L1 и L2; λ_i — длина волны колебаний сигнала НКА в диапазоне i ; $\Lambda = \frac{c}{f_1^2 - f_2^2}$ — масштабный коэффициент.

Следует отметить, что обработка измерений ГЛОНАСС и GPS должна вестись отдельно, поскольку каждая система имеет собственную шкалу времени, и для совместной обработки необходимо вводить еще одну неизвестную переменную — расхождение системных шкал времени. Кроме того, при обработке фазовых измерений ГЛОНАСС необходимо учитывать неидентичность характеристик группового времени запаздывания сигналов в приемных трактах НАП, что приводит к дополнительным сложностям в построении алгоритмов обработки [2].

Для полученных отсчетов псевдодальности S и фазы $\lambda\Phi$ будут справедливы выражения (1) и (2), в которых остаточная погрешность, вызванная задержкой сигнала в ионосфере, не превышает 6 см [5]. Величины δR и δT потребитель вычисляет с помощью данных, передаваемых в составе цифровой информации навигационного сигнала, или из источников высокоточных эфемерид и частотно-временных поправок, например СДКМ или IGS. При этом точность оценки параметров орбит и шкал времени НКА составляет единицы сантиметров и доли наносекунд [6]. Кроме того, существуют достаточно точные математические модели, которые позволяют оценивать влияние приливов δ_3 и релятивистский эффект $\delta_{\text{рел}}$ с остаточной погрешностью в единицы сантиметров [4]. В настоящее время для борьбы с эффектом многолучевости разработано довольно много различных методов, которые в первую очередь используются при высокоточных навигационных определениях. Эти методы включают в себя как аппаратные, так и программные решения. Поэтому дальнейший анализ будем строить, исходя из предположения, что погрешность, вызванная многолучевым характером распространения сигналов НКА, пренебрежимо мала по сравнению с другими погрешностями. Составляющая погрешности $\delta_{\text{ан}}$ при обработке измерений по радиосигналам системы GPS, в которой реализовано кодовое разделение радиосигналов НКА на общей несущей частоте, имеет пренебрежимо малое значение, поскольку радиосигналы НКА смещены относительно друг друга лишь на величину доплеровского сдвига вследствие взаимного движения НКА и

НАП. Однако при обработке измерений, полученных по радиосигналам НКА системы ГЛОНАСС, указанную погрешность необходимо учитывать, поскольку в системе реализован частотный метод разделения радиосигналов НКА и расхождение в задержке радиосигналов различных НКА может достигать нескольких наносекунд.

Исходя из вышесказанного, а также представив задержку сигнала в тропосфере $\delta_{\text{троп}}$ в виде произведения задержки сигнала в направлении зенита τ и отображающей функции M , можно записать следующие выражения для комбинационных отсчетов псевдодальности и фазы:

$$S = R + c\delta t + M\tau + \delta_{\text{ан}} + e_S; \quad (5)$$

$$\lambda\Phi = R + c\delta t + M\tau + N\lambda + \delta_{\text{ан}} + e_{\Phi}. \quad (6)$$

Модель оценки параметров. С учетом того, что при формировании комбинационных измерений целочисленный характер неоднозначностей N_i нарушается, выражения (5) и (6) могут быть записаны в виде линеаризованной системы уравнений относительно вектора искомых параметров $\Delta(x, y, z, \delta t, \tau, N\lambda, \delta_{\text{ан}})$:

$$C\Delta + Y - E = 0, \quad (7)$$

где C — матрица коэффициентов при искомых параметрах Δ ; Y — вектор невязок измеренных и расчетных значений навигационных параметров, который характеризуется корреляционной матрицей W ; E — вектор некомпенсированных погрешностей измерения навигационных параметров.

При этом коэффициенты линейного разложения (7) для любого произвольного НКА могут быть записаны следующим образом:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial x} & \frac{\partial S}{\partial y} & \frac{\partial S}{\partial z} & c & M & 0 & 1 \\ \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial x} & \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial y} & \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial z} & c & M & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

где $\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial x} = \frac{(X_{\text{НКА}} - x_0)}{R}$; $\frac{\partial S}{\partial y} = \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial y} = \frac{(Y_{\text{НКА}} - y_0)}{R}$; $\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial z} = \frac{(Z_{\text{НКА}} - z_0)}{R}$; x_0, y_0, z_0 — априорные значения координат потребителя.

Необходимо отметить, что в случае обработки измерений, полученных по сигналам двух систем, к числу неизвестных добавляется расхождение между системными шкалами времени ГЛОНАСС и GPS, а также что при расчете координат необходимо дополнительно учитывать расхождение между системами координат WGS-84 (G1150) и ПЗ-90.02.

Для оценки параметров местоположения потребителя можно использовать фильтр, основанный на оценке методом максимума апостериорной вероятности, т.е. фильтр Калмана, имеющий следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta_m &= \Delta_{m-1} + K_m C_m^T W_m^{-1} \cdot Y_m, \\ K_m &= (K_{m-1}^{-1} + C_m^T W_m^{-1} \cdot C_m)^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где m — момент времени, в который уточняются координаты; K_m — корреляционная матрица вектора искомым параметров в момент времени m .

Выражения (8) в общем случае можно использовать и для оценки искомым параметров местоположения подвижного потребителя. Динамика потребителя может изменяться от десятков метров в секунду для автомобиля, до нескольких километров в секунду для низкоорбитального космического аппарата. Скорость ухода шкалы времени потребителя относительно системной шкалы δt определяется качеством опорного генератора НАП. При использовании кварцевого генератора с относительной нестабильностью порядка 10^{-10} скорость ухода может составлять несколько сантиметров в секунду. При этом тропосферная задержка сигнала в направлении зенита τ изменяется сравнительно медленно, всего лишь несколько сантиметров в час. Наконец, предпоследний параметр $N\lambda$ остается постоянным при условии отсутствия сбоев, связанных с перескоками схем слежения за несущей частотой радиосигналов НКА из одного устойчивого положения в другое, а параметр $\delta_{\text{ап}}$ является постоянным для заданного образца навигационной аппаратуры и соответствующего НКА.

Для учета динамики потребителя и флуктуаций остальных параметров целесообразно представить значение корреляционной функции K_{m-1} в виде суммы:

$$K_{m-1} = K_{m-2}^{-1} + C_{m-2}^T W_{m-2}^{-1} C_{m-2} + Q_{m-1}^{-1}, \quad (9)$$

где Q — ковариационная матрица, учитывающая изменение искомым параметров между моментами времени $m-1$ и $m-2$. Для рассматриваемого случая с семью неизвестными матрица Q будет иметь вид

$$Q = \begin{bmatrix} Q_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{\delta t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{\tau} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{N\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В рассматриваемой матрице диагональные элементы определяются в соответствии с динамикой потребителя параметрами ухода генера-

тора, активностью атмосферы. При отсутствии сбоев в работе схем фазовой автоподстройки частоты НАП элемент $Q_{N\lambda}$ будет всегда равен нулю. В статическом режиме нулю также будут равны Q_x , Q_y и Q_z . Значение $Q_{\delta t}$ зависит от относительной нестабильности частоты опорного генератора НАП и может меняться в зависимости от режимов и условий работы НАП. На практике принимают, что данный процесс является белым шумом с большой флуктуацией, чтобы учесть непрогнозируемые выбросы генератора. Для учета изменения тропосферы значение Q_T выбирают, исходя из предположения, что задержка сигнала в тропосфере вследствие различных флуктуаций может достигать 5 мм/ч.

Дополнительные факторы, оказывающие влияние на точность местоопределения. Во многих случаях исследователи и разработчики программного обеспечения для решения задач вторичной обработки первичных измерений навигационных параметров по сигналам ГЛОНАСС и GPS сталкиваются с тем, что при обработке первичных измерений не удается получить теоретически обоснованных точностей. При использовании апостериорной эфемеридно-временной информации (ЭВИ) и комбинаторных двухчастотных измерений влияние на точность местоопределения начинают оказывать факторы, которые не учтены в классических моделях (1) и (2) в виде отдельных параметров в силу невозможности оценить их влияние и вклад в погрешность измерения [4]. Указанные факторы можно разделить на три вида — связанные с положением НКА в пространстве, движением Земли в солнечной системе и расхождением систем координат.

Эффекты, связанные с положением НКА в пространстве. К первой группе факторов относятся два эффекта: несовпадение точки излучения сигнала (фазового центра) НКА и его центра масс; набег фазы вследствие различной ориентации приемной и передающей антенн.

Требование по учету расхождения местоположения в пространстве центра масс НКА и фазового центра связано с тем, что НАП измеряет задержку распространения сигнала относительно фазового центра, а при определении параметров модели движения НКА расчет ведется относительно центра масс. Поэтому бортовые эфемериды ГЛОНАСС и GPS содержат данные о движении фазового центра, а центры расчета высокоточных эфемерид такие, например, как IGS, формируют параметры орбиты для центра масс. Именно центр масс выбирается центром системы координат (рис. 1), связанной с НКА. Ось Z соединяет центры масс НКА и Земли, ось Y лежит в одной плоскости с центром масс Солнца и дополняет данную систему до правой тройки. В табл. 1 приведены усредненные значения смещений фазовых центров НКА различных модификаций относительно центра масс данных НКА [7].

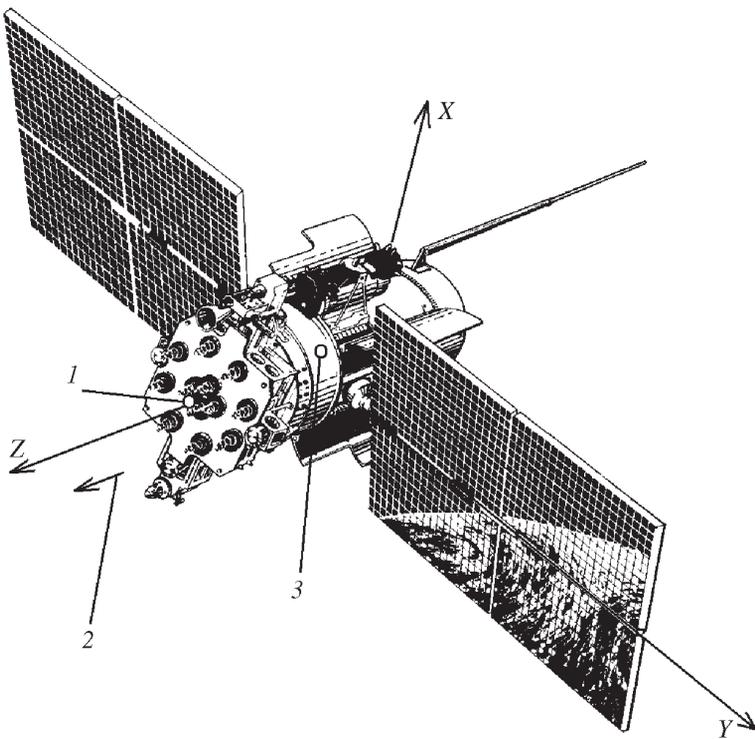


Рис. 1. Система координат, связанная с НКА:

1 – фазовый центр НКА; 2 – направление излучения; 3 – центр масс НКА

Таблица 1

Результаты оценки координат пунктов

Тип НКА	Смещение фазового центра относительно центра масс НКА, м, по оси		
	X	Y	Z
ГЛОНАСС	0	0	1,986
ГЛОНАСС-М	-0,545	0	2,277
Block I	0,210	0	1,725
Block II	0,279	0	2,421
Block IIА	0,279	0	2,376
Block IIR-A	0	0	1,145
Block IIR-B	0	0	0,669
Block IIR-M	0	0	0,699

Учет указанных в табл. 1 параметров является одним из важнейших условий достижения высокой точности местоопределения при использовании высокоточной ЭВИ, поскольку в противном случае вносимая в расчеты псевдодалности ошибка не позволит достичь требуемых точностей.

Эффект набега фазы вследствие вращения связан с тем, что НКА излучают сигналы с правой круговой поляризацией и значения измененного набега фаз зависят от взаимной ориентации антенн НКА и НАП. При вращении как передающей, так и приемной антенн относительно оси диаграммы направленности паразитный набег фазы может достигать одного периода (одной длины волны) при полном повороте на 360° . В связи с этим рекомендуется антенну НАП за исключением случаев, когда она установлена на подвижном объекте, ориентировать на север. При этом антенна НКА в любом случае будет медленно поворачиваться вследствие вращения солнечных батарей НКА, которые должны следить за Солнцем, так что взаимное вращение приемной и передающей антенн неизбежно. Особое внимание следует уделить так называемым теневым участкам Земли (ТУЗ). При выходе из зон ТУЗ НКА должен быстро вращаться для наведения солнечных батарей. При этом НКА может совершить один оборот вокруг оси менее чем за полчаса, поэтому результаты измерения фаз, полученные в такие моменты, должны быть либо скорректированы, либо исключены из обработки.

Поправка на закрутку фазы может быть рассчитана с помощью выражения [7]:

$$\Delta\phi = \text{sign}\xi \cos^{-1}(\vec{D}' \cdot \vec{D} / |\vec{D}'| |\vec{D}|), \quad (10)$$

где $\text{sign} a$ — знаковая функция, которая равна единице при $a > 0$, нулю при $a = 0$ и минус единице при $a < 0$; $\xi = \vec{k} \cdot (\vec{D}' \times \vec{D})$; \cdot — знак скалярного произведения векторов; \times — знак векторного произведения; \vec{k} — единичный вектор, определяющий направление от НКА на НАП; \vec{D}' и \vec{D} — векторы эффективных диполей антенн НКА и НАП.

При расчете поправки для различных моментов времени необходимо обеспечивать непрерывность измерения, т.е. добавлять при необходимости полное число циклов ($\pm 2\pi$).

Эффекты, связанные с движением Земли в солнечной системе.

В глобальном смысле Земля не является абсолютно твердым телом: под действием внешних сил расстояние между двумя произвольными точками изменяется. Земля не является и абсолютно упругим телом — если действие внешних сил прекращается, то точки не возвращаются в первоначальное положение, т.е. Земля остается в деформированном состоянии. Для описания упругих деформаций Земли английский геофизик Ляв ввел безразмерные параметры h , позднее, японский ученый Шида определил число l , сейчас все они называются числами Лява и Шида. Числа Лява связаны с модулями упругости Земли (характеризующими упругие свойства материалов при малых деформациях). В настоящее время доказано, что упругие свойства Земли и, следовательно, числа Лява зависят от частоты действующей на Землю силы.

Потенциал в точке наблюдения складывается из гравитационного потенциала внешних тел (Солнца, Луны и планет) и собственного потенциала Земли, возмущенного приливными деформациями. Для определения положения пункта в Международной земной системе координат (ITRF) из его мгновенного радиуса-вектора вычитается вектор Δr_f полной приливной деформации, причем постоянное смещение вычисляется с использованием принятых чисел Лява и Шида.

Для принятой модели строения Земли были рассчитаны числа Лява, на основе которых вычислено приливное смещение пункта по формуле [4]

$$\Delta r_f = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ \left[3l_2 \left(\vec{R}_j \cdot \vec{r} \right) \right] \vec{R}_j + \right. \\ \left. + \left[3 \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) \left(\vec{R}_j \cdot \vec{r} \right)^2 - \frac{h_2}{2} \right] \vec{r} \right\} + \\ + [-0,025m \sin \phi \cos \phi \sin(\theta_g + \lambda)] \vec{r}, \quad (11)$$

где GM, GM_j — гравитационные параметры Земли, Луны ($j = 2$) и Солнца ($j = 3$); r, R_j — модули геоцентрических векторов пункта, Луны и Солнца и соответствующие им единичные векторы \vec{r}, \vec{R}_j ; l_2 — число Лява второго порядка (0,609); h_2 — число Шида второго порядка (0,085); ϕ — широта пункта; λ — долгота пункта; θ_g — среднее Гринвичское сидерическое время.

Поправка (11) может достигать 30 см в радиальном направлении и 5 см в плане. Поскольку внешний потенциал включает в себя как гармоники, зависящие от времени, так и часть, постоянную во времени, то и приливное смещение пункта содержит постоянную и переменную во времени компоненты. Постоянная компонента смещения в средних широтах может достигать 12 см и оставаться неизменной в течение 24 ч, поэтому расчет поправок, учитывающих данный вид погрешностей, должен обязательно входить в алгоритмы высокоточного местоопределения.

Помимо вышеописанных эффектов, при оценке координат необходимо также учитывать влияние приливов Мирового океана. В основе данного эффекта лежит гравитационно-приливное взаимодействие в системе Земля–Луна, которое приводит к изменению орбиты Луны и замедлению вращения Земли.

Масса Луны сравнительно велика (1/81 массы Земли), и Луна находится довольно близко, вызывая приливы на Земле. В океанских водах на обращенной к Луне стороне Земли формируется приливная волна (такая же волна формируется и на противоположной стороне). Если бы Земля не вращалась вокруг своей оси, приливная волна находилась

бы точно под Луной, которая притягивает ее к себе, и бежала бы по поверхности Земли с запада на восток, совершая полный оборот за один сидерический лунный месяц (27 дней 7 часов 43,2 минуты).

Однако Земля вращается “под” этой волной, совершая один оборот за сидерические сутки (23 ч 56 мин 4,091 с). В результате приливная волна бежит по поверхности Земли с востока на запад, совершая один полный оборот за 24 ч 48 мин. Поскольку Земля отнюдь не является идеальным шаром, на каждую из этих двух приливных волн регулярно набегают восточные берега материков, омываемых Мировым океаном (набегают именно материки на волну, поскольку Земля вращается быстрее обращения Луны). Из-за этого приливная волна смещается вперед по направлению вращения Земли, опережая Луну. Следствием такого опережения является то, что значительная часть массы океанских вод (т.е. и часть массы всей Земли) смещается вперед с линии, соединяющей центры масс Земли и Луны. Эта смещенная вперед масса притягивает к себе Луну, создавая силу, действующую перпендикулярно линии Земля–Луна. В результате на Луну действует момент силы, ускоряющий ее обращение по орбите вокруг Земли.

Международная служба вращения Земли (International Earth Rotation Service) разработала рекомендации [8], согласно которым смещение (по радиусу, на запад и на юг) местоположения потребителя вследствие влияния приливов в одном направлении можно оценить с помощью следующего выражения:

$$\Delta c = \sum_{j=1}^{11} f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}), \quad (12)$$

где j – индекс, обозначающий суммирование по 11 приливым волнам (полусуточные волны M_2 , S_2 , N_2 и K_2 ; суточные волны K_1 , O_1 , P_1 и Q_1 ; длительные волны M_f , M_m и S_{sa}); f_j , u_j – коэффициенты, зависящие от долготы лунного узла (при точности в 1...3 мм $f_j = 1$ и $u_j = 0$); ω_j – угловая скорость вращения Земли; χ_j – астрономический аргумент; A_{cj} , Φ_{cj} – амплитуда и фаза смещения (по радиусу, на запад и на юг) местоположения потребителя.

Величины ω_j и χ_j принимают равными значениям угловой скорости вращения Земли и астрономического аргумента в полночь. Значения амплитуды A_{cj} и фазы Φ_{cj} рассчитываются конволюцией функции Грина с использованием модели движения Мирового океана и данных береговых наблюдений, которые можно найти на сайте Службы движения Мирового океана [8]. Результаты многолетних наблюдений свидетельствуют, что амплитуда изменения момента M_2 является самой большой и не превышает для прибрежных станций 5 см по радиусу и 2 см в горизонтальном направлении. Поэтому при решении задач

высокоточного позиционирования необходимо учитывать не только упругие деформации Земли, но и влияние приливов. Причем делать это следует не только для потребителей находящихся в прибрежной зоне, но и для тех, кто расположен в глубине материков.

Помимо указанных факторов при решении задач высокоточного позиционирования необходимо учитывать вращение Земли, т.е. эффекты прецессии и нутации. При оценке поправок к координатам потребителя (Δx , Δy , Δz) в системе координат ITRF, в которой служба IGS рассчитывает высокоточные эфемериды, можно использовать следующие формулы:

$$\begin{aligned}\Delta x &= +y\delta UT1 + z\delta Yp; \\ \Delta y &= -x\delta UT1 - z\delta Xp; \\ \Delta z &= -x\delta Yp + y\delta Xp,\end{aligned}\tag{13}$$

где x, y, z — предварительные значения координат потребителя; $\delta Xp, \delta Yp, \delta UT1$ — суточные поправки к значениям параметров вращения Земли, которые рассчитываются Государственной службой времени, частоты и определения параметров вращения Земли.

Экспериментальное исследование алгоритма высокоточного местоопределения. Для проверки алгоритма была проведена серия экспериментов по определению координат двух станций сбора измерений из состава СДКМ, разрабатываемой ОАО “Российские космические системы” по заказу Федерального космического агентства. Первая станция располагалась в Москве на территории ОАО “Российские космические системы” (условное обозначение RSS), вторая — в г. Петропавловск-Камчатский в пункте геодезической службы РАН (условное обозначение КМЧН). Отличительной особенностью станции RSS является наличие водородного генератора, который формирует опорную частоту 10 МГц для навигационного приемника. В приемном устройстве КМЧН использует внутренний кварцевый генератор.

При расчетах использовалась эфемеридно-временная информация по НКА ГЛОНАСС и GPS, полученная в результате апостериорной обработки первичных измерений глобальной сети из 33 пунктов (рис. 2). Каждый пункт имеет навигационный приемник, способный проводить измерения псевдодальности и фазы псевдодоплеровской частоты по радиосигналам НКА ГЛОНАСС и GPS в диапазонах L1 и L2. Для эксперимента использовались измерения, полученные 1 февраля 2010 г., длительность интервала накопления измерений составляла 24 ч, при обработке использовались измерения с периодичностью 300 с.

Обработка измерений из пунктов RSS и КМЧН проводилась в трех режимах навигационных определений по радиосигналам НКА: ГЛОНАСС, GPS и ГЛОНАСС + GPS.

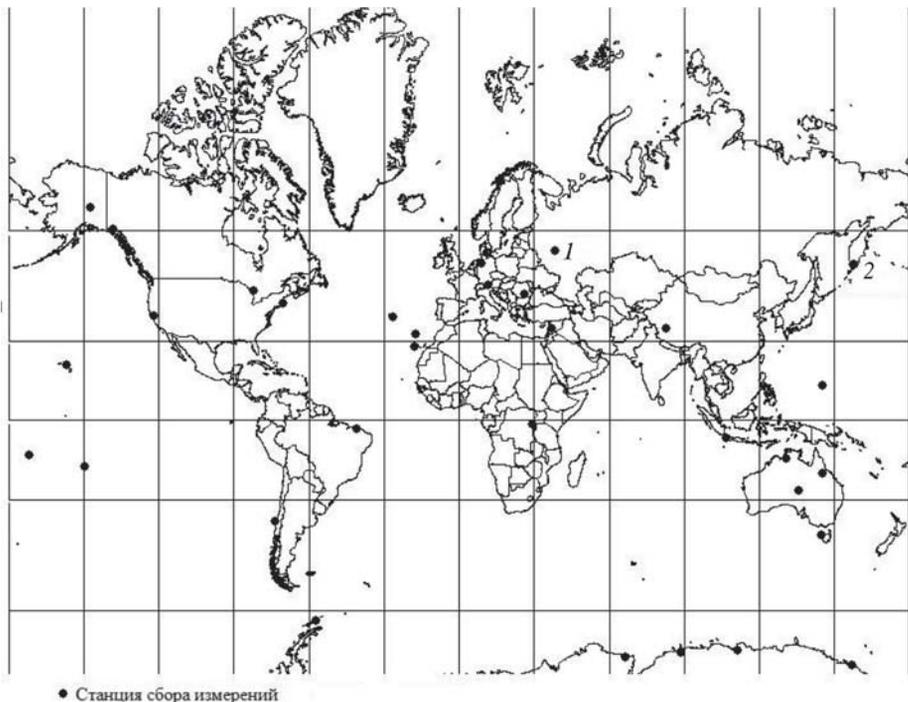


Рис. 2. Сеть станций сбора измерений, используемая для уточнения эфемеридно-временной информации:
 1 – пункт RSS; 2 – пункт KMCH

При обработке использовались измерения 17 НКА ГЛОНАСС и 29 НКА GPS. В табл. 2 приведены результаты высокоточной оценки координат пунктов в различных режимах, которые показывают, что использование длительных интервалов наблюдения позволяет получать оценки координат потребителя с погрешностью (СКО) на уровне 1 см; при этом точность навигационных определений не зависит от используемого созвездия НКА.

Таблица 2

Результаты оценки координат пунктов

Пункт	Режим	Разность между априорными и полученными значениями координат, м			Среднеквадратическое отклонение, м		
		X	Y	Z	D_X	D_Y	D_Z
RSS	ГЛОНАСС	-0,310	0,060	0,062	0,011	0,014	0,018
	GPS	-0,317	0,072	0,065	0,012	0,009	0,022
	ГЛОНАСС + GPS	-0,323	0,074	0,062	0,010	0,013	0,021
KMCH	ГЛОНАСС	-0,333	-0,337	-0,112	0,012	0,010	0,016
	GPS	-0,330	-0,347	-0,120	0,011	0,009	0,014
	ГЛОНАСС + GPS	-0,331	-0,343	-0,120	0,011	0,009	0,014

На рис. 3 приведены результаты оценки значений межканальных задержек $\delta_{\text{ап}}$, которые практически подтверждают неидентичность характеристик группового времени запаздывания навигационных приемников, которая может достигать 2 м (~ 7 нс), а разность задержек на различных литерях может составлять 6 м (~ 20 нс) и более. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета данного параметра при решении задач высокоточного местоопределения.

На рис. 4 приведена зависимость девиации Аллана от времени, описываемая нестабильностью шкалы времени навигационных приемников на пунктах RSS и КМЧН, которая определяется нестабиль-

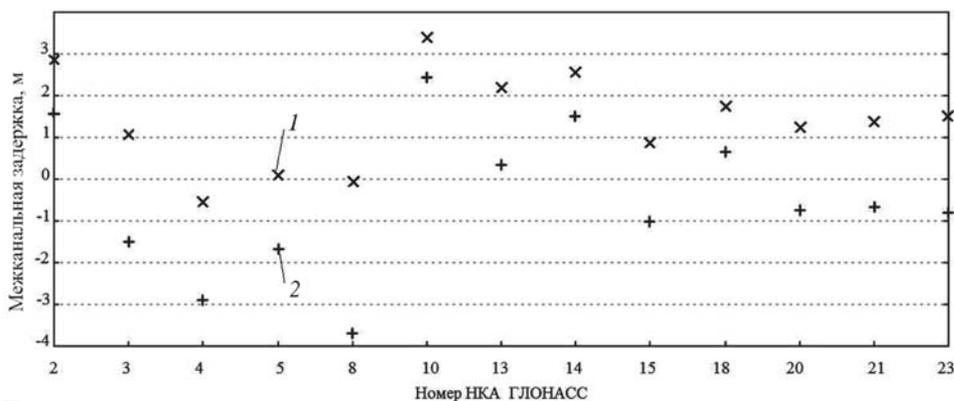


Рис. 3. Зависимость межканальной задержки радиосигналов НКА ГЛОНАСС в приемных устройствах станций сбора измерений КМЧН (1) и RSS (2)

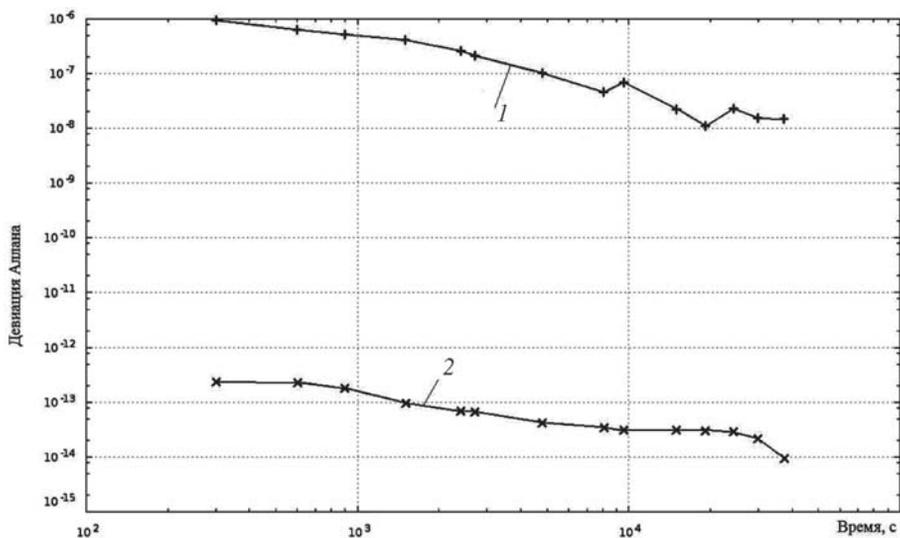


Рис. 4. Зависимость значений девиации Аллана от времени для станций сбора измерений КМЧН (1) и RSS (2)

ностью опорного генератора. Различие в 6 порядков ожидаемо и объясняется использованием в пункте RSS водородного стандарта частоты.

Выводы. Определить с высокой точностью координаты потребителей в абсолютном режиме можно за счет использования высокоточной эфемеридно-временной информации в двухчастотной навигационной аппаратуре потребителя с учетом влияния дополнительных факторов. Точность навигационных определений не зависит от используемой навигационной системы.

В заключение следует отметить, что полученные результаты позволяют выполнять дальнейшие исследования по разработке алгоритмов высокоточного местоопределения с использованием уточненной эфемеридно-временной информации в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaplan E. D. Understanding GPS: Principles and applications. Second edition. – Artech house, 2006. – 703 с.
2. Повалев А. А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. – М.: Радиотехника, 2008. – 324 с.
3. Xu G. GPS. Theory, algorithms and applications. Second edition. – Springer, 2007. – 340 с.
4. International GNSS service strategic plan 2008-2012. IGS Central Bureau, eds. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 2008.
5. Kouba J., Heroux P. GPS precise point positioning using IGS orbit products // Physics and Chemistry of the Earth Part A. – Vol. 26, iss. 6-8. – P. 573–578.
6. Mervant L., Lukes Z., Rocken C., Iwabuchi T. Precise point positioning with ambiguity resolution in real-time // Proc. of ION GNSS 21 th international technical meeting of the satellite division, 16–19 september 2008. – Vol. 397. – 405 p.
7. Wu J. T., Wu S. C., Hajj G. A., Bertiger W. I. and Lichten S. M. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase // Manuscripta Geodaetica, 18 (2). – P. 91–98.
8. McCarthy D. D., Petit G. IERS Conventions 2003 (Technical Note 32), Frankfurt am Main, 2004.

Статья поступила в редакцию 14.04.2010

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”.

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 Russian Space Systems joint-stock company.