

УДК 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.3.3.14

Калибровка измерений псевдодальностей ГЛОНАСС совмещенного GPS/ГЛОНАСС-приемника для работы с поправками СДКМ

Ю. В. Исаев, *yury@isaev.moscow*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Н. Подкорытов, *к.т.н., thepompous@gmail.com*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Межлитерные задержки сигналов ГЛОНАСС в навигационной аппаратуре потребителя существенно снижают точность местоопределения. В статье описан алгоритм вычисления и применения кодовых калибровочных поправок ГЛОНАСС в режиме реального времени для потребителей, использующих совмещенный GPS/ГЛОНАСС-приемник и работающих с поправками Системы дифференциальной коррекции и мониторинга. Предложено оценивать межлитерные задержки ГЛОНАСС в комбинации с постоянным смещением, равным разности расхождений шкалы времени приемника относительно шкал времени ГЛОНАСС и GPS (относительные межлитерные задержки). Косвенная проверка корректности предложенного алгоритма осуществлялась путем проверки соответствия оцененных относительных межлитерных задержек для спутников ГЛОНАСС с одинаковыми литерами, а также путем сравнения оцененных задержек для всех спутников GPS между собой. Приведены результаты местоопределения потребителя поправок Системы дифференциальной коррекции и мониторинга с учетом описанного алгоритма калибровки. Продемонстрировано существенное повышение точности местоопределения потребителя за счет предложенного алгоритма. Также описан модифицированный алгоритм сглаживания кодовых измерений, позволяющий снизить влияние кодовых шумов и эффектов многолучевости на точность местоопределения потребителя Системы дифференциальной коррекции и мониторинга.

Ключевые слова: СДКМ, ГЛОНАСС, аппаратурные смещения, межлитерные задержки, калибровка

Calibration of GLONASS Pseudorange Measurements from Combined GPS/GLONASS Receiver for SDCM User

Yu. V. Isaev, *yury@isaev.moscow*

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

A. N. Podkorytov, *Cand. Sci. (Engineering), thepompous@gmail.com*

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

Moscow Aviation Institute (national research university), Moscow, Russian Federation

Abstract. Inter-channel biases of GLONASS receivers considerably reduce the accuracy of user positioning in GNSS. The paper describes the algorithm of computing and applying GLONASS calibration corrections for the combined GPS/GLONASS receiver in case of the user of the System for Differential Corrections and Monitoring. It is proposed to estimate GLONASS inter-channel biases as linear combination with constant offset that equals the difference of GPS and GLONASS receiver clocks (relative to inter-channel biases). Indirect check for the algorithm was done: estimated relative inter-channel biases for GLONASS satellites with identical frequency channel numbers were compared as well as estimated biases for GPS satellites were compared against each other. Positioning results for the user of the System for Differential Corrections and Monitoring are provided and significant increase of positioning accuracy is shown for the case of applying proposed calibration algorithm. In addition, modified algorithm for carrier-smoothing of code pseudoranges for the user of the System for Differential Corrections and Monitoring is described. It allows one to reduce influence of code measurements noise and multipath effects on positioning accuracy.

Keywords: GPS, GLONASS, SBAS, ICB, inter-channel biases, equipment delay, SDCM

Введение

Система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) является функциональным дополнением ГНСС ГЛОНАСС и предназначена для повышения точности и обеспечения целостности определения местоположения морских, воздушных, сухопутных и космических потребителей навигационных радиосигналов открытого доступа ГЛОНАСС и GPS [1]. Основная функция системы — обеспечение судов гражданской авиации возможностью захода на посадку согласно требованиям Международной организации гражданской авиации ИКАО (англ. International Civil Aviation Organization, ICAO). СДКМ является широкозонной системой дифференциальной коррекции (англ. Satellite based augmentation system, SBAS).

Корректирующая информация СДКМ включает сетку вертикальных ионосферных задержек, информацию о целостности и поправки к местоположению и показаниям часов навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС и GPS, вычисленным по широкоэвemerидным эфемеридам. В отличие от системы GPS, в ГЛОНАСС используется частотное разделение сигналов, поэтому аппаратные задержки (смещения) сигналов от разных НКА в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) имеют существенное различие. Это заметно ухудшает точность местоопределения, в том числе потребителей СДКМ. Для исключения влияния различия аппаратных задержек на точность местоопределения потребителям СДКМ с совмещенным GPS/ГЛОНАСС-приемником предлагается использовать описанный далее алгоритм калибровки измерений псевдодальностей, сформированных по сигналам ГЛОНАСС.

Обзор литературы

Вопрос аппаратных задержек ГЛОНАСС широко рассмотрен в литературе [2–8]. В ГНСС известны два вида аппаратных задержек в НАП, которые зависят от частоты принимаемого сигнала: межчастотные задержки (англ. Inter-frequency biases, IFB) и межлитерные задержки (англ. Inter-channel biases, ICB). Межлитерные задержки вызваны частотным разделением сигналов в ГЛОНАСС,

они существенно влияют на точность автономного местоопределения, а также на точность и сходимость высокоточного местоопределения (англ. Precise point positioning, PPP) [2]. Аппаратурные задержки в измерениях псевдодальностей называются кодовыми, а аппаратурные задержки в измерениях псевдофаз — фазовыми межлитерными задержками [3].

В [3, 4, 7] показано, что при калибровке для фазовых межлитерных задержек ГЛОНАСС с достаточно высокой точностью может использоваться линейная модель. Для кодовых межлитерных задержек явной зависимости от частоты не выявлено, их величины значительно больше фазовых, они стабильны во времени и могут достигать нескольких метров [4].

В [2] демонстрируется, что кодовые межлитерные задержки ГЛОНАСС существенно зависят от версии программного обеспечения (прошивки) приемника, а также от типа используемой антенны. Для одинаковых приемников с одними и теми же прошивкой и антеннами кодовые межлитерные задержки ГЛОНАСС практически совпадают.

В [5] предложена методика калибровки аппаратных задержек НАП с использованием имитатора сигналов GPS и ГЛОНАСС в диапазоне L1 и L2, а также задержек в аппаратуре НКА, но результаты апробации предложенной методики отсутствуют.

В [6] описана многоступенчатая схема калибровки НАП, которая использует эталонную беззапросную измерительную систему, регулярно калибруемую с применением имитатора. Поскольку используется эталонный измеритель, то вычисленные по данной схеме аппаратурные межлитерные задержки оказываются зависимыми не только от используемой при калибровке апостериорной эфемеридно-временной информации (ЭВИ), но и от аппаратурных задержек эталонного измерителя, которые могут быть недоступны автономным навигационным потребителям. К недостаткам предложенной методики можно отнести необходимость обеспечения доступа к измерениям эталонного измерителя и его актуальным калибровочным поправкам. Кроме того, в [6] не приведена используемая математическая модель измерений, что делает возможным различные трактовки физического смысла оцениваемых калибровочных поправок.

Математические модели измерений ГЛОНАСС и GPS

Для измерений GPS (сигнал C/A) и ГЛОНАСС (СТ-сигнал) в диапазоне частот L1 используются следующие математические модели:

$$\rho_{L1}^{j,GPS} = R_{L1}^j + T^j + I^j + c \cdot (dT_{GPS} + \tau_{L1}^{j,GPS}) - c \cdot (dt^{j,GPS} - T_{GD}^j - b_{P1-C/A}^j) + e_{L1}^{j,GPS}, \quad (1)$$

$$\rho_{L1}^{j,GLO} = R_{L1}^j + T^j + I^j + c \cdot (dT_{GLO} + \tau_{L1}^{j,GLO}) - c \cdot (dt^{j,GLO} - b_{СТ-ВТ}^j) + e_{L1}^{j,GLO}, \quad (2)$$

где $\rho_{L1}^{j,GPS}$, $\rho_{L1}^{j,GLO}$ — измерения псевдодальности в диапазоне L1 приемником по сигналу C/A j -го НКА GPS и СТ-сигналу j -го НКА ГЛОНАСС соответственно (м);

$R_{L1}^j = R_{L1}^{j,EPH} + \Delta R^j \cdot \mathbf{1}^j$ — геометрическая дальность между j -м НКА в момент излучения и фазовым центром антенны НАП в диапазоне L1 в момент измерения (м), $R_{L1}^{j,EPH}$ — геометрическая дальность между j -м НКА в момент излучения и фазовым центром антенны НАП в диапазоне L1 в момент измерения, вычисленная по широкополосным эфемерисам (м), ΔR^j — вектор поправок СДКМ к координатам j -го НКА, вычисленным по широкополосным эфемерисам (медленная поправка), $\mathbf{1}^j$ — единичный вектор, направленный из фазового центра антенны НАП в диапазоне L1 на j -й НКА; c — скорость света (м/с); $j = \overline{1, J}$, J — число НКА (может меняться при обработке);

T^j — тропосферная задержка сигнала j -го НКА в приемнике, вычисляется по модели (м);

I^j — ионосферная задержка сигнала j -го НКА в диапазоне L1 в приемнике, вычисляется по корректирующей информации от СДКМ (м);

dT_{GPS} — смещение показаний часов приемника относительно показаний часов системы GPS, оценивается (с);

$dt^{j,GPS} = dt^{j,GPS,EPH} + \Delta t^{j,GPS}$ — связанное с ионосферосвободной шкалой измерений смещение показаний часов j -го НКА относительно показаний часов системы GPS (с);

$dt^{j,GPS,EPH}$ — связанное с ионосферосвободной шкалой измерений смещение показаний часов j -го НКА GPS относительно показаний часов системы

GPS, передающееся в широкополосных эфемерисах (с);

$dt^{j,GLO} = dt^{j,GLO,EPH} + \Delta t^{j,GLO}$ — связанное со шкалой измерений ВТ-сигнала смещение показаний часов j -го НКА ГЛОНАСС относительно показаний часов системы ГЛОНАСС (с);

$dt^{j,GLO,EPH}$ — смещение показаний часов j -го НКА ГЛОНАСС относительно показаний часов системы ГЛОНАСС, передающееся в широкополосных эфемерисах (с);

$\Delta t^{j,GPS}$, $\Delta t^{j,GLO}$ — корректирующие поправки СДКМ к смещениям $dt^{j,GPS,EPH}$, $dt^{j,GLO,EPH}$ (быстрые поправки СДКМ) (с);

$T_{GD}^j = \frac{1}{1-\gamma} b_{P2-P1}^j$ — передаваемый в эфемерисах GPS параметр, связывающий ионосферосвободную шкалу измерений GPS со шкалой измерений сигнала L1 $P(Y)$ GPS (с);

$$\gamma = (f_1^j)^2 / (f_2^j)^2;$$

b_{P2-P1}^j — смещение шкалы времени сигнала L2 $P(Y)$ относительно шкалы времени сигнала L1 $P(Y)$ для j -го НКА GPS (с);

$b_{P1-C/A}^j$ — смещение шкалы времени сигнала L1 $P(Y)$ относительно шкалы времени сигнала L1 C/A для j -го НКА GPS (с) (указано в (1) отдельным параметром для общности модели, в действительности входит в корректирующую поправку СДКМ $\Delta t^{j,GPS}$);

$e_{L1}^{j,GPS}$ и $e_{L1}^{j,GLO}$ — шумы измерений псевдодальностей $\rho_{L1}^{j,GPS}$ и $\rho_{L1}^{j,GLO}$ соответственно (м);

dT_{GLO} — смещение показаний часов приемника относительно показаний часов системы ГЛОНАСС, оценивается (с);

$b_{СТ-ВТ}^j$ — смещение шкалы времени СТ-сигнала относительно шкалы времени ВТ-сигнала для j -го НКА ГЛОНАСС (с) (указано в (2) отдельным параметром для общности модели, в действительности входит в корректирующую поправку СДКМ $\Delta t^{j,GLO}$);

$\tau_{L1}^{j,GPS}$ — аппаратная задержка сигнала L1 C/A j -го НКА GPS в НАП (с). В случае GPS НКА в диапазоне L1 излучают на одних и тех же несущих частотах, поэтому задержки $\tau_{L1}^{j,GPS}$ практически одинаковы для разных j . Как следствие, при решении навигационной задачи эти задержки не ухудшают точность местопределения и оцениваются в виде линейной комбинации со смещением

показаний часов приемника dT_{GPS} как параметр $dT'_{\text{GPS}} = dT_{\text{GPS}} + \tau_{\text{L1}}^{j,\text{GPS}}$. Поэтому в (1) индекс j в задержках $\tau_{\text{L1}}^{j,\text{GPS}}$ может быть опущен, он оставлен там для общности модели;

$\tau_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ — аппаратная (межлитерная) задержка СТ-сигнала j -го НКА ГЛОНАСС в приемнике (с).

В случае ГЛОНАСС НКА излучают на разных частотах, поэтому межлитерные задержки $\tau_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ имеют существенно разные значения для разных j . Это различие при решении навигационной задачи не только искажает оценку смещения показаний часов приемника ΔT_{GLO} , но и значительно ухудшает точность местоопределения в ГЛОНАСС. Оценка и учет при обработке в НАП межлитерных задержек с целью снижения их влияния на точность местоопределения потребителя можно назвать калибровкой НАП.

В моделях измерений (1), (2) не приведены систематические смещения, связанные с приливными и гравитационными эффектами, а также со смещениями фазовых центров антенн НКА и НАП. Указанные смещения также следует учитывать в обработке.

Алгоритм вычисления калибровочных поправок

Целью калибровки являются оценка и учет в НАП межлитерных задержек $\tau_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ из модели (2), но непосредственная оценка их абсолютных значений невозможна. Значения межлитерных задержек предлагается оценивать в виде линейной комбинации с медленно меняющимся, но одинаковым для всех НКА ГЛОНАСС смещением (такие оценки можно назвать относительными межлитерными задержками). Данное смещение в результате описанного варианта фильтрации может подддерживаться практически постоянным в течение суток. Калибровка сводится к вычитанию из измерений псевдодальностей ГЛОНАСС таких относительных межлитерных задержек. Это приводит к тому, что в модели (2) для измерений псевдодальностей ГЛОНАСС возникает одинаковое для всех НКА неопределенное смещение, которое не влияет на точность местоопределения и оценива-

ется в виде линейной комбинации со смещением dT_{GLO} по аналогии с системой GPS.

Для формирования оценок относительных межлитерных задержек вначале формируются значения невязок $\Delta \rho_{m,\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ ГЛОНАСС

$$\Delta \rho_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}} = \rho_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}} - \widehat{R}_{\text{L1}}^j - \widehat{T}^j - \widehat{I}^j - c \cdot d\widehat{T}'_{\text{GPS}} + c \cdot dt^{j,\text{GLO}}, \quad (3)$$

где $\widehat{R}_{\text{L1}}^j$, \widehat{T}^j , \widehat{I}^j , $d\widehat{T}'_{\text{GPS}}$ — полученные в НАП оценки соответствующих величин, $dt^{j,\text{GLO}}$ — известное смещение (требования к точности оценки $\widehat{R}_{\text{L1}}^j$ и особенности вычисления оценки $d\widehat{T}'_{\text{GPS}}$ поясняются в следующем разделе). Из (2) для невязок $\Delta \rho_{m,\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ (3) возникает их следующая математическая модель:

$$\Delta \rho_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}} = c \cdot (dT_{\text{GLO}} - d\widehat{T}'_{\text{GPS}} + \tau_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}) + \varepsilon_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}, \quad (4)$$

где дисперсия $\sigma_{\Delta \rho}^2$ ошибки $\varepsilon_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ вычисляется как сумма дисперсий входящих в (3) слагаемых.

Как видно из (4), невязка $\Delta \rho_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ содержит в себе зашумленную и выраженную в метрах сумму межлитерной задержки $\tau_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ и разности $(dT_{\text{GLO}} - d\widehat{T}'_{\text{GPS}})$. Для уменьшения шумовых ошибок невязки $\Delta \rho_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ (4) следует подвергать калмановской фильтрации [9] отдельно для каждого НКА ГЛОНАСС с малым значением шумов прогноза измерений (например, 10^{-9} м) на интервале времени не менее суток. Поскольку $\Delta \rho_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ является скаляром, информационная матрица и матрица прогноза равны 1, а матрицы шумов прогноза и шумов измерений также являются скалярами. Смещение $d\widehat{T}'_{\text{GPS}}$ в приемнике оценивается с учетом поправок СДКМ, которые вычисляются с опорой на установленный во ВНИИФТРИ высокостабильный атомный стандарт частоты. Несмотря на то, что смещающая разность $(dT_{\text{GLO}} - d\widehat{T}'_{\text{GPS}})$ — медленно меняющаяся величина, на суточном интервале из-за особенностей работы СДКМ эта разность может заметно изменяться. Для того, чтобы отфильтрованные на длительном интервале времени невязки $\Delta \rho_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$ (4) могли рассматриваться как смещенные на постоянную величину оценки межлитерных задержек $\tau_{\text{L1}}^{j,\text{GLO}}$, предлагается следующий алгоритм фильтрации.

Начиная со 2-й по порядку эпохи (момента обработки) измерений для каждого НКА ГЛОНАСС

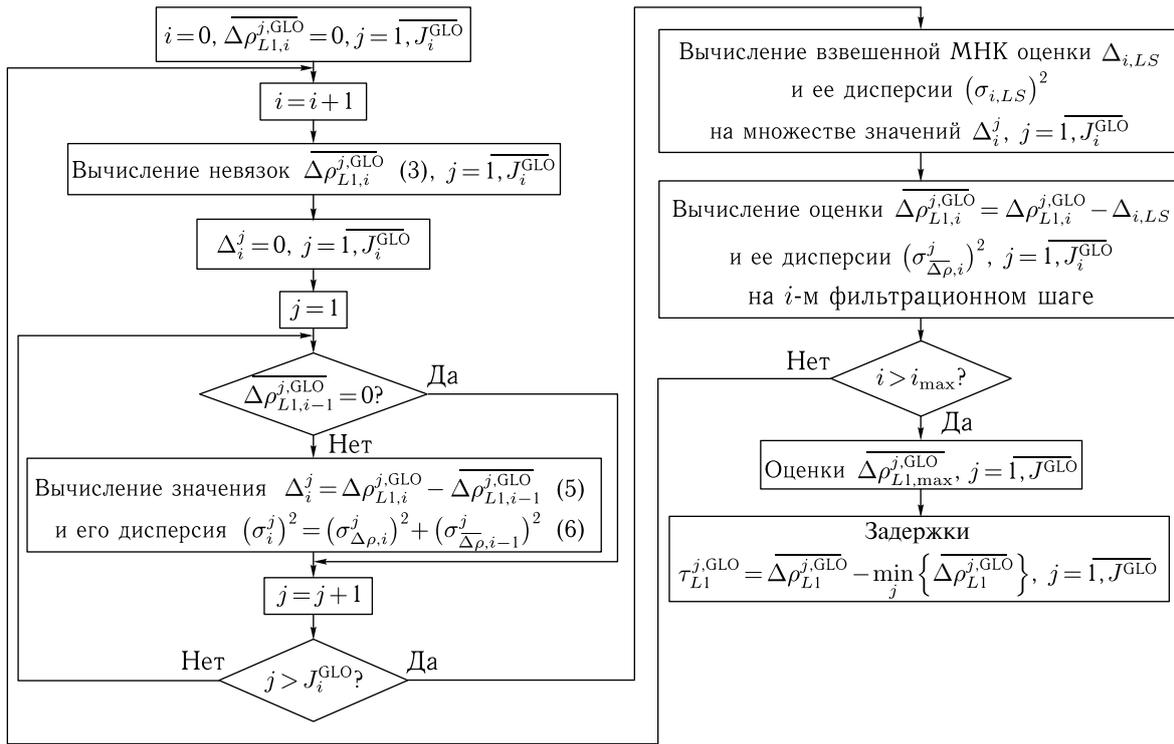


Рис. 1. Блок-схема используемого алгоритма

вычисляется отличие оценки невязки $\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO}$ (3) на текущей i -й эпохе обработки от отфильтрованного на предыдущую $(i-1)$ -ю эпоху значения:

$$\Delta_i^j = \Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO} - \overline{\Delta\rho_{L1,i-1}^{j,GLO}} \quad (5)$$

и его дисперсия

$$(\sigma_i^j)^2 = (\sigma_{\Delta\rho,i}^j)^2 + (\sigma_{\Delta\rho,i-1}^j)^2, \quad (6)$$

где значение $\overline{\Delta\rho_{L1,i-1}^{j,GLO}}$ является результатом фильтрации на интервале времени от 0 до эпохи $(i-1)$ невязки (3), смещенной на величину оценки взвешенных наименьших квадратов $\Delta_{i-1,LS}$, которая была вычислена на $(i-1)$ -ю эпоху измерений с использованием множества оценок (5) для эпохи $(i-1)$ и дисперсий шумов измерений (6) для эпохи $(i-1)$, $(\sigma_{\Delta\rho,i-1}^j)^2$ — оцененная дисперсия отфильтрованного значения $\overline{\Delta\rho_{L1,i-1}^{j,GLO}}$.

На каждую текущую i -ю эпоху измерений осуществляется оценивание в фильтре Калмана величины $(\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO} - \Delta_{i,LS})$ с дисперсией шумов измерений $((\sigma_{\Delta\rho,i}^j)^2 + (\sigma_{i,LS})^2)$ и значением шумов

прогноза 10^{-9} м, где $(\sigma_{i,LS})^2$ — дисперсия оценки $\Delta_{i,LS}$. Полученное в результате такой фильтрации значение $\overline{\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO}}$ является результатом фильтрации на интервале времени от первой до текущей эпохи i величины $(\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO} - \Delta_{i,LS})$.

Относительные калибровочные значения межлитерных задержек $\tau_{L1}^{j,GLO}$ могут быть получены следующим образом:

$$\tau_{L1}^{j,GLO} = \overline{\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO}} - \min_j \{ \overline{\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO}} \}, \quad (7)$$

где $\overline{\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO}}$ обозначает результат фильтрации смещенной невязки $\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO}$ (3) по описанному выше алгоритму на длительном интервале, $\min_j \{ \overline{\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO}} \}$ — минимальное значение из числа отфильтрованных смещенных невязок $\Delta\rho_{L1,i}^{j,GLO}$ (3) для всех НКА ГЛОНАСС. Блок-схема вышеописанного алгоритма представлена на рис. 1, где i_{\max} — пороговое значение для количества эпох (например, на сутках), после которого ошибки относительных межлитерных задержек $\tau_{L1}^{j,GLO}$ становятся достаточно малыми.

Предполагается, что потребитель СДКМ-поправок оценивает относительные межлитерные задержки ГЛОНАСС для данной НАП на суточном интервале времени, после чего оцененные межлитерные задержки применяются в данной НАП как известные значения в режиме реального времени при работе с СДКМ-поправками. Сама калибровка осуществляется путем вычитания вычисленных относительных межлитерных задержек (7) из измерений псевдодальностей (2). Необходимо раздельное вычисление относительных межлитерных задержек НАП для ВТ- и СТ-сигналов ГЛОНАСС, т. к. их различия могут достигать уровня нескольких метров [6].

Условия применения предложенного алгоритма калибровки

Необходимо выполнение следующих условий для применения описанного алгоритма.

1. Наличие в обработке как минимум одного НКА GPS для возможности получения оценки $d\hat{T}'_{GPS}$ при известных высокоточных координатах НАП либо не менее четырех НКА GPS при неизвестных высокоточных координатах НАП. Возможно два варианта калибровки совмещенной GPS/ГЛОНАСС НАП потребителем СДКМ по приведенному алгоритму. В первом варианте высокоточные координаты НАП считаются известными и неизменными, и поэтому оценки геометрических дальностей R_{L1}^j в (3) вычисляются относительно этих известных координат. Оценка смещения $d\hat{T}'_{GPS}$ может быть получена усреднением остаточных невязок измерений (1) после учета всех известных величин (в предельном случае наличия одного НКА GPS оценка $d\hat{T}'_{GPS}$ равна его остаточной невязке). Во втором варианте НАП может находиться в покое либо в движении, а геометрические дальности R_{L1}^j в (3) при калибровке вычисляются относительно оцененных с корректирующими поправками СДКМ координат НАП. При этом необходимо не менее четырех НКА GPS для решения навигационной задачи и вычисления оценки $d\hat{T}'_{GPS}$ независимо от ГЛОНАСС. Однако наиболее логично в этом случае существенно (например, на $(3 \text{ м})^2$) увеличить дисперсию шумов изме-

рений ГЛОНАСС и использовать их в обработке совместно с измерениями GPS так, чтобы основной вклад в точность предварительного местоопределения, осуществляемого в рамках калибровки, вносился измерениями GPS.

2. Калибровочные значения межлитерных задержек могут применяться в НАП только в том случае, если используемая им ЭВИ (например, широкоэвещательная ЭВИ, либо широкоэвещательная ЭВИ в комбинации с поправками СДКМ, либо высокоточная ЭВИ в случае работы в апостериорном режиме) соответствует той ЭВИ, которая использовалась при расчете указанных поправок. Только в этом случае выражение (4) для фильтруемых невязок справедливо. Это означает, что межлитерные задержки, рассчитанные по приведенному алгоритму с использованием СДКМ-поправок, некорректно применять при работе НАП в автономном режиме (т. е. без поправок СДКМ). Аналогично межлитерные задержки, вычисленные в апостериорном режиме при использовании высокоточной ЭВИ, некорректно в дальнейшем применять при использовании СДКМ-поправок в режиме реального времени. При расчете межлитерных задержек в апостериорном режиме рекомендуется использовать высокоточную ЭВИ для НКА GPS и ГЛОНАСС, вычисленную при использовании одной и той же опорной станции (предпочтительна ЭВИ для GPS и ГЛОНАСС от одного поставщика).

Известен подход, при котором оценка высокоточной ЭВИ ГЛОНАСС осуществляется для разнородной сети станций с приемниками разных производителей. Точность местоопределения НАП (без калибровки межлитерных задержек) при применении данной ЭВИ будет тем выше, чем ближе реальные межлитерные задержки данной НАП к задержкам некой средней виртуальной НАП, межлитерные задержки которой усреднены по всем НАП используемой сети.

Сглаживание измерений псевдодальностей

В системах SBAS используется сглаживание измерений псевдодальностей псевдофазовыми измерениями [10, 11]. В известных алгорит-

мах сглаживания измерений [12, 13] при работе в одночастотном режиме длительность окна сглаживания ограничивается вследствие непрерывного нарастания различия в ионосферных задержках, присутствующих в измерениях псевдодальностей и псевдофаз (англ. Code-carrier divergence effect). Это приводит к значительному остаточному влиянию шумов псевдодальности на сглаженные по этим алгоритмам измерения и, как следствие, ухудшению точности местоопределения НАП. При местоопределении одночастотного потребителя с поправками СДКМ предлагается использовать следующий модифицированный алгоритм сглаживания измерений псевдодальностей ГЛОНАСС и GPS. За счет использования информации об ионосферных задержках из поправок СДКМ этот алгоритм компенсирует воздействие меняющихся ионосферных задержек и позволяет увеличить интервал сглаживания для снижения влияния кодовых шумов и эффекта многолучевости на результат сглаживания.

1. Вычисляется следующая смещенная оценка неоднозначности псевдофазовых измерений A_{L1}^j и ее дисперсия σ_A^2 :

$$\begin{aligned} A_{L1}^j &= 2 \cdot \hat{I}^j - (\rho_{L1}^j - \varphi_{L1}^j) = N_{L1}^j + B_{L1}^{j,\rho\varphi}, \\ \sigma_A^2 &= 2^2 \cdot \sigma_I^2 + \sigma_\rho^2 + \sigma_\varphi^2, \end{aligned} \quad (8)$$

где \hat{I}^j — ионосферная задержка сигнала j -го НКА, вычисленная НАП с использованием поправок СДКМ с данными о сетке вертикальных ионосферных задержек (м), N_{L1}^j — целочисленная неоднозначность измерения псевдофазы φ_{L1}^j j -го НКА (м), $B_{L1}^{j,\rho\varphi}$ — сумма аппаратурных задержек псевдодальности ρ_{L1}^j и псевдофазы φ_{L1}^j (м), σ_I^2 — дисперсия ионосферной задержки \hat{I}^j (м²), σ_ρ^2 и σ_φ^2 — дисперсии измерений псевдодальности ρ_{L1}^j и псевдофазы φ_{L1}^j соответственно (м²).

2. Величину A_{L1}^j (8) для каждого НКА по отдельности следует фильтровать в фильтре Калмана со значением шумов прогноза измерений порядка 10^{-5} (м) на всем интервале видимости НКА. Сглаженное значение одночастотной ионосферосвободной псевдодальности $\overline{\rho_{L1}^j}$ и ее дисперсии σ_ρ^2 вычисляется как

$$\overline{\rho_{L1}^j} = \varphi_{L1}^j + \hat{I}^j - \overline{A_{L1}^j}, \quad \sigma_\rho^2 = \sigma_\varphi^2 + \sigma_I^2 + \sigma_A^2, \quad (9)$$

где $\overline{A_{L1}^j}$ — отфильтрованное значение A_{L1}^j (м), σ_A^2 — дисперсия $\overline{A_{L1}^j}$ (м²). В (9) компенсируются аппаратурные задержки измерений псевдофазы и остаются только сглаженные кодовые аппаратурные задержки.

Результаты определения и применения калибровочных поправок

На рис. 2 приведена гистограмма выраженных в метрах относительных межлитерных задержек $\tau_{L1}^{j,GLO}$ (7), оцененных совмещенной GPS/ГЛОНАСС НАП СДКМ в п.г.т. Менделеево по предложенному алгоритму. Оценка производилась на суточном интервале; координаты НАП считались известными с точностью 1–2 см; общее систематическое смещение устранено относительно НКА с номером точки 6; для НКА ГЛОНАСС с номером точки 12 поправки СДКМ не передавались.

Можно выделить три способа проверки предложенного алгоритма калибровки.

1. НКА GPS в диапазоне L1 излучают на одних и тех же несущих частотах, поэтому задержки $\tau_{L1}^{j,GPS}$ в модели (1) одинаковы для разных НКА j . Таким образом, калибровочные значения относительных межлитерных задержек $\tau_{L1}^{j,GPS}$, вычисленные по описанному алгоритму для НКА GPS по аналогии с $\tau_{L1}^{j,GLO}$ (7), должны давать одинаковые значения. На рис. 3 приведена гистограмма выраженных в метрах относительных межлитерных задержек $\tau_{L1}^{j,GPS}$, вычисленных на суточном интервале для приемника станции СДКМ в г. Менделеево.

Из рис. 3 видно, что указанные задержки распределены относительно нуля с отклонениями, не превышающими 0,1–0,13 м. Это с точностью до небольших ошибок обработки подтверждает равенство в НАП межлитерных задержек для НКА GPS и является косвенной проверкой справедливости исходных утверждений, лежащих в основе предложенного алгоритма вычисления калибровочных поправок.

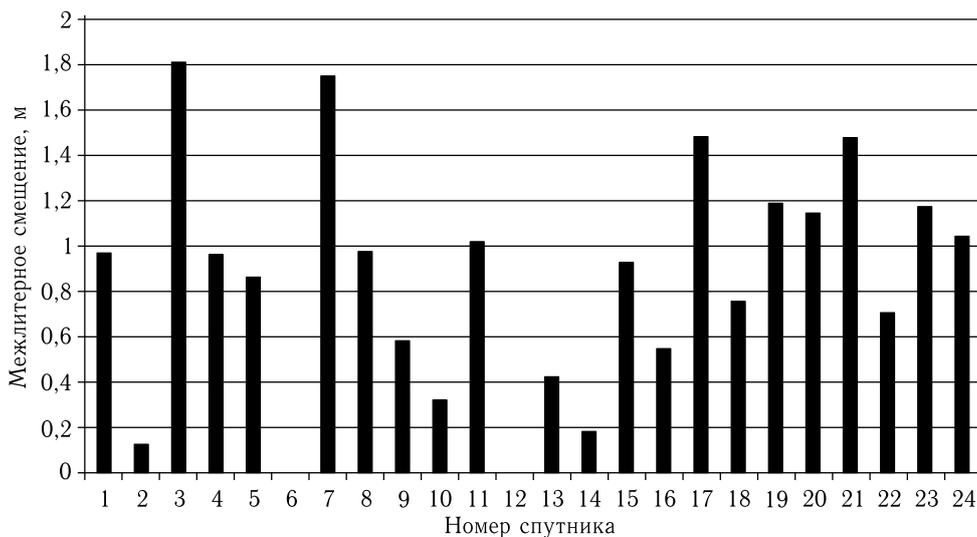


Рис. 2. Относительные межлитерные задержки ГЛОНАСС, оцененные потребителем для станции СДКМ в п.г.т. Менделеево на суточном интервале, м

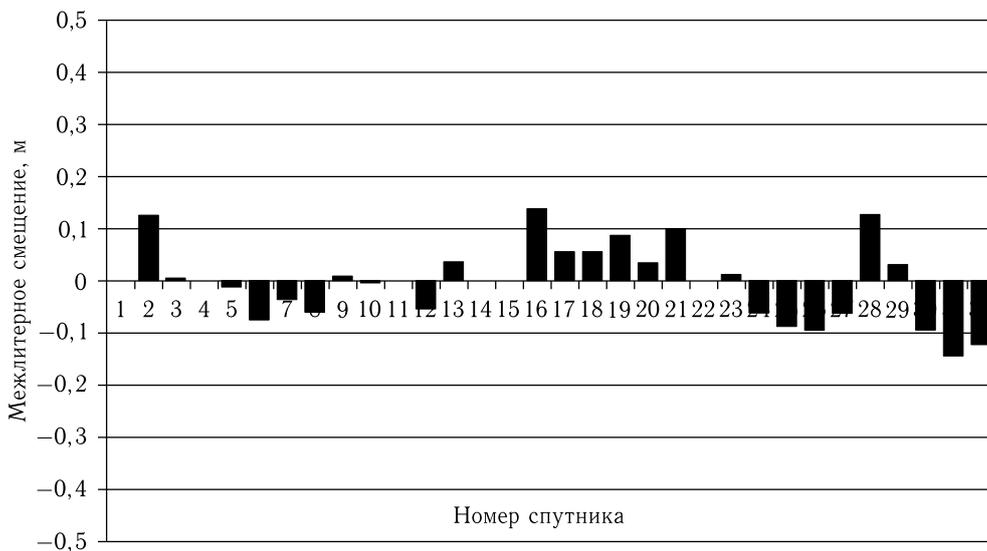


Рис. 3. Относительные межлитерные задержки GPS, оцененные в НАП для станции СДКМ в п.г.т. Менделеево на суточном интервале, м

2. В ГЛОНАСС используются так называемые НКА-антиподы с одинаковыми литерами (однолитерные КА), излучающие сигналы на одинаковых частотах. Косвенным признаком правильно оцененных относительных межлитерных задержек является их равенство для НКА с одинаковыми литерами. На гистограммах рис. 4–6 относительные межлитерные задержки сгруппированы по НКА с одинаковыми литерами. На рис. 4 приведены данные гистограммы, аналогичной рис. 2

для суточного решения по измерениям НАП станции СДКМ в п.г.т. Менделеево.

На рис. 5 приведены аналогичные данные, но для случая оценки относительных межлитерных задержек на сетевой стороне СДКМ.

Отличие процесса оценки на сетевой стороне СДКМ состоит в том, что при этом отсутствует необходимость интерполировать ионосферные данные по данным сетки вертикальных ионосферных задержек (в сетевом решении доступны двухча-

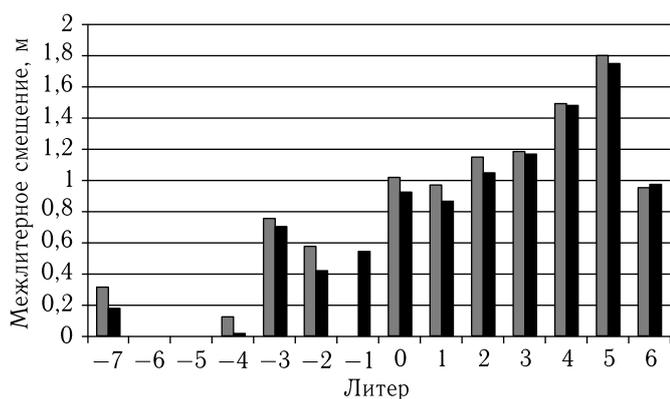


Рис. 4. Относительные межлитерные задержки ГЛОНАСС, оцененные потребителем для станции СДКМ в п.г.т. Менделеево

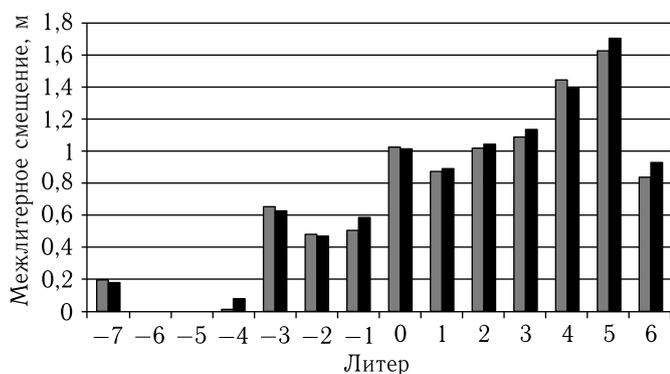


Рис. 5. Относительные межлитерные задержки ГЛОНАСС, оцененные на сетевой стороне СДКМ для станции в п.г.т. Менделеево

стотные измерения), а также в использовании метеодатчиков на станциях для вычисления тропосферной задержки. Кроме того, в процессе оценки относительных калибровочных межлитерных задержек ГЛОНАСС НАП использует корректирующие поправки СДКМ, разрешающая способность которых составляет величину 0,125 м [1]. Это означает, что переданные от сети потребителю указанные поправки могут содержать ошибку округления величиной до 0,0625 м. Указанная ошибка округления приводит к незначительному ухудшению точности оцениваемых относительных межлитерных задержек в НАП по сравнению со случаем оценки указанных задержек на сетевой стороне, где отсутствуют ограничения на разрешающую способность поправок. Этим объясняется

более высокая согласованность оцененных задержек для однолитерных НКА ГЛОНАСС (рис. 4, 5, табл. 1). Отдаленное сходство с линейной зависимости относительных межлитерных задержек от частоты на рис. 4, 5 случайно, по нескольким десяткам приемников линейной зависимости от частоты не выявлено. На рис. 6 приведены данные гистограммы, аналогичной рис. 2 для случая апостериорной оценки относительных межлитерных задержек по высокоточной ЭВИ от Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш [14].

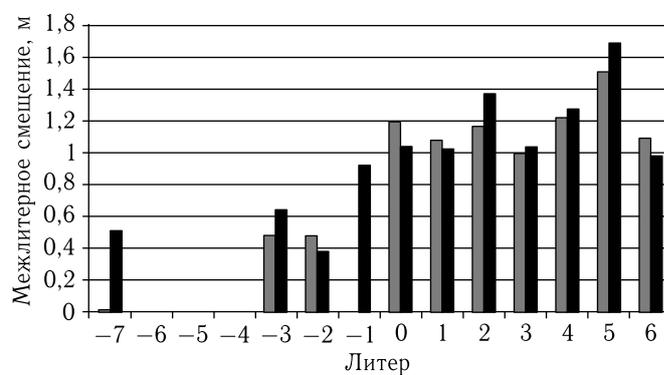


Рис. 6. Относительные межлитерные задержки ГЛОНАСС, оцененные в апостериорной режиме по высокоточной ЭВИ от ИАЦ для станции в п.г.т. Менделеево

При этом использовались финальные (наиболее точные) файлы поправок *.clk и *.sp3 от ИАЦ КВНО, файлы межчастотных и межсигнальных смещений формата *.bsx, финальные ионосферные данные от IGS, недельные измерения RINEX частотой 30 с и файл формата ANTEX для компенсации смещений фазового центра антенн НКА и приемника. Кроме того, был осуществлен переход от ионосферно-свободной шкалы измерений ВТ-сигналов ГЛОНАСС в используемой высокоточной ЭВИ к шкале одночастотных измерений СТ-сигнала ГЛОНАСС. На рис. 6 видны значительные расхождения в оценках относительных межлитерных задержек для НКА с одинаковыми литерами по сравнению с рис. 5.

С целью дополнительной проверки (чтобы исключить возможные ошибки, связанные с переходом к шкале одночастотных измерений СТ-сигнала

Таблица 1. Разницы оцененных относительных межлитерных задержек (абсолютные значения, м)

| Литера НКА ГЛОНАСС | Номера точек НКА ГЛОНАСС | Оценка НАП в режиме реального времени | | | Оценка на сетевой стороне СДКМ в режиме реального времени | | | Оценка в апостериорном режиме при использовании высокоточной ЭВИ от ИАЦ КВНО | | |
|--------------------------|--------------------------------|--|--------|--------|--|--------|--------|---|--------|--------|
| | | «МЕН» | «СП» | «НОВ» | «МЕН» | «СП» | «НОВ» | «МЕН» | «СП» | «НОВ» |
| -7 | 10, 14 | 0,1363 | 0,2345 | 0,0749 | 0,0134 | 0,0277 | 0,0108 | 0,5102 | 0,5184 | 0,5315 |
| -4 | 2, 6 | 0,1236 | 0,0615 | 0,068 | 0,079 | 0,1692 | 0,0259 | — | — | — |
| -3 | 18, 22 | 0,0451 | 0,0396 | 0,038 | 0,0233 | 0,0141 | 0,0751 | 0,1682 | 0,1641 | 0,1329 |
| -2 | 9, 13 | 0,1596 | 0,0394 | 0,185 | 0,0084 | 0,1376 | 0,1874 | 0,0937 | 0,0113 | 0,0077 |
| -1 | 12,16 | — | 0,0207 | 0,027 | 0,0736 | 0,0727 | 0,0549 | — | — | — |
| 0 | 11,15 | 0,0878 | 0,1197 | 0,021 | 0,005 | 0,0631 | 0,0602 | 0,1534 | 0,1843 | 0,2176 |
| 1 | 1, 5 | 0,1033 | 0,0786 | 0,148 | 0,0138 | 0,1215 | 0,1149 | 0,0559 | 0,1364 | 0,1111 |
| 2 | 20, 24 | 0,1049 | 0,2008 | 0,031 | 0,0255 | 0,0363 | 0,0082 | 0,2107 | 0,2245 | 0,2226 |
| 3 | 19, 23 | 0,0171 | 0,1169 | 0,008 | 0,0341 | 0,1434 | 0,0755 | 0,0419 | 0,0451 | 0,0397 |
| 4 | 17, 21 | 0,0062 | 0,0858 | 0,06 | 0,0349 | 0,0442 | 0,0098 | 0,0528 | 0,0738 | 0,0227 |
| 5 | 3, 7 | 0,0586 | 0,1059 | 0,046 | 0,0726 | 0,038 | 0,0021 | 0,1851 | 0,1867 | 0,1747 |
| 6 | 4, 8 | 0,0131 | 0,0964 | 0,18 | 0,087 | 0,0296 | 0,0855 | 0,1082 | 0,0936 | 0,066 |

ГЛОНАСС) по высокоточной ЭВИ от ИАЦ КВНО также были вычислены относительные межлитерные задержки для ионосферосвободной шкалы измерений ВТ-сигналов ГЛОНАСС. Однако расхождение оцененных относительных межлитерных задержек для НКА с одинаковыми литерами также оказалось значительно больше, чем для случая оценки НАП и на сетевой стороне СДКМ (рис. 5). Это говорит о том, что в высокоточной ЭВИ от ИАЦ КВНО (в поправках к показаниям спутниковых часов) имеются неучтенные смещения.

В табл. 1 приведены абсолютные значения разниц оцененных относительных межлитерных задержек в метрах для НКА с одинаковыми литерами для трех описанных вариантов оценки относительных межлитерных задержек НАП в п.г.т. Менделеево («МЕН»), в г. Санкт-Петербурге («СП») и в г. Новосибирске («НОВ»): оценка НАП по приведенному алгоритму, оценка на сетевой стороне СДКМ по приведенному алгоритму, оценка в апостериорном режиме при использовании ЭВИ от ИАЦ.

3. Сравнение точности местоопределения потребителя с использованием оцененных значений относительных межлитерных задержек ГЛОНАСС и без него. На рис. 7 показан график ошибок местоопределения НАП по ГЛОНАСС в плане (график типа «мишень») на суточном интервале для случаев использования («Приемник откалиброван») и неиспользования («Нет калибровки») оцененных НАП по описанному выше алгоритму относительных межлитерных задержек ГЛОНАСС $\tau_{L1}^{j,GLO}$ (7) для станции СДКМ в п.г.т. Менделеево.

В табл. 2 приведены статистические характеристики ошибки местоопределения для приемников трех станций СДКМ, усредненной на суточном интервале («МЕН», «СП», «НОВ»; МО — математическое ожидание, СКО — среднее квадратичное отклонение, ошибка в плане по уровню 2 СКО). Как видно, имеет место значительное повышение точности местоопределения за счет применения калибровки. Из рис. 7 также видно, что связанная с относительными межлитерными задержками ГЛОНАСС ошибка местоопределения НАП

Таблица 2. Статистические характеристики ошибки местоопределения (ошибка в плане по уровню 2 СКО)

| | | «МЕН» | | | «СП» | | | «НОВ» | | |
|-----------------------|-------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | Е | N | U | Е | N | U | Е | N | U |
| Отсутствие калибровки | МО, м | -0,011 | 0,007 | -0,182 | -0,049 | 0,021 | -0,002 | 0,022 | -0,006 | -0,237 |
| | СКО, м | 0,297 | 0,446 | 0,740 | 0,276 | 0,320 | 0,550 | 0,229 | 0,234 | 0,504 |
| | Ошибка в плане, м | 1,072 | | | 0,852 | | | 0,657 | | |
| Приемник откалиброван | МО, м | 0,016 | 0,022 | -0,14 | -0,019 | -0,001 | -0,1 | 0,024 | 0,004 | 0,255 |
| | СКО, м | 0,114 | 0,115 | 0,266 | 0,151 | 0,153 | 0,331 | 0,119 | 0,125 | 0,255 |
| | Ошибка в плане, м | 0,329 | | | 0,431 | | | 0,35 | | |

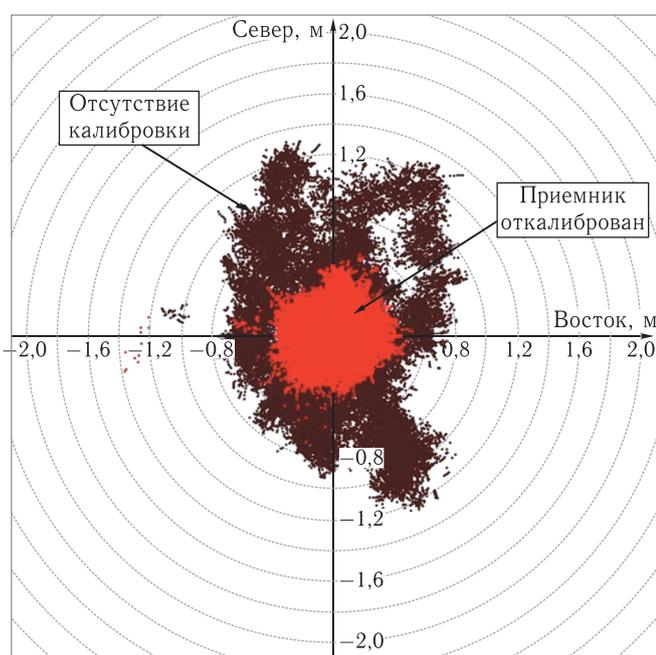


Рис. 7. График ошибок местоопределения НАП в плане на суточном интервале (станция СДКМ в г. Менделеево), м

в течение суток меняется в значительных пределах. Это связано с изменением в течение суток видимого НАП созвездия НКА ГЛОНАСС, по которому усредняется некомпенсированная межлитерная задержка. При местоопределении использовалось усреднение оцененных относительных межлитерных задержек по НКА с одинаковыми литерами.

Малые различия оцененных по приведенному алгоритму относительных межлитерных задержек

для НКА с одинаковыми литерами (рис. 4, 5, табл. 1), а также существенное повышение точности местоопределения за счет применения оцененных относительных межлитерных задержек (рис. 7, табл. 2) подтверждают корректность разработанного алгоритма калибровки НАП для ГЛОНАСС. Приведенные на рис. 2–5, 7 результаты получены при работе НАП, использующей СДКМ-поправки в режиме реального времени. При этом оцененные НАП на суточном интервале относительные межлитерные задержки с целью анализа эффективности калибровки применялись как известные значения через несколько дней после оценки также в режиме реального времени при работе с СДКМ-поправками. При этом исключается возможность автоматической компенсации каких-либо неучтенных при оценке относительных межлитерных задержек смещений при их мгновенном применении в НАП.

Заключение

Кодовые межлитерные задержки ГЛОНАСС существенно снижают точность местоопределения потребителя, использующего СДКМ-поправки, т.к. не могут оцениваться в виде комбинации со смещениями показаний часов приемника по аналогии с GPS.

Предложенный алгоритм позволяет потребителю СДКМ с совмещенным GPS/ГЛОНАСС-приемником, самостоятельно оценивать относительные межлитерные задержки ГЛОНАСС и применять

их в режиме реального времени. Показано, что в результате точность местоопределения НАП, использующей поправки СДКМ, существенно повышается. Основное необходимое условие применения описанного алгоритма — наличие измерений по НКА GPS, что не является серьезным ограничением, т.к. система СДКМ предполагает наличие таковых [1]. Положительный эффект от применения оцененных относительных межлитерных задержек ГЛОНАСС существенно зависит от используемой ЭВИ и формата работы. Таким образом, данные задержки должны применяться в НАП при тех же условиях, в которых они были оценены.

Список литературы

1. Интерфейсный контрольный документ СДКМ, редакция 1, 2012 г.
2. *Shi Chuang, Yi Wenting, Song Weiwei, Lou Yidong, Yao Yibin, Zhang Rui.* GLONASS pseudorange inter-channel biases and their effects on combined GPS/GLONASS precise point positioning // *GPS Solutions*, 2013, vol. 17, P. 439–451.
3. *Wanninger L.* Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers // *J. Geod* 2012, vol. 86 (2). P. 139–148.
4. *Yamanda H., Takasu T., Kubo N., Yasuda A.* Evaluation and calibration of receiver inter-channel biases for RTK-GPS/GLONASS. In: *proceedings of ION GNSS-2010*. Institute of Navigation, Portland, Oregon, 2010. P. 1580–1587.
5. *Вовасов В.Е., Чунин Д.Н.* Устранение смещений взвешенных разностей псевдодальностей, полученных двухчастотным приемником СРНС GPS + ГЛОНАСС // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4, вып. 4. С. 15–23.
6. *Жуков А.Н., Зотов С.М., Тупицын И.Н., Ченнин Д.Ю.* Повышение точности навигационных определений потребителей ГЛОНАСС с использованием калибровочных поправок к измерениям псевдодальности, рассчитанных в системе высокоточного определения эфемерид и временных поправок. *Радионавигационные технологии* / Под ред. А. И. Перова. М: Радиотехника, 2016. 146 с.
7. *Sleewaegen J. M., Simsky A., de Wilde W., Boon F., Willems T.* Demystifying GLONASS inter-frequency carrier phase biases // *Inside GNSS*, 2012, vol. 7 (3). P. 57–61.
8. *Kozlov D., Tkachenko M., Tochilin A.* Statistical Characterization of Hardware Biases in GPS + GLONASS Receivers, *Proceedings of ION GPS*, 2000. P. 817–826.
9. *Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews.* Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. 4th Edition.
10. *Shau-Shiun Jan, Shih-Chieh Lu.* Implementation and Evaluation of the WADGPS System in the Taipei Flight Information Region. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2010, 10. P. 2995–3022. 10.3390/s100402995.
11. *Tsai Yeou-Jyh.* Wide Area Differential Operation of the Global Positioning System: Ephemeris and Clock Operations. Ph. D. Dissertation, Stanford University, August 1999.
12. *Антонович К.М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: В 2 т. Т. 1. / К. М. Антонович. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.
13. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., J. Collins.* Global Positioning System Theory and practice. Viena: Springer, 2001.
14. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш) <https://www.glonass-iac.ru> (Дата обращения: 21.08.2019).