

УДК 629.783:527

**Сличение шкал времени с использованием сигналов
глобальных навигационных спутниковых систем**

Скакун И.О.

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,

ЦНИИмаш, ул. Пионерская, 4, Королев, 141070, Россия

e-mail: ivan.skakun@glonass-iac.ru

Аннотация

Рассматривается метод сличений с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в режиме Common View с целочисленным разрешением неоднозначностей на различных базовых линиях. Дается описание модели, используемой в обработке. Приведены различные оценки получаемой погрешности единичного измерения.

Ключевые слова: ГНСС, Common View, сличение шкал времени, целочисленное разрешение неоднозначности

Введение

Потребность в высокоточном сличении шкал времени возникает в различных отраслях науки и техники (Lombardi, 2006): начиная от систем передачи и распределения энергии и телекоммуникационных систем до национальных лабораторий времени и частоты. Одними из основных потребителей высокоточных систем сличения являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) и национальные лаборатории времени и частоты.

Для предоставления потребителям ГНСС ГЛОНАСС возможности синхронизации с национальной шкалой времени UTC(SU) проводятся регулярные сличения системной шкалы времени ГЛОНАСС и UTC(SU).

Исходя из Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012-2020 годы, погрешность согласования системной шкалы времени ГЛОНАСС с национальной шкалой времени UTC (SU) в 2020 году должна составлять несколько нс.

Национальные лаборатории времени и частоты используют каналы внешних сличений в основном для формирования собственной национальной шкалы времени и для анализа первичных генераторов времени и частоты и являются наиболее требовательным потребителем систем сличения с точки зрения точности и погрешности получаемых сверок.

Штатные технологии сличений, которые применяются Международным Бюро Мер и Весов при формировании всемирного координированного времени UTC, основаны на использовании либо сигналов ГНСС (Common view, CV -дифференциальные технологии), либо передачи сигналов через геостационарные связные спутники (Two Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT - дуплексные технологии).

Дуплексные технологии появились сравнительно недавно, не имеют широкого распространения и стоимость необходимого оборудования колеблется от 5 до 10 млн. рублей. Помимо этого, необходимо наличие круглосуточного непрерывного частотного ресурса связного спутника, аренда которого, в зависимости от полосы частот, может составлять несколько млн. рублей в год. Дуплексные технологии основаны на одновременной передаче синхронизирующих сигналов от сличаемых станций через геостационарный спутник друг другу, что позволяет существенно сократить вклад ошибок тракта распространения. Погрешность метода составляет порядка 100 пс. Погрешность калибровки аппаратуры, которая определяет точность сличений, составляет порядка 0.5 нс.

Дифференциальные технологии являются более старыми, массовыми и дешевыми. Стоимость необходимой аппаратуры оценивается от 500 000 до 1000 000 рублей (навигационный приемник геодезического класса ГЛОНАСС/GPS). Погрешность сличений дифференциальным методом

составляется порядка 500 пс, а погрешность калибровки аппаратуры сличения 1-2 нс. Существует ряд технологий, позволяющий понизить погрешность методов сличений с использованием сигналов ГНСС до уровня порядка 100 пс. Технология Precise Point Positioning (PPP) является наиболее ярким примером.

Принимая во внимание уровень точности и погрешности существующих методов сличений, стремительное развитие оптических стандартов частоты, нестабильность генерируемого сигнала которых на несколько порядков превышает нестабильность атомных часов на основе квантовых переходов в микроволновом диапазоне и постоянно возрастающие требования к качеству предоставляемых потребителям стандартных услуг ГНСС, в том числе, к погрешности согласования системной шкалы времени с всемирной координированной шкалой времени UTC, предполагают создание новых высокоточных методов сличения времени и частоты.

Из высокоточных методов сличений можно особо отметить те, которые используют сигналы ГНСС, благодаря их сравнительной дешевизне и потенциально высокой точности.

Непосредственным результатом работы исследуемого метода является оценка разности внутренних шкал времени навигационных приемников, которая может быть соотнесена с оценкой разности шкал времени используемых опорных генераторов при наличии результатов дифференциальной или абсолютной калибровки внутренних задержек используемой навигационной аппаратуры. Следует отметить, что независимо от наличия вышеупомянутых калибровочных поправок, предлагаемые методы позволяют проводить оценки разности частот опорных генераторов.

Исследуемый метод позволяет снизить погрешность сличений благодаря использованию фазовых измерений ГНСС с разрешением так называемых фазовых «неоднозначностей». Данный метод развивает идеи по разрешению «неоднозначности» фазовых измерений, предложенные в работе (Delporte, Mercier, Laurichesse, & Galy, 2008).

Также следует отметить, что в основе метода лежит использование режима Common View, который заключается в том, что для формирования оценки разности шкал времени двух навигационных приемников используются только те космические аппараты, которые находятся в пересечении зон видимости сличаемых приемников.

Методические аспекты обработки навигационных измерений

Отличительной особенностью принятой за основу модели измерений является то, что систематические задержки для разных частот, разных космических аппаратов, приемников и типов измерений (кодовые, фазовые) считаются различными. Ниже приведена символьная запись кодовых и фазовых измерений для одного КА и одной измерительной станции.

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \rho + T + I + c(dt^r - dt^s) + b_{P1}^r - b_{P1}^s + \varepsilon_{P1} \\
 P_2 &= \rho + T + \gamma^2 I + c(dt^r - dt^s) + b_{P2}^r - b_{P2}^s + \varepsilon_{P2} \\
 L_1 + \lambda_1 N_1 &= \rho + T - I + c(dt^r - dt^s) + b_{L1}^r - b_{L1}^s + \varepsilon_{L1} \\
 L_2 + \lambda_2 N_2 &= \rho + T - \gamma^2 I + c(dt^r - dt^s) + b_{L2}^r - b_{L2}^s + \varepsilon_{L2}
 \end{aligned}$$

, где P_1, P_2 - кодовая псевдодальность на частоте L1 и L2 соответственно;

L_1, L_2 - число измеренным длин волн на частоте L1 и L2 соответственно;

ρ - геометрическая дальность до КА с учетом смещения фазовых центров антенн приемника и КА и их вариаций, также учтено влияние их взаимного расположения;

T - задержка за распространение сигнала в тропосфере;

I - задержка за распространение сигнала в ионосфере;

c - скорость света в вакууме;

dt^r - смещение шкалы времени приемника относительно системной шкалы времени;

dt^s - смещение бортовой шкалы времени КА относительно системной шкалы времени;

b_{P1}^r, b_{P2}^r - систематическая задержка навигационного приемника для кодовых измерений на частоте L1 и L2 соответственно;

$b_{P_1}^s, b_{P_2}^s$ - систематическая задержка космического аппарата для кодовых измерений на частоте L1 и L2 соответственно;

$\varepsilon_{P_1}, \varepsilon_{P_2}$ - случайная ошибка кодовых измерений на частоте L1 и L2 соответственно;

$$\gamma = \frac{f_1}{f_2} \approx 1.283(3) \gamma^2;$$

λ_1, λ_2 - длина волны несущей на частоте L1 и L2 соответственно;

N_1, N_2 - неизвестное целое число длин волн на частоте L1 и L2 соответственно;

$b_{L_1}^r, b_{L_2}^r$ - систематическая задержка навигационного приемника для фазовых измерений на частоте L1 и L2 соответственно;

$b_{L_1}^s, b_{L_2}^s$ - систематическая задержка космического аппарата для фазовых измерений на частоте L1 и L2 соответственно;

$\varepsilon_{L_1}, \varepsilon_{L_2}$ - случайная ошибка фазовых измерений на частоте L1 и L2 соответственно.

Следует иметь в виду, что для простоты изложения в приведенных выражениях были опущены поправки за релятивистские эффекты и поправки, вызванные приливами в твердом теле Земли и океаническими приливами. Также предполагается, что измерения предварительно восстановлены от фазовых скачков.

Для компенсации ионосферной задержки распространения сигнала в большинстве случаев применяется так называемая безионосферная комбинация, которая имеет следующий вид:

$$P_3 = \frac{77^2 P_1 - 60^2 P_2}{77^2 - 60^2} = \rho + T + c(dt^r - dt^s) + b_{P_3}^r - b_{P_3}^s + \varepsilon_{P_3}$$

$$L_3 = \frac{77^2 L_1 - 60^2 L_2}{77^2 - 60^2} = \rho + T + c(dt^r - dt^s) + b_{L_3}^r - b_{L_3}^s - \lambda_3 N_3 + \varepsilon_{L_3}$$

, где $\lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{77 \lambda_2 - 60 \lambda_1} \approx 0.63 \text{ см}$ - длина волны безионосферной комбинации;

$N_3 = 77N_1 - 60N_2$ - неизвестное целое число длин волн безионосферной комбинации.

В задаче определения орбит и поправок часов космических аппаратов по сети измерительных станций для избавления от вырожденности, «зажимается» одна измерительная станция, которая, как правило, оснащена стандартом частоты с высокой стабильностью частоты. В приведенных выше уравнениях это эквивалентно приравниванию нулю параметра dt^r для опорной станции. В состав уточняемых параметров для каждого сеанса фазовых измерений входит неизвестное число длин волн, которое при данном составе набора уточняемых параметров не является, вообще говоря, целым, что становится ясно из следующего представления приведенной модели измерений:

$$P_3 = \rho + T + c(dt_{P_3}^r - dt_{P_3}^s) + \varepsilon_{P_3}$$

$$L_3 = \rho + T + c(dt_{P_3}^r - dt_{P_3}^s) + A_{P_3} + \varepsilon_{L_3}$$

, где $cdt_{P_3}^* = cdt^* + b_{P_3}^*$;

$A_{P_3} = b_{L_3}^r - b_{P_3}^r - b_{L_3}^s + b_{P_3}^s - \lambda_3 N_3$ - комбинация разностей кодовых и фазовых измерений приемника и космического аппарата и неизвестного числа длин волн.

Из вышесказанного следует, что используя ЧВП, полученные подобным образом нельзя накладывать условие целочисленности на параметры неоднозначности.

В случае использования космических аппаратов, находящихся в зоне видимости обеих станций, будем формировать первые разности станция-станция, так называемый метод Common View. Модель навигационных измерений примет вид:

$$\Delta P_3 = \Delta\rho + \Delta T + c\Delta dt^r + \Delta b_{P_3}^r + \varepsilon_{P_3}$$

$$\Delta L_3 = \Delta\rho + \Delta T + c\Delta dt^r + \Delta b_{L_3}^r - \lambda_3 \Delta N_3 + \varepsilon_{L_3}$$

Обработка первых разностей по станциям имеет ряд преимуществ по сравнению с обработкой прямых измерений. Она позволяет существенно сократить вклад ошибок эфемеридно временной информации, при

небольшом расстоянии между сличаемыми станциями позволяет не учитывать тропосферную задержку и приливные деформации земной коры. Разность шкал времени приемников Δdt^r полностью коррелирована с разностью систематических ошибок кодовых и фазовых измерений Δb_{L3}^r и Δb_{P3}^r , что делает невозможным их разделение на уровне обработки, поэтому для оценки разности шкал времени, будем рассматривать параметры $c\Delta dt_{L3}^r = c\Delta dt^r + \Delta b_{L3}^r$, $c\Delta dt_{P3}^r = c\Delta dt^r + \Delta b_{P3}^r$, от которых можно перейти к оценки истинной разности шкал времени при наличии дифференциальной калибровки навигационной аппаратуры по комбинациями L3 и P3. Модель измерений примет вид:

$$\begin{aligned}\Delta P_3 &= \Delta\rho + \Delta T + c\Delta dt_{P3}^r + \varepsilon_{P3} \\ \Delta L_3 &= \Delta\rho + \Delta T + c\Delta dt_{L3}^r - \lambda_3\Delta N_3 + \varepsilon_{L3}\end{aligned}$$

Принимая во внимание существенно более высокий уровень погрешности кодовых измерений и тот факт, что кодовые и фазовые измерения содержат разные оценки шкал времени (смещенных друг относительно друга на разность систематических погрешностей, что видно из приведенных выше выражений) далее будут рассматриваться системы уравнений, включающие только фазовые измерения.

Таким образом, система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \Delta L_3^1 = \Delta\rho^1 + \Delta T^1 + c\Delta dt_{L3}^{r,1} - \lambda_3\Delta N_3^1 + \varepsilon_{L3}^1 \\ \Delta L_3^2 = \Delta\rho^2 + \Delta T^2 + c\Delta dt_{L3}^{r,2} - \lambda_3\Delta N_3^2 + \varepsilon_{L3}^2 \\ \vdots \\ \Delta L_3^i = \Delta\rho^i + \Delta T^i + c\Delta dt_{L3}^{r,i} - \lambda_3\Delta N_3^i + \varepsilon_{L3}^i \end{cases}$$

, где i - номер космического аппарата.

Полученная система уравнений вырождена, потому что параметры разностей шкал времени и неоднозначностей полностью коррелированы. Поэтому, для оценки разности шкал времени, необходимо «зажать» разность неоднозначностей для одного космического аппарата.

Далее выполняется фиксация других параметров. Следует отметить, что длина волны для безионосферной комбинации в случае GPS составляет 0.63

см и находится на уровне шума фазовых измерений, что делает невозможным разрешение параметров разности неоднозначности в целых числах. Поэтому, для преодоления данной трудности, используется тот факт, что член $\lambda_3 N_3$ можно представить в следующем виде:

$$\lambda_3 N_3 = \lambda_3 (77N_1 - 60N_2) = \lambda_3 (17N_1 + 60N_4) = \lambda_6 N_1 + \lambda_3 60N_4$$

, где N_1, N_2 - число длин волн для частот L1 и L2;

N_4 - число длин волны для «широкой» комбинации L_4 ;

λ_6 - длина волны для «узкой комбинации» L_6 (10.6 см).

То есть при наличии оценки числа длин волн для «широкой» комбинации оценка числа длин волн для частоты L1 с длиной волны 0.63 см сводится к оценке числа длин волн для частоты L1 с длиной волны «узкой комбинации».

Для оценки числа длин волн на «широкой комбинации» используется комбинация Melbourne-Wubbena:

$$A_4 = L_4 - P_6 = b_{A_4}^r - b_{A_4}^s - \lambda_4 N_4 + \varepsilon_{A_4}$$

, где P_6 - «узкая» кодовая комбинация;

$b_{A_4}^r$ - систематическая задержка навигационного приемника для комбинации A_4 ;

$b_{A_4}^s$ - систематическая задержка космического аппарата для комбинации A_4 ;

λ_4 - длина волны для «широкой комбинации» L_4 (86.19 см).

Оценка разности шкал времени

Дифференциальные систематические задержки. Для оценки разности числа длин волн «широкой» комбинации, которое требуется для оценки разности числа длин волн в безионосферной комбинации, используется комбинация Melbourne-Wubbena, которая для первых разностей спутник-спутник имеет следующий вид:

$$\Delta A_4 = \Delta b_{A_4}^r - \lambda_4 \Delta N_4 + \varepsilon_{A_4},$$

где $\Delta b_{A_4}^r$ - разность внутренних задержек в приемниках для комбинации A_4 .

Для оценки разности числа длин волн «широкой» комбинации ΔN_4 необходимо оценить разность внутренних задержек Δb_{A4}^r . Следует отметить, что данных задержки являются достаточно стабильными во времени и на интервалах порядка месяца их можно считать постоянными, что дает возможно их вычислить предварительно на большом интервале. В случае спутников GPS задержки Δb_{A4}^r одинаковые для каждого космического аппарата с точностью 0.1 цикла «широкой» комбинации (0.86 см), что вообще говоря неверно для спутников ГЛОНАСС, поэтому для оценки разности шкал времени с целочисленным разрешением неоднозначностей используются только спутники GPS.

Фильтр по большой выборке представляет собой взвешенный метод наименьших квадратов на интересующем интервале. То есть решается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \Delta L_3^1 - \Delta \rho^1 = \Delta T^1 + c \Delta dt_{L_3}^{r,1} - \lambda_6 \Delta N_1^1 - \lambda_3 60 \Delta N_4^1 \\ \Delta L_3^2 - \Delta \rho^2 = \Delta T^2 + c \Delta dt_{L_3}^{r,2} - \lambda_6 \Delta N_1^2 - \lambda_3 60 \Delta N_4^2 \\ \vdots \\ \Delta L_3^i - \Delta \rho^i = \Delta T^i + c \Delta dt_{L_3}^{r,i} - \lambda_6 \Delta N_1^i - \lambda_3 60 \Delta N_4^i \end{cases}$$

В матричном виде:

$$z = A\delta + v$$

, где $z = \Delta L_3^i - \Delta \rho^i$ - n-мерный вектор измерений (n×1);

A - матрица производных (n×m);

δ - m-мерный вектор приращения уточняемых параметров (m×1).

Оценка приращения вектора уточняемых параметров представляется в виде:

$$\hat{\delta} = (A^T P_z A)^{-1} A^T P_z z = N^{-1} g,$$

где P_z - весовая матрица измерений.

В состав уточняемых параметров входят разности шкал времени приемников на каждую эпоху, неоднозначности и зенитная составляющая тропосферной задержки, которая уточняется как полином на заданных интервалах (как правило линейный полином каждые два часа). Матрица

производных в случае уточнения тропосферы линейными полиномами имеет следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} c & \text{mfS}_{UTC1}^{SV1} & \text{mfS}_{UTC1}^{SV1} \Delta UTC_1^{TII} & & \text{mfM}_{UTC1}^{SV1} & \text{mfM}_{UTC1}^{SV1} \Delta UTC_1^{TII} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & & & \\ c & \text{mfS}_{UTC1}^{SVn} & \text{mfS}_{UTC1}^{SVn} \Delta UTC_1^{TII} & & \text{mfM}_{UTC1}^{SVn} & \text{mfM}_{UTC1}^{SVn} \Delta UTC_1^{TII} & & 0 & & 0 \\ & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c & \text{mfS}_{UTCk}^{SV1} & \text{mfS}_{UTCk}^{SV1} \Delta UTC_k^{TII} & & \text{mfM}_{UTCk}^{SV1} & \text{mfM}_{UTCk}^{SV1} \Delta UTC_k^{TII} & & 0 & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c & \text{mfS}_{UTCk}^{SVn} & \text{mfS}_{UTCk}^{SVn} \Delta UTC_k^{TII} & & \text{mfM}_{UTCk}^{SVn} & \text{mfM}_{UTCk}^{SVn} \Delta UTC_k^{TII} & & 0 & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \ddots & & & & & & & \ddots & & \\ & & & & \text{mfS}_{UTCd}^{SV1} & \text{mfS}_{UTCd}^{SV1} \Delta UTC_d^{TII} & & & \text{mfM}_{UTCd}^{SV1} & \text{mfM}_{UTCd}^{SV1} \Delta UTC_d^{TII} \\ & & & & \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ & & & & \text{mfS}_{UTCd}^{SVn} & \text{mfS}_{UTCd}^{SVn} \Delta UTC_d^{TII} & & & \text{mfM}_{UTCd}^{SVn} & \text{mfM}_{UTCd}^{SVn} \Delta UTC_d^{TII} \\ & & 0 & 0 & \vdots & \vdots & & 0 & 0 & \vdots \\ & & & & \text{mfS}_{UTCi}^{SV1} & \text{mfS}_{UTCi}^{SV1} \Delta UTC_i^{TII} & & & \text{mfM}_{UTCi}^{SV1} & \text{mfM}_{UTCi}^{SV1} \Delta UTC_i^{TII} \\ c & & & & \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & & & & \text{mfS}_{UTCi}^{SVn} & \text{mfS}_{UTCi}^{SVn} \Delta UTC_i^{TII} & & & \text{mfM}_{UTCi}^{SVn} & \text{mfM}_{UTCi}^{SVn} \Delta UTC_i^{TII} \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ c & & & & & & & & & \end{bmatrix},$$

где mfS - функция отображения тропосферной задержки для сличаемой станции;

mfM - функция отображения тропосферной задержки для опорной станции.

Для избавления от вырожденности добавляется дополнительное условие на равенство какого-нибудь параметра неоднозначности нулю.

Матрица N имеет структуру стрелки (блочно-диагональная окаймленная матрица), представлена рисунке 1.

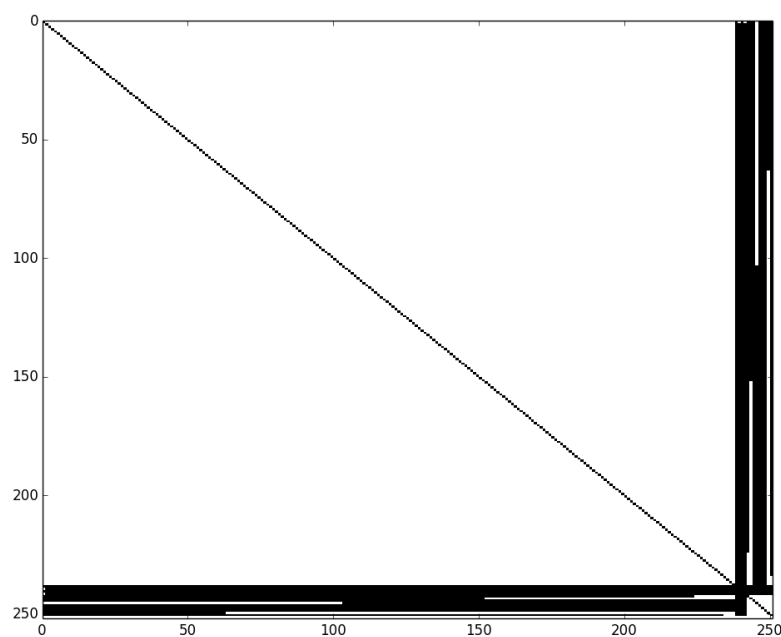


Рисунок 1. Матрица системы линейных уравнений

Полученная оценка $\hat{\delta}$ называется «вещественной». Далее будем использовать свойство целочисленности параметров неоднозначностей. Для этой цели применяется широко используемый в обработке измерений во вторых разностях целочисленный метод наименьших квадратов, то есть минимизируем следующую квадратичную форму:

$$(I - \hat{I})^T Q (I - \hat{I}), \quad I \in Z,$$

где \hat{I} - вещественная оценка неоднозначностей;

Q - ковариационная матрица вещественного решения.

Следует отметить, что в случае, когда неоднозначности не коррелированы между собой, целочисленный МНК сводится к обычному округлению.

Рекуррентный фильтр представляет собой априорно взвешенный метод наименьших квадратов для каждой эпохи обработки. Ковариационная матрица вектора оцениваемых параметров на текущую эпоху Q , с добавленным шумом системы, используется как априорная ковариационная матрица на следующей эпохе обработки.

Оценка приращения вектора уточняемых параметров представляется в виде:

$$\begin{aligned} \hat{\delta} &= (A^T P_z A + P_0)^{-1} A^T P_z z \\ \hat{X} &= X_0 + \hat{\delta} \\ Q_{\hat{X}} &= P_{\hat{X}}^{-1} = (A^T P_z A + P_0)^{-1}, \\ P_0 &= (Q_{X_{-1}} + Q_{X_{\Delta}})^{-1} \end{aligned}$$

где P_z - весовая матрица измерений;

P_0 - априорная весовая матрица, полученная из ковариационной матрицы на предыдущую эпоху $Q_{X_{-1}}$ добавлением шума системы $Q_{X_{\Delta}}$;

X_0 - априорный вектор уточняемых параметров;

$Q_{X_{-1}}$ - ковариационная матрица на предыдущую эпоху;

$Q_{X_{\Delta}}$ - шум системы.

В состав уточняемых параметров входят разности шкал времени приемников на каждую эпоху и неоднозначности для каждого сеанса. Следует иметь в виду, что в решение входят те космические аппараты, для которых неоднозначности для широкой комбинации ΔN_4^i оценены как целые числа.

Матрица шума системы является диагональной и имеет ненулевые элементы для параметра разности шкал времени и параметров неоднозначности тех космических аппаратов, которые не участвовали в обработке на предыдущей итерации или по ним был зафиксирован слип.

Сличения на нулевой базе

Для оценки погрешности данного метода был проведен следующий эксперимент. Два навигационных приемника сопряжены с одним и тем же стандартом частоты и их антенны находятся на небольшом расстоянии друг от друга. Считается, что алгоритмы построения внутренней шкалы времени у приемников подобные и ход внутренних шкал совпадает с точностью до нестабильности установленных кварцевых генераторов. Таким образом ожидаемым результатом является малошумящий временной ряд с нулевым трендом и каким-то средним значением, которое будет определяться систематической задержкой приемника и смещение из-за задания нулю произвольного параметра неоднозначности.

Приемники MDVL и MDVS сопряжены с одним и тем же генератором частоты и времени из состава эталонной базы Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ) и используют общую антенну. Оценка разности внутренних шкал времени данных приемников приведена на рисунке 2.

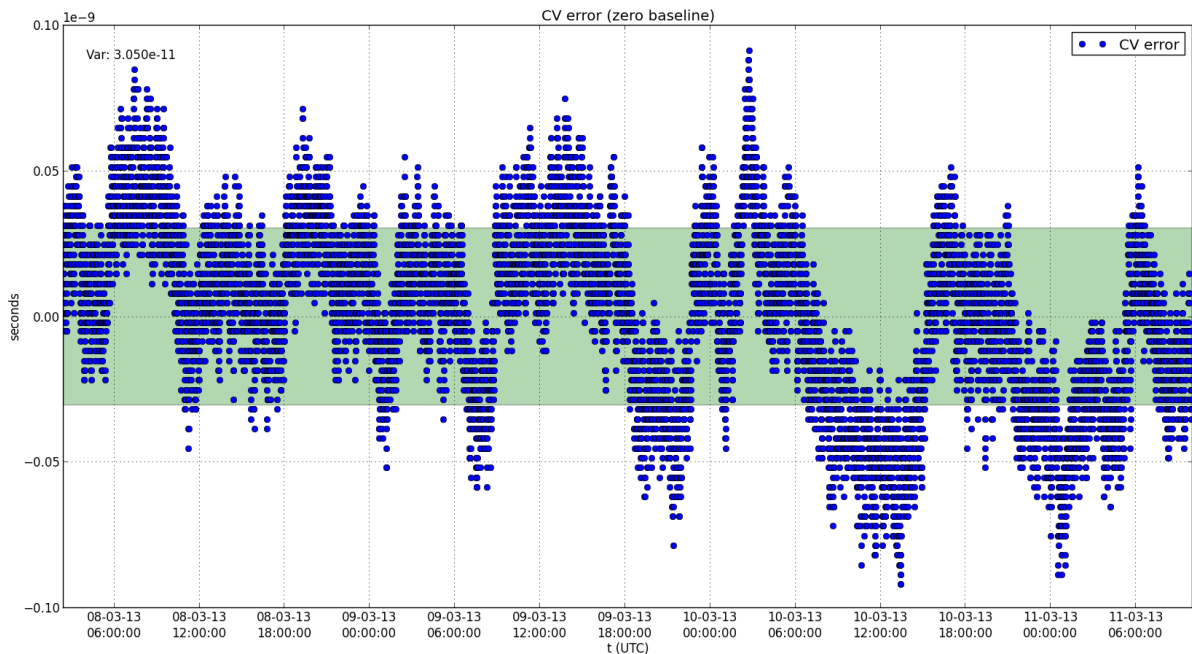


Рисунок 2. Оценка разности шкал времени приемников MDVL и MDVJ на интервале обработки 08-03-2013 03:00 - 11-03-2013 10:00

Из вышеприведенного рисунка видно, что полученная погрешность находится на уровне 30 пс. Как уже было отмечено, помимо шума самих измерений в полученную погрешность включена ошибка формирования внутренних шкал времени приемниками по внешней шкале времени.

Сличения на большой базе

На большой базе проводился следующий эксперимент. Между тремя территориально разнесенными навигационными приемниками (Менделеево-MDVJ, Светлое-SVTL, Онсала-ONSA), сопряженными с высокостабильными генераторами частоты, проводились попарные сверки. Расположение станций схематически приведено на рисунке 3. Далее формировалась такая линейная комбинация полученных оценок, которая должна дать ноль. На рисунке 4 приведен полученный результат без фиксации целочисленных неоднозначностей, а на рисунке 5 с фиксацией. Оценки приведены для обработки в фильтре по большой выборке. Из данных графиков видно, что решению без фиксации неоднозначностей свойственно ухудшение точности с течением времени. Данный недостаток можно уменьшить добавив в систему кодовые измерения, но при этом возрастет погрешность и не будет

возможным разрешить неоднозначность в целых числах из-за наличия кодовых систематик. Полученная погрешность на уровне 40 пс является косвенной оценкой метода.

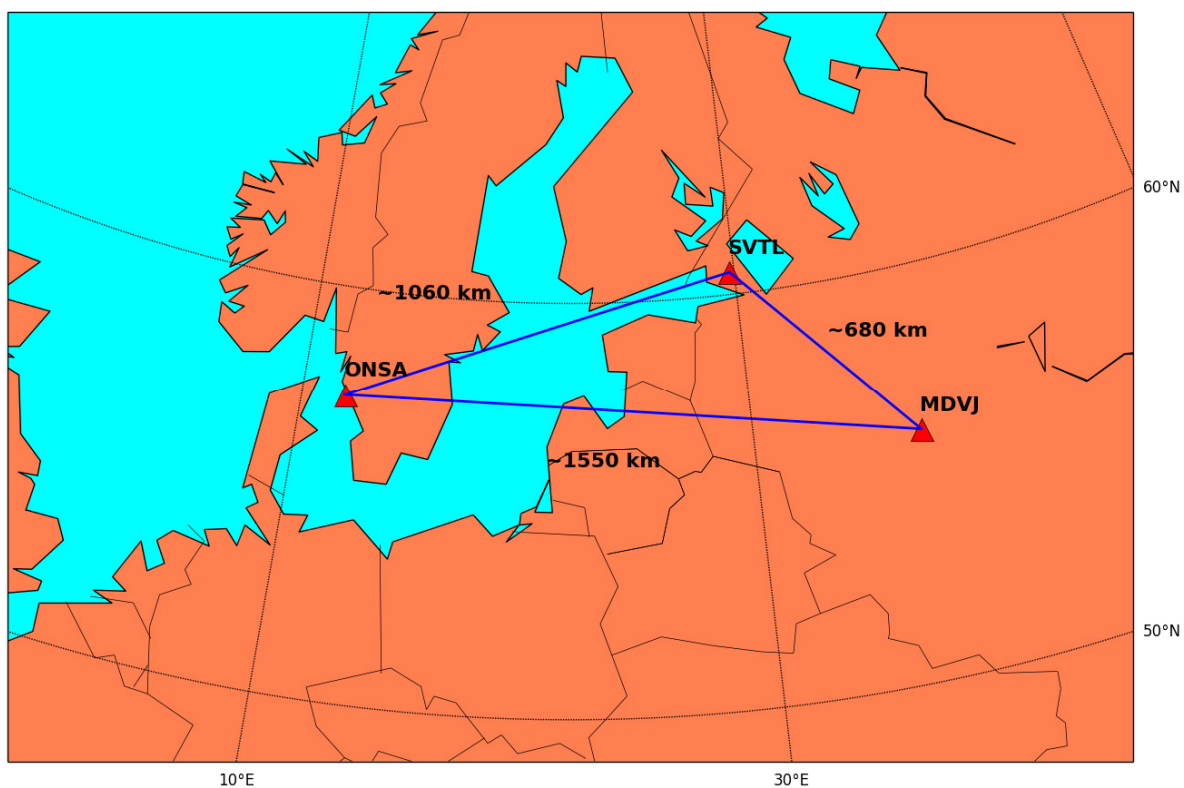


Рисунок 3. Менделеево-MDVJ, Светлое-SVTL, Онсала-ONSA

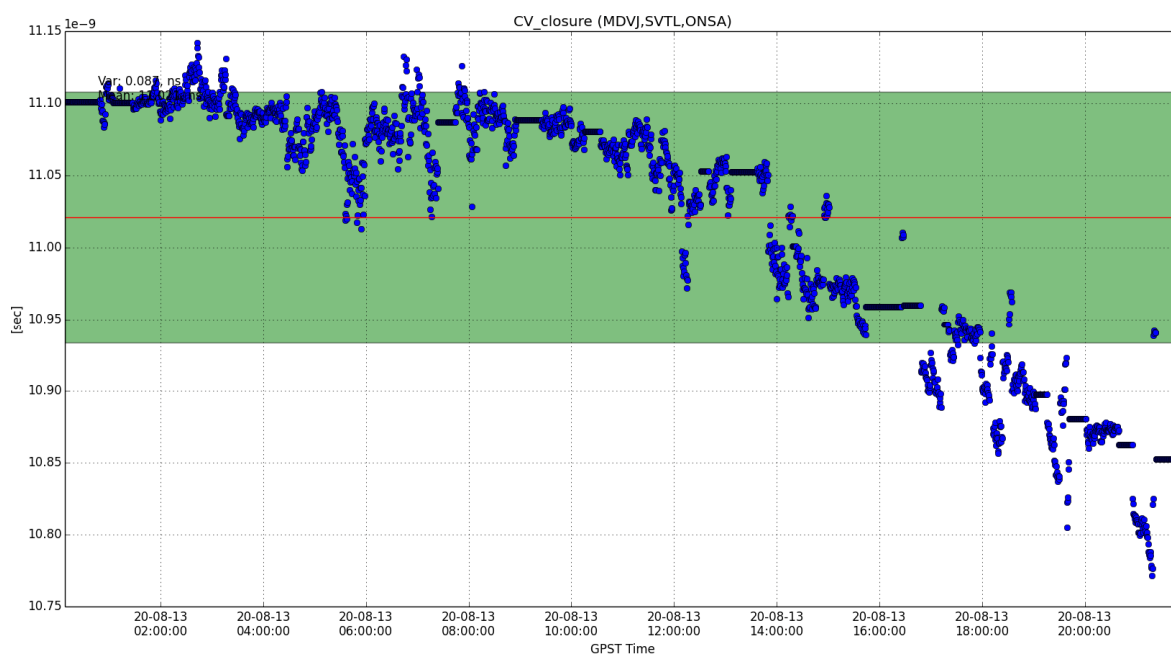


Рисунок 4. «Замыкание» без фиксации неоднозначностей

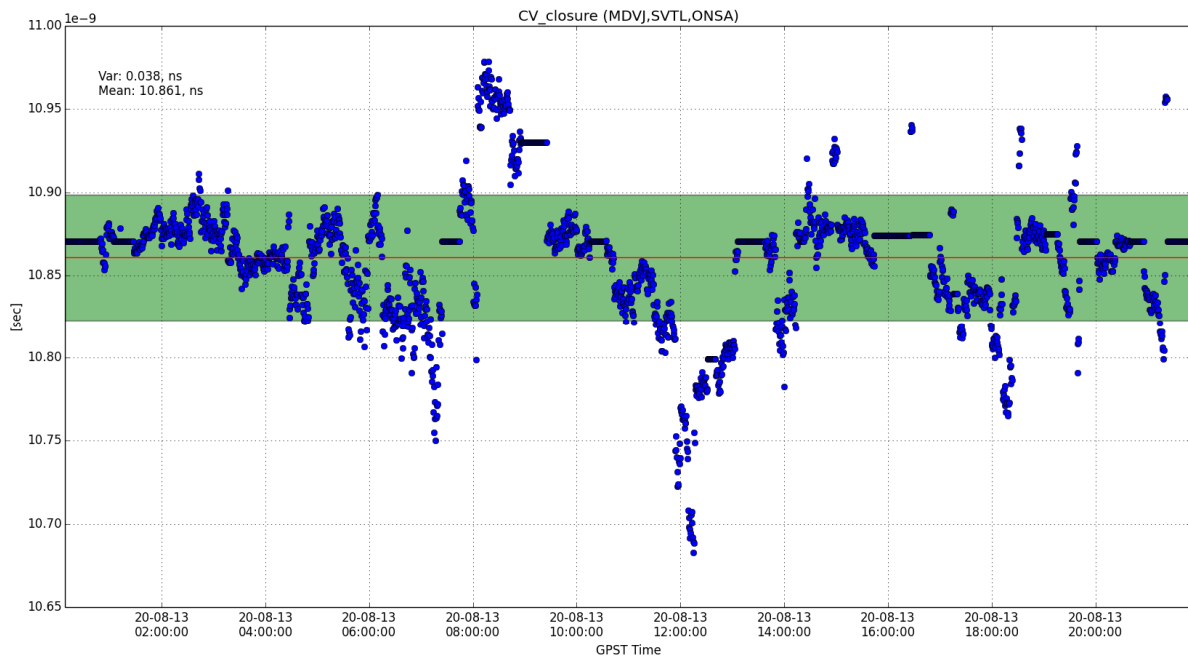


Рисунок 5. Замыкание с фиксацией неоднозначностей

Следует отметить, что целочисленное разрешения неоднозначностей фазовых измерений возможно при использовании целого ряда высокоточных моделей, таких как: приливы в твердом теле Земли (Solid tides), океанические приливы (Ocean loading), коррекция за фазовый центр антенн (PCO+PCV), релятивистские поправки и зенитная тропосферная задержка, которая оценивается независимо и используется как точная модель.

Заключение

Рассмотрен метод сличений в режиме Common View с целочисленным разрешением неоднозначностей на различных базовых линиях.

Получена косвенная оценка метода в двух экспериментах: эксперимент на нулевой базе, когда два навигационных приемника сопряжены с общим стандартом частоты и эксперимент, когда три станции попарно сличаются и из полученных оценок составляется такая линейная комбинация, которая должна дать ноль. Полученная погрешность единичного измерения находится на уровне 40 пс.

Предложенный метод замыкания можно использовать с целью контроля достоверности полученного решения.

Следует отметить, что в случае произвольной фиксации (приравнивание нулю) неоднозначности для одного из сеансов КА мы получаем смещенное на неизвестное число длин волн решение. Таким образом, используя такие сверки, можно сличать частоты разнесенных шкал времени, а не сами шкалы. Для сличений по времени необходимо предварительно согласовать полученное фазовое решение с кодовым и провести дифференциальную калибровку навигационной аппаратуры.

Библиографический список

1. Delporte J [и др.] GPS Carrier-Phase Time Transfer Using Single-Difference Integer Ambiguity Resolution [Журнал] // International Journal of Navigation and Observation. - [б.м.]: Hindawi Publishing Corporation, 2008 г.. - Т. 2008. - Номер статьи: 273785, 7 стр..
2. И.О. Скакун. Всемирное координированное время и методы сличения шкал времени [Журнал] // Космонавтика и ракетостроение 4(69). - 2012 г.С.60-69.