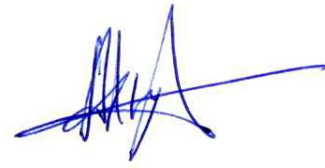


На правах рукописи



ПОДКОРЫТОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**Высокоточное местоопределение в глобальных навигационных
спутниковых системах в абсолютном режиме за счёт разрешения
неоднозначности псевдофазовых измерений**

Специальность: 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре 402 «Радиосистемы и комплексы управления, передачи информации и информационная безопасность» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: **Поваляев Александр Александрович**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Официальные оппоненты: **Харисов Владимир Назарович**

доктор технических наук, профессор, директор департамента навигационных и связных систем ОАО «ВНИИР-Прогресс»

Булавский Николай Тадеушевич

кандидат технических наук, заместитель генерального директора, начальник отделения перспективных разработок и развития навигационных технологий ЗАО «КБ НАВИС»

Ведущая организация: ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Защита диссертации состоится «30» сентября 2014 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) mai.ru.

Автореферат разослан: «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.03
доктор технических наук



М.И. Сычёв

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние годы в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) активно развивается метод высокоточного местоопределения потребителя в абсолютном режиме (Precise Point Positioning, PPP). Сегодня ошибки таких определений в режиме послесеансной обработки достигают 1см и менее для неподвижного приёмника и нескольких дециметров для подвижного. Традиционным стал подход Float PPP, при котором целочисленные неоднозначности псевдофазовых измерений вбирают в себя немоделируемые аппаратурные смещения и поэтому оцениваются как действительные числа.

Высокоточное абсолютное местоопределение в ГНСС находит применение во множестве приложений, таких как строительство и топографическая съёмка, добыча и разведка полезных ископаемых, мониторинг деформаций сооружений, изучение сейсмических процессов и др. Существенным недостатком методов Float PPP является недостаточная оперативность. Время определения высокоточных координат в зависимости от точности может длиться до нескольких часов, что неприемлемо для большого числа практических приложений. Использование в процессе местоопределения процедуры целочисленного разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений позволяет существенно сократить это время и приблизиться к местоопределению в режиме реального времени. Таким образом, разработка методов высокоточного местоопределения в абсолютном режиме с использованием разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений является актуальной и востребованной задачей.

Объект исследования

Объектом исследования являются высокоточные абсолютные местоопределения в ГНСС с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений на основе использования корректирующей информации, формируемой по измерениям сети наземных станций.

Предмет исследования

Алгоритмы формирования корректирующей информации и алгоритмы высокоточных абсолютных местоопределений с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертации являются разработка и исследование методов разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений при высокоточных местоопределениях в ГНСС с целью снижения времени определения высокоточных абсолютных координат потребителя. Для достижения поставленной цели в ходе диссертационного исследования были решены следующие задачи:

1. Разработаны математические модели измерений навигационного приёмника на исходных частотах, позволяющие осуществлять разрешение целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений при абсолютных местоопределениях в ГНСС.
2. Разработан и программно реализован алгоритм вычисления по локальной сети наземных навигационных станций поправок к показаниям спутниковых часов, позволяющих осуществлять высокоточное местоопределение в ГНСС с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.
3. Разработаны теоретические и практические вопросы преодоления дефицита ранга систем линейных уравнений при высокоточном местоопределении в ГНСС в абсолютном режиме с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений (как в части пользовательского решения, так и при обработке измерений сети наземных станций).
4. Разработан и программно реализован алгоритм высокоточного местоопределения потребителя в ГНСС в абсолютном режиме с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.
5. Проведено экспериментальное исследование эффективности использования процедуры разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений при высокоточном местоопределении в ГНСС в абсолютном режиме.
6. Разработан метод фильтрации (исключающий фильтр Калмана), позволяющий осуществлять высокоточное абсолютное местоопределение потребителя в ГНСС по предложенному алгоритму обработки измерений на исходных частотах с исключением влияния ионосферных искажений на оценки координат.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории вероятностей и математической статистики, линейной алгебры и

аналитической геометрии, теории оптимальной фильтрации случайных процессов, методы математического моделирования и теория матриц. При экспериментальном исследовании разработанных алгоритмов использовались программы компьютерного моделирования, программирование и специализированные прикладные программные продукты.

Научная новизна

1. Выявлена ортогональность ядра информационной сингулярной матрицы системы линеаризованных уравнений для измерений ГЛОНАСС и GPS осям пространства оцениваемых параметров, по которым откладываются поправки к координатам навигационного приёмника. Это позволяет несмотря на сингулярность информационной матрицы линеаризованной системы уравнений оценивать поправки к координатам приёмника однозначно с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.
2. Обосновано и экспериментально подтверждено снижение периода сходимости решения при высокоточном местоопределении в ГНСС в абсолютном режиме при использовании разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.
3. Разработано приложение теории S-преобразования и теории графов для высокоточного абсолютного местоопределения в ГНСС с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений и вычисления разделённых поправок к показаниям спутниковых часов.
4. Разработан метод фильтрации, позволяющий при местоопределении в ГНСС работать с измерениями на исходных частотах без использования ионосферосвободных комбинаций измерений (исключающий фильтр Калмана).

Практическая значимость работы

1. Продемонстрировано существенное (в десятки и даже сотни раз) снижение периода сходимости решения высокоточного абсолютного местоопределения в ГНСС при использовании разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.
2. Разработан и программно реализован алгоритм вычисления по локальной сети наземных навигационных станций разделённых поправок к показаниям спутниковых часов, позволяющих реализовать высокоточное местоопределение потребителя в ГНСС с разрешением неоднозначности псевдофазовых измерений.

Теоретическая значимость работы

1. Выявленная в работе ортогональность ядра матрицы сингулярной системы линеаризованных уравнений для измерений ГНСС может быть положена в основу новых перспективных методов и алгоритмов обработки навигационных измерений в ГНСС.
2. Разработан алгоритм преодоления дефицита ранга в системах линейных уравнений в ГНСС при высокоточном местоопределении в абсолютном режиме с разрешением неоднозначности псевдофазовых измерений (как в части пользовательского решения, так и при обработке измерений сети наземных станций).
3. Разработанный метод фильтрации (исключающий фильтр Калмана) предложено использовать в задачах квазиоптимального оценивания для исключения мешающих параметров.

Достоверность полученных научных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена строгим и корректным использованием адекватного математического аппарата, она подтверждается соответствием результатов исследований известным из литературы результатам по рассматриваемой тематике. Разработанные алгоритмы протестированы на реальных измерениях навигационной системы GPS.

Внедрение результатов работы

Результаты работы использованы во ФГУП ЦНИИмаш при выполнении НИР «Системные и комплексные научные исследования направлений развития системы ГЛОНАСС» (шифр НИР «Развитие»), а также в ОАО «Российские космические системы» и учебном процессе МАИ, что подтверждается соответствующими актами внедрения. В дальнейшем планируется использование результатов при разработке программного обеспечения навигационной аппаратуры потребителя для высокоточных абсолютных определений по сигналам ГЛОНАСС с кодовым разделением, реализуемым на новых космических аппаратах системы ГЛОНАСС.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались и обсуждались на международной рабочей группе GNSS Precise Point Positioning Workshop: Reaching Full Potential (Оттава, 2013), на IX и X Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи

SIBCON (Красноярск, 2011, 2013) и ряде других научно-технических конференций (Москва, 2011-2014).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и одного приложения. Работа изложена на 195 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 4 таблицы, список литературы включает 123 наименования.

Положения, выносимые на защиту

1. Часть координатных осей пространства переменных сингулярных систем линейных уравнений в ГНСС (ГЛОНАСС, GPS) ортогональны ядру информационной матрицы системы, и поэтому соответствующие таким осям переменные оцениваются однозначно.
2. Использование разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений позволяет существенно (в десятки и даже сотни раз) снизить период сходимости решения при высокоточном местоопределении в ГНСС.
3. Разработанный метод фильтрации (исключающий фильтр Калмана) позволяет при местоопределении в ГНСС работать с измерениями на исходных частотах без использования ионосферосвободных комбинаций измерений.
4. Разработанное на основе теории S-преобразования и теории графов правило формирования оцениваемых в сетевом решении линейных комбинаций параметров позволяет сохранить целочисленность комбинаций неоднозначностей псевдофазовых измерений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели, задачи, объект и предмет исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, указаны методы исследований, рассмотрена научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов, кратко рассмотрено содержание глав диссертации.

В первой главе сделан обзор литературы по методам высокоточного местоопределения в ГНСС в абсолютном режиме с разрешением неоднозначности псевдофазовых измерений, проведена их классификация. Высокоточное абсолютное местоопределение в ГНСС осуществляется при использовании высокоточной

эфмеридно-временной информации (ЭВИ), компенсации ряда систематических смещений в измерениях и использовании неоднозначных псевдофазовых измерений.

Классическим или стандартным в ГНСС называют режим высокоточного абсолютного местоопределения, при котором не учитывается целочисленная природа неоднозначностей псевдофазовых измерений (режим Float PPP). В этом методе псевдофазовые неоднозначности оцениваются как действительные величины, т.к. вбирают в себя немоделируемые аппаратные смещения, которые в процессе оценивания не удаётся отделить от целых неоднозначностей. Период сходимости решения к сантиметровой точности в режиме Float PPP для многих приложений является неприемлемо большим. Для его уменьшения при обработке необходимо учитывать целочисленную природу неоднозначностей псевдофазы. При использовании разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений режим высокоточного абсолютного местоопределения принято называть Integer PPP (PPP-AR). Основной причиной, препятствующей оценке целочисленных псевдофазовых неоднозначностей, являются аппаратные смещения на спутнике и в приёмнике. Автором для решения поставленной задачи был выбран наиболее теоретически обоснованный метод использования модели разделённых часов, разработанный в Министерстве природных ресурсов Канады (NRCan). Для устранения сингулярности в исходных системах уравнений в этом методе используется теория S-преобразований, подробно описанная в англоязычной литературе применительно к геодезическим сетям без учёта особых свойств ГНСС. Формулирование этих свойств, детали алгебраических методов преодоления дефицита ранга в модели разделённых часов, а также их теоретическое обоснование в литературе отсутствует.

Во второй главе рассматриваются основные принципы местоопределения в ГНСС в режиме Float PPP, большая часть которых используется и в режиме Integer PPP. Линеаризованная традиционная ионосферосвободная модель измерений GPS записывается следующим образом (индекс G обозначает GPS):

$$\begin{cases} P_3^{G,j} = R_C^j + h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + m^j \Delta D_w + dT^G - dt^{G,j} + \varepsilon_{P_3}, \\ L_3^{G,j} = R_C^j + h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + m^j \Delta D_w + dT^G - dt^{G,j} + A_{P_3}^j + \varepsilon_{L_3}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где $P_3^{G,j}$ и $L_3^{G,j}$ - ионосферосвободные комбинации измерений псевдодальности $P_i^{G,j}$ и псевдофазы $L_i^{G,j}$ для j-го спутника на частоте f_i^G ($i=1,2$), в которых скомпенсированы моделируемые систематические смещения (m); $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - поправки к грубым

координатам потребителя (м); R_C^j - грубая дальность от потребителя до j -го спутника; h_x^j, h_y^j, h_z^j - направляющие косинусы j -го спутника; ΔD_w - некомпенсированная компонента вертикальной влажной тропосферной задержки (м); m^j - функция отображения для j -го спутника; $\lambda_3^G \approx 0.006\text{ м}$ - эквивалентная длина волны комбинации измерений $L_3^{G,j}$ (м); $N_3^{G,j} = 77N_1^{G,j} - 60N_2^{G,j}$ - целочисленная неоднозначность комбинации измерений $L_3^{G,j}$ (циклы); $\varepsilon_{P_3}, \varepsilon_{L_3}$ - шумовые ошибки комбинаций измерений $P_3^{G,j}$ и $L_3^{G,j}$ (м); $dT^G = (dT_{REC}^G + b_{r,P_3}^G)$ и $dt^{G,j} = (dt_{SAT}^{G,j} + b_{P_3}^{j,G})$ - смещения показаний часов приёмника и j -го спутника относительно показаний шкалы времени системы, включающие аппаратные смещения b_{r,P_3}^G в измерениях $P_3^{G,j}$ (м);

$$A_{P_3}^j = b_{r,L_3}^G - b_{r,P_3}^G - b_{L_3}^{j,G} + b_{P_3}^{j,G} - \lambda_3^G N_3^{G,j} \quad (2.2)$$

- действительная неоднозначность, соответствующая традиционной модели измерений GPS (м); b_{r,L_3}^G - аппаратные смещения в измерениях $L_3^{G,j}$ (м).

В режиме местоопределения Float PPP после анализа и отбраковки измерений осуществляется вычисление основных параметров спутников (координаты, геометрические дальности, углы возвышения и др.) и компенсация систематических смещений в измерениях псевдодальностей и псевдофаз. Определение поправок к грубым координатам потребителя осуществляется с помощью калмановской фильтрации. Используется следующий вектор \mathbf{X} оцениваемых параметров:

$$\mathbf{X}_{(5+M_{\text{sat}}) \times 1} = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \Delta D_w \quad dT^G \quad \mathbf{A}_{P_3}]^T, \quad (2.3)$$

где $\mathbf{A}_{P_3} = [A_{P_3}^1 \quad A_{P_3}^2 \quad \dots \quad A_{P_3}^{M_{\text{sat}}}]$ - вектор действительных неоднозначностей (2.2), M_{sat} - число спутников в обработке.

В работе было реализовано местоопределение в режиме Float PPP по модели (2.1). На рис. 1 приведены зависимости средних трёхмерных ошибок местоопределения для реализованного алгоритма ("PPP") и нескольких международных сервисов от длительности интервала измерений. Как видно, в режиме Float PPP сантиметровая точность местоопределения достигается только через несколько часов обработки (6-20 часов). Это обусловлено тем, что в модели (2.1) целочисленная неоднозначность $\lambda_3^G N_3^{G,j}$ вбирает в себя немоделируемые аппаратные смещения, формируя действительную величину $A_{P_3}^j$ (2.2), что не позволяет учитывать в обработке целочисленную природу неоднозначности псевдофазовых измерений.

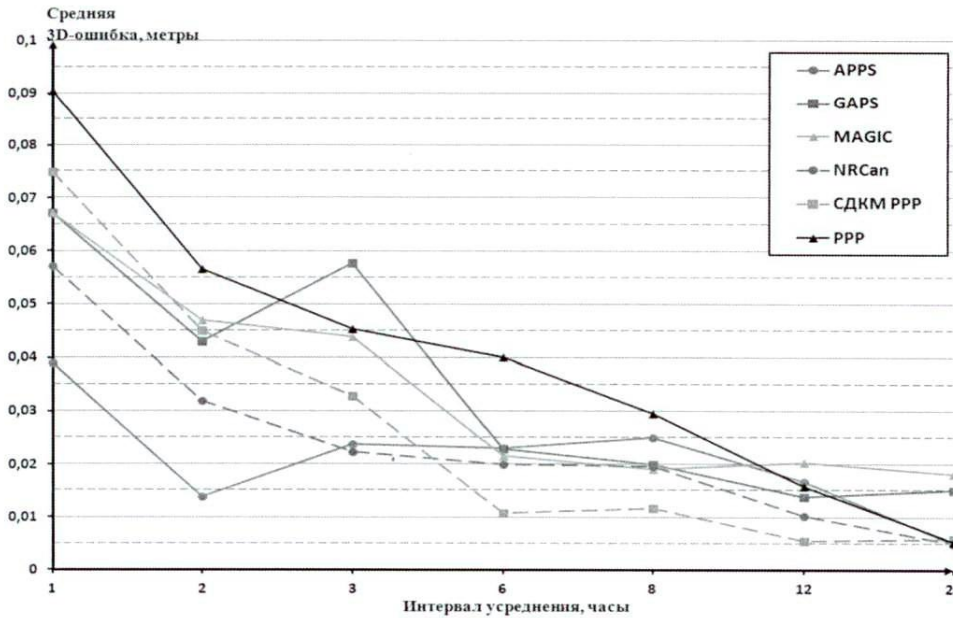


Рис. 1. Зависимость средних трёхмерных ошибок местоопределения реализованного алгоритма и международных сервисов от времени

В третьей главе рассматриваются алгебраические методы преодоления дефицита ранга в задаче Integer PPP для ГЛОНАСС и GPS. Разрешение целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений при высокоточном абсолютном местоопределении возможно при использовании разделённых поправок к показаниям спутниковых часов и часов приёмника. Предлагаемая к обработке линейризованная модель измерений на двух исходных частотах GPS с разделёнными часами имеет вид:

$$\begin{cases}
 P_1^{G,j} = R_C^j + h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + m^j \Delta D_w + dT_{P1}^G - dt_{P1}^{G,j} + I_1^j + \varepsilon_{P1}^G, \\
 P_2^{G,j} = R_C^j + h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + m^j \Delta D_w + dT_{P2}^G - dt_{P2}^{G,j} + k^G I_1^j + \varepsilon_{P2}^G, \\
 L_1^{G,j} = R_C^j + h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + m^j \Delta D_w + dT_{L1}^G - dt_{L1}^{G,j} - I_1^j - \lambda_1^G N_1^{G,j} + \varepsilon_{L1}^G, \\
 L_2^{G,j} = R_C^j + h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + m^j \Delta D_w + dT_{L2}^G - dt_{L2}^{G,j} - k^G I_1^j - \lambda_2^G N_2^{G,j} + \varepsilon_{L2}^G,
 \end{cases} \quad (3.1)$$

где $dT_{P1}^G = dT_{REC}^G + b_{r,P1}^G$ и $dT_{P2}^G = dT_{REC}^G + b_{r,P2}^G$ – кодовые смещения показаний часов приёмника потребителя относительно шкалы системы с учётом кодовых аппаратурных смещений $b_{r,P1}^G$ и $b_{r,P2}^G$ измерений $P_1^{G,j}$ и $P_2^{G,j}$, $dT_{L1}^G = dT_{REC}^G + b_{r,L1}^G$ и $dT_{L2}^G = dT_{REC}^G + b_{r,L2}^G$ – фазовые смещения показаний часов приёмника потребителя относительно шкалы системы с учётом фазовых аппаратурных смещений $b_{r,L1}^G$ и $b_{r,L2}^G$ измерений $L_1^{G,j}$ и $L_2^{G,j}$, $dt_{P1}^{G,j} = dt_{SAT}^{G,j} + b_{P1}^{j,G}$ и $dt_{P2}^{G,j} = dt_{SAT}^{G,j} + b_{P2}^{j,G}$ – кодовые смещения показаний часов j-го спутника с учётом аппаратурных смещений $b_{P1}^{j,G}$, $b_{P2}^{j,G}$ измерений $P_1^{G,j}$ и $P_2^{G,j}$, $dt_{L1}^{G,j} = dt_{SAT}^{G,j} + b_{L1}^{j,G}$ и

$dt_{L_2}^{G,j} = dt_{SAT}^{G,j} + b_{L_2}^{j,G}$ - фазовые смещения показаний часов j -го спутника на исходных частотах с учётом аппаратурных смещений $b_{L_1}^{j,G}$ и $b_{L_2}^{j,G}$ измерений $L_1^{G,j}$ и $L_2^{G,j}$, I_1^j - ионосферная задержка сигнала j -го спутника (м) на 1-ой частоте GPS f_1^G , $k^G = (f_1^G/f_2^G)^2$.

Оцениваемыми параметрами модели (3.1) являются $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta D_w, dT_{P_1}^G, dT_{P_2}^G, dT_{L_1}^G$ и $dT_{L_2}^G, \lambda_1^G N_1^{G,1} \dots \lambda_1^G N_1^{G,Msat}, \lambda_2^G N_2^{G,1} \dots \lambda_2^G N_2^{G,Msat}, I_1^1 \dots I_1^{Msat}$. В режиме Integer PPP разделённые поправки к показаниям спутниковых часов $dt_{P_1}^{G,j}, dt_{P_2}^{G,j}, dt_{L_1}^{G,j}, dt_{L_2}^{G,j}$ считаются известными из сетевого решения. Из-за присутствия разделённых часов и ионосферных задержек система (3.1) является сингулярной, дефицит ранга равен трём.

В NRCan для устранения влияния ионосферных задержек была предложена ионосферосвободная модель измерений GPS с разделёнными часами:

$$\begin{cases} P_3^{G,j} = R_C^j + h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + m^j \Delta D_w + dT_{P_3}^G - dt_{P_3}^{G,j} + \varepsilon_{P_3}^G, \\ L_3^{G,j} = R_C^j + h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + m^j \Delta D_w + dT_{L_3}^G - dt_{L_3}^{G,j} - \lambda_3^G N_3^{G,j} + \varepsilon_{L_3}^G, \\ A_4^{G,j} = b_{r,A_4}^G - b_{A_4}^{j,G} - \lambda_4^G N_4^{G,j} + \varepsilon_{A_4}^G, \end{cases} \quad (3.2)$$

где $A_4^{G,j}$ - комбинация измерений Мельбурна-Вуббена, $\lambda_4^G N_4^{G,j} = \lambda_1^G N_1^{G,j} - \lambda_2^G N_2^{G,j}$ - целочисленная неоднозначность на разностной шкале измерений (м); $dT_{P_3}^G = (dT_{REC}^G + b_{r,P_3}^G)$, $dt_{P_3}^{G,j} = (dt_{SAT}^{G,j} + b_{P_3}^{j,G})$ - кодовые смещения показаний часов приёмника потребителя и j -го спутника, учитывающие аппаратурные смещения измерений $P_3^{G,j}$; $dT_{L_3}^G = (dT_{REC}^G + b_{r,L_3}^G)$, $dt_{L_3}^{G,j} = (dt_{SAT}^{G,j} + b_{L_3}^{j,G})$ - фазовые смещения показаний часов приёмника потребителя и j -го спутника, учитывающие аппаратурные смещения измерений $L_3^{G,j}$; $b_{r,A_4}^G, b_{A_4}^{j,G}$ - аппаратурные смещения приёмника потребителя и j -го спутника в измерении $A_4^{G,j}$; $\varepsilon_{A_4}^G$ - шумовая ошибка измерения $A_4^{G,j}$. В режиме Integer PPP разделённые поправки к показаниям спутниковых часов $dt_{P_3}^{G,j}, dt_{L_3}^{G,j}, b_{A_4}^{j,G}$ известны из сетевого решения. В силу присутствия разделённых часов система линейаризованных уравнений (3.2) является сингулярной, дефицит ранга равен двум.

Системы (3.1)-(3.2) могут быть записаны в обобщённом матричном виде

$$\mathbf{y}_{m \times 1} = \mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{x}_{n \times 1}, \quad (3.3)$$

где $\mathbf{x}_{n \times 1}$ - вектор оцениваемых параметров, $\mathbf{A}_{m \times n}$ - информационная матрица, $\mathbf{y}_{m \times 1}$ - вектор измерений с известной ковариационной матрицей \mathbf{W}^{-1} . Система (3.3) является несовместной недоопределённой, т.е. $\mathbf{y} \notin R(\mathbf{A})$, $R(\mathbf{A}) \subset \mathbf{R}^m$ и для ранга r матрицы \mathbf{A}

выполняется условие $r < \min(m, n)$. Это означает, что система (3.3) имеет бесконечное множество решений наименьших квадратов (МНК-решений), т.е. является сингулярной.

В третьей главе устанавливается, что в пространстве оцениваемых параметров оси системы координат, вдоль которых откладываются геометрические параметры $(\Delta x, \Delta y, \Delta z$ и $\Delta D_w)$, являются ортогональными ядру $N(A)$ матрицы A системы линейных уравнений (3.3). Из этого свойства следует, что, несмотря на сингулярность системы (3.3), геометрические параметры могут быть оценены однозначно. В модели измерений (3.2) дополнительным параметром, оцениваемым однозначно, является смещение $dT_{P_3}^G$. Все остальные параметры системы (3.3) оцениваются неоднозначно. Дефицит ранга предлагается преодолевать путём формирования линейных комбинаций неоднозначно оцениваемых параметров на основе теории S-преобразования, развитой применительно к геодезическим сетям, с сохранением целочисленности комбинаций неоднозначностей.

Указанное свойство системы линейных уравнений (3.3) позволяет в задаче местоопределения (на примере модели измерений (3.2)) использовать следующее блочное разбиение матрицы A :

$$\begin{aligned}
 y = Ax &\Leftrightarrow \begin{bmatrix} y_I \\ y_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_I & A_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I \\ x_{II} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow y &= \underbrace{\begin{bmatrix} A_r & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_r & 0 & 1 & 0 & A_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & A_n \end{bmatrix}}_{3Msat \times (7+2Msat)} \underbrace{\begin{bmatrix} r & dT_{P_3} & dT_{L_3} & dT_{A_4} & \lambda_3^G N_3^G & \lambda_4^G N_4^G \end{bmatrix}^T}_{(7+2Msat) \times 1} \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

где вектор x_I содержит геометрические параметры $r = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta D_w]^T$ и смещение $dT_{P_3}^G$ (параметры, оцениваемые однозначно), A_I - соответствующий блок матрицы A , x_{II} - неоднозначно оцениваемые параметры, которым соответствует блок A_{II} матрицы A , A_n - блок матрицы A , связывающий y с $\lambda_3^G N_3^G$ или $\lambda_4^G N_4^G$, 1 - единичный вектор соответствующей размерности. При разбиении (3.4) выполняется условие $R^{3Msat} = R(A_I) \oplus R(A_{II})$.

Для получения единственного решения вводятся в рассмотрение ортогональные базисы S и S^\perp линейных векторных подпространств $R(S)$ и $R(S^\perp)$ такие, что

$$\begin{cases} R^n = N(A_{II}) \oplus R(S), \\ R^n = R(S) \oplus R(S^\perp) \end{cases} \quad (3.5)$$

В плоскости x_2x_3 (рис. 2) для заданного базиса S всё множество векторов x_{II} системы $y_{II} = A_{II}x_{II}$ может быть спроектировано на подпространство $R(S)$ вдоль ядра $N(A)$:

$$x^S = P_{R(S),N(A)}x_{II}, \tag{3.6}$$

где $P_{R(S),N(A)}$ - проекционная матрица на $R(S)$ вдоль $N(A)$. Функциональное преобразование (3.6) порождает те комбинации переменных системы $y_{II} = A_{II}x_{II}$, которые оцениваются однозначно. Условие (3.6) может быть также записано как $(S^\perp)^T x_{II} = 0$, тогда система $y_{II} = A_{II}x_{II}$ расширяется до вида

$$\begin{bmatrix} y_{II} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{II} \\ (S^\perp)^T \end{bmatrix} x_{II}, \tag{3.7}$$

где матрица $A_{II}^* = \begin{bmatrix} A_{II} \\ (S^\perp)^T \end{bmatrix}$ имеет полный ранг, т.е. система (3.7) является несовместной переопределённой системой с единственным МНК-решением \hat{x}_{II}^* . С учётом (3.7) система (3.4) преобразуется к виду

$$\begin{bmatrix} y_I \\ y_{II} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_I & A_{II} \\ 0 & (S^\perp)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I \\ x_{II} \end{bmatrix} \Leftrightarrow y^* = A^* x \tag{3.8}$$

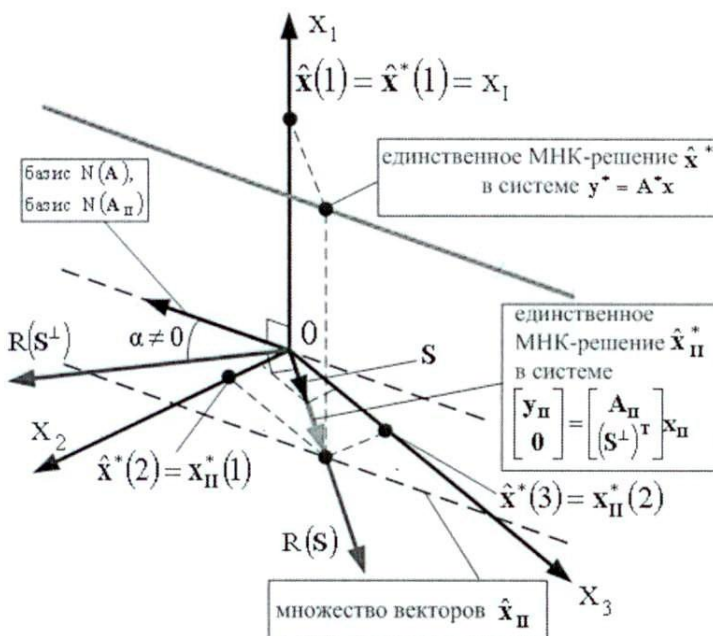


Рис. 2. Упрощённый геометрический пример, поясняющий общий случай выбора базиса S

В общем случае базис S в соответствии с (3.5) может быть задан произвольно (рис.2). Однако на практике удобно выбирать базис S так, чтобы подпространство $R(S)$ было ортогонально такому числу координатных осей, которое равно дефициту ранга в системе уравнений вида (3.3). В этом случае компоненты векторов x^S , соответствующие этим ортогональным

координатным осям, являются нулевыми, а остальные компоненты векторов \mathbf{x}^S смещаются на величину комбинации переменных, откладываемых вдоль ортогональных осей. Тогда вместо системы (3.8) можно использовать систему

$$\mathbf{y} = \underline{\mathbf{A}}^* \underline{\mathbf{x}}^* \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{y}_I \\ \mathbf{y}_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_I & \mathbf{A}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_I \\ \mathbf{x}_{II} \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

где $\underline{\mathbf{x}}_{II}$ содержит только ненулевые компоненты вектора \mathbf{x}^S , а в матрице $\underline{\mathbf{A}}_{II}$ отсутствуют столбцы, соответствующие координатным осям, ортогональным к $R(\mathbf{S})$. При этом матрица $\underline{\mathbf{A}}_{II}$ является матрицей полного ранга, а размерность вектора $\underline{\mathbf{x}}^*$ равна рангу матрицы $\underline{\mathbf{A}}^*$. Таким образом, переход от системы (3.3) к (3.9) уменьшает число оцениваемых линейных комбинаций в векторе $\underline{\mathbf{x}}_{II}$ до ранга матрицы $\underline{\mathbf{A}}_{II}$.

Функциональные компоненты подвектора \mathbf{x}_{II} в (3.4), ортогонально координатным осям которых выбрано подпространство $R(\mathbf{S})$, образуют линейные комбинации со всеми остальными функциональными компонентами подвектора \mathbf{x}_{II} (3.4). Поэтому для сохранения целочисленности линейных комбинаций целочисленных функциональных компонент подвектора \mathbf{x}_{II} в (3.4) подпространство $R(\mathbf{S})$ необходимо выбирать ортогонально координатным осям, соответствующим целочисленным неоднозначностям псевдофазовых измерений подвектора \mathbf{x}_{II} в (3.4). Для этого в модели (3.2) (модели (3.1)) базис \mathbf{S} необходимо выбирать так, чтобы $R(\mathbf{S})$ было ортогонально двум координатным осям, соответствующим неоднозначностям $\lambda_3^G N_3^{G,j}$ и $\lambda_4^G N_4^{G,j}$ ($\lambda_1^G N_1^{G,j}$ и $\lambda_2^G N_2^{G,j}$) выбранного j -го спутника. Указанные два параметра будут формировать с остальными параметрами вектора \mathbf{x}_{II} линейные оцениваемые комбинации. В работе также рассмотрена модель измерений на исходных частотах системы ГЛОНАСС.

Наличие в модели измерений (3.1) ионосферных задержек затрудняет её использование на практике. В работе разработан метод фильтрации, позволяющий не оценивать мешающие параметры, к которым относятся ионосферные задержки сигнала (исключающий фильтр Калмана). Оценка вектора оцениваемых параметров \mathbf{a} на v -ый момент фильтрации в исключаяющем фильтре вычисляется как

$$\hat{\mathbf{a}}_v = \mathbf{C}_{v-1} \hat{\mathbf{a}}_{v-1} + \mathbf{K}_v (\mathbf{z}_v - \mathbf{A}_v \mathbf{C}_{v-1} \hat{\mathbf{a}}_{v-1}) \quad (3.10)$$

где \mathbf{C}_{v-1} – матрица прогноза вектора \mathbf{a} с $(v-1)$ -го на v -й момент фильтрации,

$\mathbf{K}_v = \mathbf{G}_v \mathbf{A}_v^T \mathbf{W}_{av}$, $\mathbf{G}_v^{-1} = (\mathbf{C}_{v-1}^T \mathbf{G}_{v-1} \mathbf{C}_{v-1} + \mathbf{F}_v)^{-1} + \mathbf{A}_v^T \mathbf{W}_{av} \mathbf{A}_v$, \mathbf{F}_v - корреляционная матрица шумов прогноза, \mathbf{G}_v - ковариационная матрица ошибок оценивания вектора $\hat{\mathbf{a}}_v$, \mathbf{W}_{av} - модифицированная весовая матрица вектора измерений \mathbf{z}_v на v -ый момент фильтрации.

Форма записи (3.10) является разновидностью ковариационной формы записи и позволяет работать с весовой матрицей \mathbf{W}_{av} , которая является сингулярной.

В четвёртой главе поясняется использование информации о целочисленности неоднозначностей псевдофазовых измерений для снижения периода сходимости к точному решению. Укрупненная блок-схема алгоритма высокоточного местоопределения в режиме Integer PPP приведена на рис. 3. На выходе фильтрационной процедуры оценивания схемы рис. 3 применительно к модели (3.2) доступны вектор действительных оценок

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{a}} \\ \hat{\mathbf{N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{r}} & d\hat{T}_{P3}^G & (d\hat{T}_{L3}^G - \hat{\lambda}_3^G \mathbf{N}_3^{G,q}) & (b_{r,A4}^G - \hat{\lambda}_4^G \mathbf{N}_4^{G,q}) & \vdots & (\lambda_3^G \mathbf{N}_3^G - \hat{\mathbf{1}} \cdot \lambda_3^G \mathbf{N}_3^{G,q}) & (\lambda_4^G \mathbf{N}_4^G - \hat{\mathbf{1}} \cdot \lambda_4^G \mathbf{N}_4^{G,q}) \end{bmatrix}^T$$

(7+2Msat-2)×1



и соответствующая ему ковариационная матрица ошибок оценивания

$$\hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{P}}_{aa} & \hat{\mathbf{P}}_{aN} \\ \hat{\mathbf{P}}_{Na} & \hat{\mathbf{P}}_{NN} \end{bmatrix}_{(7+2Msat-2) \times (7+2Msat-2)}$$

($\hat{\mathbf{N}}$ -

вектор оценок целочисленных комбинаций вектора \mathbf{x}_{II} системы (3.9), \mathbf{a} - остальные параметры). При разрешении целочисленной неоднозначности в режиме Integer PPP осуществляется минимизация в целых числах \mathbf{N} следующей квадратичной формы

Рис. 3. Укрупненная блок-схема алгоритма местоопределения в режиме Integer PPP

$$D(\mathbf{N}) = (\mathbf{N} - \hat{\mathbf{N}})^T (\hat{\mathbf{P}}_{NN})^{-1} (\mathbf{N} - \hat{\mathbf{N}}) = d \xrightarrow{\mathbf{N}} \min, \quad (4.1)$$

для повышения эффективности поиска применяется целочисленное унимодулярное преобразование (ЦУМП, в англоязычной литературе LAMBDA-method).

Для оценки достоверности целочисленных векторов, минимизирующих (4.1), в работе используется контрастное отношение (ratio test), равное отношению второго по возрастанию значения квадратичной формы (4.1) к минимальному: $k_{\text{KONTR}} = d_2 / d_1$, которое сравнивается с постоянным пороговым значением $K_{\text{THRESHOLD}}$.

В случае сбоя в измерениях (например, при проезде через тоннель или срыве слежения за фазой несущей) в навигационном приёмнике происходит практически мгновенная деградация оценок $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, после чего вновь требуется время для сходимости решения. Для уменьшения периода сходимости этого “послесбойного” решения в работе предлагается использовать стабильность ионосферных и тропосферных задержек (атмосферные ограничения).

На рис. 4 приведены сравнительные результаты местоопределения в режимах Integer PPP и Float PPP. Период сходимости целочисленного решения режима Integer PPP (кривая Integer PPP P3L3A4 fixed solution) до точности 1 см составил около 600с, тогда как в режиме Float PPP (кривая Float PPP P3L3) - 18 часов (через 1 час обработки измерений ошибка местоопределения была 0.23 м, на рис. 4).

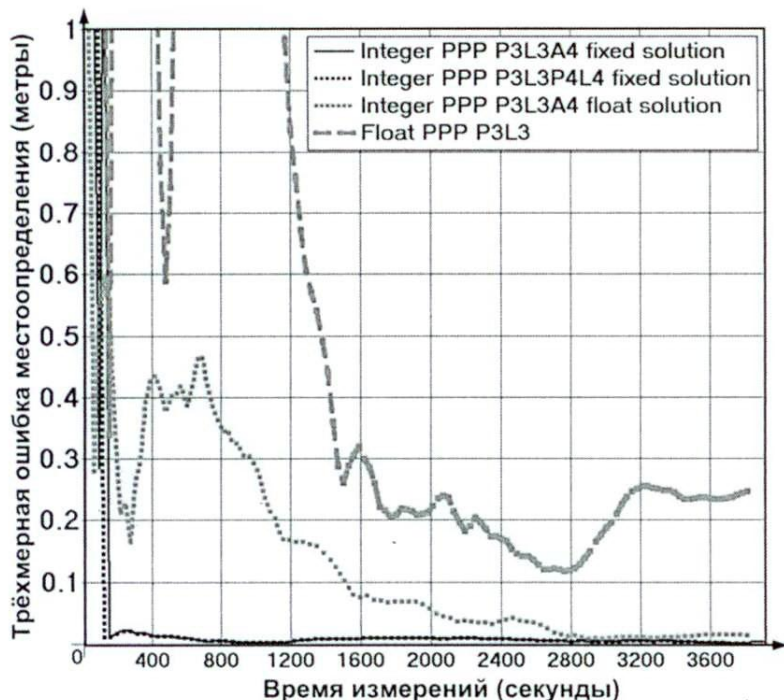


Рис. 4. Сравнительные результаты местоопределения в режимах Integer PPP и Float PPP

В работе были использованы разделённые поправки к показаниям спутниковых часов, вычисленные по глобальной сети станций и предоставленные для исследования и тестирования NRCan, а также разделённые поправки к показаниям часов спутников, вычисленные автором работы по локальной сети наземных станций. Рис. 4 соответствует использованию поправок от NRCan.

Пятая глава посвящена вычислению разделённых поправок к показаниям спутниковых часов по сети наземных станций (сетевое решение). Местоопределение в режиме Integer PPP возможно только при использовании поправок, вычисленных по сети наземных станций (продукты сетевого решения). Описанное в третьей главе правило выбора базиса S , позволяющее сохранить целочисленность оцениваемых комбинаций неоднозначностей, может быть применено и к задаче сетевого решения режима Integer PPP.

Для модели измерений (3.2) система линейных уравнений, соответствующая сетевому решению при наличии N_{st} станций и M_{sat} спутников в обработке, может быть записана в следующем матричном виде

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y}_{N_{meas}}^N &= \mathbf{A}_{N_{meas} \times N_{est}}^N \mathbf{X}_{N_{est} \times 1}^N + \boldsymbol{\varepsilon}_{N_{meas} \times 1}^N \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \mathbf{y}^N &= \left[\mathbf{A}_I^N \quad \mathbf{A}_{II}^N \right] \begin{bmatrix} \mathbf{X}_I^N \\ \mathbf{X}_{II}^N \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}^N \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{P3}^N \\ \mathbf{y}_{L3}^N \\ \mathbf{y}_{A4}^N \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_r^N & \mathbf{A}_{P3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}^{P3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_r^N & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{L3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}^{L3} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{A4} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}^{A4} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}^N \\ d\mathbf{T}_{P3}^{G,N} \\ d\mathbf{T}_{L3}^{G,N} \\ \mathbf{b}_{r,A4}^{G,N} \\ dt_{P3}^{G,N} \\ dt_{L3}^{G,N} \\ \mathbf{b}_{A4}^{G,N} \\ \lambda_3^G \mathbf{N}_3^{G,N} \\ \lambda_4^G \mathbf{N}_4^{G,N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{P3}^N \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{L3}^N \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{A4}^N \end{bmatrix}, \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

где $N_{meas} = 3N_{st} \cdot M_{sat}$ - число измерений \mathbf{y}^N ; $N_{est} = 3M_{sat} + 4N_{st} + 2M_{sat} \cdot N_{st}$ - число оцениваемых параметров; $\mathbf{A}_{r,(N_{st} \cdot M_{sat}) \times N_{st}}^N$ - блок информационной матрицы \mathbf{A}^N сетевого решения, соответствующий геометрическим параметрам сетевого решения $\mathbf{r}_{N_{st} \times 1}^N$ (N_{st} тропосферных задержек сигнала $\Delta D_{w,i}$ ($i = \overline{1, N_{st}}$) для станций сети); $\mathbf{A}_{P3,(N_{st} \cdot M_{sat}) \times N_{st}} = \mathbf{A}_{L3} = \mathbf{A}_{A4}$ - блоки информационной матрицы \mathbf{A}^N сетевого решения, соответствующие векторам $d\mathbf{T}_{P3}^{G,N}$, $d\mathbf{T}_{L3}^{G,N}$ и $\mathbf{b}_{r,A4}^{G,N}$ разделённых смещений показаний часов приёмников сети по измерениям $P_3^{G,j}$, $L_3^{G,j}$ и $A_4^{G,j}$, соответственно; $\mathbf{A}_{(N_{st} \cdot M_{sat}) \times M_{sat}}^{P3} = \mathbf{A}^{L3} = \mathbf{A}^{A4}$ - блоки информационной матрицы \mathbf{A}^N сетевого решения, соответствующие векторам $dt_{P3}^{G,N}$, $dt_{L3}^{G,N}$ и $\mathbf{b}_{A4}^{G,N}$ разделённых смещений показаний часов M_{sat} спутников по измерениям $P_3^{G,j}$, $L_3^{G,j}$ и $A_4^{G,j}$, соответственно; $\lambda_3^G \mathbf{N}_{3,(N_{st} \cdot M_{sat}) \times M_{sat}}^{G,N}$ и

$\lambda_4^{G,N} N_{4,(Nst+Msat) \times Msat}^{G,N}$ - вектора целочисленных неоднозначностей $\lambda_3^G N_3^{G,j}$ и $\lambda_4^G N_4^{G,j}$, соответствующие измерениям $L_3^{G,j}$ и $A_4^{G,j}$, соответственно.

Оцениваемые в (5.1) разделённые поправки к показаниям спутниковых часов $dt_{P3}^{G,N}$, $dt_{L3}^{G,N}$ и $b_{A4}^{G,N}$ оцениваются неоднозначно, в виде комбинаций $\overline{dt_{P3}^{G,N}}$, $\overline{dt_{L3}^{G,N}}$ и $\overline{b_{A4}^{G,N}}$ с целочисленными компонентами вектора X_{II}^N , т.е. являются целочисленно смещёнными. Это не является препятствием для их использования потребителем в режиме Integer PPP, т.к. целочисленные смещения в указанных комбинациях учитываются потребителем в процессе разрешения целочисленной неоднозначности.

Дефицит ранга матрицы A^N равен сумме дефицитов ранга её отдельных блоков A_{P3}^N , A_{L3}^N и A_{A4}^N , соответствующих векторам измерений y_{P3}^N , y_{L3}^N и y_{A4}^N . Для снижения дефицита ранга в каждом из блоков на единицу достаточно выбрать опорную станцию (reference, REF), оценка смещений показаний часов которой $dT_{P3,REF}^{G,N}$, $dT_{L3,REF}^{G,N}$ и $b_{r,A4,REF}^{G,N}$ в сетевом решении осуществляться не будет. После этого в (5.1) останется дефицит ранга величиной $(Nst + Msat - 1)$ в блоках A_{L3}^N и A_{A4}^N .

Базис S , дополняющий $N(A_{II}^N)$ до R^{Nest} ($N(A_{II}^N) \oplus R(S) = R^{Nest}$) выбирается так, чтобы $R(S)$ было ортогонально такому числу координатных осей параметров X_{II}^N (5.1), которое равно дефициту ранга матрицы A^N . В этом случае все составляющие вектора X_I^N (т.е. геометрические параметры $r_{Nst \times 1}^N$) оцениваются однозначно, а все ненулевые составляющие вектора X_{II}^N оцениваются неоднозначно в виде комбинаций (несовместная недоопределённая система (5.1) преобразуется в несовместную переопределённую систему с единственным МНК-решением). Для сохранения целочисленности оцениваемых линейных комбинаций неоднозначностей вектора X_{II}^N , необходимо выбрать $R(S)$ ортогональным координатным осям неоднозначностей $\lambda_3^G N_3^{G,j}$ и $\lambda_4^G N_4^{G,j}$ ($j = \overline{1, Nst + Msat - 1}$), соответствующих $(Nst + Msat - 1)$ парам “спутник-станция” рассматриваемой сети. Выбор указанного набора неоднозначностей может быть сформулирован в терминах теории графов. Сеть из Nst станций и Msp спутников может быть описана двудольным графом измерений (рис. 5). При этом рёбра графа соответствуют целочисленным неоднозначностям $\lambda_3^G N_3^{G,j}$ или $\lambda_4^G N_4^{G,j}$ ($j = \overline{1, Nst \cdot Msat}$). Для устранения дефицита ранга в блоках A_{L3}^N и A_{A4}^N может использоваться один граф.

Подпространство $R(S)$ выбирается ортогонально координатным осям таких

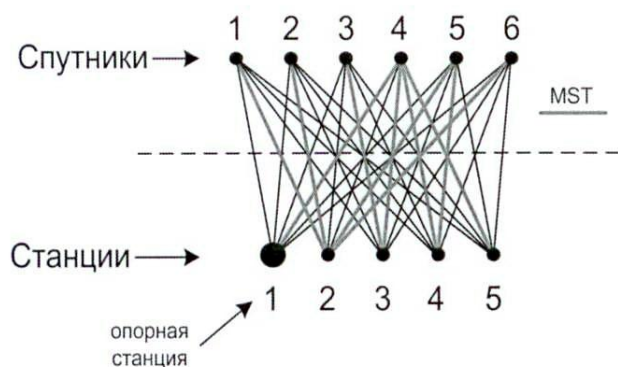


Рис. 5. Двудольный граф измерений

неоднозначностей, которым соответствуют рёбра минимального остоного дерева (minimum spanning tree, MST, рис. 5). В работе для вычисления разделённых поправок к показаниям спутниковых часов по модели измерений (3.2) осуществлялась обработка измерений локальной сети европейских станций.

Эффективность использования в режиме Integer PPP вычисленных разделённых поправок сравнивалась с таковой для поправок, вычисленных NRCan по глобальной сети станций. На рис. 6 приводятся зависимости трёхмерных ошибок местоопределения в режиме Integer PPP от времени для двух указанных наборов поправок. Как видно, вычисленные по локальной и глобальной сетям разделённые поправки обеспечивают сравнимый период сходимости режима Integer PPP.

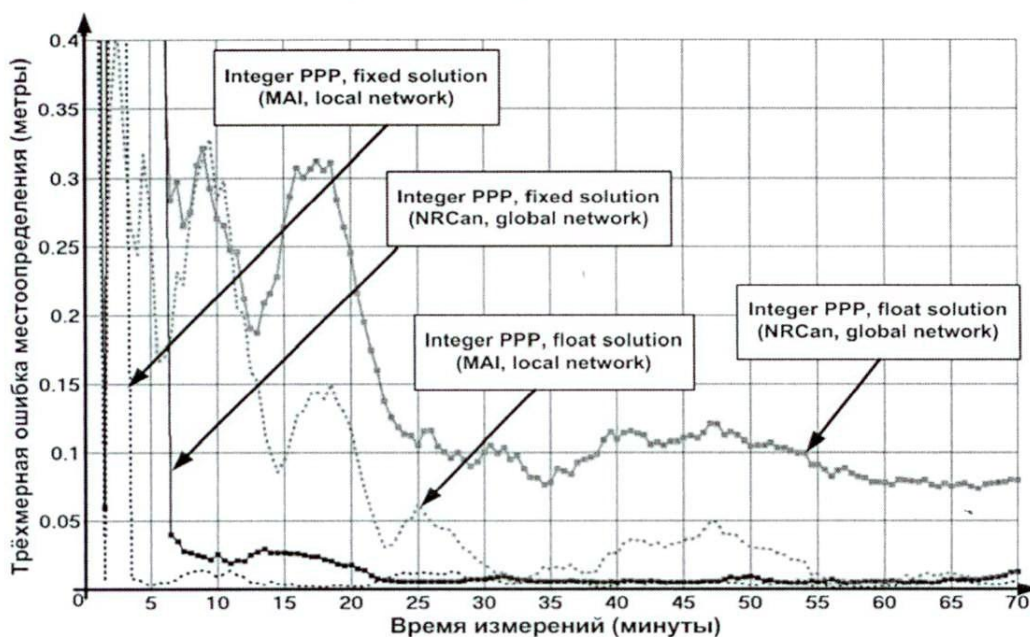


Рис. 6. Оперативность местоопределения в режиме Integer PPP

В заключении проанализированы основные результаты диссертации:

1. Разработан и программно реализован алгоритм вычисления по локальной сети наземных станций разделённых поправок к показаниям спутниковых часов в виде линейных комбинаций исходных параметров, которые позволяют потребителю

- реализовать высокоточное местоопределение в ГНСС с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.
2. Разработан и исследован алгоритм высокоточного абсолютного местоопределения потребителя в ГНСС, который позволяет существенно (в десятки и даже сотни раз) снизить период сходимости решения высокоточного местоопределения в ГНСС.
 3. Выявлена ортогональность направлений ряда параметров ядру матрицы сингулярных систем линеаризованных уравнений ГНСС, что является теоретической основой построения алгоритмов оценивания абсолютных координат потребителя с разрешением неоднозначности псевдофазовых измерений.
 4. Разработаны теоретические и практические вопросы преодоления на основе теории S-преобразования дефицита ранга систем линейных уравнений при высокоточном местоопределении в ГНСС в абсолютном режиме с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений.
 5. Разработан фильтрационный метод, позволяющий осуществлять высокоточное абсолютное местоопределение потребителя в ГНСС при использовании разработанной модели измерений на исходных частотах (исключающий фильтр Калмана).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы изложены в 17 печатных работах, среди которых 7 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертаций, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте, тезисы 5 международных конференций, 4 публикации в сборниках докладов Всероссийских и региональных конференций:

1. Поваляев А. А., Подкорытов А. Н. К задаче высокоточного определения абсолютных координат в глобальных навигационных спутниковых системах. //Радиотехника, Радиотехника, Москва, 2014. – №1 – С. 15-19.
2. Дворкин В. В., Карутин С. Н., Глухов П. Б., Подкорытов А. Н. Перспективный высокоточный комплекс функционального дополнения глобальных навигационных систем на базе системы дифференциальной коррекции и мониторинга. //Успехи современной радиоэлектроники, Радиотехника, Москва, 2013. – № 1 – С. 23-31.
3. Подкорытов А. Н., Сорокин М. А. Высокоточное определение координат потребителя в абсолютном режиме в глобальных навигационных спутниковых системах

с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений. //Информационно-измерительные и управляющие системы, Радиотехника, Москва, 2012. – Т. 10, №10 – С.45-51.

4. Подкорытов А. Н. Высокоточное местоопределение в абсолютном режиме в ГНСС с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений. //Электронный журнал Труды МАИ, Москва, 2012. – № 59.

5. Подкорытов А.Н. Математическая модель смещения фазовых центров антенн при высокоточном местоопределении в глобальных навигационных комплексах. //Электронный журнал Труды МАИ, Москва, 2012. – №50.

6. Подкорытов А.Н. Методы оценивания и компенсации систематических смещений в измерениях псевдодалностей и псевдофаз. //Информационно-измерительные и управляющие системы, Радиотехника, Москва, 2011. – Т. 9, №8 – С. 23-30.

7. Подкорытов А.Н. Высокоточное определение координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах с использованием уточненной эфемеридно-временной информации. //Вестник Московского авиационного института, Москва, 2011. – Т. 18, №3 – С. 233-239.

8. Подкорытов А. Н. Высокоточное местоопределение в ГНСС с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений и атмосферными ограничениями. //X Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2013, Красноярск, 12-13.09.2013.

9. Podkorytov A. N. Precise Point Positioning in GNSS with Ambiguity Resolution and Atmospheric Constraints. 2013 International Siberian Conference on Control and Communication (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12-13, 2013.

10. Povalyaev A., Podkorytov A. Ambiguity resolution of phase measurements in Precise Point Positioning working on initial frequencies. GNSS Precise Point Positioning Workshop: Reaching Full Potential. 12-14 June 2013 – Ottawa, Canada.

11. Подкорытов А.Н. Использование уточненной эфемеридно-временной информации для высокоточного определения координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах. //IX Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2011, Красноярск, 15-16.09.2011.

12. Подкорытов А.Н. Высокоточное определение координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах с использованием уточненной эфемеридно-временной информации. //III Международная научно-практическая конференция “Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях”, Москва, 28.06-1.07.2011.
13. Подкорытов А. Н. Высокоточное местоопределение в ГНСС в абсолютном режиме с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений: сетевое и пользовательское решения / А. Н. Подкорытов // Московская молодёжная научно-практическая конференция “Инновации в авиации и космонавтике - 2014”, Москва, МАИ, 22-24 апреля 2014. – С. 168-169.
14. Подкорытов А. Н. Работа на исходных частотах при высокоточном местоопределении в глобальных навигационных спутниковых системах с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений / А. Н. Подкорытов //Московская молодёжная научно-практическая конференция “Инновации в авиации и космонавтике - 2013”, Москва, МАИ, 16-18 апреля 2013. – С. 253-254.
15. Подкорытов А. Н. Высокоточное определение абсолютных координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений / А. Н. Подкорытов //Московская молодёжная научно-практическая конференция “Инновации в авиации и космонавтике - 2012”, Москва, МАИ, 17-20 апреля 2012. – С. 118-119.
16. Подкорытов А.Н. Высокоточное определение координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах. / А. Н. Подкорытов. //Научно-практическая конференция студентов и молодых ученых МАИ “Инновации в авиации и космонавтике - 2011”, Москва, МАИ, 26-30 апреля 2011. – С. 63-64.
17. Подкорытов А. Н. Высокоточное определение координат потребителя по измерениям глобальной навигационной спутниковой системы GPS с использованием высокоточной эфемеридно-временной информации. – РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2012616314 от 11.07.2012.