

Введение

В учебном пособии изложены теоретические и методические материалы к лабораторным работам по местоопределению потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС). Рассмотрены абсолютные и относительные методы местоопределения различной точности и оперативности по измерениям систем ГЛОНАСС и GPS. Значительное внимание уделено высокоточному абсолютному местоопределению.

В первом разделе учебного пособия рассмотрена классификация основных методов местоопределения в ГНСС и приведены модели исходных измерений навигационного приёмника. Описано оперативное абсолютное местоопределение по широкополосной эфемеридно-временной информации (ЭВИ), относительное местоопределение по измерениям псевдодалностей, высокоточное относительное местоопределение с использованием псевдофазовых измерений, высокоточное абсолютное местоопределение, а также местоопределение в системах широкозонной дифференциальной коррекции (системы типа SBAS). Наиболее детально описан режим высокоточного абсолютного местоопределения, который активно развивается в настоящее время. Помимо истории развития, традиционной модели измерений, основных этапов алгоритма и особенностей фильтрации, в разделе приведены подробности использования процедуры разрешения целочисленной неоднозначности и обзор промышленных приложений данного режима.

Второй раздел пособия посвящён описанию библиотеки программ RTKLib и двух её основных программ, в которых предлагается выполнять лабораторные работы, — RTKPOST и RTKPLOT. Для данных программ описаны настройки конфигурации и особенности использования, проведён обзор возможностей с графическими примерами.

Третий раздел содержит методические материалы для шести лабораторных работ, выполняемых с использованием библиотеки программ RTKLib: описание работы, задание, порядок выполнения, содержание отчёта, примеры результатов выполнения и варианты исходных данных. Лабораторная работа 1 посвящена исследованию зависимости качества абсолютного местоопределения статического потребителя от точности используемой ЭВИ. В работе рассматривается широкополосная ЭВИ и высокоточная ЭВИ различной

точности. В лабораторной работе 2 исследуется зависимость качества абсолютного местоопределения статического потребителя от частоты оценивания его координат и частоты поправок к показаниям часов спутников. В работе анализируется влияние интерполяции временных данных используемой ЭВИ на результаты местоопределения. В лабораторной работе 3 сравнивается качество абсолютного местоопределения потребителя при использовании измерений систем ГЛОНАСС, GPS и в совмещённом режиме. Лабораторная работа 4 посвящена исследованию влияния задержки ионосферы на точность абсолютного местоопределения потребителя. На примере системы GPS сравнивается использование модели Клубучара, ионосферосвободных линейных комбинаций измерений и ионосферных данных в формате IONEX. В лабораторной работе 5 исследуется точность местоопределения статического потребителя при использовании корректирующей информации от систем типа SBAS. Рассматривается использование SBAS-поправок от российской системы СДКМ и европейской системы EGNOS. В лабораторной работе 6 исследуется точность оперативного абсолютного и относительного местоопределения динамического потребителя, в качестве которого в работе используются легковой автомобиль в условиях городской застройки, локомотив на железнодорожных путях и гидрографическое судно в Финском заливе.

Предполагается, что к выполнению лабораторных работ приступают студенты, ранее усвоившие основные принципы и особенности функционирования ГНСС ГЛОНАСС и GPS.

При необходимости автор по запросу готов прислать исходные данные для выполнения описанных лабораторных работ.

Учебное пособие предназначено для бакалавриата, магистрантов, специалистов и аспирантов, обучающихся по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 24.00.00 «Авиационная и ракетно-космическая техника» (специальности 24.03.02 «Системы управления движением и навигация», 24.05.06 «Системы управления летательными аппаратами», 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов»), 11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи» (специальность 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы») и по научной специальности ВАК 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация». Будет полезно аспирантам и специалистам соответствующих направлений.

1 Методы местоопределения в ГНСС

1.1. Классификация методов местоопределения в ГНСС

Классификация основных методов местоопределения (позиционирования) в ГНСС представлена на рис. 1.1 [1]. Верхняя часть схемы на рис. 1.1 отображает теоретически хорошо разработанные методы местоопределения, для которых можно достаточно чётко отделить абсолютный режим местоопределения в ГНСС от относительного (дифференциального). Нижняя часть схемы на рис. 1.1 относится к методам, которые в настоящее время активно развиваются. Далее отдельные блоки данной схемы рассматриваются более подробно.

Рассмотренная классификация не является всеобъемлющей, так как многообразие технологий местоопределения в ГНСС и терминов для их обозначения временами затрудняет однозначное отнесение того или иного режима к конкретной группе методов. Например, известны также широко применяемые в аэропортах в системах навигации и посадки летательных аппаратов системы типа GBAS (Ground Based Augmentation System, ранее использовалась также аббревиатура LAAS, Local-Area Augmentation System), которые не отражены на рис. 1.1. Системы такого типа включают в себя несколько опорных станций, расположенных в районе взлётно-посадочной полосы. При этом используются как кодовые измерения, так и неоднозначные псевдофазовые измерения.

1.2. Модели измерений навигационного приёмника

Детальное описание математических моделей исходных измерений навигационного приёмника, их линейных комбинаций и ряда систематических смещений выходит за рамки данного пособия и может быть найдено, например, в [2–4]. В данном разделе рассмотрены упрощённые модели измерений псевдодалности и псевдофазы для системы GPS [5], отражающие наиболее важные систематические смещения в контексте описанных лабораторных работ. Выраженные в метрах двухчастотные измерения псевдодалностей и псевдофаз на исходных частотах системы GPS могут быть записаны в

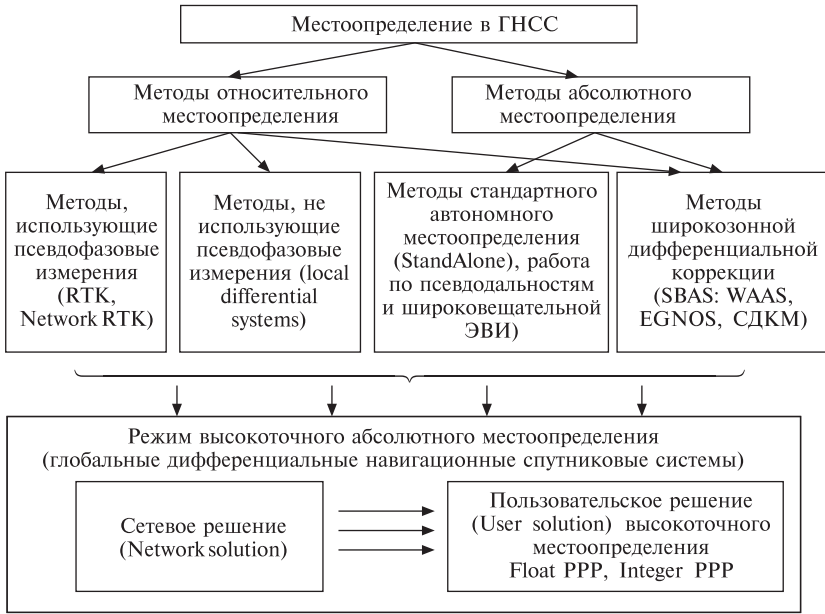


Рис. 1.1. Классификация методов местоопределения в ГНСС

следующем упрощённом виде:

$$\begin{cases}
 P_1^{G,j} = R^j + dT_{REC}^G + b_{r,P1}^G - dt_{SAT}^{G,j} - b_{P1}^{G,j} + m^j \Delta D_W + T^{G,j} + \\
 + I_1^{G,j} + \varepsilon_{P1}^{j,G}; \\
 P_2^{G,j} = R^j + dT_{REC}^G + b_{r,P2}^G - dt_{SAT}^{G,j} - b_{P2}^{G,j} + m^j \Delta D_W + T^{G,j} + \\
 + k^G I_1^{G,j} + \varepsilon_{P2}^{j,G}; \\
 L_1^{G,j} = R^j + dT_{REC}^G + b_{r,L1}^G - dt_{SAT}^{G,j} - b_{L1}^{G,j} + m^j \Delta D_W + T^{G,j} - \\
 - I_1^{G,j} - \lambda_1^G N_1^{G,j} + \varepsilon_{L1}^{j,G}; \\
 L_2^{G,j} = R^j + dT_{REC}^G + b_{r,L2}^G - dt_{SAT}^{G,j} - b_{L2}^{G,j} + m^j \Delta D_W + T^{G,j} - \\
 - k^G I_1^{G,j} - \lambda_2^G N_2^{G,j} + \varepsilon_{L2}^{j,G},
 \end{cases} \quad (1.1)$$

где:

$P_i^{G,j}$ и $L_i^{G,j}$ — измерения псевдодальности и псевдофазы для j -го спутника GPS на частоте f_i^G ($i = 1, 2$), м;

R^j — расстояние (дальность) между пространственной точкой, координаты которой определяются, в момент проведения измерения t_M и центром масс j -го спутника в момент предшествования t_{PREV}^j к моменту измерения t_M , м;

dT_{REC}^G — смещение показаний часов навигационного приёмника

относительно шкалы времени системы GPS, м;

$b_{r,P1}^G, b_{r,P2}^G$ — кодовые задержки сигналов j -го спутника GPS на частотах f_1^G и f_2^G в аппаратуре навигационного приёмника (r , receiver), м;

$b_{r,L1}^G, b_{r,L2}^G$ — фазовые задержки сигналов j -го спутника GPS на частотах f_1^G и f_2^G в аппаратуре навигационного приёмника, м;

$\lambda_1^G = \frac{c}{f_1^G} \approx 0,1903$ м, $\lambda_2^G = \frac{c}{f_2^G} \approx 0,2442$ м — длины волн несущих колебаний спутников GPS на частотах f_1^G и f_2^G ;

c — скорость света, м/с;

$dt_{SAT}^{G,j}$ — смещение показаний часов j -го спутника GPS относительно шкалы времени системы GPS, м;

$b_{P1}^{G,j}$ и $b_{P2}^{G,j}$ — кодовые задержки в аппаратуре j -го спутника GPS на частотах f_1^G и f_2^G , м;

$b_{L1}^{G,j}$ и $b_{L2}^{G,j}$ — фазовые задержки в аппаратуре j -го спутника GPS на частотах f_1^G и f_2^G , м;

$T^{G,j}$ — расчётное значение наклонной тропосферной задержки сигнала j -го спутника GPS, м;

ΔD_W — некомпенсированная компонента влажной составляющей вертикальной тропосферной задержки, м;

m^j — функция отображения для j -го спутника, б/р;

$I_1^{G,j}$ — наклонная ионосферная задержка сигнала j -го спутника GPS на частоте f_1^G , м;

$k^G = \frac{(f_1^G)^2}{(f_2^G)^2} = \left(\frac{77}{60}\right)^2$ — константа, связывающая несущие частоты f_1^G и f_2^G , широко используемая в GPS, б/р;

$N_1^{G,j}, N_2^{G,j}$ — целочисленные неоднозначности псевдофазовых измерений по j -му спутнику GPS на частотах f_1^G и f_2^G (целые числа, б/р или циклы);

$\varepsilon_{P1}^{G,j}, \varepsilon_{L1}^{G,j}$ и $\varepsilon_{P2}^{G,j}, \varepsilon_{L2}^{G,j}$ — шумовые ошибки измерений псевдодальности и псевдофазы для j -го спутника в навигационном приёмнике на частотах f_1^G и f_2^G , м.

В модели измерений (1.1) не отражены систематические смещения, связанные с неточностью знания координат спутников, с релятивистскими и гравитационными эффектами, с эффектами многолучёвости и приливными смещениями, с наличием смещения фазового центра антенн спутников и приёмника и некоторыми другими. В рассматриваемых далее режимах высокоточного местоопределения потребителя указанные смещения должны быть скомпенсированы в измерениях $P_i^{G,j}$ и $L_i^{G,j}$ модели (1.1). В других режимах местоопределения (не высокоточных) указанные смещения или часть из них на практике могут игнорироваться.

1.3. Стандартный автономный режим местоопределения

Под стандартным автономным режимом местоопределения понимается режим определения абсолютных координат потребителя в реальном времени по широкополосным эфемеридам, сообщаемым навигационными спутниками ГНСС. В англоязычной литературе данный режим часто называется режимом Stand Alone. Навигационный приёмник при этом является полностью автономным и не требует для местоопределения ничего сверх одночастотных измерений псевдодалностей (измерения псевдофазы могут использоваться для сглаживания) и сообщаемой навигационными спутниками широкополосной ЭВИ. Под абсолютными координатами потребителя понимаются координаты, определяемые относительно центра Земли (координаты в гринвичской подвижной системе координат ECEF, Earth-Centered-Earth-Fixed). В среднем ошибка местоопределения потребителя в данном режиме составляет несколько метров [6]. Портативные туристические навигаторы и встроенные в смартфоны навигационные приёмники — это типичные примеры навигационной аппаратуры, работающей в данном режиме местоопределения.

Основными достоинствами данного режима являются оперативность (работа в реальном времени) и автономность. Недостатком данного режима является недостаточная для ряда приложений точность местоопределения, связанная в основном с задержкой сигнала в ионосфере. В одночастотном приёмнике для измерений системы GPS используется ионосферная модель Клобучара, параметры которой передаются в широкополосных эфемериды спутников. Данная модель позволяет одночастотному потребителю скомпенсировать в среднем около 50 % ионосферной задержки сигналов от спутников. В системе ГЛОНАСС для одночастотных приёмников также разработана адаптивная модель ионосферы, параметры которой в ближайшее время планируется включить в широкополосную информацию всей орбитальной группировки.

1.4. Относительный режим местоопределения без использования псевдофазовых измерений

В относительных (дифференциальных) методах координаты потребителя определяются относительно координат базового (опорного) приёмника, расположенного на базовой (опорной) станции, т. е. определяются относительные координаты потребителя. В случае, когда абсолютные координаты базового приёмника известны, могут быть вычислены и абсолютные координаты потребителя. При этом ошибка абсолютных координат потребителя будет включать в себя