

Разрешение целочисленной фазовой неоднозначности абсолютных

ГЛОНАСС-измерений

К.И. Стариков¹ С.Д. Петров¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет

Аннотация

Работа посвящена разрешению целочисленной фазовой неоднозначности при абсолютных определениях координат по спутниковым радионавигационным измерениям ГЛОНАСС. Обсуждается реализация метода MLAMBDA с новыми дополнениями, призванными повысить надежность данного метода и сделать его пригодным для ГЛОНАСС.

Введение

Первоначально позиционирование с помощью измерений сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) выполнялось путем обработки дальномерных кодов, демодулированных из радиосигналов навигационных спутников, таким образом, точность определяемых координат была ограничена несколькими дециметрами. Но вскоре после запуска первых спутников ГЛОНАСС и GPS был обнаружен недокументированный способ точного измерения фазы волны, передающей сигнал с дальномерным кодом, который открыл новую перспективу для повышения точности. Начало появляться множество новых методов обработки ГНСС наблюдений, и эта работа все еще продолжается. В настоящее время в рамках относительных определений ГНСС, то есть, когда неизвестные координаты точки вычисляются относительно фиксированной точки с уже известными координатами, современные методы дают точность до нескольких миллиметров. В то же время, в рамках абсолютных определений ГНСС точность пока не так высока, как для относительных методов. Эта работа посвящена развитию недавно появившегося метода MLAMBDA (Modified Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment — модифицированная корректировка декорреляции неоднозначности методом наименьших квадратов) как для наблюдений GPS, так и для ГЛОНАСС.

Основная проблема с измерениями фазы заключается в том, что они не привязаны ко времени, по сравнению с кодовыми измерениями. В последовательности дальномерного кода, когда каждый фрагмент кода пронумерован, и всегда просто привязать любой фрагмент кодовой последовательности ко времени. В то же время точность кодовых измерений ограничена в лучшем случае несколькими дециметрами. В отличие от этого фаза несущей может быть измерена ГНСС приемником чрезвычайно точно, до долей миллиметра. С другой стороны, измерения фазы никак не могут быть пронумерованы, следовательно, не могут быть привязаны ко времени. Другими словами, каждый фрагмент измерения фазы выглядит так же, как и другой, поскольку количество полных длин волн несущего сигнала, которое помещается между навигационным космическим аппаратом и ГНСС приемником, не может быть измерено непосредственно. Также давно разработан и доведен до совершенства математический аппарат для редукиции при обработке кодовых ГНСС измерений, тогда как обработка фазовых измерений по-прежнему имеет несколько проблем, которые еще не решены полностью. Одной из таких проблем является разрешение целочисленной фазовой неоднозначности навигационного радиосигнала. Абсолютный метод точной обработки ГНСС измерений был предложен в [1] и получил название Precise Point Positioning (точного позиционирования точки — PPP). Первоначально этот метод не учитывал целочисленную неоднозначность фазы. В оригинальном PPP целочисленная неоднозначность фазы рассматривалась как часть общей, не смоделированной ошибки псевдодальности [2]. Позже начали появляться новые версии PPP, которые пытались выделить ошибку целочисленной неоднозначности фазы из общего бюджета ошибок. В настоящее время существует два основных подхода к оценке целочисленной фазовой неоднозначности. Во-первых, методы FCB (fractional cycle base) [3], где аппаратные задержки сигнала калибруются и вычитаются из общей ошибки псевдодальности, а оставшаяся часть рассматривается как ошибка фазы. Во-вторых, методы IRC (integer recovery clock) [3], которые основаны на коррекции бортовых часов навигационного космического аппарата. В работе [3] было показано, что оба метода в принципе эквивалентны. Существует также новый класс методов, основанных использовании точных карт ПЭС (полного электронного содержания) и водяного пара в атмосфере.

MLAMBDA-метод

Данная работа посвящена развитию метода MLAMBDA. Этот метод, с одной стороны, показал достаточно высокую эффективность определения целочисленной неоднозначности, а с другой стороны, он относительно прост и достаточно быстр с вычислительной точки зрения. Рассмотрена реализация алгоритма MLAMBDA для метода абсолютного позиционирования ГНСС, а также показано, что этот метод непосредственно не применим к системе ГЛОНАСС. В работе сформулировано расширение метода, позволяющее применять его не только к GPS, но и к измерениям ГЛОНАСС. Как бы то ни было, системы ГЛОНАСС и GPS очень близки друг к другу, но принципиально отличаются принципом разделения сигналов от различных спутников. Система GPS использует кодовое разделение спутниковых сигналов, так что каждый спутник GPS использует уникальный код модуляции на общей частоте несущего сигнала, в то время как система ГЛОНАСС реализует частотное разделение, так что каждый спутник ГЛОНАСС в зоне видимости использует единый код модуляции на частоте, уникальной для каждого спутника. Каждый из принципов разделения доступа имеет свои преимущества и недостатки, но в случае частотного разделения сигналов разрешение неоднозначности целочисленной фазы осложняется наличием нескольких несущих сигналов разной частоты вместо одного в случае GPS. Авторы статьи модифицируют метод MLAMBDA таким образом, чтобы он также мог быть применен к измерениям ГЛОНАСС. Метод MLAMBDA является развитием метода LAMBDA (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment — корректировка декорреляции неоднозначности методом наименьших квадратов), предложенного в [2]. Согласно [1] модель наблюдения ГНСС может быть записана в виде

$$E(x) = Aa + Bb, \quad D(x) = Qx \quad (1)$$

где x - вектор данных ГНСС порядка m , a и b - векторы параметров порядка n и p соответственно, A и B - матрицы модели наблюдения, которые связывают вектор данных с параметрами модели. Известная ковариационная матрица x равна Qx . Предполагается, что вектор x представляет собой разности между наблюдениями и моделированными значениями. Это могут быть наблюдения с двойной разностью фаз или кодов, или τ , и другое. Ищется решение таким образом, чтобы минимизировать сумму квадратов разностей между моделированными и наблюдаемыми данными. Основная идея заключается в том, чтобы сначала применить к уравнению (1) ортогональное разложение на три части. Первая часть состоит из полных параметров с плавающей точкой, вторая часть — из разностных параметров с плавающей точкой и, наконец, третья часть — из целочисленных параметров, то есть из фазовых неоднозначностей. Затем решение выполняется в три этапа. Во-первых, ищется решение задачи (1) с плавающей точкой, предполагающее, что все целочисленные параметры равны нулю. Во-вторых, задача решается для целочисленных параметров с использованием решения с плавающей точкой в качестве приближения к конечному. В-третьих, вычисленные параметры, как с плавающей точкой, так и целые числа, подставляются в (1), и оценивается, насколько близка квадратичная норма решения к минимуму с помощью процесса поиска.

Реализация алгоритма

LAMBDA метод решает задачу с помощью метода целочисленных наименьших квадратов (ЦМНК) для получения оценок целочисленных неоднозначностей двойных разностей. Необходимо отметить, что задачи решаемые с помощью ЦМНК, могут также возникать в других приложениях, таких как связь, криптография и исследование кристаллических решеток. Интересно, что LAMBDA -метод и некоторые ЦМНК, разработанные для этих приложений, имеют некоторое сходство, на которое будет указано в этой статье. Как и многие другие методы ЦМНК, LAMBDA метод состоит из двух этапов. Его первым этапом является перенос исходной задачи ЦМНК в новую с помощью так называемых Z-преобразований или унимодулярных преобразований. Поскольку этот этап устраняет неоднозначности в контексте ГНСС, в литературе по ГНСС он называется "декорреляцией". Однако на самом деле это нечто большее, чем декорреляция, поэтому мы предпочитаем называть этот этап "редукцией", как это делается в литературе по теории информации. Его второй этап заключается в поиске оптимальной оценки или нескольких оптимальных оценок вектора параметра в гиперэллипсоидальной области, и поэтому называется этапом "поиска". Для декорреляции целочисленных неоднозначностей были предложены различные методы. Для кинематических приложений ГНСС реального времени и других приложений с большими размерами скорость вычислений имеет решающее значение. В этой статье мы представляем модифицированный LAMBDA метод (MLAMBDA), который может значительно снизить вычислительную сложность LAMBDA метода для задач ЦМНК высокой размерности. Новый метод повышает вычислительную эффективность как этапа редукиции, так и этапа поиска. Численные результаты показывают, что редукиции MLAMBDA также более эффективны с точки зрения вычислений, чем традиционные. Для целей проверки, в дополнение к оптимальной оценке, часто также требуется вторая оптимальная оценка, которая дает второе наименьшее значение целевой функции. В рамках данной работы были реализованы два этапа LAMBDA метода: сокращение и поиск. На текущий момент времени авторам удалось добиться работоспособности метода для уомбинированных измерений GPS+ГЛОНАСС с привлечением сторонних данных о межчастотных фазовых сдвигах. Результаты работы алгоритма применены ниже. В качестве продолжения работы планируется адаптация алгоритма к режиму "только ГЛОНАСС", а также с оценением межчастотных фазовых сдвигов непосредственно из измерений.

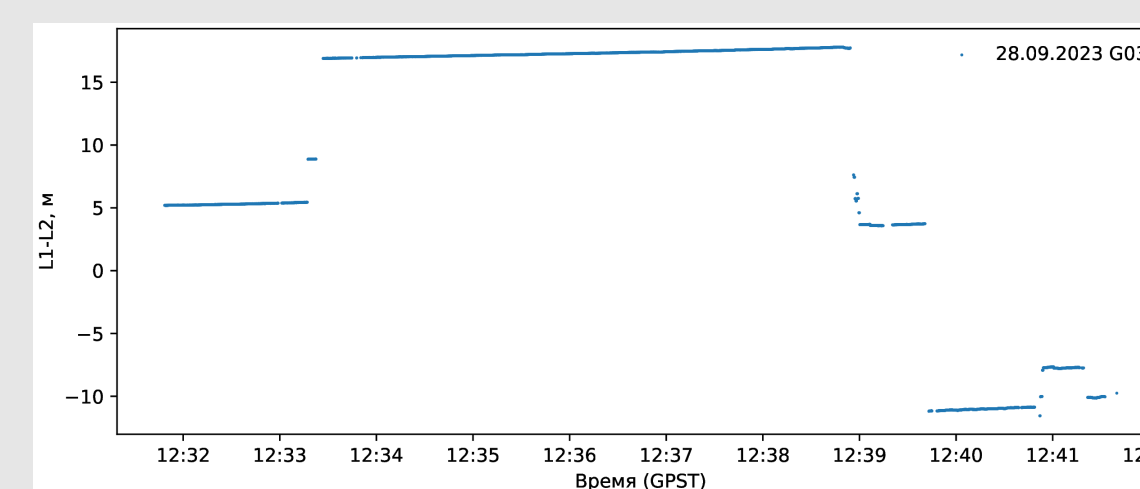


Рис. 1. Фаза линейной комбинации сигнала GPS-спутника G03

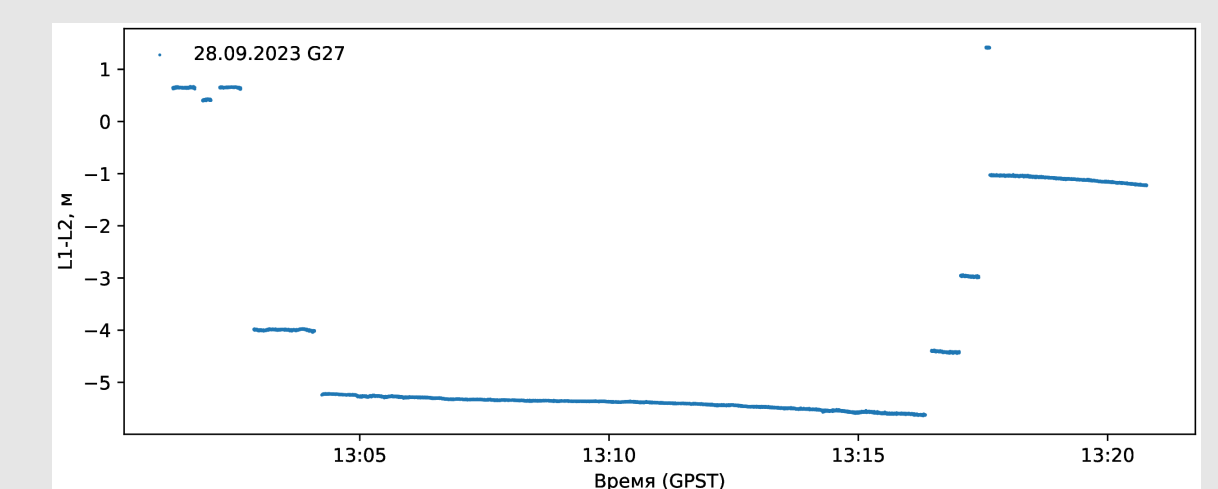


Рис. 2. Фаза линейной комбинации сигнала GPS-спутника G27

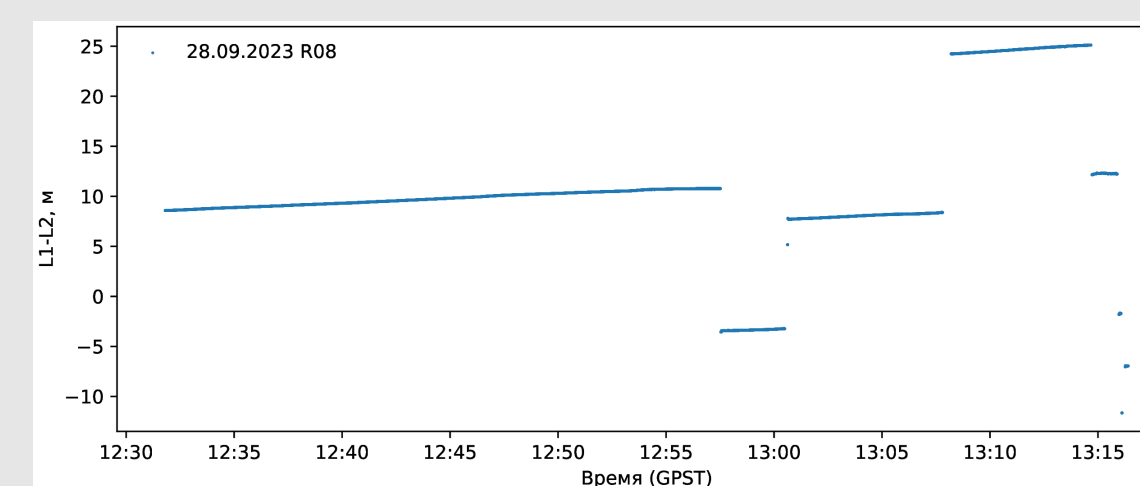


Рис. 3. Фаза линейной комбинации сигнала ГЛОНАСС-спутника R08

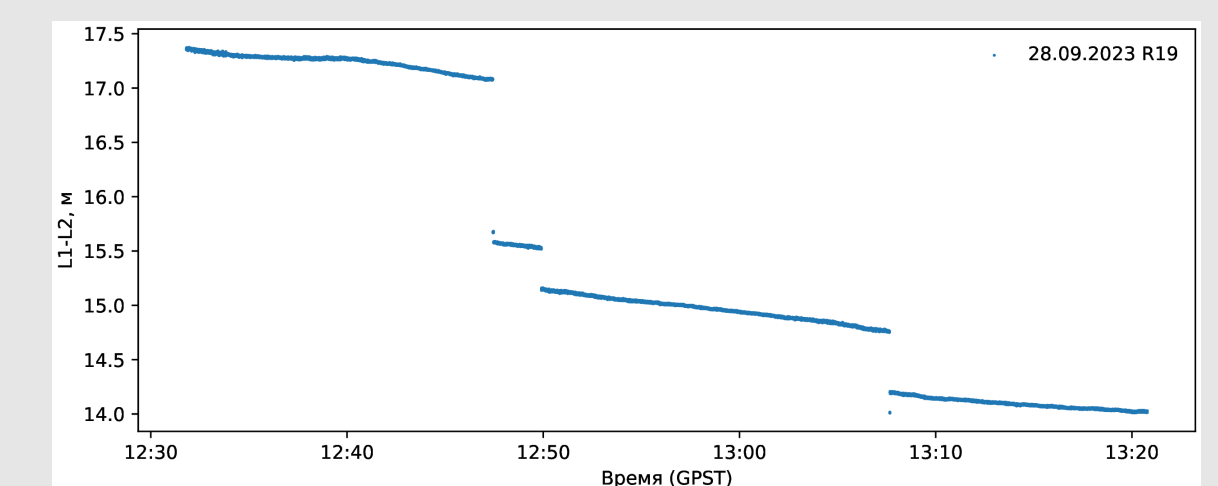


Рис. 4. Фаза линейной комбинации сигнала ГЛОНАСС-спутника R19

На рис. 1–4 приведены графики фаз линейной комбинации для сигналов двух спутников GPS и двух спутников ГЛОНАСС. Из графиков видно, что разработанный алгоритм определяет срывы фаз сигналов как для GPS, так и для ГЛОНАСС.

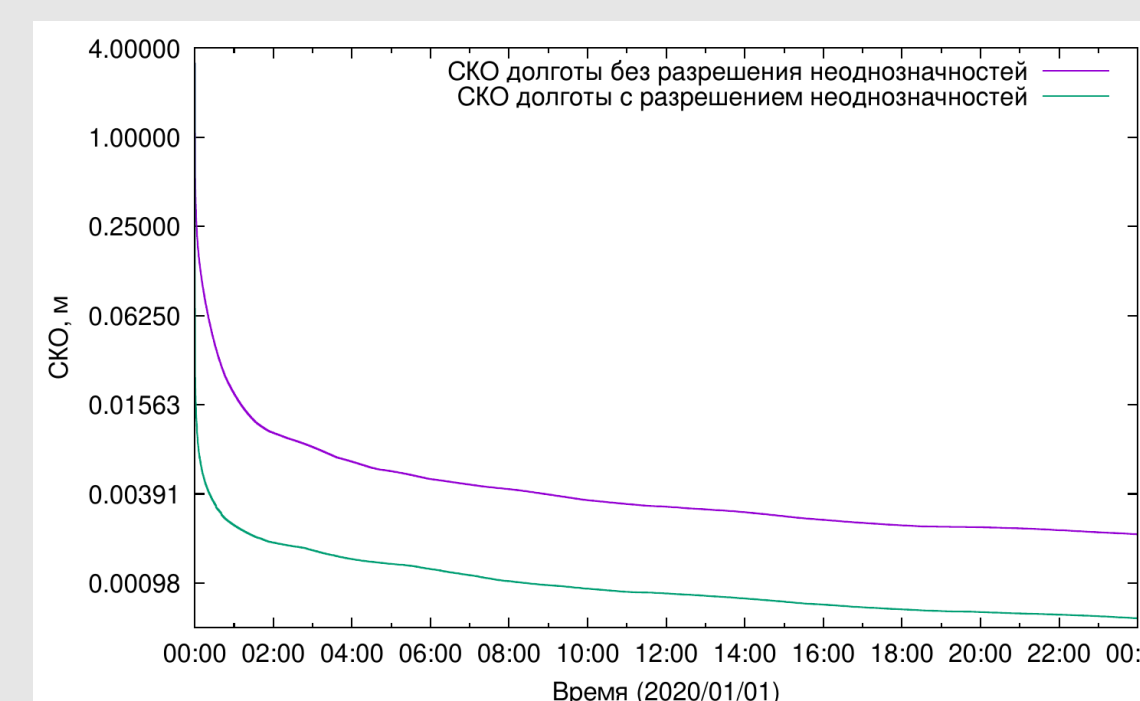


Рис. 5. Ошибка определения долготы по GPS+ГЛОНАСС без оценки неоднозначности и с оценкой неоднозначности

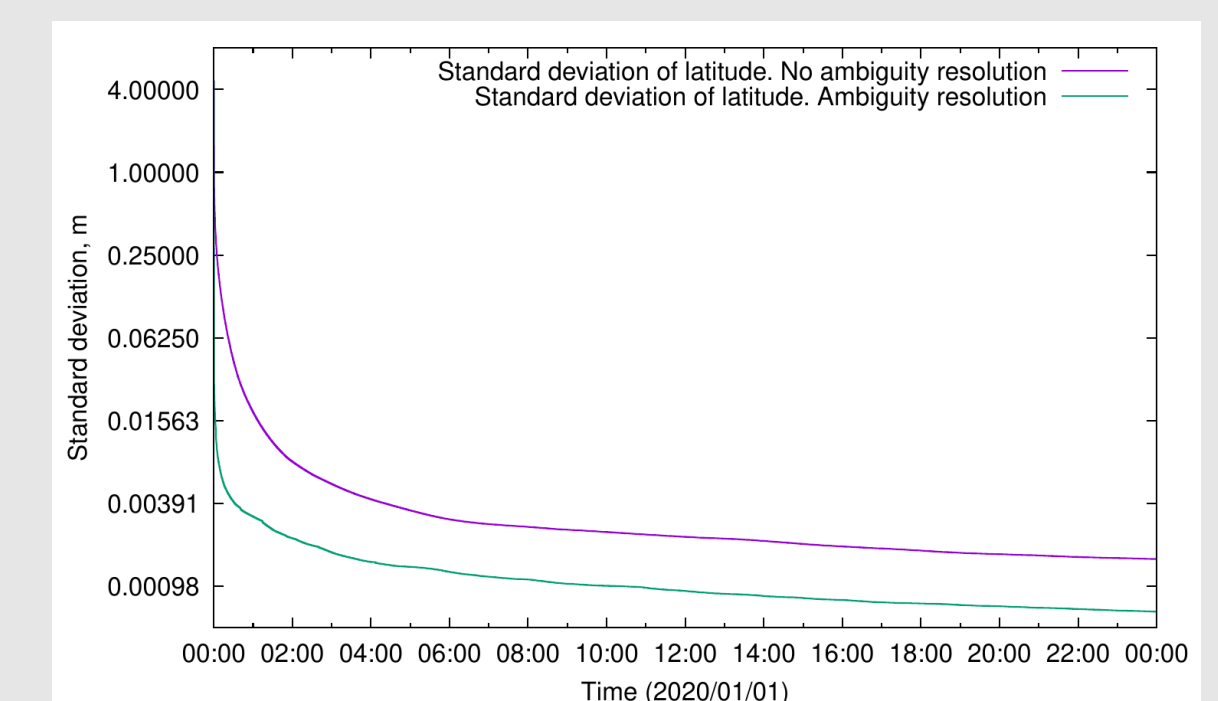


Рис. 6. Ошибка определения широты по GPS+ГЛОНАСС без оценки неоднозначности и с оценкой неоднозначности

Заключение

На базе известного алгоритма MLAMBDA получен алгоритм оценивания целочисленной фазовой неоднозначности, применимый к спутниковым навигационным системам с частотным разделением сигналов, в частности — к системе ГЛОНАСС. В настоящее время работоспособность метода проверена в режиме GPS+ГЛОНАСС, а также с привлечением сторонних данных о межчастотных фазовых задержках. Получены удовлетворительные результаты работы алгоритма в данном режиме. Алгоритм корректно оценивает целочисленные фазовые сдвига как в случае GPS, так и в случае ГЛОНАСС. В качестве развития данной работы предполагается отдалить работоспособность алгоритма в режиме "только ГЛОНАСС", а также реализовать оценку межчастотных фазовых сдвигов непосредственно из наблюдений, не прибегая к сторонним источникам данных.

References

- [1] J.F. Zumberge, M.B. Heflin, D.C. Jefferson, M.M.Watkins, and F.H. Webb, "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks," Journal of Geophysical Research, vol. 102, no. B3, pp. 5005–5018, 1997. doi:10.1029/96JB03860.
- [2] P.J.G. Teunissen, "The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation," Journal of Geodesy 70, 65–82, 1995. doi:10.1007/BF00863419.
- [3] X.W. Chang, X. Yang, T. Zhou, "MLAMBDA: a modified LAMBDA method for integer least-squares estimation," Journal of Geodesy, 79, 552–565, 2005. doi:10.1007/s00190-005-0004-x