НОВЫЙ ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ ЛИБО ЧАСТИЧНОЙ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОТЕРИ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СПУТНИКАМИ

Жалило А.А., Дицкий И.В.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина,14, каф. Радиотехники, тел. (057) 700-22-84
e-mail: gpsgroup@kture.kharkov.ua

The results of creation and researches of new effective method for processing of dual-/single-frequency kinematics GNSS observations with the purpose of detection, estimation and repair of carrier phase cycle slips are presented. Verification of the proposed method is carried out using simulation and the real GNSS observations. It is shown that reliable determine and repair of carrier phase cycle slips in the consider cases is achieved in conditions of the complete or partial losses of observations on the intervals up to 20 sec.

Введение. Решение задач высокоточного ГНСС- позиционирования невозможно без использования фазовых наблюдений [1,2]. Обработка фазовых ГНСС- наблюдений имеет ряд важных особенностей, которые заключаются в необходимости надежного устранения циклических фазовых скачков (т.н. “слипов”) и разрешения фазовой неоднозначности (РФН) [1, 2]. Эффективность используемых в настоящее время методов обработки зависит от характеристик наблюдений, вида и частоты следования фазовых скачков, количества пропусков наблюдений, темпа данных, количества спутников, уровня шумов и др. Однако известные методы, как правило, не являются универсальными, имеют ограничения их применимости. Серьезные преграды возникают при обработке наблюдений, выполненных в кинематическом режиме, когда они содержат динамическую составляющую, обусловленную не прогнозируемым движением объекта. Особенно сложной задача становиться для случая обработки данных в реальном времени. Авторам данной работы в доступных зарубежных и отечественных научно-технических источниках не удалось найти описаний существующих методов обработки фазовых наблюдений, которые позволяли бы восстанавливать непрерывность (в смысле устранения скачков) двухчастотных и/или одночастотных фазовых наблюдений при кратковременных (5÷30 сек) потерях наблюдений всех или части спутников текущего созвездия. Такие задачи обычно решают в другой постановке – как задачи РФН (если однозначное решение вообще возможно), которые, в свою очередь, характеризуются высокой сложностью реализации и не всегда высокой надежностью оценки дискретных переменных – начальных фазовых неоднозначностей.

В ходе проведенных исследований, результаты которых изложены в данной работе, был создан и исследован новый эффективный и надёжный метод восстановления непрерывности фазовых наблюдений (обнаружения, оценки и устранения дискретных фазовых скачков) для условий полной или частичной кратковременной потери одночастотных/двухчастотных кинематических наблюдений. Проведена верификация предложенного метода с использованием моделирования и реальных наблюдений. Исследования проводились для случаев полной кратковременной потери наблюдений всех спутников текущего созвездия на интервалах 5÷20 сек и потери наблюдений части спутников текущего созвездия на заданном интервале.

Целью данной работы является описание выявленных условий и созданного способа надёжного решения задачи обнаружения, оценки и устранения циклических фазовых скачков кинематических ГНСС- наблюдений в оговоренных условиях.

1. Исходные уравнения наблюдений, их преобразования и обработка. Для выделения фазовых скачков и уменьшения остаточных координатно-временных, тропосферных и ионосферных погрешностей, исключения инструментальных задержек в передающих трактах спутников и приёмном тракте приёмника, случайных начальных фаз опорных генераторов спутников и приемника удобно использовать приращения по времени

кодовых и фазовых наблюдений. Использование приращений может быть применено к наблюдениям любой ГНСС - как GPS, так и ГЛОНАСС, GALILEO. Предложенный способ обработки наблюдений предполагает в дальнейшем линеаризацию уравнений наблюдений с использованием априорных значений и их последующее преобразование в соответствии с методикой, предложенной в работах [3, 4]. После этого выполняется процедура совместного МНК- оценивания совокупности информационных (приращений координат и расхождений часов) и неинформационных параметров (циклических фазовых скачков). Оценивание циклических фазовых скачков осуществляется путём прямого перебора в предварительно определенной области поиска. Подробное описание всех преобразований и обработки уравнений наблюдений предложенным способом приводится в [4].

При двухчастотной обработке фазовых наблюдений используется также фаза разностной частоты – линейная комбинация (ЛК) Wide-Lane (WL). Использование такой комбинации позволяет создать промежуточную измерительную шкалу для более надежного решения поставленной задачи [4].

2. Результаты моделирования и возможности предложенного метода устранения фазовых циклических скачков. Для моделирования были использованы кинематические одночастотные/двухчастотные GPS-наблюдения, в которых были выбраны участки с отсутствующими скачками. Все данные прошли предварительную обработку с использованием программных комплексов OCTAVA-PPA (совместная разработка кафедры ОРТ ХНУРЭ и ГАО НАН Украины) и GrafNav/GrafNet (Канада). По известным координатам приёмников и спутников формировались расчетные значения наблюдений. Затем генерировались и добавлялись к расчетным значениям аддитивные погрешности наблюдений с заданными статистическими характеристиками. В ходе моделирования изменялось СКО погрешностей фазовых наблюдений (при фиксированном уровне СКО погрешностей кодовых наблюдений), применялись различные комбинации целочисленных скачков фазовых наблюдений как для случая полной кратковременной потери наблюдений, так и для случая частичной кратковременной потери наблюдений. После этого фиксировалось, при каком максимальном уровне СКО шума фазовых наблюдений возможно надежное решение задачи (с вероятностью $p_i\ 0{,}99$). В табл. 1 и рис. 1 приведены результаты моделирования.

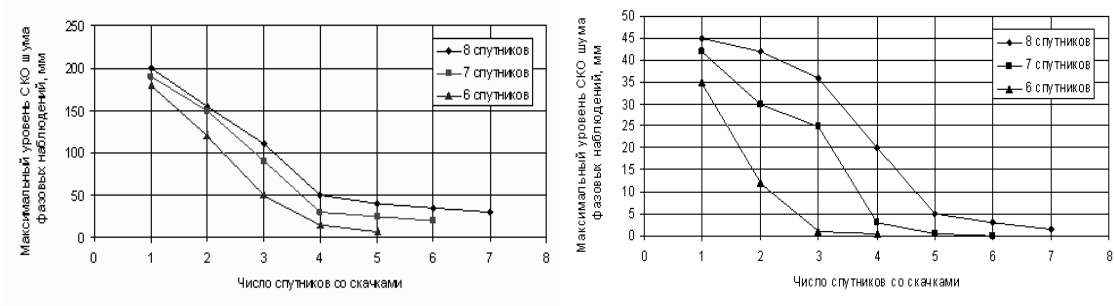
Между погрешностями приращений наблюдений в данном случае будет присутствовать корреляция ($\rho = 0{,}5$), которую обязательно необходимо учитывать.

Использование группы из пяти приращений позволяет увеличить допустимый уровень СКО погрешностей двухчастотных фазовых наблюдений в 2 – 3 раза для случая полной потери наблюдений, и в 1,5 – 2 раза для случая частичной потери наблюдений. Для случая одночастотной обработки использование группы из пяти приращений позволяет увеличить среднюю частоту правильной оценки фазовых скачков примерно на 40 % при использовании наблюдений шести спутников и на 20 % при использовании наблюдений семи-восьми спутников.

Таблица 1

Результаты моделирования метода устранения фазовых скачков при полной кратковременной потере наблюдений (5-20 сек)

Количество спутников рабочего созвездия	Максимальный уровень СКО шума наблюдений, при котором возможна надёжная оценка фазовых скачков			
	Двухчастотный режим		Одночастотный режим	
	СКО кодовых псевдодальностей, см	СКО фазовых псевдодальностей, мм	СКО кодовых псевдодальностей, см	СКО фазовых псевдодальностей, мм
8	35	21	10	3
7	35	14	10	1
6	35	11	10	1
5	35	7	-	-



а) б)

Рисунок 1 – Максимальный уровень СКО шума фазовых наблюдений (в миллиметрах), при котором возможно надежное ($p_i = 0,99$) обнаружение и оценка скачков фазы при частичном разрыве наблюдений с СКО шума кодовых наблюдений $\sigma_S = 0,35$ м: а) двухчастотный режим, б) одночастотный режим

Для повышения надёжности обнаружения и оценки циклических фазовых скачков можно использовать несколько приращений наблюдений относительно одной эпохи, предполагая, что между эпохами до разрыва наблюдений нет скачков фазы (рис. 2).

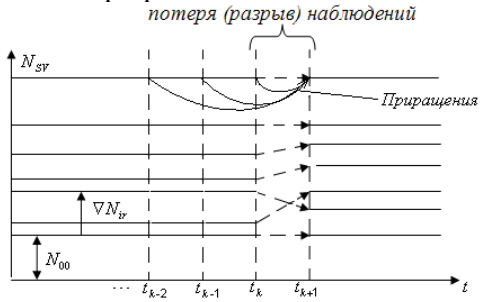


Рисунок 2 – Иллюстрация-пример: диаграмма скачков фаз при полной потере наблюдений спутников текущего созвездия на интервале $t \in [t_k, t_{k+1}]$

3. Верификация предложенного метода с использованием реальных данных. Верификация предложенного метода и алгоритмов обработки наблюдений проводилась с использованием кинематических наблюдений, выполненных в ходе аэрофотосъемки на борту вертолета с использованием двухчастотного приёмника TRIMBLE 5700 (179-е GPS-сутки 2005 года). Максимальное удаление вертолета от базовой станции (TRIMBLE 5700) составило ~60 км, максимальная высота полета около 1150 м относительно высоты установки антенны базовой станции. Длительность сеанса наблюдений для приемника на борту вертолета составила несколько часов.

Исследования с использованием реальной измерительной информации показали, что предложенный метод позволяет получить надёжное решение (с вероятностью не менее 0,99) как для случая частичной потери наблюдений, так и для случая полной потери наблюдений при двухчастотной обработке. При обработке одночастотных наблюдений надёжное решение можно получить в случае только частичной потери наблюдений за частью спутников текущего созвездия при условии, что число спутников с непрерывными наблюдениями не меньше четырех. Кроме того, исследования показали, что для получения надёжного решения в случае полной потери одночастотных наблюдений необходимо использовать сглаженные кодовые наблюдения. В этом случае для получения надёжного решения необходимо одновременно наблюдать не менее шести спутников.

Следует также отметить для ряда случаев несовпадение результатов статистического моделирования и тестирования с использованием реальных GPS- наблюдений, что го-

ворит о не полной адекватности использованной модели погрешностей наблюдений реальным условиям и необходимости ее уточнения. Ввиду этого, все методы и алгоритмы обработки ГНСС- наблюдений должны проходить этап верификации с использованием реальной измерительной информации. Решение поставленной задачи можно получить на интервалах с пропусками наблюдений от 1 до 10 сек при одновременном наблюдении шести-семи спутников и до 30 сек при одновременном наблюдении не менее восьми спутников.

Выводы. В данной работе описаны результаты создания, исследования и верификации новых эффективных метода и алгоритмов обнаружения, оценки и устранения циклических фазовых скачков. Верификация предложенных алгоритмов осуществлялась с использованием моделирования и реальной измерительной информации.

Результаты исследований показали следующие:

1) Предложенный метод позволяет получить надежное решение (с вероятностью $p \geq 0,99$) как при частичной, так и при полной потере наблюдений всех спутников текущего созвездия, даже при использовании одной группы приращения между двумя соседними эпохами. При этом рекомендуется использовать одновременно наблюдения шести и более спутников. Надежное решение можно получить на интервалах пропусков наблюдений от 1 до 10 сек при одновременном наблюдении шести-семи спутников и на интервалах пропусков до 20 сек при одновременном наблюдении не менее восьми спутников. При использовании нескольких групп приращений (накопление данных), надёжность решения значительно повышается.

2) Использование приращений кодовых и фазовых наблюдений, позволяет применять предложенный метод обработки к наблюдениям не только спутников GPS, но и других ГНСС.

3) Рассмотрение реализаций разработанного метода оценки циклических фазовых скачков показывает, что он может быть реализован не только в режиме послесеансной обработки наблюдений, но и в реальном времени, в частности, введу того, что он предполагает использование малых объемов выборок наблюдений.

Литература.

1. Гофманн-Веллінгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія та практика: пер. з англ. / Б. Гофманн-Веллінгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ під ред. Я. С. Яцківа, — Київ: Наукова думка, 1996. – 380 с.

2. Rizos Chris Principles and practice of GPS surveying/Chris Rizos // School of engineering, The University of New South Wales, Australia, 1999. – 555 p.

3. Жалило А.А. Мониторинг геометрической конфигурации многобазисной сети широкозонной дифференциальной подсистемы спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС/ А.А. Жалило, С.Н. Флерко, А.И. Яковченко // Космічна наука і технологія. НКА і НАН України.- 1999.- т. 5, №1.- С. 59-68.

Жалило А.А., Дицкий И.В. Новый эффективный метод устранения циклических фазовых скачков двухчастотных кинематических ГНСС – наблюдений / А.А. Жалило, И.В. Дицкий// Известия вузов. Радиоэлектроника". – 2011, №8.–с. 18-28.