

УДК 520.8

Д. А. Шелковенков

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ ОСТАВА_PPA

Розглянуто принципи побудови та функціонування універсального програмно-алгоритмічного комплексу ОСТАВА_PPA, який створено з метою виконання попередньої післясеансної обробки спостережень глобальних супутникових навігаційних систем (ГНСС). Представлено методичну та алгоритмічну основу комплексу, його функціональні можливості і характеристики. Описано вдосконалення комплексу, реалізовані у 2009–2010 рр. Стисло викладені плани подальшого розвитку та впровадження.

ВВЕДЕНИЕ

Создание отечественного программно-алгоритмического комплекса (ПАК) точного позиционирования в послесеансном режиме обработки ГНСС-наблюдений, впоследствии получившего условное название ОСТАВА, было начато в 2002 г. в Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО) под руководством академика Я. С. Яцкива. Разработка была начата с создания базового комплекса алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, необходимых для выполнения предварительных обязательных операций, предшествующих основным процедурам позиционирования (сглаживание наблюдений, разрешение фазовой неоднозначности, непосредственное позиционирование, верификация решения, оценка его точности и др.). Совокупности таких предварительных операций в специализированной литературе получили название «предварительной обработки и анализа» (PPA), подразумевающее определенный набор операций обработки т. н. «сырых» ГНСС-

данных. В частности, отдельный ПАК предварительной обработки ГНСС-наблюдений, получивший условное название ОСТАВА_PPA, предназначен для выполнения следующих основных операций:

- преобразования входных данных к внутреннему формату с одновременным контролем входных данных на соответствие используемым форматам;
- контроль и обеспечение качества наблюдений (устранение аномалий, контроль уровня шума и многолучевости, скорости дрейфа опорного генератора приёмника и т. д.) и эфемеридно-временной информации спутников ГНСС;
- поиск, оценка и устранение циклических/полуциклических фазовых скачков одночастотных или двухчастотных ГНСС-наблюдений;
- коррекция временных шкал приемников, контроль геометрических условий наблюдений и параметров качества решения навигационной задачи и др.;
- анализ результатов предварительной обработки данных и визуализация контрольных параметров с выводом о пригодности наблюдений к дальнейшей обработке.

© Д. А. ШЕЛКОВЕНКОВ, 2011

В 2004 г. была сформирована алгоритмическая основа ПАК ОСТАВА_PPA, ключевой составляющей которого была совокупность алгоритмических и программных модулей обработки фазовых наблюдений [12, 13]. В 2005—2008 гг. были завершены разработка и тестирование первой автоматизированной версии программного обеспечения ОСТАВА_PPA [2, 4, 6, 8, 14], в состав которой были введены новые составляющие (контроль качества наблюдений, поиск и устранение аномальных наблюдений, контроль качества эфемеридно-временных параметров спутников и др.), а также внесено множество усовершенствований и дополнений в совокупности модулей устранения фазовых скачков, оценки уровня многолучевости, решения навигационной задачи, отображения выходной информации и др. Это стало возможным благодаря тестированию и эксплуатации программного комплекса в течение нескольких лет с использованием огромного количества сессий наблюдений ГНСС-оборудования практически всех ведущих мировых производителей.

В то же время в ходе тестирования, доработок и практической эксплуатации ПАК выяснилось, что созданный комплекс не свободен от ряда недостатков, имеет ограничения функциональных возможностей (например, обработке подвергаются только GPS-наблюдения, а наблюдения ГЛОНАСС не включены в обработку), установлены недостатки программной реализации комплекса, ограничивающие возможности вычислительного процесса — быстродействие, объем используемой памяти, ограничения принятых форматов выходных данных и др. Это привело к необходимости пересмотра ряда программных решений, изменения концепции организации вычислений, необходимости оптимизации ряда важнейших программных модулей и расширения функциональных возможностей ПАК. В 2009—2010 гг. была выполнена новая разработка (вторая версия ПАК), позволившая значительно расширить его функциональные возможности и устранить множество недостатков программной реализации комплекса.

Целью настоящей работы является изложение принципов построения и функционирования

отечественного комплекса ОСТАВА_PPA, предназначенного для предварительной послесезонной обработки ГНСС-наблюдений, описание усовершенствований ПАК, а также направлений его внедрения и дальнейшего развития.

МЕТОДИЧЕСКАЯ И АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОСНОВА

На начальном этапе разработки ОСТАВА_PPA исследовательским коллективом был принят ряд положений, определивших состав разработанных методов обработки и реализованных алгоритмов. Эти положения могут быть сформулированы следующим образом:

- разработка должна быть направлена на подготовку данных для применения к ним алгоритмов позиционирования, а не только оценку качества наблюдений, как это реализовано, например, в TEQC [10] и подобным ему;
- разрабатываемые методы и алгоритмы должны предусматривать возможность скорее исправления аномалий, а не их удаления из дальнейшей разработки — минимизация отбракованных данных и ложных тревог;
- разрабатываемые методы должны предусматривать возможность обработки одночастотных ГНСС-наблюдений с использованием тех же принципов, что и для двухчастотных данных;
- разрабатываемые методы должны быть применимы без использования дифференциального подхода обработки;
- должна быть предусмотрена возможность получения широкого спектра качественных характеристик о первичных наблюдениях.

На основе принятых постулатов, анализа доступной литературы и полученного опыта обработки наблюдений ГНСС-приёмников различных классов и производителей, было установлено, что для получения данных с наилучшим качеством должны быть выполнены следующие операции [14].

Чтение текстовых либо бинарных форматов, принятых для обмена ГНСС-информацией, таких как RINEX (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/rinex/rinex211.txt>), IONEX (<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/ionex1.ps>), SP3 (http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/sp3_docu.txt) и т. д. Решение данной задачи может показаться очевидным и

простым, так как чаще всего стандарт, описывающий формат файла, доступен разработчикам для детального изучения и распространяется свободно. Однако опытным путём было установлено, что, например, реализация программного обеспечения для формирования файлов в широко распространённом на данный момент формате для обмена первичными наблюдениями RINEX версии 2.11 могут значительно отличаться, что приводит к значительным затруднениям при создании универсального алгоритма для чтения файлов. Кроме того, ошибки в данных и программном обеспечении могут приводить к тому, что какой-либо файл может не соответствовать стандарту, что требует принятия адекватных действий (например, отказа от дальнейшей обработки файла или пропуска некорректных строк в файле).

Проверка целостности данных. Как показывает практика, после считывания данных из файлов важно получить информацию о соответствии задекларированного и фактического количества отсчётов, а также правильности следования временных отсчётов. Наиболее частой проблемой при выполнении контроля целостности данных является отсутствие одной или более временных эпох.

Значительно реже встречаются такие проблемы, как внезапное изменение темпа следования наблюдений, запись в файл двух или более эпох с одинаковыми временными метками или нарушение последовательности течения времени. Такие проблемы обычно вызваны ошибками в работе аппаратуры и/или программного обеспечения.

Обнаружение аномалий кодовых наблюдений. Экспериментальные исследования, проведенные автором с использованием более 1000 сессий измерений, показали, что наиболее эффективным методом обнаружения аномалий кодовых наблюдений, таких как спонтанные выбросы, могут эффективно обнаруживаться и устраняться при решении классической навигационной задачи в автономном режиме с применением RAIM-подобного (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) [11] алгоритма контроля целостности рабочего созвездия, предложенного автором в работах [2, 6, 8, 14]. Экспериментально доказано

также, что предложенный алгоритм позволяет обнаруживать не только аномальные значения в кодовых наблюдениях, но и сбои, обусловленные ошибками в навигационных сообщениях спутников связанных, например, с орбитальными манёврами либо перенастройкой бортового опорного генератора.

Кроме того, результат решения навигационной задачи позволяет сформировать временной ряд оценок ошибок часов приёмной аппаратуры, что необходимо для дальнейшей обработки.

Коррекция шкалы времени. Известно, что при применении дифференциального метода определения местоположения наблюдения двух или более пунктов должны выполняться синхронно [1]. При этом подавляющее большинство приёмной аппаратуры ГНСС содержит в себе кварцевый опорный генератор. Производители аппаратуры могут реализовывать две принципиально различные схемы управления опорным генератором: с непрерывной подстройкой и с пороговой подстройкой.

В случае схемы с непрерывной подстройкой ошибка часов приёмника относительно системной шкалы времени навигационной системы оценивается непрерывно, обычно один раз в секунду. Подстройка опорного генератора выполняется так, чтобы минимизировать ошибку. Так как ошибка показаний часов опорного генератора является одним из оцениваемых в навигационной задаче параметров, то погрешность синхронизации примерно соответствует погрешностям определения пространственных координат. В настоящее время эти погрешности составляют 3—6 м СКО для условий открытого неба, или 10—20 нс во временном эквиваленте. Можно показать, что исходя из радиальной скорости движения навигационных спутников около 4 км/с такой уровень погрешностей вполне приемлем.

В случае пороговой подстройки ошибка часов приёмника нарастает пропорционально долговременной нестабильности опорного генератора. Подстройка опорного генератора выполняется в том случае, если оценка расхождения шкал времени приёмника и системной шкалы превысит определённый порог, обычно 1 или 0.5 мс. Обработка наблюдений таких приёмни-

ков требует выполнения процедуры синхронизации часов приёмника с учётом возможности появления скачков шкалы времени, обусловленных выполненными в приёмнике подстройками. Эксперименты показали, что в данном случае после предварительной обработки достижимы погрешности не хуже, чем для приёмников с непрерывной подстройкой.

Обнаружение аномалий фазовых наблюдений.

Целью данного этапа обработки является обнаружение моментов времени, для которых в фазовых наблюдениях одного или нескольких навигационных спутников наблюдается отклонение от общепринятой модели наблюдений [1]. Обычно причинами таких отклонений являются воздействие электромагнитных помех либо низкий уровень принимаемого сигнала, что приводит к многочисленным сбоям в работе схем слежения за фазой несущей сигнала.

Основным на данном этапе является анализ временных рядов, полученных путём формирования разностей значений двух соседних временных отсчётов (приращения) линейной комбинации (ЛК) наблюдений, полученной путём вычитания оценок фазовых псевдодалностей из кодовых. Применение таких ЛК для обнаружения фазовых циклических скачков подробно изложено в работе [9]. Однако, как показали исследования, кодово-фазовые ЛК имеют значительные ограничения, обусловленные тем, что уровень шумовых и многолучевых составляющих погрешностей кодовых псевдодалностей могут на порядок и более превышать длину волны несущей навигационного сигнала. Поэтому данный метод в ПАК OSTAВА_PPA применяется лишь для обнаружения моментов появления выбросов в фазовых наблюдениях, величина которых превышает в 3—5 раз уровень шумовых и многолучевых погрешностей кодовых наблюдений.

После составления таблицы, в которой отмечаются все обнаруженные выбросы, проводится её анализ с целью обнаружения характерных для воздействия помех ситуаций по следующим критериям:

- наличие выбросов для 50 % и более навигационных спутников в один и тот же момент времени;

- наличие выбросов для одного и того же навигационного спутника в течение трех и более последовательных временных отсчётов.

Обнаруженные по этим критериям наблюдения исключаются из дальнейшей обработки, а сформированная таблица может быть использована в дальнейшей обработке с целью предсказания моментов появления фазовых циклических скачков.

Обнаружение, оценка и коррекция фазовых скачков. Важной особенностью OSTAВА_PPA является возможность восстановления непрерывности фазовых наблюдений. Непрерывность слежения за сигналом может нарушаться вследствие затенения приёмной антенны, низкого соотношения сигнал/шум или иных причин, что, в свою очередь, приводит к ошибкам вычислений целочисленной составляющей фазовых псевдодалностей. Предложенный в работе [13] метод коррекции фазовых циклических скачков с использованием анализа разностей фазовых псевдодалностей между спутниками одного приёмника показал высокую эффективность и точность оценок скачков по сравнению с известными ранее методами, а также возможность его использования для одночастотных наблюдений. Однако в ходе экспериментальных исследований был установлен ряд особенностей и ограничений данного метода, обусловленных особенностями схемных реализаций схем слежения за фазой несущей сигналов навигационных спутников и спектральным составом погрешностей фазовых псевдодалностей.

Во-первых, было установлено, что в случае слежения за сигналом с предельно низкими значениями соотношения сигнал/шум в приёмниках большинства производителей могут возникать ошибки, приводящие к нарушению целочисленной природы фазовых неоднозначностей, а именно — возникновению полуциклических скачков с последующим восстановлением полных циклов в течение 10—12 с. Возможность оценки полуциклических скачков была доказана экспериментально путём изменения значений порогов обнаружения и допусков оценки скачка. Однако надёжная коррекция таких скачков представляется проблематичной, так как появ-

ление полуволновых фазовых скачков часто сопровождается срывами слежения за сигналом. Вследствие этого возможны ошибочные коррекции, что в некоторых случаях может привести к невозможности дальнейшего разрешения фазовых неоднозначностей.

Во-вторых, в ходе экспериментальных исследований был выявлен эффект, обусловленный инерционностью цепей слежения за фазой несущей сигнала и проявляющийся в виде возникновения дополнительной медленно изменяющейся составляющей в фазовых наблюдениях в случае резкого изменения уровня сигнала на входе приёмника. Это может быть обусловлено внезапным возникновением затеняющих радиосигналов от навигационного спутника препятствий, таких как металлические опоры антенн, деревья и т. п., вследствие движения спутника или приёмной антенны. Величина такого изменения может достигать 5...10 см за 2...10 с, что сравнимо с длиной волны несущей сигнала (для системы GPS длина волны на частоте L1 составляет 19 см), после чего обычно возникает срыв слежения за сигналом. В некоторых источниках такой эффект получил название «last value slip», однако подобные искажения измерений фазы более точно назвать как «**динамические погрешности фазовых наблюдений**». Основной проблемой таких искажений является то, что они могут приводить к появлению ложных тревог в процессе обнаружения и оценки величины скачков. С другой стороны, с учётом того, что величина такой динамической погрешности (фактически — изменения в течении 2—10 с) не превышает половины длины волны, имеется возможность идентификации указанных искажений (обычно — на краях разрыва слежения и пропусков кинематических наблюдений) и их парирования в ходе дальнейшей обработки.

В третьих, экспериментально было установлено, что в случае наблюдений с интервалами 10—30 с между соседними отсчётами времени (изначально метод восстановления непрерывности фазовых наблюдений применялся для данных с интервалами 1—5 с) надёжная оценка величин фазовых циклических скачков невозможна, что обусловлено спектральными характерис-

тиками опорных генераторов навигационных спутников. Решением данной проблемы стало использование т.н. двойных разностей фазовых наблюдений (разность разностей фазовых псевдодаленостей двух спутников двух синхронно работающих приёмников), что позволило в значительной степени устранить влияние опорных генераторов спутников [3]. Применение данного метода восстановления непрерывности фазовых наблюдений предполагает отсутствие разрывов в рядах координат навигационных спутников. Применение традиционных алгоритмов, описанных в интерфейсных контрольных документах на навигационные системы, может приводить к скачкообразным изменениям расчётных значений от единиц до десятков метров при смене наборов текущих эфемерид. Решение проблемы было найдено в использовании бортовой эфемеридной информации, формируемой центрами IGS (International GNSS Service) (<https://www.ngs.noaa.gov/IGSWorkshop2008/docs/igs08-acs+products.ppt>), так как они содержат все наборы, сформированные каждым спутником за сутки, а не только ту информацию, которую зафиксировал навигационный приёмник на интервалах радиовидимости. Также было применено взвешенное усреднение результатов расчётов координат спутника и поправок к показаниям его часов с использованием нескольких (5—6) наборов эфемеридной информации с наименьшим удалением на шкале времени от момента излучения сигнала. Данный подход позволил достичь величины скачков 1—2 мм, что на два порядка меньше порога обнаружения фазовых циклических скачков.

Оценка приращений координат с использованием фазовых наблюдений. Ещё одним ограничением описанного выше метода обнаружения и устранения фазовых циклических скачков является то, что он был разработан в предположении неподвижности приёмной антенны. Для применения данного метода к наблюдениям движущегося приёмника (пешеход, автомобиль, летательный аппарат и т. п.) потребовалось создать метод, позволяющий оценить изменения координат приёмной антенны с погрешностями 1—2 см с использованием фазовых наблюдений.

Математическая основа решения задачи оценки приращения координат по псевдодальностям для случая непрерывных наблюдений известна [7], поэтому основные усилия были направлены на разработку метода надёжного обнаружения фазовых циклических скачков. Наиболее эффективным по критерию минимизации ложных тревог оказался метод, который комбинирует информацию из таблицы о моментах возникновения скачков, сформированной ранее в ходе обнаружения аномалий фазовых наблюдений, с RAIM-подобным алгоритмом, разработанным и использовавшимся ранее для обнаружения аномалий кодовых наблюдений.

Кроме формирования опорной информации для восстановления непрерывности фазовых наблюдений, полученная информация может служить для автоматизированной идентификации участков сеанса наблюдений, во время которых навигационный приёмник находился в движении. Это, в свою очередь, может быть использовано для автоматической разметки сеансов в режиме «stop-and-go», что значительно сокращает трудоёмкость обработки таких файлов в случае отсутствия аппаратной возможности маркировки при выполнении наблюдений и значительном объёме пунктов стояния (10 и более).

Оценка уровня шумовых и многолучевых погрешностей. Такие характеристики кодовых наблюдений, как оценки уровня шумовых (некоррелированных) и многолучевых (коррелированных и обусловленных многопутностью распространения сигнала) погрешностей, могут дать специалисту важную информацию о характеристиках приёмной антенны, правильности выбора места для установки антенного поста, качестве антенного кабеля и косвенные оценки о качестве наблюдений для данного сеанса в целом. В OCTAVA_PPA реализованы методы для отдельной оценки шумовых и многолучевых погрешностей кодовых наблюдений [3], которые могут быть использованы для формирования графической информации, а также служить параметрами для отсекаемых из измерительного сеанса данных, не удовлетворяющих заданным критериям (например, по максимально допустимому уровню многолучевости).

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Методы и алгоритмы ПАК OCTAVA_PPA реализованы в виде программ в среде программирования MatLab, выбор которого был обусловлен наличием богатой библиотеки функций для выполнения матричных операций, относительно высокой скоростью работы и наличием простой и удобной среды разработки. Это делает возможным создавать достаточно сложные программные комплексы усилиями людей, не имеющих специальных углублённых знаний в области программирования.

Изначально целью реализации разрабатываемых алгоритмов являлась проверка их правильности и исследование их свойств. Позже, в 2005 г. было принято решение о создании комплекса программных модулей, реализующего последовательно все разработанные методы и алгоритмы. К 2007 г. был создан комплекс программ [4], представляющий собой библиотеку функций и набора программ, для следующих типов входных данных:

- наблюдения неподвижных пунктов с интервалам между отсчётами наблюдений от 1 до 5 с (OCTAVA_PPA_Static 1-1/5Hz);
- наблюдения неподвижных пунктов с интервалам между отсчётами наблюдений от 10 до 30 с (OCTAVA_PPA_Static 1/5-1/30Hz);
- наблюдения движущихся объектов с интервалам между отсчётами наблюдений 1 с (OCTAVA_PPA_Kinematic 1 Hz).

Каждая из программ способна обрабатывать наблюдения только системы GPS и предусматривает наличие оператора, устанавливающего файлы, которые необходимо обработать, и задающего настройки. Кроме того, была создана модификация программы для обработки наблюдений неподвижных пунктов с интервалами между отсчётами наблюдений от 1 до 5 с, которая предусматривала возможность непрерывной посуточной автоматизированной обработки наблюдений сети перманентных референционных станций Украины [18]. В ходе работы над данным продуктом коллективом исследователей было принято решение, что дальнейшие усилия будут направлены преимущественно на разра-

ботку продуктов для создания центров обработки ГНСС наблюдений. Доступ потребителей, желающих воспользоваться обработкой, должен в дальнейшем осуществляться с помощью интернета в интерактивном режиме.

Основной целью при применении ПАК ОСТАВА_РРА является создание массивов наблюдений сетей базовых станций и потребителей, прошедших предварительную обработку, которые в дальнейшем могут использоваться для применения к ним различных методов точного позиционирования. В то же время конечные продукты предварительной обработки могут быть весьма ценными как для операторов сетей базовых станций и использующих их данные центров обработки, так и потребителей, таких как научные и учебные организации, компании, выполняющие геодезические, кадастровые и другие виды работ с использованием ГНСС и др. Причиной этого, во-первых, является то, что ПАК ОСТАВА_РРА способен формировать массивы первичных наблюдений, прошедших предварительную обработку, например, в широко распространённом формате RINEX.

Это, во-первых, помогает потребителям улучшать качество получаемых ими результатов за счёт использования исходных данных, в которых вероятность появления аномалий в кодовых или фазовых наблюдениях значительно снижена. Во-вторых, оценки качества первичной измерительной информации, такие как уровень многолучевых и шумовых погрешностей кодовых наблюдений, могут помочь в оценке качества ГНСС-аппаратуры, мест размещения приёмных антенн и измерительных пунктов. В-третьих, потребителям может быть доступна полная информация об измерительном сеансе, включая данные об интервалах непрерывности фазовых наблюдений, что даёт возможность потребителям, основываясь на результатах, получаемых с использованием ОСТАВА_РРА, разрабатывать и применять собственные методы точного позиционирования.

Несмотря на положительные качества первой версии ОСТАВА_РРА, в ходе всестороннего тестирования с использованием наблюдений перманентных станций, а также статических и кинематических наблюдений, которые были любезно предоставлены компаниями, выполняющими геодезические работы, а также производителями и дистрибьюторами ГНСС-аппаратуры, были выявлены проблемные вопросы, требовавшие доработки как алгоритмической базы, так и программных модулей. Кроме того, во время тестирования были получены ценные предложения о расширении либо изменении функциональных возможностей алгоритмов и программ.

матических наблюдений, которые были любезно предоставлены компаниями, выполняющими геодезические работы, а также производителями и дистрибьюторами ГНСС-аппаратуры, были выявлены проблемные вопросы, требовавшие доработки как алгоритмической базы, так и программных модулей. Кроме того, во время тестирования были получены ценные предложения о расширении либо изменении функциональных возможностей алгоритмов и программ.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАК ОСТАВА_РРА В 2009–2010 гг.

Ниже изложены усовершенствования и нововведения, которые были выполнены в 2009–2010 гг. в ПАК ОСТАВА_РРА.

Главные усилия были направлены на создание такой программной реализации ОСТАВА_РРА, которая могла бы применяться не только для решения научных, но и целого ряда актуальных практических задач. Было принято решение сконцентрировать на разработке программного комплекса для предварительной обработки наблюдений с наиболее распространёнными временными интервалами между отсчётами как для базовых станций, так и полевых или передвижных пунктов: от 1 до 5 с.

Важным шагом стало принятие новой архитектуры программного обеспечения (см. рисунок). Так, если ранее для наблюдений базовых станций и подвижных приёмников необходимо было воспользоваться разными программами, то теперь обработка выполняется с использованием одной и той же программы-ядра, общей для всех типов входных данных и режимов обработки. Настройка ядра для задания режимов обработки осуществляется путём формирования проектов (формализованных структур переменных), настройки из которых считываются в начале работы программы.

Также был проделан значительный объём работы, направленной на эмпирическое определение пороговых значений в различных процедурах, обеспечивающих, с одной стороны, минимальный уровень ложных срабатываний и сохранение максимального объёма данных для обработки, а с другой стороны — надёжное обнаружение и уст-



ранение ошибок в кодовых и фазовых наблюдениях для различных типов оборудования.

Ниже кратко описаны другие важные усовершенствования ПАК OSTAVA_PPA.

Поддержка обработки наблюдений ГЛОНАСС. Логичным продолжением работы над ПАК OSTAVA_PPA стала реализация поддержки обработки не только GPS-, но и GPS+ГЛОНАСС-наблюдений.

Принятие решения о необходимости сравнительно простой алгоритмически, но трудоёмкой программнодоработки (требуется пересмотр всех процедур обработки как кодовых, так и фазовых наблюдений) было вызвано необходимостью обработки наблюдений современного ГНСС-оборудования с возможностью приёма сигналов ГЛОНАСС. Так как принципы обработки кодовых и фазовых наблюдений для систем GPS и ГЛОНАСС сходны, то основной особенностью, которую пришлось учесть при реализации, стало частотное разделение навигационных сигналов, используемое в ГЛОНАСС. Кроме того, при со-

здании программных модулей была учтена возможность поддержки и других ГНСС, таких как Galileo, EGNOS (если в будущем для этой системы будут доступны эфемериды для геостационарных спутников, вещающих дифференциальные поправки этой системы) и др.

Автоматическое обнаружение интервалов движения. Как было уже сказано выше, в процессе обработки наблюдений, особенно кинематических, есть необходимость оценки изменения координат приёмного пункта с течением времени, что необходимо для выполнения восстановления непрерывности фазовых наблюдений. Исследования, проведенные автором, показали, что информация о приращениях координат может быть использована для определения моментов, когда приёмник был неподвижен. В отличие от геодезических приёмников, где маркеры, указывающие на нахождение приёмника в движении расставляются оператором съёмки вручную, в программе реализован интервальный фильтр.

Логика работы этого фильтра в следующем: если есть моменты времени $i, i - 1, i - 2, \dots, i - n$, для которых приращение длины вектора положения не превышает некоторого значения V_{\max} , то интервал $i, \dots, i - n$ считается интервалом времени, для которого антенна навигационного приёмника не перемещалась. Параметры n и V_{\max} могут устанавливаться произвольными, однако экспериментально было установлено, что для надёжной работы фильтра при вероятности ложных тревог не более 1 % и интервале между отсчётами 1 с оптимальными являются значения $n = 10$ и $V_{\max} = 10$ см/с.

Эксперименты показали, что данный фильтр может надёжно маркировать статические и кинематические файлы, полученные в различных режимах съёмки. Интервальный фильтр хорошо себя зарекомендовал при обработке наблюдений, полученных в режиме «stop-and-go». Особенно он полезен, если при большом количестве статических сессий (10 и более) в исходном файле отсутствуют маркеры, обозначающие начало и окончание статических участков. Кроме того, могут быть обнаружены и устранены ошибки операторов оборудования, такие как перемещение приёмника во время интервала статической инициализации.

Особенности работы с файлами наблюдений. Первые программные реализации ПАК ОСТАВА_PPA предполагали, что информация базовых станций и потребителей (наблюдения и эфемериды) доступна в виде файлов формата RINEX 2.0.2.11. Опыт эксплуатации программного обеспечения показал, что это предположение усложняет и замедляет процесс обработки наблюдений из-за следующих обстоятельств:

- наблюдения базовых станций обычно хранятся в структуре файловых архивов (локальных, национальных, международных) где они с целью экономии дискового пространства преобразуются из формата RINEX в формат Compact RINEX (<http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html>);

- файлы наблюдений и эфемерид, размещённые в файловых архивах, а также файлы потребителей обычно упаковываются с использованием архиваторов для экономии дискового пространства;

- доступ к файловым архивам базовых станций и, всё чаще, потребителей обычно осуществляется с использованием протоколов HTTP или FTP;

- иногда пользователи не имеют возможности выполнить преобразование наблюдений, сформированных их оборудованием в формате, защищенном авторскими и иными правами, обычно предусматривающем платный доступ к информации, в формат RINEX.

Решение каждой из этих задач средствами MatLab, также как и выполнение этих операций вручную с использованием стороннего программного обеспечения, показалось автору нерациональным. Поэтому были разработаны модули автоматизации, позволяющие управлять следующими программами без участия оператора:

- cURL (<http://ru.wikipedia.org/wiki/CURL>) — программное обеспечение для загрузки файлов с использованием протоколов HTTP, FTP и других позволяет полностью автоматизировать загрузку файлов из файловых архивов; поддерживает различные методы аутентификации и типы прокси-серверов;

- RNX2CRX, CRX2RNX (<http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html>) — набор утилит для преобразования файлов в формате RINEX в формат CompactRINEX и обратно;

- gzip (<http://ru.wikipedia.org/wiki/Gzip>) свободно распространяемый архиватор файлов;

- wconvert, gpbrin (http://www.novatel.com/Documents/Waypoint/Downloads/NavNet810_Manual.pdf) — набор API-утилит из коммерческого программного продукта GrafNav/GragNet (требует приобретения лицензии, разрабатывается компанией NovAtel-Waypoint inc, Канада), позволяющие выполнить преобразование наблюдений большинства современных проприетарных форматов ГНСС-оборудования в формат RINEX 2.10.

Имея в распоряжении такой набор программного обеспечения и создав процедуры автоматизации его запуска, автор получил возможность в целом автоматизировать все перечисленные выше задачи загрузки и преобразования измерительных файлов.

Оптимизация работы. Первые программные реализации ОСТАВА_PPA были предназначены

для верификации разработанных методов и алгоритмов с целью изучения их свойств. При этом основное требование, которое при этом предъявлялось, состояло в точности соответствия программ и алгоритмов. В 2005 г. был взят курс на создание такого образца ПАК, который был бы способен решать не только научные, но и практические задачи. К моменту регистрации авторских прав на ОСТАВА_PPA в 2008 г., программный комплекс уже не единожды был использован при выполнении различных научно-практических задач, однако имел ряд ограничений.

Во-первых, сравнительно низкое быстродействие: время обработки одного измерительного файла, содержащего одни сутки измерительной информации, могло достигать 3...4 ч.

Во-вторых, при обработке файлов длительностью 12 ч и более часов возникали проблемы, вызванные ограниченным объемом оперативной памяти.

В связи с тем, что ОСТАВА_PPA должна стать одним из комплексов для создания центра по обработке ГНСС-наблюдений потребителей, то должны были быть приняты меры по оптимизации программных модулей, как по быстродействию, так и по объёму используемой памяти. Так как MatLab является преимущественно языком для научных исследований, то решению задачи оптимизации при изучении этой среды программирования обычно не уделяется достаточно внимания. В литературных источниках (см., например, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5685-writing-fast-matlab-code>), созданных энтузиастами системы MatLab, можно найти рекомендации по созданию таких программных модулей, которые будут эффективно и максимально быстро выполнять любые задачи. При этом скорость выполнения операций, по наблюдению автора, может быть сопоставима со скоростью программ на языке С. Автором были разработаны и собственные приёмы оптимизации, что позволило сократить время обработки одного суточного файла наблюдений с 3...6 ч до 20—40 мин (в зависимости от числа аномалий в сеансе).

Решение проблемы сегментирования оперативной памяти. Одной из проблем при работе

с большими массивами (десятки-сотни мегабайт) в MatLab является проблема, которая может быть названа «сегментация памяти», которая проявляется в постепенном уменьшении максимального объёма переменной, которую возможно создать. Так, если непосредственно после запуска среды MatLab этот объём может составлять 1 гигабайт и более, то после активной работы с переменными объёмом в десятки-сотни мегабайт этот объём снижается на один-два порядка, что делает невозможным дальнейшую работу с такими массивами. После перезапуска среды программирования способность создавать большие переменные восстанавливается. Поэтому было предложено создать программу следующим образом.

Вспомогательная программа-скрипт формирует входные данные и структуры переменных настроек, необходимые для запуска ОСТАВА_PPA. Затем для исполнения основной программы запускается ещё одна копия MatLab, используя возможности команды «dos». В новой копии выполняется проверка доступности необходимого пространства оперативной памяти с использованием команды «memory». Завершением работы основной программы является исполнение команды «exit», закрывающей дополнительную копию MatLab. Кроме того, подобный подход позволяет выполнять обработку нескольких файлов одновременно на многопроцессорных компьютерах с запуском нескольких независимых копий основной программы.

Применение Embedded MatLab. Embedded MatLab (<http://www.mathworks.com/help/toolbox/eml/>) является пакетом расширения, позволяющим, при соблюдении синтаксиса, сходного, но всё же отличного от традиционного MatLab, создавать программы, которые встроенными средствами системы программирования преобразуются исходный код на языке С и компилируются в С-библиотеку. Скорость выполнения такой библиотеки, чаще всего выполняющей рутинные алгебраические и тригонометрические операции, может быть в 2-3 раза, а иногда и на порядок выше, чем у MatLab-прототипа.

Были разработаны процедуры, позволяющие компилировать такие С-библиотеки «на

лету» при исполнении программы. Необходимость этого обусловлена тем, что размерности и типы всех переменных для процедур, написанных с применением Embedded MatLab, должны быть обязательно определены. При этом время, затрачиваемое на компиляцию, значительно меньше, чем выигрыш времени от использования Embedded MatLab.

Следует отметить, что использование описанного выше подхода, как показали исследования, оправданно лишь для процедур со значительным объёмом однотипных вычислений, например во вложенных циклах.

ПЛАНЫ ВНЕДРЕНИЯ И ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

К концу 2010 г. в ГАО НАНУ завершается создание Центра автоматизированной обработки ГНСС-наблюдений, целью которого является предоставление следующих услуг:

- анализ качества наблюдений потребителей;
- предоставление доступа к наблюдениям сети базовых станций, прошедших предварительный контроль качества;
- автоматизированная обработка статических и кинематических наблюдений потребителей с целью получения высокоточных координатных решений;
- пересчет систем координат и др.

Одной из важнейшей составляющей программного комплекса создаваемого Центра обработки наблюдений будет ПАК ОСТАВА, который будет выполнять обработку двухчастотных и одночастотных ГНСС (GPS+ГЛОНАСС+SBAS) наблюдений сети перманентных референцных станций и наблюдений потребителей Украины, выполненных в статическом и кинематическом режимах измерений. Отличительной особенностью вычислительного комплекса Центра обработки является возможность получения сантиметровой точности позиционирования (как в статическом, так и в кинематическом режимах) по результатам наблюдений сравнительно недорогого одночастотного геодезического ГНСС-оборудования, которое в настоящее время весьма широко используется в Украине при выполнении геодезических, кадастровых и дру-

гих работ, где требуется высокая точность координатных определений.

Дальнейшее развитие описанного программного комплекса предполагает продолжение работ по расширению функциональных возможностей ПАК ОСТАВА_PPA путём усовершенствования существующих, создания и внедрения новых методов и алгоритмов предварительной обработки и анализа ГНСС-наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный отечественный ПАК ОСТАВА_PPA не имеет аналогов в Украине, является конкурентоспособным уникальным научно-техническим продуктом многолетней разработки и исследований творческого коллектива авторов. Данный комплекс позволил выполнить целый ряд актуальных научно-практических исследований в области разработки новых эффективных методов и алгоритмов точного ГНСС-позиционирования и представляет собой серьезный научный и практический базовый инструмент, без которого исследования, создание и внедрение новых передовых методов обработки ГНСС-информации будут либо невозможны, либо существенно ограничены.

Представленная в данной статье разработка финансировалась ГАО НАНУ на протяжении 2002—2010 гг. Результаты модернизации описанного программного комплекса получены в ходе выполнения научно-технического проекта «Оптимізація мережі перманентних ГНСС-станцій України та дослідна експлуатація центру збору та обробки інформації для забезпечення робіт з геодезії, кадастру та навігації рухомих об'єктів», который выполняется в 2010 г. ГАО НАНУ по заказу НАН Украины, и научно-исследовательской работы «Розробка, дослідження та тестування програмного забезпечення автоматизованої мережної обробки ГНСС-спостережень», выполняемой ХНУРЕ по заказу ГАО НАНУ.

Автор признателен Я. С. Яциву за всестороннюю поддержку разработки, а также А. А. Жалило за помощь в подготовке рукописи.

1. Гофманн-Велленгоф Б., Лихтнеггер Г., Коллинз Д. Глобальная система визначення місцеположення (GPS).

- Теорія і практика / Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1995. — 380 с.
2. Жалило А. А., Шелковенков Д. А. «ОCTAVA»: многофункциональный программный инструментальный обработки и анализа GPS/GNSS наблюдений // Интегрированные навигационные системы: Тр. XIV междунар. конф. — С.-Пб., 2007. — С. 319—321.
 3. Жалило А. А., Шокало В. М., Саданова Н. В. и др. Сглаживание двухчастотных кодовых GPS-наблюдений с использованием фазовых в режиме послесеансной обработки // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: Сб. тр. 2-го Междунар. радиоэлектронного Форума (МРФ-2005). Междунар. конф. по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), Харьков, ХНУРЭ, 19—23 сентября 2005 г. — Харьков: ХНУРЭ, 2005. — Т. 2. — С. 548—551.
 4. Жалило О. О., Шелковенков Д. О. Програмный продукт «Програмный комплекс OCTAVA_PPA» // Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір № 24507. — Київ: Міністерство освіти і науки, 2008.
 5. Інформаційно-вимірвальна GNSS-система та мережна VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок: Зб. наук. праць міжнар. наук.-практ. конф. «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування — європейський досвід» (Чернігів, 21 — 23 травня 2008 р.). — Чернігів: Чернігівський державний ін-т економіки і управління, 2008. — Вип. 4. — С. 5—24.
 6. О контроле качества двухчастотных GPS-наблюдений на этапе предварительной обработки: Праці міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Одеса, 22—26 травня 2006 р.). — Одеса: ВМВ, 2006. — Т. 1. — 233 с.
 7. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1993. — 408 с.
 8. Шелковенков Д. А. Контроль качества кодовых и фазовых GPS-наблюдений на этапе предварительной обработки // Интегрированные навигационные системы: Тр. XIV междунар. конф. — С.-Пб., 2007. — С. 310—312.
 9. Bisnath S. B., Kim D., Langley R. B. A new approach to an old problem: carrier-phase cycle slips // GPS World. — 12, N 5. — P. 46—51.
 10. Estey L. H., Meertens C. M. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data // GPS Solutions. — 1999. — 3. — P. 42—49.
 11. Hewitson S., Wang J. GNSS receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) performance analysis // GPS Solutions. — 2006. — 10 (3). — P. 155—170.
 12. Zhaililo A. A., Sadanova N. V. Pre-Processing and Analysis software «OCTAVA_PPA»: concept, possibilities and features, initial test results // Proceedings of the 2004 International Symposium on GNSS/GPS (GNSS 2004), Sydney, Australia, 6—8 December 2004.
 13. Zhaililo A. A., Sadanova N. V. Carrier-phase cycle-slip detection, estimation and correction of dual-frequency GPS data — new efficient technique, algorithms and experimental results // Astronomy in Ukraine — Past, Present and Future: Abstract book. — Kiev: Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2004. — P. 154.
 14. Zhaililo A., Shelkovenkov D. Features and service performance of multifunctional software toolkit OCTAVA for processing and analysis of GPS/GNSS observations // GEOS 2007 Conference Proceedings, Prague, Czech Republic, 1—2 March 2007. — Prague, 2007. — P. 102—110.

Надійшла до редакції 28.12.10

D. A. Shelkovenkov

MULTIFUNCTIONAL SOFTWARE-ALGORITHMIC COMPLEX FOR PRE-PROCESSING OF GNSS-OBSERVATIONS, OCTAVA_PPA

We consider the principles of the construction and functioning of the universal software-algorithmic complex OCTAVA_PPA intended for the preliminary post-session processing of observations of global satellite navigation systems (GNSS). The methodical and algorithmic basis of the complex, its functional abilities and characteristics are presented. The improvements of the software complex during 2009—2010 are described. Some prospects for the development and implementation of the complex are briefly considered.