

УДК 621.396.98

В.П. Харченко<sup>1)</sup>, д.т.н., проф, А.А. Жалило<sup>2)</sup>, к.т.н., с.н.с., В.В. Конин<sup>1)</sup>, д.т.н.,  
В.М. Кондратюк<sup>2)</sup>

## МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ НАВИГАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОЗОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ GPS (GNSS)

<sup>1)</sup>Национальный авиационный университет, Киев, Украина; email: [cnsatm@nau.edu.ua](mailto:cnsatm@nau.edu.ua)

<sup>2)</sup>ООО НПП«ГРАНАС», Украина; email: [granas@ukr.net](mailto:granas@ukr.net)

*Приводится краткое изложение методик оценок характеристик широкозонных спутниковых функциональных дополнений типа SBAS*

Рассмотрим характерные особенности ныне существующих и широко используемых в мире технологий и подсистем дифференциальной коррекции GPS(GNSS)–наблюдений.

При традиционном методе дифференциальной навигации каждая референцная (базовая) станция независимо от других станций автономно формирует и распространяет потребителям RTCM SC-104 DGPS-коррекции. При этом станция должна выполнять автономный контроль целостности GPS и передаваемых потребителям сообщений (коррекций). Последние вычисляются для наблюдений каждого спутника в отдельности, за исключением редко используемого т.н. инверсного метода дифференциальной коррекции, когда поправки формируются не к наблюдениям, а к координатам объекта с учетом совместно "видимого" созвездия спутников. При нормальных условиях остаточные после коррекции погрешности местоопределения обусловлены атмосферными эффектами (как ионосферными, так и тропосферными погрешностями), многолучевостью и, в меньшей степени, орбитальными погрешностями. Для погрешностей с сильной пространственно-временной корреляцией (атмосферные и орбитальные эффекты) эффективность их коррекции уменьшается с увеличением расстояния между базовой станцией и потребителем и на больших удалениях (500 – 2000 км) точность DGPS-местоопределения может быть практически сравнимой с точностью автономного местоопределения.

Рост требований в мире к точности и надежности определения местоположения обусловил появление т.н. широкозонных дифференциальных WADGPS подсистем (функциональных дополнений GPS(GNSS)) и соответствующих информационных услуг. При "широкозонном" подходе наблюдения разреженной сети GPS-станций совместно обрабатываются, чтобы максимально использовать свойства сильной пространствен-

но-временной корреляции атмосферных и орбитальных (эфемеридных) погрешностей путем их моделирования в зоне действия (покрытия) сети референчных станций. Такой WADGPS-подход позволяет значительно повысить уровень точности и надежности местоопределения и обеспечить практически равномерное распределение точности коррекций по всей зоне покрытия сети станций.

Существует несколько различных подходов и алгоритмов, которые используются для формирования WADGPS-коррекций. Можно выделить две главные группы алгоритмов. Первая группа формирует коррекции в пространстве измерений, вторая – в пространстве состояний отдельных моделируемых составляющих погрешностей наблюдений [1].

При реализации первого подхода (первой группы), который в литературе также получил название **Multi-Reference Differential (MRD)**, на каждой станции сети одновременно формируются кодовые DGPS-коррекции, которые затем в центре сбора и обработки (ЦСО) подвергаются контролю качества и целостности и взвешенной обработке так, чтобы ее результаты (в виде коррекций либо их функций) передать потребителям, где формируются текущие, оптимальные для данного местоположения потребителя, сетевые поправки, получившие название коррекций виртуальной референчной (базовой) станции (**Virtual Reference (Base) Station – VRS(VBS)**), как бы находящейся рядом с потребителем даже с изменением его местоположения. Такой подход является относительно простым и для его реализации необходимо относительно небольшое количество референчных станций (например, компания OmniSTAR/FUGRO обеспечивает VBS-коррекциями Северную Америку с использованием только 10 станций).

При реализации второго подхода (второй группы), который получил широко используемое

название **Wide Area Differential (WAD)**, по двухчастотным наблюдениям сети референчных станций вычисляются параметры моделей каждого источника погрешностей в отдельности. Обычно это – уходы спутниковых часов, эфемериды и ионосферная задержка. Параметры, описывающие поведение этих погрешностей, передаются потребителям в зоне обслуживания сети (GPS/GNSS-подсистемы). У потребителей вектор параметров коррекций преобразуется в вектор коррекций наблюдений для каждого спутника в отдельности также с учетом текущего местоположения потребителей. Поэтому в широком смысле его также можно назвать VRS-методом. Этот подход положен в основу подсистем **WAAS** (США), **EGNOS** (ЕС), **MSAS** (Япония), **GPS-C** (Канада) и др. Он значительно сложнее подхода MRD и требует адекватного количества референчных станций для его реализации. В то же время, WAD-метод потенциально обладает большими возможностями по ряду характеристик по сравнению с методом MRD.

Как показывает практика, в части точности одночастотных координатных определений по кодовым наблюдениям оба метода в эквивалентных условиях дают близкие результаты. В наиболее современных коммерческих двухчастотных сетевых системах (High Performance OmniSTAR/FUGRO и StarFire NavCom Technologies/John Deere) высокой (дециметровой и сантиметровой) точности с использованием неоднозначных фазовых наблюдений применяют, как можно видеть из [2], комбинированный подход WAD/MRD. Поэтому для общего обозначения сетевых дифференциальных подсистем спутниковой навигации мы будем использовать устоявшийся в зарубежной литературе термин WADGPS.

В процессе оценивания точности отдельных составляющих широкозонных (WAAS, EGNOS) коррекций и определения местоположения с использованием этих коррекций в целом немаловажную роль играет такой фактор, как точность привязки антенны "контрольного" GPS/EGNOS приемника в системе координат WGS-84 (или ITRF), особенно, если этот приемник удален от ближайших перманентных станций IGS на десятки или даже сотни километров, что имеет место, в частности, в Украине. Эта проблема рассматривается, например, в [3], где обосновываются требования к точности пространственной привязки фазового центра приемной антенны контрольного приемника (погрешности привязки не должны превышать 10 см (95%)) и анализируются различные факторы, такие как эффекты

геодинамики, которые следует учитывать в ходе проведения экспериментов.

В последние несколько лет на мировом рынке передовых GPS/GNSS-технологий определения местоположения высокой точности появились коммерческие продукты и услуги с беспрецедентными точностными характеристиками. Речь идет о таких технологиях и системах, как **Omnistar High Precision (HP) Services (Omnistar/FUGRO)**, **Racal Genesis (Thales Geosolutions – бывшая RACAL)** и **StarFire (NavCom Technologies/ John Deere)**. Главная особенность этих новейших технологий и систем – достижение дециметровой точности в статическом и кинематическом режимах съемки в реальном времени в зонах покрытия разреженных сетей станций на удалениях от референчных станций до 1000 км.

Принципиальные отличия и необычные возможности таких технологий и систем по отношению к традиционным технологиям DGPS состоят в следующих положениях:

- **сетевой принцип** – совместная обработка наблюдений сети референчных двухчастотных GPS станций позволяет отдельно оценить медленноменяющиеся (эфемеридные, ионосферные, тропосферные и частотно-временные) составляющие погрешностей, найти пространственно-временные модели этих погрешностей в рабочей зоне сети станций и точно рассчитать эти погрешности для потребителей; это важнейшее свойство сетевой технологии позволяет во много раз расширить зону действия дифференциального режима, в которой точность уже не будет зависеть от удаления потребителя от той или иной опорной станции;

- **использование фазовых наблюдений** (инструментальные погрешности составляют единицы миллиметров) позволяет достичь на один-два порядка более высокую точности, чем при использовании традиционного кодового DGPS-метода, в том числе и за счет практически полного парирования многолучевости по сравнению с кодовыми наблюдениями; достижения перечисленных компаний состоят в том, что им удалось реализовать робастную обработку (устранение фазовых "слипов" и разрешение неоднозначности) точных, но неоднозначных фазовых наблюдений на измерительных базах ~1000 км в реальном масштабе времени с результирующей точностью координатных определений ~10 см (95%) с доставкой корректирующей информации потребителям через созвездие геостационарных спутников практически в общепринятом масштабе;

• **использование двухчастотных приемников у потребителей** – это позволило практически полностью исключить наиболее значимую и наиболее изменчивую ионосферную составляющую погрешностей как в местах расположения референчных станций, так и пользователей; при этом значительно облегчается разрешение неоднозначности фазовых измерений.

Основные приложения новых технологий типа OmniSTAR HP: геодезическая съемка и ГИС; фотограмметрия; картография; кадастр; прокладка трубопроводов; укладка кабеля или оптоволоконка; тестирование авионики и аэронавигационных систем; дистанционное управление транспортными средствами, сельскохозяйственными машинами, подъемными кранами, швартовка судами; сейсмическая съемка и др.

В рамках направлений обеспечения траекторного контроля FIS во время инспекционных полетов проверки (мониторинга) характеристик аэронавигационного обеспечения (АНО), в том числе с использованием сигналов GPS/EGNOS, рассматриваемые технологии высокой точности как нельзя лучше отвечают требованиям к эталонным системам траекторного контроля и мониторинга точностных характеристик современного АНО.

Нужно сказать, что массовое применение таких высокоточных технологий и систем пока ограничивается более высокой (по отношению к одночастотному DGPS и WADGPS оборудованию) ценой соответствующего двухчастотного оборудования потребителей, способного принимать двухчастотные фазовые коррекции, и подлиски на услуги коррекции.

Достаточно детальное описание принципов функционирования, инфраструктуры сети референчных станций, сегментов управления, сбора, обработки наблюдений и передачи коррекций потребителям, а также верификации и мониторинга точностных характеристик системы **StarFire (NavCom Technologies/John Deere)** дано в [2]. Там же приводятся результаты экспериментов по оценке точности GPS-определений с использованием сигналов широкозонных функциональных дополнений WAAS и EGNOS, когда эталоном служили данные GPS/**StarFire**. На рис.1, 2 приведены взятые из [2] временные зависимости погрешностей (в плане и по вертикали) наблюдений приемника **NavCom NCT-2000/StarFire** на эталонных точках с заранее известными (на миллиметровом уровне точности) координатами.

На рис. 3, 4 [2] приведены погрешности определений по сигналам GPS/WAAS (рис. 3) и GPS/EGNOS (рис. 4). В последнем случае за эталон брались координаты, полученные по технологии **NavCom/StarFire**.

Итоги трехлетнего опыта экспериментальных исследований характеристик ESTB/EGNOS, ближайшие перспективы разработки и развития EGNOS и специально разработанный инструмент оценки характеристик ESTB/EGNOS – программный комплекс постсеансной обработки PEGASUS достаточно детально изложены в докладах [4, 5, 6].

Обзор результатов экспериментов по комплексному оцениванию всех характеристик такой сложной подсистемы как EGNOS (ESTB) является отдельной довольно объемной задачей. Здесь мы рассмотрим только некоторые вопросы, связанные с направлениями нашего обзора.

Очень интересным представляется описанный в [5] пример разработки французского космического агентства (CNES) специального инструментария (EGNOS Performances Observatory - **EPO**) для обработки сообщений и "сырых" измерений SBAS/EGNOS и сравнения их с другими (референчными) источниками информации. Такое сравнение проводилось на нескольких уровнях:

- по координатам, полученным по сигналам GPS с использованием SBAS-коррекции, которые сравнивались с эталонными очень точными значениями, определенными по данным IGS- или других базовых станций;
- по ионосферным коррекциям и уровням их погрешностей (GIVD-GIVE), передаваемым SBAS, которые пересчитывались в коррекции псевдодальностей до спутников GPS в соответствии с алгоритмом, определенном MOPS, и затем сравнивались с ионосферными задержками, полученными из прямых двухчастотных наблюдений;
- по эфемеридным погрешностям и погрешностям коррекции уходов часов спутников GPS (т.е. по так называемым "медленным" (slow) и "быстрым" (fast) коррекциям), которые
- сравнивались с IGS-данными (IGU, IGR или SP3 типы данных).

EPO содержит в себе и другие виды средств оценки и контроля данных, например, для проверки уходов координат RIMS, качества собранных данных и др. В общем виде архитектура EPO CNES представлена на рис. 5.

22 March 2003			
Ave.(m)	East -0.009	North -0.009	Up 0.028
Sigma(m)	0.071	0.038	0.142

Starfire Monitor at Moline in N.E. USA  
NavCom NCT-2000D Receiver  
ITRF2000 Reference Position

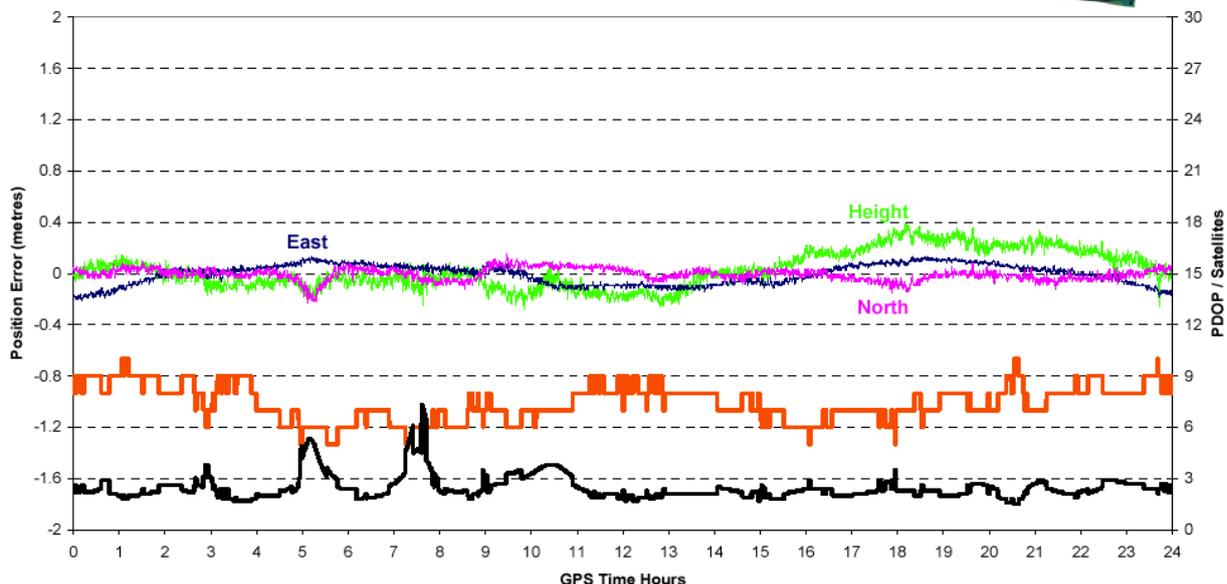


Рис. 1 . Точностные характеристики StarFire на территории США

07:30 1st to 07:30 2nd April 2003			
Ave.(m)	East 0.040	North 0.031	Up -0.069
Sigma(m)	0.089	0.049	0.103

Starfire Monitor at Zweibrucken in Germany  
NavCom NCT-2000D Receiver  
ITRF2000 Reference Position

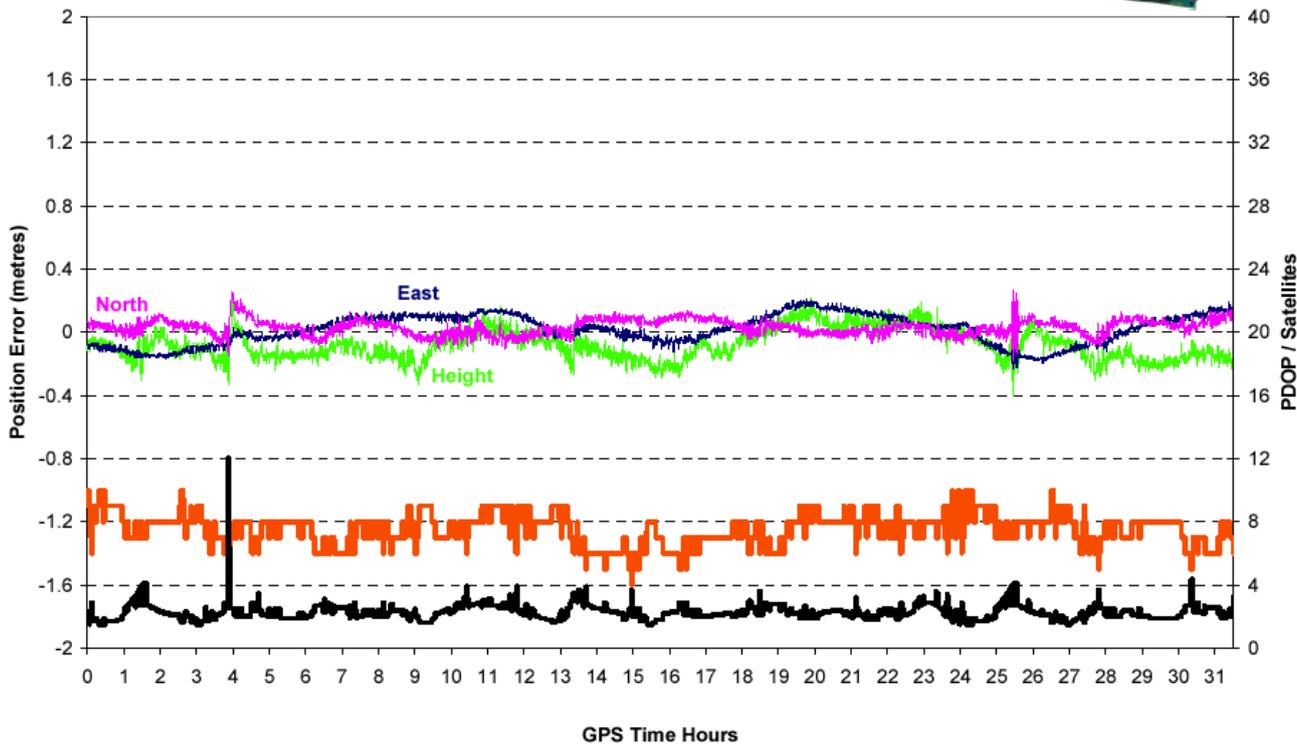


Рис. 2. Точностные характеристики StarFire на территории Европы

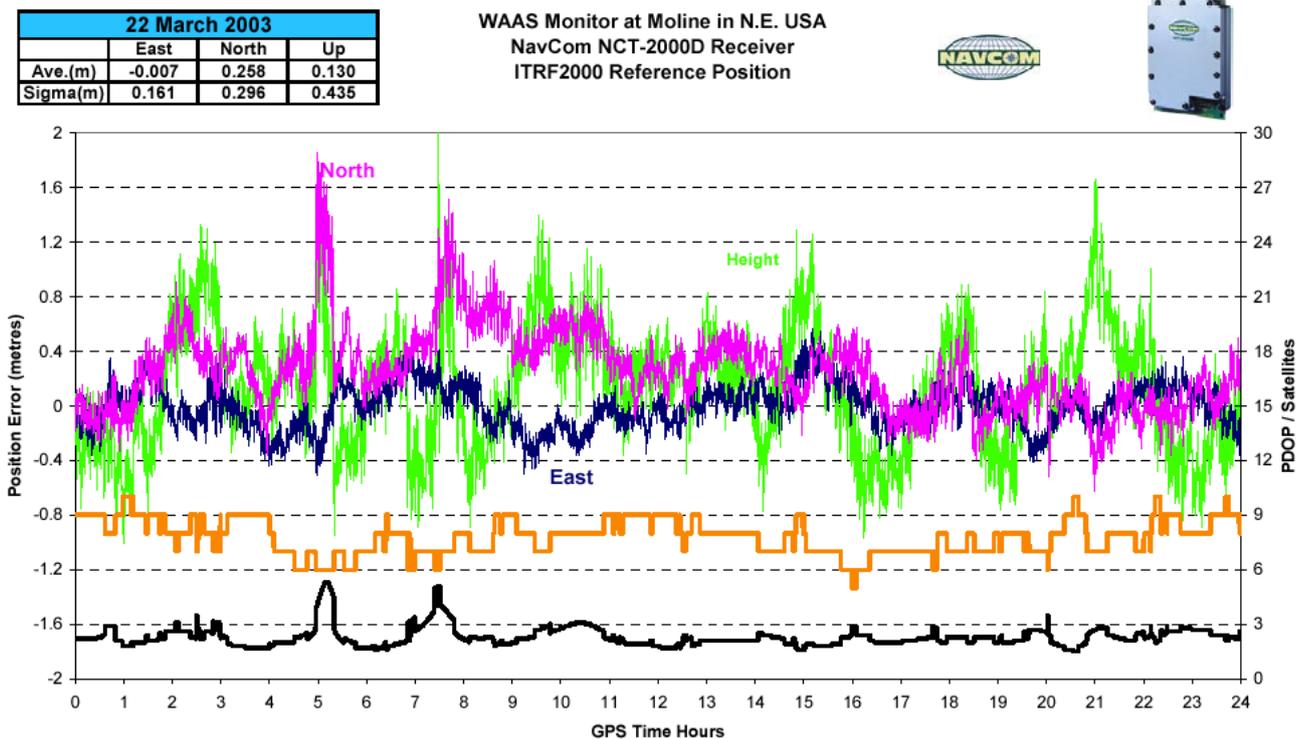


Рис. 3. Точностные характеристики WAAS

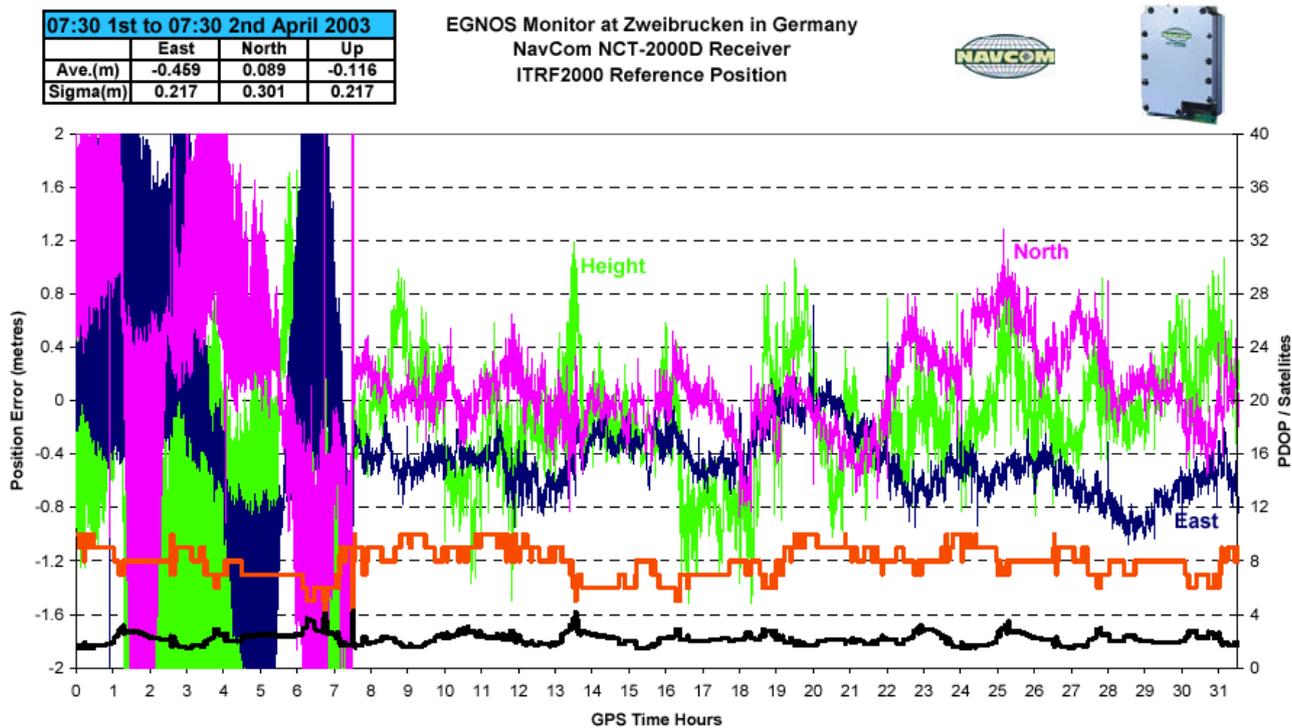


Рис. 4. Точностные характеристики EGNOS. На рисунке четко виден момент перехода в новый, WAAS-подобный, режим коррекции

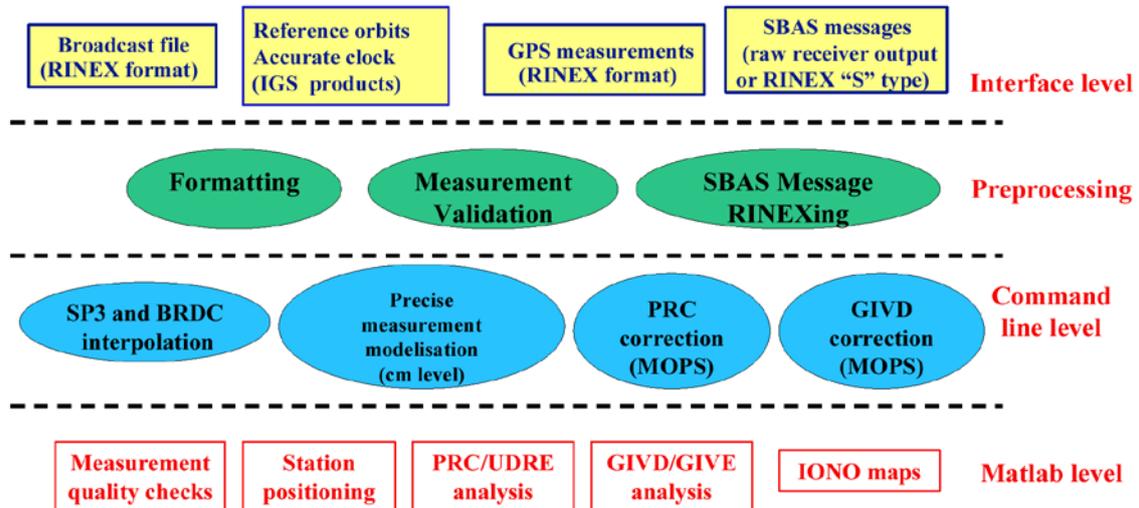


Рис. 5. Архитектура EPO CNES - инструментария для оценки характеристик коррекций "сырых" измерений SBAS/EGNOS и сравнения их с опорными данными

Каждый проведенный цикл обработки с использованием EPO документируется в отдельном отчете, а полученные результаты анализируются и используются для коррекции и усовершенствования алгоритмов EGNOS. Следует уделить внимание и такому перспективному инструменту контроля характеристик ESTB/EGNOS, как программный комплекс PEGASUS (Prototype EGNOS Analysis System Using SAPHIRE), который был создан по инициативе Евроконтроля в рамках программ GNSS Programme и European Air Traffic Management Programme как прототип штатного комплекса PACF (Performance Assess-

ment and system Check-out Facility) оценки и мониторинга (контроля) характеристик EGNOS. PEGASUS является эволюцией системы SAPHIRE, в которой ранее уже были внедрены алгоритмы анализа характеристик местоопределения, автономного контроля целостности и доступности сигналов GNSS по накопленным данным бортовых наблюдений на коммерческих ВС. PEGASUS позволяет обрабатывать данные псевдодалномерных наблюдений, широкозонной корректирующей информации SBAS и данных целостности для GPS и ESTB. Архитектура ПО PEGASUS изображена на рис. 6.

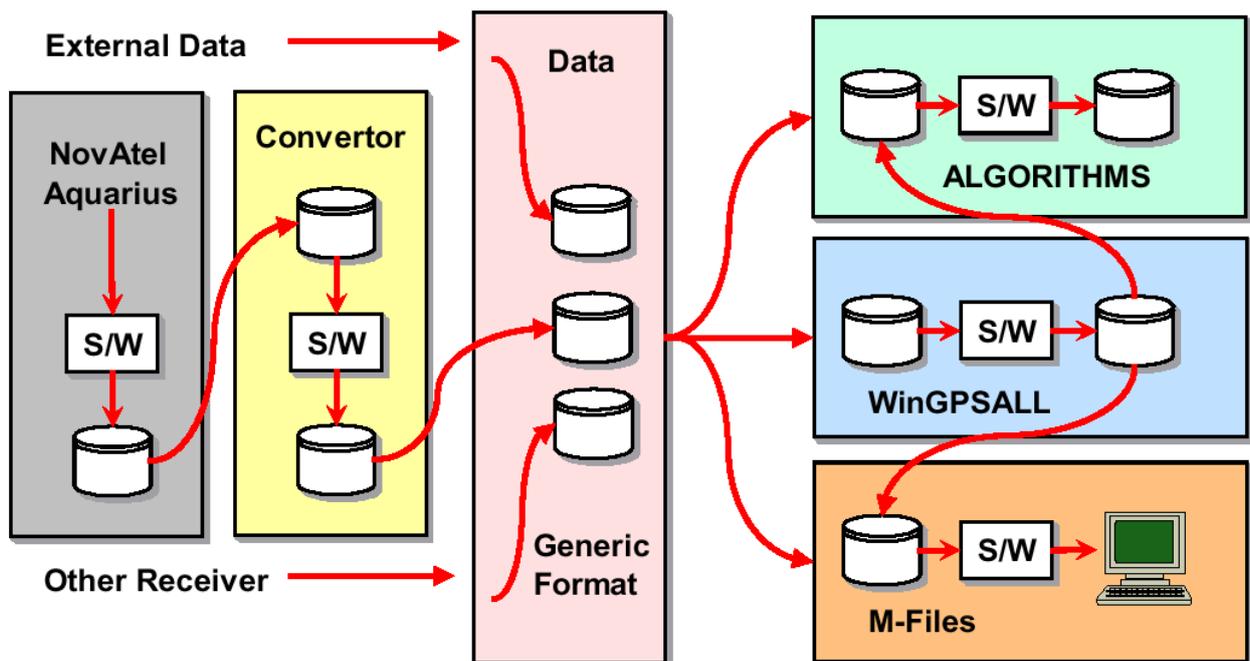


Рис. 6. Архитектура программного обеспечения PEGASUS

ПО PEGASUS состоит из трех главных программных компонентов. Программа CONVERTOR транслирует данные наблюдений GNSS-приемника в специфический формат ПО PEGASUS. Программа WinGPSALL использует выходные данные программы CONVERTOR для получения GNSS-решения, анализа текущего созвездия, предиктивной оценки величин, характеризующих качество мониторинга целостности, и для выполнения самого мониторинга целостности, используя алгоритмы RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) и AAIM (Aircraft Autonomous Integrity Monitoring). Архитектура ПО PEGASUS позволяет иметь доступ ко всем данным на всех стадиях обработки, их отображения и визуализации с использованием возможностей системы MATLAB. Важно отметить, что реальные погрешности местоопределения не могут быть оценены в ПО PEGASUS без высокоточных опорных (референчных) данных извне как при работе в статическом режиме на земле, так и при проведении лётных экспериментов. В то же время, оценка горизонтального и вертикального защитных уровней HPL (Horizontal Protection Level) и VPL (Vertical Protection Level) не требует знания очень точного местоположения.

ПО PEGASUS является доступным (на бесплатной основе) инструментарием и может быть успешно использован для проведения исследовательских работ по оценке характеристик EGNOS на территории и в воздушном пространстве Украины.

Кратко рассмотрим еще один важный аспект оценки точности местоопределений и отдельных составляющих погрешностей наблюдений по сигналам GPS/EGNOS- верификацию, рекомендуемых SARPS тропосферных моделей для коррекции наблюдений по сигналам GPS/WAAS/EGNOS.

Тропосферная задержка является одним из главных источников погрешностей спутниковых навигационных определений. Величина тропосферной задержки превышает 2 м в зените и 20 м на малых углах места, т.е. менее 10 градусов. Если эта задержка не будет должным образом промоделирована, погрешности местоопределения могут достигать 10 м.

Документ SARPS ICAO рекомендует использовать эмпирический алгоритм тропосферной коррекции наблюдений GPS/WAAS/EGNOS, применяющий в качестве входных параметров оценку текущей высоты объекта и усредненные оценки пяти метеорологических параметров, учитывающий средние значения и сезонные вариации этих параметров. Эта модель разработана в университете г. New Brunswick (Канада) на основе обработки многолетних измерений метеоданных, включая наблюдения шаров-зондов на территории Северной Америки. Такая простая модель, хотя и рекомендована ICAO к использованию в глобальном масштабе, не учитывает изменения погоды с высокой точностью и может не отражать характеристики локальных регионов в различных частях мира, например, в Европе. Это потребовало проведения ряда экспериментов для подтверждения возможности исполь-

зования рекомендованной модели в зоне действия EGNOS. Так, например, в работе английских ученых [7] даны результаты исследований по верификации рекомендуемой SARPS ICAO модели расчета тропосферных коррекций на территории Объединенного Королевства.

В [7] рекомендуемые для использования в EGNOS тропосферные коррекции, с целью оценки точности модели, сравнивались с оцененными по фазовым GPS-наблюдениям тропосферными задержками. Допустимая погрешность моделирования зенитной тропосферной задержки по рекомендуемой SARPS модели не должна превышать 0,12 м (RMS). Достигнутая точность оценки вертикальных тропосферных задержек по GPS фазовым наблюдениям (периоды усреднения - 15 минут) составила около 1 см, что позволило успешно верифицировать рекомендуемую для использования модель. Для связи зенитной и наклонной задержки в [7] была использована эмпирическая функция отображения (Mapping Function) Niell, которая является очень точной и применяется для наблюдений как при высоких, так и при очень низких углах места – даже менее 5 градусов. Наблюдения и соответствующий анализ были проведены в течение года на месячных выборках каждого периода года. Как показали исследования, максимальная зенитная погрешность тропосферного моделирования составила ~16 см, что близко к требованиям ICAO. Такая погрешность моделирования зенитной тропосферной задержки может привести к погрешности определения местоположения по горизонтальным координатам объекта ~ 43 см и по вертикальной координате ~1,5 м.

Распространение действия EGNOS на территорию Украины требует проведения аналогичных [7] исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cannon M.E., Skone, S. Gao Y., Moon Y., Chen K., Crawford S., Lachapelle G., "Performance Evaluation of Several Wide-Area GPS Services", ION GPS 2002, 24-27 September 2002, Portland, OR.
2. Dixon K. (NavCom Technology / USA). "A Global Satellite Based Augmentation System: Starfire – Real time Decimetre Accuracy", GNSS 2003 – The European Navigation Conference 22-25 April 2003/Austria.
3. Su H., Schneider J.-Y., Ruf C. "Statistical Analysis on the Influence of User Receiver Antenna Position Errors on EGNOS System Accuracy Assessment", GNSS 2003 – The European Navigation Conference 22-25 April 2003/Austria.
4. Basker S., Solari G., Ventura-Traveset J., Motefusco C., "The Transition from ESTB to EGNOS: Managing User Expectation", GNSS 2003 – The European Navigation Conference 22-25 April 2003/Austria.

5. Suard N., Secretan H., Beltan T., “**ESTB Operations 3 Years of Experience, Perspectives**”, GNSS 2003 – The European Navigation Conference 22-25 April 2003/Austria.

6. Butzmuehlen C., Stolz R., Farnworth R., Breeuwer E., “**PEGASUS – Prototype Develop-**

**ment for EGNOS Data Evaluation – First User Experiences with the EGNOS System Test-Bed**”.

7. Dodson A.H., Chen W., Baker H.C., Penna N.T., Roberts G.W., Jeans R.J., Westbrook J., “**Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model**”, ION GPS’99, 14-17 September 1999, Nashville, TN.

УДК 621.396.98

*Prof. Vladimir P. Kharchenko<sup>1)</sup>, Alexey A. Zhalilo<sup>2)</sup>,  
Prof. Valery V. Konin<sup>1)</sup>, Vasily M. Kondratyuk<sup>2)</sup>*

**METHODOLOGIES OF VERIFICATION OF NAVIGATION PERFORMANCE  
OF WIDE AREA GPS (GNSS) AUGMENTATION SUBSYSTEMS**

<sup>1)</sup>The National Aviation University, Kiev, Ukraine; email: cnsatm@nau.edu.ua

<sup>2)</sup>Granas Ltd, Scientific& Production Enterprise, Kiev, Ukraine; email: granas@ukr.net

*The summary of the methods of experimental evaluation of the performance of type SBAS Wide Area GPS (GNSS) Augmentation subsystems is given.*