

УДК 621.396.98

**В.П. Харченко¹⁾, д.т.н., проф, А.А. Жалило²⁾, к.т.н., с.н.с.,
В.В. Конин¹⁾, д.т.н., проф., В.М. Кондратюк²⁾**

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОЗОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ GPS (GNSS)

¹⁾Национальный авиационный университет, Киев, Украина; email: cnsatm@nau.edu.ua

²⁾ООО НПП«ГРАНАС», Украина; email: granas@ukr.net

Рассматриваются вопросы методического обеспечения, а также примеры использования аппаратных и программных средств для оценивания и анализа навигационных характеристик GPS (GNSS) широкозонных спутниковых функциональных дополнений типа SBAS в различных региональных условиях и зонах обслуживания потребителей, включая граничные районы рабочих зон этих систем

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам экспериментальной оценки и анализа навигационных характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS/ГЛОНАСС – WAAS и EGNOS- в различных региональных условиях и зонах обслуживания потребителей посвящены работы [110, 212, 313, 16, 17]. В этих отобранных для рассмотрения работах описываются результаты исследований характеристик широкозонных WADGPS-подсистем спутниковой навигации на границах рабочих зон этих подсистем, что может представлять немалый интерес для потенциальных пользователей сигналами EGNOS в Украине. Сигналы EGNOS уже доступны на части территории Украины и с точки зрения технической реализуемости не существует принципиальных препятствий для расширения зоны действия EGNOS на всю территорию Украины.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОЗОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ

В работе [1] представлены результаты выполнения проекта по всесторонней оценке возможности использования WAAS в воздушном пространстве Исландии, а также на границах расчетной зоны действия WAAS – на самых высоких широтах вблизи Северного Полюса. Необходимость выполнения этого проекта была обусловлена, в первую очередь, высокой плотностью перелётов (~30%) между Северной Америкой и Европой через Северо-Атлантический коридор, проходящий через Исландию.

В ходе этого многоцелевого проекта ICAA (Icelandic Civil Aviation Administration) – FAA (USA) кроме летных испытаний на маршрутах проверялась жизнеспособность WAAS в качестве инструментария для осуществления захода на

посадку посредством многочисленных (около 200) летных экспериментов. Был проанализирован вклад исландской тестовой референционной станции (в составе прототипа WAAS – National Satellite Test Bed (NSTB)) в результирующую точность оценки параметров орбит GPS-спутников. Данные наблюдений указанной станции были использованы и для определения воздействия свойственных высоким широтам авроральных эффектов на характеристики приема сигналов GPS и WAAS.

Ввиду того, что данный проект представляет значительный методический интерес, остановимся подробнее на узловых моментах и выводах данного проекта.

А) Летные испытания продемонстрировали, что WAAS удовлетворяет требованиям точного захода на посадку в Исландии. Хотя точность навигационных определений была ниже точности, достигнутой на континенте (в США), все же, она удовлетворяла установленным требованиям. Ожидается, что с внедрением в WAAS улучшенных алгоритмов оценивания ионосферной задержки результирующая точность заметно улучшится.

Б) WAAS обеспечивает требуемые характеристики навигационного обеспечения на маршруте (en-route) на протяжении Северо-Атлантического коридора. Ожидается, что влияние на доступность, точность и целостность навигационного обеспечения по сигналам WAAS при приближении потребителей к северным границам радиовидимости геостационарного спутника (GEO-SBAS) будет незначительным.

В) Испытательные полеты в район Северного полюса продемонстрировали, что сигналы WAAS могут использоваться на более высоких широтах, чем ожидалось.

Г) Уточнение орбит спутников GPS с вводом дополнительной станции WAAS в Исландии не является значительным. В то же время, наблюдения исландской WAAS-станции вносят принципиальный вклад в точность ионосферных коррекций в исландском регионе. В качестве прототипа WAAS станции использовался комплекс из трех приемников (Trimble 4000SSI, Allen Osborn Turbo Rogue, NovAtel MiLLEnium), двух рубидиевых стандартов, антенны, профессионального компьютера (рабочей станции) и источника бесперебойного питания.

Анализ ионосферных наблюдений продемонстрировал значительное влияние авроральных эффектов на прием GPS/WAAS сигналов (сцинтилляции, мерцания) в высоких широтах, особенно на частоте L2. В периоды авроральной активности наблюдались частые потери слежения за сигналами, что приводит к невозможности получения точных оценок ионосферной задержки.

Д) Для проведения летных испытаний был использован самолет (Beechcraft King Air B 200) с FIS, дополнительно оснащенный специализированным WAAS/NSTB/GPS-приемником и приемником геодезического класса (Trimble 4000SSI) для определения опорной (эталонной) траектории относительно наземной референцной станции в послеполетном режиме по результатам фазовых наблюдений. После каждого испытательного полета осуществлялась обработка данных с целью определения погрешностей наблюдений и выходных параметров WAAS/NSTB системы путем сравнения с эталонными данными.

Обработка проводилась исландскими и американскими специалистами независимо друг от друга с использованием собственных программных комплексов в системе Matlab с последующим сравнением результатов.

В процессе анализа проверялась работоспособность оборудования, оценивались горизонтальные и вертикальные ошибки навигационной системы (Navigation System Errors), горизонтальных и вертикальных защитных уровней и их погрешностей, оценивалась доступность и точность WAAS как функция широты, оценивался вклад исландской WAAS станции в точность определения орбит GPS спутников (с использованием прецизионных IGS орбит) и ионосферных задержек.

Результаты экспериментальной оценки точности навигации наземных мобильных объектов (измерительных лабораторий на базе легковых автомобилей) по сигналам GPS/ESTB EGNOS в Польше, Словакии и Италии рассматриваются

[2]. Подчеркнем, что эти результаты получены на границах зоны высокой точности ESTB (из-за недостаточного количества RIMS в ESTB рабочая зона ESTB заметно меньше, чем у EGNOS при полном развертывании). Эксперименты проходили с использованием GPS/WADGPS-оборудования различных производителей (NovAtel, Ashtech, Magellan) и сравнивались с оценками координат, полученными тремя другими методами определения местоположения (GPS, DGPS и эталонный L1/L2 Carrier-Phase Kinematic (по фазе несущей в постобработке)) без использования WAD(ESTB EGNOS)-коррекций. На фото (рис. 1 и рис. 2) показаны автомобиль и бортовое измерительное оборудование, участвующее в измерениях в районе г. Trieste (Италия).



Рис. 1



Рис. 2

Один из тестов выполнялся в течение 25 мин с использованием 4-х приемников геодезического класса (Ashtech Z-XII – на опорной позиции, Ashtech Z-XII и два приемника NovAtel

OEM4/WADGPS – на движущемся автомобиле) и одного ручного (Magellan/WADGPS). На автомобиле три высокоточных приемника были подключены к одной антенне через сплиттер. Один из приемников NovAtel OEM4/WADGPS был включен в режиме определения местопо-

жения с использованием широкозонных коррекций ESTB, а другой такой же приемник – был включен в режиме оценки координат с использованием прямых двухчастотных наблюдений (т.н. "iono-free solution") с целью оценки качества ионосферных коррекций по сигналам ESTB.

Расхождения между координатами, полученными для каждого из перечисленных режимов измерений, и "истинными" координатами движущегося объекта, полученными в режиме постобработки фазовых наблюдений (OTF – "On-The-Fly"), представлены на рис.3– рис. 7.

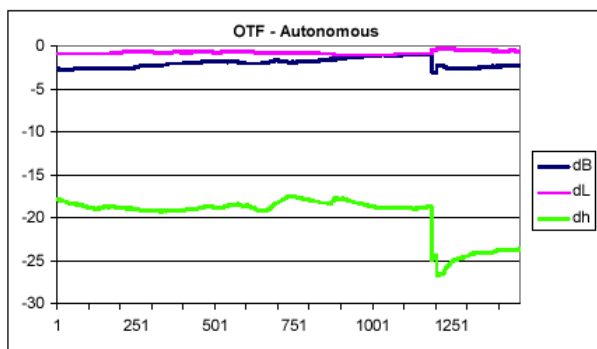


Рис. 3 Погрешности автономных L1 GPS-определений

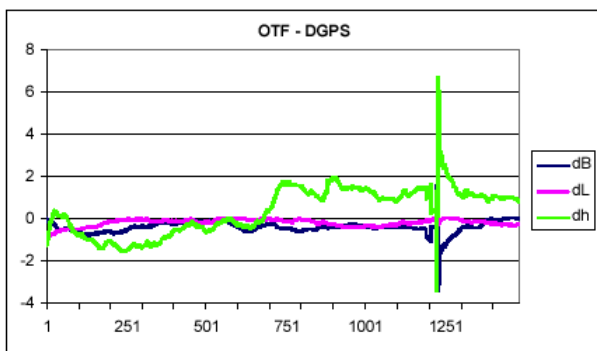


Рис. 4. Погрешности DGPS (не ESTB) определений

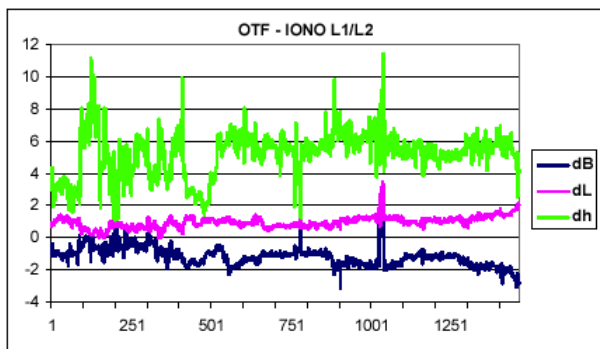


Рис.5. Погрешности автономных L1/L2 GPS определений (NovAtel)

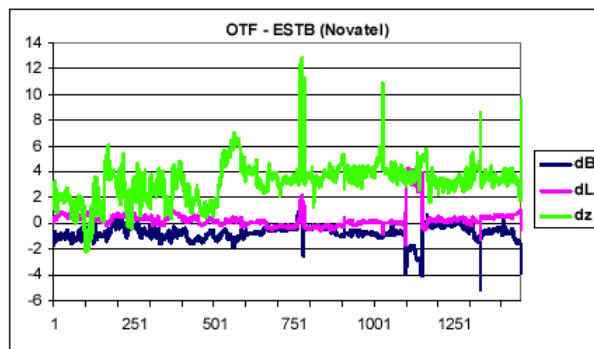


Рис.6. Погрешности ESTB определений (NovAtel)

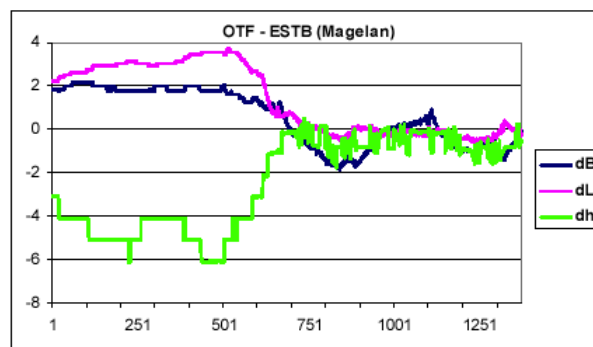


Рис. 7. Погрешности ESTB определений (Magellan)

Перепады и выбросы погрешностей на рисунках относятся к моментам изменения рабочих созвездий из-за затенений спутников GPS препятствиями при движении автомобиля.

Полученные в ходе этих экспериментов средние значения погрешностей определения местоположения (в среднем они составляют 2,5–3,5 м) с использованием сигналов ESTB в зоне пониженной точности позволяют говорить о хороших прогнозах на время полного развертывания EGNOS.

Работа [3] представляет значительный интерес с точки зрения использованного методического подхода к оцениванию характеристик широкозонного навигационного обеспечения по сигналам GPS/WAAS на периферии зоны действия WAAS - в восточной части Канады (район г. New Brunswick). Особенность упомянутой работы состоит в том, что авторы поставили задачу оценить качество не только GPS/WAAS-координатных определений, но и выполнить детальную оценку отдельных составляющих WAAS-коррекций (ионосферных и эфемеридных широкозонных поправок).

В этом состоит отличие от [2], где показаны результаты сравнительного анализа только по "выходной" координатной информации, и соответствие направлениям исследований в [1], где, как и в [3], также проводился покомпонентный анализ погрешностей WAAS-коррекций.

Проведенный в [3] на основе обработки больших выборок наблюдений всесторонний анализ качества WAAS-коррекций был проведен в университете New Brunswick в преддверии и в обеспечение работ по созданию широкозонного функционального дополнения GPS Канады (Canadian WAAS) в части определения оптимально размещения референчных станций CWAAS.

В процессе исследований использовались различные источники наблюдений и другой необходимой информации. Для многосуточного сбора GPS/WAAS L1-наблюдений на территории университета был использован 12-канальный приемник Allstar с опцией WAAS компании CMC Electronics с аэроантенной AT-575-70. В течение 37 суток архивировались все выходные данные, включая "сырые" кодовые и фазовые наблюдения с темпом 1 Гц. Часть наблюдений была использована для оценки влияния сильных возмущений в ионосфере (ионосферного "шторма") на точность определения местоположения. В разные периоды наблюдений анализировалась также разница между результатами обработки с использованием "старого" и "нового" WAAS алгоритмов мониторинга ионосферных ошибок GIVE (Grid Ionospheric Vertical Error). Параллельно выполнялась оценка точности координатных определений по сигналам GPS/WAAS с использованием IGS-точных координат положения антенны приемника, определенных с использованием данных IGS (International GPS Service) перманентных станций. Для территории восточной части Канады погрешности (95%) плановых координат составили ~2м.

Детальный и точный анализ "сеточной" (grid) ионосферной модели WAAS был проведен с использованием двухчастотных наблюдений ближайших к университету GPS/IGS перманентных станций сети CORS (Continuously Operating Reference Station System). Оценка точности эфемеридных коррекций WAAS проводилась путем прямого их сравнения с данными прецизионных IGS орбит.

Заслуживающая особого внимания методология сравнительной оценки точностных характеристик трех функционирующих WADGPS-подсистем (WAAS, Global Surveyor, OmniSTAR) изложена в [4], где представлены результаты исследований, выполненных в университете г. Кал-

гари (Британская Колумбия, Канада) в сентябре 2002 г. Эксперименты были проведены в одинаковых условиях для каждой из сравниваемых подсистем, чтобы исключить различия в технологиях приема и обработки сигналов в приемниках разных производителей и исключить влияние многолучевости из результатов сравнения.

Приведем краткие характеристики двух из трех оцениваемых и сравниваемых в [4] статье дифференциальных подсистем – **Global Surveyor** (Канада) и **OmniSTAR VBS** (FUGRO).

Global Surveyor обеспечивает региональный дифференциальный сервис в Британской Колумбии (Канада) и является переходной к широкозонной подсистеме **Canada-Wide Differential GPS (CDGPS)**, которая будет дополнять WAAS и службу морских радиомаяков береговой охраны (Coast Guard) США в Северной Америке. **CDGPS** базируется на использовании государственной перманентной сети станций Канады **CACS (Canadian Active Control System)**. Прототипом подсистемы является **GPS•C**. Подсистема **Global Surveyor** в настоящее время использует широкозонные коррекции, которые генерирует инфраструктура **GPS•C**, использующая наблюдения всей северной части Северной Америки. Заявленная точность (95%) определения местоположения с использованием коррекций **Global Surveyor** зависит от качества используемого приемника и составляет:

- для приемников класса Low End – лучше 10 м в статике и лучше 20 м в динамике;
- для приемников класса Medium – по плановым координатам - 2-3 м в статике и 4-6 м в динамике, по вертикальным координатам - 5 м в статике и 10 м в динамике;
- для приемников класса High End – по плановым координатам ~1 м в статике и ~2 м в динамике, по вертикальным координатам ~2 м в статике и ~3 м в динамике.

Система **OmniSTAR** в настоящее время имеет в своем составе примерно 100 референчных станций, 3 центра загрузки данных на спутники и 2 центра сбора, обработки и управления (ЦСОУ) глобальной сети референчных GPS-станций (CPC), компания является глобальной DGPS подсистемой реального времени, которая доставляет коррекции от глобальной сети базовых (референчных) станций. Эти данные передаются в ЦСОУ, где они проходят контроль качества и целостности, а затем – через геостационарные спутники – ретранслируются авторизованным потребителям **OmniSTAR** – коррекций. Приемники потребителей обрабатывают данные всех доступных ближайших референчных станций

для получения оптимального решения. Оптимальное решение для каждого потребителя получается путем взвешенной обработки данных от референчных станций, где веса являются функциями расстояний между потребителем и стан-

циями. Результатом является одно множество коррекций (по каждому спутнику), оптимальное для данного текущего положения каждого потребителя, т.е. VBS-решение. Принцип действия системы поясняет рис.8.

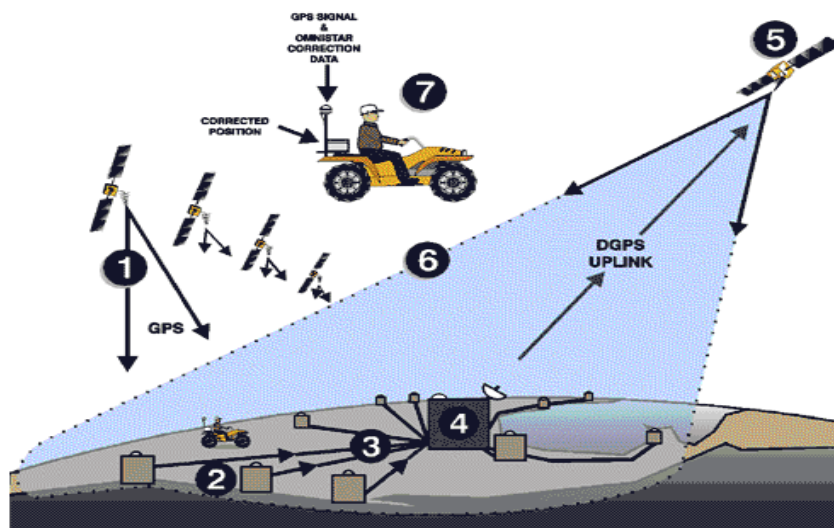


Рис. 8. Принцип действия системы **OmniSTAR** : 1 - GPS спутники; 2 – сеть референчных GPS-станций (CPC) OmniSTAR; 3 – передача GPS-наблюдений в центры сбора, обработки и управления (ЦСОУ) CPC посредством выделенных каналов; 4 – ЦСОУ - обрабатывают данные, контролируют их качество и осуществляют их запаковку и передачу на геостационарные спутники (GEOs) для передачи в L-диапазоне; 5 – GEOs – передают данные (дифференциальные коррекции) потребителям (7) в зонах покрытия (6) OmniSTAR для использования в реальном времени

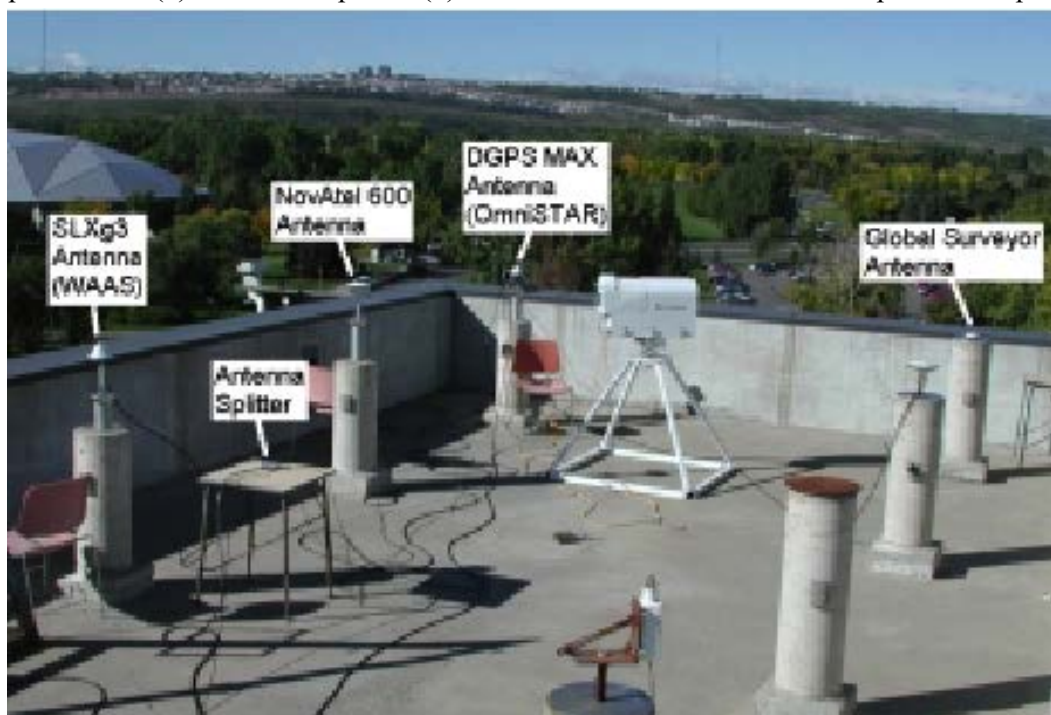


Рис. 9. Экспериментальная установка на крыше инженерного здания

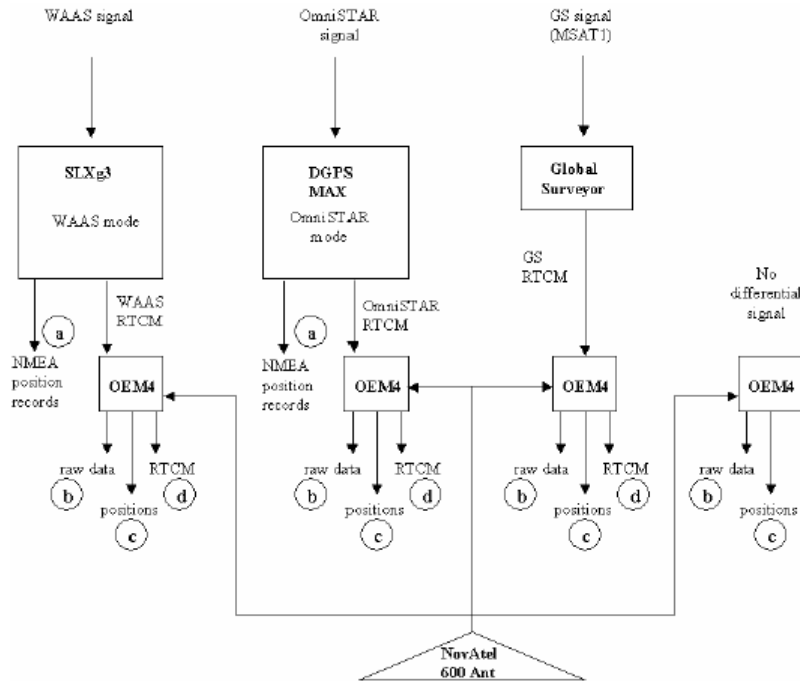


Рис. 10. Конфигурация экспериментальной установки

		OmniSTAR DGPS-MAX	WAAS (SLXg3)	OmniSTAR (OEM4)	WAAS (OEM4)	Global (OEM4)	SGPS (OEM4)
MEAN	N	-0.67	0.51	-0.78	0.47	-0.55	-0.01
	E	-0.05	-0.26	0.22	-0.03	2.11	0.30
	U	0.22	0.99	0.27	1.09	0.31	-2.11
RMS	N	1.07	0.93	1.30	0.84	1.86	2.03
	E	0.39	0.58	0.71	0.67	2.63	1.45
	U	1.51	1.51	1.59	1.47	3.23	4.19
MAX	N	1.98	3.13	3.65	3.44	8.44	9.67
	E	1.23	1.12	3.56	1.71	21.45	6.66
	U	3.58	4.29	7.63	4.62	10.17	18.18
MIN	N	-3.20	-1.83	-5.54	-1.70	-11.97	-15.38
	E	-0.97	-1.38	-4.53	-1.90	-1.42	-10.49
	U	-3.88	-2.19	-10.38	-2.47	-27.45	-36.71

		OmniSTAR (RTCM)	WAAS (RTCM)	Global (RTCM)	SGPS
MEAN	North	-0.74	0.45	-0.44	0.37
	East	0.28	0.04	2.07	0.44
	Up	0.27	1.13	0.34	1.33
RMS	North	1.13	0.86	1.64	1.92
	East	0.60	0.63	2.42	2.17
	Up	1.40	1.48	2.77	3.51
MAX	North	2.32	3.63	31.06	7.19
	East	5.00	1.94	20.31	7.74
	Up	7.79	4.08	11.27	25.21
MIN	North	-6.31	-1.79	-8.63	-10.58
	East	-1.40	-1.62	-3.94	-10.17
	Up	-5.89	-1.70	-12.43	-16.46

Рис. 11. Итоговые результаты проведенных экспериментов (все цифры даны в метрах) для реального времени (таблица слева) и для послесансной обработки наблюдений (таблица справа)

Заявленная точность (95%) определения местоположения с использованием коррекций **OmniSTAR VBS** для коммерческих приемников высокого качества составляет менее 1 м по плановым координатам и 2 – 2,5 м по вертикальным.

Для того, чтобы сравнить характеристики WADGPS корректирующей информации, предоставляемой подсистемами Global Surveyor, OmniSTAR VBS и WAAS, была собрана оригиналь-

ная экспериментальная установка, показанная на рис. 9, 10.

В экспериментах были использованы следующие приемники: (1) Satloc SLXg3 с опцией WAAS, (2) CSI Wireless DGPS MAX с опцией OmniSTAR VBS и (3) приемник корректирующих RTCM-сигналов Global Surveyor, которые подаются на вход приемника NovAtel OEM4. На рис. 16 буквой "a" в кружке обозначены выходные NMEA-данные с прямым использованием WADGPS-коррекций. Чтобы избежать зависимо-

сти результатов сравнительного анализа от типа приемников в схему включены 3 дополнительных L1/L2 приемника NovAtel OEM4.

На их дифференциальные входы поданы широкозонные, преобразованные в RTCM формат, коррекции от WAAS и OmniSTAR VBS. "Сырые" наблюдения, коррекции и навигационные определения регистрировались, чтобы обеспечить полный послесезонный анализ результатов наблюдений. Для избежания фактора многолучевости все приемники NovAtel OEM4 были подключены к одной антенне NovAtel GPS-600 через сплиттер. Положение каждой приемной антенны перед экспериментом было точно определено посредством геодезической GPS-съемки.

Как видно из анализа и сравнения полученных результатов (рис. 11), СКО (RMS) определения местоположения с использованием дифференциальных коррекций WAAS и OmniSTAR составили ~1м по плановым координатам и ~1,5 м по вертикальным. Для Global Surveyor эти результаты в 2-3 раза хуже. Результаты для реального времени и для послесезонной обработки весьма близки. Как для WAAS, так и для OmniSTAR полученные результаты оценки точности вдвое хуже заявленных, однако следует сделать поправку на то, что эксперимент проводился в месте, расположенном на краю зон расчетного покрытия этих подсистем, там, где не гарантирована заявленная точность определения местоположения. Достаточно сказать, что г. Калгари, где проводились измерения, расположен на значительном удалении от всех станций OmniSTAR, расположенных южнее, так что ближайшая станция расположена на расстоянии ~1000 км. В этом случае можно говорить не об интерполяции коррекций, а об их экстраполяции. Главным образом это касается ионосферных погрешностей наблюдений.

УДК 621.396.98

*Prof. Vladimir P. Kharchenko¹⁾, Alexey A. Zhalilo²⁾,
Prof. Valery V. Konin¹⁾, Vasily M. Kondratyuk²⁾*

METHODS AND MEANS OF EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF WIDE AREA GPS(GNSS) AUGMENTATION SUBSYSTEMS

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

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

The methodical approaches of the evaluation and analysis of type SBAS Wide Area GPS(GNSS) Augmentation subsystems performances are examined. The examples of using the GPS equipment and software for the purpose of solving the given tasks in various regions of user's differential services including the edge of coverage of the GPS(GNSS) Augmentation subsystems are given.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемом обзоре рассмотрены вопросы методического обеспечения, а также примеры использования различных аппаратных и программных средств для оценивания и анализа навигационных характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS/ГЛОНАСС – WAAS и EGNOS в различных региональных условиях и зонах обслуживания потребителей, включая граничные районы рабочих зон этих систем. Зарубежный опыт методологического подхода к оценке характеристик систем типа SBAS может быть весьма полезным при внедрении спутниковых навигационных технологий в Украине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analyses of WAAS Performance in Iceland and at High Latitudes in the NAT area, Icelandic Civil Aviation Administration and Innovative Solutions International, December 1999, <http://www.caa.is/gps/waas.htm>
2. Oszczak S., Ciecko A., Bakula M., Popielarczyk D., Balint J., Manzoni G., Cefalo R., "Estimation of Accuracy of EGNOS System Test Bed (ESTB) Car Navigation in Central European Countries in 2002", GNSS 2003 – The European Navigation Conference 22-25 April 2003/Austria
3. Rho H., Langley R.B., "Assessment of WAAS Correction Data in Eastern Canada", Geodetic Research Laboratory University of New Brunswick
4. 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