

УДК 527.629.78

**Анатолий Анатольевич ВОДЯНЫХ,**  
*заместитель главного конструктора, ГП “Оризон-Навигация”, г. Смита*

**Юрий Иванович БУДАРЕЦКИЙ,**  
*кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИО  
Научного центра Сухопутных войск Академии сухопутных войск, г. Львов*

**Андрей Владимирович ДЬЯКОВ,**  
*кандидат технических наук, начальник НИО Научного центра  
Сухопутных войск Академии сухопутных войск, г. Львов*

**Сергей Иванович БУДАРЕЦКИЙ,**  
*заведующий отделом Донецкого института искусственного  
интеллекта, г. Донецк*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ СРНС-ИНС СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ**

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований приемного модуля навигационной аппаратуры потребителей (НАП) сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС), для навигации и топогеодезической привязки наземных подвижных объектов (НПО) ракетных войск и артиллерии и бронетехники при их высокоманевренном движении по пересеченной местности в условиях естественных и организованных помех. Предложены*

© Водяных А. А., Бударецкий Ю. И., Дьяков А. В., Бударецкий С. И.

*алгоритмы комплексирования СРНС и инерциальных навигационных систем. Рассмотрены варианты реализации НАП СРНС с цифровыми аппаратно-программными следящими измерителями с различной степенью астатизма. Определена их устойчивость к действию помех для маневров НПО с различными динамическими характеристиками.*

**Ключевые слова:** *помехоустойчивость, спутниковая радионавигационная система, инерциальная навигационная система, навигация и топографическая привязка.*

**Постановка проблемы в общем виде.** Характерной особенностью современных вооруженных конфликтов является высокая скорость маневрирования войсками и огнем. Быстрый и точный выход на огневые позиции подразделений ракетных войск и артиллерии (РВиА), передислокация бронетанковых и мотопехотных подразделений в район огневого соприкосновения, планирование огневого налета, целераспределение и управление действиями подразделений и отдельных боевых единиц на поле боя, их своевременный отход на запасные позиции невозможен без надежного обеспечения машин управления, объектов РВиА и бронетехники средствами навигации и топогеодезической привязки.

Такие средства должны обеспечивать высокоточное определение координат стартовых и огневых позиций РВиА и местоположение объектов бронетехники в условиях естественных и организованных средствами радиоэлектронного противодействия (РЭП) противника помех.

Поэтому разработка, экспериментальные исследования и постановка на вооружение высокоточных и помехоустойчивых средств навигации и топогеодезической привязки объектов РВиА и бронетехники представляют актуальную научно-техническую задачу.

**Анализ предыдущих исследований и публикаций, в которых заложено решение данной проблемы и на которые опираются авторы.** Средства астрономической и инерциальной навигации появились со времен освоения наземного пространства и мореплавания. Однако, существенный прогресс в развитии навигационных средств насту-

пил со времен внедрения спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Поэтому передовые в военном отношении страны при модернизации и создании новых образцов вооружения и военной техники особое внимание уделяют оснащению объектов военной техники навигационной аппаратурой потребителей (НАП) СРНС. Сегодня американская СРНС (GPS NAVSTAR) используется военными стран НАТО практически повсеместно для решения самых разнообразных задач: от наведения бомб до отслеживания грузов.

GPS – наиболее широко используемая технология позиционирования, популярная среди военных, гражданских и коммерческих предприятий по всему миру, но, к сожалению, очень уязвимая к атакам. GPS-сигнал чрезвычайно слаб, и потребуется не так много времени, чтобы заглушить приёмник другим, более сильным радиосигналом. Американские аналитики отмечают, что противник может заглушить сигнал GPS и лишит американскую армию ее главного преимущества. Примеры подавления сигналов GPS можно найти практически во всех локальных конфликтах современности. Например, министерство обороны Южной Кореи сообщило, что правительство Северной Кореи использует средства подавления против их военных и гражданских GPS приёмников. Южная Корея утверждает, что подобные инциденты могут быть началом более серьёзных атак. Не менее ярким примером является самоликвидация сотен крылатых ракет “Томагавк” во время операции “Лиса в пустыне”, или большое рассеивание тех же ракет при бомбардировке американцами Сербии. В те времена, когда происходили эти события, пресса разнесла по всему миру сообщение о профессоре Кашинове, который предложил Ираку и Югославии схему устройства подавления навигационного сигнала, принимаемого оружием самонаведения [1].

Важно отметить, что подобного рода атакам на спутниковые навигационные системы подвергается не только популярная GPS, но и российская ГЛОНАСС, а также европейская GALILEO, которая сейчас находится в процессе развертывания. Поэтому сегодня особую актуальность приобретают проблемы обеспечения помехоустойчивой работы НАП СРНС.

Стремление повысить помехоустойчивость современной НАП вызвано не только специальными (военными) требованиями, но и перспективой широкого внедрения спутниковой навигации в системы автоматического управления движением транспорта. Поэтому принципы помехозащищенности НАП были приняты как основополагающие в концепции проектирования навигационной аппаратуры Государственного предприятия (ГП) “Оризон-Навигация”.

Основные способы повышения помехозащищенности, которые внедряются в разрабатываемую ГП “Оризон-Навигация”, НАП и их численные показатели более подробно приведены в [2; 3]. Основными из них являются:

контроль целостности СНС;

пространственная селекция сигналов и подавление помех;

посткорреляционная обработка сигнала (уменьшение порога чувствительности колец слежения к воздействию помех);

алгоритмическая посткорреляционная обработка сигнала (алгоритмические (программные) способы помехоустойчивого выделения эфемеридной информации);

предкорреляционная обработка смеси сигналов и помех.

Кроме реализации вышеуказанных методов, на помехозащищенность НАП существенно влияет тип и принцип построения слеящего измерителя.

Основным звеном такого измерителя является цифровая фазовая автоподстройка частоты (ЦФАПЧ), которая используется как в системах слежения за несущей спутникового сигнала (ССН), так и в системах слежения за задержкой (ССЗ) псевдошумового сигнала.

Кроме аппаратной ЦФАПЧ с астатизмом второго порядка в НАП ГП “Оризон-Навигация” используются программно-аппаратные ЦФАПЧ (петля ЦФАПЧ замыкается программно), а также ЦФАПЧ 3-го порядка астатизма и ЦФАПЧ 2-го порядка астатизма при интеграции с ИНС. Рассмотрим алгоритма работы последней реализации.

Алгоритм фильтрации, аппаратной ЦФАПЧ с астатизмом второго порядка может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned}\varphi_k &= \varphi_{k-1} + 2 \cdot \phi \pi \Delta \cdot f_{k-1} + K_\varphi \cdot \delta\varphi_k \\ f_k &= f_{k-1} + K_f \cdot \delta\varphi_k\end{aligned}, \quad (1)$$

где  $\delta\varphi_k$  представляет собой значение цифрового кода на выходе цифрового фазового дискриминатора (ЦФД);  $\Delta$  – темп поступления информации с выхода ЦФД (интервал времени между последовательными моментами изменения значения кода на выходе ЦФД).

Таким образом, реализованная в НАП ГП “Оризон-Навигация” схема слежения за фазой сигнала представляет собой ЦФАПЧ второго порядка астатизма. Характеристики ЦФАПЧ полностью определяются интервалом  $\Delta$ , коэффициентами  $K_\varphi$  и  $K_f$  и эквивалентным временем накопления сигнала. Интервал  $\Delta$  определяется частотой сброса накопительных сумматоров для синфазной и квадратурной компонент сигнала. Путем записи соответствующих коэффициентов в регистры приемного модуля можно так варьировать параметры  $\Delta$ ,  $K_\varphi$  и  $K_f$ , что полоса ЦФАПЧ будет меняться в диапазоне от 3,74 до 207,25 Гц.

Известно, что ЦФАПЧ с астатизмом второго порядка отслеживает несущую частоту сигнала с установившейся динамической погрешностью [4]. Поэтому при высокой динамике перемещения НПО по пересеченной местности такая ЦФАПЧ может давать срыв сопровождения. Следовательно, для устранения этого явления нужно применять либо ЦФАПЧ с астатизмом третьего порядка и прилагать большие усилия по обеспечению устойчивости ее работы, либо при высокой динамике движения НПО использовать информацию от ИНС для поддержки устойчивого сопровождения ЦФАПЧ второго порядка астатизма. В дальнейшем будем рассматривать этот метод как более помехоустойчивый.

Наличие информации от ИНС позволяет практически полностью компенсировать во входном сигнале следящего измерителя составляющую, обусловленную влиянием динамики движения объекта. При этом степень компенсации главным образом определяется точностью данных, поступающих от ИНС.

Уравнение состояния в условиях наличия информации от ИНС может быть представлено в виде

$$\begin{bmatrix} \varphi_k \\ f_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2\pi\Delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{k-1} \\ f_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \pi\Delta^2 \\ \Delta \end{bmatrix} \frac{a_k}{\lambda} + \begin{bmatrix} n_{\varphi k} \\ n_{fk} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $a_k$  – ускорение, вычисляемое по данным от ИНС,  $\lambda$  – длина волны сигнала,  $[n_{\varphi k}, n_{fk}]^T$  – вектор шумов экстраполяции, представляющий собой ДБГШ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией.

$$D_n = \frac{N_{\text{ИНС}}}{2 \cdot \lambda^2} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \pi \Delta^3 & \pi \Delta^2 \\ \pi \Delta^2 & \Delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{ИНС}}$  – односторонняя спектральная плотность шумов измерения ИНС.

Соответствующий квазиоптимальный алгоритм слежения за фазой имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_k &= \hat{\varphi}_{k-1} + 2\pi \hat{f}_{k-1} \Delta + \frac{\pi}{\lambda} a_k \Delta^2 + K_{\varphi} \delta \bar{\varphi}_k, \\ \hat{f}_k &= \hat{f}_{k-1} + \frac{1}{\lambda} a_k \Delta + K_f \delta \bar{\varphi}_k. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражения (4) описывают алгоритм ФАП 2-го порядка с поддержкой от ИНС.

Полученные аналитические выражения положены в основу построения расширенного фильтра Калмана (РФК) в алгоритме обработки сигналов от НАП и ИНС среднего класса точности в сильно-связанной комплексированной системе навигации, реализуемой на ГП “Оризон-Навигация”. Подробное описание алгоритмов работы РФК изложено в литературе и пояснений не требует [5–8].

**Целью статьи** есть экспериментальные исследования помехоустойчивости разработанных алгоритмов комплексирования СРНС и ИНС.

**Изложение основного материала исследований.** Для исследования работы разработанных алгоритмов предложена экспериментальная установка на базе имитатора навигационных сигналов СН-3803 производства ГП “Оризон-Навигация” [9].

При решении задач натурного моделирования важное место занимает проблема получения достоверной информации о значениях фазовых координат движения объекта (и связанных с ними других параметров) в реальной динамике движения НПО. Основным источником такой информации являются материалы специальных траекторных измерений, в которых составляющие вектора состояния регистрируются бортовыми средствами объективного контроля или специализированными бортовыми регистраторами с использованием штатных датчиков.

На рис. 1 представлен график ускорений реального физического объекта, имевших место при маневрировании (движение НПО по пересеченной местности). Анализ динамики показал, что приведенная траектория относится к классу ограниченно маневренных и может быть охарактеризована следующими параметрами:

максимальное ускорение –  $25 \text{ м/с}^2$ ;

максимальный рывок (скорость изменения ускорения) –  $7,5 \text{ м/с}^3$ .

При этом на траектории можно четко выделить три наиболее динамичных маневра, обозначенные как М1, М2 и М3 (рис. 1):

М1: начало – 128-я секунда, длительность – 76 секунд, пиковое значение ускорения движения – 1,6 g, среднее значение ускорения – 0,9 g;

М2: начало – 294-я секунда, длительность – 96 секунд, пиковое значение ускорения движения – 1,5 g, среднее значение ускорения – 0,85 g;

М3: начало – 480-я секунда, длительность – 203 секунды, пиковое значение ускорения движения – 2 g, среднее значение ускорения – 0,9 g.

Поскольку схемы ЦФАПЧ наиболее подвержены срывам слежения в моменты выполнения объектом маневра, в ходе исследований помехоустойчивости приемника этим участкам траектории движения уделялось особое внимание.

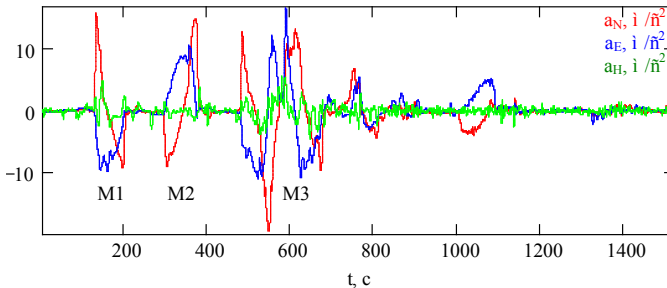


Рис. 1. Реализация ускорения при движении НПО по пересеченной местности

Известно, что измерения НАП СРНС обладают высокими точностными характеристиками и достаточно подробно прописывают траекторию. Однако их использование в качестве эталона напрямую, без предварительной обработки, приведет к тому, что в момент поступления новых измерений с темпом 10 Гц фазы радиосигналов будут изменяться скачкообразно (претерпевать разрыв первого рода) [10; 11], что недопустимо для реальных сигналов СРНС. Кроме того, измерения НАП содержат шумовую составляющую, которая обусловлена различными внешними факторами и не имеет непосредственного отношения к формируемой эталонной траектории.

Для формирования эталонной траектории по измерениям НАП СРНС использовался двусторонний алгоритм интерполяции [10], суть которого сводится к восстановлению траектории по всей совокупности измерений НАП с использованием априорной модели движения. Алгоритм интерполяции и качество его функционирования применительно к восстановлению траекторий детально рассмотрены в [11].

Эталонные траектории и данные от ИНС в WGS-84 были записаны в файлы. Был разработан сценарий для имитатора спутниковых радиосигналов, воспроизводящий рассматриваемую траекторию движения, при этом синхронно с формированием сигналов СРНС имитатор обеспечивал выдачу по одному из портов (RS-232) пакетов данных, содержащих информацию ИНС. Использование подобного сценария в достаточной степени позволяет воспроизвести ситуацию, которая



имеет место на НПО и, таким образом, практически эквивалентна испытанию НАП в реальных условиях.

На рис. 2 представлено истинное значение ускорения объекта вдоль оси  $X$  системы координат WGS-84 и оценка ускорения, вычисленная по информации от ИНС. На рис. 3 представлена зависимость ошибки оценки ускорения по данным ИНС.

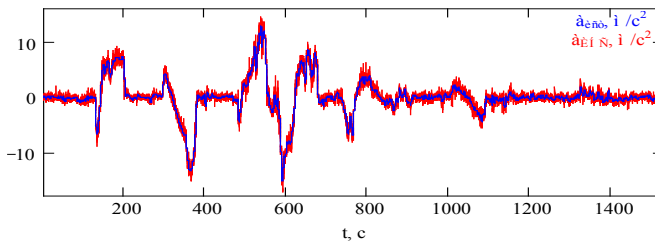


Рис. 2. Реализация ускорения по данным ИНС

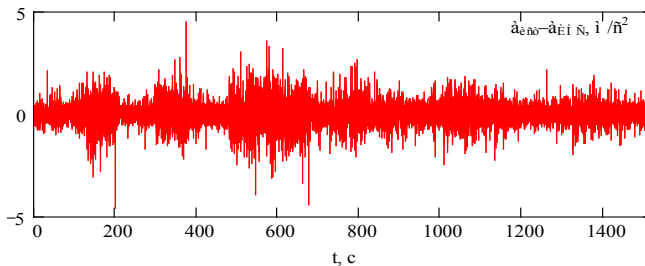


Рис. 3. Ошибка ускорения в ИНС

Анализ характера ошибок ИНС позволяет рассматривать их как дисперсию белого гауссовского шума (ДБГШ) с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением порядка  $0,5 \text{ м/с}^2$ .

В ходе экспериментального исследования алгоритмов использовался имитатор сигналов со сценарием, моделирующим описанную выше траекторию движения объекта.

Программное обеспечение 5-канального макета приемника было настроено на поиск спутников GPS с системными номерами 1, 2, 4, 13 и 16,

моделирование сигналов которых осуществлялось имитатором. На начальном этапе после запуска сценария на имитаторе была установлена общая мощность сигнала минус 113 дБ, что соответствовало уровню сигнала на входе приемника минус 143 дБ. После захвата всех пяти спутников мощность сигнала на выходе имитатора уменьшалась до значений, представленных в левой колонке таблиц 1 и 2, и фиксировались срывы слежения за спутниками на участке траектории общей длительностью около 11 минут, которая включает в себя все три маневра. После этого исполнение сценария останавливалось, и исследование повторялось для нового значения уровня сигнала на выходе имитатора. В ходе экспериментов также контролировалась точность оценки координат и скорости (до тех пор, пока в режиме слежения не находилось не менее 4 спутников).

В табл. 1 представлены результаты тестирования аппаратных ЦФАПЧ.

Таблица 1

#### Результаты тестирования аппаратных ЦФАПЧ

$P_{и}$	$P_{с}$	M1	M2	M3
- 125 dB	- 155 dB	–	–	–
- 126 dB	- 156 dB	–	–	16
- 127 dB	- 157 dB	2, 16	–	4
- 128 dB	- 158 dB	2, 4, 16	–	–
- 129 dB	- 159 dB	2, 4, 16	–	13
- 130 dB	- 160 dB	2, 4, 13, 16	–	1
- 131 dB	- 161 dB	1, 2, 4, 13, 16	N/A	N/A

В табл. 2 – результаты тестирования аппаратных ЦФАПЧ 2-го порядка с поддержкой от ИНС.

Анализ результатов, представленных в таблицах, позволяет сделать следующие выводы: ЦФАПЧ 2-го порядка с поддержкой от ИНС обеспечивает итоговое повышение помехоустойчивости на 8–9 дБ,

при этом использование разработанных программно-аппаратных ЦФАПЧ не приводило к ухудшению точностных характеристик приемника по оценке координат и скорости.

Таблица 2

**Результаты тестирования аппаратных ЦФАЧ 2-го  
порядка астатизма с поддержкой от ИНС**

Ри	Рс	М1	М2	М3
- 133 dB	- 163 dB	-	-	-
- 134 dB	- 164 dB	-	-	-
- 135 dB	- 165 dB	-	-	4,16

**Выводы и предложения** по использованию алгоритмов комплексирования с ИНС для повышения помехоустойчивости НАП СРНС. При предложенной структуре и схемотехнических реализациях НАП ГП “Оризон-Навигация”, алгоритме сильносвязанной комплексной обработки на основе РФК, ИНС среднего класса точности, применяемой на объектах НПО, может быть обеспечена помехоустойчивость НАП СРНС на уровне (52...54) дБ.

**Направления дальнейших исследований** предполагают исследования целесообразности комплексирования СРНС и ИНС с доплеровской радиолокационной навигационной системой.

**Список использованной литературы**

1. Теория и практика падающих томагавков [Электронный ресурс] / В. В. Кашнинов. – Режим доступа : <http://www.x-libri.ru/elib/kashn001/00000001.htm>
2. Казаков А. Е. Пути повышения помехозащищенности навигационной аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем / А. Е. Казаков, А. А. Водяных // Системи обробки інформації (выпуск 59)\*. – Харків : ХУПС, – 2007. – С. 48–51.
3. Водяных А. А. Перспективные направления развития навигационных технологий и оборудования ГП “Оризон-Навигация” / А. А. Водяных. – Режим доступа : [http://ismk.kpi.ua/sites/default/files/Conference/Section\\_1/paper\\_06.pdf](http://ismk.kpi.ua/sites/default/files/Conference/Section_1/paper_06.pdf)

4. Бударецкий Ю. И. Анализ микропроцессорных систем синхронизации в импульсном приближении / Ю. И. Бударецкий, М. И. Жодзишский, И. А. Мымрин // Теоретическая электротехника. – 1989. – № 47. – С. 128–135.
5. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер. – М. : Радио и связь, 1993.
6. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – К. : КВиЦ, 2000.
7. Я. Бар-Шалом. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы : в 2 частях / Бар-Шалом Я., Ли Х. – Р. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
8. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч. 1. / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. – М. : Радиотехника, 2004.
9. Официальный сайт предприятия “Государственное предприятие “Оризон-Навигация”. – Режим доступа : <http://www.orizon-navigation.com/>
10. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М. : Радио и связь, 1991.
11. Синтез алгоритма интерполяции для восстановления траекторий подвижных объектов / В. Н. Харисов, А. В. Токарев // Статистический синтез радиосистем. – 2003. – № 7.

*Рецензент – доктор технических наук,  
старший научный сотрудник Зубков А. Н.*

*Стаття надійшла до редакції 04.06.2015.*

*Водяних А. А., Бударецкий Ю. И., Д’яков А. В., Бударецкий С. И.*  
**Експериментальне дослідження завадостійкості комплексованої  
СРНС-ІНС системи навігації**

У статті наведено результати експериментальних досліджень приймального модуля навігаційної апаратури споживачів (НАС) сигналів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) для навігації і топогеодезичної прив’язки наземних рухомих об’єктів (НРО) ракетних військ і артилерії та бронетехніки при їх високоманевреному русі по пересічній місцевості та за умов природних і організованих завад. Запропоновано алгоритми комплексування СРНС та інерціальних навігаційних систем (ІНС), розроблено методи дослідження завадо-

стійкості запропонованих алгоритмів. Розглянуто варіанти реалізації НАС СРНС з цифровими апаратно-програмними слідкуючими вимірювачами з різним ступенем астатизму. Визначена їх стійкість до впливу природних та організованих завад для маневрів НРО з різними динамічними характеристиками.

**Ключові слова:** *завадостійкість, супутникова радіонавігаційна система, інерційна навігаційна система, навігація і топогеодезична прив'язка.*

*Vodianykh A., Budareckii Y., Diakov A., Budareckii S.* **Experimental study of immunity integration of GPS-INS navigation system**

Problem statement.

Modern navigation and topogeodesic bindings must provide accurate determination of the coordinates of the start and fire positions and the location of objects of armored vehicles in a natural and organized by means of electronic countermeasures enemy jamming.

Therefore, the development, production and experimental studies on high-precision weapons and antijamming navigation and topographic and geodetic binding sites of missile troops and artillery as well as armored vehicles are vital scientific and technical problem.

The aim of the article is the conduct at experimental studies of noise immunity developed algorithms aggregation of satellite navigation systems and inertial navigation systems.

Statement of the basic material of research.

To study the operation of the developed algorithms has been proposed experimental setup based simulator navigation signals CH-3803 production of the State Enterprise "Orizon-Navigation".

In solving problems of live simulation plays important role the problem of obtaining reliable information about the values of the phase coordinates the movement of the object (and other associated parameters) in real driving dynamics of terrestrial moving objects. The main source of such information is material specific trajectory measurements, in which the components of the state vector are recorded by on-board means of objective control or specialized flight recorders using standard sensors. Analysis of

the dynamics of of cross-country movement showed that studied trajectory belongs to a class of limited maneuverability and can be characterized by the following parameters:

Maximum acceleration – 25 m/s<sup>2</sup>;

The maximum jerk (rate of acceleration change) – 7.5 m/s<sup>3</sup>.

The experimental results of work tracking gauges consumer navigation equipment of satellite navigation systems and their networking at its complexing with an inertial navigation system using a tightly integrated processing algorithm based on extended Kalman filter have been presented.

The analysis of the experimental results leads to the conclusion that the use of digital phase-locked loop with astatism of 2nd order when integrated with an inertial navigation system provides the final increase in noise immunity by 8-9 dB. The use of the developed software and hardware of digital phase-locked loop does not lead to a deterioration of accuracy in assessing the performance of the receiver position and velocity.

Conclusions and suggestions. In the proposed structure and circuit implementations of consumer navigation equipment, inertial navigation system midrange accuracy and a tightly integrated processing algorithm using the extended Kalman filter can be provided at the level of noise immunity (52...54) dB.

Areas for further research involve feasibility study of interconnecting satellite radio navigation system and an inertial navigation system with Doppler radar navigation system.

**Keywords:** *immunity, satellite navigation system, inertial navigation system.*