

УДК 629.78

**В.И. ВАСИЛИШИН, В.В. АФАНАСЬЕВ, А.В. НИКИТИН, Н.Д. РЫСАКОВ***Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина***СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ПОСАДКИ САМОЛЕТОВ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Рассмотрены проблемы применения и тенденции развития расширенных спутниковых радионавигационных систем для решения задач категорированной посадки самолетов. Обсуждаются некоторые варианты реализации спутниковой системы посадки с использованием псевдоспутников. Приведена классификация псевдоспутников.

**спутниковая радионавигационная система (СРНС), локальные дифференциальные подсистемы СРНС, псевдоспутники, объединенная система точного захода на посадку и посадки самолетов**

**Введение, постановка проблемы и цель статьи**

На сегодняшний день спутниковые радионавигационные системы (СРНС) находят широкое применение в различных отраслях, в том числе авиации. Преимущества спутниковых технологий обуславливают то, что их использование связано с перспективами развития современных автоматизированных систем управления воздушным движением (организации воздушного движения). Указанные системы, в свою очередь, являются составной частью перспективной системы CNS/ATM (связь – Communication, навигация – Navigation и наблюдение – Surveillance / организации воздушного движения -air traffic management) [1].

Среди многообразия задач, решаемых с помощью СРНС (типа ГЛОНАСС и GPS), особый интерес для авиации представляет обеспечение захода на посадку и посадка самолетов [2, 3]. Традиционно для решения таких задач используются обзорные и посадочные радиолокационные системы, инструментальная система посадки (ILS), микроволновая система посадки (MLS) [4, 5]. Особыми задачами военной авиации являются посадка на необорудованные наземными посадочными комплексами полевые аэродромы, посадка на корабельные взлетно-посадочные полосы (ВПП), групповые полеты, по-

леты с дозаправкой топлива в воздухе и др.[6].

Несмотря на достаточно большое внимание в технической литературе к СРНС, вопросы использования СРНС в авиационных приложениях еще не достаточно освещены.

Целью статьи является анализ состояния и перспектив совершенствования системы посадки самолетов по сигналам СРНС.

**Состояние и тенденции развития систем посадки ЛА по сигналам СРНС**

Широкое внедрение процедур захода на посадку по СРНС в практику авиации считается целесообразным особенно на аэродромах с несовершенным радиотехническим обеспечением навигации и посадки.

Автономные СРНС могут быть использованы при полетах ЛА по трассам и в районах аэропортов. Однако их применение для захода на посадку по категориям ICAO нецелесообразно, поскольку точность автономных СРНС по горизонтальным и вертикальным компонентам координат составляет десятки метров, а по составляющей вектора скорости – десятки сантиметров в секунду. Кроме того, специфика управления воздушным движением предъявляет к СРНС специфические требования по надежности навигационных измерений, которая определяет характеристики доступности (готовности), целост-

ности и непрерывности использования этих систем.

В табл. 1 приведены требования воздушных потребителей к точности определения места и высоты

при заходе на посадку и посадке самолетов по категориям ICAO (Международной организации гражданской авиации).

Таблица 1

Требования для категорированного захода на посадку по СРНС

Категория посадки	Высота над взлетно-посадочной полосой для проверки, м	Точность измерения координат (СКО)		Доступность	Целостность
		Боковая ошибка, м	Вертикальная ошибка, м	Вероятность	Вероятность (время)
I	30,0	4,5...8,5	1,5...2,0	0,999999	0,99999 (6с)
II	15,0	2,3...2,6	0,7...0,85	0,9999999	0,999999 (2с)
III	2,4	2,0	0,2...0,3	0,99999999	0,9999999995 (1с)

При категорированном заходе на посадку предусматривается дополнение СРНС широкозонными дифференциальными подсистемами (ДПС) (такими как EGNOS, WAAS, MSAS), региональными ДПС (Starfix, Skyfix, Eurofix) или локальными ДПС (D920, SLS100) [1-3]. ДПС СРНС позволяют реализовать дифференциальный режим СРНС и внешний по отношению к потребителю и навигационному космическому аппарату (НКА) контроль целостности СРНС.

Широкозонные ДПС содержат сеть широкозонных контрольных станций, информация от которых передается на главные станции. Выработанные на этих станциях сигналы целостности и корректирующие поправки передаются через наземные системы передачи данных (НСПД) на геостационарные космические аппараты (ГКА) типа Инмарсат для ретрансляции потребителям. Более того, ГКА используются в качестве дополняющих навигационных созвездия для дополнительных дальномерных измерений. ШДПС могут быть использованы для обеспечения посадки в условиях I-й категории ICAO (табл. 1, 2).

В региональных ДПС (РДПС) в качестве средства передачи корректирующей информации (КИ) может использоваться радиотехническая система дальней навигации (РСДН). В [6] рассмотрена структура радиоэлектронного комплекса (РЭК) региональной дифференциальной коррекции, вариант расширенного РЭК управления снижением и посадкой самолета на базе расширенной СРНС.

Характеристика ДПС СРНС

Тип ДПС	Дальность действия (радиус рабочей зоны), км	Средства передачи КИ	Обеспечение посадки ЛА, категория ICAO
ШДПС	5000-6000	НСПД, ГКА	I категория
РДПС	400-2000	НСПД, ГКА (РСДН)	I – II категория
ЛДПС	50-200	НСПД, (псевдоспутники)	I – III категория (вплоть до касания ВПП, пробега, руления)

Локальные ДПС (ЛДПС) в большинстве случаев включают контрольно-корректирующую станцию (ККС), аппаратуру контроля и управления, средства передачи данных.

Особый интерес для решения задачи захода на посадку и посадки представляют авиационные ЛДПС, которые можно охарактеризовать следующими показателями [1 – 3]:

- обеспечивают возможность работы для начальных участков всех ВПП со стороны захода на посадку с расстояний до 55 км (это делает систему экономически более эффективной по сравнению со средствами, предназначенными для одной ВПП);

- характеризуются гибкостью, что позволяет реализовать траекторию захода на посадку с изменяемой геометрией (что позволяет минимизировать время полета);

– менее чувствительны к атмосферным аномалиям по сравнению с ШДПС.

Точность определения координат с помощью ЛДПС выше, чем в случае использования ШДПС если пользователь находится на расстоянии меньшем 100 км от опорного приемника (ККС). Для категорий I, II ЛДПС будет обеспечивать вертикальной и горизонтальной информацией вплоть до высоты принятия решения [2].

В частном случае ККС ЛДПС может излучать сигнал, аналогичный сигналу КА (по аналогии с излучением сигнала ГКА в ШДПС). Такая ККС называется псевдоспутником (псевдолитом) [2, 7, 8]. В общем случае использование псевдоспутника в ЛДПС не предусмотрено. Поэтому, если в составе ЛДПС используются ПС, то это изменяет название ЛДПС на ЛДПС с ПС [7].

Внимание специалистов к ПС обусловлено тем, что они позволяют [1 – 3, 7, 8]:

– повысить надежность навигационных определений путем замены вышедшего из строя навигационного космического аппарата (НКА);

– выполнять функции ККС по передаче КИ без привлечения дополнительной связной аппаратуры на борту потребителя;

– обеспечивать гарантированную точность навигационных определений при частично развернутой группировке НКА путем установки ПС в нужных районах;

– улучшить геометрический фактор (эффект улучшается при размещении ПС относительно ЛА в тех направлениях, которые плохо прикрыты СРНС).

Помимо указанных достоинств использование ПС имеет некоторые проблемы, например, проблему интерференции сигналов ПС с сигналами СРНС. Сигналы ПС имеют значительный динамический диапазон (мощность сигнала может изменяться до 60 дБ [7]), что связано с большим изменением расстояния ПС-ЛА в процессе измерений.

Для решения указанной проблемы требуется

применение специальных мер [7 – 9]. Например, сигнал ПС должен излучаться как последовательность импульсов длительностью примерно 100 мкс при сохранении скорости передачи информационных символов. Кроме того, спектр передаваемого сигнала ПС может быть 10 МГц, а не 1 МГц, как у сигнала НКА.

Среди псевдоспутников аэропорта отличают дальномерные (range) ПС, гиперболические ПС и маяки целостности (ПС, устанавливаемые ниже глиссады планирования) [7, 9]. ПС, который излучает сигнал, синхронизированный с сигналом НКА, называется синхrolитом [9]. Взамен формирования высокостабильного во времени сигнала, похожего на сигнал НКА, ПС может переизлучать когерентную копию сигнала НКА, который он принимает. Для проведения навигационных определений сигнал от одного НКА может переизлучаться тремя синхrolитами.

Дальномерные ПС (или просто ПС) излучают сигнал НКА.

Два (и более) псевдоспутника аэропорта могут быть сконфигурированы таким образом, чтобы обеспечить фиксированное множество гиперболических линий положения. Такие ПС называют гиперболическими. При этом синхронизируются фазы несущих ПС и на борту ЛА измеряют разность фаз несущих принятых сигналов. Например, они могут быть расположены вдоль (параллельно) ВПП, при этом один из них располагается вблизи точки касания ВПП (рис. 1, а), а другой – на расстоянии 1000 – 2000 м от первого [7]. С целью упрощения на рисунке не приведена ККС.

Интерес представляет также случай размещения псевдоспутников под глиссадой (на рис. 1, б ПС3), по которой заходит на посадку самолет [2, 7, 9]. В этом случае псевдоспутники не только передают корректирующую информацию, но и позволяют проводить навигационные определения относительно них. Поэтому, при нахождении самолета (потребителя) над

псевдоспутником точность определения вертикальной координаты (высоты) возрастает [2]. Также целесообразен вариант [2, 6, 7, 9], когда ПС (на

рис. 1, б ПС1,2) располагаются под глиссадой, но на расстояниях около сотни метров [9] от продолжения оси ВПП по разные стороны оси.

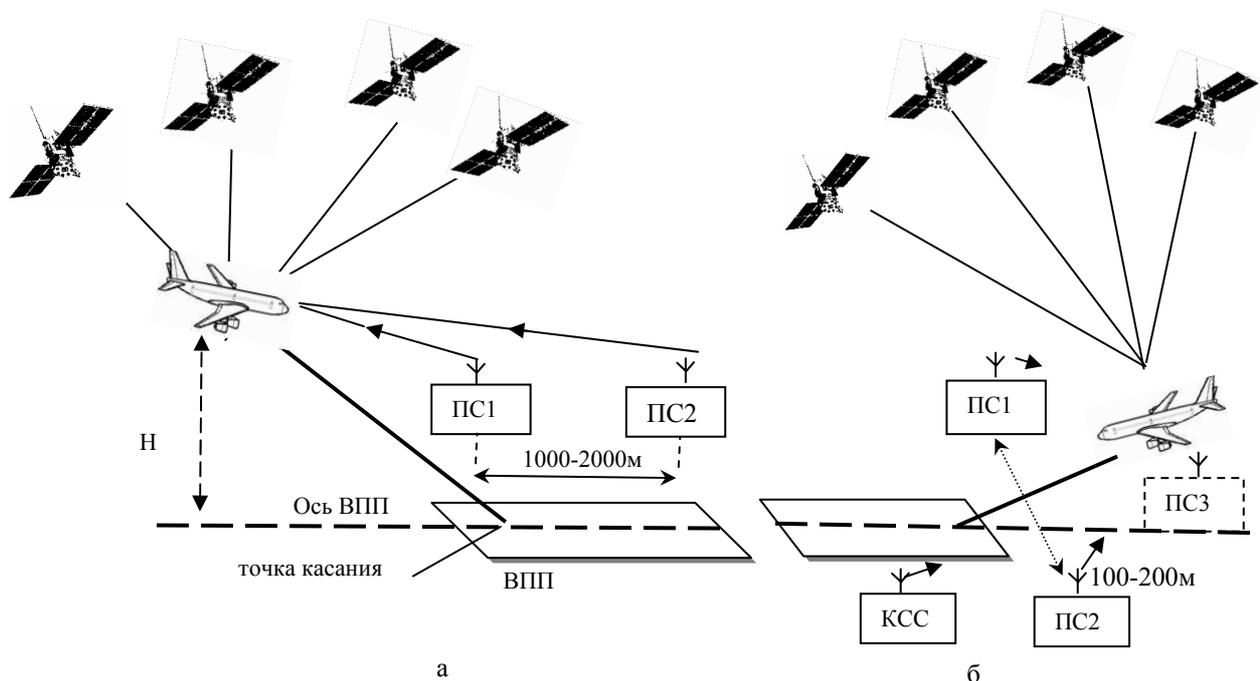


Рис. 1. Варианты построения радиоэлектронного комплекса управления снижением и посадкой самолета на базе СРНС

Следует отметить одно из правил размещения ПС – они размещаются так, чтобы максимизировать вероятность приема сигналов ПС антенной, устанавливаемой в верхней части ЛА (и используемой для приема сигналов НКА). Вопросы оптимального размещения псевдоспутников для ДПС СРНС рассмотрены в [10]. Во избежание взаимного влияния сигналов ПС минимальное расстояние между ПС рекомендуется равным 54 км [9].

Точность определений на основе ЛДПС может быть повышена до дециметрового (сантиметрового) уровня при использовании фазовых измерений сигналов НКА (по фазе несущей частоты). Использование измерений фаз несущей для алгоритмов сглаживания кодовых измерений также повышает помехоустойчивость спутниковой аппаратуры.

Однако платой за повышение точности есть необходимость устранения неоднозначности фазовых измерений. Ввиду этого прямое использование фазовых измерений целесообразно только для сглажи-

вания менее точных, но однозначных измерений по коду [2, 3].

Разрешение неоднозначности можно выполнять на уровне как первичной, так и вторичной обработки. Методы разрешения неоднозначности фазовых измерений на уровне вторичной обработки, а также беспереборные процедуры разрешения неоднозначности рассмотрены в [3].

В [11] представлена ЛДПС, которая использует кодовые и фазовые измерения сигналов НКА и сигналов ПС, размещаемых перед торцом ВПП (для каждого направления на посадку). Совместное использование на борту ЛА собственных кодовых и фазовых измерений (по НКА и псевдоспутникам) и таких же измерений наземной ККС позволяет решить проблему неоднозначности фазовых отсчетов и реализовать их потенциальную более высокую точность [2, 11].

Для решения задач военной авиации используется объединенная система точного захода на посадку

и посадки самолетов JPALS (Joint precision approach and landing system), которая по сути – аналог ЛДПС [12]. Она является комбинированием СРНС, инерциальной навигационной системы (ИНС) и сети скрытой беспроводной связи. Данная система обеспечивает безопасный заход на посадку и посадку самолетов в условиях воздействия преднамеренных помех. JPALS использует приемники СРНС с улучшенной защитой от помех.

Информация с дифференциальными поправками будет получаться самолетами за 16-48 километров от ВПП. Кроме дифференциальных поправок от наземной станции JPALS на борт ЛА передается информация о целостности. Посадка осуществляется с точностью до нескольких метров. В перспективе предполагается усовершенствование радиолинии передачи данных.

ПС системы JPALS, также выполняющий функции контроля целостности, показан на рис. 2.

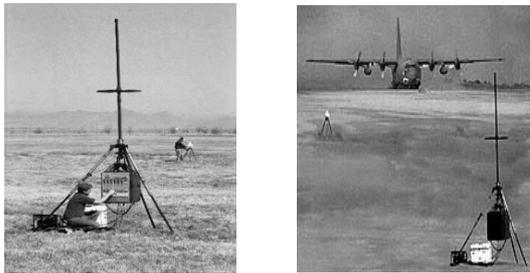


Рис. 2. ПС фирмы Raytheon, разработанный для JPALS

При осуществлении посадки на авианосцы реализуется так называемый метод относительных координат [2, 3, 8]. Точность навигационных определений повышается по мере приближения ЛА к авианосцу. При этом на авианосцах уже не требуется другое навигационное оборудование (например, станция AN/URN –25 TACAN [12]).

В России разработан спутниковый радионавигационный комплекс унифицированный СРНК-У, в основе построения которого лежит метод относительных координат [13].

Отдельного внимания заслуживают вопросы синтеза алгоритмов обработки сигналов НКА, псев-

доспутников при решении задач посадки, синтеза оптимального управления посадкой ЛА.

В [14] синтезированы алгоритмы обработки сигналов в бортовом навигационно-посадочном комплексе (НПК) на основе марковской теории оптимального оценивания случайных процессов. Для обеспечения заданного значения геометрического фактора (DOP) для вертикальной составляющей координат ЛА (что значимо при посадке), в НПК наряду с комплексированием аппаратуры потребителя СРНС инерциальной навигационной системой (ИНС) используется информация от радиовысотомера (РВ) малых высот и барометрического высотомера (БВ).

В [15] обсуждается задача оптимального управления центра масс самолета в окрестности экспоненциальной траектории. Показано что спутниковая система оптимального управления центра масс самолета при снижении и посадке практически удовлетворяет требованиям ИКАО по III-й категории сложности посадки, если используются два ПС и локальная КС.

Вопросы помехозащищенности СРНС и ее расширений (ШДПС, РДПС, ЛДПС) особенно актуальны для военной авиации [2, 3]. Среди разнообразных путей повышения помехозащищенности перспективным является использование на борту ЛА адаптивной антенной решетки (ААР), позволяющей формировать нули диаграммы направленности (ДН) в направлении на постановщики помех. Помимо устройства формирования весовых коэффициентов в состав аппаратуры потребителя должно входить устройство формирования лучей (УФЛ) ДН. Минимальное число формируемых в направлении на НКА лучей равно четырем.

В условиях сложной сигнально-помеховой обстановки для военной авиации могут использоваться ПС военного назначения [16]. Аппаратура ПС устанавливается на борту беспилотного ЛА (БПЛА), который оборудован ААР. Помимо ААР на борту БПЛА находится ИНС, которая определяет всю со-

вокупность пилотажно-навигационных параметров, необходимых для управления БПЛА [16, 17]. Для надежного навигационно-временного определения используются четыре БПЛА. Они могут находиться в близком к аэродрому районе при посадке ЛА или в другом месте, в котором планируется использование авиации. Каждый из БПЛА определяет свои координаты по сигналам НКА. УФЛ каждого БПЛА формирует четыре луча (рис. 3). По закрытому каналу связи БПЛА передает сигнал, аналогичный сигналу НКА. Таким образом, БПЛА выступает в роли НКА (является ПС). Использование таких специализированных БПЛА позволяет избежать потребности установки ААР на каждом военном ЛА [16].

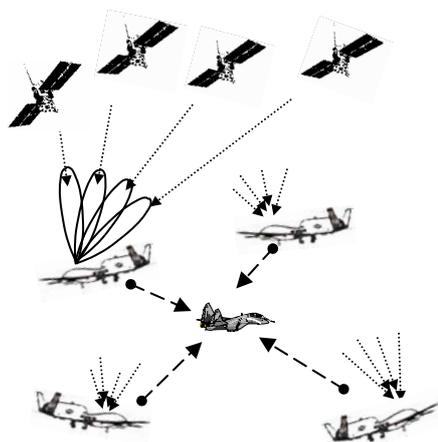


Рис. 3. Вариант СРНС с ПС с использованием БПЛА

Перспективы развития систем посадки самолетов по сигналам спутниковых радионавигационных систем в первую очередь связаны с перспективами развития СРНС GPS и ГЛОНАСС, их совместного использования. К перспективам развития следует отнести и поиск новых алгоритмов определения положения ЛА, комплексирование АП СРНС с бортовым оборудованием ЛА, использование перспектив пространственно-временной обработки сигналов.

Так, например, в [18] рассматривается использование фазовых измерений для сглаживания погрешностей определения псевдодальностей (кодовые измерения). Показано, что использование двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей

позволяет существенно снизить остаточную погрешность измерения псевдодальностей, особенно относительно НКА с малыми углами возвышения над горизонтом.

Развитие комплексирования спутниковой аппаратуры может быть направлено на разработку алгоритмов комплексной обработки информации СРНС и автономных систем с корректирующей информацией дифференциальных подсистем, синтез алгоритмов комплексной обработки информации кодовых и фазовых измерений СРНС и автономных средств для борьбы с многолучевостью.

## Заключение

Произведенный в работе анализ технической литературы позволяет сделать следующие выводы:

1. Непосредственно СРНС (без расширений) не позволяет осуществлять категорированную посадку ЛА.

2. Широкозонные ДПС не удовлетворяют требованиям навигации ЛА по точности местоопределения для посадки ЛА по всем категориям ИКАО. Данные системы имеют высокую стоимость (требуются дополнительные геостационарные космические аппараты) и являются достаточно сложными.

3. Региональные и локальные ДПС СРНС наиболее полно удовлетворяют требованиям полета и посадки ЛА. ЛДПС обеспечивают точность навигационно-временных определений, достаточную для посадки по I – III категории (вплоть до касания ВПП, пробега, руления). Такие точности возможны благодаря использованию дифференциального режима СРНС и метода измерения псевдодальности по фазе несущей (точность измерений повышается до дециметрового и даже сантиметрового уровня).

4. Псевдоспутники, установленные в районе аэропорта, могут обеспечить передачу не только КИ, но и дополнительных сигналов, позволяющих измерить дальность относительно их и уменьшить не точности, обусловленные потерями сигналов НКА.

Использование ПС в составе ЛДПС позволяет улучшить характеристики ЛДПС. Два и более ПС аэропорта могут синхронизироваться с целью получения гиперболических линий положения на основании измерений дифференциальной фазы несущей.

5. Бортовые авиационные навигационно-посадочные комплексы целесообразно строить на базе аппаратуры потребителя СРНС, осуществляя ее комплексирование с ИНС, РВ и БВ.

6. Повышение помехозащищенности СРНС, актуальное для военной авиации, возможно за счет использования теории и техники ААР.

### Литература

1. Дем'янчук В.С., Биковцев І.С., Клименко В.О., Юр'єв Ю.М. Автоматизовані системи керування повітряним рухом із використанням супутникових технологій. – К.: Укрлерорух, 2001. – 166 с.
2. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой радионавигации. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 268 с.
3. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова и др. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
4. Сосновский А.А., Хаймович И.А. Авиационная радионавигация. – М.: Транспорт, 1980. – 255 с.
5. Перевозов Е.С., Турченко В.А. Состояние и тенденции совершенствования радиолокационных систем посадки // Зарубежная радиоэлектроника. – 2001. – № 9. – С. 64-69.
6. Хомяков Э.Н., Наумова Е.Э., Медведев В.Н. Актуальные проблемы применения СРНС в авиации // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2003. – Вип. 4 (4). – С. 40-46.
7. Enge P. Local area augmentation of GPS for the precision approach of aircraft // Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87, no.1. – P. 111-131.
8. Шебшаевич В.С. и др. Дифференциальный режим сетевой спутниковой радионавигационной системы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – №1. – С. 5-32.
9. Cobb H.S. GPS pseudolites: theory, design, and applications: Ph.D. dissertation. – 1997, 166 p.
10. Parkinson B.W., Fitzgibbon K.T. Optimal locations of pseudolites for differential GPS // Journal of the Institute of Navigation. – 1987. – V. 33, no.4. – P. 259-283.
11. Pervan B., et al. Flight test evaluation of an alternative local area augmentation system architecture // Navigation, USA. – 1998. – V. 45, no.1. – P. 159-174.
12. Patterson J. Joint precision approach and landing system (JPALS): Making high-risk aircraft operation safer // DSP Journal. – July 2002. – P. 25-28.
13. Относительный режим навигации СНС. СРНК-У. Буклет. Гос. предприятие "Пилотажно-исследовательский центр" ЛИИ, 2002. – 17 с.
14. Ярлыков М.С., Пригонюк Н.Д. Заход на посадку и посадка самолетов по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника. – 2001. – № 1. – С. 30-43.
15. Хомяков Э.Н., Шаповалов С.Г., Наумова Е.Э. Оптимальное управление снижением и посадкой ЛА с использованием средств расширенной СРНС ГЛОНАСС // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2002. – Вип. 1 (39). – С. 100-106.
16. Sklar J.R. Interference Mitigation Approaches for the Global Positioning System // Lincoln laboratory journal. – 2003. – Vol. 14, no. 2. – P. 167-180.
17. Управление и наведение беспилотных маневренных ЛА на основе современных информационных технологий / Под ред. М.Н. Красильщикова и Г.Г. Серебрякова. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.
18. Наумова Е.Э. Повышение точности спутниковых систем координатно-временного обеспечения потребителей с использованием двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2001. – Вип. 1. – С. 74-80.

Поступила в редакцию 29.11.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.