

УДК 629.783

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ

А. А. Филиппов^а, доктор техн. наук, профессор

Д. А. Бажин^а, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела

А. Н. Хлобыстов^а, начальник научно-исследовательской лаборатории

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: основным направлением повышения помехозащищенности спутниковых радионавигационных систем является их резервирование с помощью локальных радионавигационных систем на основе псевдоспутников. Типовыми искусственными помехами для радионавигационных систем являются активные шумовые и доплеровские помехи. Цель работы — исследование возможности применения комбинированного метода пространственно-временной и пространственно-частотной обработки навигационных сигналов для повышения точности позиционирования летательного аппарата. **Методы:** в целях повышения уровня принимаемых от локальной навигационной системы сложных фазокодоманипулированных навигационных сигналов на фоне искусственных помех используются алгоритмы, применяемые в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях, которые основаны на использовании различий спектров сигналов от источников, движущихся с различной радиальной скоростью относительно летательного аппарата. **Результаты:** определен возможный вариант построения локальной навигационной системы для управления летательным аппаратом в условиях помех. При этом точность позиционирования не уступает точности привязки при использовании спутниковых радионавигационных систем. Применение адаптивной антенной решетки в бортовом навигационном комплексе позволяет ослабить влияние активной шумовой помехи. Применение адаптивной доплеровской фильтрации и сжатия сложного сигнала позволяет повысить соотношение сигнал/шум на 35–50 дБ. В результате обеспечивается устойчивое сопровождение навигационного сигнала при воздействии активных шумовых помех мощностью до 100 Вт. Вероятность доставки летательного аппарата в заданную область на 10–15 % превосходит существующие благодаря снижению флюктуационных ошибок на 20–30 %.

Ключевые слова — локальная радионавигационная система, активные помехи, пространственно-частотная обработка.

Введение

Для управления летательным аппаратом (ЛА) и его самонаведения на цель в настоящее время применяют пилотажно-навигационные и навигационные комплексы, включающие различные радиотехнические навигационные системы (РНС) для оценки позиционирования.

Наиболее уязвимым местом с точки зрения радиоэлектронного подавления в РНС являются бортовые навигационные приемники (НАП), реализация требований к которым в спутниковых РНС идет в нескольких направлениях.

Интегрирование РНС (спутниковых и наземных) является одним из перспективных направлений развития систем радионавигации. Успешно применяются локальные радиотехнические навигационные системы (ЛРНС), позволяющие обеспечить высокоточную доставку ЛА в пункт назначения в условиях сложной помеховой обстановки, в том числе в условиях активного радиоэлектронного противодействия.

Направлениями повышения помехоустойчивости ЛРНС являются:

- повышение мощности передатчиков псевдоспутников ЛРНС;
- динамическое изменение мощности передатчика в зависимости от внешних условий;

- динамическое изменение кода;
- скачки по частоте;
- управление лучом передатчика с помощью коммутируемых антенн или направленных антенн с механическим сканированием;
- увеличение длины псевдослучайной последовательности.

В целях повышения точности навигационного комплекса на борту ЛА проводится комплексная обработка информации от автономных систем и корректоров инерциальной навигационной системы с использованием фильтра Калмана [1].

Неавтономность и помехозависимость радиотехнических корректоров инерциальной навигационной системы, а именно радиосистем ближней и дальней навигации или спутниковой РНС, влияние геометрического фактора, а также удаление спутниковой РНС от базовой корректирующей станции снижает точность определения координат местоположения ЛА.

Возможное отключение сигналов спутниковой РНС в условиях преднамеренного противодействия или при «затенении» или «срыве» слежения за ними приводит к недостаточно высокой надежности и точности навигационного комплекса при маловысотном полете [1].

Прогресс в создании точных малогабаритных систем автономной коррекции ошибок инерци-

альной навигационной системы, работающих по геофизическим полям, и прогресс в формировании цифровой картографической информации по аэрокосмическим снимкам и топографическим картам при значительном увеличении вычислительной мощности бортовых процессоров определяют задачу увеличения степени автономности или создания полностью автономных комплексов навигационных систем [2–4].

Локальная радиотехническая навигационная система может достаточно легко быть интегрирована в системы глобального позиционирования и вместе с тем с более высокой вероятностью обеспечить требуемую точность наведения ЛА на цель [2, 5]. Результаты расчета выходной мощности передатчика шумовой помехи как функции расстояния от передатчика помехи до НАП показывают, что даже маломощные передатчики шумовых помех в состоянии создать зону подавления спутниковой РНС радиусом свыше 100 км [6].

Обоснование метода пространственно-частотной обработки навигационных сигналов ЛРНС

Уязвимость со стороны помех приводит к тому, что помимо совершенствования конструкции НАП и методов обработки навигационных сигналов активно рассматриваются вопросы резервирования спутниковой РНС с помощью ЛРНС с повышенной помехозащищенностью [2].

Остается актуальным применение псевдоспутников различного базирования, позволяющих не только увеличить помехозащищенность радионавигационного сигнала, но и обеспечить более высокую точность навигационных определений. На дальностях до 30–50 км целесообразно применять резервную мобильную ЛРНС, состоящую из трех опорных станций (ОС) и использующую для навигации ЛА сложный помехозащищенный сигнал [7]. При этом предлагается:

- 1) размещать ОС в район цели в радиусе 3–5 км (сделать их забрасываемыми);
- 2) производить пространственно-частотную обработку навигационных сигналов путем слежения за временем задержки навигационных сигналов и их доплеровской частотой.

При полете ЛА относительно ОС навигационный сигнал приобретает доплеровский сдвиг частоты. Он зависит от длины волны, углов наблюдения и скорости ЛА [8].

Предлагается организовать в НАП для повышения помехозащищенности навигационных сигналов от ОС адаптивную доплеровскую фильтрацию.

Через полосовые фильтры доплеровской частоты (ФДЧ) проходят сигналы, ограниченные двумя соответствующими линиями положения с постоянной частотой Доплера. Во временной области

организуется селекция сигналов ОС и автосопряжение по дальности (временем задержки).

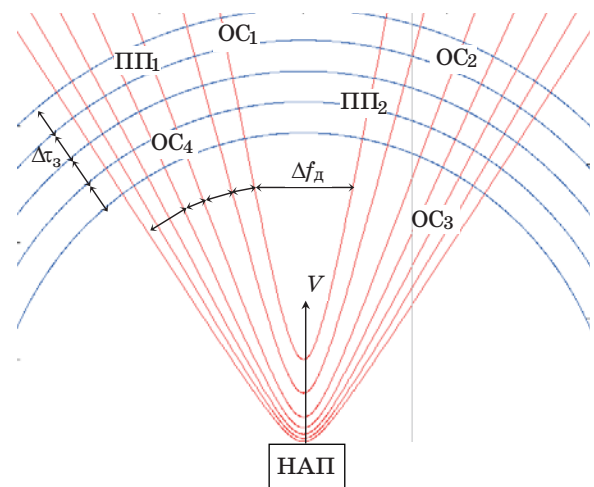
В результате наблюдения в переднебоковой зоне изодопы, полученные с использованием ФДЧ с полосой для рассматриваемых условий 500 Гц, пересекают элементы разрешения по дальности с длительностью 2 мкс (рис. 1).

Результатирующая разрешающая способность при этом по дальности и направлению в режиме поиска и захвата сигналов ОС достигает 500 м. При построении данной поверхности был использован сигнал с $\lambda = 5$ см, высота носителя — 200 м, скорость движения ЛА — 150 м/с.

При воздействии источников преднамеренных и промышленных помех, которые могут использоваться для прикрытия целей, применение узкополосной фильтрации в области доплеровских частот позволяет подавить широкополосную помеху на 20–40 дБ в зависимости от качества цифрового ФДЧ.

В режиме измерения местоположения ЛА для снижения влияния распределенных за счет многолучевого распространения активных шумовых помех (АШП) слежение осуществляется с элементами разрешения по частоте более узкополосными ФДЧ (в моделируемом случае $\Delta f_d = 100$ Гц) и во временной области — меньшими элементами разрешения по дальности Δt_3 после сжатия радиоимпульса. Это позволяет повысить соотношение сигнал/помеха еще дополнительно на 15 дБ.

При синтезе алгоритма обнаружения навигационного сигнала в рамках модели предполагается известным направление прихода сигнала от ОС в соответствии с алгоритмом функционирования ЛРНС, а значит и доплеровская частота излученного радионавигационного сигнала. При этом алгоритм, синтезированный при априорной ин-



■ Рис. 1. Применение частотно-временной обработки навигационных сигналов НАП ЛА в передне-боковой зоне (ПП — постановщик помех)

формации только о сигналах, будет неоптимальным. В реальных условиях неизвестна корреляционная функция активной помехи, от которой зависит оптимальность алгоритма обнаружения.

В том случае, когда речь идет об обнаружении навигационного сигнала ОС на фоне активных помех, имеется принципиальная возможность оценить неизвестную корреляционную функцию АПП и реализовать адаптивный алгоритм обнаружения.

Этот алгоритм можно построить, заменяя неизвестные параметры помехи в алгоритме, синтезированном для условий полной априорной определенности, на их оценки, сформированные по классифицированной обучающей выборке.

Структура же исходного (неадаптивного) алгоритма и его характеристики помехоустойчивости во многом зависят от выбранной модели навигационного сигнала и корреляционной функции помехи.

При наличии помех от местных предметов для уменьшения просачивания по боковым лепесткам доплеровских фильтров применяют весовую (оконную) обработку входной последовательности. При этом происходит расширение полосы доплеровских фильтров и потери в отношении сигнал/шум.

В работе [8] предложен вариант построения обнаружителя с многоканальным по доплеровской частоте алгоритмом, применяемый в импульсно-доплеровских РЛС.

В этом случае алгоритм обнаружения имеет вид

$$z = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{\lambda_{k,i}} \left| \sum_{j=0}^{n-1} \psi_{k,i,j} \cdot x_{j+in} \right|^2 > c, \quad (1)$$

где n — число импульсов, обрабатываемых когерентно по алгоритму, описанному в работе [3]; $N = mn$ — число обрабатываемых импульсов пачки; m — число некогерентно суммируемых результатов когерентной обработки; $\lambda_{k,i}$ — оценка собственных значений корреляционной матрицы межимпульсных флуктуаций помехи; $\psi_{k,i,j}$ — собственные векторы корреляционной матрицы помехи, выбранные при синтезе алгоритма; x_{j+in} — отчеты входного сигнала.

При весовой обработке полоса частот каждого канала расширяется в два раза и обработке вместо 16 доплеровских каналов реально доступно только 8 каналов, что дополнительно приводит к ухудшению отношения сигнал/шум на 3 дБ. Однако если не использовать весовую обработку, то при наличии помех будут подавляться все 16 доплеровских каналов [8]. Поэтому для доплеровской обработки навигационных сигналов ЛРНС весовая обработка необходима.

В условиях активного радиоэлектронного противодействия разработанная в настоящее время

теория синтеза оптимальных алгоритмов обработки радиосигналов в общем случае не применима и, как следствие этого, не может предложить меры помехозащиты, гарантирующие заданную помехоустойчивость.

На практике применяются подоптимальные способы защиты от активных помех. Это, например, перестройка несущей частоты зондирующих сигналов, изменение периода повторения импульсов, их длительности и формы и т. д. [9].

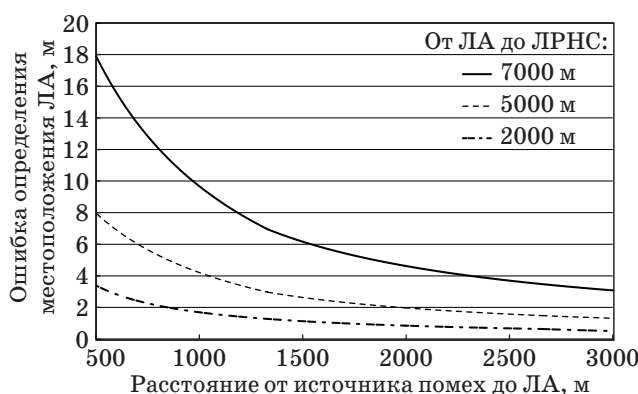
В качестве мер повышения помехозащищенности применяются:

- смена несущей частоты, периода повторения, формы импульсов;
- сложные сигналы;
- когерентная обработка пачки импульсов.

В рассматриваемом варианте применима случайная смена кода фазовой модуляции от импульса к импульсу, при этом оптимальный приемник реализуется в виде согласованного (отсутствует блок компенсации помехи), а его потенциальная помехоустойчивость пропорциональна базе радиоимпульса. Один из вариантов реализации оптимального алгоритма заключается в использовании в качестве кода фазовой модуляции укороченной М-последовательности с периодом, равным или большим произведения базы радиоимпульса на число когерентно накапливаемых импульсов.

Результаты моделирования показывают, что для обеспечения требуемой точности определения местоположения координат ЛА ($\sigma_{МП} = 15 \div 20$ м) в навигационном поле, созданном ЛРНС, необходимо, чтобы ОС размещались по фронту на расстояниях не менее 1/5 от максимальной дальности функционирования системы (рис. 2).

В рассматриваемом случае дальность должна быть не менее 10 км. Максимальная длина базы будет ограничиваться условиями распространения радиоволны, взаимным расположением аппаратуры потребителя, радионавигацион-

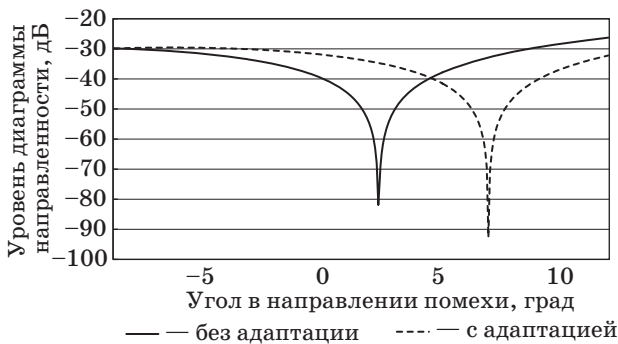


■ Рис. 2. Зависимость точности позиционирования ЛА от геометрического фактора и расстояния от НАП до ПП с мощностью АПП 100 Вт

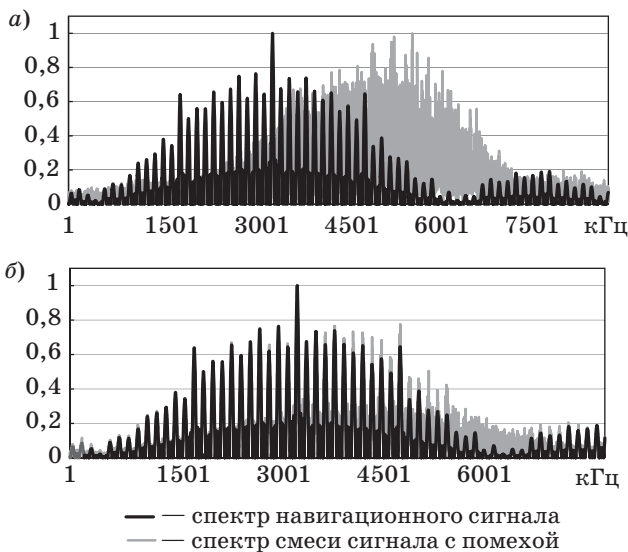
ных точек и источника помех, интенсивностью помех.

Требуемое соотношение сигнал/помеха обеспечивается путем организации в бортовых адаптивных антенных решетках (АР) НАП пространственно-временной обработки. Для трехэлементной эквидистантной АР на рис. 3 показано изменение положения диаграммы направленности после того, как был сформирован ноль диаграммы в направлении помехи. При моделировании предполагалось, что активная помеха поступает по боковому лепестку с угла 7,5° относительно направления основного лепестка. Из рисунка видно, что адаптированная диаграмма направленности АР преобразуется так, что в данном направлении формирует ноль и тем самым ослабляется влияние помехи.

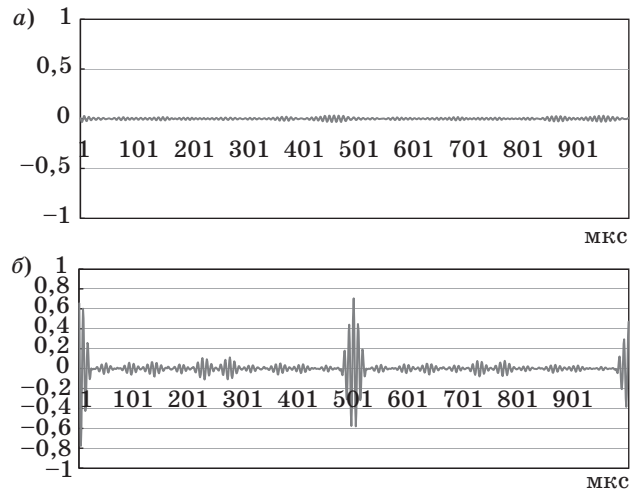
Для подавления навигационных сигналов моделировалась смесь активной шумовой помехи в виде «белого шума» и узкополосной доплеровской помехи, наиболее коррелированной с систе-



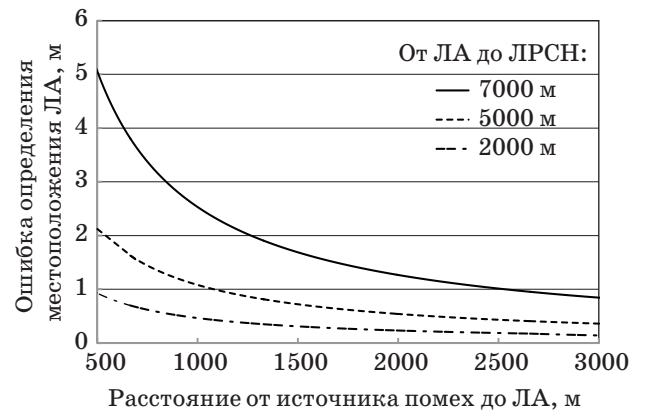
■ Рис. 3. Формирование нуля диаграммы направленности антенны при помощи адаптивной АР



■ Рис. 4. Нормированные спектры навигационного сигнала, смеси сигнала с АПП и доплеровской помехой до (а) и после (б) обработки



■ Рис. 5. Нормированные взаимокорреляционные функции навигационного сигнала с помехами до (а) и после (б) обработки



■ Рис. 6. Точность позиционирования ЛА при пространственно-временной и пространственно-частотной обработке принимаемых сигналов в условиях воздействия АПП 100 Вт

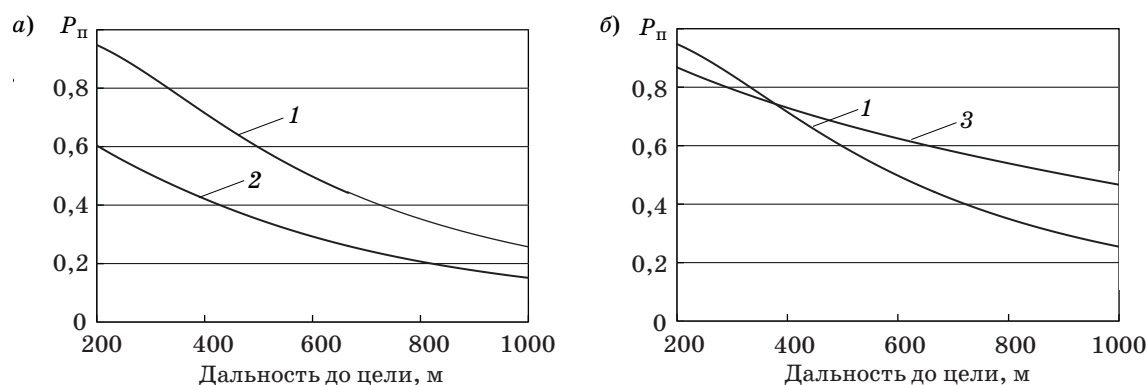
мой слежения ЛРНС за направлением и скоростью (рис. 4, а, б и 5, а, б).

Требуемое соотношение сигнал/помеха на 35 дБ позволяет обеспечить надежное слежение за навигационным сигналом и требуемую точность на удалениях ЛА от ОС до 5 км даже при мощности постановщика АПП 100 Вт (рис. 6).

Оценка результатов предлагаемых технических решений

Вероятность попадания в зону доставки ЛА при типовых систематических и флуктуационных ошибках в одной плоскости определяется по зависимости

$$P_{п\ x} = \Phi_0 \left\{ \frac{l_x(\langle \eta \rangle + 1)}{2R_{ц} \sigma_{сум}} \right\} + \Phi_0 \left\{ \frac{l_x(\langle \eta \rangle - 1)}{2R_{ц} \sigma_{сум}} \right\}, \quad (2)$$



■ **Рис. 7.** Вероятность доставки ЛА в заданную область с использованием ЛРНС (а) и доплеровской обработкой в НАП (б): 1 — при отсутствии подавления комплексированной РНС; 2 — с использованием существующей ЛРНС в условиях радиоэлектронного противодействия; 3 — в условиях радиоэлектронного противодействия с использованием многоканальной доплеровской обработки и случайной фазовой манипуляции навигационного сигнала от импульса к импульсу

где $\Phi_0(\cdot)$ — функция Лапласа; l_x — линейный размер зоны доставки по оси OX , соответствующий ширине ее проекции на картинную плоскость; $R_{ц}$ — дальность до зоны доставки; $\sigma_{\text{сум}} = (\sigma_d^2 + \sigma_n^2 + \sigma_{ц}^2)^{1/2}$ — суммарное значение среднеквадратической ошибки в рассматриваемой плоскости, зависящее от динамических ошибок управления σ_d , ошибок навигации σ_n и ошибок визирования $\sigma_{ц}$.

Полная вероятность попадания ЛА в требуемую зону доставки $P_{п}$ в предположении о независимости каналов управления будет равна

$$P_{п} = P_{пx} P_{пy}, \quad (3)$$

где $P_{пy}$ рассчитывается также по формуле (2).

Результаты оценки вероятности попадания в заданную зону доставки для рассматриваемых условий представлены на рис. 7. Из результатов моделирования следует, что в условиях радиоэлектронного противодействия с использованием многоканальной доплеровской обработки и случайной фазовой манипуляции навигационного сигнала от импульса к импульсу вероятность доставки в заданную область повышается на 15 %.

Заключение

Системы управления ЛА с ЛРНС не уступают по точности системам с корреляционно-экстремальным принципом коррекции инерциальных навигационных систем. В условиях непреднамеренных и преднамеренных помех ЛРНС могут использоваться для доставки беспилотных ЛА с точностью не ниже спутниковых РНС.

Применение пространственно-временной обработки и доплеровской фильтрации навигационных сигналов в НАП ЛРНС позволяет повысить соотношение сигнал/помеха на 35–50 дБ в зависимости от взаимного расположения по-

становщика помех и ЛА и избирательности ФДЧ и обеспечить слежение за навигационным сигналом при мощностях активных шумовых и доплеровских помех в зоне действия ЛРНС до 100 Вт. Дополнительное повышение помехоустойчивости НАП навигационного комплекса обеспечивает «мерцающий» режим работы опорных станций ЛРНС, согласованный по частоте с контуром управления ЛА.

Предлагаемый метод управления ЛА в условиях воздействия преднамеренных помех по вероятности доставки в заданную область на 10–15 % превосходит существующие благодаря снижению флуктуационных составляющих ошибок на 20–30 %.

Литература

1. Харин Е. Г. Комплексная обработка информации навигационных систем летательных аппаратов/МАИ. — М., 2002. — 260 с.
2. Балов А. В., Болошин С. Б., Геворкян А. Г., Шебшаевич Б. В. Система координатно-временного и навигационно-информационного обеспечения с базированием опорных станций в околоземном воздушном пространстве // Новости навигации. 2009. № 3. С. 17–23.
3. Веремеенко К. К., Головинский А. Н., Инсаров В. В. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. — М.: Физматлит, 2013. — 280 с.
4. Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Капитоненко В. В. Оптимизационно-адаптивный подход к управлению инвестициями в условиях неопределенности. — М.: Российская таможенная академия, 2009. — 173 с.

5. Терехов С. А., Водяных А. А., Кривовяз А. Т. Новые направления развития навигационных технологий и оборудования ГП «Оризон-навигация» // Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии: докл. конф., Харьков, 18–21 октября 2011 г. Харьков: ХНУРЭ, 2011. Т. 1. Ч. 2. С. 11–15.
6. Дятлов А. П., Дятлов П. А., Кульбикаян Б. Х. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами. — М.: Радио и связь, 2004. — 226 с.
7. Филиппов А. А., Охонский А. Г., Хлобыстов А. Н. Сравнительная характеристика систем доставки

высокоточных боеприпасов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2013. Вып. 3–4. С. 35–45.

8. Родионов В. В. Помехоустойчивость РЛС в условиях радиоэлектронного подавления // Радиолокация, навигация, связь: докл. конф., Воронеж, 15–17 апреля 2014 г. Воронеж: НПФ «Саквое», 2014. Т. 3. С. 1476–1485.
9. Максимов М. В., Бобнев М. П., Кривицкий Б. Х. Защита от радиопомех. — М.: Сов. радио, 1976. — 496 с.

UDC 629.783

Improving Drone Aircraft Control Efficiency under Interference

Filippov A. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, filaleant@yandex.ru

Bazhin D. A.^a, PhD, Tech., Head of a Research Division, sprutos@bk.ru

Khlobystov A. N.^a, Head of a Research Laboratory, xlob@mail.ru

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The main way to improve the noise immunity of satellite navigation systems is their reservation via local navigation systems based on pseudosatellites. Typical artificial interferences to radio navigation systems are active noise interference and Doppler interference. To improve the aircraft positioning accuracy, a combined method can be used of spatiotemporal and spatial-frequency processing of the navigation signals. **Methods:** The method increases the level of complex phase-code-manipulated signals received from the local navigation system on the background of artificial interference. It applies algorithms used in pulse-Doppler radars. They are based on using differences in the spectra of signals from the sources which are moving with different radial speeds relatively to the aircraft. **Results:** We have identified options for constructing a local navigation system for aircraft control under interference. The accuracy of positioning is not inferior to the accuracy of the binding when using satellite navigation systems. An adaptive antenna array in the onboard navigation complex weakens the influence of the active noise interference. Adaptive Doppler filtering and compression of the complex signal can increase the signal/noise ratio by 35–50 dB. The result is a stable maintenance of the navigation signal when exposed to active noise interference with the capacity up to 100 watts. The probabilities of aircraft delivery in a given area are by 10–15% higher than the current ones due to the reduction of fluctuation errors by 20–30%.

Keywords — Local Radio Navigation System, Active Interference, Spatial Frequency.

References

1. Kharin E. G. *Kompleksnaia obrabotka informatsii navigatsionnykh sistem letatel'nykh apparatov* [Integrated Data Processing Navigation Systems of Aircraft]. Moscow, MAI Publ., 2002. 260 p. (In Russian).
2. Balov A. V., Boloshin S. B., Gevorkian A. G., Shebshaevich B. V. Pseudolite Regional PNT and Information System using Base Stations in Near-Earth Airspace. *Novosti navigatsii*, 2009, no. 3, pp. 17–23 (In Russian).
3. Veremeenko K. K., Golovinskii A. N., Insarov V. V. *Upravlenie i navedenie bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologii* [Guidance and Control Maneuverable Drones based on Modern Information Technology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 280 p. (In Russian).
4. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Kapitonenko V. V. *Optimizatsionno-adaptivnyi podkhod k upravleniiu investitsiyami v usloviakh neopredelennosti* [Optimization, Adaptive Management Approach to Investment under Uncertainty]. Moscow, Rossiiskaia tamozhennaia akademiia Publ., 2009. 173 p. (In Russian).
5. Terechov S. A., Vodianikh A. A., Krivoviaz A. T. New Directions for the Development of Navigation Technologies and Equipment SE «Orizon-Navigation». *Doklady konferentsii "Integrirovannye informatsionnye radioelektronnye sistemy i tekhnologii"* [Proc. Int. Conf. "Integrated Information Radio Electronic Systems and Technologies"]. Khar'kov, KhNURE Publ., 2011, pp. 11–15 (In Russian).
6. Diatlov A. P., Diatlov P. A., Kul'bikaian B. Kh. *Radioelektronnaia bor'ba so sputnikovymi radionavigatsionnymi sistemami* [Electronic Warfare against Satellite Navigation System]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2013. 226 p. (In Russian).
7. Filippov A. A., Okhonskii A. G., Khlobystov A. N. Comparative Characteristics of Onboard Navigation Systems. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu*, 2013, no. 3, pp. 35–45 (In Russian).
8. Rodionov V. V. Immunity under the Radar Jamming. *Doklady konferentsii "Radiolokatsiia, navigatsiia, sviaz' 2014"* [Conf. rep. "Radar, Navigation, Link"]. Voronezh, NPF "Sakvooe" Publ., 2014, pp. 1476–1485 (In Russian).
9. Maksimov M. V., Bobnev M. P., Krivitskii B. Kh. *Zashchita ot radiopomekh* [Protection against Interference]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976. 496 p. (In Russian).