

Труды МАИ. 2025. № 140
Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.)

Научная статья

УДК 621.39; 004.056

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184066>

EDN: <https://www.elibrary.ru/NITWIN>

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННОГО СИГНАЛА С УМЕНЬШЕННЫМ УРОВНЕМ ВНЕПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Валерий Владимирович Неровный¹, Владислав Сергеевич Радько²,

Вячеслав Владимирович Цитиридис³, Марина Юрьевна Толстых^{4✉}

^{1,2,3}Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина»,

Воронеж, Российская Федерация

⁴Московский государственный лингвистический университет,

Москва, Российская Федерация

⁴Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя,

Москва, Российская Федерация

⁴marina_lion@mail.ru ✉

Аннотация. Научная статья относится к направлению теоретических и прикладных исследований, касающихся глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), при которых основное внимание уделяется разработке и совершенствованию локальных навигационных систем (ЛНС). Последние

представляют собой функциональные дополнения к ГНСС и позволяют улучшить точность и надежность определения местоположения в условиях, когда сигнал спутниковых систем затруднительно принять. Одним из преимуществ подобных систем является устранение искажений, а также увеличение уровня мощности сигнала на входе навигационной аппаратуры потребителя (НАП). В содержании предлагается подход к решению одной из актуальных научных задач в области навигации: разработка методов и устройств для формирования сигналов с улучшенными характеристиками электромагнитной совместимости (ЭМС) и уменьшенным уровнем внеполосного излучения (ВПИ). В рамках данной научной статьи рассматриваются перспективные мультиплексированные ТМВОС-сигналы (time multiplexed binary offset carrier), которые демонстрируют преимущества по сравнению с традиционными сигналами благодаря высокому уровню мощности спектра в основной полосе частот. При этом учитываются, что использование ТМВОС-сигналов в ЛНС может вызывать повышенное ВПИ, что требует соблюдения требований по ЭМС с другими радиоэлектронными средствами (РЭС). Для уменьшения ВПИ и улучшения характеристик ЭМС предлагаются методы фильтрации сигналов, в частности, с использованием фильтров с «импульсной характеристикой приподнятый косинус». Такие фильтры позволяют минимизировать искажения сигнала и снизить уровень ВПИ. Экспериментальные модели, созданные в среде MatLab/Simulink, подтвердили эффективность данных методов. Также проанализирована некогерентная обработка сигналов, широко применяемая в НАП ГНСС для упрощения архитектуры приемников. В статье разработаны и охарактеризованы методики оценки точности и помехоустойчивости

НАП ГНСС при некогерентной обработке мультиплексированного сигнала. Изложен порядок и результат проведенных исследований, которые показали, что при использовании сигналов ТМВОС с улучшенными характеристиками ЭМС, несмотря на увеличение уровня помехоустойчивости, наблюдаются незначительные потери в точности определения местоположения. Данные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития навигационных систем и улучшения их характеристик в сложных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: локальная навигационная система, фильтр с характеристикой «приподнятый косинус», мультиплексированный сигнал, внеполосное излучение, аппаратура потребителей

Для цитирования: Неровный В.В., Радько В.С., Цитиридис В.В., Толстых М.Ю. Методика оценки точности и помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя при некогерентной обработке мультиплексированного сигнала с уменьшенным уровнем внеполосного излучения // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184066>

Original article

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ACCURACY AND NOISE IMMUNITY OF CONSUMER NAVIGATION EQUIPMENT DURING INCOHERENT PROCESSING OF A MULTIPLEXED SIGNAL WITH A REDUCED LEVEL OF OUT-BAND EMISSION

**Valery V. Nerovny¹, Vladislav S. Radko², Vyacheslav V. Citiridis³,
Marina Yu. Tolstykh⁴✉**

^{1,2,3}Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Y.A. Gagarin,
Voronezh, Russian Federation

⁴Moscow State Linguistic University,
Moscow, Russian Federation

⁴Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
Moscow, Russian Federation

⁴marina_lion@mail.ru 

Abstract. The scientific article pertains to the field of theoretical and applied research related to Global Navigation Satellite Systems (GNSS), with a primary focus on the development and enhancement of Local Navigation Systems (LNS). These systems serve as functional augmentations to GNSS, allowing for improved accuracy and reliability of positioning in environments where satellite signal reception is challenging. One of the advantages of such systems is the mitigation of signal distortions and the increase in signal power at the input of the user's navigation equipment (UNE). The article presents an approach to addressing a current scientific challenge in the field of navigation: the development of methods and devices for generating signals with improved electromagnetic compatibility (EMC) characteristics and reduced out-of-band emissions (OOBE). The study focuses on advanced time-multiplexed binary offset carrier (TMBOC) signals, which offer advantages over traditional signals due to their high spectral power density in the main frequency band. It is acknowledged, however, that the use of TMBOC signals in LNS can lead to increased OOBE, necessitating adherence to EMC requirements with other radio electronic equipment (REE). To reduce OOBE and enhance EMC characteristics, the article proposes signal filtering methods, particularly using filters with a «raised cosine impulse response». These filters minimize signal distortions and lower

OOBE levels. Experimental models developed in the MatLab/Simulink environment have confirmed the effectiveness of these methods. The article also analyzes non-coherent signal processing, which is widely used in GNSS UNE to simplify receiver architecture. Methodologies for assessing the accuracy and interference immunity of GNSS UNE during non-coherent processing of multiplexed signals are developed and characterized. The research findings indicate that while the use of TMBOC signals with improved EMC characteristics results in increased interference immunity, there is a slight loss in positioning accuracy. These results can be utilized for the further development of navigation systems and the enhancement of their performance in challenging operational conditions.

Keywords: local navigation system, filter with «raised cosine» characteristic, multiplexed signal, out-of-band emission, consumer equipment

For citation: Nerovny V.V., Radko V.S., Citiridis V.V., Tolstykh M.Y. Methodology for assessing the accuracy and noise immunity of consumer navigation equipment during incoherent processing of a multiplexed signal with a reduced level of out-band emission.

Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184066>

Введение

К востребованным векторам научных работ в направлении глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) относится разработка и усовершенствование функциональных дополнений, позволяющих улучшить

качество определения местоположения навигационной аппаратуры потребителя (НАП).

Локальные навигационные системы (ЛНС) являются функциональным дополнением ГНСС, состоящие из псевдоспутников, которые излучают сигналы, схожие по структуре сигналам космических аппаратов (КА). Данные системы актуальны в районах со сложной радиоэлектронной обстановкой или в сложно доступной местности, где НАП ГНСС не принимает сигналы КА [1]. Так как сигналы в этом случае излучаются около земной поверхности, исключаются ионосферные и тропосферные искажения, и на вход НАП поступают навигационные сигналы с увеличенным уровнем мощности, что позволяет повысить помехоустойчивость и увеличить надежность навигационных определений [2, 3]. Наиболее известной зарубежной ЛНС является LocataNet [4], которая используется в г. Сидней. В России разработкой ЛНС занимается АО Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», проект «КОНСУЛ» [5].

Для определения местоположения потребителя в ГНСС используются фазоманипулированные сигналы BPSK, а также меандровые ВОС-сигналы и их производные (мультиплексированные МВОС-сигналы, AltВОС и т.д.). На данный момент сигналы с кодовым разделением используются наиболее часто, что показывает их актуальность как в ГНСС, так и в ЛНС. В данной работе исследования будут направлены на перспективные мультиплексированные ТМВОС-сигналы (time multiplexed binary offset carrier), которые имеют высокий уровень мощности спектра в основной полосе частот, что является преимуществом

сигналов с дополнительной меандровой модуляцией по сравнению с ВОС-сигналами [7, 8].

Однако необходимо обратить внимание, что использование этих сигналов в ЛНС с учетом высокого уровня внеполосного излучения (ВПИ) может оказать влияние на эффективность работы отечественных радиоэлектронных средств (РЭС), которые работают в общем диапазоне частот. В связи с этим, при развертывании ЛНС на основе псевдоспутников, использующих навигационные сигналы с дополнительной меандровой модуляцией, необходимо соблюдать требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) [7] с другими РЭС, функционирующими в диапазоне 1-2 ГГц (L-диапазоне).

В работах [10, 12] разработан способ и устройство формирования навигационного сигнала с уменьшенным уровнем внеполосного излучения (УУВИ), который достигается благодаря использованию фильтра с «импульсной характеристикой приподнятый косинус» [8]. В данных работах получено выражение импульсной характеристики для фильтрации меандрового сигнала и выбран коэффициент скругления фильтра, при котором в сигнал вносятся наименьшие искажения. Также в работах [12, 13] описаны алгоритмы некогерентной обработки навигационных сигналов для НАП ГНСС. Как правило, некогерентная обработка сигналов используется в навигационной аппаратуре для упрощения архитектуры приемников и снижения затрат. Однако, она может приводить к ухудшению точности и устойчивости к помехам по сравнению с когерентной обработкой [13]. В этой связи важно оценить эффективность некогерентной обработки для ТМВОС-сигналов в контексте ЛНС.

Цель данной научной работы заключается в разработке методики оценки точности и помехоустойчивости НАП ГНСС при некогерентной обработке мультиплексированного сигнала с улучшенными характеристиками ЭМС и в оценке полученных результатов.

Постановка задачи исследования

Улучшение показателей точности навигационных определений приводит к появлению более сложных сигналов, при формировании которых используется дальномерный код с двумя меандровыми последовательностями. ТМВОС-сигнал является комбинированным сигналом, в структуре которого применяется мультиплексированные во времени меандровые псевдослучайные последовательности (ПСП), т.е. по определенному закону сменяются два различных вида меандрового колебания на каждом периоде дальномерного кода. В работе будет рассматриваться сигнал ТМВОС(6,1,1/11), который используется в ГНСС и описывается следующим выражением [6]:

$$S_{\text{ТМВОС}}(t) = AG_{\text{ДК}}(t)G_{\text{НС}}(t) \left(G_{\text{ТМ}}(t)M_1(t) + (1 - G_{\text{ТМ}}(t))M_2(t) \right) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала; $G_{\text{ДК}}(t)$ – дальномерный код; $G_{\text{НС}}(t)$ – навигационное сообщение; $G_{\text{ТМ}}(t)$ – последовательность стробирующих импульсов; принимающих значения 1 или 0 по закону временного разделения двух меандровых последовательностей; $M_1(t)$, $M_2(t)$ – первая и вторая меандровые

последовательности, которые описываются по закону ВОС(6,1) и ВОС(1,1) соответственно; ω_0 – несущая частота; φ_0 – начальная фаза.

В сигнале подобного типа комбинируют несколько типов ВОС модуляции: ВОС(6,1) и ВОС(1,1) с меандровыми поднесущими колебаниями $M_1(t)$ и $M_2(t)$ соответственно описываемые выражениями:

$$M_1(t) = \text{sign}[\sin(\omega_{m1}t)];$$

$$M_2(t) = \text{sign}[\sin(\omega_{m2}t)], \quad (2) \quad (2)$$

где функция знака числа $\text{sign}(x)$ принимает значение $+1$, если $x > 0$, при $x < 0$ принимает значение -1 ; ω_{m1} , ω_{m2} – циклические частоты следования импульсов соответствующих поднесущих колебаний.

В пилотной компоненте сигнала применено временное уплотнение двух компонент сигнала, одна из которых имеет модуляцию ВОС(1,1), а другая – ВОС(6,1). Благодаря стробирующей последовательности псевдослучайная последовательность дальномерного кода делится на 33 бита таким образом, чтобы биты с номерами 1, 5, 7, 30 осуществляли модуляцию по закону ВОС(6,1), а все остальные биты – по закону ВОС(1,1) [6]. Схематично такие подпериоды изображены на рисунке 1.

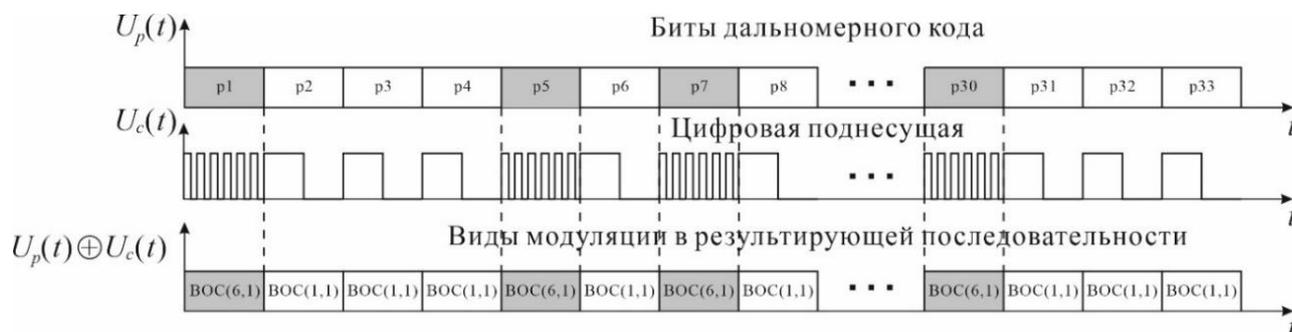


Рис. 1. Подпериоды дальномерного кода

Данным типам модуляции отводится разные доли энергии. Модуляции ВОС(6,1) в приведенном примере выделяется 0,09 от интегративной мощности. Таим образом, можем определить условие (выражение) для энергетического спектра полного ТМВОС [6]:

$$S_{ТМВОС}(f) = \frac{10}{11} S_{ВОС(1,1)}(f) + \frac{1}{11} S_{ВОС(6,1)}(f) \quad (3)$$

где $S_{ТМВОС}(f)$ – энергетический спектр полного ТМВОС-сигнала; $S_{ВОС(1,1)}(f)$, $S_{ВОС(6,1)}(f)$ – спектральные образы сигналов ВОС(1,1) и ВОС(6,1) соответственно.

Структурная схема формирователя полного сигнала с дополнительной меандровой модуляцией представлена на рисунке 2.

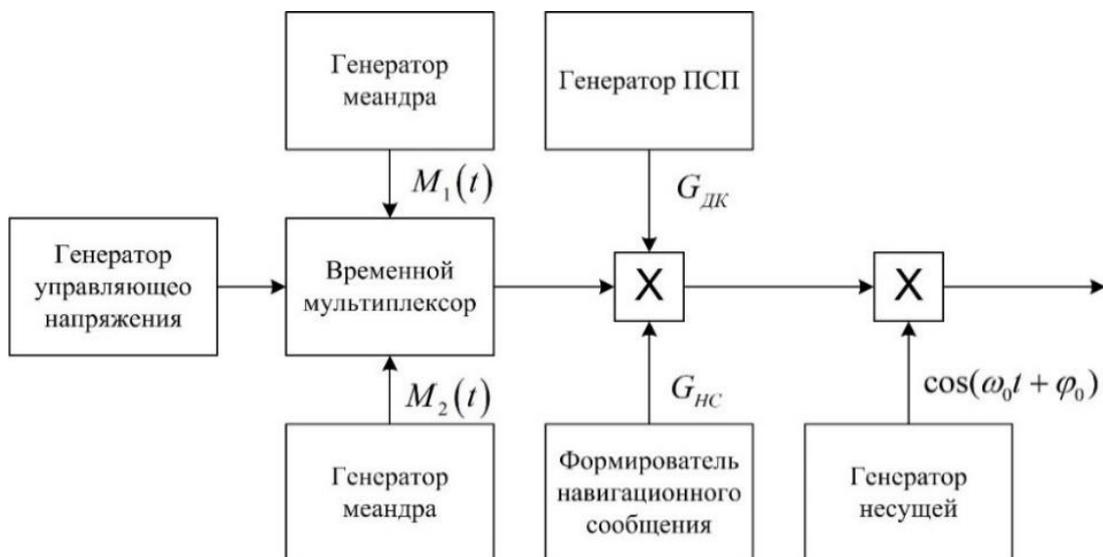


Рис. 2. Структурная схема формирователя ТМВОС-сигнала

Для изучения характеристик сигнала до и после фильтрации в области ВПИ в среде MatLab/Simulink разработана модель [15], согласно которой был сформирован

мультиплексированный сигнал. Анализируя спектр 1 на рисунке 3, амплитудно-частотный спектр (АЧС) сигнала ТМВОС(6,1,1/11) имеет лепестковый характер спектра, где в основной полосе частот сосредоточено более 90% энергии. Основная полоса частот ТМВОС-сигнала определяется формулой [16]:

$$\Delta f_{\text{ТМВОС}} = 2f_b(m_1 + m_2 + n) \quad (4)$$

где f_b – базовая частота (в данном случае она равна 1023 МГц); m_1, m_2 – коэффициенты кратности частот меандровых последовательностей сигналов ВОС(6,1) и ВОС(1,1) базовой частоте; n – коэффициент кратности частоты ПСП базовой частоте.

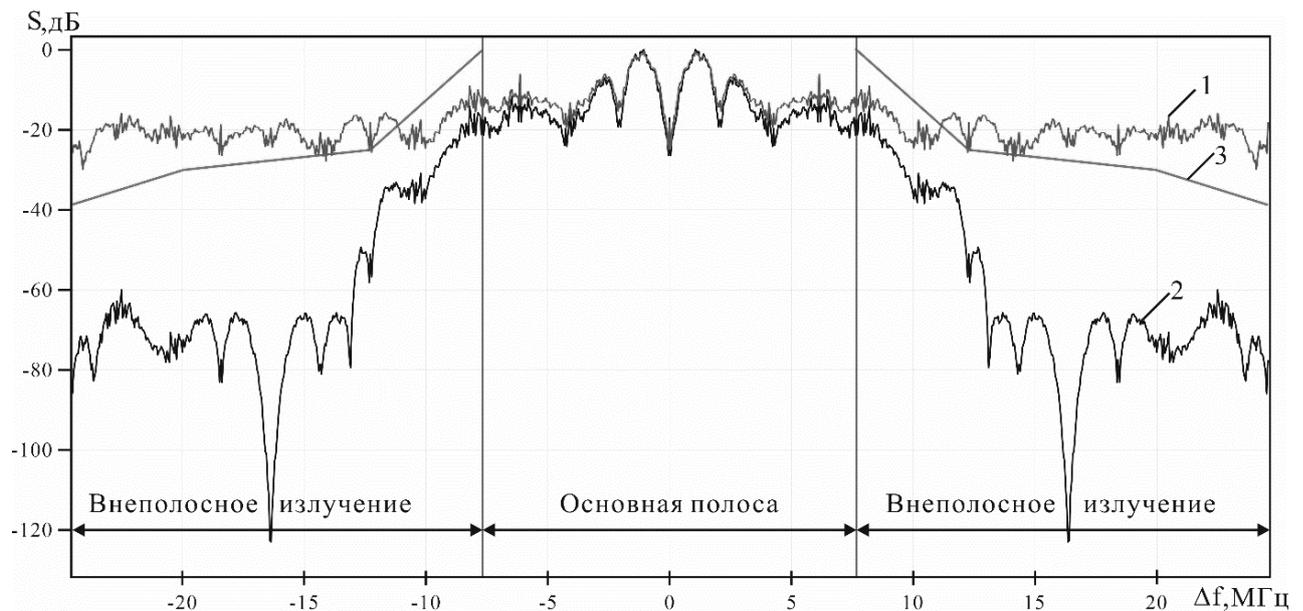


Рис. 3. Амплитудно-частотный спектр: 1 – сигнал ТМВОС(6,1,1/11) без фильтрации; 2 – сигнал ТМВОС(6,1,1/11) с фильтрацией основной полосы; 3 – ограничительная линия спектра

Основные параметры внеполосных и побочных радиоизлучений радиопередающих устройств изложены в [7], основные термины и определения в

области ЭМС – в [17]. Согласно [7] на АЧС сигнала строится ограничительная линия спектра (график 3 рисунка 3), пересечение которой является следствием не соответствия требованиям ЭМС, поэтому из рисунка 3 видно, что сигнал ТМВОС(6,1,1/11) имеет высокий уровень ВПИ, что может повлиять на качество работы другой РЭС, работающих в L-диапазоне.

В связи с тем, что одним из необходимых параметров сигнала в ГНСС является фаза, поэтому особое внимание уделяется фильтрам с конечной импульсной характеристикой, которые имеют линейное изменение фазы. Также для минимизации межсимвольной интерференции был выбран фильтр Найквиста с передаточной функцией $H(f)$, имеющей постоянное значение в полосе частот от нуля до $f_c \geq 1/(2\tau_c)$ и являющееся сверткой с произвольной четной функцией $z(f)$, равной нулю вне этой полосы.

Так как рассматриваемый фильтр невозможно реализовать в аппаратуре, в системах подвижной радиосвязи с фазоманипулированными сигналами для фильтрации основной полосы сигнала используются фильтры, которые выбираются из семейства фильтров Найквиста, форма амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) которых приближена к АЧХ «идеального» фильтра нижних частот.

Уменьшение внеполосных излучений было достигнуто благодаря прохождению мультиплексированного сигнала через фильтр с характеристикой «приподнятый косинус» (ФПК). Выражение для импульсной характеристики (ИХ) фильтров «приподнятый косинус» с полосой частот, использующихся при формировании ТМВОС -сигнала имеет вид [16, 18]:

$$h(t) = \frac{\cos\left(\frac{\pi\alpha(m_1+m_2+n)t}{\tau}\right)}{1-4\alpha^2\left(\frac{(m_1+m_2+n)t}{\tau}\right)^2} \cdot \frac{\sin\left(\frac{(m_1+m_2+n)t}{\tau}\right)}{\frac{(m_1+m_2+n)t}{\tau}}, \quad (5)$$

где α – коэффициент скругления ФПК, изменяющийся в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 1$.

Структурная схема передающего устройства навигационных сигналов с дополнительной меандровой модуляцией с фильтром основной полосы модулирующего колебания представлена на рисунке 4.

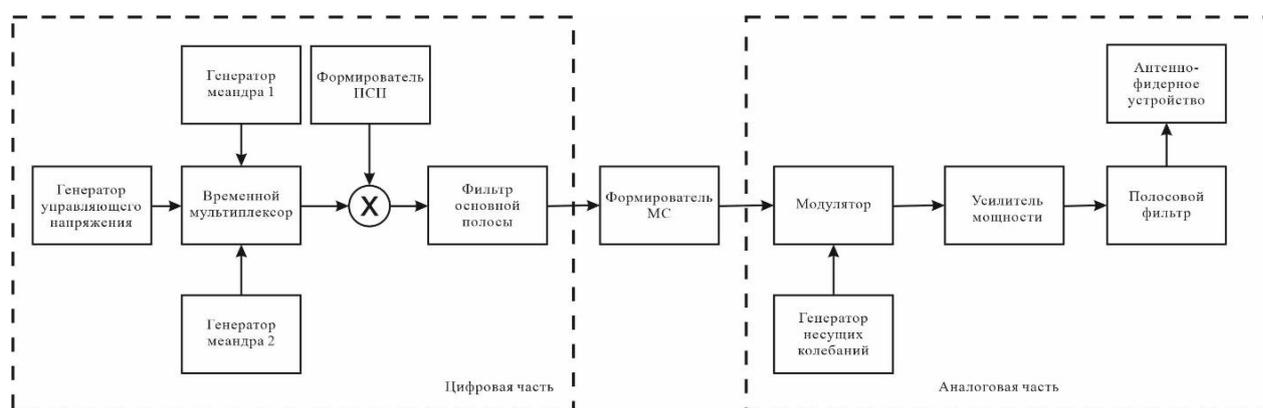


Рис. 4. Функциональная схема передающего устройства ТМВОС-сигналов с фильтром основной полосы

В соответствии со схемой, изображенной на рисунке 4, модулирующая функция навигационного сигнала с модуляцией ТМВОС формируется в цифровом виде путем перемножения биполярных импульсных сигналов: псевдослучайной последовательности и временного мультиплексора, на который подается сигналы с генераторов меандра и генератора управляющего напряжения. Цифровой фильтр основной полосы изменяет вид модулирующего колебания навигационного сигнала таким образом, чтобы обеспечить требуемый уровень внеполосного излучения. Формирователь модулирующего сигнала преобразует сигнал в вид, требуемый для работы аналогового модулятора передающего устройства. Усиленный радиосигнал

подается в антенное устройство через аналоговый полосовой фильтр, предназначенный для подавления побочного излучения, обусловленного нелинейными процессами в передатчике и не связанного с законом модуляции излучаемого радиосигнала.

С помощью модели [15] был сформирован сигнал ТМВОС(6,1,1/11) с УУВИ, где $\alpha=0,85$. Как видно по спектру 2 (рисунок 3) полученный сигнал удовлетворяет требованиям ЭМС [7], а при $\alpha=0,85$ в навигационный сигнал вносятся наименьшие искажения. Однако не известно, как данные искажения влияют на показатели эффективности аппаратуры потребителей. Следовательно, необходимо исследовать влияние искажений сигнала на АП ГНСС при некогерентной обработке.

Оценка точности и помехоустойчивости аппаратуры потребителей с некогерентной обработкой

Для качественной обработки навигационного сигнала, в ГНСС используется когерентная и некогерентная обработка. На данный момент некогерентная обработка сигнала с дополнительной меандровой модуляцией изучена не в полном объеме. Стоит отметить, что при этом типе обработки, в качестве информационного параметра выступает доплеровское смещение частоты, а фаза сигнала усредняется. Также оценивается и задержка дальномерного кода, следовательно, это определяет состав некогерентного приемника: система слежения за частотой (ССЧ) и система слежения за задержкой (ССЗ). При сравнении с когерентным приемником, некогерентный обладает повышенной помехоустойчивостью, что предопределяет

его преимущество [11]. Чтобы определить помехоустойчивость АП ГНСС используется только ССЧ, а для определения точности – ССЗ.

Существуют алгоритмы обработки мультиплексированных сигналов: на двух и четырех поднесущих частотах (ДПИ и ЧПЧ), где сигнал представляется как два или четыре сигнала BPSK; на единой промежуточной частоте (ЕПЧ), где за информационный параметр дополнительно используется задержка меандровой последовательности [13].

В работе будет рассматриваться алгоритм на ЧПЧ и ЕПЧ.

Для работы с помехоустойчивостью ССЧ в обстановке действующих помех целесообразно применить подход, описанный в [13]. Методика включает в себя расчет статистических характеристик частотного дискриминатора на базе математического моделирования.

Для этого необходимо определить дискриминационную характеристику дискриминатора ССЧ, которое описывается формулой [11]:

$$U(\varepsilon_\omega) = M[u_{D\omega}], \quad (6)$$

где ε_ω – ошибка оценки доплеровского смещения частоты, $u_{D\omega}$ – напряжение на выходе дискриминатора ССЧ.

Крутизна дискриминационной характеристики рассчитывается согласно выражению:

$$S_\omega = \partial U(\varepsilon_\omega) / \partial \varepsilon_\omega |_{\varepsilon_\omega=0}. \quad (7)$$

Также необходимо вычислить и флуктуационную характеристику, которая определяется выражением:

$$D_{\omega} = M[(u_{d\omega} - M[u_{d\omega}])^2] | \varepsilon_{\omega} = 0. \quad (8)$$

Следовательно, можно вычислить дисперсию, пересчитанную к входу дискриминатора согласно формуле:

$$D = D_{\omega} / S_{\omega}^2. \quad (9)$$

Тогда для определения дисперсии ошибки фильтрации используется выражение:

$$\sigma_{\omega} = 2 \cdot D \cdot T \cdot \Delta f_{\text{ССЧ}} \quad (10)$$

где $\Delta f_{\text{ССЧ}}$ – шумовая полоса пропускания ССЧ, T – время длительности навигационного сигнала.

Метод расчета помехоустойчивости аппаратуры потребителей ГНСС с некогерентной обработкой представлена в [10]. Так как построение аналитической модели трудно осуществимо, поэтому в данном случае применяются метод статистических испытаний или метод Монте-Карло [19]. Для определения вероятности срыва слежения (ВСС) навигационных определений с использованием ЭВМ разработаны соответствующие модели систем слежения за частотой, а именно в среде MatLab/Simulink.

Для оценки эффективности работы частотного дискриминатора в условиях помех используется ВСС за определенное время T . Срыв слежения означает выход мгновенного значения ошибки слежения за частотой за пределы аперттуры дискриминационной характеристики дискриминатора. ВСС рассчитывается как отношение числа опытов, в которых произошел выход мгновенного значения

ошибки слежения за апертуру дискриминационной характеристики, к общему числу опытов. Математически ВСС может быть выражена следующим образом:

$$P_C = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta_k(\sigma_\omega) \quad (11)$$

где P_C – ВСС; N – общее количество опытов; σ_ω – значение статистики, пересчитанной к входу частотного дискриминатора в опыте k ; δ_k – индикаторная переменная, причем $\delta_k(\sigma_\omega) = 1$, если $\sigma_\omega > A_{\text{дх}}$ и $\delta_k(\sigma_\omega) = 0$, если $\sigma_\omega \leq A_{\text{дх}}$; $A_{\text{дх}}$ – раскрыв апертуры дискриминационной характеристики.

В модели для сигнала ТМВОС(6,1,1/11) с фильтрацией и без фильтрации было использовано $N = 200$ число опытов. На основе полученных результатов (таблица 1) был построен график, где P_C – ВСС, j/s – отношение шум/сигнал:

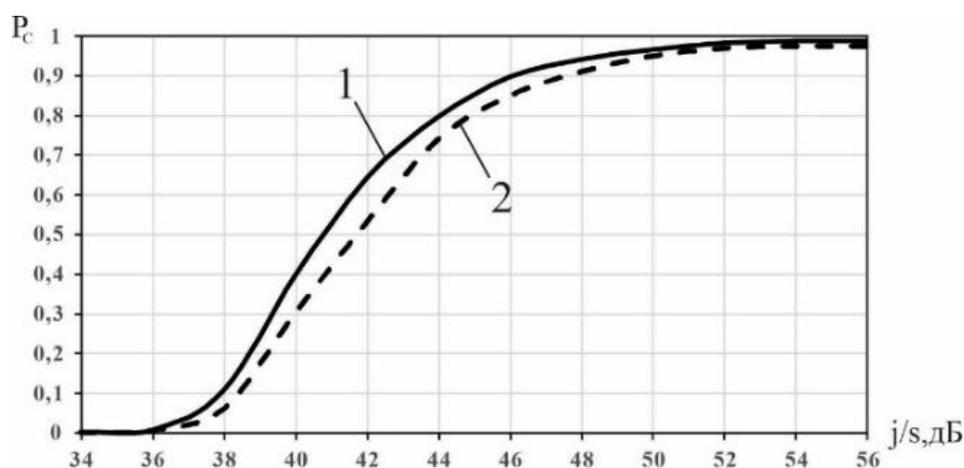
Таблица 1.

Вероятность срыва слежения для сигнала ТМВОС(6,1,1/11)

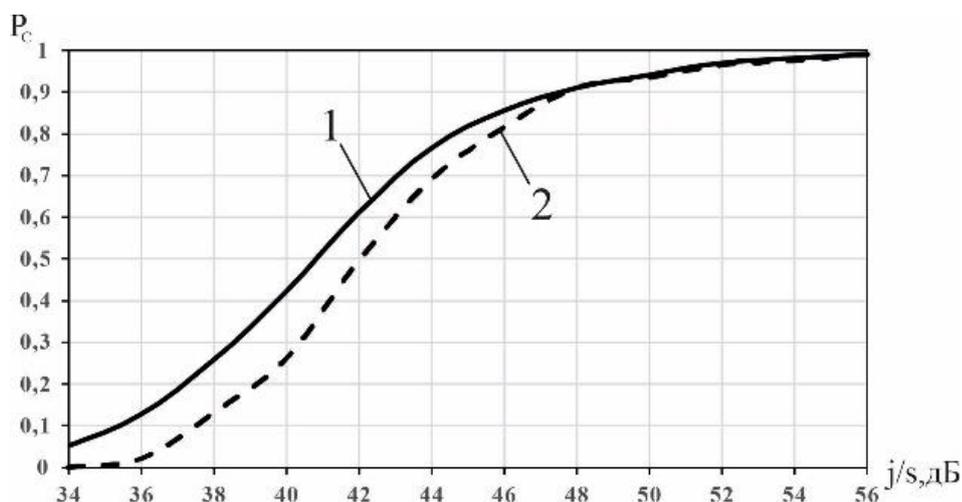
| Отношение шум/сигнал | Вероятность срыва слежения | | | |
|----------------------|--|-------------------------|---|-------------------------|
| | Обработка на четырех поднесущих частотах | | Обработка на единой промежуточной частоте | |
| j/s | $P_{\text{сТМВОС}}$ | $P_{\text{сТМВОС}\phi}$ | $P_{\text{сТМВОС}}$ | $P_{\text{сТМВОС}\phi}$ |
| 36 | 0,005 | 0,005 | 0,02 | 0,125 |
| 38 | 0,06 | 0,105 | 0,13 | 0,256 |
| 40 | 0,301 | 0,395 | 0,26 | 0,42 |
| 42 | 0,53 | 0,64 | 0,495 | 0,61 |
| 44 | 0,74 | 0,795 | 0,69 | 0,765 |
| 46 | 0,85 | 0,895 | 0,815 | 0,855 |
| 48 | 0,91 | 0,94 | 0,91 | 0,91 |
| 50 | 0,95 | 0,965 | 0,935 | 0,94 |

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|------|
| 52 | 0,97 | 0,98 | 0,975 | 0,97 |
| 54 | 0,975 | 0,985 | 0,975 | 0,98 |
| 56 | 0,975 | 0,985 | 0,99 | 0,99 |

На рисунке 5 представлена визуализация зависимости ВСС навигационного сигнала от отношения шум/сигнал при некогерентной обработке (а) на четырех промежуточных частотах и (б) на единой промежуточной частоте. Факт события срыва считается на уровне $P_c = 0,5$, как видно на рисунке 2 (а) при приеме навигационного сигнала ТМВОС(6,1,1/11) с УУВИ помехоустойчивость НАП уменьшается на 1 дБ, на рисунке 2 (б) – на 1,1 дБ. Это происходит из-за искажений, которые вносит фильтр с характеристикой «приподнятый косинус». Полученный разнос является незначительным, так как при формировании сигнала с УУВИ обеспечивается ЭМС с РЭС без изменений аппаратной части НАП.



а)



б)

Рис. 5. График зависимости вероятности срыва слежения от отношения шум/сигнал для ССЧ: а) с обработкой на четырех поднесущих частотах; б) с обработкой на единой промежуточной частоте; 1 – сигнал ТМВОС(6,1,1/11) с требуемой формой спектра; 2 – сигнал ТМВОС(6,1,1/11)

Критерием оценки точности работы НАП считается среднеквадратическая ошибка (СКО) определения псевдодальностей. Дискриминационная характеристика дискриминатора ССЗ определяется выражением (4) [11] при замене индекса ω на τ , тогда $\varepsilon_\tau = \tau - \tilde{\tau}$ – ошибка оценки временной задержки; $u_{д,\tau}$ – напряжение на выходе дискриминатора ССЗ. Аналогично можно найти крутизну дискриминационной характеристики S_τ и флуктуационную характеристику дискриминатора временной задержки D_τ .

Следовательно, для ССЗ дисперсия ошибки фильтрации σ_τ^2 , которая формируется на выходе разработанной модели, определяется как:

$$\sigma_\tau^2 = 2 \cdot D \cdot T \cdot \Delta f_{\text{ССЗ}}, \quad (12)$$

где $\Delta f_{\text{ССЗ}}$ – шумовая полоса пропускания схемы слежения за задержкой (ССЗ).

Для получения численных значений ошибки фильтрации в программной среде MATLAB/Simulink [20] для статистических испытаний были разработаны имитационные модели схем слежения за задержкой сигнала, работающих в условиях гауссовской помехи. Для каждого заданного значения «помеха/сигнал» j/s проведено по 200 опытов.

После реализации серий опытов необходимо провести оценку достоверности полученных статистических данных. Математическое ожидание $\bar{\sigma}_\tau$ для σ_τ^2 может быть оценено с использованием выражения:

$$\bar{\sigma}_\tau = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{\tau_i}^2}{n}. \quad (13)$$

Согласно [19], для вычисления дисперсии случайной величины $\sigma_{\tau_i}^2$ оценивается с помощью формулы:

$$\tilde{D} = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{\tau_i}^2 - \bar{\sigma}_\tau)^2}{n-1}. \quad (14)$$

Для вычисления среднее квадратического отклонения оценки математического ожидания случайной величины $\sigma_{\tau_i}^2$ используется выражение:

$$\sigma_{\bar{\sigma}_\tau^2} = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}. \quad (15)$$

После чего необходимо узнать значение t_β , которое определяет для нормального закона распределения число средних квадратических отклонений, которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок было равно β . Переменная является

табличным значением [19] и при $\beta = 0,95$ $t_\beta = 1,96$. Следующим шагом, согласно [19], определяется величина ε_β по формуле:

$$\varepsilon_\beta = t_\beta \sigma_{\bar{\sigma}_\tau}. \quad (16)$$

Таким образом, значение ε_β задает границы доверительного интервала:

$$m_H = \bar{\sigma}_\tau - \varepsilon_\beta; m_B = \bar{\sigma}_\tau + \varepsilon_\beta, \quad (17)$$

где m_H – нижняя граница доверительно интервала; m_B – верхняя граница доверительно интервала.

Итоги среднеквадратического отклонения определения псевдодоальности при различных алгоритмах некогерентной обработки сигнала ТМВОС(6,1,1/11) представлены в таблице 2.

Таблица 2.

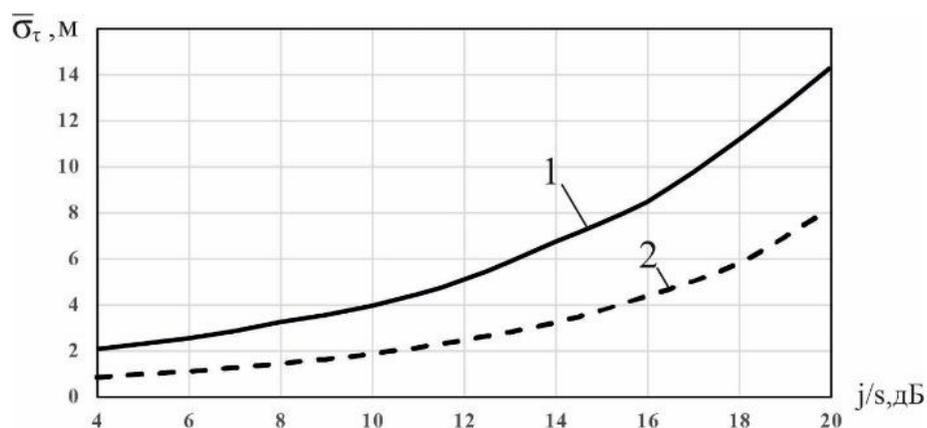
Среднеквадратическое отклонение определения псевдодоальности для сигнала

ТМВОС(6,1,1/11)

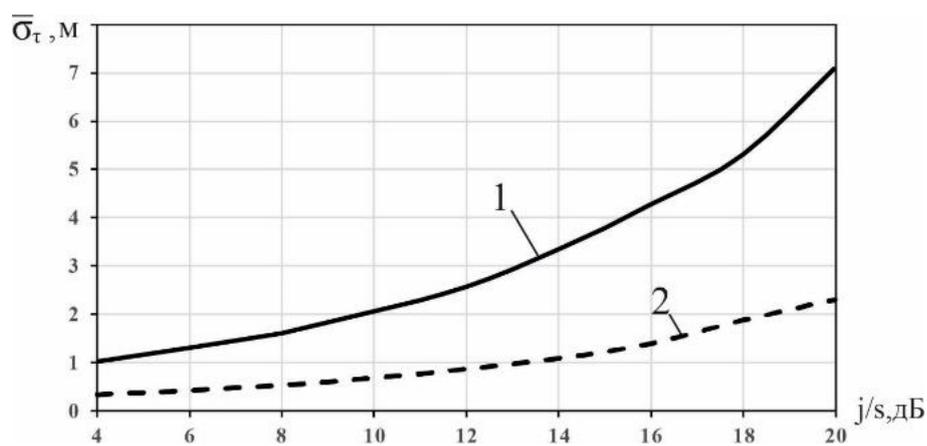
| Отношение шум/сигнал | Вероятность срыва слежения | | | | | | | |
|----------------------|--|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| | Обработка на четырех поднесущих частотах | | | | Обработка на единой промежуточной частоте | | | |
| | Без фильтрации | | С фильтрацией | | Без фильтрации | | С фильтрацией | |
| j/s | $\bar{\sigma}_\tau^2$ [М] | ε_β [М] | $\bar{\sigma}_\tau^2$ [М] | ε_β [М] | $\bar{\sigma}_\tau^2$ [М] | ε_β [М] | $\bar{\sigma}_\tau^2$ [М] | ε_β [М] |
| 2 | 0,65 | 0,033 | 1,63 | 0,109 | 0,01 | 0,001 | 0,04 | 0,001 |
| 4 | 0,83 | 0,044 | 2,04 | 0,141 | 0,01 | 0,001 | 0,06 | 0,002 |
| 6 | 1,08 | 0,061 | 2,52 | 0,174 | 0,02 | 0,002 | 0,08 | 0,003 |

| | | | | | | | | |
|----|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|
| 8 | 1,42 | 0,083 | 3,21 | 0,224 | 0,03 | 0,002 | 0,1 | 0,004 |
| 10 | 1,83 | 0,121 | 3,94 | 0,276 | 0,04 | 0,004 | 0,13 | 0,007 |
| 12 | 2,43 | 0,161 | 5,05 | 0,375 | 0,06 | 0,006 | 0,16 | 0,01 |
| 14 | 3,19 | 0,236 | 6,71 | 0,492 | 0,09 | 0,009 | 0,21 | 0,015 |
| 16 | 4,35 | 0,332 | 8,46 | 0,671 | 0,14 | 0,016 | 0,29 | 0,024 |
| 18 | 5,77 | 0,527 | 11,15 | 0,849 | 0,25 | 0,027 | 0,4 | 0,037 |
| 20 | 8,16 | 0,718 | 14,28 | 1,149 | 0,38 | 0,039 | 0,53 | 0,054 |

По информации, приведенной в таблице 2, сформирован график зависимости ошибки вычисления псевдодальности от соотношения шум/сигнал для НАП (рисунок 6) при обработке (а) на четырех поднесущих частотах и (б) на единой промежуточной частоте. На графиках видно, что до соотношения шум/сигнал, равного 10 дБ, СКО определения псевдодальности увеличивается примерно на 1 дБ. Далее идет стремительное увеличение СКО в связи с высоким уровнем шумов на входе НАП.



а)



б)

Рис. 6. График зависимости среднеквадратического отклонения определения псевдодалности от отношения шум/сигнал для ССЗ: а) с обработкой на четырех поднесущих частотах; б) с обработкой на единой промежуточной частоте; 1 – сигнал ТМВОС(6,1,1/11) с требуемой формой спектра; 2 – сигнал ТМВОС(6,1,1/11)

Заключение и выводы

Современные ЛНС играют ключевую и значимую роль в обеспечении точного позиционирования и синхронизации в различных областях, таких как транспорт, сельское хозяйство, беспилотные системы, военные приложения. С ростом количества потребителей и усложнением задач, предъявляемых к навигационным системам, возрастает потребность в высокоточном и устойчивом к помехам навигационном оборудовании. В выделенной предметной области востребованы ТМВОС-сигналы, которые характеризуются уменьшенным уровнем внеполосного излучения и разработаны для улучшения спектральной эффективности и уменьшения влияния на другие системы. Однако, такие сигналы требуют сложной обработки и оценки их характеристик.

В данной научной статье представлены этапы разработки и охарактеризована сущность методики оценки точности и помехоустойчивости НАП ГНСС при некогерентной обработке мультиплексированных сигналов с требуемой формой спектра, которые обеспечивают ЭМС с другими РЭС.

Согласно полученным результатам, при применении полученных сигналов, целесообразно учитывать незначительное ухудшение показателей помехоустойчивости и точности. Вероятность срыва сигнала с УУВИ для алгоритма на четырех поднесущих частотах составляет $P_c = 40,8 \pm 0,5$ дБ, на единой промежуточной частоте – $P_c = 40,9 \pm 0,5$.

Полученная методика может быть использована при развертывании ЛНС, например, вблизи аэродромов, поскольку позволяет подтвердить ряд преимуществ, характерных для процесса оценки точности и помехоустойчивости НАП ГНСС. К таковым относятся: снижение эксплуатационных рисков, связанных с неправильным позиционированием и навигацией; оптимизация конструкции и протоколов работы навигационной аппаратуры, обеспечивающих ее надежность в реальных условиях; улучшение пользовательского опыта за счет улучшения качества навигационных услуг.

Список источников

1. Брагин А.С. Сравнительный анализ систем глобального и локального позиционирования // Экономика и качество систем связи. 2021. № 3 (21). С. 71-78.

2. Зализнюк А.Н., Флегонтов А.В., Волков А.А. Перспективы развития наземной навигации в Вооруженных Силах Российской Федерации // Военная мысль. 2022. № 9. С. 65-69.
3. Бродский М.С., Звонарев В.В., Хуббиев Р.В., Шерстюк А.В. Компьютерная модель радиоканала системы спутниковой связи и ретрансляции данных при многопозиционной передаче сигнала // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170340>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-10)
4. Брагин А.С. Особенности и характеристики систем глобального и локального позиционирования // 48 Международная конференция «Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом» (Москва, 26–27 октября 2021): тезисы докладов. – М.: Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий, 2021. С. 64-66.
5. Радько В.С., Филоненко В.В., Межуев А.М., Миронов В.А. Способ формирования навигационных сигналов с пониженным уровнем внеполосного излучения // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2024. № 2. С. 26-34.
6. Ярлыков М.С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах. – М.: Радиотехника, 2017. - 416 с.
7. ГОСТ Р 50016-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к ширине полосы радиочастот и внеполосным излучениям радиопередатчиков. Методы измерений и контроля. – М.: Издательство стандартов.1996. - 60 с.

8. Суровцев Р.С., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Передача импульсного сигнала по витку меандровой линии без искажения ближней перекрестной наводкой // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80445>
9. Неровный В.В., Журавлев А.В., Кирюшкин В.В., Филоненко В.В., Радько В.С. Выбор полосы пропускания формирующего фильтра «приподнятый косинус» для навигационных меандровых сигналов // Радиотехника. 2023. № 7. С. 42-49.
10. Неровный В.В., Бабусенко С.И., Журавлев А.В. и др. Радиопередающее устройство с автоматической регулировкой параметров спектра радиосигнала. Патент RU 2795268 С1. Бюл. № 13, 02.05.2023.
11. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – М.: Радиотехника, 2010. - 800 с.
12. Иванов В.Ф., Кошкарлов А.С. Повышение помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС за счет комплексирования с инерциальными навигационными датчиками // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80455>
13. Неровный В.В. Помехоустойчивость мультисистемной аппаратуры потребителей ГНСС: монография. – М.: Научная книга, 2018. - 227 с.
14. Грошев А.В. Стратегия алгоритмического повышения точностных характеристик и информационной надежности инерциально-спутниковых навигационных систем в составе беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102217>

15. Неровный В.В., Миронов В.А., Коратаев П.Д., Пакляченко М.Ю., Неровная Н.А. Модель формирователя DuoVOC сигналов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613775, 15.03.2021.
16. Радько В.С., Цитиридис В.В., Филоненко В.В., Неровный В.В. Способ формирования мультиплексированных сигналов с требуемой формой спектра в локальных навигационных системах // Всероссийская (заочная) научная конференции преподавателей, аспирантов и студентов «Телекоммуникационные технологии: актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров в современных условиях» (Хабаровск, 25-26 декабря 2023). - Хабаровск: Хабаровский институт инфокоммуникаций. 2024. С. 358.
17. ГОСТ 23611-1979. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 1979. - 10 с.
18. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами. – М.: Радио и связь, 2002. - 440 с.
19. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2001. - 315 с.
20. Радько В.С. Оценка точности навигационной аппаратуры потребителей в некогерентном режиме приема мультиплексированных ТМВОС сигналов с уменьшенным уровнем внеполосного излучения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615763, 13.03.2024.

References

1. Bragin A.S. Comparative analysis of global and local positioning systems. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*. 2021. No. 3 (21). P. 71-78. (In Russ.)

2. Zaliznyuk A.N., Flegontov A.V., Volkov A.A. The development prospects of ground navigation in the rf armed forces. *Voennaya mysl'*. 2022. No. 9. P. 65-69. (In Russ.)
3. Brodskii M.S., Zvonarev V.V., Khubbiyev R.V., Sherstyuk A.V. Computer model of the satellite communication and data relay system radio channel during multiposition signal transmission. *Trudy MAI*. 2022. No. 127. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170340>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-10)
4. Bragin A.S. Features and characteristics of global and local positioning systems. 48 *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Mobil'nyi biznes: perspektivy razvitiya i realizatsii sistem radiosvyazi v Rossii i za rubezhom»* (Moscow, October 2021): tezisyy dokladov. Moscow: Natsional'nyi institut radio i infokommunikatsionnykh tekhnologii, 2021. P. 64-66.
5. Rad'ko V.S., Filonenko V.V., Mezhuev A.M., Mironov V.A. Method for generating navigation signals that meet the requirements of out-of-band radiation. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii*. 2024. No. 2. P. 26-34. (In Russ.)
6. Yarlykov M.S. *Meandrovyye shumopodobnyye signaly (BOC-signaly) i ikh raznovidnosti v sputnikovykh radionavigatsionnykh sistemakh* (Meander noise-like signals (BOC signals) and their varieties in satellite radio navigation systems). Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017. 416 p.
7. *GOST R 50016-92. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Trebovaniya k shirine polosy radiochastot i vnepolosnym izlucheniyyam radioperedatchikov. Metody izmerenii i kontrolya* (GOST R 50016-92. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Requirements for radio frequency bandwidth and out-of-band emissions from radio transmitters). Moscow, Standarty, 1996. 60 p.

8. Surovtsev R.S., Zabolotskii A.M., Gazizov T.R. Pulse signal transmission in the meander line without distortions by near-end crosstalk. *Trudy MAI*. 2017. No. 93. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80445>
9. Nerovnyi V.V., Zhuravlev A.V., Kiryushkin V.V., Filonenko V.V., Rad'ko V.S. Selection of the bandwidth of the "raised cosine" shaping filter for navigation meander signals. *Radiotekhnika*. 2023. No.7. P. 42-49. (In Russ.).
10. Nerovnyi V.V., Babusenko S.I., Zhuravlev A.V. ets. *Radioperedayushchee ustroystvo s avtomaticheskoi regulirovkoj parametrov spektra radiosignala. Patent RU 2795268 C1*. (Radio transmitting device with automatic adjustment of radio signal spectrum parameters. Patent RU 2795268 C1). No 13, 02.05.2023.
11. Perov A.I., Kharisov V.N. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of construction and operation). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p.
12. Ivanov V.F., Koshkarov A.S. Improving the noise immunity of GLONASS consumer navigation equipment by combining with inertial navigation sensors. *Trudy MAI*. 2017. No. 93. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80455>
13. Nerovnyi V.V. *Pomekhoustoichivost' mul'tisistemnoi apparatury potrebitelei GNSS: monografiya* (Noise immunity of multi-system equipment of GNSS consumers: monograph). Moscow: Nauchnaya kniga Publ., 2018. 227 p.
14. Groshev A.V. Algorithmic improvement strategy for accuracy characteristics and information reliability of inertial satellite navigation systems withing unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2019. No. 104. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102217>

15. Nerovnyi V.V., Mironov V.A., Korataev P.D. Paklyachenko M.Yu., Nerovnaya N.A. *Model' formirovatelya DuoBOC signalov. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2021613775* (Model of the DuoBUS signal generator. Certificate of state registration of a computer program No. 2021613775), 15.03.2021.
16. Rad'ko V.S., Tsitiridis V.V., Filonenko V.V., Nerovnyi V.V. *Method for forming multiplexed signals with the required spectrum shape in local navigation systems Vserossiiskaya (zaochnaya) nauchnaya konferentsii prepodavatelei, aspirantov i studentov «Telekommunikatsionnye tekhnologii: aktualizatsiya i reshenie problem podgotovki vysokokvalifitsirovannykh kadrov v sovremennykh usloviyakh»* (Khabarovsk, December 2023). Khabarovsk: Khabarovskii institut infokommunikatsii Publ., 2024. P. 358.
17. *GOST 23611-1979. Sovmestimost' radioelektronnykh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya.* (GOST 23611-1979. Electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment. Terms and definitions). Moscow: Standartinform, 1979. 10 p.
18. Makoveeva M.M., Shinakov Yu.S. *Sistemy svyazi s podvizhnymi ob'ektami.* (Communication systems with moving objects). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 2002. 440 p.
19. Ventsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei (Probability theory)* – M.: Vysshaya shkola Publ., 2001. - 315 s.
20. Rad'ko V.S. *Otsenka tochnosti navigatsionnoi apparatury potrebitelei v nekogerentnom rezhime priema mul'tipleksirovannykh TMVOS signalov s umen'shennym urovnem vnepolosnogo izlucheniya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2024615763* (Assessment of the accuracy of consumer navigation equipment in the incoherent mode of receiving multiplexed TMBOS signals

with a reduced level of out-of-band radiation. Certificate of state registration of a computer program no. 2024615763), 13.03.2024.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024

Одобрена после рецензирования 28.09.2024

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 18.09.2024; approved after reviewing on 28.09.2024; accepted for publication on 25.02.2025