

УДК 654.16

DOI 10.51955/2312-1327_2025_4_61

ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ В РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

*Алексей Александрович Шалаев,
orcid.org/0000-0002-8490-5143,
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
alexsnow9999@gmail.com*

Аннотация. Важнейшим направлением совершенствования авиационных радионавигационных систем является повышение точности определения местоположения воздушного судна. Одним из факторов, влияющих на точность радионавигационных систем, является соотношение сигнал/шум, исследованию величины и динамики изменения которого и посвящена данная работа. Оценка соотношения сигнал/шум теоретически позволит повысить точность определения местоположения воздушного судна путём применения алгоритмов адаптивной фильтрации. В статье приведены результаты теоретических исследований отношения сигнал/шум и факторов, влияющих на его абсолютное значение. Представлена экспериментальная установка для мониторинга сигналов средств аэронавигационного обеспечения полетов. Для оценки изменения соотношения сигнал/шум приведены результаты мониторинга и исследования сигнала азимутального радиомаяка DVOR Иркутского международного аэропорта и соотношения сигнал/шум для различных спутников ГНСС на основе хронологической записи данных в течение суток.

Ключевые слова: мониторинг радиоэфира, радиотехническая разведка, анализ сигналов, обнаружение помех, когнитивное радио, радиоконтроль.

ASSESSMENT OF ACTUAL SIGNAL/NOISE RATIO VALUES IN RADIONAVIGATION SYSTEMS BASED ON EXPERIMENTAL DATA

*Alexey A. Shalaev,
orcid.org/0000-0002-8490-5143,
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov street
Irkutsk, 664047, Russia
alexsnow9999@gmail.com*

Abstract. One of the most important ways to improve aviation radio navigation systems is to increase the accuracy of aircraft position-fixing. Among the factors affecting the accuracy of radio navigation systems is the signal-to-noise ratio, the magnitude and dynamics of which are the subject of this work. The assessment of the signal-to-noise ratio will theoretically improve the accuracy of aircraft position-fixing by applying adaptive filtering algorithms. The article presents the results of theoretical studies of the signal-to-noise ratio and the factors influencing its absolute value. An experimental installation for monitoring signals from air navigation support facilities is presented. To assess the changes in the signal-to-noise ratio, the results of recording and studying the signal of the

Doppler VHF omnidirectional radio range (DVOR) at Irkutsk International Airport and the daily log of the signal-to-noise ratio for various GNSS satellites are presented.

Key words: spectrum monitoring, radio intelligence, signal analyzing, interference detection, cognitive radio, radio monitoring.

Введение

В основе безопасности и эффективности современного воздушного транспорта лежит процесс управления воздушным движением (УВД). Именно УВД обеспечивает регулярность осуществления авиаперевозок, а также предотвращает взаимные столкновения воздушных судов (ВС) на всех этапах полёта. При этом основными техническими средствами, при помощи которых и реализуется УВД, служат средства радионавигации, радиосвязи и радиолокации [Использование модуляции Lora..., 2023]. Именно они обеспечивают диспетчерскую службу и экипаж информацией о местоположении ВС на всех этапах полёта, а также возможностью обмена информацией между бортом и землёй. К особенно важным навигационным системам относятся системы посадки ввиду того, что посадка является одним из наиболее сложных этапов полёта любого воздушного судна. Именно эти системы позволяют самолётам безопасно приземляться на аэродромы даже в сложных метеоусловиях, обеспечивая тем самым ещё и регулярность полётов. Их развитие и внедрение является одной из важнейших задач, обозначенных в глобальном аэронавигационном плане [GANP Portal, s.a.].

Ввиду всего вышеизложенного, обеспечение бесперебойной работы средств радионавигации является одним из приоритетных направлений деятельности служб радиотехнического обеспечения полётов (РТОП). Для своевременного обнаружения отклонений в работе радионавигационных систем применяются радиомониторинг средств РТОП – измерение параметров сигнала, передаваемого системой при помощи специальных приёмных устройств. Так, для оценки работоспособности глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в районе аэропортов применяются локальные контрольные станции мониторинга (ЛКСМ) – системы мониторинга, регистрации и хранения состояния навигационного обслуживания ГНСС в районе аэродрома. Наличие ЛКСМ является обязательным условием для допуска к полетам с использованием GNSS для допущенных операций в районе аэродрома¹.

Важным параметром, который влияет на производительность и качество средств РТОП, является отношение сигнал/шум (С/Ш). Одним из возможных способов оценки точностных характеристик радионавигационных средств является определение отношения сигнал/шум для их сигналов при помощи контрольных станций (станций радиомониторинга). При этом подобный принцип применим в различных сферах народного хозяйства, использующих беспроводные линии передачи информации. Их разработка и внедрение являются одним из важнейших направлений в развитии систем радиоконтроля в

¹ Приказ Министерства транспорта РФ №297 от 20.10.2014 г. об утверждении федеральных авиационных правил «Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь в гражданской авиации», п. 2.23.

России². Надежность и точность радионавигационных систем (РНС) зависят от их помехозащищенности по отношению к внешним и внутренним, случайным и регулярным помехам. От правильного решения задачи обеспечения помехоустойчивости РНС зависит их нормальное функционирование в процессе эксплуатации. Источниками помех могут быть сети электропитания, передающая радиоэлектронная аппаратура, разряды статического электричества и атмосферные явления. Помехи, представляющие собой непредусмотренный при проектировании РНС сигнал, способный нарушить ее функционирование, приводят к искажению аналоговой или дискретной информации в РНС во время ее преобразования, обработки или передачи.

Ввиду того, что в реальных условиях функционирования средств РТОП характеристики интенсивности шумов и помех могут отличаться от расчетных, так как возникновение помех – процесс трудно прогнозируемый, а их источниками может служить широкий ряд различных электрических устройств, научный и практический интерес вызывает оценка фактических значений отношения сигнал/шум в радионавигационных системах методами полунатурного моделирования [Межетов и др., 2022]. В работе предлагается использовать данный подход к средствам аэронавигационного обеспечения полетов, что позволит вести непрерывное наблюдение за характеристиками передающих устройств радионавигационных систем, а также осуществлять контроль помеховой обстановки, и, при необходимости, изменять мощность сигнала передатчика или применять адаптивные фильтры, поддерживая необходимый для работы системы уровень соотношения сигнал/шум, что является актуальной научно-прикладной задачей. На текущем этапе развития радиомониторинга оценка помехой обстановки в целом, и соотношения сигнал/шум в частности, в большинстве случаев производится вручную при помощи спектроанализаторов периодически, что не позволяет радиосистемам оперативно подстраиваться под электромагнитную обстановку.

Цель статьи – создание экспериментальной установки на основе современных средств радиомониторинга для оценки фактических значений отношения сигнал/шум в радионавигационных системах методами полунатурного моделирования.

Теоретические исследования. Материалы и методы

С/Ш можно рассчитать с помощью различных формул в зависимости от того, как измеряются и определяются уровни сигнала и шума. Одним из определений отношения сигнал/шум является отношение мощности сигнала (значимого входного сигнала) к мощности фонового шума (бессмысленного или нежелательного входного сигнала):

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}, \quad (1)$$

² КОНЦЕПЦИЯ развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года, №17-42-06 от 04.07.2017 г., с. 4.

где P_{signal} – средняя мощность сигнала, P_{noise} – средняя мощность шума. Мощность сигнала и шума должна измеряться в одних и тех же или эквивалентных точках системы и в пределах одной и той же полосы пропускания системы.

Если полезный сигнал и шум представлены в виде реализаций случайных процессов $s(t)$ и $n(t)$ соответственно, то отношение сигнал/шум можно представить в виде:

$$SNR = \frac{M[s^2(t)]}{M[n^2(t)]}, \quad (1)$$

где $M[\]$ – символ математического ожидания случайной величины.

Следует отметить, что сигнал и шум должны иметь одинаковые единицы измерения, например, В², Вт, дБ и т.д., при этом ОСШ является безразмерной величиной.

В ряде работ приводятся выражения для расчета С/Ш применительно к конкретным системам. Основные навигационные параметры, определяемые в навигационных системах на основе спутниковых технологий, дальность и скорость движения ВС. Соответствующими им радионавигационными параметрами являются задержка времени прихода сигнала τ и доплеровское смещение частоты f_d [ГЛОНАСС..., 2010; Ерохин, 2019, с. 219-220]. Для высокоточного определения координат и параметров движения ВС необходимо обеспечить высокую точность измерения радионавигационных параметров. Из статистической теории оценивания параметров сигнала [Перов, 2003; Тихонов и др., 1991] известно, что минимальные среднеквадратические ошибки σ_τ и σ_{fd} оценки задержки и доплеровского смещения частоты при приеме сигнала $s(t)$ на фоне гауссовского шума с односторонней спектральной плотностью N_0 при раздельном их измерении определяются соотношениями:

$$\sigma_\tau = 1 / (\sqrt{2q\beta}) ; \sigma_{fd} = 1 / (\sqrt{2q\alpha}), \quad (2)$$

где $q = E / N_0$ – отношение сигнал/шум; $E = \int_0^T s^2(t)dt$ – энергия сигнала за время

наблюдения T [B²C] ; $\alpha = \left[\frac{1}{E} \int_0^T (2\pi t)^2 s^2(t)dt \right]^{1/2}$ – эффективная длительность

сигнала [C]; $\beta = \left[\frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |\dot{S}(f)|df \right]^{1/2}$ – эффективная ширина спектра сигнала

[Гц]; $\dot{S}(f) = \int_0^T s(t)e^{-j2\pi ft}df$ – спектральная плотность сигнала [B²/Гц].

Энергетические характеристики условий приема сигналов в приемниках спутниковой навигации (ПСН) характеризуются параметром $q_{c/n_0} = P_{\text{вх}} / N_0$, представляющим собой отношение мощности полезного сигнала на входе высокочастотной части приемника $P_{\text{вх}}$ к спектральной плотности (односторонней) внутреннего шума приемника N_0 . Мощность радиосигнала, принимаемого потребителем от НС «ГЛОНАСС-М», на выходе приемной линейно поляризованной антенны с коэффициентом усиления +3 дБ и при угле места 5^0 составляет не менее -161 дБВт [ГЛОНАСС..., 2010]. В [ГЛОНАСС..., 2010] приведены рассчитанные значения $N_0 = -201,5$ дБВт/Гц; $\tilde{q}_{c/n_0} = 10\log(q_{c/n_0}) = -161 + 201,5 = 40,5$ дБГц.

В ПСН энергетические характеристики условий приема сигналов характеризуют отношением [ГЛОНАСС..., 2010]:

$$q_{c/n_0} = P_c / N_0 = A^2 / 2N_0 = E / (N_0 T), \quad (3)$$

определяющим отношение мощности сигнала к мощности внутреннего шума.

Известно, что в основе формирования дискриминаторов различных типов лежат синфазные I и квадратурные Q компоненты, которые формируются на выходах соответствующих корреляторов. Дисперсии флуктуационных составляющих синфазной и квадратурной компонент корреляторов когерентного приемника равны [ГЛОНАСС..., 2010]:

$$D_{Q_\phi} = D_{I_\phi} = A^2 T / N_0 = 2q_{c/n_0} T. \quad (4)$$

Несмотря на то, что информация для различных радиотехнических систем может быть заключена в разных параметрах радиосигнала, механизм разрушения информации под воздействием шумовых составляющих во всех системах схож. Следовательно, полученные результаты анализа зависимости точности оценки времени задержки сигнала от отношения сигнал/шум в ГНСС можно спроецировать к задаче исследования энергетических и точностных характеристик к другим радиотехническим системам.

При реализации в ПСН оптимального фильтра второго порядка для следящей системы за задержкой огибающей сигнала ошибки оценки задержки огибающей ε_τ сигнала приводят к снижению эквивалентного отношения сигнал/шум q_{c/n_0} , которое определяет дисперсию шума наблюдений:

$$z(t) = S(\lambda, t) + n(t), \quad (5)$$

где $S(\lambda, t)$ – полезный сигнал, $\lambda(t)$ – фильтруемый процесс; $n(t)$ – белый гауссовский шум (БГШ) с корреляционной функцией $M[n(t)n^T(t + \tau)] = \frac{N_0}{2} \delta(\tau)$.

Выражение, характеризующее зависимость дисперсии флуктуационной ошибки оценки задержки сигнала от отношения сигнал/шум имеет вид [ГЛОНАСС..., 2010]:

$$D_{\phi, \text{ош}\tau} = \frac{\Delta f_{\text{ССЗ}} \tau_s^2}{2q_{c/n_0}} \left(1 + \frac{2}{q_{c/n_0}} \right), \quad (6)$$

где $\Delta f_{\text{ССЗ}}$ – полоса пропускания системы слежения за задержкой сигнала (ССЗ), $\tau_s = 1/511$ мс – длительность элементарного символа дальномерного кода.

На рисунках 1.а и 1.б приведены график зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки оценки времени задержки для ГНСС (рисунок 1.а) и азимута для DVOR (рисунок 1.б) от отношения сигнал/шум, соответственно.

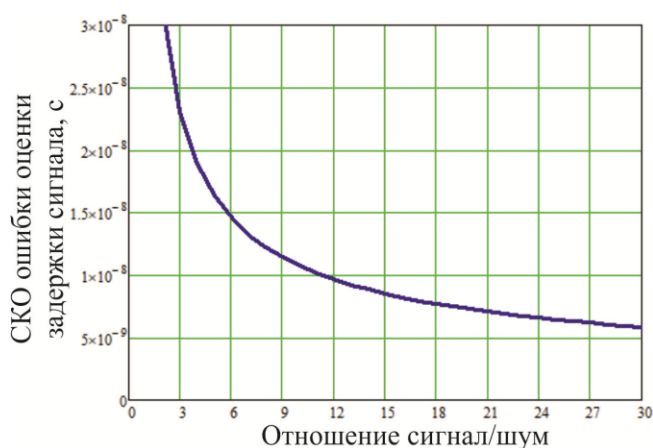


Рисунок 1.а – СКО ошибка оценки времени задержки сигнала в ГНСС

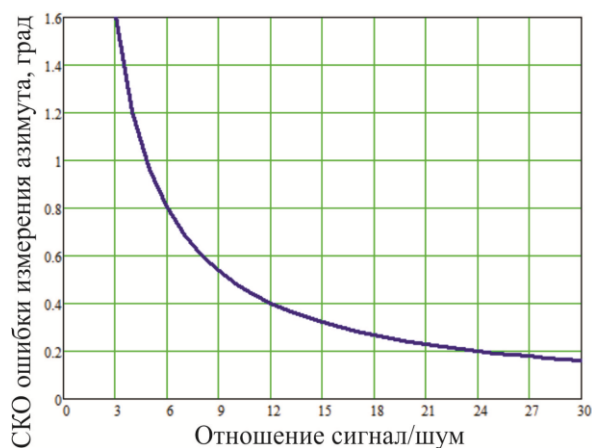


Рисунок 1.б – СКО ошибка оценки азимута в DVOR

Таким образом, отношение сигнал/шум напрямую влияет на погрешность оценки навигационных параметров и, как следствие, на точность определения местоположения воздушного судна при помощи радионавигационных систем.

Описание экспериментальной установки

В качестве аппаратной базы для реализации систем контроля радиопередающих устройств могут быть использованы программно-определяемые радиосистемы (SDR, англ. Software defined radio) совместно с персональными компьютерами, либо специализированные модули, например, применяемые для мониторинга глобальных навигационных спутниковых систем [Арефьев и др., 2022; Арефьев и др., 2024; Ерохин, 2016].

Системы на основе SDR-технологии – это радиосистемы, основанные на квадратурных передатчиках и приёмниках, управляемых при помощи программы через компьютер. Для мониторинга радиосигналов от наземных радионавигационных маяков с использованием SDR и исследования реальной помеховой обстановки была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 2.

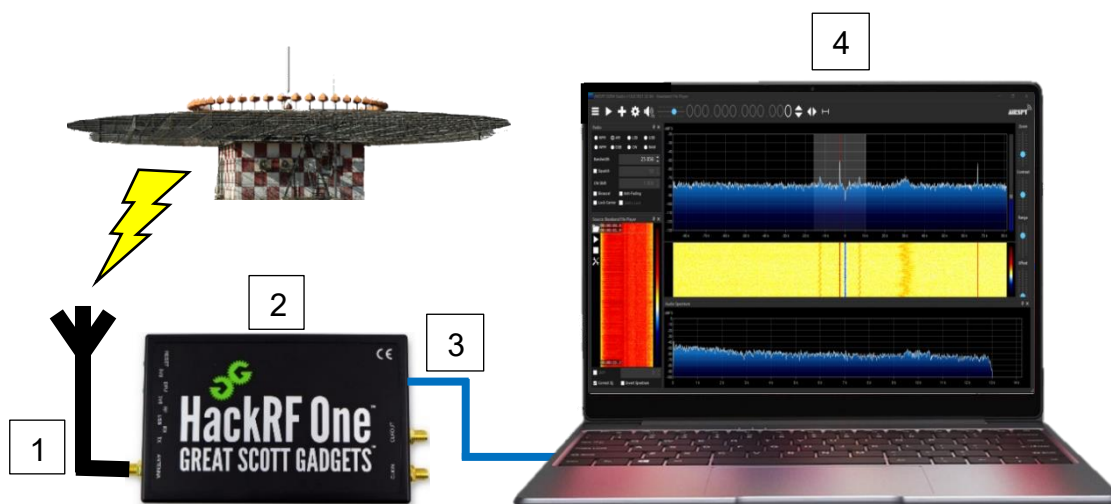


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для определения соотношения сигнал/шум азимутального радиомаяка DVOR на основе SDR-платформы HackRF (1 – пассивная широкодиапазонная антенна, 2 – HackRF, 3 – USB кабель с экранированием и ферритовым кольцом, 4 – компьютер с программной средой SDRSharp)

Для анализа работы радионавигационных систем (РНС) при помощи SDR можно применять программу для радиомониторинга SDRSharp или программы, собранные в среде GNU-radio. На рисунке 3 приведён интерфейс программы SDRSharp.

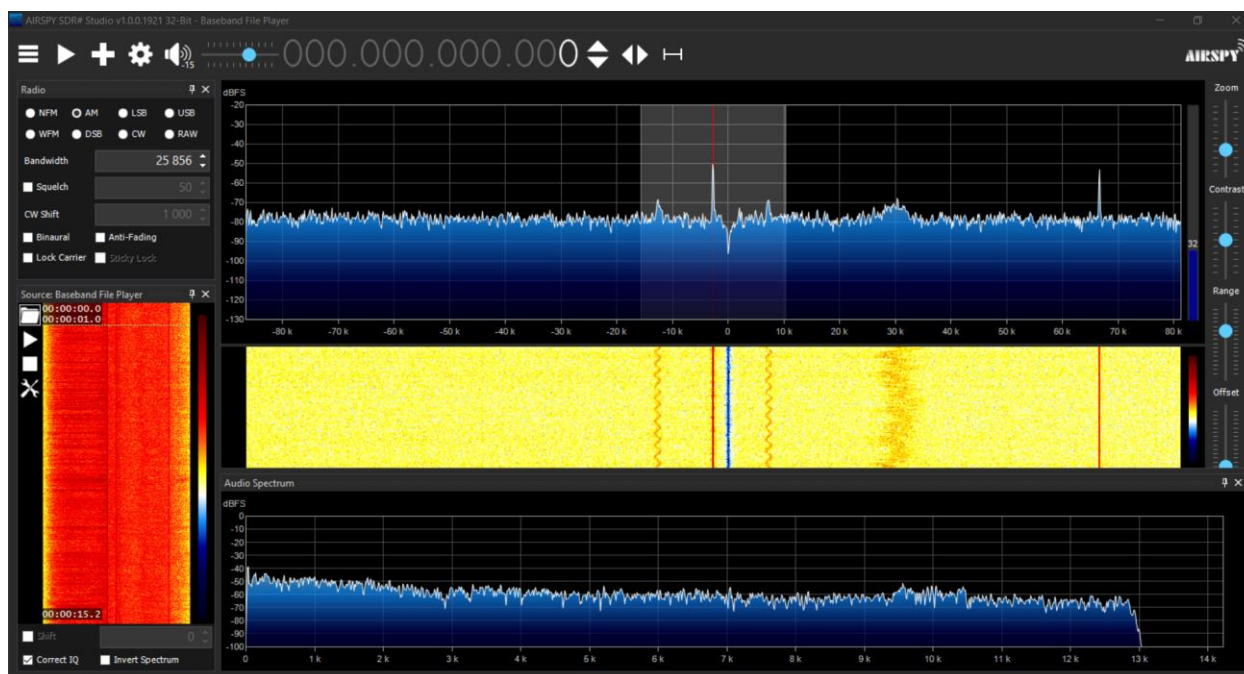


Рисунок 3 – Интерфейс программы SDRSharp, воспроизводится запись сигнала азимутального радиомаяка DVOR Иркутского аэропорта

Данная программа совместно с HackRF или RTL-SDR позволяет решать комплекс нижеперечисленных задач:

- визуальный анализ спектра;
- реализация основных способов демодуляции к выбранной области спектра с последующим воспроизведением результата демодуляции;
- оценка мощности принимаемого сигнала по соотношению сигнал/шум;
- постобработка принимаемых сигналов на основе применения дополнительных плагинов, а также выполнение записи сигнала в WAV-файл для дальнейшего анализа.

Аналогичный функционал предоставляет среда для работы с SDR GNU-radio, её интерфейс приведён на рисунке 4.

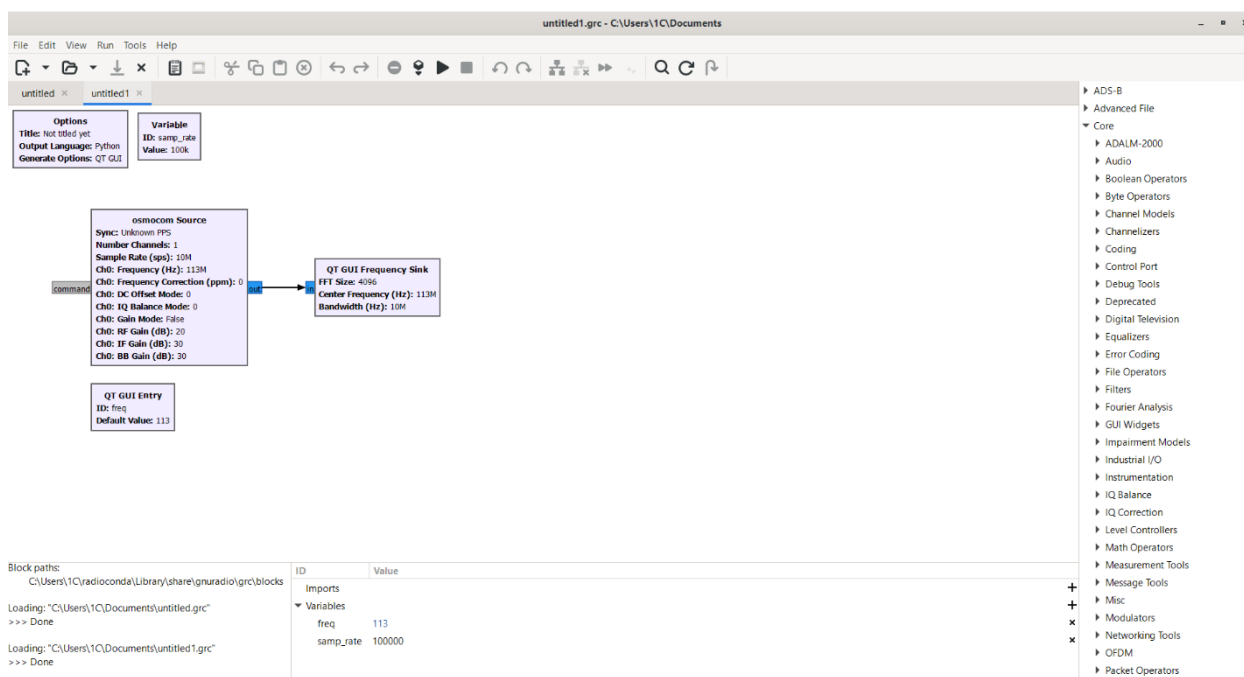


Рисунок 4 – Интерфейс среды для работы с SDR GNU-radio, на рабочем поле представлен листинг диаграммы для построения спектра с указываемой центральной частотой и шириной в 10МГц

В отличие от SDRSharp, данная среда позволяет создавать программы для SDR самостоятельно, в виде блок-диаграмм из отдельных функциональных блоков. GNU-radio может служить базой для создания автоматизированных систем мониторинга, однако также может применяться для создания узкоспециализированных станций не автоматического мониторинга [Межетов и др., 2023]. Также данная программная среда позволяет работать не только на приём, но и на передачу сигналов, если это позволяет аппаратная часть системы.

В качестве основы для мониторинга ГНСС можно использовать специальные модули, работающие совместно с ПЭВМ, например, GeoS-5M [Арефьев и др., 2023а; Арефьев и др., 2023б; Росточкина и др., 2025]. Также данная программная среда позволяет работать не только на приём, но и на передачу.

Схема экспериментальной установки для мониторинга соотношения сигнал/шум группировок GPS и ГЛОНАСС приведена на рисунке 5.

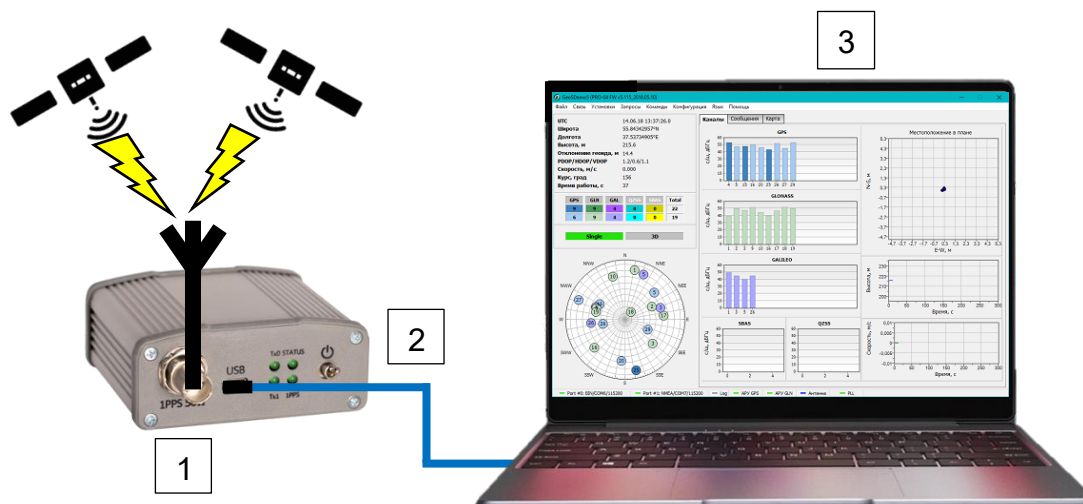


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки для определения соотношения сигнал/шум ГНСС на основе модуля GeoS-5M (1 – модуль GeoS-5M с антенной, 2 – USB кабель с экранированием и ферритовым кольцом, 3 – компьютер с программной средой GeoSDemo5)

Данный модуль совместно с программой GeosDemo5 позволяет осуществлять наблюдение за соотношением сигнал/шум (SNR) для видимых спутников, отображать выходную навигационную информацию приёмника и осуществлять её запись в файлы. Пример файла, выводящего соотношение сигнал/шум для наблюдаемых спутников, приведён на рисунке 6.

№	НС	SNR	№	НС	SNR	№	НС	SNR	№
8,000000	35,000000	10,000000	50,000000	11,000000	37,000000	1			
8,000000	35,000000	10,000000	50,000000	11,000000	37,000000	1			
8,000000	35,000000	10,000000	50,000000	11,000000	37,000000	1			
8,000000	35,000000	10,000000	50,000000	11,000000	37,000000	1			
8,000000	35,000000	10,000000	50,000000	11,000000	37,000000	1			

Рисунок 6 – Пример файла, отображающего SNR для наблюдаемых спутников. В строке содержится SNR для наблюдаемых спутников за одну секунду измерений

Результаты экспериментальных исследований по радиомониторингу навигационных систем

Для оценки изменения соотношения сигнал/шум была произведена запись сигнала с азимутального радиомаяка DVOR Иркутского международного аэропорта при помощи RTL-SDR и программы SDRSharp. При этом запись

производилась с разной длительностью выборки, что влияет на детализацию спектра. Результаты оценки представлены на рисунках 7.а и 7.б.

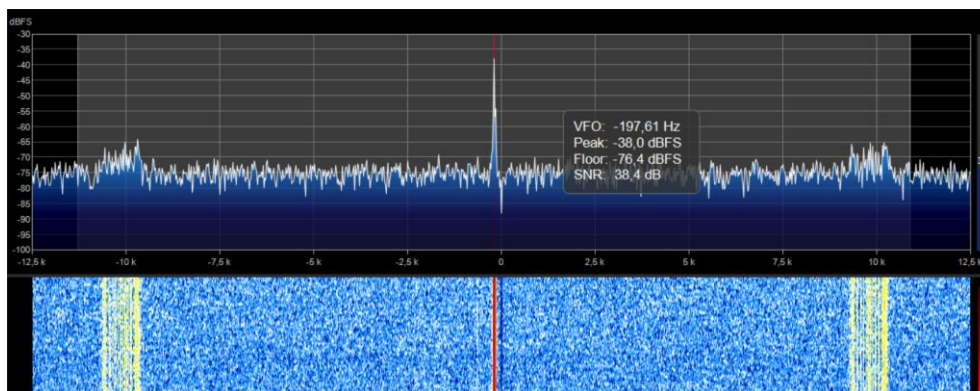


Рисунок 7.а – Сигнал DVOR с длинной выборкой (частота дискретизации 3,2МГц). Соотношение сигнал/шум 38,4 дБ, в процессе записи длительностью 3 минуты изменялось в пределах 36,4-38,7 дБ

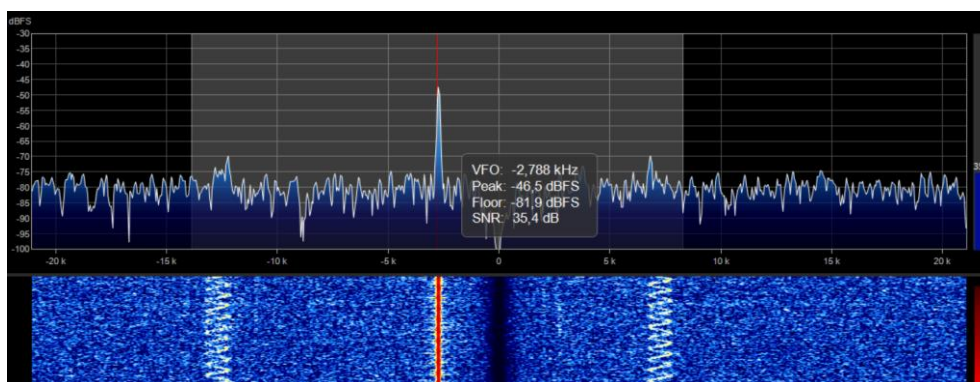


Рисунок 7.б – Сигнал DVOR с короткой выборкой (частота дискретизации 0,25 МГц). Соотношение сигнал/шум 35,4 дБ, в процессе записи длительностью 3 минуты изменялось в пределах 34,8-37,2 дБ

Непротяжённая по времени запись связана с практически неизменными условиями распространения радиоволн: уровни шума в УКВ диапазоне слабо изменяются во времени, сам источник сигнала и приёмник неподвижны. Ввиду этого, для оценки малых флуктуаций значения сигнал/шум было решено ограничиться записью сигнала длительностью не более 3 минут.

Для оценки соотношения сигнал/шум в системах ГНСС был произведён непрерывный мониторинг сигналов навигационных спутников в течение суток с формированием отчёта по соотношению сигнал/шум для каждого из каналов радиомодуля ежесекундно. Такой подход связан с тем, что уровень сигнала со спутников может существенно изменяться в зависимости от их положения на орбите и состояния ионосферы. Более того, сравнительно слабые по мощности сигналы ГНСС сильнее подвержены помехам, чем более мощные сигналы с наземных систем [Ерохин, 2018].

По результатам мониторинга сигналов спутников ГНСС при помощи среды LabVIEW были построены графики изменения соотношений сигнал/шум во времени, которые представлены на рисунках 8.а, 8.б, 8.в, и 8.г.

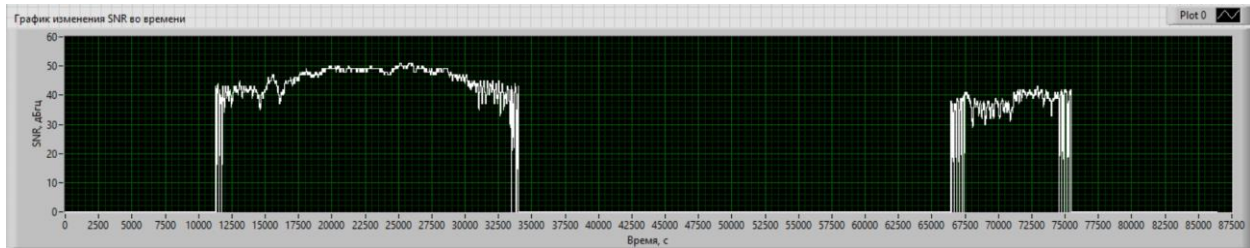


Рисунок 8.а – Изменение SNR во времени спутника №29

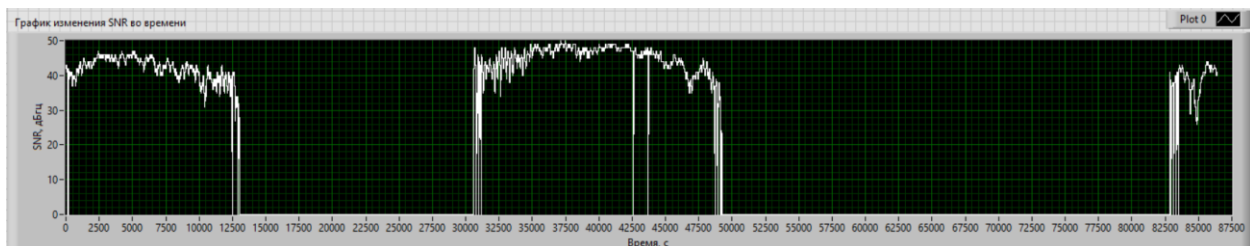


Рисунок 8.б – Изменение SNR во времени спутника №27

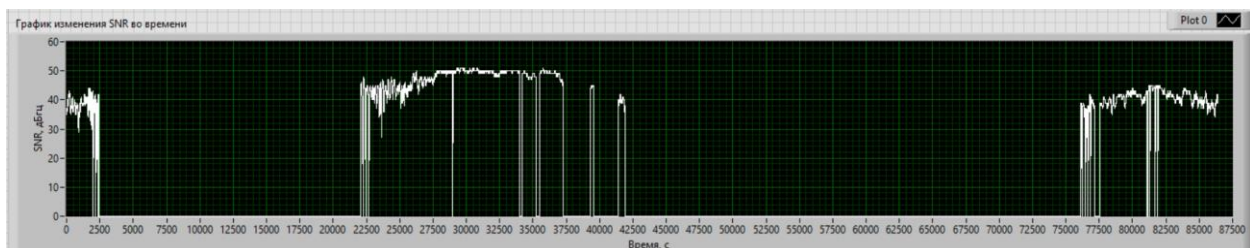


Рисунок 8.в – Изменение SNR во времени спутника №21

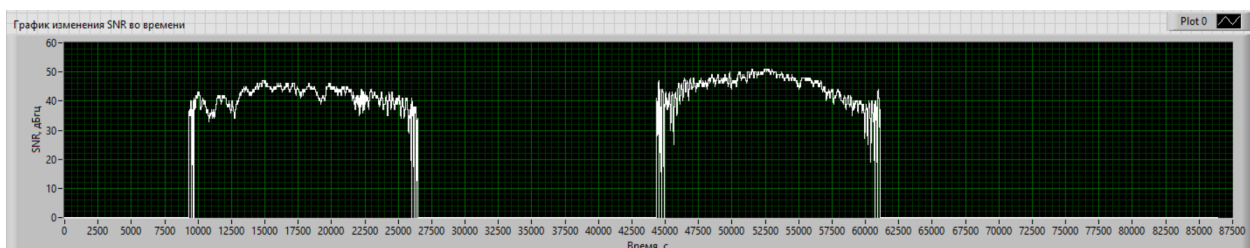


Рисунок 8.г – Изменение SNR во времени спутника №26

Анализируя внешний вид графиков, можно сделать вывод о том, что соотношение сигнал/шум в системах ГНСС изменяется во времени значительно сильнее, чем в наземных радионавигационных системах УКВ диапазона. Наиболее сильные флуктуации наблюдаются при нахождении спутника на границах зоны видимости, что предположительно связано с прохождением угла отсечки спутника. Провалы SNR в зонах видимости спутника,

предположительно, связаны с воздействием на приёмник какой-либо помехи от других радиоэлектронных устройств.

Дискуссия

Опираясь на проведённое исследование, можно сделать вывод, что соотношение сигнал/шум для ГНСС изменяется в процессе работы существенно сильнее, чем в наземных системах радионавигации. А, следовательно, соотношение сигнал/шум является хорошим критерием оценки точности спутниковых систем навигации, но мало информативным для систем навигации наземного размещения. При этом, теоретически, выполняя непрерывный радиомониторинг SNR для радионавигационных систем, можно формировать какой-либо управляющий сигнал для источников или потребителей навигационной информации с целью повышения точности данных РНС путём учёта изменения соотношения сигнал/шум. Например, управлять мощностью излучаемого сигнала радиопередатчика, а также применять адаптивную фильтрацию в приёмном тракте РНС. Кроме того, по результатам радиомониторинга точностных характеристик РНС в реальных условиях эксплуатации могут быть сформулированы рекомендации разработчикам таких систем по оптимизации их параметров для повышения точности навигационных определений.

Для осуществления радиомониторинга наиболее перспективной аппаратной платформой является программно-определяемое радио, ввиду его универсальности и наличия программных средств, позволяющих автоматизировать процесс мониторинга. Наиболее эффективный способ использования средств радиомониторинга и оценки соотношения сигнал/шум подразумевает их применение в составе приёмника потребителя радионавигационной информации, поскольку непрерывная оценка уровня помех в радиоканале позволит применять алгоритмы оптимальной фильтрации, при этом технически, при современном уровне развития SDR систем, такое дополнение может быть реализовано в виде программы, без изменения аппаратной части. При наличии же канала обратной связи от потребителя к источнику радионавигационной информации возможно формировать сигнал управления мощностью передающей части РНС, что позволит более оптимально использовать энергию передатчика и бороться с воздействием помех.

Заключение

Представленные в работе результаты теоретических исследований показали, что соотношение сигнал/шум напрямую влияет на точность определения местоположения воздушного судна при помощи радионавигационных систем. Ввиду того, что в реальных условиях функционирования средств РТОП характеристики интенсивности шумов и помех могут отличаться от расчетных, научный и практический интерес вызывает оценка фактических значений отношения сигнал/шум в радионавигационных системах методами полунатурного моделирования.

В статье представлены результаты разработки программно-аппаратного комплекса на основе современных средств радиомониторинга для экспериментальной оценки фактических значений отношения сигнал/шум в радионавигационных системах методами полунатурного моделирования. Анализ результатов исследований показывает, что соотношение сигнал/шум ГНСС-приемника изменяется в процессе работы существенно сильнее, чем в наземных системах радионавигации, работающих в УКВ-диапазоне. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых перспективных образцов средств спутниковой и радиомаячной систем навигации и модернизации существующих. Обобщение полученных результатов может быть полезно при усовершенствовании и других средств РТОП, например, радиосвязи или систем вещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В).

Библиографический список

- Арефьев Р. О.* Исследование помехоустойчивости мультисистемного GNSS приемника / Р. О. Арефьев, О. Н. Скрыпник, М. А. Межетов // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык.* 2023а. № 2. С. 28-43. DOI 10.51955/2312-1327_2023_2_28. EDN WNHEEA.
- Арефьев Р. О.* Исследование фактических точностных характеристик приемника спутниковой навигации БПЛА на основе натурного эксперимента / Р. О. Арефьев, В. В. Ерохин, В. А. Караченцев // *Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия конструкторского бюро "Туполев", 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа, Иркутск, 13–14 октября 2022 года. Том 2.* Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технический университет гражданской авиации", 2022. С. 8-14. EDN NKMTQZ.
- Арефьев Р. О.* Методика экспериментальной оценки точности навигационного комплекса DJI MAVIC 2 ZOOM / Р. О. Арефьев, О. Н. Скрыпник, Н. Г. Арефьева // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык.* 2024. № 4. С. 127-139. DOI 10.51955/2312-1327_2024_4_127. EDN TJUDEL.
- Арефьев Р. О.* Программный комплекс определения координат потребителя по спутниковым системам навигации на основе SDR технологий / Р. О. Арефьев, В. Е. Карелин // *Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации : Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации, Иркутск, 12–13 октября 2023 года.* Иркутск: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2023б. С. 7-18. EDN QENIAA.
- ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
- Ерохин В. В.* Оптимизация навигационного обеспечения воздушных судов при свободной маршрутизации полетов: специальность 05.22.13 "Навигация и управление воздушным движением": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ерохин Вячеслав Владимирович, 2019. 287 с. EDN BZSGAB.
- Ерохин В. В.* Управление траекторией летательного аппарата при полете по заданному маршруту на основе глобальной навигационной спутниковой системы / В. В. Ерохин // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника.* 2018. № 3. С. 49-56. EDN YCKLYT.
- Ерохин В. В.* Экспериментальная установка для исследования приемников спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS на основе программно-аппаратного комплекса national instruments // *Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества : Сборник*

тезисов докладов участников Международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию Университета, Москва, 18–20 мая 2016 года. М.: Академия имени Н.Е. Жуковского, 2016. С. 188-189. EDN ХВАОХХ.

Использование модуляции LoRa в средствах радиосвязи, навигации и наблюдения для решения задач управления воздушным движением / М. А. Межетов, Б. В. Лежанкин, А. И. Тихова, У. С. Вахрушева // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2023. № 1. С. 77-97. DOI 10.51955/2312-1327_2023_1_77. EDN SHMSTI.

Межетов М. А. Алгоритм обнаружения внеполосных излучений для задач мониторинга частотного ресурса в системах когнитивного радио / М. А. Межетов, А. А. Шалаев // *Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации : Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации*, Иркутск, 12–13 октября 2023 года. – Иркутск: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2023. – С. 80-85. – EDN HESBLK.

Межетов М. А. Реализация алгоритма распознавания сигналов в системе мониторинга авиационных линий связи / М. А. Межетов, А. А. Шалаев // *Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации : Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия конструкторского бюро "Туполев", 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа*, Иркутск, 13–14 октября 2022 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технический университет гражданской авиации", 2022. С. 71-79. EDN WVIACD.

Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. 400 с.

Ростокина Е. А. Статистический анализ погрешностей определения координат беспилотного летательного аппарата по экспериментальным данным приёмников спутниковой навигации / Е. А. Ростокина, Р. О. Арефьев, В. В. Ерохин // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2025. № 1(57). С. 13-24. DOI 10.24412/2221-2574-2025-1-13-24. EDN JVMHRR.

Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.

GANP Portal [официальный сайт the Global Air Navigation Plan Portal] // [Электронный ресурс]. – URL: <https://www4.icao.int/ganportal/> (дата обращения: 15.02.2025)

References

Arefyev R. O., Erokhin V. V., Karachentsev V. A. (2022). Investigation of the actual accuracy characteristics of a UAV satellite navigation receiver based on a field experiment. *Actual problems and prospects of civil aviation development: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference, dedicated to the celebration of the 100th anniversary of the Tupolev Design Bureau, the 55th anniversary of the Irkutsk branch of the Moscow State Technical University, the 75th anniversary of the Irkutsk Aviation Technical College*. Irkutsk. 2: 8-14. (in Russian)

Arefyev R. O., Karelin V. E. (2023a). Software package for determining consumer coordinates using satellite navigation systems based on SDR technologies. *Actual problems and prospects of civil aviation development: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference dedicated to the celebration of the 100th anniversary of Russian Civil Aviation*. Irkutsk: 7-18. (in Russian)

Arefyev R. O., Skrypnik O. N., Arefyeva N. G. (2024). Method of experimental evaluation of the accuracy of the navigation system for DJI Mavik 2 ZOOM. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 4: 127-139. (in Russian)

Arefyev R. O., Skrypnik O. N., Mezhetov M. A. (2023b). Investigation of noise immunity of a multi-system GNSS receiver. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 2: 28-43. (in Russian)

Erokhin V. V. (2016). Experimental installation for the study of GLONASS/GPS satellite navigation receivers based on the national instruments software and hardware complex. *Civil aviation at the*

present stage of the development of science, technology and society: A collection of abstracts of the participants of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 45th anniversary of the University. Moscow: 188-189. (in Russian)

Erokhin V. V. (2018). Trajectory control of an aircraft when flying along a given route based on a global navigation satellite system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviation equipment*: 49-56. (in Russian)

Erokhin V. V. (2019). Optimization of navigation support for aircraft with free flight routing. Specialty 05.22.13 "Navigation and air traffic control": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. 2019. 287 p. (in Russian)

GANP Portal [official the Global Air Navigation Plan Portal website]. Available at: <https://www4.icao.int/ganportal/> (accessed 15 February 2025).

GLONASS. Principles of construction and functioning / edited by A. I. Perov, V. N. Kharisov. 4th ed., revised and additional. Moscow: *Radio Engineering*, 2010. 800 p. (in Russian)

Mezhetov M. A., Lezhankin B. V., Tikhova A. I., Vakhrusheva U. S. (2023). The use of Lora modulation in radio communications, navigation and surveillance to solve air traffic control problems. *Credo Experto: transport, society, education, language*. 1: 127-139. (in Russian)

Mezhetov M. A., Shalaev A. A. (2022). Implementation of the signal recognition algorithm in the monitoring system of aviation communication lines. *Actual problems and prospects of civil aviation development: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. dedicated to the celebration of the 100th anniversary of the Tupolev Design Bureau, the 55th anniversary of the Irkutsk branch of the Moscow State Technical University, the 75th anniversary of the Irkutsk Aviation Technical College*. 10(2): 71-79. (in Russian)

Mezhetov M. A., Shalaev A. A. (2023). An algorithm for detecting out-of-band radiation for monitoring frequency resources in cognitive radio systems. *Actual problems and prospects of civil aviation development: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference dedicated to the celebration of the 100th anniversary of Russian Civil Aviation*. Irkutsk: 80-85. (in Russian)

Perov A. I. (2003). Statistical theory of radio engineering systems. Moscow: *Radio Engineering*, 2003. 400 p. (in Russian)

Rostokina E. A., Arefyev R. O., Erokhin V. V. (2025). Statistical analysis of errors in determining the coordinates of an unmanned aerial vehicle based on experimental data from satellite navigation receivers. *Radio engineering and telecommunication systems*. 1(57): 13-24. (in Russian)

Tikhonov V. I., Kharisov V. N. (1991). Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems. Moscow: *Radio and communications*, 1991. 608 p. (in Russian)