

УДК 623.626

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА

В.С. Радько (Воронеж)

### Введение

В связи с недостатками глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) (низкий уровень сигнала на входе навигационной аппаратуры потребителей (НАП), энергетические потери из-за ионосферных и тропосферных искажений) все большую актуальность набирают локальные навигационные системы (ЛНС), состоящие из наземных псевдоспутников, которые излучают сигналы, идентичные сигналам ГНСС. Так как источники навигационных сигналов расположены на земной поверхности, точность и помехоустойчивость НАП увеличиваются [1]. Но при развертывании ЛНС необходимо учитывать проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими радиоэлектронными средствами (РЭС) работающими в диапазоне 1-2 ГГц (L-диапазоне). В работе [2] предлагается способ формирования, улучшающие характеристики ЭМС навигационных сигналов. Это достигается с помощью фильтра с импульсной характеристикой «приподнятый косинус», уменьшающий внеполосное излучение (ВПИ) навигационного сигнала до уровня, соответствующего требованию по ЭМС [3]. Стоит учитывать, что любое уменьшение или искажение спектра навигационного сигнала влияют на показатели точности и помехоустойчивости НАП. Поэтому разработаны способ и устройство [2] формирования навигационного сигнала с автоматической регулировкой параметров спектра, обеспечивающие ЭМС с другими РЭС. Следовательно, необходимо произвести моделирование автоматического выбора параметра фильтра, при котором обеспечиваются наименьшие искажения навигационного сигнала.

Цель работы – моделирование формирования навигационных сигналов с уменьшенным уровнем ВПИ и автоматический выбор оптимального коэффициента скругления, обеспечивающего наименьшие искажения сигнала, а также проведение экспериментального исследования для подтверждения возможности формирования полученных сигналов.

### Практическая реализация

В результате исследований разработано приемопередающее устройство, реализующее способ формирования навигационного сигнала с автоматической регулировкой параметров спектра и обеспечением ЭМС с другими РЭС [2]. Принцип работы устройства основан на анализе влияния ВПИ навигационного сигнала на сигнал РЭС, функционирующего в общей с ЛНС полосе частот. Структурная схема предлагаемого устройства изображена на рисунке 1.

Устройство состоит из следующих основных блоков:

- приемное устройство (ПРМ), принимает сформированный навигационный сигнал и сигналы других РЭС в области ВПИ;
- измеритель мощности (ИМ);
- два делителя ( $D_1$ ,  $D_2$ ), формируют коэффициент подавления  $Q_{\pi i}$  и допустимый коэффициент подавления  $Q_{Di}$ , соответственно;
- запоминающее устройство (ЗУ), используется для хранения характеристик чувствительности приемных трактов других РЭС;

- устройство сравнения (УС), для проверки выполнения неравенства  $Q_{Pi} \geq Q_{Di}$ ; формирователя сигнала (ФС), обеспечивающего первичную меандровую модуляцию заданного навигационного сигнала (ВОС или ТМВОС);
- управляемый переключатель (УП), осуществляет коммутацию соответствующих цепей (ВЧ и УМ или ФПК) по сигналам на управляющих входах (упр. вх. 1 и упр. вх.2); ФПК, реализующего адаптивную фильтрацию ВПИ навигационного сигнала в зависимости от уровня сигнала другого РЭС и запоминание оптимальных настроек с использованием сигналов на управляющих входах (упр. вх. 1 и упр. вх.2);
- блок высокой частоты и усилитель мощности (ВЧ и УМ), осуществляет перенос сформированного первичного навигационного сигнала на несущую частоту L-диапазона и усиление его до необходимого уровня для излучения в пространство.

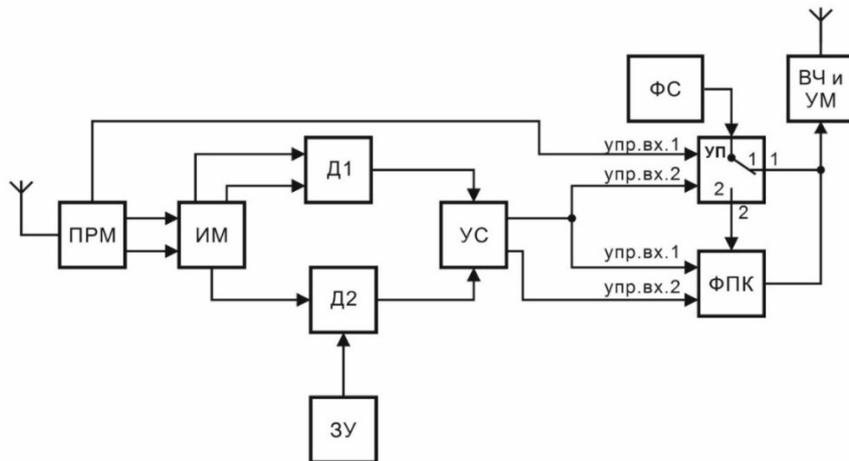


Рис. 1 – Схема приемопередающего устройства с автоматической регулировкой параметров спектра сигнала

Принцип работы устройства заключается в следующем. Через заданный интервал времени  $\Delta t$  принимают ПРМ и измеряют в ИМ мощности сформированного навигационного сигнала в полосе ВПИ  $P_{ВПИ}$  и сигнала другого РЭС (защищаемого сигнала)  $P_{ЗСи}$ . После чего в делителях определяют коэффициент подавления  $Q_{Pi} = P_{ЗСи}/P_{ВПИ}$  и допустимый коэффициент подавления  $Q_{Di} = P_{ЗСи}/P_{вх.min i}$ , где  $P_{вх.min i}$  – записанные в ЗУ значения минимальных мощностей защищаемых сигналов, определяемые чувствительностью каждого  $i$ -ого радиоприемного устройства РЭС. В устройстве сравнения сравнивают полученные значения и при выполнении условия  $Q_{Pi} \geq Q_{Di}$  принимают решение об удовлетворении требований ЭМС, формируя навигационный сигнал приемопередающего устройства без фильтрации внеполосного излучения (УП первоначально замкнут на ВЧ и УМ). В противном случае (УП переключается на ФПК), осуществляют дополнительную фильтрацию навигационного сигнала приемопередающего устройства в ФПК с регулируемой импульсной характеристикой, для которого путем проведения итераций на интервале от 1 до 0 определяют коэффициент скругления  $\alpha_j = \alpha_{j-1} - \Delta\alpha$  (обеспечивающий требуемое уменьшение мощности сигнала ВПИ  $P_{ВПИ}$ , пока не выполнится неравенство  $Q_{Pi} \geq Q_{Di}$ ), где  $\Delta\alpha = 0,05$  – шаг перестройки коэффициента скругления, который рассчитывают исходя из порядка и набора элементов самого фильтра [4].

Разработанное устройство может быть использовано при создании новых и совершенствовании существующих приемопередающих модулей ЛНС для обеспечения ЭМС с другими РЭС, работающими в общей полосе частот.

### Моделирование автоматического выбора коэффициента скругления при формировании навигационного сигнала с уменьшенным уровнем внеполосного излучения

Согласно полученной схеме приемопередающего устройства с автоматической регулировкой параметров спектра сигнала в программной среде Matlab/Simulink разработана модель формирования навигационного сигнала с оптимальным коэффициентом скругления (рисунок 2) [5]. Для моделирования навигационных сигналов используется модуляция  $BOC(m,n)$  и  $TMBOC(m_1, m_2, a)$ , где  $m$  – коэффициент кратности частоты МПК,  $n$  – коэффициент кратности частоты ПСП,  $a$  – долевой энергетический коэффициент. В данной модели формируются существующие навигационные сигналы: меандровые  $BOC(1,1)$ , которые в настоящий момент используются в ГЛОНАСС, и перспективные мультиплексированные  $TMBOC(6,1,1/11)$  которые на данное время применяются в GPS [6, 7]. Также есть возможность формирования сигналов другой РЭС в частотной области внеполосного излучения.

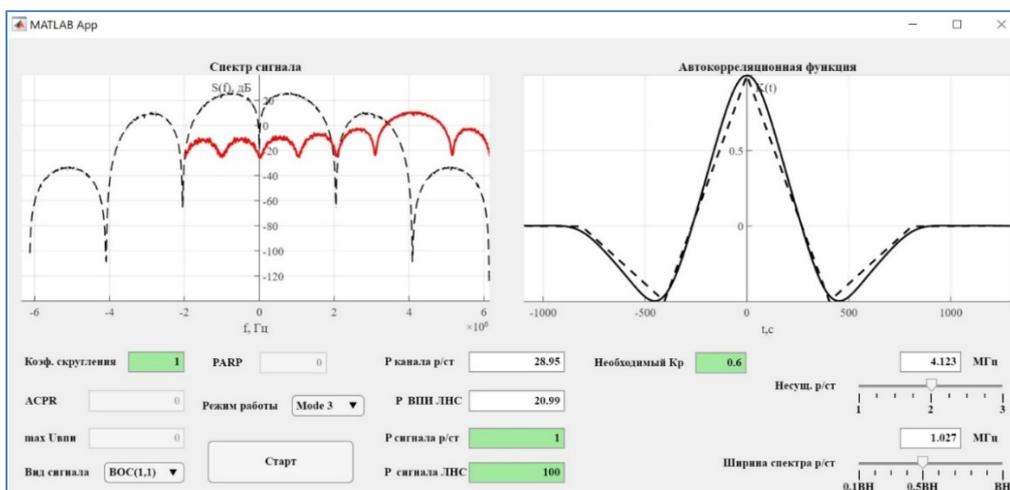


Рис. 2 – Программа выбора оптимального коэффициента скругления для ЛНС

При выборе вида навигационного сигнала и параметров сигнала РЭС программа формирует навигационный сигнал без ФПК согласно [8], амплитудно-частотные спектры (АЧС) которых показаны на рисунках 3 и 4 в зависимости от вида сигнала. После чего производится оценка параметров влияния навигационного сигнала на другие РЭС и если установленное условие  $Q_{Pi} \geq Q_{Di}$  не выполняется, то коэффициент скругления ФПК уменьшается на 0,05 до момента выполнения условия.

Следовательно, зная параметры РЭС, необходимые для нормальной работы аппаратуры, можно сформировать навигационный сигнал с улучшенными характеристиками ЭМС. При выполнении требований по ЭМС [3], коэффициенты скругления составляют для сигнала  $BOC(1,1) = 0,8$ ;  $TMBOC(6,1,1/11) = 0,9$ .

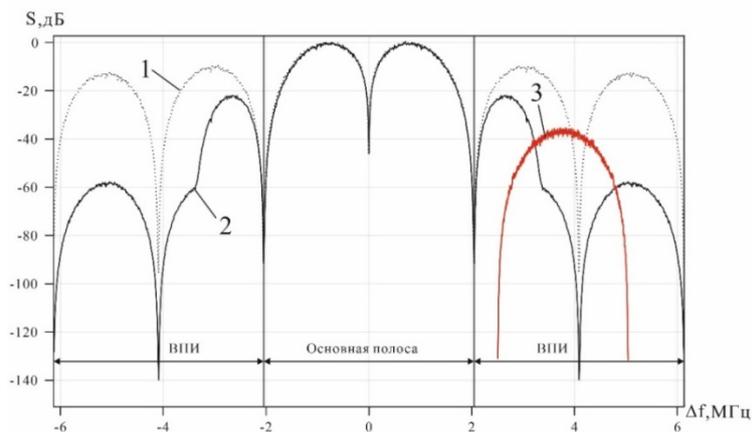


Рис. 3 – АЧС сигнала: 1 – ВОС (1,1) без фильтрации; 2 – ВОС (1,1) с фильтрацией; 3 – РЭС

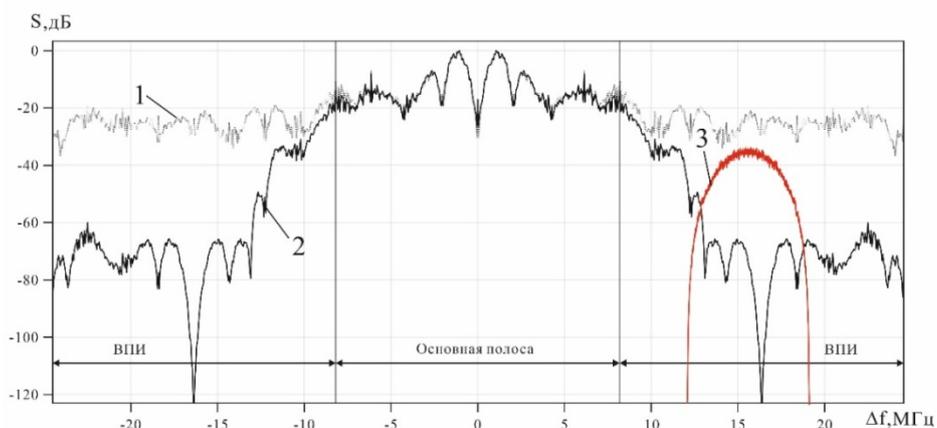


Рис. 4 – АЧС сигнала: 1 – ТМВОС (6,1,1/11) без фильтрации; 2 – ТМВОС (6,1,1/11) с фильтрацией; 3 – РЭС

### Экспериментальное исследование по формированию меандровых сигналов с требуемой формой спектра

Для проведения экспериментальных исследований для меандровых сигналов с уменьшенным уровнем ВПИ были собраны экспериментальные установки, структурные схемы которых представлены на рисунках 5 и 6.

Экспериментальная установка состоит из персонального компьютера со специализированным программным обеспечением, USB-накопителя, векторного генератора высокочастотных сигналов, анализатора спектра, передающей и приемной антенн.

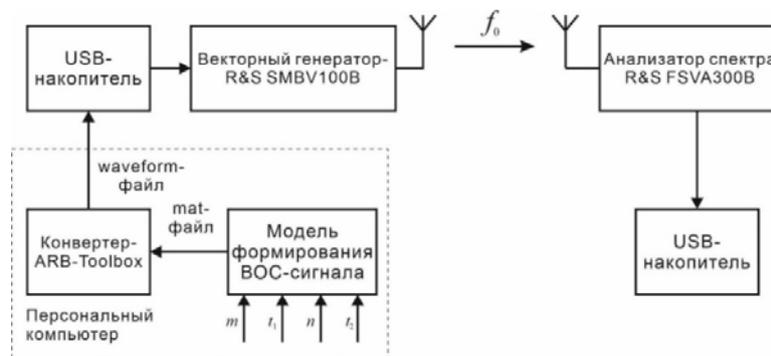


Рис.5 – Структурная схема экспериментальной установки формирования ВОС-сигналов

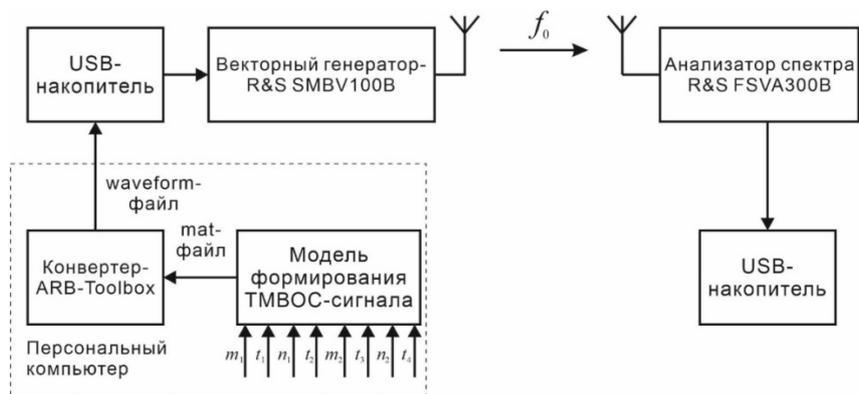


Рис. 6 – Структурная схема экспериментальной установки формирования *TMBOC*-сигналов

На первом этапе необходимо сформировать комплексную выборку отсчётов *BOC*- и *TMBOC*-сигнала с уменьшенным уровнем внеполосного излучения в формате совместимом с генератором сигналов R&S SMBV100B. Для этого с помощью описанной модели формирователя навигационных *BOC*- и *TMBOC*-сигналов с уменьшенным ВПИ в среде MATLAB [8] формируются и запоминаются цифровые отсчёты модулирующей функции сигнала. Переменные рабочей области не сохраняются после выхода из MATLAB. Для использования в других приложениях переменные сохраняются в бинарный файл с расширением *.mat* среды MATLAB. Восстановить сохраненные данные возможно, загрузив *mat*-файл обратно в MATLAB или использовав специализированное программное обеспечение. В векторных генераторах Rohde&Schwarz для задания модулирующей функции используются *waveform*-файлы (расширение *.wav*), содержащие синфазные и квадратурные отсчеты комплексного сигнала. Преобразование *mat*-файлов в *waveform*-файлы выполнено с помощью программного обеспечения Rohde&Schwarz *ARB Toolbox*, предназначенного для графической оценки содержимого сигнала, импорта данных из *mat*-файлов, передискретизации или фильтрации сигналов, создания сложных сценариев с несколькими несущими.

Полученные *waveform*-файлы записываются на USB-накопитель и подключаются к векторному генератору для перемножения несущего колебания на комплексную модулирующую функцию.

В экспериментальной установке использован векторный генератор сигналов «Rohde&Schwarz» R&S SMBV100B (рисунок 7), работающий в диапазоне частот до 3 ГГц с полосой модуляции 1 ГГц. Векторные генераторы сигналов осуществляют перенос сигналов модуляции на высокую несущую частоту и вывод итогового сигнала. Сигнал модуляции формируется в цифровой форме и обрабатывается как поток комплексных *I/Q*-данных в полосе частот модулирующего сигнала. Квадратурные (*I/Q*) модуляторы изменяют несущий ВЧ-сигнал сразу в двух измерениях: амплитуды и фазы. Они формируют сигнал модуляции из суммы двух модулирующих сигналов,  $i(t)$  и  $q(t)$ , где  $i(t)$  представляет собой синфазную составляющую, а  $q(t)$  – квадратурную. Ортогонально расположенные на квадратурной плоскости они формируют вектор с длиной  $A(t)$  и фазой  $\varphi(t)$ . Сформированные модулирующие *I/Q*-данные затем переносятся на несущую частоту. *I/Q*-методы позволяют реализовать любой тип модуляции – простой или комплексный, цифровой или аналоговый – а также сигналы с одной или несколькими несущими. Такой принцип формирования сигналов обеспечивает полнофункциональную имитацию сигналов ГНСС GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou.

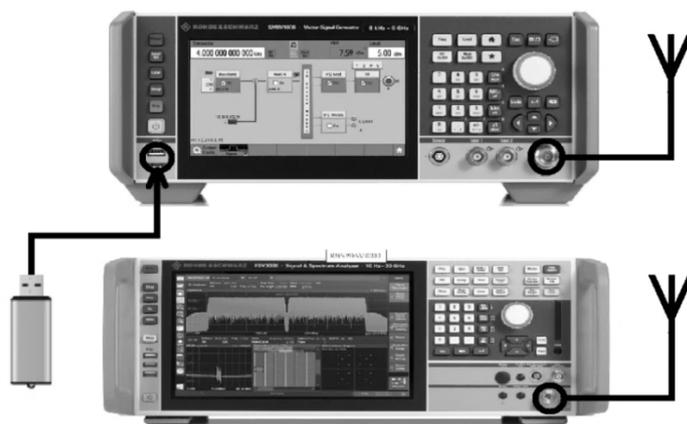


Рис. 7 – Внешний вид экспериментальной установки

Для определения частотных характеристик меандровых сигналов использовался анализатор спектра «Rohde&Schwarz» R&S FSVA300B. Он характеризуется диапазоном частот до 4 ГГц, полосой анализа до 400 МГц, низким уровнем фазового шума – 120 дБн/Гц при отстройке 10 кГц и большим динамическим диапазоном.

После включения экспериментальной установки USB-накопитель с комплексными отчётами сигнала подключается к входу генератора сигналов R&S SMBV100B. В генераторе осуществляется вычисление и преобразование в аналоговый вид в реальном масштабе времени отсчётов сигнала, поступающих с выхода USB-накопителя, а также перенос сформированного аналогового сигнала на заданную несущую частоту. В описываемом экспериментальном исследовании значение несущей частоты  $f_0 = 1,6$  МГц, что соответствует диапазону частот ГНСС ГЛОНАСС.

Сформированный генератором R&S SMBV100B высокочастотный сигнал с уменьшенным уровнем ВПИ через антенну излучается в эфир. Анализатор спектра R&S FSVA300B осуществляет приём и обработку излученного сигнала. В результате обработки на мониторе анализатора спектра R&S FSVA300B отображается спектр сигнала с уменьшенным уровнем ВПИ. Цифровые спектральные отсчеты анализируемого сигнала также записываются в подключенный к анализатору спектра USB-накопитель.

Экспериментально полученные спектры сигналов  $BOC(1,1)$  и  $TMBOC(6,1,1/11)$  представлены на рисунках 8 и 9.

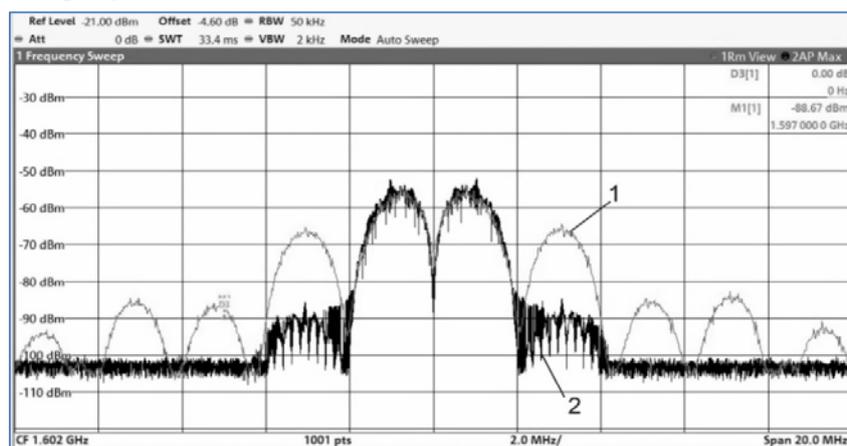


Рис.8 – Спектр навигационного сигнала: 1 –  $BOC(1,1)$  без фильтрации; 2 –  $BOC(1,1)$  с фильтрацией

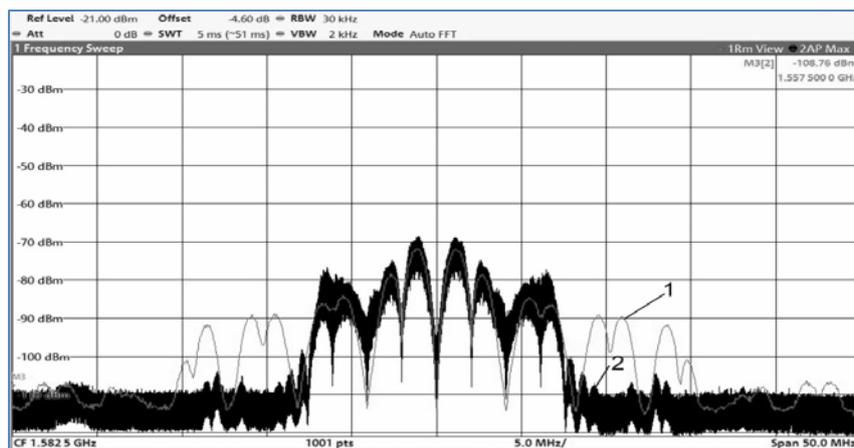


Рис. 9 – Спектр навигационного сигнала:  
 1 –  $TMBOC(6,1,1/11)$  без фильтрации; 2 –  $TMBOC(6,1,1/11)$  с фильтрацией

Анализ графиков, приведенных на рисунках 8 и 9, показывает, что энергетические спектры навигационных сигналов с уменьшенным уровнем ВПИ, полученных экспериментальным способом, имеют два основных лепестка, попарно расположенных относительно нулевой частоты, а также заметно сниженный уровень ВПИ, соответствует спектрам тех же сигналов, полученным путем моделирования и изображенным на рисунках 2 и 3. Несколько сниженный уровень боковых лепестков спектра у  $BOC(1,1)$  на 5 дБ,  $TMBOC(6,1,1/11)$  на 12 дБ обусловлен тем, что в генераторе сигналов R&S SMBV100B используется цифровой метод оптимизации формы спектра сигнала для снижения уровней внеполосного излучения.

### Выводы

Рассмотрен вопрос взаимодействия имитационного моделирования в среде MATLAB с другими видами и технологиями моделирования в рамках концепции комплексного (системного) моделирования исследуемых сложных объектов и процессов, что соответствует проблематике конференции.

### Литература

1. **Зализнюк А.Н., Флегонтов А.В., Волков А.А.** Перспективы развития наземной навигации в Вооруженных Силах РФ // Военная мысль. 2022. №9. С. 65-69.
2. **Радько В.С.** Способ формирования навигационных сигналов с пониженным уровнем внеполосного излучения / В.С. Радько, В.В. Филоненко, А.М. Межуев, В.А. Миронов. // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2024. №2. С. 26-34.
3. ГОСТ Р 50016–92. Государственный стандарт РФ. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к ширине полосы радиочастот и внеполосным излучениям радиопередатчиков. Методы измерений и контроля. Издание официальное. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.
4. **Неровный В.В., Журавлев А.В., Урывская Т.Ю., Коратаев П.Д.** Математические модели навигационных сигналов с требуемой формой спектральной плотности мощности // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 7. С. 69-75.
5. **Радько В.С.** Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2024667430 Выбор оптимального коэффициента скругления фильтра для формирования навигационного сигнала в локальных навигационных системах. Зарегистрировано 24.07.2024 г.
6. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 // Москва. 2008 г. – 74 с.

7. **Ярлыков М.С.** Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах. Монография. М.: // Радиотехника, 2017. – 416 с.
8. **Неровный В. В., Миронов В. А., Коратаев П.Д., Пакляченко М.Ю., Неровная Н.А.** Модель формирователя DuoВОС сигналов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613775, заяв. 05.03.2021, опубл. 15.03.2021.