

УДК 623.626

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕАНДРОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С УМЕНЬШЕННЫМ УРОВНЕМ ВНЕПОЛОСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В.С. Радько, А.М. Межуев, В.В. Неровный, В.А. Миронов (Воронеж)

Введение

В настоящее время существуют два пути развития глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) – улучшение существующей аппаратуры ГНСС и усовершенствование функциональных дополнений (ФД). Локальные навигационные системы (ЛНС) являются одним из перспективных направлений развития ФД, которые обеспечивают навигационные определения в ограниченной области пространства с помощью псевдоспутников (ПС). Так как источники навигационных сигналов расположены на земной поверхности, точность и помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей (НАП) увеличиваются [1].

В настоящее время разработки различных ЛНС ведутся во многих странах мира: США, России, Австралии и др. В России разработкой ЛНС занимается АО НИИ микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», проект «КОНСУЛ» [2].

Стоит отметить, что внедрение новых видов навигационных сигналов с кодовым разделением является перспективным направлением развития как в ЛНС, так и в ГНСС. Одним из видов сигналов, характеризующиеся высокой доступностью и точностью определения местоположения, являются меандровые *ВОС*-сигналы (binary offset carrier), а также перспективные мультиплексированные *ТМВОС*-сигналы (time–multiplexed binary offset carrier).

Главным отличительным признаком *ТМВОС*-сигналов является увеличенная доля мощности составляющих энергетического спектра в основной полосе, что и предопределяет преимущество *ТМВОС*-сигналов по сравнению с обычными *ВОС*-сигналами [3]. Но стоит учитывать, что использование меандровых или мультиплексированных сигналов в ЛНС из-за увеличенного уровня внеполосного излучения (ВПИ) может повлиять на качество работы других радиоэлектронных средств (РЭС), работающих в общем диапазоне частот. Поэтому при разработке ЛНС на основе псевдоспутников, излучающих *ВОС*- и *ТМВОС*-сигналы, необходимо учитывать требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими РЭС, работающими в диапазоне 1-2 ГГц (L-диапазоне). Поэтому разработаны способ [4] и устройство [5], которые формируют навигационные сигналы при помощи фильтра с импульсной характеристикой «приподнятый косинус» (ФПК), удовлетворяющие требованиям ЭМС. Следовательно, для оценки влияния ФПК на спектральные характеристики навигационных сигналов необходимо произвести моделирование данных сигналов для определения оптимального параметра фильтра.

Цель работы – моделирование меандровых сигналов с уменьшенным уровнем внеполосного излучения, удовлетворяющих требованиям ЭМС с другими РЭС при использовании ФПК.

Анализ амплитудно-частотных спектров навигационных сигналов

Навигационные *ВОС*- и *ТМВОС*-сигналы, состоящие из элементарных символов псевдослучайной последовательности (ПСП), модулируются одним или двумя меандровыми поднесущими колебаниями (МПК). *ВОС*-сигналы получают путем модуляции элементарного символа ПСП одним МПК, при этом частоты ПСП и МПК кратны заданной базовой частоте (f_b): $f_n = n f_b$, где f_n – частота ПСП, n – коэффициент

кратности частоты ПСП; $f_m = mf_b$, где f_T – частота МПК, m – коэффициент кратности частоты МПК. В соответствии с представленными коэффициентами кратности меандровые сигналы имеют условное обозначение $ВОС(m,n)$.

В целом навигационный ВОС-сигнал описывается следующим выражением [3]:

$$S_{ВОС}(t) = AG_{ДК}(t)G_{НС}(t)M_1(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала,
 $G_{ДК}(t)$ – дальномерный код навигационного сигнала;
 $G_{НС}(t)$ – навигационное сообщение;
 $M_1(t)$ – первое МПК сигнала;
 f_0 – несущая частота;
 φ_0 – начальная фаза.

ТМВОС-сигналы представляют собой составные (комбинированные) сигналы, сформированные на основе двух МПК различных типов (например, образованные на основе меандровых поднесущих колебаний $ВОС(6,1)$ и $ВОС(1,1)$) [6]. Поэтому сигналы обозначаются как $ТМВОС(m_1, m_2, a)$, где a – долевой энергетический коэффициент.

ТМВОС-сигналы применяются в модернизированной системе GPS и описываются следующей формулой:

$$S_{ТМВОС}(t) = AG_{ДК}(t)G_{НС}(t) \times (G_{ТМ}(t)M_1(t) + (1 - G_{ТМ}(t))M_2(t)) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2)$$

где $M_2(t)$ – второе МПК сигнала, $G_{ТМ}(t)$ – последовательность стробирующих импульсов, принимающих значения 1 или 0 по закону временного разделения двух МПК.

Требования к ЭМС навигационных сигналов определяются ГОСТ, регламентирующим уровень внеполосного излучения [7]. При этом, под внеполосным излучением понимаются полосы частот, ширина которых равна ширине основной полосы (B_H), непосредственно примыкающие к ее верхней и нижней границе. Ограничительная линия спектра, определяющая допустимый уровень ВПИ, строится в соответствии с таблицей 1 [7].

Таблица 1 – Координаты характерных точек ограничительной линии спектра

Номер точки Параметр	1	2	3	4
Расстройка по частоте, МГц	$\Delta f_{S_1} = \pm 0,5B_H$	$\Delta f_{S_2} = \pm 2,6B_H$	$\Delta f_{S_3} = \pm 4,6B_H$	$\Delta f_{S_4} = \pm 8,2B_H$
Уровень спектральной плотности мощности, дБ	$S_1 = 0$	$S_2 = -40$	$S_3 = -50$	$S_4 = -60$

В программной среде Matlab/Simulink была разработана модель [8] формирования навигационных сигналов ВОС – и ТМВОС – сигналов с построением ограничительных линий на АЧС сигнала (рисунок 1), которая состоит из формирователя меандровой последовательности (МП), блока формирования ПСП, блока фазовой модуляции (ФМ) и блока ФПК, который при необходимости отключается, для формирования существующих навигационных сигналов.

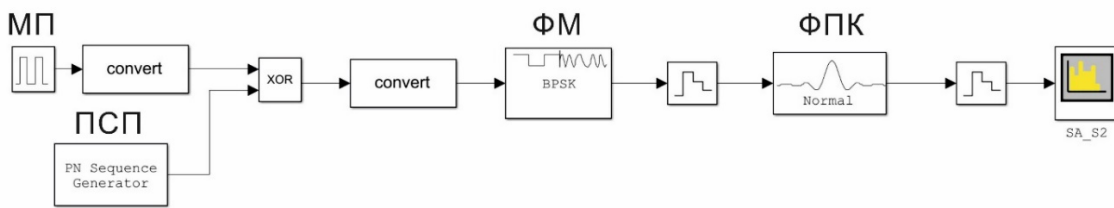


Рис. 1 – Схема формирования навигационных сигналов в программной среде Matlab/Simulink

Сигналы с блока МП в виде меандровой последовательности поступают на блок преобразования типа данных (convert), где преобразуются к логическому типу данных и наоборот. Полученный сигнал совместно с сигналом ПСП поступает в блок XOR, реализующий операцию логическое исключаящее ИЛИ. Результат преобразования направляется в блок ФМ, где используется бинарный метод манипуляции сдвига фазы. Сформированный высокочастотный сигнал поступает на блок ФПК, с регулируемым коэффициентом скругления сигнала. Для контроля характеристик сигнала используется блок спектроанализатора. Между блоками ФМ и ФПК, ФПК и спектроанализатора установлены блоки согласования частоты дискретизации.

С помощью разработанной модели получены амплитудно-частотные спектры (АЧС) навигационных сигналов с ограничительной линией спектра, где по оси ординат откладывается уровень спектральной плотности мощности S радиосигнала относительно максимального значения АЧС, а по оси абсцисс – расстройка по частоте (Δf_s), относительно ширины основной полосы (B_H) (рисунки 2 и 3). Стоит отметить, что в данной статье будут рассматриваться существующие навигационные сигналы $BOC(1,1)$, которые используются в системе ГЛОНАСС, и $TMBOC(6,1,1/11)$, которые применяются в системе GPS.

Из рисунков 2 и 3 видно, что уровень внеполосного излучения сигнала пересекает ограничительную линию спектра, а, следовательно, формируемые навигационные сигналы не соответствуют требованиям [7] по ЭМС с другими РЭС. Поэтому необходимо применять ФПК для уменьшения уровня ВПИ. Максимальный уровень боковых лепестков сигналов с меандровой модуляцией, полученных путем моделирования, составляет от -12 до -8 дБ; мультиплексированного сигнала – от -25 до -17 дБ.

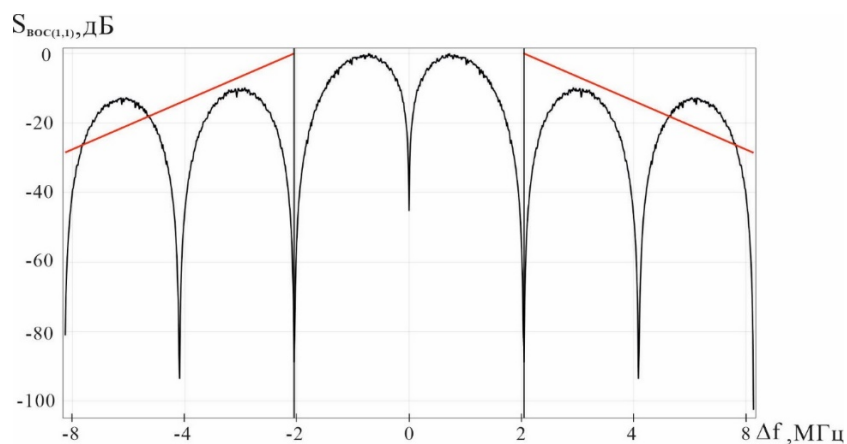


Рис. 2 – АЧС сигнала $BOC(1,1)$

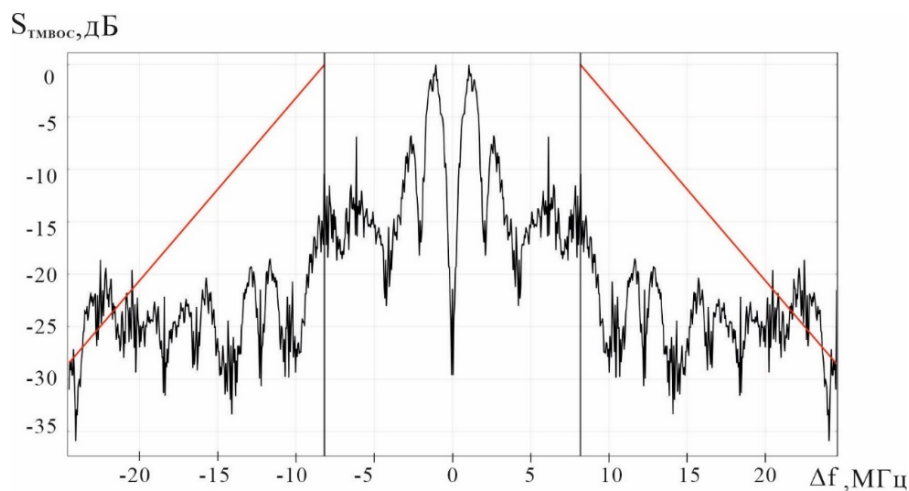


Рис.3 – АЧС сигнала ТМВОС (6,1,1/11)

В качестве количественной меры уровня внеполосного излучения применяются такие параметры, как максимальный уровень боковых лепестков, находящихся за пределами основной полосы сигнала, и относительная мощность в соседнем канале ACPR (adjacent channel power ratio) [9].

Параметр ACPR определяется десятичным логарифмом отношения величины мощности сигнала в полосе частот соседнего канала $P_{СК}$ (в данном контексте под ним понимается каждый из двух каналов ВПИ) к величине мощности в основном канале $P_{ОК}$, в соответствии с выражением:

$$ACPR = 10 \lg \frac{P_{СК}}{P_{ОК}} \quad (1)$$

Значения ACPR, полученные с использованием метода математического моделирования в среде Matlab/Simulink, для сигналов ЛНС, применяемых в настоящее время, составили:

- для навигационного сигнала $ВОС(1,1) = -11,27$ дБ;
- для навигационного сигнала $ТМВОС(6,1,1/11) = -13,88$ дБ.

Таким образом, видно, что при общепринятом способе формирования $ВОС(1,1)$ и $ТМВОС(6,1,1/11)$ сигналов, уровень ВПИ не позволяет обеспечить требуемую ЭМС с РЭС, работающими в общем с ЛНС диапазоне частот.

Моделирование навигационных сигналов с пониженным уровнем внеполосного излучения

Решение задачи снижения уровня ВПИ может быть достигнуто путем разработки способа фильтрации навигационных сигналов. При этом необходимо выбрать такой фильтр, который вносил бы минимальные искажения в структуру навигационного сигнала, одновременно обеспечивая эффективное решение задачи ЭМС. Как показывает анализ известных публикаций, технически достаточно сложно получить требуемую форму спектра в формирователе на радиочастоте L-диапазона [10]. Поэтому в современных системах подвижной радиосвязи фильтрация сигнала осуществляется в области низких частот. Для изменения вида амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и минимизации межсимвольной интерференции используются ФПК. Выбор данных фильтров обусловлен обеспечением требований по ЭМС [11], а их импульсная характеристика для $ВОС$ – сигналов описываются выражениями [4]:

$$h_{ВОС}(t) = \frac{\cos(2\pi\alpha(n+m)t/\tau_{оп})}{1 - 4\alpha^2(2(n+m)t/\tau_{оп})^2} \cdot \frac{\sin(2(n+m)t/\tau_{оп})}{(2(n+m)t/\tau_{оп})}, \quad (2)$$

где $\tau_{оп}$ – длительность символа опорного сигнала, α – коэффициент скругления формы АЧХ, изменяющийся в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 1$.

Для *ТМВОС*–сигнала импульсная характеристика определяется выражением [4]:

$$h_{ВОС}(t) = \frac{\cos(2\pi\alpha(n+m+k)t/\tau_{оп})}{1 - 4\alpha^2(2(n+m+k)t/\tau_{оп})^2} \cdot \frac{\sin(2(n+m+k)t/\tau_{оп})}{(2(n+m+k)t/\tau_{оп})}. \quad (3)$$

Вид АЧХ ФПК представлен на рисунке 4.

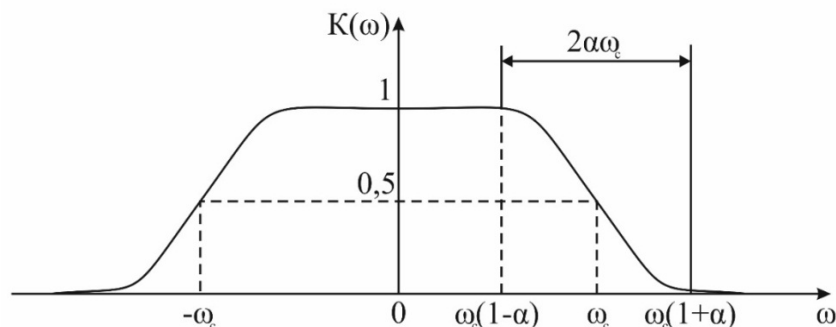


Рис. 4 – АЧХ фильтра с характеристикой типа «приподнятый косинус»

Физический смысл коэффициента скругления заключается в том, что при $\alpha = 0$ ФПК превращается в идеальный фильтр с прямоугольной АЧХ; при $\alpha = 1$ АЧХ ФПК перестает содержать плоский участок в полосе пропускания. Примеры трансформации спектра меандровых сигналов при различных значениях α приведены в работе [12]. С точки зрения формирования меандровых сигналов с требуемой формой спектра необходимо учитывать, что с возрастанием α уровень внеполосного излучения также возрастает. С другой стороны, при возрастании α уменьшается степень искажения его спектральных, а значит и временных характеристик, что уменьшает потери при корреляционной обработке в приемниках навигационной аппаратуры потребителей. Таким образом, необходимо найти такое оптимальное значение коэффициента скругления α_0 , при котором спектральная плотность мощности сигнала на выходе фильтра в области ВПИ приближается снизу к ограничительной линии спектра, но не превышает ее:

$$\alpha_0 = \max(\alpha) \mid S_M(f, \alpha) \leq L_{огр}(f) \text{ в диапазоне } |f - f_0| > \frac{\Delta f_M}{2}. \quad (4)$$

Для решения данной задачи был разработана способ формирования навигационных сигналов, заключающийся в формировании синфазных и квадратурных отсчетов модулирующей функции при помощи модели в среде MatLab/Simulink [8].

На рисунках 5 и 6 представлены АЧС меандрового сигнала *ВОС*(1,1) (при $\alpha = 0,8$) и мультиплексированного сигнала *ТМВОС*(6,1,1/11) (при $\alpha = 0,9$) с требуемым уровнем ВПИ, который становится ниже ограничительной линии спектра, удовлетворяя требованиям ЭМС [7].

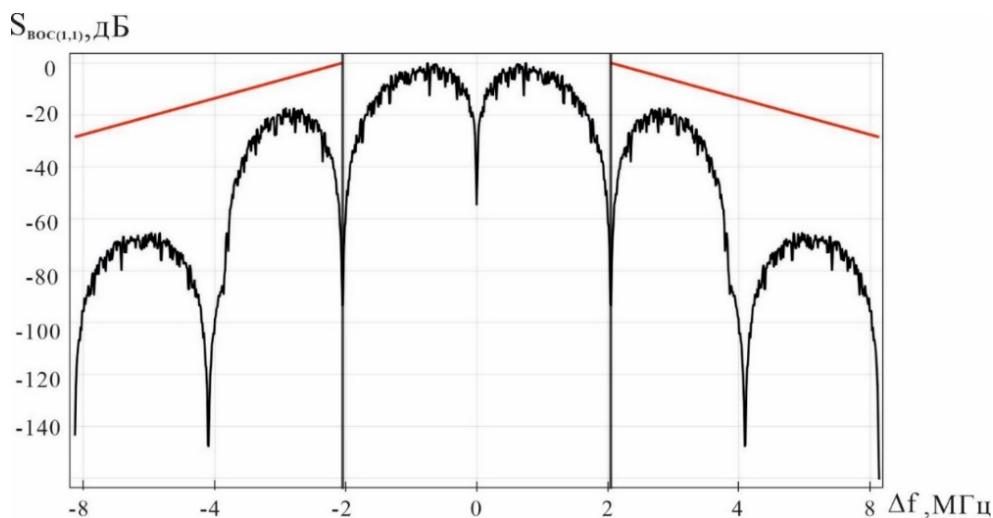


Рис. 5 – АЧС сигнала $VOS(1,1)$ после обработки ФПК

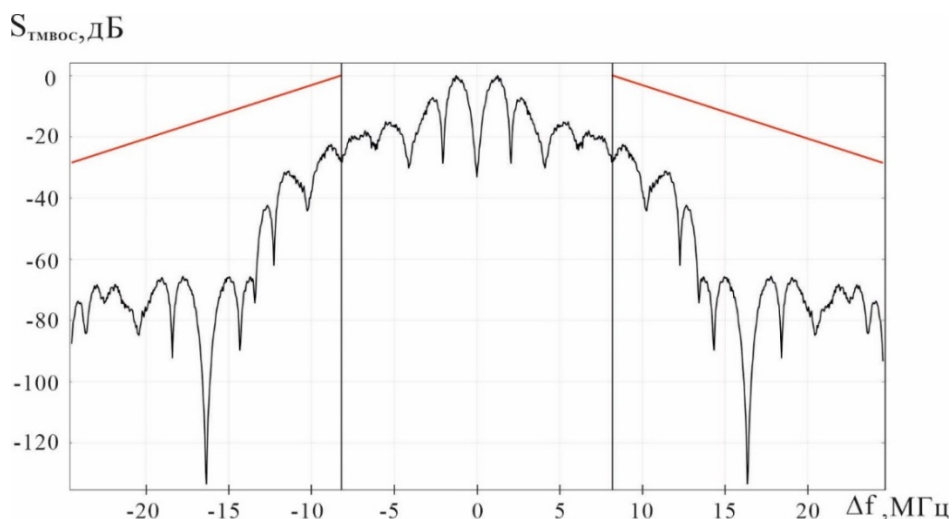


Рис. 6 – АЧС сигнала $TMVOS(6,1,1/11)$ после обработки ФПК

Измеренные значения АСРР для полученных сигналов оказались значительно ниже, чем при обычном способе формирования и составили: $VOS(1,1) = -23,1$ дБ; $TMVOS(6,1,1/11) = -32,85$ дБ. Полученные результаты были достигнуты последовательным подбором параметров фильтра до тех пор, пока уровень ВПИ не будет ниже ограничительной линии спектра.

Вывод

Предложена практическая реализация имитационной модели.

Литература

1. Зализнюк А.Н. Перспективы развития наземной навигации в Вооруженных Силах Российской Федерации / А.Н. Зализнюк, А.В. Флегонтов, А.А. Волков // Военная мысль. 2022. №9. С. 65-69.
2. ЛНС «Консул» обеспечивает высокую надежность и точность геопозиционирования – Текст: электронный // АО «НИИМА ПРОГРЕСС»: [офиц. сайт]. 2022. URL: <https://www.i-progress.tech/news/Consul/>.

3. **Ярлыков М.С.** Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах. Монография. М.: // Радиотехника, 2017. – 416 с.
4. **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 ФСИИ России. 2024. №2. С. 26-34.
5. **Неровный В.В., Бабусенко С.И., Журавлев А.В., Кирюшкин В.В., Шуваев В.А., Красов Е.М., Исаев В.В., Радько В.С., Филоненко В.В.** Свидетельство о государственной регистрации патента № 2795268 Радиопередающее устройство с автоматической регулировкой параметров спектра радиосигнала. Зарегистрировано 02.05.2023 г.
6. Радиозлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
7. ГОСТ Р 50016–92. Государственный стандарт Российской Федерации. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к ширине полосы радиочастот и внеполосным излучениям радиопередатчиков. Методы измерений и контроля. Издание официальное. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.
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.
9. **Ершов А.Н.** Особенности расчета и проектирования высокоскоростных радиолиний космических аппаратов ДЗЗ / Ершов А.Н., Березкин В.В., Петров С.В., Петров А.В., Почивалин Д.А. // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т.5. Выпуск 1. С. 52-57.
10. **Маковеева М.М.** Системы связи с подвижными объектами./ Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. // М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
11. **Скляр Бернанд.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение // М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
12. **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.