

УДК 52.08

## **ИМИТАЦИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ KEYSIGHT M8190A**

**М.А. Зенченко, А.М. Каверин, А.В. Клеопин**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
zenchenko@vniiftri.ru,  
a\_kaverin@vniiftri.ru,  
kleopin@vniiftri.ru*

*Аннотация. Разработан имитатор навигационных сигналов на базе генератора сигналов произвольной формы. Разработано специальное программное обеспечение для моделирования навигационных сигналов и управления генератором. Получены результаты измерений параметров съмитированных навигационных сигналов, а также параметров вносимых искажений.*

*Ключевые слова: радионавигационные сигналы, генератор сигналов произвольной формы, псевдослучайная последовательность.*

## **SIMULATION OF NAVIGATION SIGNALS VIA ARBITRARY WAVEFORM GENERATOR KEYSIGHT M8190A**

**M.A. Zenchenko, A.M. Kaverin, A.V. Kleopin**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
zenchenko@vniiftri.ru,  
a\_kaverin@vniiftri.ru,  
kleopin@vniiftri.ru*

*Annotation. A simulator of navigation signals on the basis of the arbitrary waveform generator was developed. Special software was developed to simulate navigation signals and control the generator. The results of measurements of the parameters of simulated navigation signals, as well as the parameters of the introduced distortions, were obtained.*

*Key words: radio navigation signals, arbitrary waveform generator, pseudo-random sequence.*

### **Введение**

Одним из направлений совершенствования глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС является разработка и внедрение новых радионавигационных сигналов. Перспективные радионавигационные сигналы используют сложные виды модуляции, обладают более высокой помехозащищённостью и скоростью передачи служебной информации. Для отработки

технологий формирования новых сигналов применяются в том числе специализированные измерительные приёмные устройства. Оценка характеристик данных приёмных устройств, в свою очередь, требует создания высокоточных имитаторов новых сигналов. Таким образом, возникает необходимость периодического обновления используемых имитаторов.

Существующие модели имитаторов сигналов являются специализированными и конструктивно законченными изделиями. В связи с этим внедрение новых сигналов требует разработки новой модификации модели имитатора сигналов и является экономически нецелесообразным. Таким образом, актуальной является задача оценки возможности использования генераторов сигналов произвольной формы для воспроизведения радионавигационных сигналов, а также исследование свойств получаемых таким способом сигналов.

Современный уровень развития генераторов сигналов произвольной формы (ГСПФ), а именно возможность прямого цифрового синтеза навигационного сигнала, обеспечивает возможность реализации перспективных, чрезвычайно гибких методов формирования навигационного сигнала в имитаторах. Обработка математических моделей сигнала любой сложности с физической частотой дискретизации 20...100 пс позволяет обеспечить высокую точность измерений навигационных параметров НАП на основе использования измерений по фазе несущей навигационного сигнала (фазовых измерений).

### **Постановка задачи**

Принцип формирования и структура навигационных сигналов приводятся в соответствующих стандартах организаций [1, 2, 3]. В общем случае навигационный сигнал является фазоманипулированным и может быть представлен следующим образом [4]:

$$u_{\text{ФМ}}(t) = U_m \cos[\omega_0 t + ks(t)], \quad (1)$$

где  $U_m$  — амплитуда сигнала;  $\omega_0$  — значение частоты в отсутствие полезного сигнала;  $k$  — некоторый коэффициент пропорциональности;  $s(t)$  — сигнал передаваемого сообщения.

Модулирующую последовательность получают с помощью одного или нескольких генераторов псевдослучайной последовательности, которыми выступают сдвиговые регистры с обратной связью. В образовании модулирующей последовательности также участвуют символы передаваемого навигационного сообщения, оверлейных и свёрточных кодов. Структурно навигационный сигнал разделяется на строки; несколько строк образуют кадр, а несколько кадров — суперкадр. На рис. 1 приведены временные соотношения между синхроимпульсами модулирующего навигационного сигнала ГЛОНАСС и псевдослучайной последовательностью (ПСП).

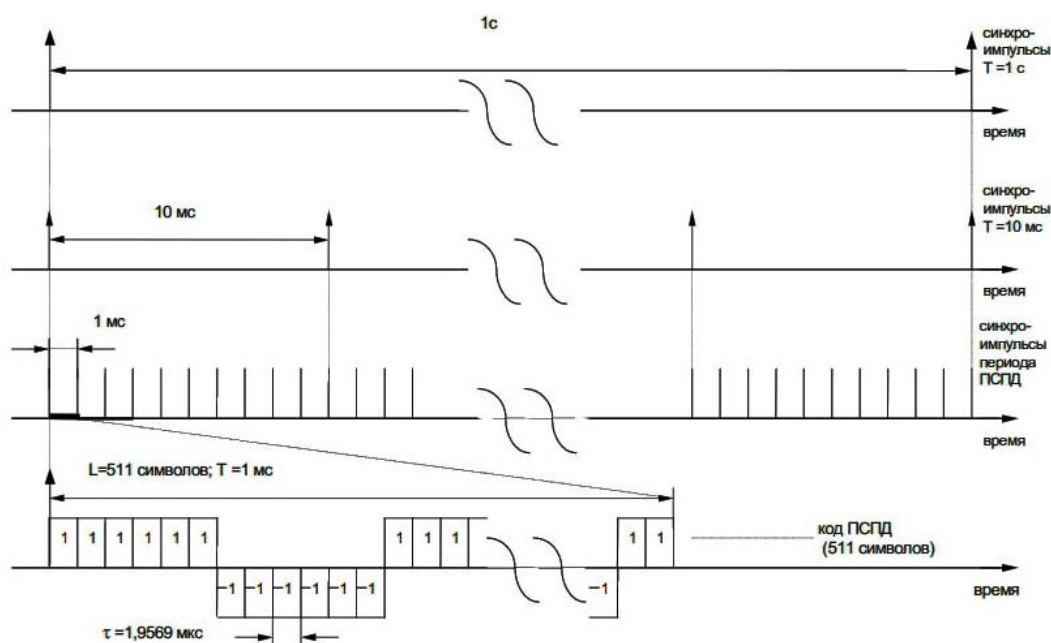


Рис. 1. Структура информационной строки сигнала ГЛОНАСС при частотном разделении

Математическое моделирование навигационных сигналов можно осуществить, используя какую-либо интегрированную среду разработки, предназначенную для работы с большим количеством данных. В данной работе использовался пакет MATLAB. В MATLAB сдвиговый регистр может быть смоделирован одномерным массивом, количество элементов которого равно количеству ячеек регистра. Таким образом, процесс формирования отсчетов навигационного сигнала сводится к обработке массивов данных. Сформированный сигнал можно записать в память ГСПФ или генератора векторных сигналов для последующего воспроизведения.

Сравнительный анализ качества воспроизведения навигационного сигнала с использованием ГСПФ и генератора векторных сигналов показал, что в первом случае достигаются на порядок лучшие характеристики по быстродействию, что отражается в снижении длительности переходных процессов в моменты фазовой манипуляции. На рис. 2 представлены осциллограммы участка навигационного сигнала, на которых зафиксирован момент изменения фазы (коэффициент развёртки — 5 нс/дел., коэффициент отклонения — 5 мВ/дел.).

Таким образом, при генерации сигнала с помощью ГСПФ можно добиться отсутствия сегмента сигнала, в котором из-за переходных процессов амплитуда радиоимпульсов снижается до уровня шумов и наблюдается неопределённость фазы.

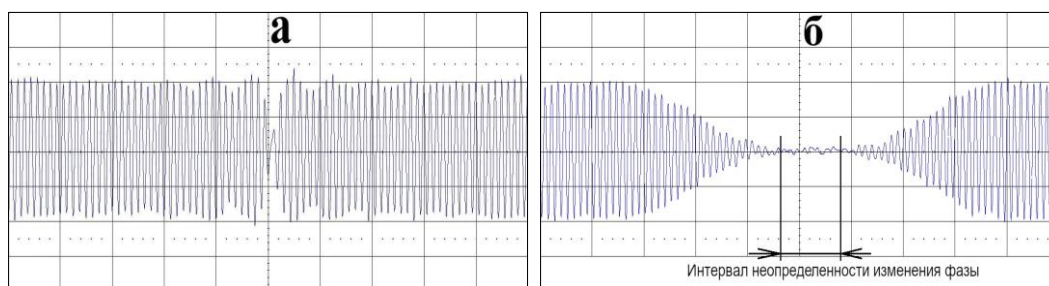


Рис. 2. Осциллограммы сигналов: а — сигнал на выходе ГСПФ; б — сигнал на выходе генератора векторных сигналов

### Описание решения. Экспериментальные исследования

ГСПФ Keysight M8190A обеспечивает воспроизведение сигналов с частотой дискретизации 8 и 12 ГГц (в зависимости от установленной опции). Максимальная амплитуда сигнала на выходе ГСПФ составляет 720 мВ, что со значительным запасом превышает необходимый уровень мощности для имитации навигационных сигналов. Имеется возможность записать в память ГСПФ ряд сегментов сигнала и воспроизводить их в произвольно выбранном порядке. Стандартный режим генерации подразумевает непосредственный прямой цифровой синтез сигнала по отсчётам из памяти. Кроме этого, имеется возможность генерации с аппаратной интерполяцией, при которой частота дискретизации уменьшается в несколько раз (INTx4 — в 4 раза, INTx12 — в 12 раз и т.д.), а воспроизводимый сигнал дополняется интерполирующими отсчётами. В режиме генерации с интерполяцией воспроизводимый сигнал записывается в виде двух составляющих, фаза несущей для которых отличается на  $90^\circ$  (квадратуры).

Для имитации навигационных сигналов в первую очередь был рассмотрен вариант, при котором математическая модель навигационного сигнала, формируемого в MATLAB, содержала полную информацию, включая отсчёты синусоидального колебания на несущей частоте, а генерация осуществлялась в режиме прямого цифрового синтеза.

Практическая реализация показала, что подобный вариант обладает следующими недостатками:

- запись только одного сегмента навигационного сигнала длительностью 1,9565 мкс занимает неоправданно долгое время (более 10 минут), при загрузке данных в память ГСПФ посредством интерфейса Ethernet;
- объём доступной памяти ГСПФ позволяет записать малую часть кадра навигационного сигнала (менее 100 мс).

В то же время данный способ в перспективе позволит обеспечить наиболее гибкий способ имитации навигационных сигналов с минимально возможными вносимыми искажениями. Для его реализации потребуется ГСПФ с большим объёмом памяти и широкополосным интерфейсом дистанционного управления (например, PCIe версии 4).

В итоге был выбран режим генерации с интерполяцией (INTx12) при тактовой частоте 600 МГц. В этом режиме запись в память ГСПФ одного периода псевдослучайной последовательности занимает до 2 минут.

Для управления ГСПФ разработано специальное программное обеспечение, которое реализует математическое моделирование навигационных сигналов GPS C/A, GPS L5, ГЛОНАСС L1, ГЛОНАСС L2 (частотное разделение), ГЛОНАСС L3 (кодированное разделение) (рис. 3). Для имитации переходного процесса, наблюдаемого в реальных навигационных сигналах при смене фазы, использовались различные формы огибающей: трапецеидальная, гауссиан, прямоугольная (без огибающей).

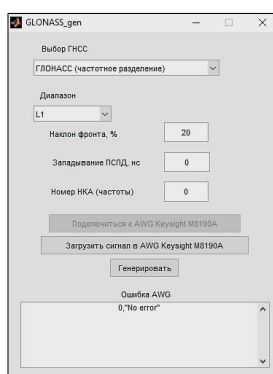


Рис. 3. Интерфейс программы управления генератором M8190A

Предварительная оценка правильности моделирования навигационных сигналов осуществлялась с помощью осциллографа цифрового LeCroy WaveMaster 820Zi-A, на экране которого наблюдался сформированный сигнал и осуществлялся анализ формы огибающей и переходных процессов в моменты фазовой манипуляции.

Экспериментальная проверка качества работы ГСПФ в режиме имитации навигационных сигналов проведена с использованием приёмника навигационных сигналов МРК-113. Схема измерений представлена на рис. 4. Для обеспечения нормального режима работы приёмника формируемый ГСПФ сигнал подавался на вход «НС» с ослаблением 70 дБ. Для обеспечения хорошего приёма и во избежание срывов генератор и приёмник должны быть синхронизированы — в качестве источника опорной частоты генератора и приёмника использовался стандарт частоты FS725.

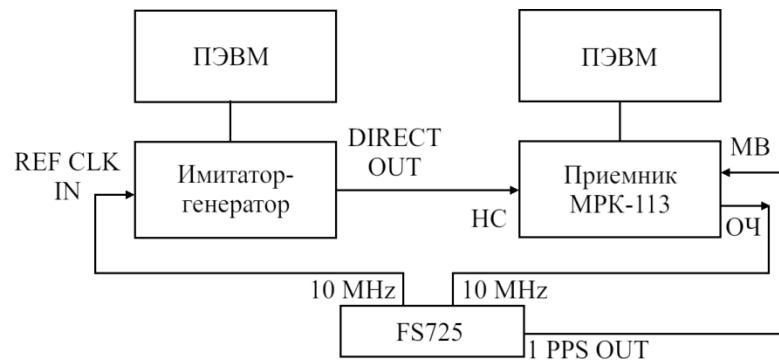


Рис. 4. Схема измерений

При анализе параметров имитируемых навигационных сигналов с помощью приёмника использовались различные формы огибающей и задавались некоторые значения доли длительности символа ПСП, занимаемой фронтом огибающей. При больших значениях этого параметра (более 20 %) наблюдался срыв приёма. Результаты измерений СКО задержки псевдодальности генерируемых сигналов без огибающей приведены в таблице 1. Измерения производились после вычисления приёмником 20 значений задержки (приёмник вычисляет одно значение задержки раз в три секунды).

Таблица 1

Результаты измерения СКО задержки псевдодальности генерируемого сигнала

Тип сигнала	СКО, нс
ГЛОНАСС L1OF	0,003 нс
ГЛОНАСС L2OF	0,003 нс
ГЛОНАСС L3ОСР	0,001 нс
GPS L1 C/A	0,001 нс
GPS L5-I	0,002 нс
GPSL5-Q	0,002 нс

Также проведена оценка возможности внесения искажений в имитируемый ГСПФ навигационный сигнал. Осуществлялось увеличение длительности огибающей псевдослучайной последовательности (ПСП) относительно нормального значения 1 мс. Проведены измерения СКО задержки псевдодальности для всех имитируемых сигналов при разных значениях установленной задержки. Полученные результаты представлены в таблице 2. При установленной задержке более 30 нс происходил срыв приёмника.

Таблица 2

Результаты измерений СКО задержки псевдодальности в режиме имитации навигационных сигналов с искажением длительности огибающей ПСП

Тип сигнала	Вариант 1 (10 нс)	Вариант 2 (20 нс)	Вариант 3 (30 нс)
ГЛОНАСС L1OF	10,060 нс	20,123 нс	–
ГЛОНАСС L2OF	10,058 нс	20,128 нс	30,192 нс
ГЛОНАСС L3ОСР	10,000 нс	20,178 нс	30,185 нс
GPS L1 C/A	10,062 нс	20,107 нс	–
GPS L5-I	9,820 нс	20,129 нс	30,116 нс
GPSL5-Q	9,815 нс	20,129 нс	30,118 нс

Таким образом, по результатам, приведённым в таблице 1, можно сделать вывод, что возможности использовавшегося ГСПФ позволяют применять его для имитации сигналов различных ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, Galileo), при этом обеспечивается низкий уровень СКО задержки псевдодальности в формируемом навигационном сигнале. Кроме этого, результаты, представленные в таблице 2, свидетельствуют о возможности внесения произвольных искажений в имитируемые навигационные сигналы. Дальнейшие исследования следует направить на более глубокий анализ взаимосвязи имитируемых и измеренных значений СКО задержки псевдодальности.

### Список литературы

1. Interface control document. Navigational radiosignal in bands L1, L2 (Edition 5.1) // Российские космические системы: [сайт]. — Moscow, 2008. — URL: [http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_eng\\_v5.1.pdf](http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_eng_v5.1.pdf) (дата обращения: 20.11.2020).
2. Interface Control Document. Navigational radiosignal in bands L1, L2. (Edition 5.1) // GPS.gov: [website]. — URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200L.pdf> (date of the application: 20.11.2020).
3. Signal-in-space interface control document // European GNSS Service Centre: [website]. — URL: <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf> (date of the application: 20.11.2020).
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2000. — 462 с.

*Статья поступила в редакцию: 26.03.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 05.04.2021 г.*

*Статья принята в работу: 16.04.2021 г.*