Программно-аппаратная реализация наземного псевдоспутника

Software and hardware implementation of the terrestrial pseudosatellite

Гарин / Garin E.
Евгений Николаевич
(Vii@sfu-kras.ru)
доктор технических наук, профессор.
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), директор Военно-инженерного института.
г. Красноярск

Ратушняк / Ratushniak V.
Василий Николаевич
(oborona-81@ya.ru)
кандидат технических наук, доцент.
СФУ, доцент Военно-инженерного института.
г. Красноярск

Гладышев / Gladyshev A.
Андрей Борисович
(a-glonass@yandex.ru)
СФУ, доцент Военно-инженерного института.
г. Красноярск

Тяпкин / Tyapkin I.
Игорь Валерьевич
(Aronakss@ yandex.ru)
СФУ, преподаватель Военно-инженерного института.
г. Красноярск

Соколовский / Sokolovskiy A.
Алексей Владимирович
(sokolovskii_a@mail.ru)
СФУ, доцент Военно-инженерного института.
г. Красноярск

Ключевые слова: радионавигационная система ближней навигации – navigation system short-range navigation; псевдоспутник – pseudosatellites; передающая аппаратура псевдоспутника – transmission equipment of the pseudo ground; наземная радиомаячная система – radio beacon landing system.

Рассматриваются особенности программной реализации формирования навигационных сигналов псевдоспутников наземной радионавигационной системы. Приведена программная модель формирования навигационных сигналов и аппаратное оборудование, осуществляющее генерацию радионавигационного сигнала псевдоспутника.

The features of the software implementation of the formation of navigation signals of the pseudosatellite ground radio navigation system are considered. A software model for generating navigation signals and hardware that generates a pseudosatellite radio navigation signal is presented.

Введение

Анализ российских и зарубежных проводимых исследований в области наземных радионавигационных систем (РНС) показывает существенный интерес потребителей высокоточной навигационной информации и производителей аппаратуры к системам навигации, являющимся дополнением к существующими ГНСС и позволяющим увеличить их точность и помехоустойчивость. Одним из преимуществ рассматриваемой наземной радионавигационной системы на основе псевдоспутников (ПС), в отличие от ГНСС, является возможность выбора конфигурации группировки РНС, уровня энергетики радиолинии РНС, частотно-кодовой структуры радионавигационных сигналов ПС. В свою очередь оптимальное использование достоинств РНС предоставляет возможность варьировать такими характеристиками как: частотно-кодовой структурой радионавигационных сигналов, помехоустойчивостью РНС, границами и пространственной формой зоны навигации, кратностью навигационного поля, уровнем целостности РНС и др.

Конфигурирование навигационного поля РНС на основе ПС и распределение энергетики радиолинии в зоне навигации потребителей определяется исходя из размеров зоны навигации потребителей, требуемой точности измерения радионавигационных параметров сигналов, а также исключения перегрузки приемных трактов потребителей мощными полезными сигналами. Исходя из динамического диапазона навигационной аппаратуры потребителей (НАП) и границ геометрической зоны навигации объектов, а также возможностей формирования требуемых диаграмм направленностей

3 2019 □□□□□□□.indd 25 19.09.2019 11:06

передатчиков ПС (например, в местности со сложным рельефом Земли) требуется сконфигурировать расположение ПС в РНС [1, 2].

Вместе с этим при разработке системы ближней навигации на основе ПС возникает комплексная задача выбора частотно-кодовой структуры радионавигационных сигналов ПС. Навигационная аппаратура потребителей, работающая по сигналам ГНСС ГЛОНАСС и GPS, должна с минимальными модификациями быть способна обнаружить и следить за навигационными сигналами ПС с учетом минимизации кросс-корреляции с сигналами ГНСС ГЛОНАСС и GPS. Для этого предлагается использовать широкополосные сигналы с частотным или кодовым разделением близкие по своей структуре и частотному диапазону к сигналам ГНСС.

Программная реализация радионавигационных сигналов ПС

Использование кодового разделения навигационных сигналов ПС не приводит к значительным доработкам НАП, поскольку кодовая последовательность сигналов стандартной точности ГНСС ГЛОНАСС и GPS имеет запас более 1000 кодовых комбинаций и ещё больше кодовых последовательностей в широкополосных сигналах высокой точности. По результатам проведенного математического и компьютерного моделирования широкополосных сигналов с различными задающими полиномами со структурами, близкими к структуре сигналов ГНСС, получены нормированные корреляционные и взаимнокорреляционные функции сигналов. Наилучшими корреляционными свойствами формируемых псевдослучайных последовательностей (ПСП) радионавигационных сигналов, обеспечивающих малый уровень выбросов взаимнокорреляционной функции, являются кодовые последовательности Касами. Исходя из необходимости использования радиосигналов РНС подобной по своей структуре к сигналам ГНСС и анализа корреляционных свойств рассмотренных ПСП радионавигационных сигналов, в РНС предлагается использовать широкополосный сигнал с дальномерным кодом из 511 символов [1, 2].

На сегодняшний день для формирования радионавигационных сигналов со своей кодовой ПСП в основном используются векторные генераторы сигналов, для которых модулирующая последовательность формируется путем считывания из памяти или в реальном масштабе времени. Процесс формирования навигационного сигнала заключается в создании квадратурных составляющих, закон изменения во времени которых соответствует полиному кодовой последовательности, и модулировании этой последовательностью цифровой информации передаваемого навигационного сообщения.

Основой формирования цифрового кода модулирующей последовательности является ПЛИС. Использование CORDIC процессора, который по аппаратным ресурсам идентичен конвейерному процессору и работает в режиме вращения, в то же время позволяет получить сразу квадратурные составляющие псевдослучайной последовательности навигационного сигнала $I(t)$ и $Q(t)$ [3, 4].

Итерационный метод формирования цифрового кода модулирующей последовательности сводится к выполнению простых операций сложения и сдвига вычислений угла вращения вектора сигнала в соответствии с выражением (1):

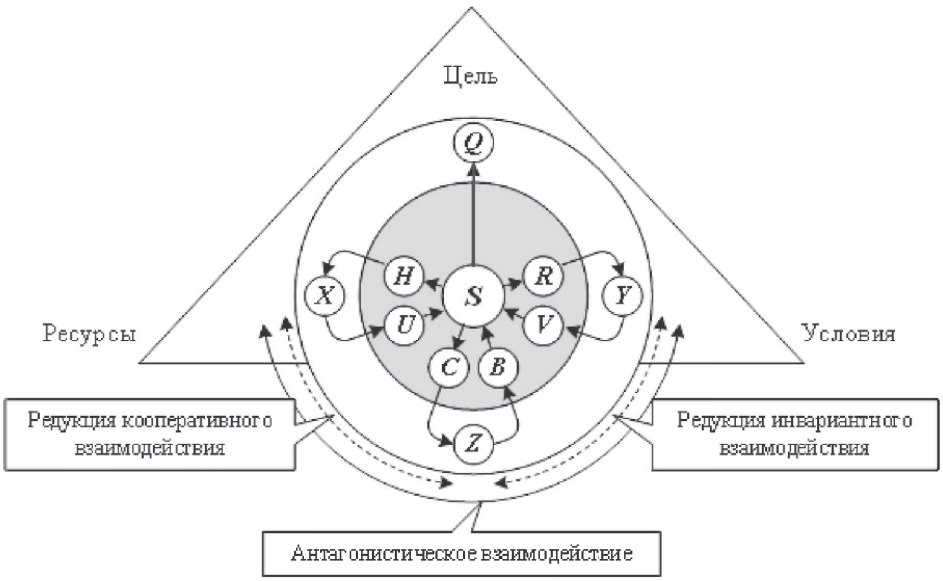

Рис. 1. Динамическая модель функционирования объектов СИКС в условиях антагонистического и неантагонистического (кооперативного или инвариантного) взаимодействия

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - d_i y^{(i)} 2^{-i},$$
$$y^{(i+1)} = y^{(i)} + d_i x^{(i)} 2^{-i},$$
$$z^{(i+1)} = z^{(i)} - d_i \tan^{-1} 2^{-i} \qquad (1)$$

где $x=\cos(z)$, $y = \sin(z)$, z – целевой угол, $d \in \{-1, 1\}$.

Существует несколько основных архитектур ПЛИС, каждая из которых имеет преимущество либо по скорости работы, либо по простоте реализации. При разработке вычислительных архитектур, работающих на частотах 100–200 МГц, необходима конвейеризация вычислений. Несмотря на то что конвейерная архитектура имеет большие накладные расходы на выравнивание задержек вычислительных блоков, её использование оправданно при обработке и преобразования сигналов при решении навигационных задач.

Для ускорения вычислений угла вращения вектора сигнала предварительно рассчитываются промежуточные значения $\tan^{-1}2^{-i}$ и сохраняются в регистрах. На каждой итерации проверяется знак промежуточного значения угла, далее выбирается приращение угла на следующей итерации конвейера.

Конвейерная реализация позволяет вычислять значения $I(t)$ и $Q(t)$ за один такт, и способна работать на частоте более 100 МГц (рис. 1).

Программная реализация формирования радионавигационных сигналов псевдоспутника позволяет использовать как стандартный формат кадра навигационного сообщения, так и изменённый формат для использования для специальных потребителей. Это реализуется разделением блоков формирования дальномерной последовательности и навигационного сообщения.

На рис. 2 изображена структурная схема формирования радионавигационных сигналов ПС. Все блоки на схеме синхронизированы между собой с помощью блока генерации сигналов синхронизации (рис. 3).

Гибкая программная архитектура LabVIEW позволяет запрограммировать в ПЛИС необходимый ансамбль псевдослучаинои последовательности навигационных сигналов и далее произвести автоматическую компиляцию кода vi LabVIEW в VHDL, для реализации логики ПЛИС (Рис. 4).

Для формирования дальномерной ПСП используется сдвиговый регистр и блок логического суммирования Mod 2. Формирование дальномерной ПСП осуществляется в блоке генерации дальномерного кода (рис. 5).

На входы логического сумматора Mod 2 подаются биты 5 и 9 сдвигового регистра. Результат суммирования по модулю 2 подаётся на вход сдвигового регистра в бит 1. Дальномерная ПСП снимается с 8 бита сдвигового регистра.

Сформированная дальномерная ПСП переносится на промежуточную частоту в блоке переноса на промежуточную частоту с помощью генератора литерной частоты на базе CORDIC генератора гармонических сигналов с непрерывной фазой и схемы модуляции квадратурного сигнала по коду дальномерной ПСП (рис. 6).

CORDIC генератор гармонических сигналов синхронизируется тактовыми импульсами ПЛИС частотой 100 МГц и на выходе выдаёт квадратурный сигнал с шириной спектра 50 МГц. Значение частоты задаётся с шагом 6103,5 Гц. Квадратурный сигнал на заданной промежуточной частоте подаётся на инвертор для параллельного формирования отрицательного значения сигнала и заводится на селектор, вместе с положительным значением сигнала. Селектор переключает текущее значение гармонического сигнала в соответствие со значением бит дальномерной ПСП. Селектор синхронизируется тактовыми импульсами дальномерной ПСП с частотой 511 кГц.

Сформированный сигнал дальномерной последовательности на промежуточной частоте модулируется навигационным сообщением, выборки которого предварительно буферизируются и синхронизируются общим тактовым сигналом на ПЛИС в блоке BPSK модуляции (рис. 7). Буферизация осуществляется по

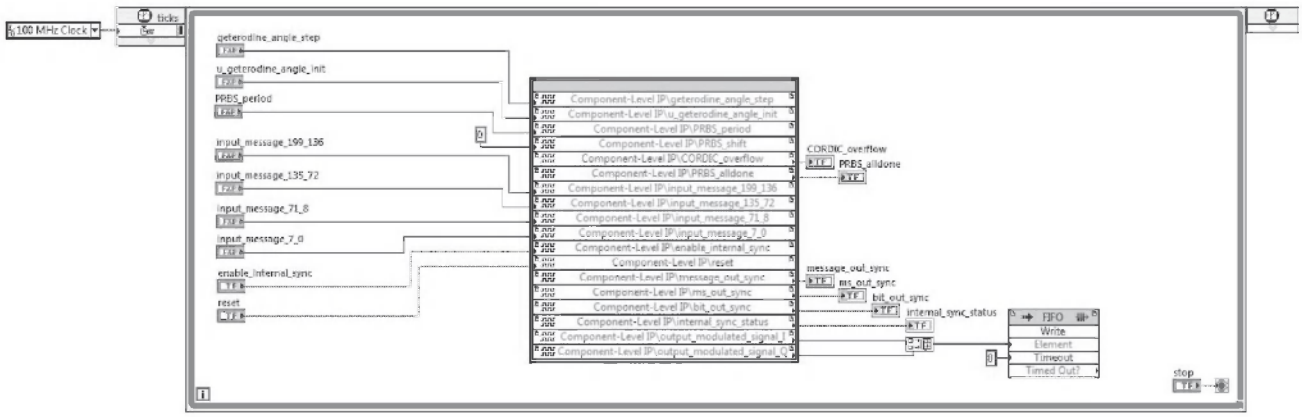

Рис. 1. Конвейерная реализация I(t) и Q(t) CORDIC процессора

3 2019 □□□□□□□.indd 27 19.09.2019 11:06

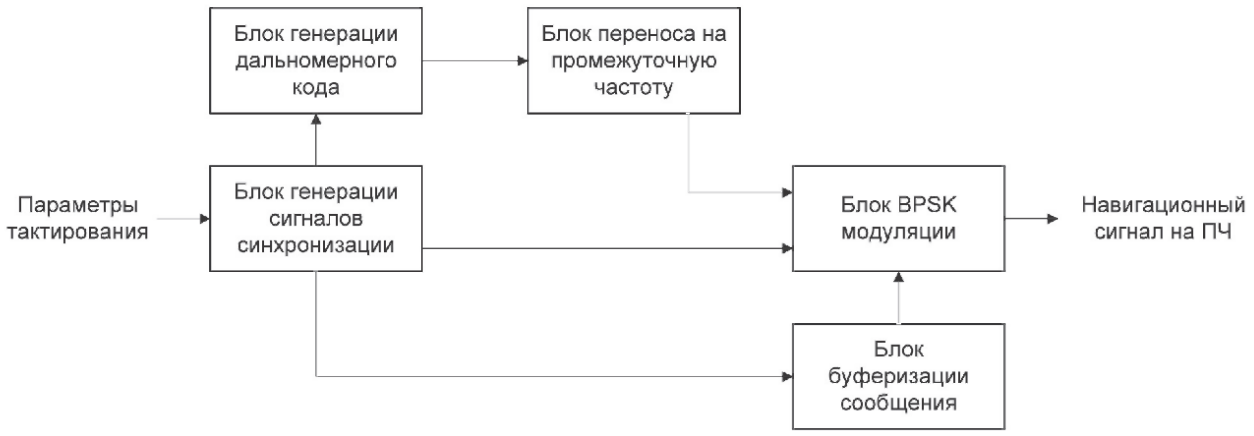

Рис. 2. Структурная схема программно-аппаратной реализации радионавигационных сигналов ПС

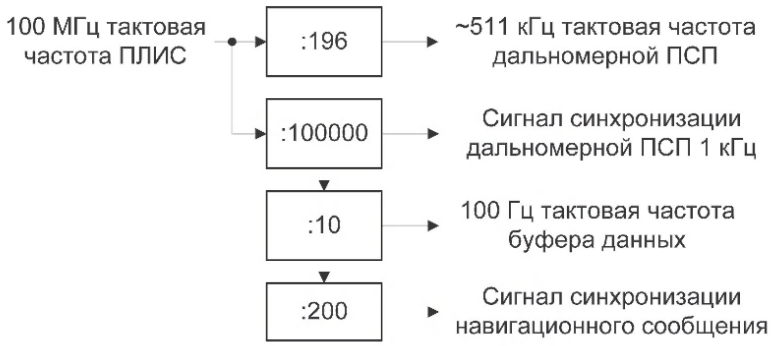

Рис. 3. Структурная схема блока генерации сигналов синхронизации

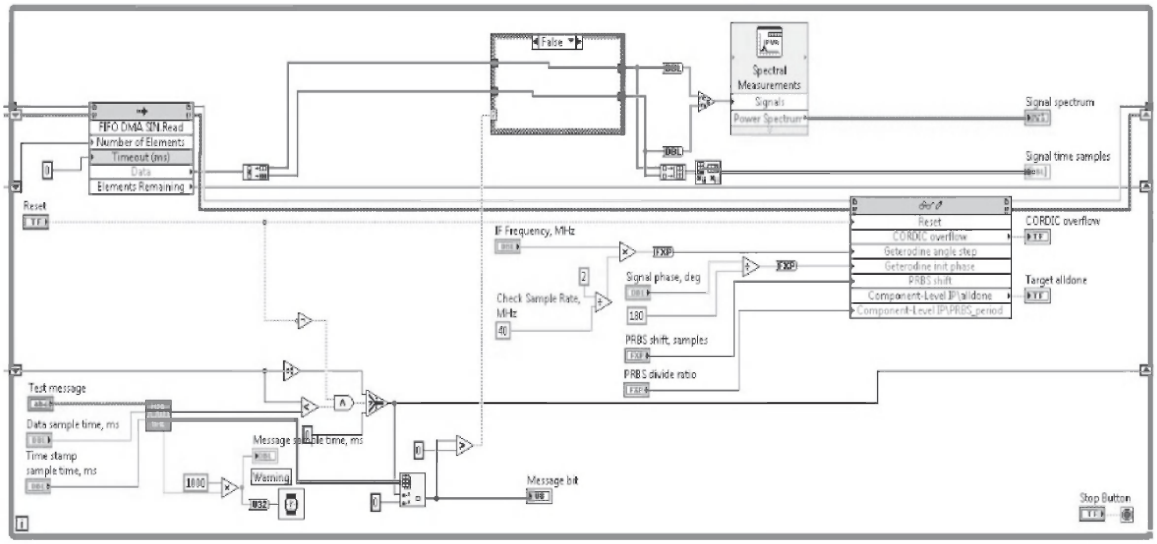

Рис. 4. LabVIEW VI блок диаграмма формирования навигационного сигнала ПС

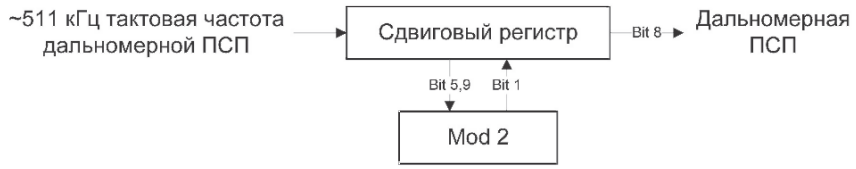

Рис. 5. Блок генерации дальномерного кода

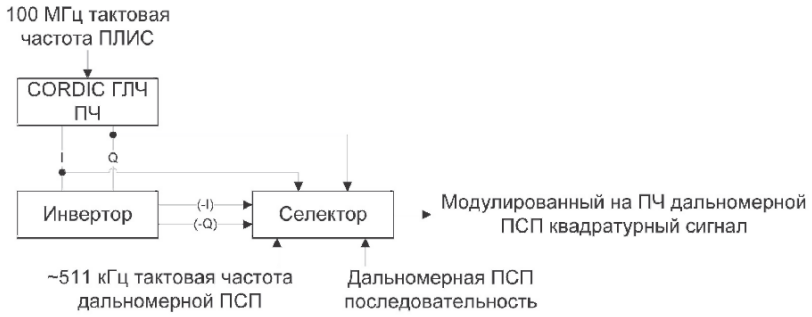

Рис. 6. Блок переноса на промежуточную частоту

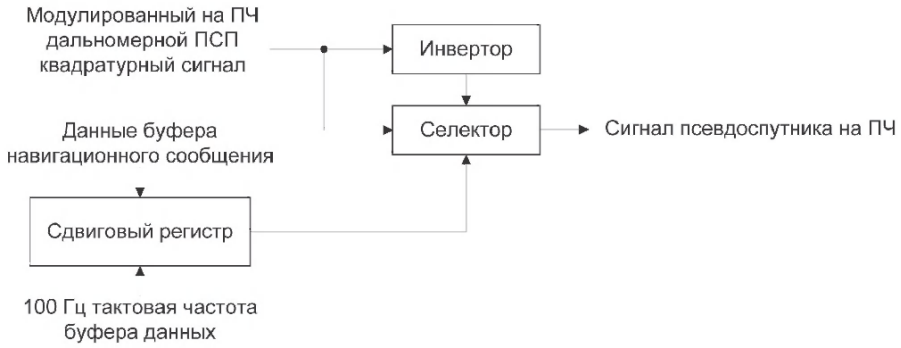

Рис. 7. Блок BPSK модуляции

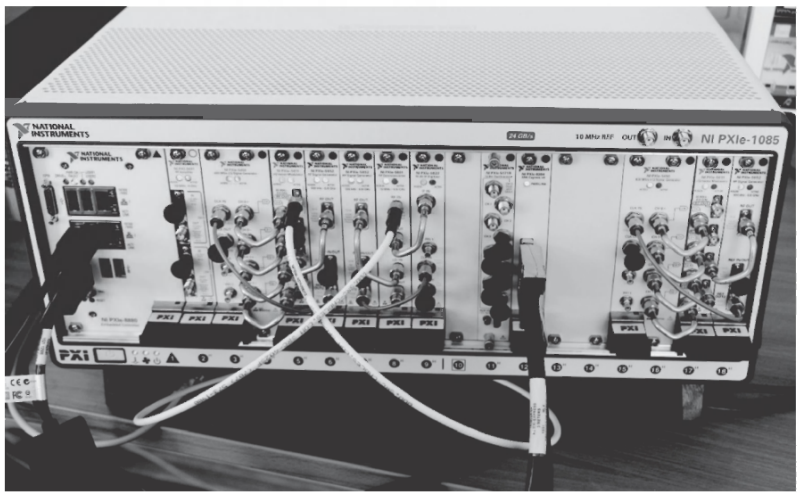

Рис. 8. Внешний вид аппаратурного оборудования генерации радионавигационных сигналов ПС

3 2019 □□□□□□□ .indd 29 19.09.2019 11:06

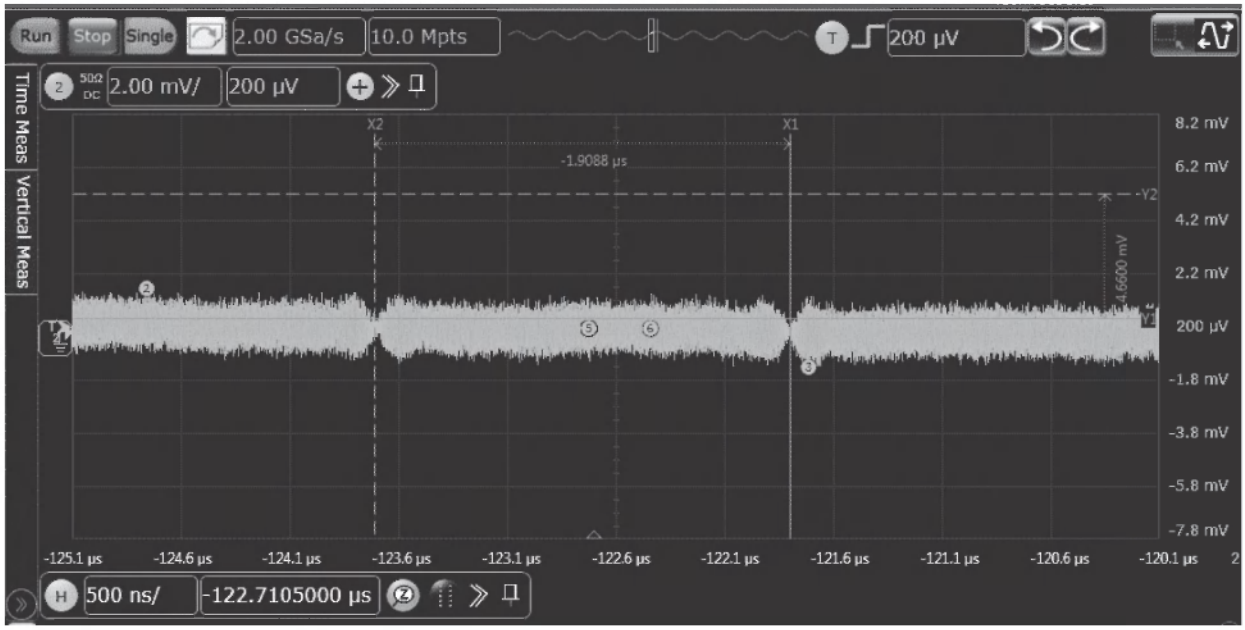

Рис. 9. Осциллограмма дискреты ПСП радионавигационного сигнала ПС

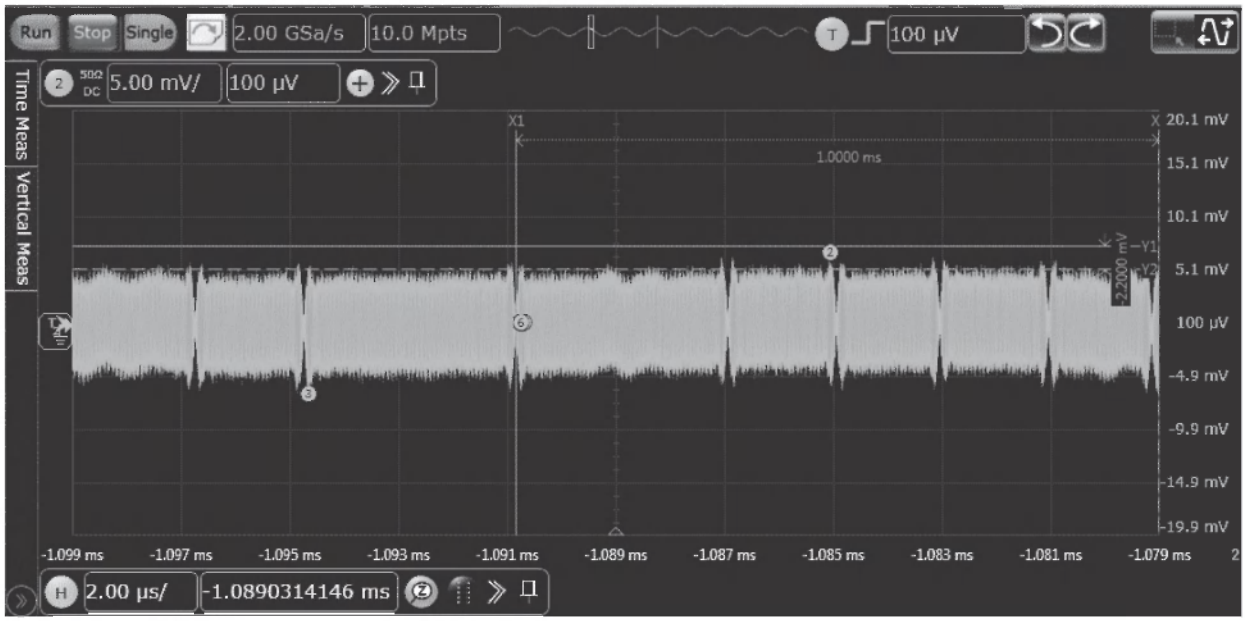

Рис. 10. Осциллограмма структуры ПСП радионавигационного сигнала ПС

сигналу синхронизации навигационного сообщения, который генерируется на ПЛИС в блоке генерации сигналов синхронизации. Буферизация сохраняет данные строки навигационного сообщения в буфере навигационного сообщения для построчной, синхронизированной с дальномерным кодом, передачи данных в блоке BPSK модуляции.

На данном этапе исследования тестовые данные навигационного сообщения записаны непосредственно во внутренний регистр ПЛИС. Таким образом, это позволяет сформировать требуемую ПСП радионавигационных сигналов на основе М-последовательности, кода Голда, Касами, заданную с любым полиномом, сравнить корреляционные характеристики сигналов и по результатам этого анализа, на этапе проектирования, принять решение о применении той или иной ПСП в радионавигационных сигналах.

Тестовое навигационное сообщение записывается в буфер ПЛИС. На приборной панели возможно установить значение промежуточной частоты дальномерной последовательности, начальную фазу генератора литерной частоты, параметр тактирования дальномерной последовательности от тактовой частоты ПЛИС, включение/выключение использования блока генерации сигналов синхронизации, сброс аппаратных блоков.

Аппаратная реализация радионавигационных сигналов ПС

Для сокращения времени и стоимости разработки аппаратной реализации целесообразно использовать ряд возможных модульных элементов оборудования. Например, модули PXI National Instruments (NI), такие как: векторные генераторы, анализаторы, программируемые ПЛИС, ЦАП и АЦП, которые полностью удовлетворяют требования по созданию радионавигационных сигналов заданной структуры, их генерации в среду распространения и позволяют гибко управлять параметрами сигналов и в целом обеспечением зоны навигации РНС (рис. 8).

Прототип имитатора сигнала ПС на промежуточной частоте реализован на модуле NI FlexRIO PXIe-7976R на базе ПЛИС Xilinx K710T, которая обеспечивает в задачах цифровой обработки радионавигационных сигналов максимальную гибкость. В ПЛИС задается ПСП навигационного сигнала с модулированием оперативной информации и формируется закон изменения квадратурных составляющих во времени, которые соответствуют полиному кодовой последовательности и цифровой информации передаваемого навигационного сигнала. В векторном генераторе сигналов NI PXIe-5673 используется прямой перенос сигналов из основной полосы в радиочастотный диапазон. На входе векторного модулятора NI PXIe-5611 поступают синфазная и квадратурная составляющие навигационного сигнала и непрерывный ВЧ-сигнал на несущей частоте с высокочастотного генератора NI PXI-5652 [5]. Аппаратная реализация ПС позволяет генерировать требуемые навигационные сигналы с возможностью изменения несущей частоты сигнала, его кодовой структуры, навигационной оперативной информации в заданных пределах уровня мощности.

Для примера, на рис. 9 и 10 представлены осциллограммы сформированного навигационного сигнала с частотой 1602 МГц, длительностью дискреты ПСП 1,9 мкс и длительностью ПСП 1 мс.

Заключение

Таким образом, данная программно-аппаратная реализация наземного псевдоспутника позволяет формировать кодовые ПСП на основе различных полиномов и передавать, в соответствии с разработанным форматом, оперативную информацию навигационного сообщения с требуемым качеством. Гибкое управление модульными элементами наземного псевдоспутника обеспечивает формировать заданную частотно-кодовую структуру радионавигационных сигналов и мощность излучаемых сигналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10089).

Литература

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1) / Координационный научно-информационный центр. – М., 2008.

2. Гарин, Е. Н. Создание радионавигационных сигналов псевдоспутников на основе программно-аппаратного комплекса National Instruments / Е.Н. Гарин, В.Н. Ратушняк, А.В. Соколовский // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. / науч. ред. А. И. Громыко ; отв. за вып. А. А. Левицкий. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. – С. 171–176.

3. Анализ эффективности VHDL-описаний архитектур сумматоров / А.В. Соколовский [и др.] // Наукоемкие технологии. – 2017. – Т. 18, № 12. – С. 66–68.

4. Hardware implementation of the unit of the GNSS consume / A. Sokolovskiy [et al.] // Siberian Journal of Science and Technology – 2017. – Vol. 18, No. 3. – P. 604–609.

5. Garin E. Study of errors in measuring the coordinates in a ground-based near-navigation system based on pseudolites / E. Garin, D. Dmitriev, V. Ratushnyak // Progress of modern radio electronics. – 2016. – No. 11. – P. 132–136.

3 2019 □□□□□□□.indd 31 19.09.2019 11:06