

Библиографические ссылки

1. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29). С. 4–9.
2. Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем. М. : Наука, 1970. 252 с.
3. Орлов А. И. Нечисловая статистика. М. : МЗ-Пресс, 2004.
4. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск : Изд-во Ин-та математики, 1999. 270 с.
5. Данилин Н. С. Диагностика и контроль качества изделий цифровой микроэлектроники. М. : Изд-во стандартов. 1991. 176 с.

References

1. Medvedev A. V. [Theory of nonparametric system. Processes]. *Vestnik SibGAU*. 2010, no. 3 (29), p. 4–9.
2. Cypkin Ja. Z. *Osnovy teorii obuchajushhihsja system* (Fundamentals of the theory of learning systems). Moscow, Nauka, 1970, 252 p.
3. Orlov A. I. *Nechislovaja statistika* (Non-numeric statistics). Moscow, M3-Press, 2004.
4. Zagoruiko N. G. *Prikladnye metody analiza dannyh i znaniy* (Applied methods of data analysis and knowledge). Novosibirsk, Publish Mathematics Institute, 1999, 270 p.
5. Danilin N. S. *Diagnostica i kontrol kachestva izdelii cifrovoj mikroelektroniki* (Diagnostics and quality control of digital microelectronics products). Moscow, Standards Publisher, 1991.

© Коплярова Н. В., Орлов В. И., 2014

УДК 621.396.6

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАТОРОВ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

С. С. Красненко¹, А. В. Пичкалев¹, Д. А. Недорезов¹, А. Ю. Лапин¹, О. В. Непомнящий²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: t_150@list.ru

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: 2955005@gmail.com

Изложены результаты анализа основных проблем создания имитаторов навигационных сигналов. Рассмотрены принципы организации испытательных комплексов для тестирования и наземных испытаний навигационных приемников космических аппаратов. Исследованы используемые и перспективные методы формирования навигационного сигнала в действующих имитаторах. Предложен подход к реализации многоканальных имитаторов на основе ПЛИС и магистрально-модульного построения отладочного комплекса. Представлен способ реализации навигационного процессора на кристалле ПЛИС. Предложено перспективное решение для создания совмещенной схемы имитатора орбитальных навигационных приемников.

Ключевые слова: навигационный приемник, имитатор радионавигационного сигнала, принципы синтеза сигнала, цифровой синтез, модульные приборы.

METHODS OF REALIZATIONS OF SATELLITE RADIONAVIGATION SYSTEM SIMULATORS

S. S. Krasnenko¹, A. V. Pichkalev¹, D. A. Nedorezov¹, A. U. Lapin¹, O. V. Nepomnyashchy²

¹JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
E-mail: t_150@list.ru

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: 2955005@gmail.com

The results of the analysis of creation simulators of navigation signals are presented. The principles of the design of systems for testing and ground debug of spacecraft’s navigational receivers are discussed. Present and promising methods of a navigation signal forming in existing simulators are considered. The approach for multi-channel

simulators development based on FPGA and bus-modular systems debug is presented. The way of implementation of the navigational processor on-FPGA chip is suggested. A promising solution for the combined circuit simulator of orbital navigation receivers is proposed.

Keywords: navigation receiver, simulator of a radio navigation signal, principles of signal synthesis, digital synthesis, modular devices.

На сегодняшний день уровень развития спутниковых радионавигационных систем (СРНС) позволяет обеспечить координатно-временными параметрами космические аппараты (КА), находящиеся на геостационарных (ГСО) и высокоэллиптических орбитах. Для этого в ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева на основе соответствующих методов позиционирования был разработан специализированный радионавигационный приемник [1]. Его установка на КА, находящихся на ГСО, обеспечила контроль полета в автоматическом режиме, а точность позиционирования увеличилась до нескольких сотен метров, заменив дорогостоящую астрономическую обсервацию с точностью позиционирования несколько километров.

Для проверки, отладки и метрологической сертификации навигационных приемников (НП) [2], в том числе специализированных (орбитальных), необходима сертифицированная контрольно-испытательная аппаратура, в состав которой в обязательном порядке должен входить имитатор радионавигационных сигналов (ИРНС), эмулирующий реальное функционирование НП. ИРНС для проверки функционирования приемников формирует как единичные навигационные сигналы (НС) с известными параметрами для проверки каналов приема, так и сигналы от навигационных космических аппаратов (НКА) СРНС ГЛОНАСС и GPS для проверки НП на выполнение своей целевой задачи. Также при помощи ИРНС производится измерение погрешности определения навигационных параметров. Принципам построения ИРНС и способом формирования НС и посвящена данная статья.

Самый очевидный способ реализации ИРНС – раздельный поканальный синтез НС, когда навигационные сигналы формируются специальными цифровыми синтезаторами (ЦС) или некими их аналогами, сглаживаются фильтрами нижних частот (ФНЧ), переносятся в высокочастотную (ВЧ) область раздельно для каждого канала и затем суммируются в сигнал, имитирующий требуемую навигационную обстановку (рис. 1). Данный способ позволяет калибровать и настраивать каждый канал синтеза сигнала, а также раздельно управлять тактовыми частотами синтезаторов сигнала для имитации эффекта Доплера. Это позволяет весьма качественно генерировать единичные навигационные сигналы. Однако в этом способе реализации имеется один существенный минус – «рассогласованность» (метрологическая неидентичность) каналов и, как следствие, различное время прохождения сигналов в каналах. Стоит отметить, что разность прохождения сигналов в каждом радиотракте (межканальное расхождение) в 10 нс дает погрешность определения координат около трех метров. Данный недостаток можно частично устранить при помощи введения обратных связей, схем управления и синхронизации, тем самым уменьшив межканальное расхождение сигнала до 1 нс, а погрешность до 30 см, но это значительно усложняет конструкцию имитатора и, следовательно,

удорожает его производство. Самотестирование и самокалибровка таких приборов после включения займет порядка 30–40 мин. А стоимость (например, имитаторов Spirent Communications GSS8000, GSS7790, GSS7600, где применяется раздельный поканальный синтез НС) доходит до 900 млн руб.

Реализация полного цифрового синтеза НС с суммированием сигнала от каждого синтезатора на промежуточной частоте (ПЧ) и последующим переносом группы сигналов в ВЧ-область практически устраняет метрологическую неидентичность каналов, присущую раздельному поканальному синтезу. В этом способе дискретные синтезаторы тактируются одной частотой F_T , из-за чего перестройка частоты при имитации эффекта Доплера идет с дискретизацией, определяющейся F_T и характеристиками самих синтезаторов (рис. 2). Данный способ довольно прост в реализации и является относительно недорогим, но возникает сложность обеспечения согласованной работы каналов цифрового синтеза на ПЧ. Если при разработке топологии печатной платы и конструкции прибора учесть все разности прохождения тактового и навигационного сигналов от каждого синтезатора до сумматора, а также построить схемы фазовой автоподстройки частоты, то можно уменьшить погрешность позиционирования от межканального расхождения сигналов до 1–2 м без сложных схем синхронизации и калибровки и при условии не более шести каналов имитации. Так разрабатывались первые серийные ИРНС, такие как, например, 6-канальный МРК-40 ОАО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) или 4-канальный СН-3802 ЗАО «КБ «Навис» (г. Москва). Однако так как все современные НП имеют 12 и более каналов приема НС, такие ИРНС уже не обеспечивают всей полноты проверки навигационных приемников.

Проблему увеличения числа каналов имитации НС без использования сложных схем синхронизации и калибровки может решить интегрирование синтезаторов и сумматора в единую цифровую схему, что обеспечит согласованную работу всех каналов синтеза НС (рис. 3) [3].

Современные технологии позволяют организовать прямой полный цифровой синтез и суммирование НС в цифровом виде с достаточно большим частотным разрешением. Это позволяет избежать рассогласованной работы каналов синтеза НС. В качестве носителя единой цифровой схемы можно использовать кристалл программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Современные быстродействующие ПЛИС позволяют интегрировать большое число синтезаторов, организовывать генерацию и суммирование НС в режиме реального времени. Суммарный НС в цифровой форме можно подавать на вход быстродействующего цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и переносить в ВЧ-область обычным преобразователем частоты вверх.

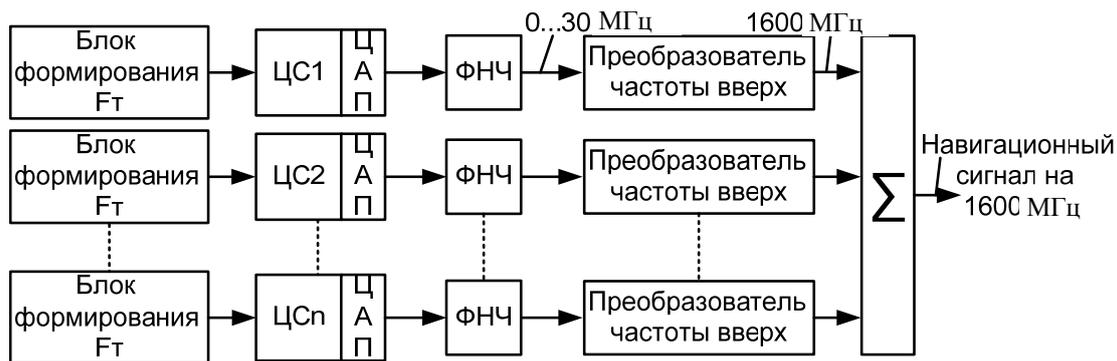


Рис. 1. Формирование НС с разделным поканальным синтезом

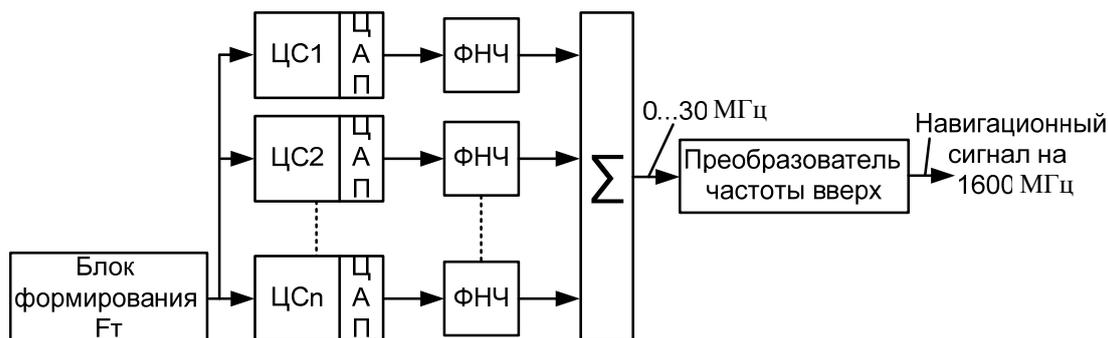


Рис. 2. Формирование НС дискретными синтезаторами на ПЧ

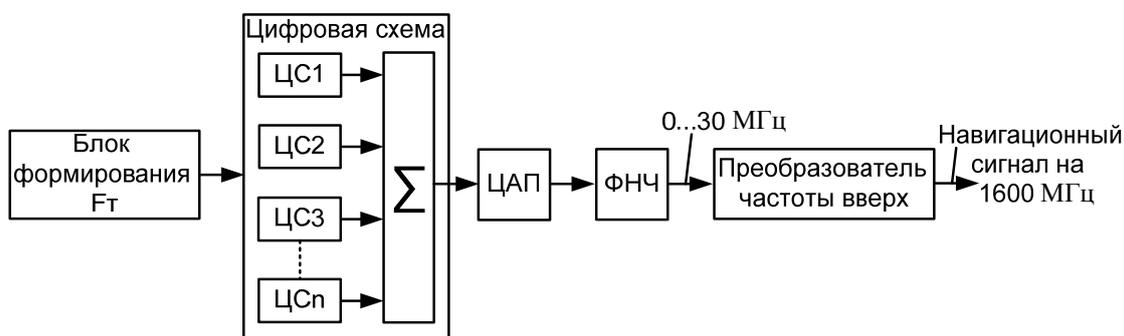


Рис. 3. Формирование НС интегрированными синтезаторами

Единственным недостатком данного способа является наличие существенной погрешности перестройки частоты при имитации эффекта Доплера (впрочем, не превышающей аналогичную погрешность предыдущего способа). Перестройка осуществляется с дискретным шагом, определяющимся частотой тактирования и характеристиками интегрированных синтезаторов, т. е. дальность между НП и НКА по средством НС описывается с помощью специальной кусочно-линейной аппроксимации. Так как распознавание НС в НП осуществляется путем определения максимума корреляционной функции, то этот недостаток можно частично компенсировать путем применения усредняющей аппроксимации.

Можно сразу учесть все погрешности дискретизации, если заранее синтезировать весь спектр НС в цифровом виде, а затем перевести его в аналоговый

вид сверхбыстродействующим ЦАП с последующим переносом его в ВЧ-область. Для получения полного НС в цифровом виде можно использовать вычислительные машины различного назначения, а в качестве сверхбыстродействующего ЦАП с преобразователем частоты вверх – программируемый векторный генератор (рис. 4).

Единственным условием успешного формирования НС программным синтезом является обеспечение своевременной подачи рассчитанных значений в ЦАП. Значит, необходимо обеспечить быстрый расчет параметров НС и их непрерывную передачу с соответствующей скоростью, либо (если расчёт с передачей в реальном времени организовать не удастся) полученные значения сигнала необходимо записывать на носитель больших цифровых массивов, после чего по скоростному каналу связи непрерывно передавать данные с носителя на ЦАП.

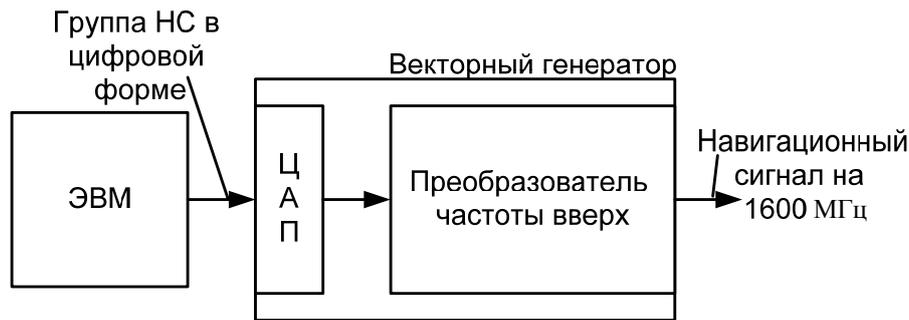


Рис. 4. Формирование НС программным синтезом на векторном генераторе

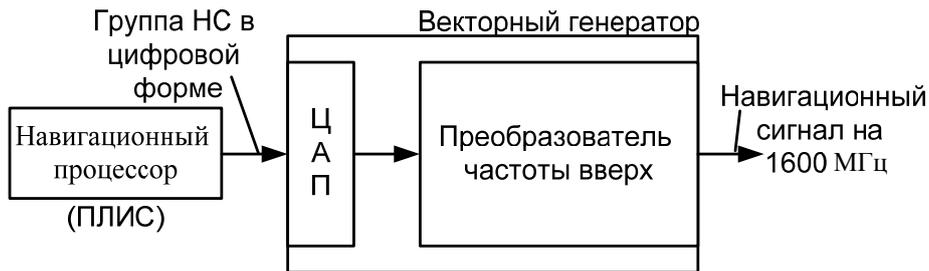


Рис. 5. Формирование НС на векторном генераторе навигационным процессором

Проблему быстрого расчёта и передачи в реальном времени параметров НС может решить специальный навигационный процессор, который выполнит все необходимые действия и обеспечит всеми данными векторный генератор (рис. 5). Серийных микросхем таких специализированных процессоров для формирования радиосигналов пока немного, но можно реализовать его на ПЛИС. Данный способ позволяет создать весьма гибкую схему имитации НС, а современные быстродействующие ПЛИС позволят организовать воспроизведение широкого спектра радиосигналов (и, соответственно, большого числа каналов имитации НС) в режиме реального времени. Данная схема считается наиболее перспективной при реализации ИРНС ГЛОНАСС/GPS для всех видов НП [4].

Для сокращения времени и стоимости разработки ИРНС целесообразно использовать их возможные модульные реализации [5]. Например, модуль PXIe-5641R производства National Instruments (NI), имеющий ПЛИС и по два независимых канала ЦАП и АЦП, хорошо подходит для разработки на его базе имитатора на интегрированных синтезаторах. Реализовав на ПЛИС модуля цифровое формирование НС и пропустив его через встроенные ЦАП, можно получить до 32 НС на ПЧ. Далее полученная группа сигналов переносится в необходимый ВЧ-диапазон модулем преобразователя частоты вверх NI PXI-5610. Управление и программирование производится в разработанной той же NI среде графического программирования LabVIEW, которая позволяет разрабатывать прикладное программное обеспечение для организации взаимодействия с измерительной и управляющей аппаратурой, сбора, обработки и отображения информации, а также моделирования как отдельных объектов, так и автоматизированных систем в целом [6].

Для способа программного синтеза НС прекрасно подходит векторный генератор сигналов NI PXI-5672. Данные модули устанавливаются в шасси (например NI PXIe-1075 с системным контроллером NI PXIe-8130). На системном контроллере – встроенном компьютере – производится расчет НС в цифровой форме. Далее по системной шине шасси сигнал передается на модуль ЦАП NI PXIe-5442 (из состава векторного генератора) для перевода в аналоговую форму, и далее через ВЧ-кабель сигнал поступает на преобразователь частоты вверх PXI-5610. Данный способ позволяет генерировать программно до 9 каналов НС в режиме реального времени. При необходимости большего числа каналов используется RAID-накопитель HDD-8264 с модулем NI 8262.

В настоящее время в ОАО «ИСС» используются для отладки и испытаний орбитальных НП оба ИРНС в модульном исполнении.

Использование современных технологий при создании имитаторов радионавигационных сигналов описанными выше способами позволит решить проблему испытаний специализированных НП, а при модульной реализации с гибким программным обеспечением можно в кратчайшие сроки производить доработку ИРНС для новых видов навигационной аппаратуры.

Библиографические ссылки

1. Двухсистемный навигационный приемник космического аппарата : пат. 112401: МПК G01C21/24 / Зубавичус В. А., Балабанов А. З., Комаров В. А. и др.
2. Непомнящий О. В., Шайдунов В. В., Вейсов Е. А. Проблемы и решения проектирования микропроцессорных модулей навигационной аппаратуры пользователей ГЛОНАСС // Вестник СибГАУ. 2009. № 4 (25). С. 14–18.

3. Красненко, С. С. Многоканальный цифровой синтез в имитаторах радионавигационных сигналов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2013. Т. 6, № 5. С. 521–526.

4. Красненко С. С., Пичкалев А. В. Способы формирования сигналов в радионавигационных имитаторах // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека: Тезисы доклада 2-й Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 30-летию запуска на орбиту первого навигационного космического аппарата «Глонасс» / под общ. ред. Н. А. Тестоедова ; ОАО «Информационные спутниковые системы»; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 75–77.

5. Красненко С. С., Пичкалев А. В. Имитатор радионавигационных сигналов в модульном исполнении // Решетневские чтения : матер. XIV Междунар. науч. конф. Красноярск, 2010. Ч. 1. С. 154–155.

6. Красненко С. С., Недорезов Д. А. Практическое применение модульных приборов компании National Instruments при разработке имитаторов радионавигационных сигналов // Интеллект и наука : тр. XII Междунар. науч. конф. Железногорск, 2012. С. 43–44.

References

1. Zubavichus V. A., Balabanov A. Z., Komarov V. A., Marareskul D. I., Furmanov V. V., Cvetkova O. I., Udin V. A., Ankudinov A. V. *Dvukhsistemnyu navigatsionnyu priyemnik kosmicheskogo apparata* [Two-system navigation receiver spacecraft]. Patent RF no. 112401, MPK G01C21/24.

2. Nepomnyashchy O. V., Shaidurov V. V., Veisov E. A. *Vestnik SibGAU*. 2013, № 2 (48), p. 133–136.

3. Krasnenko S. S., Nedorezov D. A., Kashkin V. B., Hazagarov U. G., Pichkalev A. V. *Zurnal Sibirskogo Federalnogo Universiteta, seria "Tehnika I Tehnologiya"* (Siberian Federal University. Engineering & Technologies). 2013, vol. 6, no. 5, p. 521–526.

4. Krasnenko S. S., Pichkalev A. V. [Ways of signal formation in radionavigating simulators]. *Tezisu doklada II Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoi konferentsii posvachennoi 30-letiu zapuska na orbity pervogo navigacionnogo kosmicheskogo apparata "Glonnas"; "Navigacionnue sputnikovue sistemu, ih rol i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"* [Theses of the report 2nd International Scientific and Technical Conference devoted to the 30th anniversary of launching the into orbit of the first navigation of the spacecraft "Glonass"; "Navigation satellite systems, their role and importance in the life of modern man"]. Krasnoyrsk, 2012, 75 p. (In Russian).

5. Krasnenko S. S., Pichkalev A. V. *Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials of the XIV Intern. scientific. conf. "Reshetnev reading"], Krasnoyrsk, 2010, 154 p. (In Russian).

6. Krasnenko S. S., Nedorezov D. A. *Trydy XII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Intelekt i nayka"* [Proceedings of the XII Intern. scientific. conf. "Intelligence and science"], Zheleznogorsk 2012, 43 p. (In Russian).

© Красненко С. С., Пичкалев А. В., Недорезов Д. А., Лапин А. Ю., Непомнящий О. В., 2014

УДК 519.6

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАФОВ КЭЛИ ГРУПП ПОДСТАНОВОК*

А. А. Кузнецов, А. С. Кузнецова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kuznetsov@sibsau.ru

Представлен алгоритм для вычисления диаметра, среднего диаметра и функции роста графа Кэли конечной группы, заданной фиксированным множеством порождающих элементов. Доказана его корректность. На основе данного алгоритма предложена его параллельная версия для исследования графов Кэли групп подстановок. Созданный алгоритм может быть полезен при проектировании топологии многопроцессорной вычислительной системы (МВС). В этом случае модель МВС будет представлена в виде графа Кэли, в котором процессоры являются вершинами графа, а ребра соответствуют физическим соединениям между процессорами. Применение указанного алгоритма позволяет изучить характеристики рассматриваемого графа, что, в свою очередь, дает возможность оценить производительность МВС.

Ключевые слова: граф Кэли, многопроцессорная вычислительная система.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект Б 112/14).