

УДК 629.78.054:621.396.018

Многоканальный цифровой синтез в имитаторах радионавигационных сигналов

**С.С. Красненко^а, Д.А. Недорезов^а,
В.Б. Кашкин^{а*}, Ю.Г. Хазагаров^а, А.В. Пичкалев^б**

*^аСибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79
^бОАО «Информационные спутниковые системы»
им. акад. М.Ф. Решетнёва»,
Россия 662972, Красноярский край,
г. Железногорск, ул. Ленина, 52*

Received 18.04.2013, received in revised form 12.06.2013, accepted 24.07.2013

Обоснованы главные требования к имитатору радионавигационных сигналов. Рассмотрены существующие имитаторы. Показано, что при разработке имитаторов целесообразно использовать принципы многоканального синтеза.

Ключевые слова: имитатор радионавигационных сигналов, цифровой синтез, межканальная погрешность, многоканальность, тактовая частота.

4 октября 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый в истории человечества искусственный спутник Земли (ИСЗ). Измерения доплеровского сдвига частоты передатчика этого ИСЗ на пункте наблюдения с известными координатами позволили определить параметры движения спутника. Решение обратной задачи, т.е. определение координат пункта приема сигнала, излученного с ИСЗ с известными координатами, по измерениям доплеровского сдвига принятого сигнала положило начало развитию спутниковых радионавигационных систем (СРНС) [1].

СРНС наряду с системами мобильной связи стали неотъемлемой частью человеческой деятельности и используются в самых различных ее областях, а именно в быту, образовании и науке и т.д. Сегодня технология спутникового координатно-временного обеспечения востребована абонентами не только на поверхности Земли и околоземном пространстве, ее использование значительно упростит определение местонахождения космических аппаратов (КА), находящихся на геостационарных и высокоэллиптических орбитах (ГСО и ВЭО). Ввиду того что навигационное поле от СРНС выше 5000 км распадается на локальные сигналы от отдельных навигационных КА (НКА), применение обычных навигационных приемников

(НП) для КА на ГСО и ВЭО невозможно. Кроме того, планируется использование СРНС для позиционирования разгонных блоков, что также требует наличия на них специализированных НП. Для проверки и отладки таких приемников необходима контрольно-испытательная аппаратура, в состав которой входит специальный имитатор радионавигационных сигналов (ИРНС), имитирующий для НП радионавигационную обстановку, максимально схожую с рабочей.

ИРНС – это специальный прибор, которым производят проверку, испытание и сертификацию навигационных приемников различного назначения. Основной областью применения ИРНС является проведение проверок функционирования приемников, формируя как единичные навигационные сигналы (НС) с известными параметрами для проверки каналов приема, так и сигналы от созвездия навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС/GPS (НКА) для проверки НП на выполнение своей целевой задачи.

Сегодня аппаратура имитации навигационного сигнала весьма востребована и некоторыми компаниями производится серийно. Далее описаны некоторые параметры ИРНС.

- Число каналов – это число генерируемых спутниковых сигналов. Если принять, что каждый навигационный спутник излучает два сигнала (в диапазоне L1 и L2), то для имитирования созвездия из трех спутников необходим шестиканальный ИРНС.
- СРНС и диапазон имитации. Возможны: ГЛОНАСС – L1, L2, L3. GPS – L1, L2, L5. GALILEO – E1, E2, L1. SBAS – L1.
- Максимальная высота имитирования полета приемника.
- Погрешность формирования сигнала. Одной из основных является межканальная погрешность, возникающая вследствие рассогласованности каналов синтеза и разности пути прохождения сигналов в радиотракте, сигналов тактирования для узлов формирования и т.д. Устранению межканальной погрешности и посвящена данная статья.

В таблице 1 приведены некоторые характеристики серийных ИРНС [2-4].

ИРНС фирм Spirent Communications и ЗАО «КБ Навис» не могут обеспечить полную проверку специализированного НП для КА, находящихся на ГСО и ВЭО, так как они формируют НС для НП, находящихся в едином навигационном поле, до 5000 или 8000 км, а ГСО и ВЭО проходят далеко за пределами навигационного поля. МРК-40, хотя и удовлетворяет требованию по максимальной высоте имитирования полета НП, но имеет небольшое число каналов и может лишь частично произвести проверку, так как все современные, и тем более специализированные, приемники будут иметь около 12 каналов приема. Кроме того, представленные ИРНС имеют межканальное расхождение, что негативно сказывается на качестве проверки приемника. В этой связи разработка нового ИРНС, который будет удовлетворять всем представленным требованиям, весьма актуальна.

Максимальная высота имитирования полета НП в ИРНС обеспечивается как конструктивными особенностями, так и в большей степени жестко заданными сценариями полета приемника, т.е. негибким программным обеспечением (ПО). Это необходимо учесть при создании нового ИРНС, удовлетворяющего всем предъявленным к нему требованиям.

Выполнить все предъявленные требования к формированию навигационного сигнала и сохранить простоту реализации может цифровой синтез, а именно прямой цифровой син-

Таблица 1. Серийно производимые ИРНС

ФНС + (Производитель)	Число каналов	СРНС-диапазон	Межканальная погрешность, м	Максимальная высота имитирования полета НП, км
МРК-40 (ФГУП НИИП «Радиосвязь»)	6	ГЛОНАСС – L1, L2 GPS – L2	$\pm 2,5$	90000
СН-3805М/СН-3803 (ЗАО «КБ Навис»)	48/32	ГЛОНАСС – L1, L2, L3 GPS – L1, L2, L5 GALILEO – E1, E2, L1 SBAS – L1	$\pm 0,3$	8000
GSS8000 (Spirent Communications)	48	ГЛОНАСС – L1, L2 GPS – L1, L2, L5 GALILEO – E1, E2, L1 SBAS – L1	$\pm 0,5$	5000
GSS7790 (Spirent Communications)	24	GPS – L1, L2, L5 SBAS – L1	$\pm 0,5$	5000
GSS7600 (Spirent Communications)	12	ГЛОНАСС – L1 GPS – L1, L2, L5 SBAS – L1	$\pm 0,5$	5000

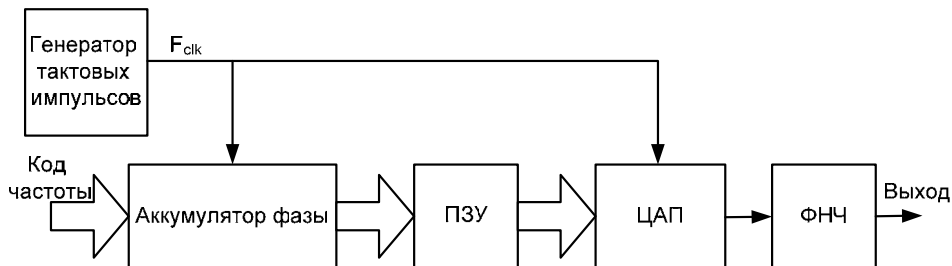


Рис. 1. Работа синтезатора типа DDS

тез (Direct Digital Synthesis – DDS). Применение DDS также позволит значительно сократить массогабаритные размеры ИРНС. На рисунке 1 изображен принцип работы синтезатора типа DDS [2].

В DDS аккумулятор фазы формирует линейно изменяющуюся последовательность кодов мгновенной фазы сигнала. Кодом частоты задается скорость изменения фазы. Далее с помощью постоянно запоминающего устройства (ПЗУ) и логики формирования адреса линейно изменяющаяся фаза преобразуется в изменяющиеся по синусоидальному закону цифровые выборки. После чего эти отсчеты поступают на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и фильтруются аналоговым фильтром нижних частот (ФНЧ), после чего на его выходе получается синусоидальный сигнал. Использование одного такого синтезатора позволяет получить сигнал, идентичный навигационному, от одного НКА.

При разработке ИРНС прямой цифровой синтез можно применять в двух вариантах:

1. Реализация с использованием нескольких цифровых синтезаторов (ЦС).
2. Реализация ЦС на единой цифровой схеме.

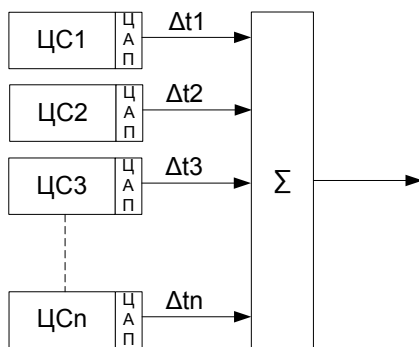


Рис. 2. Многоканальная реализация ИРНС на основе одноканальных цифровых синтезаторов

При многоканальной реализации ИРНС с использованием нескольких ЦС возникает проблема их согласованной работы. В таком использовании синтезаторов при прохождении сигнала через радиотракт от ЦАП до сумматора возникают задержки сигнала, которые будут различаться между собой ($\Delta t_1 \neq \Delta t_2 \neq \Delta t_3 \neq \Delta t_n$), что даст большое межканальное расхождение (рис. 2), как в случае с МРК-40. Трудность синхронизации большого числа каналов в ИРНС послужила основной причиной для отказа разработки многоканальных имитаторов на основе одноканальных ЦС.

Чтобы избежать неидентичной задержки в каналах синтеза сигналов, необходимо синтезировать и суммировать сигналы непосредственно на цифровой схеме, например по программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) (рис. 3), второй способ. В этом случае синтезирование и суммирование сигналов происходит на одной цифровой схеме, поэтому межканальной задержки сигналов не будет. После суммирования и цифроаналогового преобразования получаем навигационный сигнал от нескольких НКА на промежуточной частоте и внесенные задержки в процессе переноса частоты будут одинаковыми для всех каналов, которые в случае необходимости можно откалибровать.

При многоканальном синтезе необходимо учитывать некоторое уменьшение динамического диапазона формируемой суммы сигналов, возникающее за счет суммирования нескольких сигналов до поступления на ЦАП. Эквивалентная разрядность ЦАП для каждого отдельного формируемого сигнала при этом уменьшается.

При разработке ИРНС необходимо правильно выбрать тактовую частоту цифровой схемы, зависящей от двух параметров формирования сигнала:

- частоты дискретизации ЦАП;
- требуемого шага перестройки частоты формируемого сигнала.

Для преобразования цифрового сигнала в аналоговый необходимо, чтобы частота дискретизации ЦАП была как минимум вдвое больше, чем верхняя частота спектра формируемого сигнала, на практике она еще больше. Также необходимо учитывать, чтобы при дискретизации сигнала высшие гармоники как можно больше отличались от основной. Это позволит использовать на выходе ЦАП относительно широкополосные фильтры, что, в свою очередь, позволит избежать частотной неравномерности задержки сигнала при фильтрации. Для этого также необходимо, чтобы частота дискретизации, т.е. тактовая частота ЦАП, была бы максимально

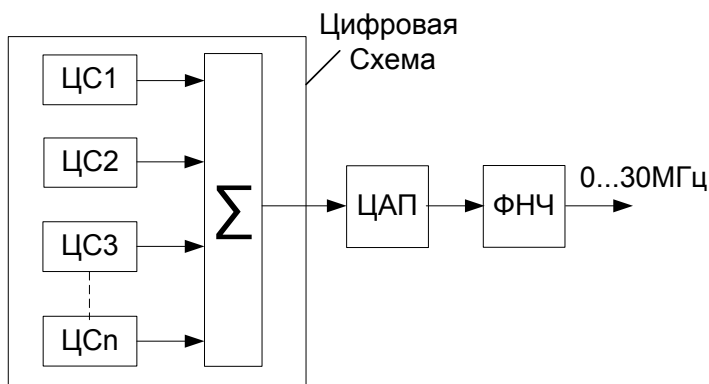


Рис. 3. Реализация ФНС на цифровой схеме

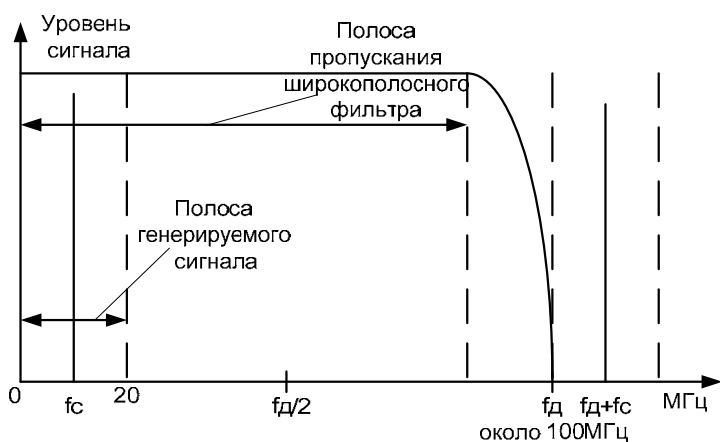


Рис. 4. Спектр сигнала при генерации

возможной. На рисунке 4 представлен спектр сигнала при генерации, где f_c – частота сигнала с полосой около 20 МГц, f_d – частота дискретизации, $f_d/2$ – половина частоты дискретизации, т.е. максимально возможная частота сигнала при генерации, f_d+f_c – побочная составляющая сигнала (высшая гармоника).

При выборе тактовой частоты для ЦС необходимо учитывать максимально допустимый шаг перестройки частоты. Из свойств синтезатора DDS следует, что для уменьшения шага перестройки частоты необходимо увеличить разрядность аккумулятора фазы или уменьшить тактовую частоту, но на практике используется разрядность порядка 32...48 бит, редко больше. Из этого следует, что для обеспечения минимально необходимого шага перестройки частоты необходимо, чтобы тактовая частота была наименьшей, а разрядность аккумулятора фазы была наибольшей. Выбирая тактовую частоту, необходимо обеспечить минимальный шаг по частоте и фильтрацию сигнала широкополосным фильтром [5].

В заключение отметим, что разрабатываемый ИРНС должен быть реализован на принципах многоканального синтеза. С целью исключения межканальной задержки для формируемых сигналов синтез и суммирование сигналов параллельных каналов ИРНС целесообразно реали-

зовать в одной интегральной микросхеме (ИМС). В качестве ИМС цифрового синтеза необходимо использовать ПЛИС типа SPARTAN6, VIRTEX5, VIRTEX6, обеспечивающие требуемое число каналов формирования сигналов, а также обладающие необходимым быстродействием. Вычислительный блок ИРНС лучше реализовать на базе IP-ядра MicroBlaze, встраиваемого в ПЛИС, с возможным подключением внешнего оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) для имитирования реального созвездия требуемых НКА.

Список литературы

- [1] Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2005. 688 с.
- [2] Электронный ресурс: <http://www.spirent.com>
- [3] Электронный ресурс: <http://www.navis.ru>
- [4] Электронный ресурс: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2011/section24.html>
- [5] Электронный ресурс: http://rf.atnn.ru/s6/DDS_1.htm

Multi-Channel Digital Synthesis of Radio Navigation Signals Simulator

**Sergey S. Krasnenko^a,
Dmitrii A. Nedorezov^a, Valentin B. Kashkin^a,
Yuri G. Hazagarov^a and Aleksandr V. Pichkalev^b**

^a*Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

^b*JSC «Academician M. F. Reshetnev's
«Information Satellite Systems»,
52 Lenin Str., Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk region, 662972 Russia*

Basic requirements for simulator of radio navigation signals are presented. A short review of existing simulators is given. It is shown multichannel synthesis is the best step for the development of the simulator.

Keywords: simulator of radio navigation signals, digital synthesis, interchannel error, multichannelness, the clock frequency.
