

УДК 621.396.9

СИНТЕЗАТОР ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА

Муравьев В.В.¹, Корневский С.А.¹, Костюкевич К.А.², Стануль А.А.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

²НП ООО «ОКБ ТСП», г. Минск, Республика Беларусь

Проведены разработка и экспериментальные исследования формирователя широкополосных сигналов методом прямого цифрового синтеза. Формирователь позволяет обеспечивать коррекцию фазо-частотных характеристик формируемого широкополосного сигнала. Исследован уровень побочных излучений на выходе смесителя сдвига при переносе спектра сигнала в диапазон СВЧ. (E-mail: Comrad-1@mail.ru)

Ключевые слова: сигнал с линейной частотной модуляцией, прямой цифровой синтез, широкополосный сигнал.

Введение

Область применения радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) значительно расширилась за последние годы. Помимо радиолокации, ЛЧМ радиосигналы (далее ЛЧМ сигналы) нашли применение в измерениях, наблюдении в плотных средах (геолокация), медицине, гидролокации.

Многие метрологические характеристики панорамных измерительных приборов СВЧ зависят исключительно от встроенного широкополосного источника гармонических сигналов, обуславливающего панорамность прибора, – синтезатора частот. К ним относятся: стабильность и точность установки частоты, шаг и время перестройки по частоте, спектральная чистота (уровень фазовых шумов, гармоник, побочных спектральных составляющих).

В зависимости от типа прибора уровень требований может варьироваться в широких пределах. Например, для панорамных скалярных анализаторов цепей важны стабильность и точность установки частоты вместе с частотным разрешением, в то время как требования к спектральной чистоте крайне низкие в силу особенностей метода измерения. В анализаторах спектра требования к гетеродинам относительно жесткие и касаются практически всех их характеристик, кроме, разве что, гармоник и субгармоник [1].

Более широкое использование ЛЧМ сигналов затруднено ограничением существующих методов формирования сложных частотно-модулированных сигналов по длительности формируемых сигналов снизу и девиации частоты сверху. Так, длинные импульсы с ЛЧМ непригодны для использования в быстродействующих защищенных системах связи, системах дистанционного зондирования Земли, системах геофизического мониторинга, системах радиотомографии [1].

Существует множество способов формирования сигналов с ЛЧМ: использование различных дисперсионных линий задержки, множество видов электровакуумных и твердотельных генераторов, имеющих вход установки частоты, микросхемы цифро-аналогового преобразования.

Однако большинство дисперсионных линий задержки не обеспечивают высокую точность формирования частот (погрешность более 5 %). Генераторы с управляемым входом также не обеспечивают требуемую точность, хоть и в меньшей степени. Кроме того, лишь сигнал, сформированный с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), имеет предсказуемую в каждый момент фазу [2].

Целью данной работы являлась разработка устройства формирования ЛЧМ сигналов с полосой девиации частоты до 200 МГц, высокой частотной стабильностью, предсказуемой фа-

зой сигнала, а также возможностью работы в сантиметровом диапазоне длин волн.

Обзор элементной базы микросхем прямого цифрового синтеза

В настоящее время имеется большое количество микросхем, позволяющих использовать цифровые методы формирования широкополосных сигналов с заданными законами изменения амплитуды, частоты и фазы выходного сигнала в полосе частот до 300–400 МГц и более. Цифровые методы формирования сигналов (в качестве зондирующих сигналов) позволяют обеспечить высокую разрешающую способность по дальности, скрытность работы и помехозащищенность разрабатываемых радиоэлектронных систем, удовлетворяя жестким требованиям, предъявляемым современными радиоэлектронными устройствами к полосе частот формируемого сигнала, уровню побочных излучений, погрешностям установления амплитуды и фазы выходного сигнала [3].

Такие сигналы имеют строго заданную скорость изменения фазы, а также крайне высокую стабильность частоты (зачастую определяется стабильностью опорного колебания), что очень

важно при использовании их в различных измерительных приборах (векторные анализаторы цепей, анализаторы спектра и др.)

Основными элементами формирователей широкополосных сигналов являются микросхемы *DDS* (*Direct Digital Sintethator* – прямой цифровой синтезатор) и ЦАП. Ведущими производителями *DDS* с большим количеством разрядов и высокой частотой дискретизации являются фирмы *Analog Device* и *Texas Instrument* (таблица). Однако проведенный анализ российских микросхем показал, что во многих случаях целесообразно использовать микросхемы российского НПЦ «Элвис», например, микросхему 1508ПЛ8Т. Несмотря на относительно меньшее значение частоты дискретизации, она имеет два независимых выходных канала и возможность коррекции линейных искажений приемопередающего устройства путем динамического изменения амплитуды и фазы выходного сигнала. Это позволяет эффективно использовать российские микросхемы при формировании широкополосных сигналов в полосе частот до 400 МГц.

Упрощенная структурная схема формирователя широкополосного сигнала приведена на рисунке 1.

Таблица

Цифро-аналоговые преобразователи различных фирм

№ п/п	Название	Производитель	Частота дискретизации, МГц	Количество разрядов	Тип
1	1508ПЛ8Т	НПЦ «Элвис»	1000	10	DDS с ЛЧМ
2	AD9912	Analog Device	1000	14	DDS
3	AD9910	Analog Device	1000	14	DDS с ЛЧМ
4	AD9914	Analog Device	3500	12	DDS с ЛЧМ
5	AD9146	Analog Device	1230	16	ЦАП
6	DAC567	Texas Instrument	2400	14	ЦАП
7	DAC34SH84	Texas Instrument	1500	16	ЦАП

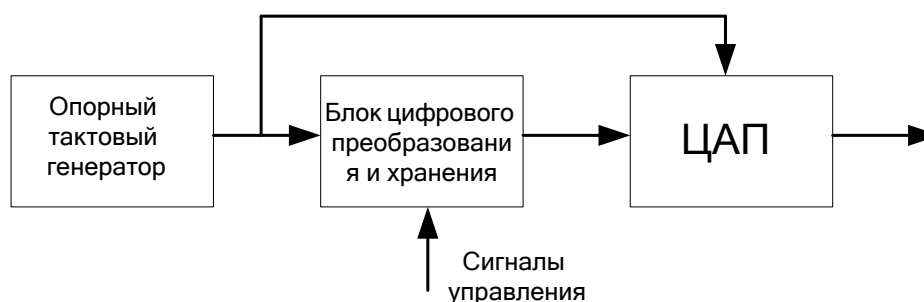


Рисунок 1 – Структурная схема формирователя широкополосного сигнала методом прямого цифрового синтеза

В блок преобразования и хранения поступают сигналы управления, позволяющие установить необходимые значения параметров выходного широкополосного сигнала:

- значения начальной и конечной частоты генерируемого широкополосного сигнала;
- период повторения, амплитуду и начальную фазу выходного сигнала;
- дополнительное изменение фазы формируемого выходного сигнала для коррекции линейных искажений.

Коды сигналов управления могут храниться в памяти устройства либо непосредственно вычисляться на каждом такте. Опорный тактовый генератор синхронизирует работу устройства. Сигналы управления позволяют формировать гармонический сигнал с различными видами и форматами модуляций (*FSK*, *BPSK*, *QPSK*, *QAM* и др.); формировать ЛЧМ сигнал в полосе частот до 0,5 тактовой частоты микросхемы с заданными значениями частоты, амплитуды и начальной фазы; обеспечивать коррекцию линейных искажений в приемопередающем тракте аппаратуры [4].

Важнейшим параметром формирователя широкополосных сигналов является уровень побочных излучений в спектре формируемого сигнала [5]. При формировании широкополосных сигналов с частотной модуляцией можно считать, что уровень побочных излучений ЛЧМ сигнала практически равен уровню излучений при формировании гармонического колебания. На рисунке 2 показан спектр гармонического сигнала, сформированного 12 разрядным ЦАП AD9914. Из рисунка видно, что уровень побочных излучений не превышает минус 61 дБс.

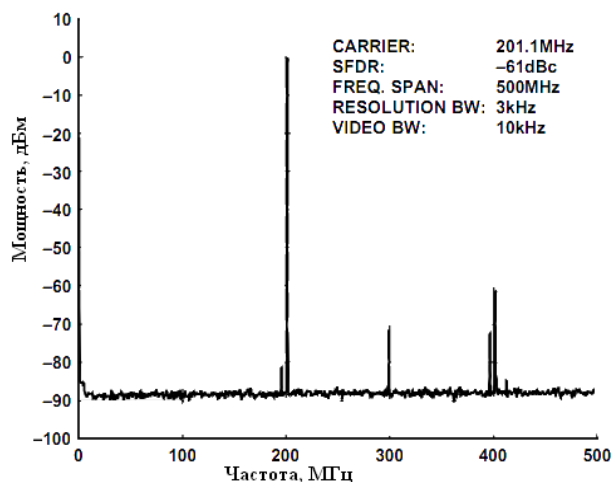


Рисунок 2 – Спектр гармонического сигнала, сформированного AD9914 (ЦАП 12 бит)

Экспериментальные исследования синтезатора широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией

Экспериментальные исследования проводились на разработанном синтезаторе широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией. В синтезаторе использована микросхема 1508ПЛ8Т. Сигнал сформирован методом прямого цифрового синтеза. Упрощенная структурная схема синтезатора приведена на рисунке 3.

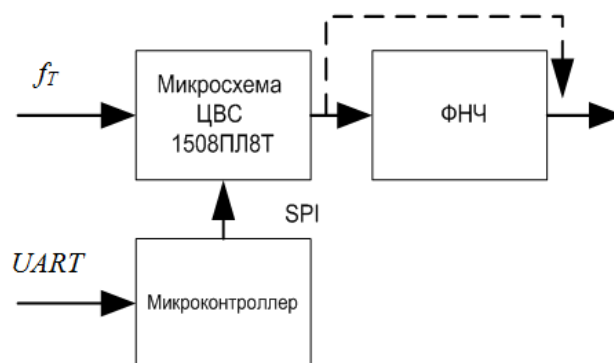


Рисунок 3 – Упрощенная структурная схема синтезатора широкополосных сигналов

В качестве генератора тактовой частоты использован генератор с малым уровнем фазовых шумов, что позволило устранить влияние фазовых шумов генератора тактовой частоты на шумовые характеристики синтезатора широкополосных сигналов. Фильтр низких частот (ФНЧ) имеет частоту среза 400 МГц. Для измерения уровня побочных излучений непосредственно на выходе микросхемы 1508ПЛ8Т предусмотрена возможность отключения ФНЧ. Команды управления работой широкополосного синтезатора формируются в среде *Lab View*. Микроконтроллер обеспечивает преобразование команд, сформированных в интерфейсе *UART* в формат *SPI* (последовательный периферийный интерфейс), которым управляется ЦВС (цифровой вычислительный синтезатор) выполненный на микросхеме 1508ПЛ8Т. Для измерения уровня побочных излучений программное обеспечение позволяет формировать на выходе синтезатора не только широкополосный сигнал с ЛЧМ, но и гармоническое колебание с необходимой частотой. Так, на рисунке 4 показан спектр сигнала с частотой 101 МГц. Из рисунка видно, что уровень побочных излучений на выходе синтезатора не превышает минус 82 дБс.

На рисунке 5 показаны временные и спектральные характеристики сформированного широкополосного сигнала с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией. Длительность импульса 1 мкс, внутриимпульсная девиация частоты 150 МГц (изменение частоты 250–400 МГц).

Нижняя частота внутриимпульсной частотной модуляции (250 МГц) выбрана из условий обеспечения эффективной фильтрации сигнала при переносе спектра сформированного сигнала в диапазон СВЧ. Верхняя частота (400 МГц) ограничивается частотой дискретизации микросхемы 1508ПЛ8Т равной 1000 МГц. Проведенные исследования показали, что изменение амплитуды вершины импульса на временной характеристике, равное 1,5 дБ, обуслов-

лено коэффициентом стоячей волны цепи измерительного тракта.

Разработанный синтезатор позволяет формировать широкополосный сигнал с заданным значением начальной фазы. На рисунке 6а показан фрагмент временной характеристики импульсного сигнала в момент времени запуска импульса при отсутствии требований к значению начальной фазы. Видно, что начальная фаза сигнала случайна. На рисунке 6б показан тот же сигнал, но с заданным значением начальной фазы равным нулю. Из рисунка видно, что начальная фаза всех сформированных импульсов соответствует заданному значению.

Программное обеспечение позволяет формировать различные законы изменения частоты выходного сигнала.

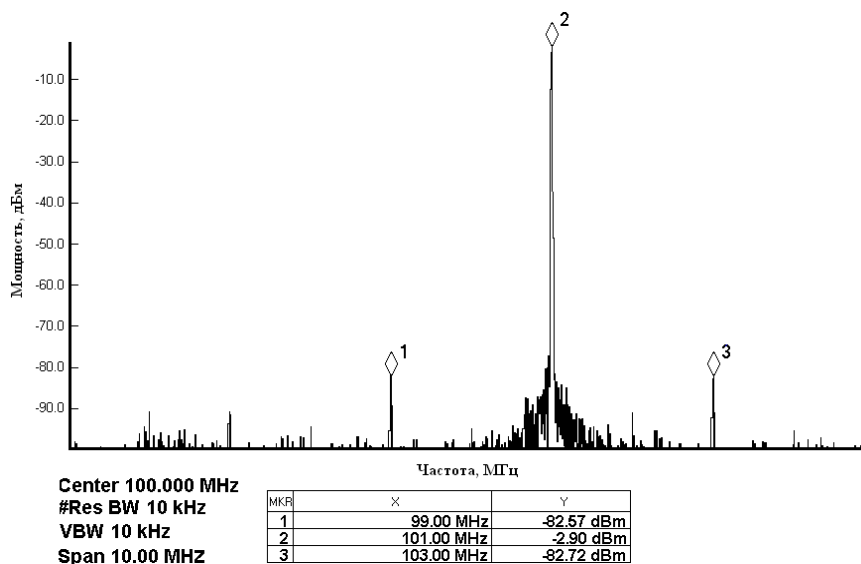


Рисунок 4 – Спектр гармонического сигнала, сформированного микросхемой 1508ПЛ8Т

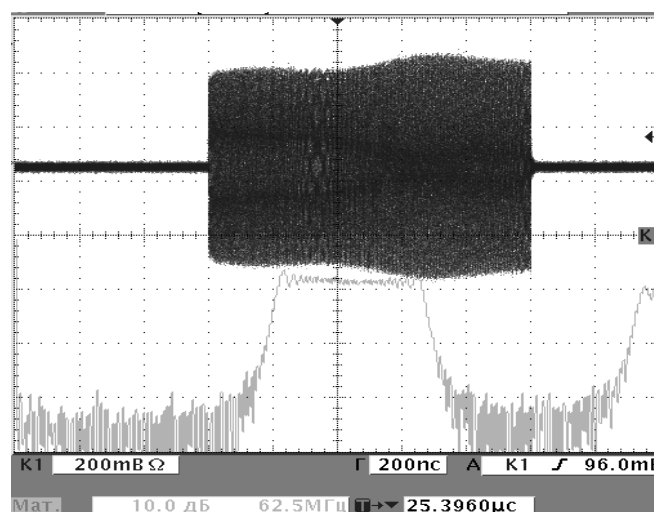


Рисунок 5 – Линейно-частотно модулированный импульс и его спектр

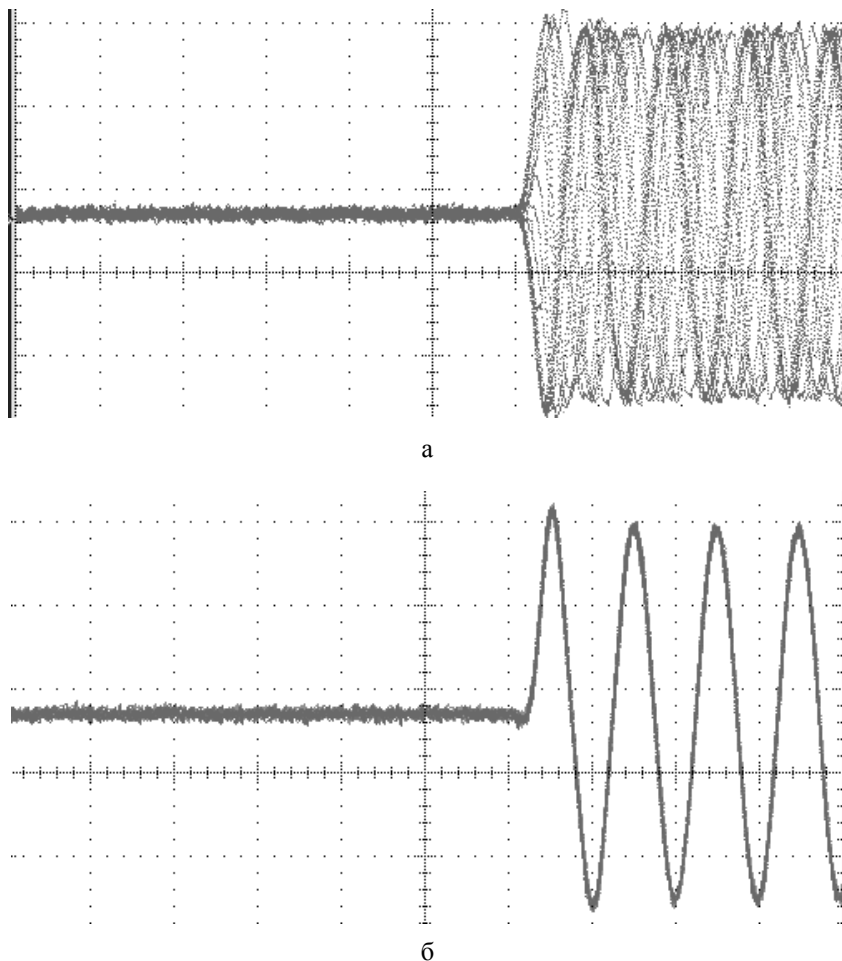


Рисунок 6 – Начало линейно-частотно модулированного импульса: а – без установки начальной фазы; б – с установкой начальной фазы

СВЧ синтезатор широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией

На рисунке 7 приведена схема переноса сформированного спектра широкополосного сигнала в диапазон частот, близкий к диапазону частот генератора высокой частоты (ВЧ).

Когерентность работы всех узлов рассматриваемой схемы обеспечивается синхронизацией ЦВС и генератора ВЧ от общего опорного генератора. Генератор ВЧ осуществляет умножение частоты опорного сигнала с помощью петли фазовой автоподстройки частоты. При такой схеме включения фазовые шумы выходного сигнала будут определяться фазовыми шумами генератора ВЧ (при $f_{лчм} \ll f_{вч}$).

Для исследования этой схемы к макету синтезатора был подключен двойной балансный смеситель *HMC925LP5*. Значение частоты генератора ВЧ равно 7 ГГц. Спектр сигнала исследо-

вался на выходе смесителя (без полосового фильтра), рисунок 8. Из рисунка видно:

- значение мощности спектральной составляющей генератора ВЧ ($f_{вч}$) сравнимо со значениями мощности спектральных составляющих широкополосных выходных сигналов смесителя ($f_{вч} + f_{цвс}$ и $f_{вч} - f_{цвс}$);
- значение мощности комбинационных составляющих $f_{вч} \pm n \cdot f_{лчм}$ ($n=1, 2, 3 \dots$) менее -50 дБс.

Уменьшение мощности спектральной составляющей ($f_{вч}$) фазовыми методами возможно лишь при наличии квадратурного смесителя и фазовращателя, что значительно усложняет схему. Поэтому необходимое значение уровня спектральной составляющей ($f_{вч}$) возможно получить только путем включения полосового фильтра на выходе смесителя, который одновременно обеспечит эффективное ослабление мощности спектральных составляющих $f_{вч} - f_{цвс}$.

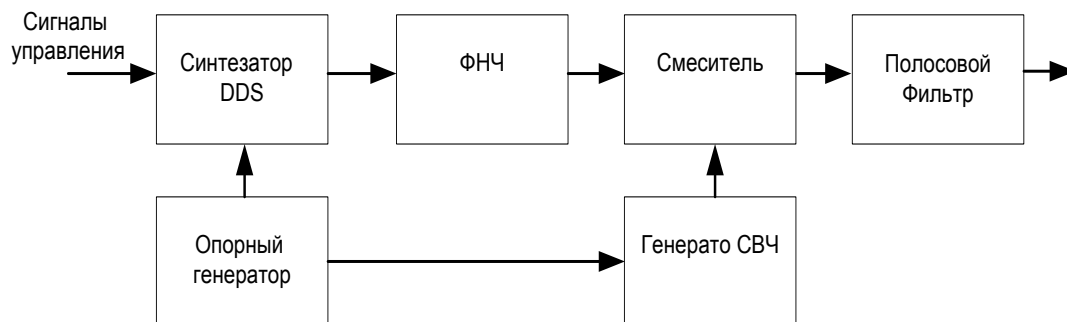


Рисунок 7 – Схема переноса частоты

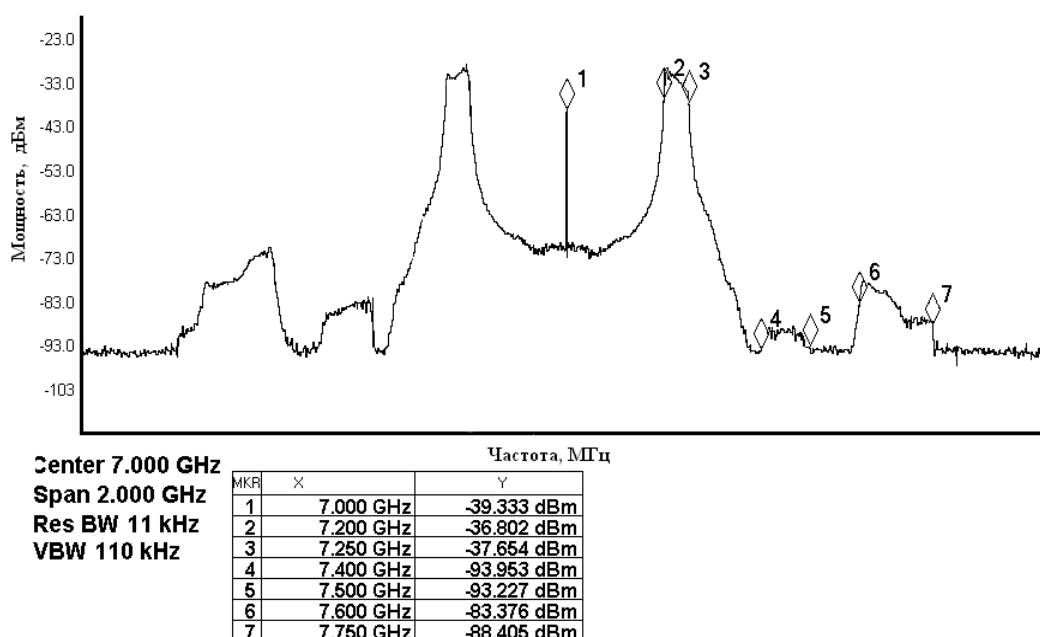


Рисунок 8 – Спектр сигнала с линейной частотной модуляцией на выходе смесителя сдвига (частота 7 ГГц)

Заключение

На основании анализа характеристик современной элементной базы разработан формирователь широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией. Формирователь обеспечивает значение полосы частот выходного сигнала до 400 МГц. Разработана и исследована схема сдвига спектра сформированного широкополосного радиосигнала с линейной частотной модуляцией в СВЧ диапазон на частоту 7 ГГц.

Проведенные экспериментальные исследования временных и спектральных характеристик разработанного формирователя широкополосных сигналов показали:

- полоса частот разработанного формирователя широкополосного сигнала с линейной частотной модуляцией, формируемого методом

прямого цифрового синтеза, может достигать 400 МГц;

- формирователь широкополосного сигнала позволяет задавать необходимое значение начальной фазы выходного сигнала, обеспечивать коррекцию фазо-частотной характеристики формируемого сигнала;

- обеспечен сдвиг спектра сформированного широкополосного сигнала в диапазон СВЧ (частоту 7 ГГц);

- при сдвиге спектра широкополосного сигнала максимальную мощность внеполосных излучений создает спектральная составляющая частоты гетеродина, которая может быть уменьшена только полосовым фильтром на выходе смесителя;

- уровень мощности остальных спектральных составляющих внеполосных излучений на выходе смесителя сдвига не превышает – 50 дБс.

Список использованных источников

1. Горевой, А.В. Архитектура широкополосных синтезаторов частот для панорамных сканирующих измерительных приборов СВЧ / А.В. Горевой // Радиоизмерения. – 2013. – № 3.
2. Зачиняев, Ю.В. Анализ и классификация формирователей линейно-частотно-модулированных радиосигналов с точки зрения уменьшения длительности формируемых сигналов / Ю.В. Зачиняев // Современные проблемы науки. – 2012. – № 5.
3. Зачиняев, Ю.В. Формирование наносекундных ЛЧМ-радиосигналов на волоконно-оптических структурах / Ю.В. Зачиняев, К.Е. Румянцев, А.В. Кукуяшный // Электротехнические и информационные системы и комплексы. – 2011. – Т. 7. – № 3. – С. 32.
4. НПЦ «ЭЛВИС» 1508ПЛ8Т // Техническое описание. – 2011. – С. 4.
5. Манасевич, В. Синтезаторы частот (Теория и проектирование) / В. Манасевич ; пер. с англ. ; под ред. А.С. Галина. – М. : Связь, 1979. – 394 с.ил.

Murav'iov V.V., Korenevsky S.A., Kostykevich K.A., Stanul A.A.

The experimental studies of the generator of wideband signals were conducted by the method of direct digital synthesis.

Development and experimental studies of the generator of wideband signals were conducted by the method of direct digital synthesis. Generator allows for the correction of phase- frequency characteristics of the formed broadband signal. The level of spurious radiation was investigated at the output of the frequency mixer in the transfer of the signal spectrum in the band of UHF. (E-mail: Comrad-1@mail.ru)

Key words: chirp signal, direct digital synthesis, wideband signal.

Поступила в редакцию 02.04.2013.