

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ФОРМИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЛЧМ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА И ПЕРЕНОС ИХ В ДИАПАЗОН СВЧ Часть 1. Формирование прецизионных ЛЧМ сигналов DDS синтезаторами

В статье рассматриваются вопросы по формированию широкополосных ЛЧМ сигналов методами прямого цифрового синтеза. Синтезаторы позволяют гибко менять параметры формируемых ЛЧМ сигналов и обеспечивать коррекцию их фазо-частотных характеристик.

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

Введение

Постановка проблемы и анализ публикаций. Область применения радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) значительно расширилась за последние годы, особенно с появлением быстродействующей цифровой элементной базы позволяющей вести цифровую обработку сложных сигналов с любой ЧМ. Помимо радиолокации, ЛЧМ сигналы нашли применение в системах измерения, геолокации, гидролокации, медицине, связи и т.д. [1 - 3].

Многие характеристики радиоустройств напрямую зависят исключительно от встроенного источника сигналов, обуславливающего их точность. 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 устройства, где используется ЛЧМ сигнал, уровень требований варьируется в широких пределах.

Более широкое применение ЛЧМ сигналов затруднено ограничением существующих методов формирования сложных частотно-модулированных сигналов по длительности формируемых сигналов снизу и девиации частоты сверху.

В радиолокации, например, длинные импульсы с ЛЧМ хороши на дальних границах обнаружения, где они дают хорошее разрешение по дальности за счет сжатия ЛЧМ импульсов, повышают скрытность РЛС за счет меньшей пиковой мощности передатчика и в тоже время непригодны в ближней зоне обнаружения из-за возрастания мертвой зоны обнаружения.

Существует большое количество способов формирования сигналов с ЛЧМ: с использованием различных дисперсионных линий задержек, множество видов электровакуумных и твердотельных генераторов, микросхемы цифроаналогового преобразования.

В тоже время дисперсионные линии задержки не обеспечивают высокую точность формирования частот (большая погрешность, более 5%). С меньшей погрешностью, но также не обеспечивают требуемую точность и генераторы с управляемым входом (ГУН) [4].

Лишь сигнал, сформированный цифровыми методами, имеет предсказуемые параметры, такие как частота и фаза в каждый момент времени [5].

Цифровые синтезаторы частот (ЦСЧ) и цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС) находят в последние годы все большее применение в современных радиотехнических системах, таких, как мобильные средства связи, прецизионные измерительные устройства, системы радиолокации и радионавигации. Основной тенденцией развития ЦСС в указанных областях является повышение выходных частот (десятки гигагерц), уменьшение шага сетки частот (единицы герц), повышение чистоты спектра (уменьшение уровня побочных составляющих и фазовых шумов).

Целью статьи является исследование возможностей по формированию широкополосных ЛЧМ сигналов прямыми цифровыми методами с помощью синтезаторов DDS с высокой частотной стабильностью и предсказуемой фазой сигнала.

Изложение основного материала

В настоящее время имеется большое количество микросхем, цифровых синтезаторов прямого синтеза (DDS), позволяющих использовать цифровые методы формирования широкополосных сигналов с заданными законами изменения амплитуды, частоты и фазы выходного сигнала в полосе частот до 1500 МГц и более.

Цифровые методы формирования сложных ЛЧМ сигналов и их обработка позволяют обеспечить высокую разрешающую способность РЛС 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 установки амплитуды и фазы выходного сигнала. Такие сигналы имеют строго заданную скорость частотной модуляции, а также высокую стабильность частоты, которая определяется стабильностью опорного генера-

тора, что очень важно при использовании их в различных измерительных приборах и т.д.

Основными элементами формирователей широкополосных сигналов являются цифровые синтезаторы сигналов (DDS) и ЦАП. Львиную долю DDS выпускают фирмы Analog Devise и Texas Instrument (табл. 1).

Таблица 1

Современные цифровые синтезаторы сигналов различных фирм производителей

| № п/п | Название | Производитель | Тактовая частота, МГц | Кол-во двоичных разрядов ЦАП | Тип DDS |
|-------|-----------|------------------|-----------------------|------------------------------|-----------|
| 1 | 1508ПЛ8Т | НПЦ «Элвис» | 1000 | 10 | DDS с ЛЧМ |
| 2 | AD9858 | Analog Device | 1000 | 10 | DDS с ЛЧМ |
| 3 | AD9912 | Analog Device | 1000 | 14 | DDS |
| 4 | AD9910 | Analog Device | 1000 | 14 | DDS с ЛЧМ |
| 5 | AD9914 | Analog Device | 3500 | 12 | DDS с ЛЧМ |
| 6 | AD9915 | Analog Device | 2500 | 12 | DDS с ЛЧМ |
| 7 | AD9146 | Analog Device | 1230 | 16 | ЦАП |
| 8 | DAC567 | Texas Instrument | 2400 | 14 | ЦАП |
| 9 | DAC34SH84 | Texas Instrument | 1500 | 16 | ЦАП |

Из таблицы видно, что наиболее подходящим аналогом микросхем фирм AD и DAC является российская микросхема НПЦ «Элвис», например, микросхема 1508ПЛ8Т [6]. Несмотря на относительно меньшее значение тактовой частоты, она имеет два независимых выходных канала, что дает возможность формировать квадратурные сигналы и производить коррекции линейных искажений приемопередающего устройства путем динамического изменения амплитуды и фазы выходного сигнала. Все эти микросхемы можно эффективно использовать при формировании широкополосных ЛЧМ сигналов в полосе частот до 400-1500 МГц и более [7].

Упрощенная структурная схема формирователя широкополосного ЛЧМ сигнала приведена на рис. 1.

Здесь с устройства управления (ЭВМ или процессора управления) поступают сигналы управления, позволяющие установить необходимые значения параметров выходного сигнала:

- значения начальной частоты и фазы формируемого сигнала;
- значения скорости частотной модуляции;
- длительность и период повторения радиоимпульса;
- значения амплитуды выходного сигнала;
- дополнительное изменение фазы формируемого выходного сигнала для коррекции линейных искажений.

Коды управления параметрами сигналов могут храниться в памяти устройства управления либо

непосредственно вычисляться и записываться новые перед каждым тактом по мере необходимости. Генератор опорных частот (ГОЧ) синхронизирует работу всего устройства формирования. Сигналы управления позволяют формировать гармонический сигнал с различными видами и формами модуляций (FSK, BPSK, QPSK, QAM и др.); формировать сигналы с ЛЧМ в полосе частот до 0,5 тактовой частоты микросхемы с заданными параметрами начальной частоты, амплитуды и начальной фазы; обеспечить коррекцию линейных искажений в приемопередающем тракте радиоэлектронных средств.

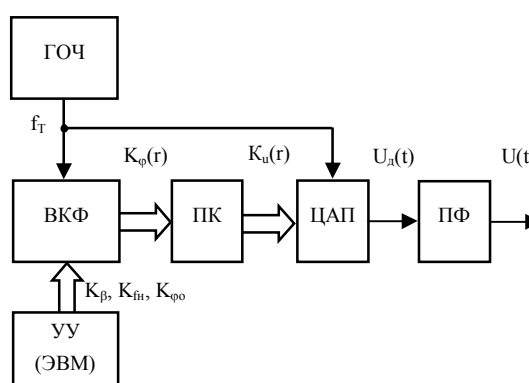


Рис. 1. Структурная схема формирователя ЛЧМ сигнала методом прямого цифрового синтеза

Важнейшими параметрами синтезатора широкополосных ЛЧМ сигналов являются уровень побочных излучений в спектре формируемого сигнала

и фазовый шум вблизи несущей. В справочных данных на DDS есть характеристики снятые экспериментально для нескольких частот. Как разработчика формирователей различных сигналов на базе DDS представляет интерес, а какие же шумы нас будут ожидать на других интересующих нас частотах и диапазонах. Поэтому, попытаемся восполнить этот пробел, и далее будем проводить моделирование этих характеристик для DDS AD9914 и AD9915, как наиболее новых и быстродействующих на данный момент времени интегральных цифровых вычислительных синтезаторов.

Тем не менее, все присущие рассуждения будут распространяться и на другие DDS с более низкой тактовой частотой.

Для начала, представим ЛЧМ сигнал ступенчатой аппроксимацией закона изменения частоты [8].

Согласно [8], выражение для расчета искажений ЛЧМ сигнала от ошибок квантования и дискретизации выглядит следующим образом

$$U(n) = \frac{U}{2^L - 1} \times \text{ent} \left\{ \left(2^L - 1 \right) \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{2^M} \cdot \text{ent} \left[2^M \cdot T \cdot n \times \left(f_n + f_{\text{ш}} \cdot \text{ent} \left[\frac{n}{m} + \frac{f_{\text{ш}}}{2} \right] \right) \right] \right] \right\}, \quad (1)$$

где $n = 0, 1, 2 \dots R$ – текущее значение номера временного отсчета;

f_n – начальная частота формируемого сигнала;

M – разрядность вычислителя кода фазы;

L – разрядность цифроаналогового преобразователя;

$f_{\text{ш}}$ – шаг приращения частоты;

$T = 1/f_T$ – интервал дискретизации; m – количество отсчетов тактовой частоты за время длительности одной ступеньки $T_{\text{ш}}$.

На рис. 2 приведены спектры гармонических сигналов рассчитанных по (1) при скорости частотной модуляции равной нулю. Из рисунка видно, что уровень побочных спектральных составляющих напрямую зависят от разрядности ЦАП использованного в том или ином DDS. Это хорошо видно из рис. 2, а и рис. 2, б.

При одинаковых параметрах сигнала, но различных разрядностях ЦАП уровень побочных спектральных составляющих уменьшился во втором случае на 24 дБ.

Для синтезаторов AD9915 и AD9914 (рис. 2, в, г) уровень побочных спектральных составляющих примерно одинаков. Однако можно заметить, что в AD9914 общий шумовой фон на несколько децибел ниже, это объясняется более высокой тактовой частотой синтезатора и более высоким качеством сформированного сигнала.

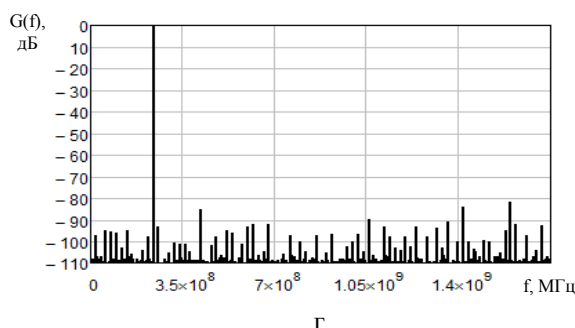
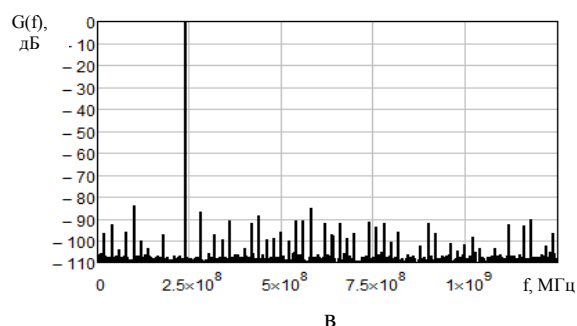
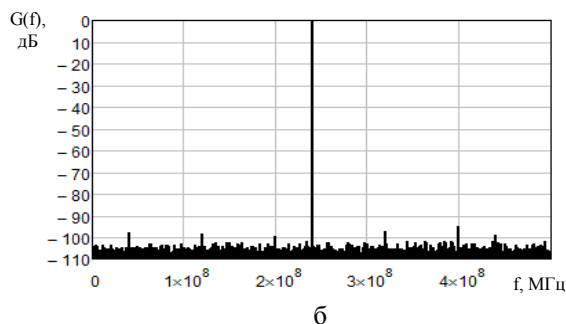
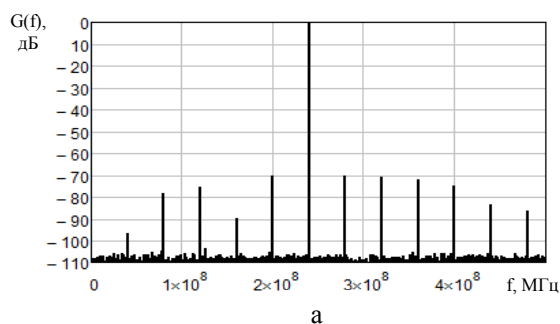


Рис. 2. Спектры гармонических сигналов частотой 240 МГц на выходе DDS синтезаторов:
а – AD9858; б – AD9910;
в – AD9915; г – AD9914

На рис. 3 приведены спектры ЛЧМ сигналов сформированные этими же синтезаторами с различными параметрами, но одинаковой длительностью импульса 1 мкс.

На рис. 3, а, б изображены спектры сигналов с одинаковыми начальными параметрами и тактовой частотой, но с различными разрядностями ЦАП.

Спектр на рис. 3, б отличается лучшим качеством так как сформирован DDS с 14 разрядным ЦАП. При этом отношение сигнал/шум у обоих синтезаторов примерно одинаков. Приведенные на рис. 3, в, г, д спектры ЛЧМ сигналов сформированы синтеза-

торами AD9915 и AD9914, нижние частоты которых выбраны из условия обеспечения эффективной фильтрации сигнала при его переносе в диапазон СВЧ. Верхняя частота ограничивается в каждом случае своей частотой дискретизации DDS. На рис.3д, для примера показано, как при увеличении девиации отношение сигнал/шум уменьшается. Кроме того, при росте девиации частоты из-за неидеальности ЦАП и его АЧХ, неравномерность спектральной плотности спектра сигнала в полосе

частот может достигать 1,5 дБ и более, что усложняет фильтрацию таких сигналов и вызывает необходимость применять полосовые фильтры более высоких порядков.

При этом все DDS позволяют формировать ЛЧМ сигналы со стабильными значениями начальных параметров. На рис.4,а показан сжатый ЛЧМ сигнал со случайной начальной фазой, а на рис.4,б показан тот же сигнал, но с заданным значением начальной фазы равным нулю.

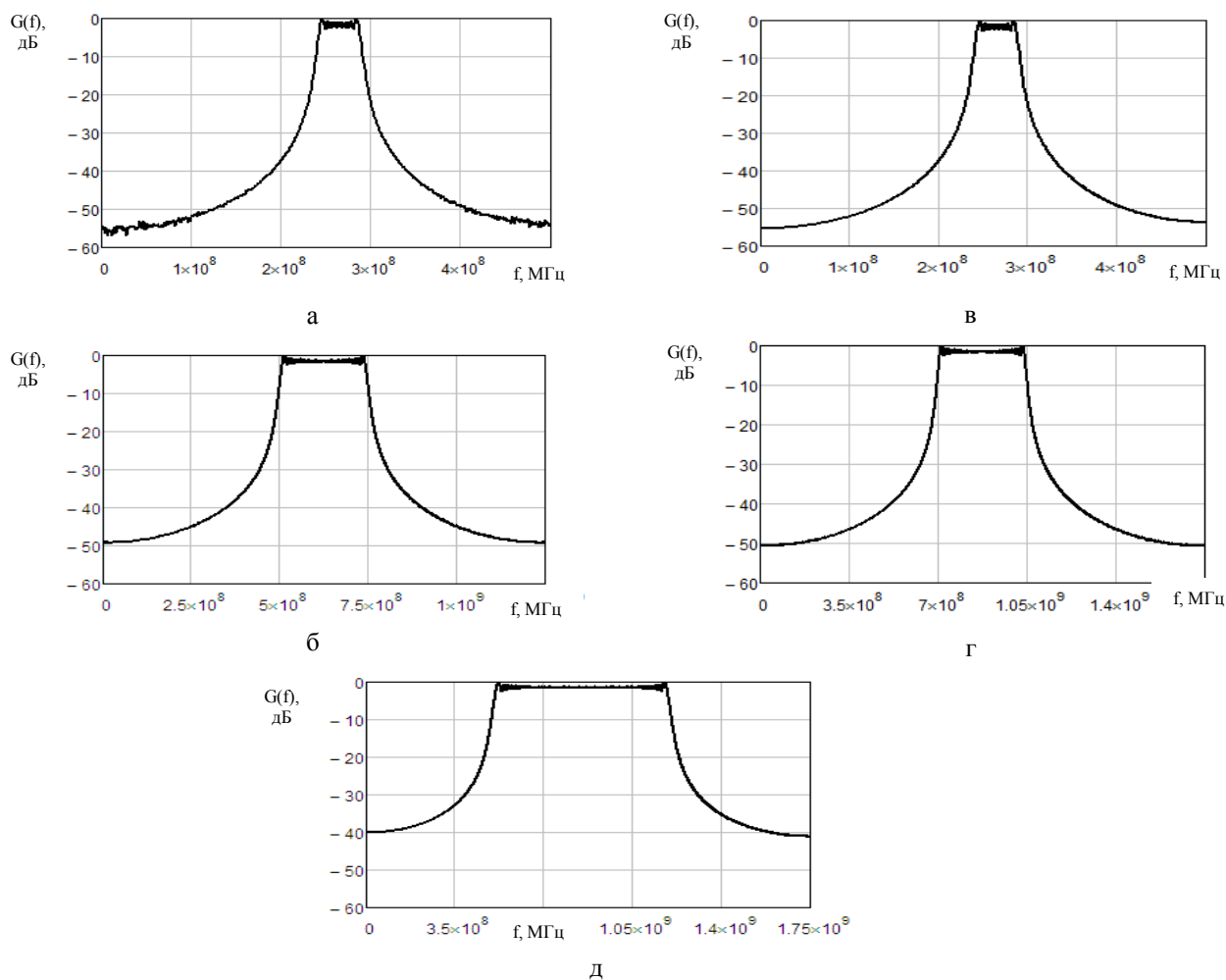


Рис. 3. Спектры ЛЧМ сигналов на выходе DDS:

- а – AD9858, $f_H = 240$ МГц, $\Delta F = 50$ МГц;
- б – AD9910, $f_H = 240$ МГц, $\Delta F = 50$ МГц;
- в – AD9915, $f_H = 500$ МГц, $\Delta F = 250$ МГц;
- г – AD9914, $f_H = 700$ МГц, $\Delta F = 350$ МГц;
- д – AD9914, $f_H = 500$ МГц, $\Delta F = 700$ МГц

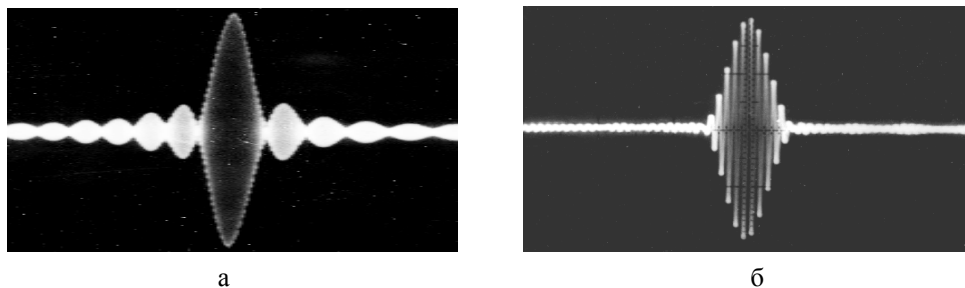


Рис. 4. Сжатые ЛЧМ сигналы, полученные экспериментально при случайной (а) и постоянной начальной (б) фазе сформированные DDS

Устройство управления позволяет формировать различные законы изменения частоты выходного сигнала (нарастающий или спадающий).

Внешний вид экспериментального синтезатора ЛЧМ сигналов показан на рис. 5.

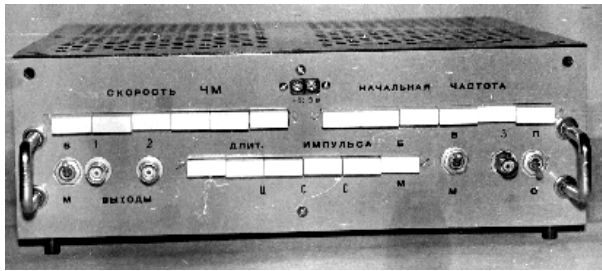


Рис. 5. Внешний вид экспериментального синтезатора DDS

Выводы

На основании анализа характеристик современной элементной базы были исследованы вопросы по формированию широкополосных ЛЧМ сигналов методами прямого цифрового синтеза.

Проведенные исследования временных и спектральных характеристик синтезаторов широкополосных ЛЧМ сигналов показали:

- полоса частот синтезаторов широкополосных сигналов с ЛЧМ, формируемых методом прямого цифрового синтеза, может достигать 700 МГц;
- синтезаторы широкополосных сигналов позволяют задавать необходимые значения начальных параметров выходных сигналов и обеспечивать коррекцию фазочастотной характеристики формируемых сигналов;
- уровни побочных составляющих при формировании сетки частот напрямую зависят от тактовой частоты и разрядности ЦАП и в среднем колеблются от -70 дБ до -95 дБ;
- при формировании широкополосных ЛЧМ сигналов отношение сигнал/шум в основном зави-

сит от девиации и длительности сигнала и лежит в диапазоне -40...80 дБ.

Список литературы

1. Кандырин Н.П. Исследование вопросов применения цифровых синтезаторов сигналов для формирования сложных сигналов в метеорадиолокации / Н.П. Кандырин // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил* – Х.: ХУПС, 2013. – № 4 (37). – С. 58-63.
2. Кандирин М.П. Цифрові синтезатори сигналів у пристроях управління і зв'язку / М.П. Кандирин // *Системи озброєння і військова техніка. Науковий журнал*. – Х.: ХУПС, 2006. – № 4 (8). – С. 93-97.
3. Кандирин Н.П. Цифровое формирование много-частотных сигналов в радиолокации и медицине / Н.П. Кандирин // *Системи обробки інформації: збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 1 (117). – С. 26-29.
4. Манасевич В. Синтезаторы частот (теория и проектирование) / В. Манасевич: пер. с англ.; под ред. А.С. Галина. – М.: Связь, 1979. – 394 с.
5. Кандырин Н.П. Цифровые методы формирования сигналов в РЛС с изменяющейся несущей частотой / Н.П. Кандырин // *Системи озброєння і військова техніка. Науковий журнал*. – Х.: ХУПС, 2014. – № 3(39). – С. 100-107.
6. НПЦ «ЭЛВИС» 1508ПЛ8Т. Техническое описание. – Зеленоград, ЗАО «Элвис», 2014. – 32 с.
7. Analog Devices, Inc., 2013. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к материалу: <http://www.analog.com/ru/index.html>.
8. Кандырин Н.П. Шумы квантования в цифровых синтезаторах сигналов и способы их уменьшения / *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил* / Н.П. Кандирин. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 4 (45). – С. 57-63.

Поступила в редколлегию 12.01.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ФОРМУВАННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ ЛЧМ СИГНАЛІВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ ТА ПЕРЕНЕСЕННЯ ЇХ В ДІАПАЗОН НВЧ Частина 1. Формування прецизійних ЛЧМ сигналів DDS синтезаторами

М.П. Кандирин

У статті розглядаються питання щодо формування широкосмугових ЛЧМ сигналів методами прямого цифрового синтезу. Синтезатори дозволяють гнучко змінювати параметри формованих ЛЧМ сигналів і забезпечувати корекцію їх фазочастотних характеристик.

Ключові слова: сигнал з лінійною частотною модуляцією, прямий цифровий синтез.

FORMING OF WIDEBAND LFM SIGNALS AND TRANSFER OF THEM METHOD OF DIRECT DIGITAL SYNTHESIS IN RANGE GSE Part 1. Forming of the precision LFM signals of DDS by synthesizers

N.P. Kandyrin

In the article questions are examined on forming of the wideband LFM signals the methods of direct digital synthesis. Synthesizers allow flexibly changing the parameters of the formed LFM signals and providing the correction of their phase-frequency characteristic.

Keywords: signal with linear frequency modulation, direct digital synthesis.