

УДК 621.396.967

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ФОРМИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ

Зачиняев Ю. В.

ФГОАУ ВПО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, Россия (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42), e-mail: yuri@zachinyaev.ru

Проведен анализ и сравнение существующих формирователей радиосигналов с линейной частотной модуляцией различных типов по параметру длительности формируемых сигналов, а также по параметрам девиации частоты, скорости изменения частоты, базы сигнала и рабочего диапазона частот. Показано, что существующие устройства, в частности, формирователи на основе управляемых генераторов, дисперсионных линий задержки, и цифровые не способны обеспечить формирование сигналов с линейной частотной модуляцией длительностью менее 0,1...0,5 мкс с высокими значениями девиации частоты, что существенно ограничивает области их применения. С учетом применения радиосигналов с линейной частотной модуляцией в системах высокоскоростной защищенной связи, системах ближней радиолокации, подповерхностного зондирования и радиотомографии даны рекомендации по уменьшению длительности формируемых ЛЧМ-сигналов с использованием волоконно-оптических структур.

Ключевые слова: линейная частотная модуляция, ЛЧМ-сигнал, радиосигнал, длительность ЛЧМ-сигнала, девиация частоты, скорость изменения частоты.

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF LINEAR FREQUENCY MODULATED RADIO SIGNALS IN REDUCING DURATION OF GENERATED SIGNALS

Zachinyaev Y. V.

Southern federal university, Rostov-on-Don, Russia (344006, Rostov-on-Don, street B. Sadovaya, 105/42), e-mail: yuri@zachinyaev.ru

We have done the analysis and comparison of existing types of linear frequency modulated radio signals generators in the parameter of duration of generated signals, and the parameters of the chirp bandwidth, chirp rate, the time-bandwidth product and the operating frequency band. It has been shown that the existing devices, particularly generators based on controlled oscillators, dispersive delay lines and digital structures are not able to ensure the generation of signals with a linear frequency modulation with duration less than 0.1 ... 0.5 ms with large chirp bandwidths which greatly limits their practical application. To use radio signals with linear frequency modulation in high-speed secure communication systems, short-range radar, subsurface probing and the radio tomography recommendations for reducing chirp signal generated duration using a fiber-optic structures have been made.

Key words: linear frequency modulation, LFM signal, radio signal, LFM signal duration, chirp bandwidth, chirp rate.

Введение

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

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 [4].

Таким образом, актуальной научной задачей является уменьшение длительности ЛЧМ-сигналов и увеличение девиации частоты ЛЧМ-сигнала.

С учетом поставленной научной задачи **целью исследования** является классификация средств и методов формирования ЛЧМ-сигналов и их сравнение по ключевым параметрам.

Материалы и методы исследования

Анализ литературных источников и патентных документов позволил выделить следующие основные типы формирователей ЛЧМ-сигналов: формирователи на основе управляемых генераторов; цифровые формирователи; формирователи на основе дисперсионных линий задержки.

Формирователи первой группы исторически были первыми в качестве устройств формирования ЛЧМ-сигналов. В диапазоне низких и сверхнизких частот, как правило, используются управляемые LC-генераторы. В диапазоне 1...20 ГГц используются как генераторы с магнитно-перестраиваемыми резонаторами из железо-иттриевого граната (ЖИГ), так и отражательные клистроны, митроны (перестраиваемые магнетроны), лампы обратной волны, диоды Ганна и лавинно-пролетные диоды [6].

К достоинствам формирователей ЛЧМ-сигналов на основе LC-генераторов следует отнести относительную простоту реализации, высокую скорость перестройки частоты и стабильность модуляционных характеристик. Однако при этом они имеют недостаточный диапазон рабочих частот (до 10МГц), низкую ($10^{-2}...10^{-3}$) относительную стабильность частоты генерации и наличие искажений сигнала.

Проблему ограниченного рабочего диапазона частот и стабильности частоты формируемых сигналов решает применение управляемых генераторов на основе СВЧ-элементов, позволяющих достичь высоких значений девиации частоты и базы сигнала. Однако они также обладают рядом серьезных недостатков.

Недостатками формирователей ЛЧМ-сигналов с применением ЖИГ-резонаторов являются высокая требуемая мощность цепей управления и ограничения длительности формируемых сигналов снизу (не менее 1 мс) в связи с инерционностью магнитной системы управления ЖИГ-резонатором. Кроме того, они обладают низкой скоростью перестройки частоты, что ограничивает девиацию частоты ЛЧМ-сигналов и скорость частотной модуляции.

Формирователи на основе митронов также требуют высоких значений напряжения питания и не обеспечивают высокой стабильности частоты. Кроме того, они не позволяют достичь

больших значений девиации частоты ЛЧМ-сигнала в связи с низкой скоростью электронной перестройки по частоте [3].

Линейная частотная модуляция осуществима и в магнетронных, а также стабилотронных генераторах, однако, как правило, реализуемые значения девиации частоты в этих случаях невысоки, что затрудняет применение этих устройств на практике [1].

Формирователи ЛЧМ-сигналов на основе диодов Ганна и лавинно-пролетных диодов имеют неудовлетворительные шумовые характеристики, что требует использования дополнительных источников опорного сигнала с ультранизкими фазовыми шумами [7]. Кроме того, они характеризуются невысокой скоростью электронной перестройки частоты, что ограничивает сверху значение девиации частоты формируемого сигнала.

Для формирователей ЛЧМ-сигналов на основе ламп обратной волны необходимо использовать дополнительные устройства для линейризации модуляционной характеристики. Кроме того, требуется высокая требуемая мощность цепей управления [5].

Принцип работы большинства цифровых формирователей ЛЧМ-сигналов основан на вычислении кода фазы сигнала в отсчетные моменты времени.

С учетом требований к качеству ЛЧМ-сигнала и относительно небольшой девиации частоты формирователь сигналов реализуется на основе цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС), реализующего вычисления кода фазы и квадратурного модулятора (рис.1).

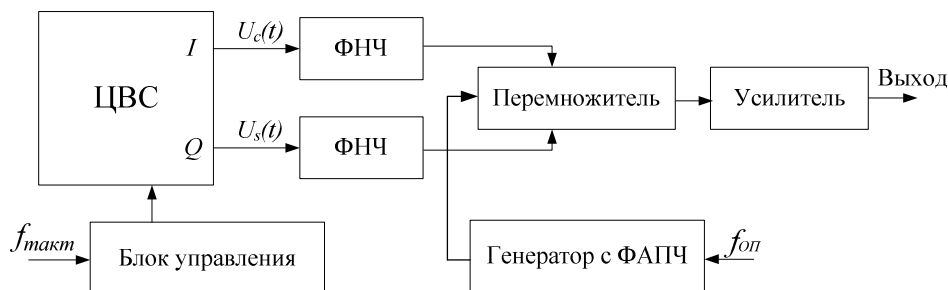


Рис. 1. Структурная схема цифрового формирователя ЛЧМ-сигналов

Сформированный квадратурный ЛЧМ-видеосигнал переносится по частоте на величину $f_{оп}$ сигнала локального синхронизированного генератора, а затем усиливается [6].

К достоинствам цифровых формирователей ЛЧМ-сигналов следует отнести стабильность и когерентность формируемых сигналов, хорошую воспроизводимость характеристик при серийном изготовлении, возможность оперативного изменения параметров модуляции. Стабильность формируемых сигналов позволяет умножать частоту выходного сигнала, что, однако, увеличивает уровень искажений [9]. Скорость генерации цифрового сигнала, главным образом, ограничена цифровым интерфейсом и является весьма высокой, сопоставимой с аналоговыми схемами. Цифровые синтезаторы также обеспечивают

довольно малый уровень фазовых шумов, даже демонстрируя уменьшение шумов используемого тактового сигнала [7].

К недостаткам цифровых формирователей ЛЧМ-сигналов можно отнести недостаточный диапазон рабочих частот без применения дополнительных устройств и невозможность достичь высоких значений базы сигнала. Практические значения верхней границы диапазона находятся в районе от нескольких десятков до нескольких сотен МГц (в литературе указаны значения современных цифровых генераторов с максимальной рабочей частотой 350 МГц). Очевидно, прямое умножение выходного сигнала частотного синтезатора не может быть реализовано из-за дальнейшей деградации спектрального состава [7].

В [9] приведена схема цифрового формирователя ЛЧМ-сигналов, включающего последовательно включенные накопитель частоты, накопитель фазы, два постоянных запоминающих устройства (ПЗУ) с табличными значениями функций \sin и \cos , цифро-аналоговый преобразователь и ФНЧ для каждого из каналов I и Q. Формирователь обеспечивает более высокую скорость работы, чем традиционные цифровые формирователи ЛЧМ-сигналов. К недостаткам такого формирователя можно отнести ограничение снизу длительности формируемых ЛЧМ-сигналов, ограничение сверху девиации частоты ЛЧМ-сигнала и ограничение сверху центральной частоты ЛЧМ-сигнала.

Формирователи ЛЧМ-сигналов на основе дисперсионных линий задержки, как правило, имеют структуру, изображенную на рис.2.

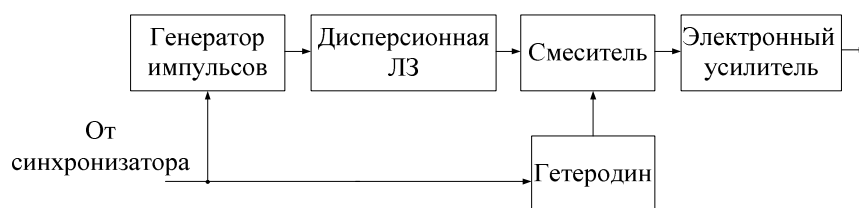


Рис. 2. Структурная схема формирователя ЛЧМ-сигналов на основе дисперсионной линии задержки

Основным узлом формирователей такого типа является дисперсионная линия задержки. Применение качественных линий задержки для диапазона СВЧ позволяет формировать и обрабатывать сигналы непосредственно на несущей частоте сигнала, то есть без дополнительного преобразования частоты. В качестве дисперсионной линии задержки могут применяться устройства на основе поверхностных акустических волн (ПАВ), магнитостатических волн (МСВ), устройства на пленках ЖИГ, а также волноводные линии задержки.

К достоинствам формирователей ЛЧМ-сигналов на основе линии задержки на ПАВ можно отнести возможность использования одинакового, а иногда одного и того же фильтра как для формирования, так и для сжатия, что обеспечивает согласование сигнала и фильтра даже при

неточном соблюдении линейного закона частотной модуляции. Кроме того, таким устройствам свойственны высокая частотно-временная стабильность генерируемых ЛЧМ-сигналов, надежность, небольшие габариты и стоимость [6, 10].

К недостаткам подобных формирователей можно отнести большие потери на преобразование электрических колебаний в ПАВ и обратно (до 60...70 дБ), ограничение амплитуды входного сигнала дисперсионных линий задержки, недостаточно высокое отношение сигнал-шум на выходе, трудность оперативной регулировки параметров формируемых ЛЧМ-сигналов и текущей коррекции фазовых отклонений, возникающих в последующих усилительно-преобразовательных каскадах тракта ЛЧМ-передатчика, необходимость преобразования несущей частоты, узкополосность дисперсионных линий задержки [6]. Большое затухание и ограниченные возможности фотолитографии микронной технологии (на частоте 1 ГГц требуется разрешение 1 мкм) затрудняют создание акустоэлектронных приборов на частотах более 1...2 ГГц [10].

В зарубежных источниках [9] предлагается другая схема формирователя ЛЧМ-сигналов на ПАВ (рис. 3).

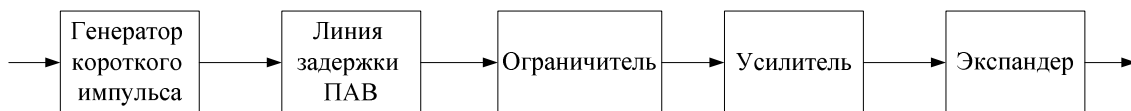


Рис. 3. Схема формирователя ЛЧМ-сигналов на ПАВ

Генератор короткого импульса формирует одиночный прямоугольный импульс малой длительности, который подается на линию задержки на ПАВ, обладающую определенной импульсной характеристикой, и имеющую в качестве отклика на поданный короткий импульс несколько циклов радиокосебания определенной частоты.

Ограничитель пропускает колебания только определенной амплитуды, усилитель усиливает данные колебания и передает их на вход так называемого расширителя, представляющего собой линию задержки на ПАВ с центральной частотой, равной частоте колебания на выходе линии задержки на ПАВ, сконфигурированную таким образом, что на выходе выдается частотно модулированное колебание. Формирователь позволяет генерировать короткие сигналы (от 50 нс), однако ограничения девиации частоты и длительности формируемых сигналов не позволяют получить высоких значений скорости частотной модуляции.

В [8] рассматривается метод формирования ЛЧМ-сигнала с помощью линий задержки на основе МСВ, где были получены компактные спектры частот и уровень побочных колебаний не превышающий -35 дБ. В обоих случаях наблюдалась неразрывность фазы сформированного сигнала. На несущей частоте 1,5 ГГц удалось сформировать ЛЧМ-сигнал с девиацией частоты 20 МГц при точности формирования не хуже 5 %. Теоретически

дисперсионные линии задержки на МСВ способны обеспечить формирование ЛЧМ-сигнала с девиацией единицы гигагерц и значением базы сигнала до 1000.

В целом, к недостаткам акустоэлектронных приборов следует отнести большой уровень вносимых потерь, наличие ложных откликов, связанных с многократными переотражениями акустических волн, и температурную нестабильность, обусловленную свойствами материала подложки.

Результаты исследования

Характеристики формирователей ЛЧМ-сигналов на основе различных дисперсионных линий задержки сведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики формирователей ЛЧМ-сигналов на основе различных дисперсионных линий задержки [6, 10,8]

Тип линии задержки	Девиация частоты, МГц	Длительность импульса, мкс	База сигнала	Центральная частота, МГц	Уровень потерь, дБ
ПАВ	750	1...750	2000	1500	70
Волноводные линии задержки	1000	3	2000	5000	60
МСВ	До 1000	0,1...200	1000	до 20000	35
Пленки ЖИГ	1000	10	2000	2000	70

Как видно из табл. 1, формирователи на основе дисперсионных линий задержки имеют большие потери при формировании сигнала и ограниченные значения девиации частоты и длительности сигнала.

Сводная таблица характеристик формирователей ЛЧМ-сигналов различных типов, составленная по результатам анализа литературы и патентного поиска, приведена в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики формирователей ЛЧМ-сигналов различных типов [6,3,1, 5, 10, 8]

Тип формирователя	Девиация частоты, МГц	Длительность импульса, мкс	База сигнала	Диапазон рабочих частот, МГц	Скорость изменения частоты, МГц/мкс	Относительная нестабильность частоты
ЛС УГ	15	1..100	500	$10^{-4}...10^2$	150	10^{-6}
Лампы обратной волны (М-типа) УГ	3000	0,5...1000	1500	$10^3...2\cdot 10^4$	20000	10^{-4}
ЖИГ УГ	единицы гигагерц	50...1000	До 10000	$10^3...10^5$	20000	10^{-4}
Лавинно-пролетный диод	единицы гигагерц	0,5...1000	До 10000	$10^3...10^4$	50000	10^{-5}

УГ						
Диоды Ганна УГ	единицы гигагерц	0,5...1000	До 10000	$3 \cdot 10^3 \dots 10^5$	50000	10^{-5}
Отражательный клистрон УГ	единицы гигагерц	1...1000	До 10000	$10^3 \dots 10^5$	3000	10^{-6}
Митроны УГ	300	0,2...1000	До 2000	$3 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^4$	1500	10^{-4}
Цифровые	10...100	1...1000	До 1000	До $4 \cdot 10^2$	100	10^{-6}
ПАВ	750	0,5...200	До 2000	1500	1500	10^{-6}
Волноводные линии задержки	1000	3	До 2000	5000	333	10^{-6}
Линии задержки на МСВ	до 1 ГГц	0,1...200	До 1000	$1500 \cdot 2 \cdot 10^4$	50000	10^{-6}

Как видно из табл. 2, наименьшую длительность формируемого ЛЧМ-сигнала обеспечивают формирователи на основе магнитоэлектрических волн (от 0,1 мкс). По параметру девиации частоты выделяются формирователи на основе СВЧ УГ (единицы гигагерц).

Выводы

Обобщая вышесказанное, а также на основе данных, приведенных в табл. 2, можно заключить:

- существующие устройства не способны обеспечить формирование ЛЧМ-сигнала длительностью менее 0,1...0,5 мкс, что существенно ограничивает области их применения. Кроме того, они имеют строго определенный рабочий диапазон частот: для автогенераторов на пассивных элементах 0,1ГГц...10МГц, для формирователей на дисперсионных линиях задержки 10...1500МГц, для СВЧ управляемых генераторов от 1 до 100ГГц;
- большинство существующих формирователей ЛЧМ-сигналов в практически используемых диапазонах частот обладают высоким энергопотреблением и требованиями к источникам питания;
- пассивный метод формирования (без использования управляемых генераторов) представляет большой интерес с точки зрения простоты формирования ЛЧМ-сигнала и его обработки, однако, из-за физических особенностей функционирования дисперсионных линий задержек, эти устройства имеют ограниченный рабочий диапазон.

Невозможность применения традиционных методов для высокоскоростного формирования и обработки широкополосных радиосигналов, в том числе и ЛЧМ-сигналов, приводит к необходимости использования оптических методов обработки информации, в том числе применению для этих целей волоконно-оптических структур. Использование бинарных волоконно-оптических структур позволяет сократить длительность формируемых сигналов (до 2,2 нс) при больших значениях девиации частоты (порядка 6 ГГц) [4].

Список литературы

1. Вамберский М. В. Передающие устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1984. – 448 с.
2. Дмитриев В. Ф. Устройства интегральной электроники: Акустоэлектроника. – ГУАП. СПб., 2006. – 169 с.
3. Дятлов Ю. В., Козлов Л. Н. Митроны. Серия "Элементы радиоэлектронной аппаратуры". Вып. 9. – М.: Советское радио, 1967. – 48 с.
4. Зачиняев Ю. В., Румянцев К. Е., Кукуяшный А. В. Формирование наносекундных ЛЧМ-радиосигналов на волоконно-оптических структурах // Электротехнические и информационные системы и комплексы. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 32-38.
5. Зиньковский А. И. Лампы бегущей и обратной волны. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 32 с.
6. Кочемасов В. Н., Белов Л. А., Оконешников В. С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
7. Ченакин А. Н. Частотный синтез: текущие решения и новые тенденции // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2008. – № 1. – С. 92-97.
8. Черепнев А. А. Методы формирования и обработки сигналов с использованием линий задержки на магнитостатических волнах: автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 2007. – 19 с.
9. HughMcPerson, JohnP. Blackely. Chirpsignalgeneratingforpulsecompressionradar. Патент 4633185 США, МКИ H03K5/159, №539558. Заявл. 06.10.1983; опубл. 30.12.1986.
10. Merrill I. Skolnik. Radar Handbook (2nd Edition). – McGraw-Hill, 1990. – 1220 p.

Рецензенты:

Румянцев Константин Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ИБТКС, Южный федеральный университет, г. Таганрог.

Веселов Геннадий Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, декан факультета информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог.