

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ СВЧ-ДИАПАЗОНА

Ченакин Александр Вняльевич,
к.т.н., директор R&D, Анритсу, Морган Хил, США,
alexander.chenakin@anritsu.com

Кочемасов Виктор Неофидович,
к.т.н., генеральный директор, Радиокомп, Москва, Россия,
vkochemasov@radiocomp.ru

Пестряков Александр Валентинович,
д.т.н., профессор, декан МТУСИ, Москва, Россия,
a.v.pestryakov@mail.ru

Аннотация

Обсуждаются состояние и перспективы развития синтезаторов частот (СЧ) СВЧ-диапазона, используемых в контрольно-измерительной аппаратуре. Рассматриваемые тенденции применимы и к другим классам СЧ, в частности синтезаторным модулям более сложных систем. Отмечается, что общий объем рынка синтезаторов частот контрольно-измерительной аппаратуры оценивается в \$300М с годовым ростом около 3%.

Современной тенденцией развития синтезаторов частот является снижение уровня фазовых шумов и побочных спектральных составляющих при одновременном увеличении скорости перестройки. Важными параметрами являются рабочий диапазон и частотное разрешение, возможность модуляции выходного сигнала, а также массогабаритные и стоимостные характеристики. Рассмотрены основные архитектурные решения, применяемые в современных СЧ, основанные на прямом аналоговом, цифровом и косвенном методах синтеза. Отмечается, что на сегодняшний день наиболее востребованными остаются традиционные архитектуры с фазовой автоподстройкой частоты. С другой стороны, аналоговый синтезатор является наиболее передовой архитектурой, демонстрирующей исключительно высокую скорость перестройки и малые фазовые шумы. Тем не менее, будущие разработки связаны с цифровым вычислительным синтезом (ЦВС) в связи со стремительным развитием полупроводниковых технологий. В настоящее время ЦВС доступны в виде специализированных интегральных схем, а также могут быть выполнены на программируемых логических интегральных схемах с внешним цифровым аналоговым преобразователем (ЦАП). Для увеличения выходной частоты используют параллельную (многоканальную) структуру цифровой обработки сигнала и высокоскоростные ЦАП, что позволяет сформировать выходной сигнал непосредственно в СВЧ-диапазоне. Дальнейшее улучшение характеристик возможно параллельным включением (чередованием) двух и более ЦАП. Ожидается расширение рабочей полосы ЦВС до нескольких десятков ГГц, а также улучшение его спектральных характеристик.

Отмечается, что современные СЧ ориентируются на генерацию сложных форм выходного сигнала с применением векторной IQ-модуляции. При этом происходит постоянное расширение полосы модулирующего сигнала до сотен мегагерц и даже единиц гигагерц. Дальнейший скачок в развитии СЧ ожидается с применением новых видов генерации опорного сигнала, в частности, с использованием лейкосапфировых генераторов с комбинированной стабилизацией сигнала и оптоэлектронных методов.

Ключевые слова: синтезатор частот, генератор сигналов, контрольно-измерительные приборы, фазовый шум, скорость перестройки

Введение

Синтезаторы частот (СЧ) являются исключительно важными функциональными узлами многих систем, от коммерческих сетей связи до контрольно-измерительных приборов [1]. Можно сказать, что СЧ в том или ином виде присутствуют фактически во всех электронных системах, таких как:

- контрольно-измерительная аппаратура,
- приёмно-передающая аппаратура,
- различные системы связи (включая новые проекты типа WLAN, 5G и т.д.),
- радиолокационное оборудование,

- медицинская аппаратура.

Наиболее массовой аппаратурой, в которой применяются СЧ, на сегодняшний день является оборудование систем мобильной связи. Поскольку в таком оборудовании приоритетным является обеспечение минимальных массогабаритных показателей и низкого энергопотребления, СЧ реализуются исключительно на основе косвенных методов синтеза с использованием систем синхронизации [2-5, 31-32]. Теории и технике построения СЧ на основе систем синхронизации в последние годы было посвящено большое количество работ [6-11], однако, постоянно возрастающие требования к характеристикам СЧ, особенно при использовании их в сложной профессиональной прецизионной аппаратуре, побуждает разработчиков к поиску новых путей повышения их качественных показателей.

В данной статье обсуждаются состояние и перспективы развития СЧ СВЧ-диапазона, в основном используемых в контрольно-измерительной аппаратуре. Однако, рассматриваемые тенденции применимы и к другим классам СЧ, в частности синтезаторным модулям более сложных систем. Согласно исследованию [12] общий объем рынка синтезаторов частот СВЧ-диапазона контрольно-измерительной аппаратуры оценивается в \$300М с годовым ростом около 3% (рис. 1). Результаты более позднего исследования [13] с региональной сегментацией показаны в табл. 1 (дополнительно включая функциональные генераторы).

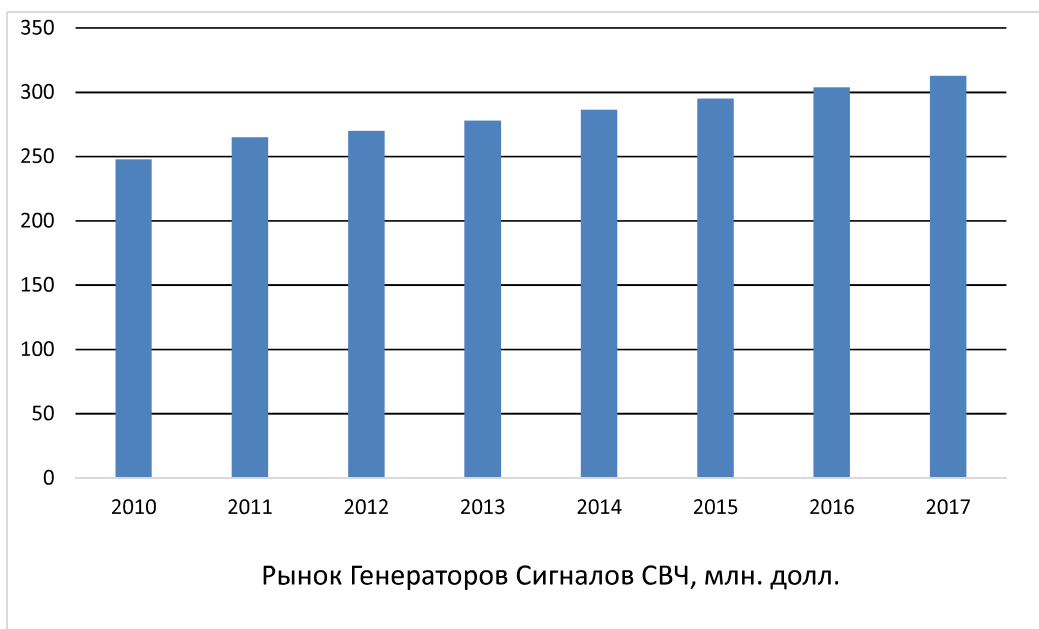


Рис. 1. Общий объем рынка синтезаторов частот СВЧ-диапазона

Таблица 1

Региональное разделение рынка СЧ и функциональных генераторов

Региональное разделение рынка СЧ, млн. долл.							
Регион / Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Сев. Америка	110.84	116.82	123.63	131.38	140.57	151.76	165.38
Европа	103.00	107.16	111.91	117.25	123.66	131.45	140.84
Азиатско-Тихоокеанский	88.03	98.26	109.98	123.49	139.33	158.43	181.65
Остальные	40.54	43.86	47.7	52.09	57.33	63.55	71.23
Итого	342.41	366.10	393.22	424.21	460.89	505.19	559.11

Современной тенденцией развития синтезаторов частот является снижение уровня фазовых шумов и побочных спектральных составляющих (ПСС) при одновременном увеличении скорости перестройки. Важными параметрами являются рабочий диапазон и частотное разрешение, возможность модуляции выходного сигнала, а также массогабаритные и стоимостные характеристики [14].

Очевидно, что современные синтезаторы контрольно-измерительной аппаратуры должны обеспечивать широкий диапазон генерируемых частот с малым шагом, низкими фазовыми шумами и побочными спектральными составляющими. Однако, особым требованием и, по сути, направлением развития СЧ в настоящее время является увеличение скорости перестройки. Время, требуемое для перестройки с одной

частоты на другую, является критическим параметром, так как, обычно, не может быть использовано для приёма или передачи сигнала.

Даже традиционно “медленные” измерительные приборы требуют увеличения скорости перестройки для более быстрого сканирования в рабочем диапазоне частот. Важным аспектом развития СЧ является использование современных видов модуляции сигнала, в частности векторной IQ-модуляции. Несмотря на всё возрастающие требования к основным техническим характеристикам, также ожидается снижение массогабаритных параметров и стоимости устройств. Все эти факторы накладывают определённые ограничения в выборе архитектурных и схемотехнических решений при проектировании синтезаторов частот.

Архитектурные решения

Традиционно синтезаторы подразделяют на две основные группы (рис. 2), основанные на прямом и косвенном методах синтеза частот. В свою очередь, практическая реализация СЧ может быть выполнена с помощью аналоговых и цифровых методов. Однако, как правило, используются комбинированные (гибридные) решения, в которых используют как аналоговые, так и цифровые элементы [2-7].

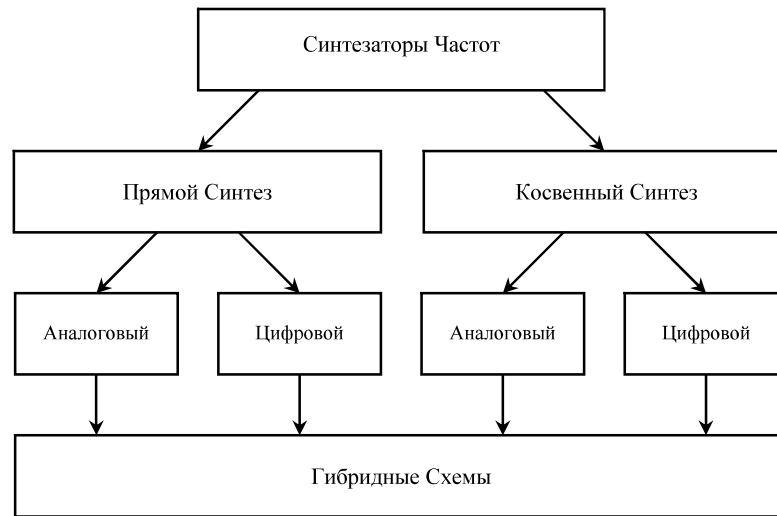


Рис. 2. Классификация синтезаторов частот

Прямой аналоговый синтез

Прямые аналоговые синтезаторы (direct analog) реализуются путем преобразования базовых сигналов на фиксированных частотах с их последующей фильтрацией, как показано на рис. 3. Базовые сигналы могут быть получены на основе низкочастотных (кварцевые, ПАВ) или высокочастотных (диэлектрический, волноводный и др.) генераторов посредством умножения, деления или фазовой автоподстройки частоты.

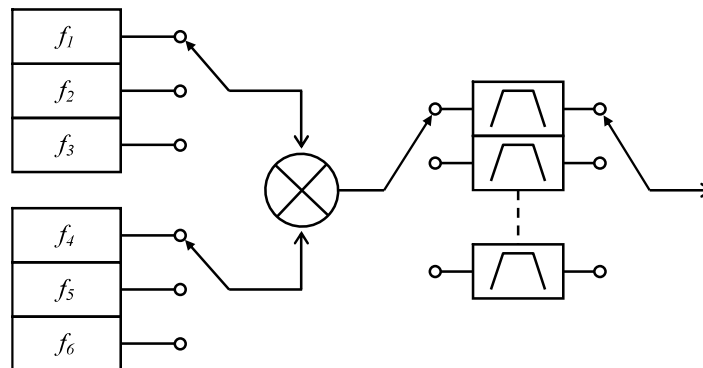


Рис. 3. Концепция прямого аналогового синтеза

Главным преимуществом прямых аналоговых синтезаторов является чрезвычайно высокая скорость переключения, лежащая в микро- или даже наносекундном диапазоне. Еще одно преимущество основано на использовании компонентов с исключительно малым уровнем собственных шумов по сравнению с источниками базовых частот. Т.е. шумы аналогового синтезатора определяются в основном шумами используемых базовых источников и могут быть весьма низкими. Основным недостатком указанной топологии – ограниченный диапазон и разрешение по частоте. Количество генерируемых сигналов можно увеличить, введя большее число базовых частот и смесительных каскадов. Однако, такой подход требует большего числа компонентов и, следовательно, усложняет систему. Еще одна серьезная проблема – множество побочных спектральных составляющих, которые генерируют смесительные каскады. ПСС должны быть тщательно отфильтрованы, что предъявляет серьезные требования к разработке частотного плана синтезатора.

Другой перспективный подход основан на концепции последовательного расширения полосы синтезируемых частот [15]. Структура синтезатора состоит из последовательного соединения ячеек, содержащих делитель с переменным коэффициентом деления (ДПКД), смеситель и полосовой фильтр (или набор переключаемых полосовых фильтров), как показано на рис. 4. При преобразовании для расширения полосы рабочих частот используются несколько значений промежуточной частоты на выходе ДПКД. Полоса входного сигнала и коэффициенты деления выбираются таким образом, чтобы обеспечить условие $\Delta f_{i+1} > \Delta f_i$ при непрерывном перекрытии. Таким образом, происходит последовательное расширение полосы частот до требуемого значения.

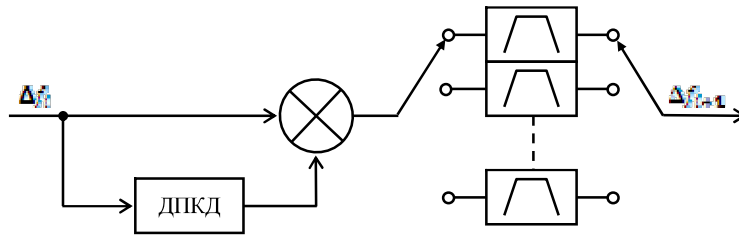


Рис. 4. Последовательное расширение полосы синтезируемых частот

В целом существует немало различных схем прямого аналогового синтеза, однако, все они, как правило, требуют большого числа компонентов для обеспечения малого частотного шага и широкого диапазона частот. Таким образом, хотя аналоговые синтезаторы и предлагают исключительно высокую скорость перестройки и малые шумы, их использование ограничено из-за довольно высоких стоимостных характеристик.

Прямой цифровой синтез

В отличие от традиционных аналоговых решений, цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС или DDS – direct digital synthesizers) используют цифровую обработку для конструирования требуемой формы выходного сигнала из входного тактового сигнала [16]. Скорость перестройки ЦВС ограничена цифровым интерфейсом и является весьма высокой, сопоставимой с аналоговыми схемами. Цифровые вычислительные синтезаторы также обеспечивают довольно малый уровень фазовых шумов. Однако, основным достоинством ЦВС является исключительно высокое разрешение по частоте (единицы герц, миллигерц и даже микрогерц). Главные недостатки – ограниченный частотный диапазон и высокое содержание побочных спектральных составляющих, прежде всего, из-за ошибок квантования и преобразования в выходном цифро-аналоговом преобразователе (ЦАП).

В настоящее время ЦВС доступны в виде специализированных интегральных схем, а также могут быть выполнены на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) с внешним ЦАП. Для увеличения выходной частоты используют параллельную (многоканальную) структуру цифровой обработки сигнала и высокоскоростные ЦАП, что позволяет сформировать выходной сигнал непосредственно в СВЧ-диапазоне. Дальнейшее улучшение характеристик (рабочий диапазон частот, уровень ПСС) возможно параллельным включением (чередованием) двух и более ЦАП, как это показано на рис. 5.

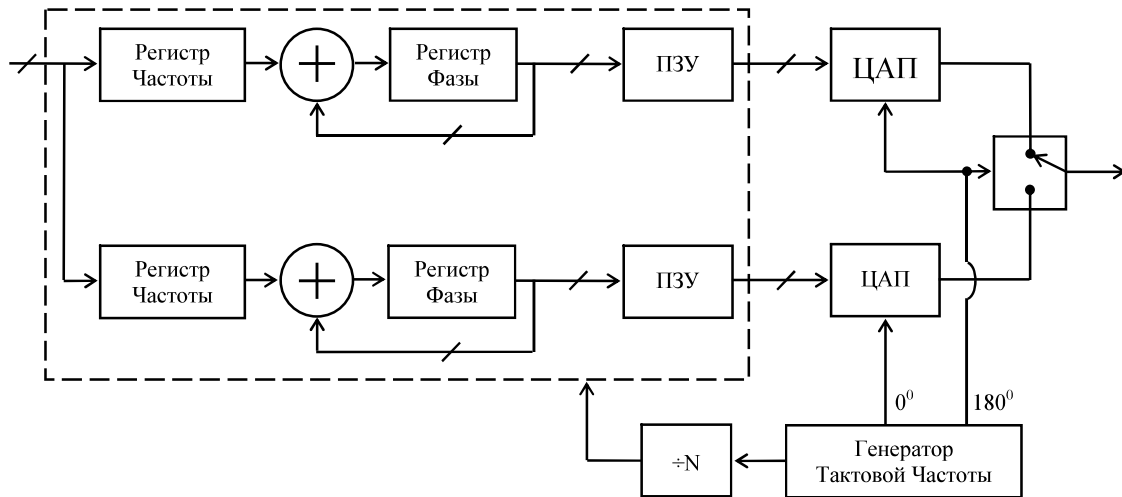


Рис. 5. Многоканальная структура ЦВС с чередованием ЦАП

В целом, ЦВС является весьма перспективным направлением в плане увеличения рабочей частоты и уменьшения ПСС. ЦВС также широко применяют в более сложных прямых аналоговых синтезаторах, а также в синтезаторах на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для обеспечения требуемого разрешения по частоте.

Косвенный синтез

Косвенный синтез подразумевает генерацию сигнала непосредственно в СВЧ-диапазоне с помощью дополнительного генератора, управляемого напряжением (ГУН), частота которого определяется частотой опорного генератора с помощью фазовой автоподстройки частоты. Главными преимуществами схем на основе ФАПЧ являются более чистый спектр выходного сигнала, обусловленный эффективными фильтрационными свойствами ФАПЧ и значительно меньшая сложность устройства по сравнению с прямыми аналоговыми синтезаторами. Основной недостаток – большее время перестройки (из-за инерционности системы автоподстройки) и значительно более высокий уровень фазового шума по сравнению с аналоговыми схемами. Фазовый шум зависит от коэффициента деления частотного делителя в кольце ФАПЧ, который – чтобы обеспечить требуемое разрешение по частоте – может быть довольно большим. Применяют различные решения для уменьшения коэффициента деления для заданного разрешения по частоте, например, путем использования дробных коэффициентов деления.

Вместе с тем, существуют решения, позволяющие полностью исключить делитель из кольца ФАПЧ и, следовательно, резко снизить фазовые шумы и ПСС при сохранении высокой скорости перестройки. К таким решениям относят различные схемы с преобразованием частоты (офсетные схемы) и многокольцевые синтезаторы. Возможно использование элементов прямого аналогового синтеза в кольце ФАПЧ (рис. 6). Показано, что при использовании общей опорной частоты интермодуляционные продукты преобразования смесителей совпадают с гармониками частоты сравнения фазового детектора (эффект кратности) и могут быть легко отфильтрованы фильтром ФАПЧ [17]. Возможно дальнейшее улучшение спектральных характеристик введением умножения в кольце ФАПЧ, как это концептуально показано на рис. 7.

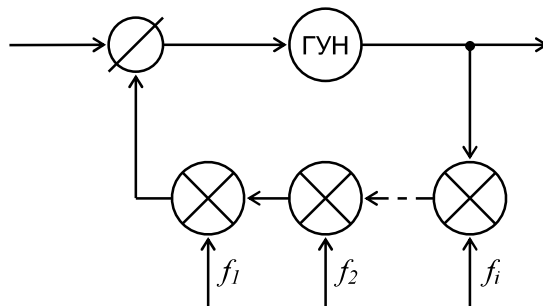


Рис. 6. Многократное преобразование в кольце ФАПЧ

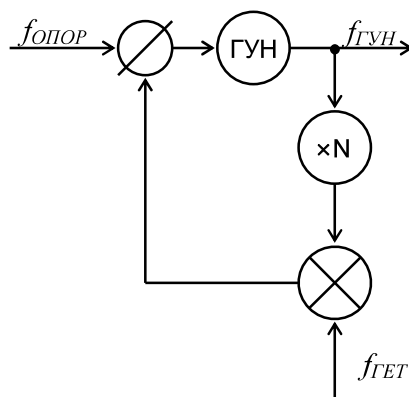


Рис. 7. Умножение в кольце ФАПЧ

Генерирование опорной частоты

Фазовые шумы современных СЧ в основном определяются шумами используемых генераторов опорной частоты, в частности, 100-МГц кварцевых генераторов (КГ). Для уменьшения фазовых шумов на низких отстройках применяют синхронизацию с 10-МГц КГ. Для минимизации шумов на высоких отстройках, соответственно, применяют синхронизированные высокочастотные генераторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и диэлектрических резонаторах в качестве составного опорного генератора, как это показано на рис. 8. Перспективными выглядят разработки новых опорных генераторов с применением комбинированной стабилизации сигнала (КСС) и генераторов на лейкосапфировых резонаторах [18, 19], а также оптоэлектронных генераторов [20]. В частности, сообщается достижение фазовых шумов -170 дБн/Гц на отстройке 10 кГц на выходной частоте 10 ГГц для лейкосапфирового генератора с КСС [21].

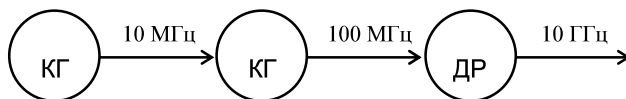


Рис. 8. Применение составного опорного генератора

Модуляция

В СЧ контрольно-измерительной аппаратуры традиционно применяют различные виды аналоговой модуляции, например, амплитудную, частотную, фазовую и импульсную модуляции. В современных СЧ перспективным является применение более сложных форм выходного сигнала с помощью векторной IQ-модуляции [22-30]. При этом происходит постоянное расширение полосы модулирующего сигнала до сотен мегагерц и даже единиц гигагерц. Проектирование векторных модуляторов с широкой полосой модулирующего сигнала и стабильными характеристиками в широком температурном диапазоне является далеко не тривиальной задачей.

Выводы

В настоящий момент объем рынка СЧ СВЧ-диапазона для контрольно-измерительной аппаратуры составляет около \$300М и характеризуется годовым ростом в 3%. Современные СЧ имеют широкий диапазон генерируемых частот с малым шагом, низкими фазовыми шумами и побочными спектральными составляющими. Однако, особым требованием и, по сути, направлением развития СЧ в настоящее время является увеличение скорости перестройки.

На сегодняшний день наиболее востребованными остаются традиционные архитектуры с ФАПЧ. С другой стороны, аналоговый синтезатор является наиболее передовой архитектурой, демонстрирующей исключительно высокую скорость перестройки и малые фазовые шумы.

Хотя его ценовые характеристики весьма высоки, тем не менее, аналоговый СЧ может быть хорошим решением в некоторых применениях, где низкая стоимость не является определяющим фактором.

Будущие разработки связаны с цифровым вычислительным синтезом в связи со стремительным развитием полупроводниковых технологий. Ожидается расширение рабочей полосы ЦВС до нескольких десятков ГГц, а также улучшение его спектральных характеристик. Современные СЧ также ориентируются на генерацию сложных форм выходного сигнала с применением векторной IQ-модуляции. Дальнейший скачок в развитии СЧ ожидается с применением новых видов генерации опорного сигнала в частности с использованием лейкосапфирных генераторов с КСС и оптоэлектронных методов.

Литература

1. *Ченакин А.* Частотный синтез: текущие решения и новые тенденции // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, 2008, № 1. С. 92-97.
2. *Манасевич В.* Синтезаторы частот. Теория и проектирование. Пер. с англ. под ред. А.С. Галина. М.: Связь, 1979. 384 с.
3. *Шапиро Д.Н., Паин А.А.* Основы теории синтеза частот. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.
4. *Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А., Карякин В.Л., Петров В.А., Федосеева В.Н., Пестряков А.В., Акимов В.Н.* Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации. 2-е издание, доп. и перераб. М.: Радио и связь, 1989. 320 с.
5. *Шахтарин Б.И., Прохладин Г.Н., Иванов А.А., Быков А.А., Чечулина А.А., Гречищев Д.Ю.* Синтезаторы частот: Учебное пособие. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 128 с.
6. *Shakhgil'dyan V.V., Pestryakov A.V., Kabanov A.I.* General principles for designing fast frequency synthesizers based on phase sync systems // *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 1983, No 10, p. 52.
7. *Pestryakov A.V., Kozlov A.L.* Low power consumption frequency synthesizers based on pulsed phased-locked loop pulse systems with cyclic interrupts // *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 1991.
8. *Shakhgil'dyan V.V., Pestryakov A.V.* Promising trends in the development of a dynamic theory of digital phase-locked systems for frequency synthesizers and stabilizers. // *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, November 1993.
9. *Shakhgil'dyan V.V., Pestryakov A.V.* Development tendencies of frequency synthesis technique for telecommunication systems and devices // *Elektrosvyaz*, January 2003, pp. 74-78.
10. *Itkin G., Pestryakov A.* Multi-band Frequency Synthesizer for Mobile Terminals. US Patent No. 6,828,863, December 2004.
11. *Pestryakov A., Smirnov A.* Multi-band Frequency Synthesizer. EU Patent No. EP1458111, November 2003.
12. Analysis of the Signal Generator and Arbitrary Waveform Generator Market. Frost and Sullivan Research Report, December 2011, www.frost.com.
13. Signal Generators Market by Products. Profound Research Report, June 2013, www.profound.com.
14. *Chenakin A.* Frequency Synthesis: Current Status and Future Projections // *Microwave Journal*, April 2017, pp. 22-36.
15. *Баринов Д.А., Коломейцев В.А., Посадский В.Н.* Широкополосный синтезатор частот с быстрой перестройкой и высокой чистотой спектра. // *Электронная техника*, Сер. 1, СВЧ-техника, вып. 3(514), 2012, с. 50-58.
16. *Кочемасов В., Голубков А, Егоров Н., Черкашин А., Чузуй А.* Цифровые вычислительные синтезаторы - применение в системах синтеза частот и сигналов // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, 2014, №8. С. 171-178.
17. *Chenakin A.* Low Phase Noise PLL Synthesizer. US Patent No. 7,701,299, April 2010.
18. *Tsarapkin D.* Low Phase Noise Sapphire Disk Dielectric Resonator Oscillator with Combined Stabilization. IEEE Int. Frequency Control Symposium Proc., June 1994, pp. 451-458.
19. *Ivanov E., Tobar M. and Woode R.* Microwave Interferometry: Application to Precision Measurements and Noise Reduction Techniques. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, November 1998, pp. 1526-1536.
20. *Yao S. and Maleki L.* Characteristics and Performance of a Novel Photonic Oscillator. IEEE Int. Frequency Control Symposium Proc., May-June 1995, pp. 161-168.
21. *McNeilage C., et al.* A Review of Sapphire Whispering Gallery-Mode Oscillators Including Technical Progress and Future Potential of the Technology. IEEE Int. Frequency Control Symposium Proc., August 2004, pp. 210-218.
22. *Дингес С.И., Комаров М.В., Пестряков А.В.* Векторный анализ и формирование модулированных сигналов. // *Электросвязь*, 2008, № 6. С. 34-36.
23. *Дингес С.И., Колесников И.И., Пестряков А.В.* Программный комплекс векторного формирования и анализа сигналов цифровых систем связи вектор версии 3.5 // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2012. Т. 6. № 9. С. 56-58.
24. *Poborchaya N.E., Pestryakov A.V., Khasyanova E.R.* Synthesis and analysis of the compensation algorithm to the qam signal distortion due to non idealities of quadrature downconversion at awgn and phase noise in the presence of quazideterministic bandpass interference // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2015. Т. 9. № 3. С. 82-85.
25. *Пестряков А.В., Поборчая Н.Е., Хасьянова Е.Р.* Упрощенные алгоритмы компенсации искажений кам-сигнала, наблюдаемого на фоне аддитивного шума // *Электросвязь*. 2016. № 4. С. 35-40.

26. *Пестряков А.В., Хасьянова Е.Р.* Анализ методов компенсации неидеальной работы квадратурных преобразователей радиоприемников цифровой радиосвязи // *Электросвязь*. 2013. № 5. С. 20-24.
27. *Дингес С.И., Пестряков А.В.* Программный комплекс формирования и анализа сигналов современных и перспективных телекоммуникационных систем // *T-Compt: Телекоммуникации и транспорт*. 2015. Т. 9. № 3. С. 62-65.
28. *Дингес С.И., Пестряков А.В.* Программный комплекс обучения современным телекоммуникационным технологиям "вектор" версии 5.5 // *Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе*. 2014. Т. 3. № 3. С. 98-103.
29. *Константинов А.С., Пестряков А.В.* Анализ фундаментальных ограничений максимальной скорости передачи информации в сети LTE-Advanced // *T-Compt: Телекоммуникации и транспорт*. 2017. Т. 11. № 12. С. 60-63.
30. *Громорушкин В.Н., Пестряков А.В., Чугунов И.В.* Двухканальный программно аппаратный имитатор канала распространения длинных, средних и коротких волн // *DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов*. 2016. Т. 6. № 2. С. 453-456.
31. *Шахгильдян В.В., Пестряков А.В., Кабанов А.И.* Общие принципы построения быстродействующих синтезаторов частот на основе систем фазовой синхронизации // *Электросвязь*. 1983. № 10. С. 36.
32. *Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешников В.С.* Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. Москва, 1983.