

УДК 621.391

О.И. Бокова, Д.А. Жайворонок, О.С. Слестникова  
**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВ  
АНАЛОГОЦИФРОВОГО ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
ШИРОКОПОЛОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПЕЛЕНГОВАНИЯ**

*Воронежский институт МВД России  
ЦИТСиЗИ УМВД России по Ханты-Мансийскому  
автономному округу-Югре*

*В статье рассматриваются актуальные на сегодняшний день вопросы использования устройств аналого-цифрового приема и обработки (АЦПО) радиосигналов для осуществления контроля загруженности частотного спектра, обнаружения и анализа новых излучений, определения местоположения их источников, а также выявления непреднамеренных или специально организованных каналов утечки информации. Для повышения эффективности работы АЦПО предлагается обеспечить быструю перестройку частоты станции по рабочему диапазону, без ухудшения характеристик работы приемопередатчика. В частности, обеспечение заданных динамических и спектральных характеристик, предлагается получить путем построения тандемных цифровых синтезаторов частот (ЦСЧ). При компьютерном проектировании станции разработана принципиальная схема двух кольцевого ЦСЧ с автоматической компенсацией частотных искажений на современной элементной базе. Кроме того, проведен анализ амплитудно-частотных модуляционных характеристик предложенной схемы, а также проведен анализ реакции предложенной схемы на паразитное приращение фазы опорного колебания. В работе получены передаточные модуляционные функции предложенной схемы и определены условия устойчивости режима угловой модуляции. Таким образом, использование двух кольцевого цифрового синтезатора частот в конструкторском решении помехоустойчивого приемопередатчика, обеспечивает быструю перестройку частот по рабочему диапазону длин волн с угловой модуляцией, без ухудшения его основных характеристик.*

**Ключевые слова:** синтезатор частот, импульсно-фазовая автоподстройка частоты, сетка частот, быстродействие.

В последнее время для осуществления постоянного или периодического контроля загруженности частотного спектра, обнаружения и анализа новых излучений, определения местоположения их источников, а также выявления непреднамеренных или специально организованных каналов утечки информации все большую актуальность приобретает использование устройств аналого-цифрового приема и обработки (АЦПО) радиосигналов.

Устройство АЦПО обычно представляет собой двухканальный программно-управляемый радиоприемник супергетеродинного типа с тремя преобразованиями частоты. Перестройка приемника осуществляется изменением частот гетеродинов. Антенные входы рассчитаны на

подключение антенн несимметричным коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом. Цифровая обработка принимаемых сигналов осуществляется в устройстве цифровой обработки.

Целью данной статьи является обеспечение быстрой перестройки частоты станции по рабочему диапазону, без ухудшения характеристик работы приемопередатчика.

Конструктивно приемник выполняется в виде одного блока (Рисунок 1), в котором размещены: аналоговая часть и цифровая часть – устройство цифровой обработки сигналов (ЦОС). Аналоговый приемный тракт оканчивается выходами на частоте 88 МГц. Цифровой тракт, состоящий из устройства ЦОС и ЭВМ со специальным программным обеспечением, имеет выходы для подключения внешней ПЭВМ (порты Ethernet).

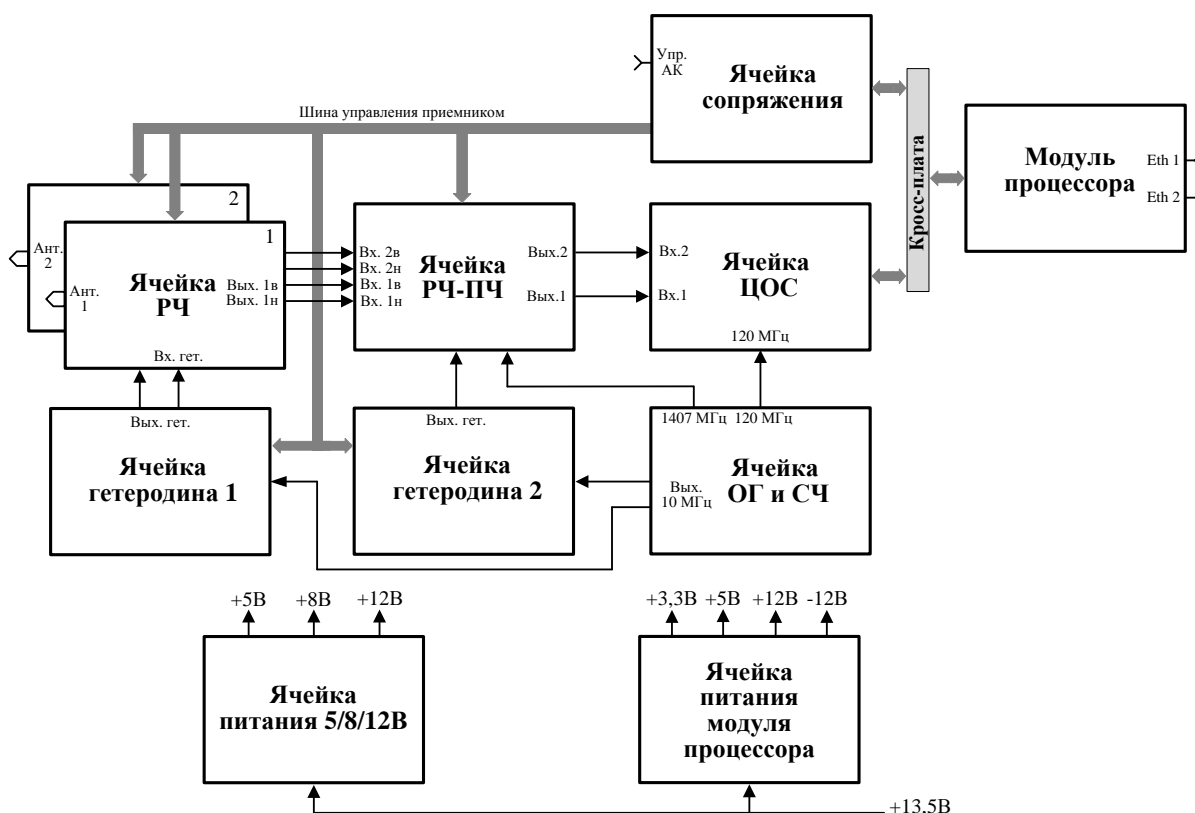


Рисунок 1 – Структурная схема двухканального устройства АЦПО

Ячейка РЧ и гетеродин 1 образуют встроенный в приемник конвертер, принимающий сигналы в диапазоне 1000...3000 МГц и осуществляющий линейный перенос их спектров в диапазон 325...775 МГц (Рисунок 2).

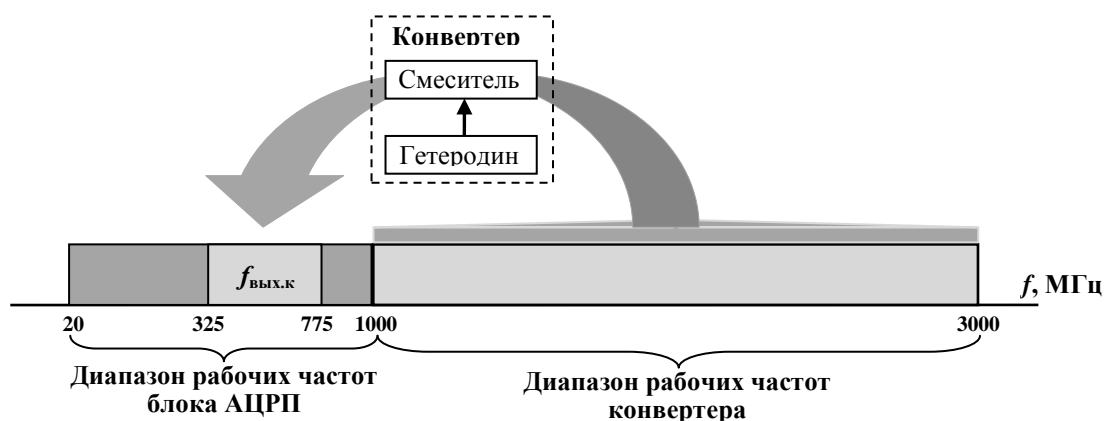


Рисунок 2 – Конвертирование спектров сигналов.

Ячейка РЧ – смеситель конвертера, который осуществляет прием сигналов в диапазоне частот 1000...3000 МГц и линейный перенос их спектров в диапазон 325...775 МГц. Преобразование обеспечивается с помощью гетеродина конвертера, работающего в диапазоне 1500...2200 МГц. При работе конвертера в диапазоне 1000...1800 МГц используется «верхняя» настройка гетеродина ( $f_{\text{вых.к.}} = f_{\text{гет}} - f_c$ ), а в диапазоне 1800...3000 – «нижняя» ( $f_{\text{вых.к.}} = f_c - f_{\text{гет}}$ ).

В диапазоне частот 30...1000 МГц преобразований принимаемых сигналов в ячейке РЧ не происходит, поскольку сигналы со входа ячейки РЧ коммутируются на ее выход.

На входе ячейки РЧ имеются аттенюаторы, дискретно регулирующие уровни входных сигналов и позволяющие снизить уровни интермодуляционных помех. Пределы регулирования ослабления аттенюаторов 0...30 дБ, шаг регулирования 5 дБ.

Ячейка РЧ/ПЧ выполняет избирательно-усилительную и преобразовательную функции. Ширина полосы пропускания ячейки по входу соответствует диапазону рабочих частот приемника (30...1000 МГц).

Смесители ячейки с помощью внешних гетеродинов обеспечивает два преобразования несущих частот сигналов: одно на промежуточную частоту 1495 МГц (ПЧ1), а второе – на промежуточную частоту 88 МГц (ПЧ2). Как при первом, так и при втором преобразовании осуществляется линейный перенос спектров принимаемых сигналов на соответствующие промежуточные частоты. Ширина полосы пропускания по промежуточной частоте 1495 МГц около 40 МГц, по промежуточной частоте 88 МГц – 20 МГц.

Гетеродинирующие колебания с частотами первого гетеродина формируются в ячейке гетеродина 1, а с частотой второго гетеродина – в ячейке опорного генератора (ОГ) и синтезатора частот (СЧ).

Ячейка ОГ и СЧ. В состав ячейки входят два гетеродина-синтезатора частот: один из них формирует колебания с частотой 1407 МГц, а второй – колебания с частотой 120 МГц, используемые в устройстве ЦОС для дискретизации принимаемых аналоговых сигналов при их преобразовании в цифровую форму. В случае применения классических схем построения однокольцевых цифровых синтезаторов частот приходится сталкиваться с противоречием: невозможно получить одновременно высокую чистоту спектра выходного высокочастотного сигнала при перестройке в широком диапазоне частот с малым шагом сетки частот и высокое быстродействие при переключении с одной частоты на другую. Применение двухкольцевого цифрового синтезатора частот с автоматической компенсацией частотных искажений позволяет решить данное противоречие.

В качестве метода повышения помехоустойчивости станции выбран метод прыгающих радиочастот (ПРЧ), который в сочетании с цифровой обработкой принятого сигнала позволит переключать частотные каналы станции либо в автоматическом режиме, либо по команде оператора. Применение данного метода подразумевает быструю перестройку частот станции по рабочему диапазону, при этом характеристики приемопередатчика не должны ухудшаться.

Ключевым элементом станции, позволяющим решить эту задачу, является перспективное конструкторское решение синтезатора частот приемопередатчика.

Известно, что система импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ) ЦСЧ представляет собой фильтр нижних частот по отношению к шумам колебания опорной частоты и фильтр верхних частот по отношению к шумам генератора, управляемого напряжением (ГУН). Поэтому, если необходимо подавить шумы колебания опорной частоты до требуемых значений, надо использовать узкополосную петлю ИФАПЧ. В этом случае не будут выполняться требования по быстродействию и не компенсируются собственные шумы ГУН, для чего нужна широкополосная петля ИФАПЧ. С другой стороны, если спроектировать кольцо ИФАПЧ со сравнительно широкой полосой частот, что и требуется для быстродействующего синтезатора, тогда шумы опорного генератора, после повышения частоты путем умножения пропорционально коэффициенту  $N$  до выходной частоты будут определять основные шумы на выходе синтезатора.

За основу построения синтезаторов станции взята идея двухкольцевого цифрового синтезатора частот (ЦСЧ) [1,3] с автоматической компенсацией частотных искажений.

Известен двухкольцевой ЦСЧ с частотной модуляцией (ЧМ) [2] с последовательным включением колец ИФАПЧ, в котором функции

частотообразования разделены между первым и вторым кольцами, что уменьшает отмеченные выше противоречия. В этом ЦСЧ первое кольцо узкополосное и является опорным для второго широкополосного выходного кольца. Во втором кольце с использованием делителя частоты с дробным переменным коэффициентом деления (ДДПКД) вместо целочисленного ДПКД можно получить высокое быстродействие, которое в настоящее время необходимо в системах связи на основе быстрого переключения частот по заданной программе.

Структурная схема тандемного ЦСЧ представлена на Рисунке 3

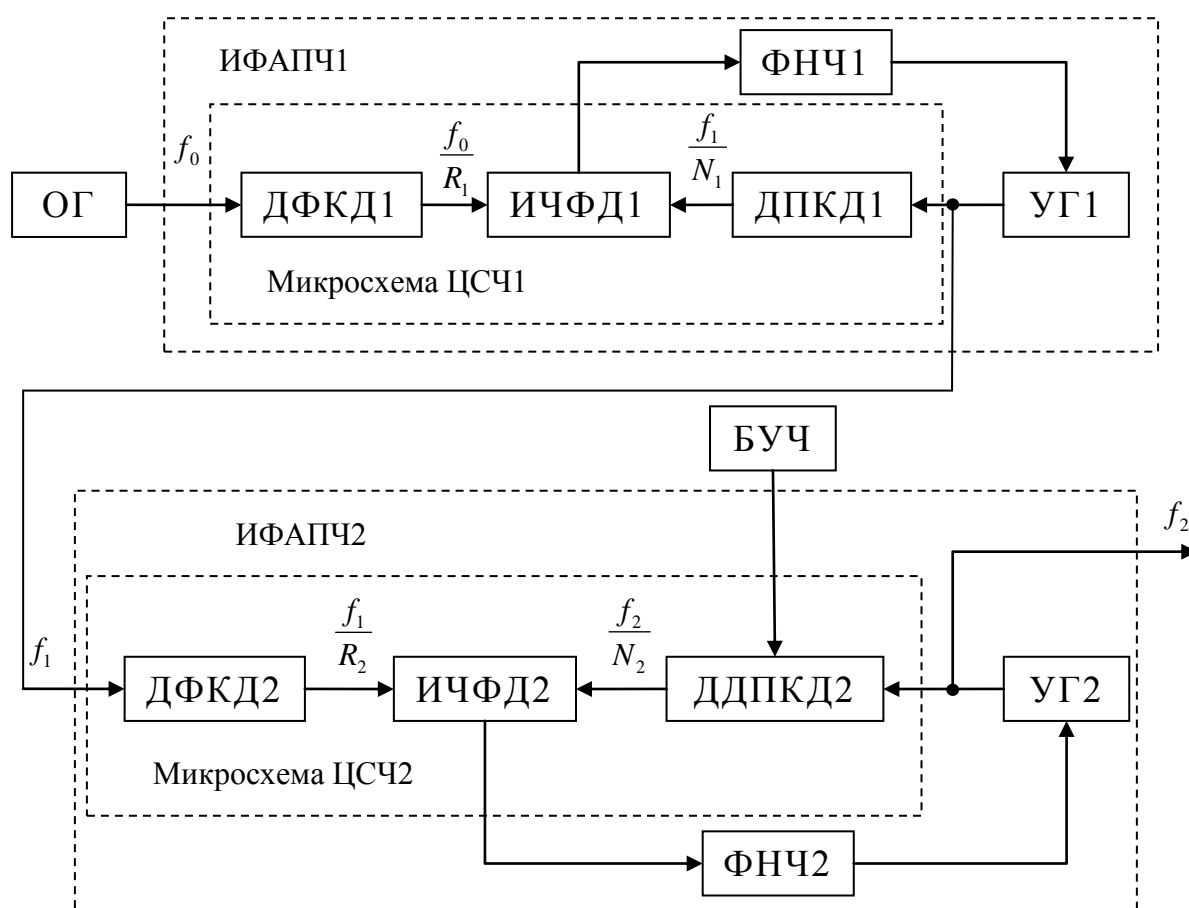


Рисунок 3 – Структурная схема тандемного ЦСЧ.

На этом рисунке приняты следующие обозначения:  $f_1$  — частота колебания на выходе ИФАПЧ1;  $f_2$  — частота колебания на выходе ИФАПЧ2;  $R_1, R_2$  — постоянные коэффициенты деления ДФКД1 и ДФКД2;  $N_1$  — постоянный коэффициент деления ДПКД1;  $N_2$  — переменный средний дробный коэффициент деления ДДПКД2.

Кольцо ИФАПЧ1 синтезирует сигнал с фиксированной частотой  $f_1$ , который является опорным для кольца ИФАПЧ2, при этом  $f_1 \gg f_0$ . Корректирующий фильтр ФНЧ1 выбирается таким образом, чтобы спектр сигнала управляемого генератора (УГ1) определялся спектром сигнала ОГ до частоты среза  $f_{c1}$  кольца ИФАПЧ1 и спектром сигнала УГ1 за частотой среза  $f_{c1}$  кольца ИФАПЧ1. Это позволяет получить высокое качество синтезированного колебания УГ1 с частотой  $f_1$ , поскольку сигнал УГ1 имеет меньший уровень фазовых шумов, чем сигнал ОГ при отстройках от несущей частоты на десятки и сотни килогерц.

Следовательно спектральная характеристика выходного синтезированного колебания ИФАПЧ2 с частотами  $f_2$  в областях, в которых шумы ОГ больше шумов УГ1, значительно улучшается. В связи с тем что  $f_1 \gg f_0$ , можно повысить частоту сравнения  $f_{cp2}$  кольца ИФАПЧ2, что позволяет снизить общий уровень фазовых шумов выходного сигнала тандемного ЦСЧ за счет уменьшения коэффициента умножения шумов в кольце ИФАПЧ2 при высоком быстродействии тандемного ЦСЧ.

Таким образом, тандемный ЦСЧ позволяет реализовать широкий диапазон синтезируемых частот  $f_2$  в ОВЧ и УВЧ диапазонах, широкий диапазон шага сетки  $f_{III}$  от нескольких килогерц до десятка мегагерц при высоком быстродействии и низком уровне шумов. При компьютерном проектировании станции разработана принципиальная схема двухкольцевого ЦСЧ с автоматической компенсацией частотных искажений на современной элементной базе.

Кроме того, получены передаточные модуляционные функции предложенной схемы и определены условия устойчивости режима угловой модуляции, проведен анализ амплитудно-частотных модуляционных характеристик предложенной схемы, а также проведен анализ реакции предложенной схемы на паразитное приращение фазы опорного колебания.

Зафиксированное время установления частоты составляет не более 5 мс в рабочем диапазоне частот. Спектр синтезируемого сигнала представлен на Рисунке 4.

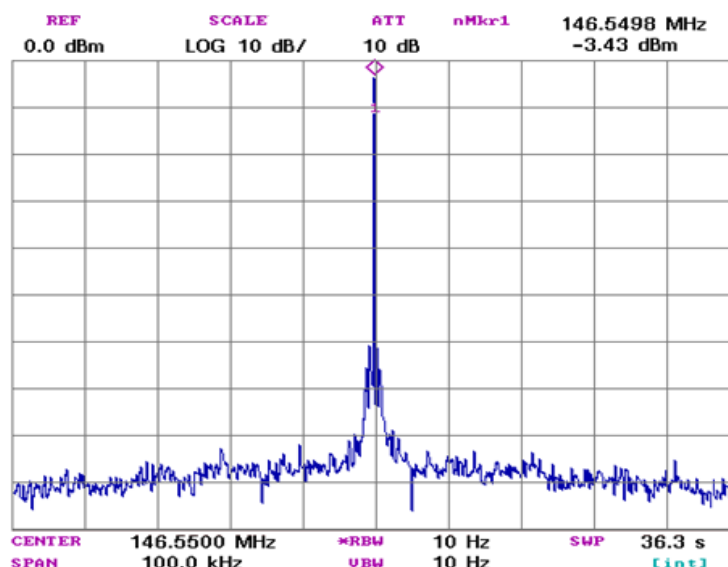


Рисунок 4 – Спектр выходного сигнала синтезатора

Таким образом, использование двухкольцевого цифрового синтезатора частот в конструкторском решении помехоустойчивого приемопередатчика, обеспечивает быструю перестройку частот по рабочему диапазону длин волн с угловой модуляцией, без ухудшения его основных характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Системы и сети передачи информации: учебное пособие / О.И. Бокова, Д.А. Жайворонок, Н.Н. Оськин, Н.С. Хохлов. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015.— 154 с.
2. Патент 6044124 США. МКИ H03D Delta Sigma PLL with low jitter [Text] / Peter Monahan, Declan Farrely, Nial O' hEarcain (США). – № 08/916619; Заявл. 22.08.97.; Опубл. 28.03.00.
3. Свидетельство на ПМ № 139091 РФ, Тандемный цифровой синтезатор частот с частотной модуляцией. [Текст] /О.В.Четкин, О.И. Бокова, Е.А. Печенин, О.С. Слестникова. – № 139091; Заявл 15.10.13. Опубл. 10.04.14. Бюл. №5.
4. Кириллов С.Н., Бодров О.А., Макаров Д.А. Стандарты и сигналы средств подвижной радиосвязи. Рязань: РГРТА. 1999.
5. Гольцова М. Широкополосные ЦАП: борьба на рынке коммуникационных систем усиливается. // Электроника. 2001. №2.
6. Bluetooth: устройства всех стран, соединяйтесь! ...без проводов. // Электроника. 2000. №5.

7. Уолт Кестер, Джеймс Брайэнт. Аналого-цифровые преобразователи для задач цифровой обработки сигналов. [www.analog.com.ru/public/3.pdf](http://www.analog.com.ru/public/3.pdf)
8. Проектирование радиопередатчиков: Учеб. пособие для вузов. / Под ред. В.В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь. 2000. 654 с.
9. Рябов И.В. Метод прямого цифрового синтеза прецизионных сигналов // Радиотехника. - 2006. - № 9. - С. 11-17.
10. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. - М.: 2008.
11. Ашанин В.Н., Исаев С.Г., Ермаков В.В. Схемотехника: учебное пособие. - Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007.

O.I. Bokova, D.A. Zhayvoronok, O.S. Slastnikova  
**IMPROVED PERFORMANCE DEVICES  
ANALOG-RECEPTION AND PROCESSING OF SIGNALS  
BROADBAND COMPLEXES DIRECTION FINDING**  
*Voronezh Institute of Russian Ministry of Internal Affairs  
TsITSiZI AMIA Russia's Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra*

*The article deals with topical issues of today use analog-to-digital receiving and processing devices (ATSPD) radio signals to control congestion of the frequency spectrum, the detection and analysis of new emissions, determining the location of their sources, as well as identifying unintended or specially organized channels of information leakage. To improve the effectiveness of the proposed ATSPD provide frequency agility operating range station, without derating transceiver operation. In particular, the provision of specific dynamic and spectral characteristics, receives by constructing a tandem digital frequency synthesizer (TSSCH). In computer design stations developed the concept of the two ring TSSCH with automatic compensation of frequency distortion on modern element base. In addition, the analysis of amplitude-frequency modulation characteristics of the proposed scheme, as well as the analysis of the reaction of the proposed scheme in the parasitic increment the reference oscillation phase. We obtain the modulation transfer function of the proposed scheme and the defined conditions of sustainability of the angle modulation. Thus, the use of two digital frequency synthesizer annular in design decision error-correcting transceiver provides frequency agility over the operating range of wavelengths with angle modulation, without impairing its essential characteristics.*

**Keywords:** frequency synthesizer, pulse-phase-locked-often you, frequency grid, speed.



## REFERENCES

1. Systems and information transfer network: a tutorial / OI Bokova, DA Zhayvoronok, NN Os'kin, NS Khokhlov. - Voronezh: Voronezh Institute of Russian Ministry of Internal Affairs, 2015.- 154 p.
2. Patent 6,044,124 US. MKI H03D Delta Sigma PLL with low jitter [Text] / Peter Monahan, Declan Farrely, Nial O 'hEarcain (USA). - № 08/916619; Stated. 08.22.97 .; Publ. 03.28.00.
3. Evidence on the PM number 139 091 RF, Tandem digital frequency synthesizer with frequency modulation. [Text] /O.V.Chetkin, OI Bokova, EA Pechenin, OS Slastnikova. - № 139 091; Stated 10/15/13. Publ. 04.10.14. Bull. №5.
4. Kirillov SN, Bodrov OA, Makarov DA Standards and signals of mobile radio resources. Ryazan: RGRТА. 1999.
5. Goltsova M. Broadband DAC: the struggle to communication systems on the market intensifies. // Electronics. 2001. №2.
6. Bluetooth: devices of all countries, unite! ... Without any wires. // Electronics. 2000. №5.
7. Walt Kester, James Bryant. Analog-to-digital converters for digital signal processing tasks. [www.analog.com.ru/public/3.pdf](http://www.analog.com.ru/public/3.pdf)
8. Design of radio transmitters: Proc. manual for schools. / Ed. VV Shakhgildyan. M .: Radio and communication. 2000. 654 p.
9. Igor Ryabov The method of direct digital synthesis of precision signals // Radio engineering. - 2006. - № 9. - S. 11-17.
10. Gusev VG, Gusev Yu Electronics and microprocessor technology. - M .: 2008.
11. Ashanin VN, SG Isaev, VV Ermakov Circuitry: a tutorial. - Penza: Information and Publishing Center of PSU 2007.