

# ПРИМЕНЕНИЕ МОНОБИТНОЙ ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ В ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

*Ю.Т. Карманов, А.Н. Николаев, Я.Г. Зеленцова,  
С.В. Поваляев, И.И. Заляцкая*

Рассмотрены и проанализированы существующие и перспективные способы цифровой обработки радиосигналов, которые потенциально могут быть использованы для создания широкополосных цифровых устройств обработки радиосигналов. Показано, что наиболее удобным, доступным и недорогим инструментом при создании цифровых устройств обработки радиосигналов в широком диапазоне частот (до 20 000 МГц), является монобитная цифровая технология обработки радиосигналов. Установлено, что монобитную цифровую технологию обработки радиосигналов целесообразно применять в широкодиапазонных радиоэлектронных системах (РЭС) для быстрого обнаружения радиосигналов, быстрого (но достаточно грубого) определения их несущих частот, разностей фаз радиоимпульсов РЭС. Рассмотрена структура и алгоритмы обработки радиосигналов типового монобитного цифрового устройства обработки радиосигналов.

*Ключевые слова: монобитная цифровая технология, радиоэлектронные системы, аналого-цифровое преобразование, быстрое преобразование Фурье.*

## **Введение**

Логика развития современного информационного общества определяет тенденцию постоянного роста требований по расширению рабочих частотных диапазонов, выполняемых функций, увеличения точности и повышения быстродействия аппаратуры радиоэлектронных средств радиолокации, радионавигации и радиосвязи, с одновременным уменьшением их габаритов, энергопотребления и стоимости.

Так, например, за последние 5 лет требования к ширине рабочего частотного диапазона радиоэлектронных систем (РЭС) возросли в несколько раз. Стандартный рабочий диапазон частот 4–18 ГГц ранее обслуживался как минимум тремя комплектами (литерами) радиоэлектронной аппаратуры. В настоящее время его необходимо обслуживать одним литером аппаратуры с улучшенными техническими и массогабаритными характеристиками.

Классические приемы расширения диапазона частот РЭС путем совершенствования СВЧ-узлов приемников радиосигналов, наращивания рабочей полосы каналов СВЧ-приемников и увеличения их числа исчерпали себя и не могут обеспечить требуемое расширение рабочего диапазона частот.

Например, матричный способ организации приема радиосигналов в широком диапазоне частот практически не работоспособен при расширении полосы каналов свыше 1–2 ГГц из-за резкого возрастания числа обрабатываемых радиосигналов и искажений частотных характеристик каналов [1].

На сегодняшнем этапе развития радиоэлектроники существенного расширения частотного диапазона РЭС с одновременным улучшением их технических и массогабаритных характеристик можно достичь путем использования цифровых технологий обработки радиосигналов.

Цифровые технологии обработки радиосигналов позволяют избавиться от многих пороков аналоговых приемников РЭС с одновременным расширением их рабочей полосы и уменьшением габаритов.

В настоящей статье анализируется возможность создания широкодиапазонных цифровых устройств на основе монобитного цифрового аналого-цифрового преобразования сигналов.

## **1. Анализ существующих способов расширения частотного диапазона цифровых устройств РЭС**

На рис. 1 систематизированы существующие и перспективные способы цифровой обработки радиосигналов, которые потенциально могут быть использованы для создания широкополосных цифровых устройств.

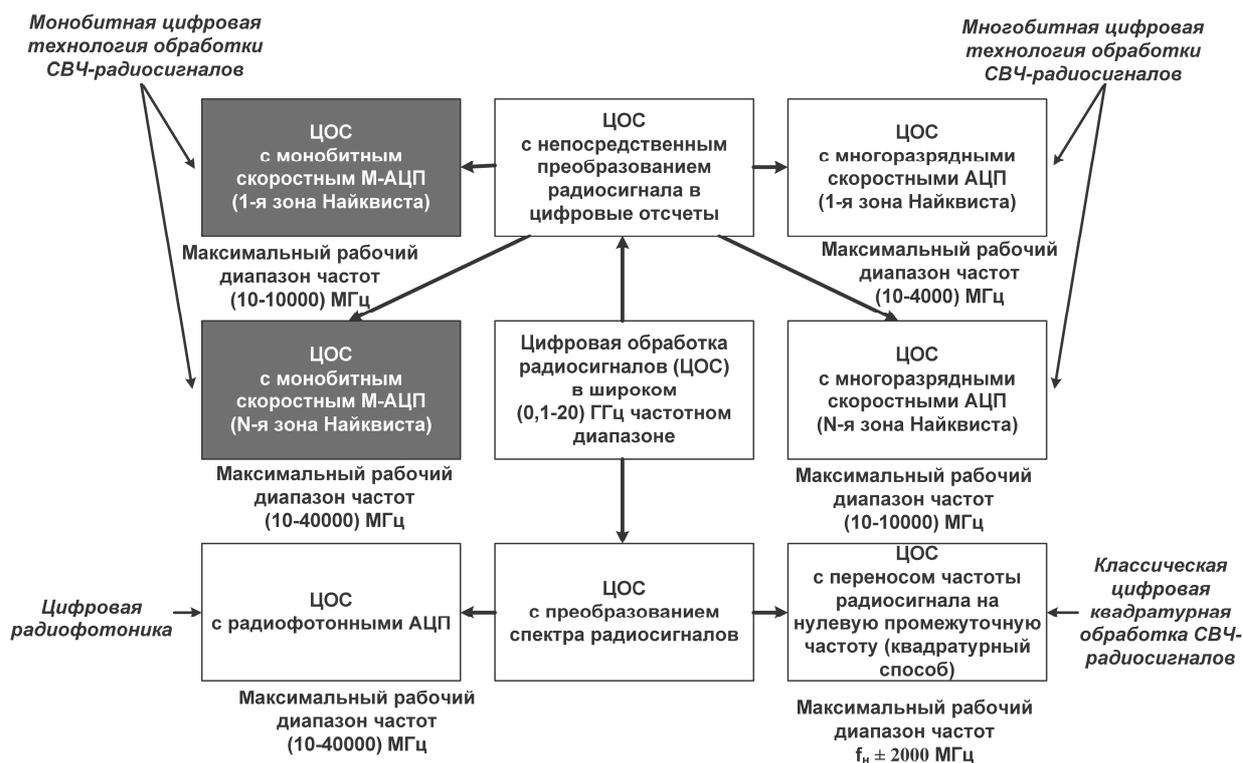


Рис. 1. Способы обработки СВЧ-радиосигналов в широком частотном диапазоне

На сегодняшний день широко используется «квадратурный» способ цифровой обработки сигналов, основанный на предварительном смещении спектра частот в «нулевую» область, выделения квадратурных составляющих сигналов с последующим их аналого-цифровым преобразованием (АЦП).

Впечатляющие успехи в области телекоммуникаций и радиосвязи во многом обязаны этому способу. Этим объясняются широкие возможности по его технической реализации на специально разработанной элементной базе.

Вместе с тем использование только квадратурного способа обработки радиосигналов для кардинального расширения частотного диапазона требует увеличения тактовых частот цифровых узлов (АЦП, ПЛИС, ЦАП) до нескольких десятков тысяч мегагерц.

Так, например, для обработки сигналов в полосе 2 ГГц квадратурным способом необходима тактовая частота цифровых устройств в 2,5 ГГц. В РЭС требуемая полоса достигает десятков гигагерц. Поэтому, несмотря на достоинства квадратурного способа, он может использоваться в перспективных РЭС только в совокупности с другими способами.

Вместе с тем, с появлением на рынке широкополосных квадратурных СВЧ-демодуляторов, способных функционировать на частотах до 18–20 ГГц, ситуация изменится и данный способ будет самостоятельно использоваться для широкополосной ЦОС.

Второй способ носит инновационный характер. Он основан на бурно развивающемся направлении обработки сигналов – «радиофотонике». В данном способе обрабатываемые радиосигналы предварительно переносятся в область оптических частот и преобразуются в поток цифровых слов с частотами до 100 000 МГц. Однако для его практического применения необходимо решить ряд проблем.

Во-первых, при радиофотонном способе обработки радиосигнал преобразуется в высокоскоростной цифровой поток, частота следования импульсов в котором доходит до 50–100 ГГц. Сегодня не существует цифровых устройств, способных обрабатывать такие скоростные цифровые потоки. Перспективы решения данной задачи туманны и требуют привлечения для этих целей новых физических принципов и идей.

Во-вторых, до инженерного воплощения в виде элементной базы радиофотонных АЦП и т. п. очень далеко. А без такого инженерного воплощения идей бесполезно обсуждать перспективы применения их в РЭС.

Следующие способы широкодиапазонной цифровой обработки радиосигналов основаны на непосредственном преобразовании радиоколебаний в скоростной поток цифровых отсчетов.

Заслуживают внимание два способа, позволяющие потенциально расширить частотный диапазон РЭС.

Первый способ основан на прямом преобразовании радиосигнала многоуровневыми скоростными АЦП с последующей обработкой цифрового потока скоростными ПЛИС по типовым алгоритмам.

Если при этом АЦП использует только первую зону Найквиста (частота сигнала  $f_c \leq (0,4 - 0,45)f_T$ ), то полоса частот обрабатываемых радиосигналов будет не больше, чем в классическом квадратурном методе.

Однако если использовать многоуровневые АЦП, способные обрабатывать радиосигналы во 2-й, 3-й и т. д. зонах Найквиста (частота сигнала  $f_c \leq k(f_T / 2)$ ,  $k$  – номер зоны Найквиста), то возможно расширение полосы обрабатываемых сигналов в  $k$  раз.

Например, при  $k = 3$  и  $k = 4$  можно достичь диапазона частот обработки радиосигналов до 10 000 МГц.

Использование зон Найквиста при  $k > 1$  порождает неоднозначности определения частотных составляющих спектра обрабатываемого сигнала. В этом случае радиосигналы, принятые в широком диапазоне частот шириной  $k(f_T / 2)$ , «сворачиваются» в более узкий диапазон частот шириной  $0,9(f_T / 2)$ . Это обстоятельство порождает ряд проблем, требующих для решения привлечения дополнительных способов.

Во-первых, чтобы «восстановить» истинную информацию о частотах спектральных составляющих радиосигнала приходится использовать несколько АЦП с разными тактовыми частотами. При этом возрастают массогабаритные характеристики, сложность и стоимость устройства, возникают дополнительные ошибки.

Во-вторых, «свертка» большого числа сигналов из широкого частотного диапазона в узкий диапазон частот неизбежно порождает взаимные помехи, которые не только ухудшают качество обработки сигналов, но и существенно увеличивают время, необходимое для устранения «неоднозначности», что создает проблемы при обработке импульсных радиосигналов с изменяющейся частотой от импульса к импульсу. В диапазоне 1–18 ГГц работает много РЭС, и наличие большого числа радиосигналов является обыденным явлением.

Второй способ [2–12] основан на применении высокоскоростных однобитных (монобитных) АЦП, известных как «компараторы» сигналов.

Заманчиво использовать монобитное преобразование радиосигналов, так как при этом:

– в качестве АЦП можно использовать давно известные «компараторы» сигналов, в которых тактовая частота достигает  $> 40\,000$  МГц и они способны преобразовывать радиосигналы в цифровые отсчеты в первой зоне Найквиста с несущей частотой до 20 000 МГц, где отсутствует неоднозначность по частоте; ВЧ-компараторы могут работать также и в зонах Найквиста высоких порядков;

– монобитные цифровые потоки имеют возможность работать с ПЛИС, сигнальными процессорами и т. п. с невысокими тактовыми частотами, так как существуют надежные и недорогие микросхемы – демультимплексоры, преобразующие высокоскоростной цифровой поток в совокупность субпотоков (фаз) с меньшей частотой. Кроме того, монобитный поток цифровых отсчетов имеет меньшую интенсивность, чем многоуровневые потоки.

– алгоритмы обработки монобитного цифрового потока сильно упрощаются и ускоряются, так как многие операции типа умножения, деления, сложения вырождаются в стандартные логические операции.

Вместе с тем, переход от многоуровневых АЦП к монобитным АЦП ведет к частичной потере информации о радиосигнале, что может ухудшить качество обработки радиосигналов. Поэтому отметим, что переход к монобитным АЦП, по существу означает обработку радиосигналов, жестко ограниченных по амплитуде.

Особенности обработки ограниченных по амплитуде радиосигналов подробно изучены. Показано, что в ряде случаев ограничение сигналов по амплитуде не вносит больших искажений. В частности, получили известность и широко применяются схемы ШОУ – широкополос-

ное ограничение радиосигналов по амплитуде + узкополосная фильтрация ограниченных радиосигналов [13].

Суммируя сказанное, можно сделать вывод: монобитное аналого-цифровое преобразование радиосигналов является удобным, доступным и недорогим инструментом при создании цифровых устройств обработки радиосигналов в широком диапазоне частот (до 20 000 МГц) для перспективных широкодиапазонных РЭС.

## 2. Монобитная цифровая технология обработки радиосигналов

На рис. 2 приведена схема типового монобитного цифрового устройства обработки радиосигналов [3, 4].

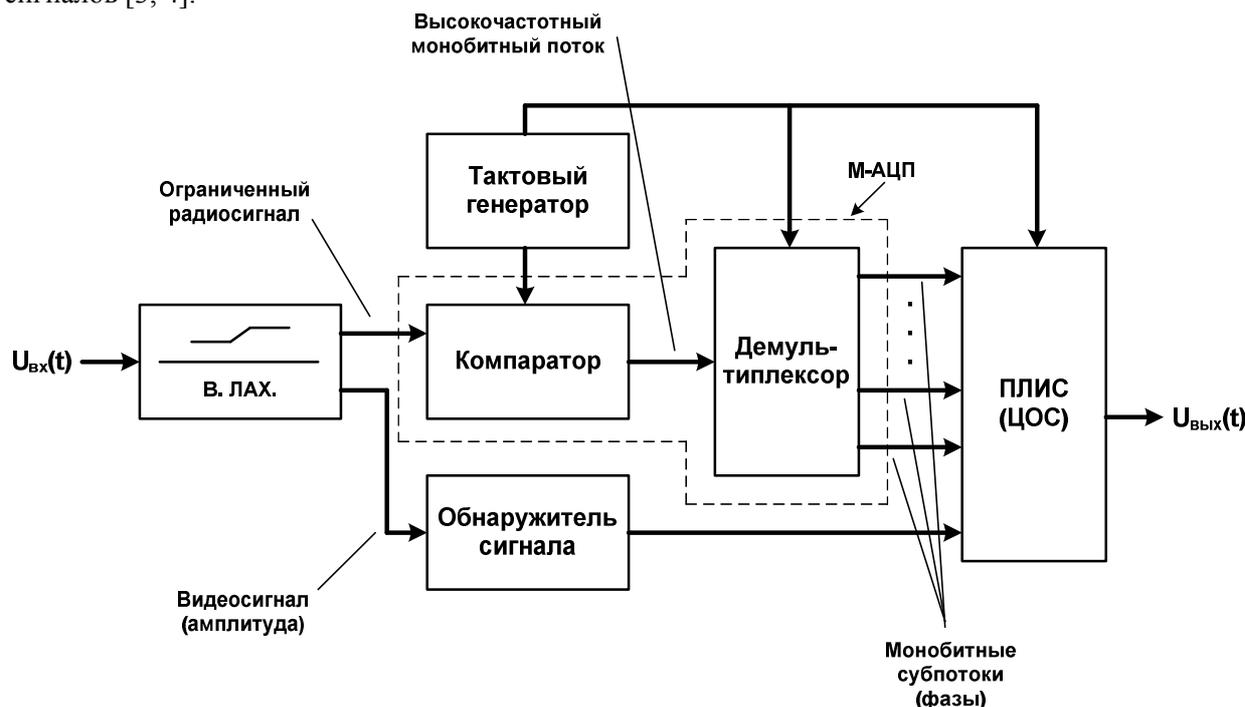


Рис. 2. Монобитная цифровая технология обработки радиосигналов

Типовое монобитное устройство состоит:

- из входного широкополосного усилителя-ограничителя;
- высокочастотного компаратора сигналов и тактового генератора, которые осуществляют дискретизацию ограниченного по амплитуде входного сигнала по времени и формируют высокочастотный монобитный поток его отсчетов;
- демультимплексора – цифрового высокоскоростного устройства, осуществляющего разделение высокоскоростного потока монобитных отсчетов на совокупность синхронных субпоток (фаз) отсчетов с меньшей частотой повторения для согласования с пропускной способностью портов ПЛИС;
- типового обнаружителя радиосигналов, формирующего сигнал обнаружения при превышении амплитуды сигнала заданного порога;
- программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), осуществляющей обработку поступающих цифровых потоков с целью измерения и анализа параметров радиосигналов по специальным алгоритмам.

ПЛИС монобитной ЦОС могут программироваться для реализации монобитного цифрового алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), предназначенного для проведения спектрального анализа в рабочей полосе устройства «порции» (отрезка) входного сигнала заданной длины [5].

На основе спектрального анализа радиосигнала можно быстро определить его частоту и комплексную амплитуду сигнальной составляющей спектра. Монобитный алгоритм БПФ является упрощенной версией типового алгоритма БПФ. Из-за этого в полученном спектре помимо полезных сигнальных составляющих присутствуют паразитные составляющие. Для выделения полез-

ных сигнальных составляющих спектра используют известное свойство, согласно которому в спектре ограниченного радиосигнала составляющая с максимально возможной амплитудой  $u_0$  соответствует положению радиосигнала с максимальной амплитудой. Поэтому отсутствие в спектре составляющей с амплитудой близкой к  $u_0$  свидетельствует об отсутствии в анализируемой «порции» полезного сигнала. Этот факт можно использовать для реализации обнаружителя радиосигналов.

Если в анализируемой «порции» присутствуют два радиосигнала с различными амплитудами (отличающимися более чем на 6 дБ), то будет обнаружен и измерен только «сильный» сигнал. При обработке радиосигналов в виде «пачек» радиоимпульсов этот недостаток компенсируется возможностью обнаружения «слабого» сигнала при анализе других «порций».

На рис. 3 проиллюстрированы особенности спектрограмм монобитного БПФ одной «порции» радиосигнала.

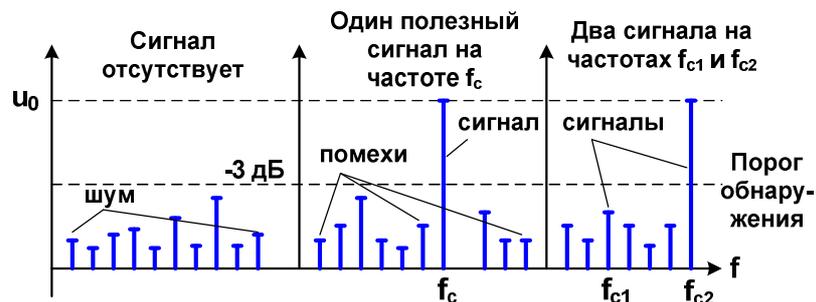


Рис. 3. Спектрограммы сигналов

На рис. 4 приведена спектрограмма М-БПФ «порции» радиосигнала длительностью 100 нс на несущей частоте 2679 МГц, полученная моделированием на ЭВМ.

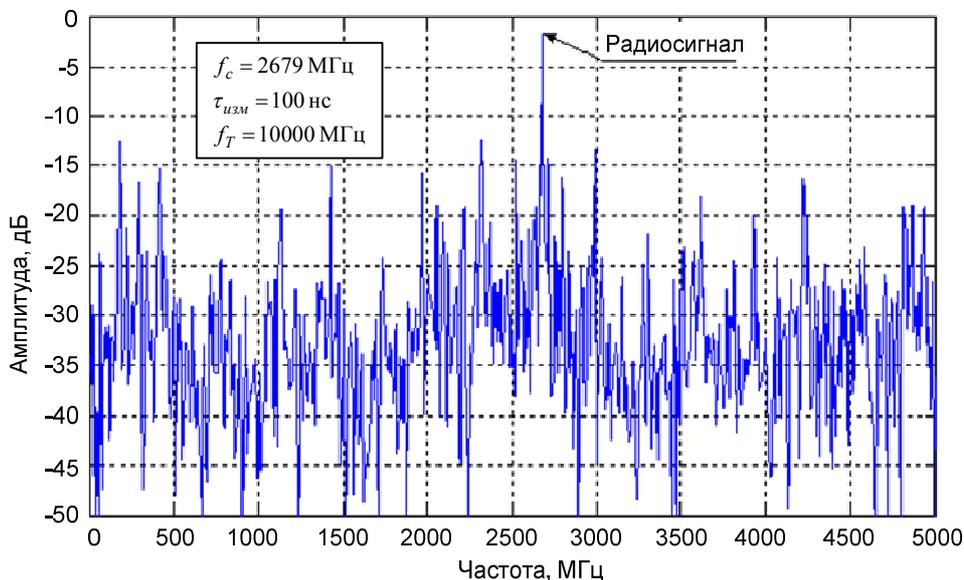


Рис. 4. Спектрограммы М-БПФ

Из рис. 3, 4 следует, что, сравнивая амплитуды спектральных составляющих с заданным порогом обнаружения, можно:

- обнаружить сигналы на фоне шумов приемника (а – нет сигнала, б, в – сигнал есть);
- определить составляющие комплексной амплитуды спектральной составляющей на частоте мощного радиосигнала, необходимые для измерения его частоты и фазы;
- измерить разности фаз двух радиосигналов одной частоты путем определения их комплексных амплитуд по монобитному алгоритму БПФ и вычислить по ним разности фаз.

## Выводы

1. Монобитную технологию обработки радиосигналов прежде всего целесообразно применять в широкодиапазонных РЭС для быстрого обнаружения радиосигналов, быстрого, но достаточно грубого определения их несущих частот, разностей фаз радиоимпульсов РЭС. Эта информация может быть использована для последующего наведения на частоты обнаруженных РЭС узкополосных устройств обработки информации.

2. Применение монобитной технологии обработки радиосигналов позволяет расширить рабочий диапазон частот РЭС и уменьшить их габариты за счет расширения полосы частот и числа каналов многоканального приемника.

## Литература

1. Вакин, С.А. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки / С.А. Вакин, Л.Н. Шустов. – М.: Советское радио, 1968. – 448 с.

2. Tsui, J.B.Y. *Digital Techniques for Wideband Receivers* / J.B.Y. Tsui. – Raleigh: SciTech Publishing Inc, 2004. – 571 p.

3. Николаев, А.Н. Цифровые технологии в широкополосных приемниках СВЧ радиосигналов / А.Н. Николаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 17, № 35(294). – С. 30–34.

4. Карманов, Ю.Т. Цифровая технология обработки СВЧ радиосигналов в широком частотном диапазоне / Ю.Т. Карманов, А.Н. Николаев // Физика и технические приложения волновых процессов: тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. – 2012. – С. 143–144.

5. Николаев, А.Н. Применение алгоритма монобитного быстрого преобразования Фурье в широкополосных малогабаритных станциях радиотехнической разведки / А.Н. Николаев // Сборник научных трудов УрФУ. – 2013. – Вып. 14. – С. 58–64.

6. Николаев, А.Н. Обнаружение радиосигналов в широком частотном диапазоне с использованием монобитного быстрого преобразования Фурье / А.Н. Николаев, Я.Г. Зеленцова // Цифровые радиоэлектронные системы. – 2012. – № 9. – С. 21–26.

7. Николаев, А.Н. Измерение несущей частоты радиосигналов при субдискретизации / А.Н. Николаев, А.А. Белугина // Сборник материалов 18-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ. – 2014. – Т. 3. – С. 143–144.

8. Pat. 5793323 United States, US 08/758,275, US5793323 A. Two signal monobit electronic warfare receiver / James. B.Y. Tsui; The United States of America as Represented by the Secretary of the Air Force; Decl. date 25.11.96; Pub. date 11.08.98. – 9 p.

9. Pat. 5917737 United States, US 08/914,348, US5917737 A. Fourier transform mechanization using one bit kernel function / J.J. Schamus, J.B.Y. Tsui; The United States of America as Represented by the Secretary of the Air Force; Decl. date 15.08.97; Pub. date 29.06.99. – 13 p.

10. Pat. 5963164 United States, US 08/914,347, US5963164 A. Monobit kernel function electronic warfare receiver for characterizing two input signals / D.H. Kaneshiro, J.J. Schamus, J.B.Y. Tsui; The United States of America as Represented by the Secretary of the Air Force; Decl. date 15.08.97; Pub. date 05.10.99. – 18 p.

11. Pat. 6448921 United States, US 09/917,589, US6448921 B1. Channelized monobit electronic warfare radio receiver / J.B.Y. Tsui, J.N. Hedge, V.D. Chakravarthy, K.M. Graves; The United States of America as Represented by the Secretary of the Air Force; Decl. date 30.07.01; Pub. date 10.09.02. – 15 p.

12. Pat. 7440989 United States, US 10/816,353, US7440989 B1. Kernel function approximation and receiver / J.B.Y. Tsui, J.M. Emmert, S.L. Hary, D.M. Lin, N.A. Pequignot, K.M. Graves; The United States of America as Represented by the Secretary of the Air Force; Decl. date 02.04.04; Pub. date 21.10.08. – 13 p.

13. Гуткин, Л.С. Радиоприемные устройства. Ч.2 / Л.С. Гуткин, В.Л. Лебедев, В.И. Сифоров. – М.: Советское радио, 1963. – 647 с.

**Карманов Юрий Трофимович**, д-р техн. наук, профессор, директор НИИ цифровых систем обработки и защиты информации, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); karmanovyt@susu.ac.ru.

**Николаев Андрей Николаевич**, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, заместитель директора НИИ цифровых систем обработки и защиты информации, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); Andrew.N@rambler.ru.

**Зеленцова Яна Геннадьевна**, магистрант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); yazel0320@mail.ru.

**Поваляев Сергей Валентинович**, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); svp.drts@gmail.com.

**Залыцкая Инна Ивановна**, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); zalyatskayainna@mail.ru.

*Поступила в редакцию 20 апреля 2014 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series "Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics"**  
**2014, vol. 14, no. 3, pp. 11–18**

---

## **APPLICATION MONOBIT DIGITAL PROCESSING TECHNOLOGY IN WIDEBAND RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS**

**Yu.T. Karmanov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
karmanovyt@susu.ac.ru,

**A.N. Nikolaev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
Andrew.N@rambler.ru,

**Ya.G. Zelentsova**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
yazel0320@mail.ru,

**S.V. Povalyaev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
svp.drts@gmail.com,

**I.I. Zalyatskaya**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
zalyatskayainna@mail.ru

The article describes and analyzes existing and future methods of digital processing of signals that could potentially be used to create a wideband digital signal processing devices. It is shown that the most convenient, affordable and inexpensive tool to create the digital signal processing of signals in a wide frequency range (up to 20000 MHz) is monobit digital technology processing signals. It is found that monobit digital processing technology appropriates to apply to wide-range radio-electronic system for the rapid detection of signals, fast (but coarse enough) determination their carrier frequency, phase differences pulses radio-electronic system. The structure and signal processing algorithms typical monobit digital signal processing devices is considered.

*Keywords: monobit digital technology, radio-electronic systems, analog-to-digital conversion, the fast Fourier transform.*

### **References**

1. Vakin S.V., Shustov L.N. *Osnovy radioprotivodeystviya i radiotekhnicheskoy razvedki* [Fundamentals of Electronic Countermeasures and Electronic Reconnaissance]. Moscow, Soviet Radio, 1968. 448 p.
2. Tsui J.B.Y. *Digital Techniques for Wideband Receivers*. Raleigh, SciTech Publishing Inc, 2004. 571 p.

3. Nikolaev A.N. [Digital Technologies in Wideband Receivers of Ultra-High Frequency Radio Signals] *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2012, no. 35(294), pp. 30–34. (in Russ.)
4. Karmanov Y.T., Nikolaev A.N. [Digital Processing Technology of Microwave Radio Signals over a Wide Frequency Range]. *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov: tr. XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Physics and Engineering Applications of Wave Processes. Proc. of XI International. Scientific and Engineering conf.], 2012, pp. 143–144. (in Russ.)
5. Nikolaev A.N. [Application of the Algorithm Monobit Fast Fourier Transform in Broadband Small Stations Electronic Reconnaissance]. *Sbornik nauchnykh trudov UrFU* [Collection of Scientific Works of the Ural Federal University], 2013, no. 14, pp. 58–64. (in Russ.)
6. Nikolaev A.N., Zelentsova Y.G. [Detection of Radio Signals in a Wide Frequency Range Using a Monobit Fast Fourier Transform]. *Digital Electronic Systems*, 2012, no. 9, pp. 21–26. (in Russ.)
7. Nikolaev A.N., Belugina A.A. [Measurement of Carrier Frequency Radio Signals Undersampling]. *Sbornik materialov 18-go Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma "Radioelektronika i molodezh' v XXI veke"* [Proc. of 18th International Youth Forum "Radio electronics and youth in the XXIst century"]. Kharkov, KNURE, 2014, vol. 3, pp. 143–144. (in Russ.)
8. Tsui J.B.Y. Two Signal Monobit Electronic Warfare Receiver. Pat. US, no. 5793323, 1998.
9. Schamus J.J., Tsui J.B.Y. Fourier Transform Mechanization Using One Bit Kernel Function. Pat. US, no. 5917737, 1999.
10. Kaneshiro D.H., Schamus J.J., Tsui J.B.Y. Monobit Kernel Function Electronic Warfare Receiver for Characterizing Two Input Signals. Pat. US, no. 5963164, 1999.
11. Tsui J.B.Y., Hedge J.N., Chakravarthy V.D., Graves K.M. Channelized Monobit Electronic Warfare Radio Receiver. Pat. US, no. 6448921, 2002.
12. Tsui J.B.Y., Emmert J.M., Hary S.L., Lin D.M., Pequignot N.A., Graves K.M. Kernel Function Approximation and Receiver. Pat. US, no. 7440989, 2008.
13. Gutkin L.S., Lebedev V.L., Siforov V.I. *Radiopriemnye ustroystva. Ch. 2* [Radio Receivers. Part 2]. Moscow, Soviet Radio, 1963. 647 p.

*Received 20 April 2014*