

УДК 512 (075.8)

АНАЛИЗ БЫСТРЫХ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ И ДЕКОДИРОВАНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ КОДОВ

В.Д. ДВОРНИКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Представлены синтез и анализ методов цифровой обработки сигналов, а также подходы к декодированию низкоскоростных кодов в радиотехнических системах.

Ключевые слова: декодирование, цифровая обработка, радиотехническая система.

Семидесятые годы прошлого столетия характеризуются стремительным ростом интереса к новым методам формирования и обработки сигналов в радиотехнических системах (РТС) различного назначения. Наиболее перспективным оказался подход, в котором используются сложные сигналы в совокупности с цифровыми алгоритмами их формирования и обработки. Это позволяло повышать такие технические характеристики как помехоустойчивость, надежность, дальность действия, скрытность, точность измерения параметров, быстродействие систем и устройств.

Наиболее изученными в тот период времени были сигналы, формируемые на основе двоичных M -последовательностей (кодов максимальной длины). Они легко генерируются, имеют достаточно большие ансамбли и обладают идеальными корреляционными свойствами. Поэтому именно они чаще всего становились основой для построения систем передачи информации, синхронизации, локации, и навигации. Для их обработки, в основном, использовались согласованные фильтры, многоканальные корреляторы и сигнальные процессоры на основе алгоритмов преобразования Фурье. Уровень развития производства элементной базы того периода времени не позволял создавать быстродействующую и простую аппаратуру обработки сигналов. В особенности если речь шла о применении длинных, порядка нескольких тысяч символов, сигналов.

В конце 1974 г., в научном коллективе, который возглавлял Лосев В.В., был разработан алгоритм обработки сигналов на основе бинарных M -последовательностей при помощи быстрого преобразования Уолша (БПУ). Не уступая в помехоустойчивости известным корреляционным алгоритмам, он был значительно проще в реализации и выигрывал у них по быстродействию.

Результаты исследований были защищены авторским свидетельством и опубликованы в СССР в декабре 1976 г. в журнале «Известия ВУЗов. Радиоэлектроника» [1]. В январе 1977 г. появилась публикация [2] американских авторов практически одинакового с [1] содержания, но с частным решением. Выходные данные публикаций говорят о неоспоримом приоритете СССР в данном научном достижении. К сожалению, перевод русскоязычной публикации на английский язык появился только через несколько лет, поэтому в научном мире закрепилось представление об американском приоритете.

В дальнейшем, в работах Лосева В.В. и его учеников данный подход и его модификации были использованы для разработки быстрых алгоритмов обработки целого ряда сигналов, которые формируются на базе M -последовательности (последовательностей Голда, Гордона-Милса-Велча, Кассами, Мак-Элис) [3, 4]. Продуктивным данный подход оказался и для обработки очень длинных сигналов по отрезку [5].

На основе полученных научных результатов разработан ряд технических решений, которые защищены авторскими свидетельствами СССР [6, 7] и реализованы в реальных устройствах в ходе выполнения нескольких НИР.

Еще одним применением процессоров БПУ явилось использование их для декодирования низкоскоростных кодов, таких как код максимальной длины [8] и код Рида-Маллера [9]. При этом реализуется корреляционный алгоритм декодирования, позволяющий получить максимальную помехоустойчивость. Кроме этого, за счет упрощения декодера он легко реализуется как аппаратно, так и программно. Что касается кода Рида-Маллера, то впервые было показано и доказано, что коэффициент сложности корреляционного декодера при увеличении порядка кода и его длины, асимптотически стремится к нулю. Это оказалось возможным при его представлении в виде каскадной конструкции из q -ичного полного кода и кода Рида-Маллера первого порядка.

Многие результаты исследований Лосева В.В. были новаторскими. Так, он существенно развил теорию дихотомического и полихотомического поиска последовательностей Стифлера, нашел способы ввода в синхросигналы информации и ее выделения, в которых используются свойства диадного сдвига [4]. Еще одним плодотворным направлением в обработке сигналов было использование секционирования – разбиения составных последовательностей на компоненты, имеющие особые свойства, позволяющие выполнять быструю обработку. Такой подход реализован в алгоритме поиска последовательностей Гордона–Милса–Велча [9].

Многие подходы и методы исследований Лосева В.В. применялись его учениками в их дальнейшей самостоятельной научной деятельности. Так, получили развитие методы обработки M -последовательностей и последовательностей Гордон–Милса–Велча, использующие их двумерное представление в виде матрицы, имеющей в своей структуре блок, образованный диадным сдвигом [9–11]. Это позволило использовать вычисление диадной свертки. По структуре цифровая обработка отличается от ранее упомянутого метода вычисления корреляции для M -последовательности, но имеет равную величину вычислительной сложности.



Полученные результаты интересны еще и тем, что последовательности Гордон–Милса–Велча имеют большую структурную сложность, чем M -последовательность и позволяют существенно повысить защищенность сигнала. При этом сохраняется возможность быстро и надежно выполнять его поиск и синхронизацию.

Еще одним примером использования диадного сдвига является метод формирования и декодирования низкоскоростных кодов на базе бент-последовательностей [12]. Бент-

последовательности получают из бент-функций, которые являются частью класса максимально-нелинейных функций. Они интенсивно исследуются и широко применяются в криптографических системах. Их основные достоинства заключаются в высокой структурной сложности и большом размере множества. Это позволяет легко формировать необходимое количество ансамблей сигналов для создания больших сетей помехоустойчивой и защищенной передачи информации. При этом их обработка не сложнее, чем вычисление БПУ.

Бент-последовательности структурно связаны с матрицей БПУ, которая образует ядро алгоритма их формирования. Если в качестве ядра использовать матрицу преобразования Фурье, то получают комплексные ортогональные последовательности, называемые последовательностями Фрэнка [13]. Сигналы Фрэнка имеют в прямом смысле идеальную периодическую автокорреляционную функцию и широко исследуются в настоящее время.

В [12] описан алгоритм обработки последовательностей Фрэнка, в основу которого положено преобразование последовательности в двумерную матрицу. При этом алгоритм вычисления корреляции свертки при помощи двукратного преобразования Фурье исходной последовательности заменяется комбинацией вычисления нескольких более коротких преобразований Фурье и прямого вычисления корреляции или свертки. Вычислительная сложность алгоритма не превышает вычислительной сложности одного преобразования Фурье размерности исходной последовательности.

Приведенные примеры не исчерпывают всех возможностей применения описанных подходов к цифровой обработке других классов сложных сигналов и низкоскоростных кодов.

ANALYSIS OF FAST METHODS OF DIGITAL PROCESSING OF COMPLEX SIGNALS AND LOW-SPEED CODES DECODING

V.D. DVORNIKOV

Abstract

Synthesis and analysis of digital signal processing methods, as well as approaches to decoding of low-speed codes in radioengineering systems are presented.

Keywords: decoding, digital processing, radioengineering system.

Список литературы

1. *Лосев В.В., Дворников В.Д.* Способ многоканальной обработки симплексных кодов // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. 1976. № 12. С. 89.
2. *Kohn M., Lempel A.* On fast M -sequence transforms // IEEE Transactions on Information Theory. January, 1977. P. 135.
3. *Лосев В.В., Дворников В.Д.* Распознавание адресных последовательностей при помощи быстрых преобразований // Радиотехника и электроника. 1983. № 8. С. 1540–1547.
4. *Лосев В.В., Бродская Е.Б., Коржик В.И.* Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов. М.: Радио и связь, 1988.
5. *Лосев В.В., Дворников В.Д.* Определение фазы ПСП по отрезку с помощью БПУ // Радиотехника и электроника. 1981. № 8. С. 1666–1671.
6. *Дворников В.Д., Лосев В.В., Бudyko A.A.* Устройство определения фазы M -последовательности / Авторское свидетельство СССР № 625314.
7. *Дворников В.Д., Лосев В.В.* Устройство декодирования M -последовательности / Авторское свидетельство СССР № 773948.
8. *Лосев В.В., Дворников В.Д.* Декодирование кода максимальной длины при помощи БПУ // Радиотехника и электроника. 1979, № 3. С. 1233–1239.
9. *Дворников В.Д., Конопелько В.К., Липницкий В.А.* Теория и практика низкоскоростных кодов. Минск: БГУИР. 2002.
10. *Дворников В.Д., Макаров А.И.* Декодирование негрупповых кодов при помощи быстрого преобразования Уолша-Адамара // Сб. докл. 1-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA'98». Москва, 1998. Т. 2. С. 63–66.
11. *Дворников В.Д.* Сравнительный анализ быстрых алгоритмов обработки M -последовательности // Матери. второй науч.-практ. конф. «Гидроакустическая связь и средства аварийно-спасательного назначения». Волгоград, 2003. С. 33–39.
12. *Дворников В.Д.* Ортогональные коды на основе бент-последовательностей // Докл. БГУИР. 2003. № 1. С. 110–113.
13. *Дворников В.Д.* Многофазные последовательности с идеальными корреляционными свойствами // Докл. БГУИР. 2003. № 1. С. 111–114.