

## МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

© 2016 г. И.Е. ТАРАСОВ, Ф. БУЗЫЛЁВ, С.В. ТРОЯН, И.Ю. МАРКОВ, А.С. САВЧЕНКО

Московский технологический университет (МИРЭА)

### Введение

Системы радиосвязи должны отвечать целому комплексу требований, затрагивающих различные аспекты их проектирования, производства и эксплуатации. К числу наиболее важных можно отнести скорость, дальность и надежность передачи данных, которые характеризуют потребительские свойства системы связи. Кроме того, важную роль играют такие показатели, как энергопотребление, занимаемая частотная полоса, массогабаритные параметры, стоимость и т.д. Одной из важных современных тенденций в развитии систем связи является широкое использование цифровых электронных компонентов, обеспечивающих цифровую обработку сигнала (ЦОС), начиная с определенного этапа его преобразования. Важным направлением развития беспроводных технологий связи является использование программно-зависимого радио (SDR).

Применяемые сейчас стандарты беспроводных коммуникаций требуют не только высокой производительности системы ЦОС, но и высокой степени интеграции компонентов, наличия таких модулей, как высокоскоростной приемопередатчик (для передачи данных по проводному интерфейсу), а также возможности простого обновления алгоритмов работы при смене протокола работы. Всем этим требованиям удовлетворяют системы на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с архитектурой FPGA. Такие микросхемы содержат, кроме конфигурируемых логических ячеек, набор аппаратных модулей, реализующих операции, характерные для ЦОС, и последующей передачи результатов в проводные сети: аппаратные блоки «умножение с накоплением», блочную память, высокоскоростные последовательные приемопередатчики.

### Архитектура вычислительного комплекса для ЦОС в программно-зависимом радио

С учетом повышения степени интеграции цифровых систем, оказывается возможным реализовать по технологии СНК не только устройство обработки сигналов канального уровня, но и постобработку на уровне символов или пакетов данных.

Для ЦОС характерно потоковое или массово-параллельное выполнение операций «умножение с накоплением», являющихся основой, в частности, КИХ-фильтров:

$$y = \sum_{i=1}^N k_i x_i, \quad (1)$$

В представленном виде данная операция имеет прямое отображение на аппаратные ресурсы FPGA, в частности, реализуется без привлечения дополнительных компонентов блоками DSP48 в FPGAXilinx.

Дополнительно для постобработки символов можно использовать алгоритмы статистической обработки. В условиях наличия импульсных помех в канале связи более высокую помехоустойчивость демонстрируют статистические оценки, отличные от среднего арифметического – например, медиана и мода. Однако для определения таких оценок необходимо иметь в составе системы обработки радиосигнала вычисли-

тельные устройства с узлами, оптимизированными для выполнения специфичных для статистической обработки операций.

Помехоустойчивая статистическая оценка может быть проведена по критерию, рассмотренному в [1]. В этой работе предлагается вычислять апостериорную вероятность гипотез по теореме Байеса, вводя переменную величину, характеризующую масштаб функции плотности распределения вероятности ошибки измерительного канала системы.

$$\tau_N = n \frac{2(N-1)L}{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – масштаб распределения плотности вероятности ошибки, варьируемый в предлагаемом методе статистической обработки.

В общем виде функционал качества приближения экспериментальных данных можно записать

$$S(\beta, \sigma) = \sum_{i=1}^N \rho[y_i, f(x_i, \beta)], \quad (3)$$

где  $\rho$  – функция расстояния от экспериментальных точек до приближающей зависимости, определяемой параметрами  $\beta$ .

Формирование функции расстояния предлагается производить на основе функции распределения вероятности ошибки, характерной для измерительного устройства системы управления, как было показано в [1]. При использовании в качестве функции расстояния квадрата отклонения оказывается, что при увеличении амплитуды выброса величина функционала качества приближения нарастает по параболическому закону, хотя ожидается, что такой отсчет должен оказывать ограниченное влияние на функционал качества.

Обработка измерительной информации согласно (2) подразумевает вычисление суммы условных вероятностей. Эти вероятности могут быть заданы таблично, т.е. реализованы в виде блока памяти. Аналогично, в виде блока памяти может быть реализовано устройство хранения результатов вычислений апостериорных вероятностей.

На рис.1 представлена блок-схема устройства, представляющего собой аппаратный ускоритель операций статистической обработки. На рис.1 можно видеть, что вычислительный узел не содержит блоков «умножение с накоплением». И так, его применение в радиосистемах не приводит к дополнительным аппаратным затратам, однако повышает помехоустойчивость алгоритмов постобработки.

Структурная схема системы ЦОС, использующей аппаратное ускорение статистических операций, представлена на рис.2.

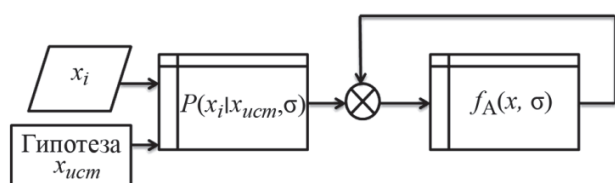


Рис. 1. Структурная схема устройства для вычисления апостериорной вероятности.

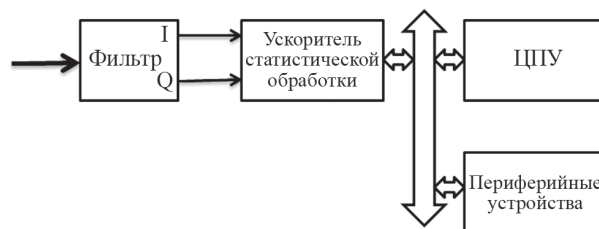


Рис. 2. Структурная схема системы ЦОС.

Элементы системы, показанной на рис.2, имеют различные требования к составу аппаратных средств. Если для фильтра используются в основном модули «умножение с накоплением», то аппаратный ускоритель статистической обработки использует преимущественно операции с памятью, поэтому оценка его производительности выполняется не по количеству операций «умножение с накоплением» в секунду, как для сигнальных процессоров, а по общей пропускной способности реализованной в нем подсистемы памяти. Такой подход позволяет балансировать нагрузку на ресурсы

ПЛИС. При этом центральный процессор такой системы не является основным элементом, определяющим ее функциональные характеристики или показатели производительности.

### **Применение вычислительного комплекса на базе ПЛИС для обработки сигналов эталонных стандартов частоты-времени**

Рассмотренный подход использован для обработки сигналов эталонных стандартов частоты времени (ЭСЧВ). Для подстройки региональных ЭСЧВ используется система, основанная на сличении частоты подстраиваемого ЭСЧВ с государственным эталоном, сигнал которого передается на одной из известных частот.

В силу высокой стоимости ЭСЧВ задача измерения разности фаз является крайне актуальной, поэтому применение высокопроизводительной элементной базы для построения цифровой системы подстройки фазы представляется оправданным. Для решения этой задачи разработан вычислительный комплекс на базе ПЛИС с архитектурой FPGA семейства Virtex-5 SXT. ПЛИС установлена на плате ML-605 производства Xilinx с дополнительной платой для ввода аналогового сигнала.

Для статистической обработки был применен метод приближения экспериментальных данных, основанный на оценке качества приближения в пространстве, формируемым на базе функции распределения вероятности ошибки используемой измерительной системы. В данном случае определялись параметры зависимости вида

$$y(a, \sigma, C) = C e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} . \quad (4)$$

В результате применения комплекса технических решений, включающих и оценку дисперсии распределения ошибки измерения фазы, было достигнуто существенное уменьшение (до 3 раз) среднего квадрата отклонения фазовых набегов разработанного цифрового приемника ЭСЧВ по сравнению с приемником-компаратором ПК Ч7-38.

### **Выводы**

Использование высокопроизводительной элементной базы способно оказать комплексное положительное влияние на метрологические характеристики измерительных устройств, используемых для оценки параметров радиосигналов. При этом увеличение степени интеграции компонентов позволяет реализовать цифровое устройство класса «Система на кристалле», сочетающее на одном кристалле устройства цифровой фильтрации, помехоустойчивой статистической обработки и центрального процессора общего назначения. Предложенный метод статистической обработки позволяет повысить помехоустойчивость системы обработки радиосигнала, и при этом использует компоненты и методы проектирования, поддержанные современной микроэлектронной промышленностью. Практическая реализация подхода для создания системы на базе ПЛИС подтверждает целесообразность его использования в системах для обработки радиосигналов, требующих высокой точности.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Тарасов И.Е.* Оценка результатов измерений с использованием функций распределения вероятности с переменным масштабом. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. №11. С. 55-61.
2. *Егорова Е.В., Нефедов В.И.* Нелинейные искажения в усилительных СВЧ-модулях. 11-я Международная научно-техническая конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение» 26-28 марта 2009 г., Москва. С. 123-129.