

Полиспектральный анализатор сигналов на базе модуля цифрового сигнального процессора TMS320C6416

Константин Жучков,
Сергей Хоружий,
Николай Пархоменко,
Артем Карюков

В статье приводится описание реализованной схемы устройства многофункционального полиспектрального анализатора, не имеющего аналога. Анализатор реализован на вычислительной платформе процессора TMS320C6416 фирмы Texas Instruments и способен работать в режиме реального времени с сигналами с полосой до 10 МГц. Приводится краткое описание алгоритмов полиспектрального анализа на примере вычисления биспектра. Оценивается требуемая производительность вычислительной платформы и обосновывается распределение вычислений между ПЛИС, цифровым сигнальным процессором и ЭВМ.

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие современных методов и алгоритмов обработки информации наряду с прогрессом в области вычислительных платформ способно ставить и решать перед специалистами совершенно новые задачи по анализу тонкой структуры сигналов. В частности, традиционный спектральный анализ, основанный на обработке спектров второго порядка (через классическое преобразование Фурье), уже далеко не всегда приемлем в ситуациях, когда, например, нужно получить одновременно высокую разрешающую способность по частоте и времени или решить задачу принадлежности гармоник колебания одному источнику излучения.

В последнее время для решения этих и многих других задач стали широко использоваться вейвлет-преобразование со всем “зоопарком” его локальных базисов, метод multitaper, генетические алгоритмы и др. Отдельно в этом списке стоят перспективные методы обработки спектров высших порядков, получившие в литературе название “полиспектральный анализ”, которые позволяют увеличить объем информации о сигнале по сравнению с методами, использующими только спектр второго порядка.

При этом спектральные характеристики нечетных порядков и, в частности, спектр третьего порядка (биспектр), являющийся преобразованием Фурье от кумулянтной функции третьего порядка, позволяет уточнить параметры несимметрии случайного процесса. Это, в свою очередь, дает возможность выявить наличие связей между дискретными составляющими обычного спектра, в частности определить в нем наличие высших гармоник, что делает, например, при определенных условиях биспектральный обнаружитель сигналов эффективнее энергетического или корреляционного.

Характеристики четных порядков и, в частности, спектр четвертого порядка (триспектр) уточняют параметры полноты, эксцесса вероятностного распределения исследуемого процесса.

В частности, одномерный четно-степенной спектр четвертого порядка позволяет эффективно определить наличие модуляционных (мультипликативных) составляющих наблюдаемого сигнала.

Достигнуты обнадеживающие результаты по применению полиспектральных методов путем совместного измерения традиционного спектра мощности и спектров третьего и четвертого порядка для решения задач классификации различных сигналов по наличию и уровню высших гармоник, повышению разрешающей способности по частоте и др.

Наиболее последовательное и математически корректное изложение методологии полиспектрального анализа выполнено в добротной монографии [1], научный аппарат которой и был взят разработчиками в качестве основы для данного проекта.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ ПОЛИСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ БИСПЕКТРА

Не ограничивая общности и опуская сложные математические выкладки, приведем обзор свойств спектра третьего порядка — биспектра.

Биспектральной плотностью мощности $G_3(\omega_1, \omega_2)$ называется двумерное преобразование Фурье кумулянтной функции третьего порядка $K_3(\tau_1, \tau_2)$ стационарного случайного процесса $x(t)$:

$$G_3(j\omega_1, j\omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_3(\tau_1, \tau_2) \exp(-j(\omega_1\tau_1 - \omega_2\tau_2)) d\tau_1 d\tau_2, \quad (1)$$

где кумулянт третьего порядка определяется как:

$$K_3(\tau_1, \tau_2) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau_1)x(t+\tau_2) dt; \quad (2)$$

спектр третьего порядка определяется формулой:

$$\Phi_3(j\omega_1, j\omega_2) = (2/T)^2 G_3(j\omega_1, j\omega_2) \quad (3)$$

с размерностью $[x^3]$.

Прямой алгоритм вычисления спектра третьего порядка получается как преобразование Фурье отрезка процесса $x(t)$ вида:

$$C(j\omega) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (4)$$

Подставив (2) в (1), сгруппировав множители и вводя $t_1 = t - \tau_1$, $t_2 = t - \tau_2$ с учетом выражения (4) получим оценку спектра 3 порядка:

$$\Phi_3(j\omega_1, j\omega_2) = C(j\omega_1)C(j\omega_2)C^*(j\omega_1 + j\omega_2), \quad (5)$$

где * — комплексно сопряженная величина.

Опуская строгость математического изложения, приведем свойства результатов биспектрального преобразования:

- биспектр гауссового шума равен нулю;
- биспектр идеального синусоидального сигнала равен нулю;
- биспектр не равен нулю, если в сигнале присутствуют связанные частотные составляющие $\omega_1, \omega_2, \omega_1 + \omega_2$. Стоит заметить что биспектр видеопульса также не равен нулю;
- комплексный характер биспектра позволяет представлять информацию об амплитуде и фазе сигнала;
- фаза биспектра инвариантна относительно времени прихода импульса:

$$\Phi_{i1}(\omega_1, \omega_2) = \Phi_{i2}(\omega_1, \omega_2);$$

- свойство симметрии:

$$\begin{aligned} \Phi_3(\omega_1, \omega_2) &= \Phi_3(\omega_2, \omega_1) = \\ &= \Phi_3(\omega_1, \omega_1 - \omega_2) = \Phi_3^*(-\omega_1, -\omega_2). \end{aligned}$$

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛИСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА НА ПРОЦЕССОРЕ TMS320C6416

Несмотря на то, что полиспектры обладают некоторыми уникальными свойствами, которыми не обладает спектр второго порядка, применение полиспектрального анализа еще не нашло широкого распространения. Сложностью в исследовании свойств полиспектров и в практическом их применении, в частности, является проблема графичес-

кого отображения результатов. Дело в том, что уже биспектральная плотность мощности является функцией двух переменных и для ее графического изображения используется поверхность, то есть трехмерное пространство. Триспектр повышает размерность пространства отображения до 4, что приводит к известным сложностям визуализации. Для их преодоления часто отображают нужную биспектральную проекцию соответствующего полиспектра и предоставляют возможность "скользить срезом биспектра" по всему полиспектру. Таким образом, задача построения полиспектрального анализатора может быть сведена к реализации биспектрального анализатора.

Как легко видеть из выражения (5), для вычисления биспектра необходимо использовать двойное комплексное преобразование Фурье и операции умножения комплексных функций. При обработке в реальном времени целесообразно получать аналитический сигнал, то есть разлагать сигнал на квадратуры, и фильтровать, в случае работы с полезным узкополосным анализируемым сигналом, на уровне программируемой логики, например ПЛИС, непосредственно сразу после аналого-цифрового преобразования. Дальнейшие операции над сигналом уже можно производить на процессоре, к достоинствам которого следует отнести возможность гибкой адаптации кода (речь ведется о необходимости по указанию оператора изменять биспектральную проекцию полиспектра, количество точек быстрого преобразования Фурье (БПФ) и другие параметры) и работу в режиме реального времени с сигналом в максимально широкой полосе. Были выбраны 2 современных высокопроизводительных процессора: цифровой сигнальный процессор TMS320C6416 фирмы Texas Instruments (TI) и пара процессоров Intel Xeon, работающих в мультипроцессорном режиме на плате сервера Intel.

Результаты проведенного тестирования и измерения времени выполнения программ БПФ приведены в работе [2], однако мы сочли необходимым привести нужные для построения полиспек-

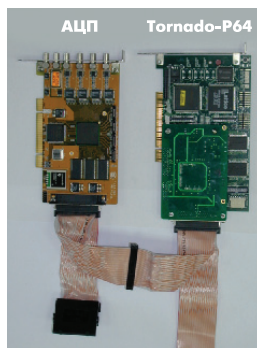
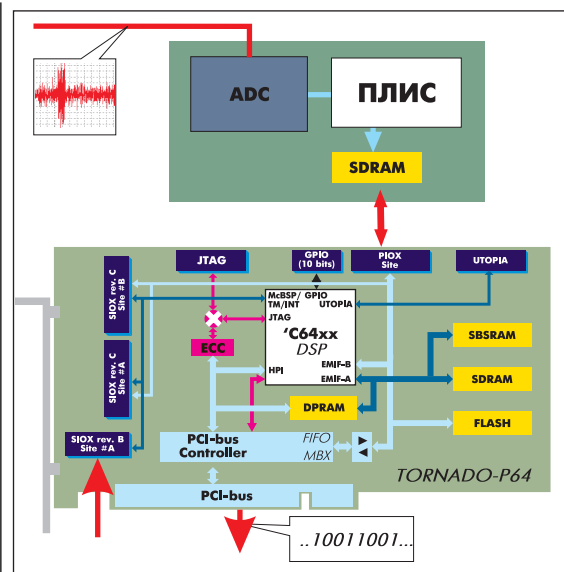
трального анализатора сведения в таблице. Функции, реализующие перечисленные выше математические операции, взяты из специализированных библиотек для соответствующих процессоров: DSPLIB фирмы TI для процессоров TMS320C6000 и Intel Integrated Performance Primitives 3.0 для процессоров Intel. Функции этих библиотек оптимизированы под архитектуру конкретного процессора.

Таким образом, на процессоре TMS320C6416 удастся сделать двойное БПФ без потерь блоков данных при скорости поступления отсчетов АЦП 40 МГц. Процессор с тактовой частотой 600 МГц будет работать даже не на пике своей производительности (его пиковая производительность на этой тактовой частоте ~ 5000 MIPS).

Предложенный подход к построению полиспектрального анализатора был реализован на модуле АЦП разработки ФГУП «ГКБ «Связь»» и модуле ЦОС TORNADO-P64, который разработан компанией «МикроЛАБ Системс» (www.mlabsys.com). Схема взаимодействия модулей и их фотографическое изображение представлены на рис. 1. Аналоговый сигнал попадает на вход аналого-цифрового преобразователя модуля АЦП. Затем он подвергается предварительной обработке на ПЛИС Xilinx Virtex II Pro и записывается в буфер объемом 32 млн отсчетов. Оптимальная фильтрация на модуле АЦП осуществляется в полосе до 10 МГц. Дальнейшая обработка сигнала производится на модуле ЦОС TORNADO, куда сигнал поступает из буфера АЦП посредством SCSI-шлейфа и устройства преобразования интерфейсов — мезонинного модуля на плате TORNADO. Модули ЦОС TORNADO представляют собой очень удобный "конструктор ЦОС", включающий динамическую (SDRAM), синхронную блоковую (SBSRAM), двухпортовую (DPRAM) память, а также последовательный (SIOX) и параллельный (PIOX) интерфейс ввода/вывода. Последний высокоскоростной интерфейс и используется для ввода преобразованных данных в процессор. Программное обеспечение DSP функционирует пол-

Таблица. Результаты тестирования БПФ в разных процессорах

	TMS320C6701 (166 МГц)		TMS320C6416 (600 МГц)		Пара процессоров Intel Xeon (2,4 ГГц)	
	при передаче данных	без передачи данных	при передаче данных	без передачи данных	при передаче данных	без передачи данных
БПФ 1024 комплексных точки (мкс)	160	160	11	11	25	18



горитмов полиспектрального анализа был реализован полиспектральный анализатор сигналов в составе:

- ЭВМ не хуже Pentium IV — 2.4 МГц;
- модуль АЦП разработки ФГУП «ГКБ «Связь»»;
- модуль TORNADO P64 разработки компании «МикроЛАБ Системс»;
- комплект программного обеспечения.

Реализованный полиспектральный анализатор сигналов имеет следующие технические характеристики:

- частота дискретизации АЦП — 40 МГц;
- разрядность преобразования — 12 бит;
- максимальная полоса анализируемого сигнала — 10 МГц;
- разрешающая способность по частоте в биспектральной области — до 30 кГц;
- программируемое подавление фантомных линий биспектра — до 40 дБ;
- возможность выбора заданной биспектральной проекции для полиспектра с порядком до шестого.

Показано, что специализированная система команд процессора и архитектура построения модуля TORNADO-P64 позволяют естественным образом реализовать процедуры полиспектрального анализатора с таким показателем эффективности, который недостижим на универсальных средствах.

Литература

1. Новиков А. К. Полиспектральный анализ. СПб.: Микроматикс, 2002.
2. Жучков К., Хоружий С., Чепель Е. Сравнительный анализ производительности процессоров для задач цифровой обработки сигналов // CHIP NEWS. 2003. № 8. С. 26–29.

Рис. 1. Схема взаимодействия аппаратных средств полиспектрального анализатора сигналов (слева) и их фотографическое изображение (справа)

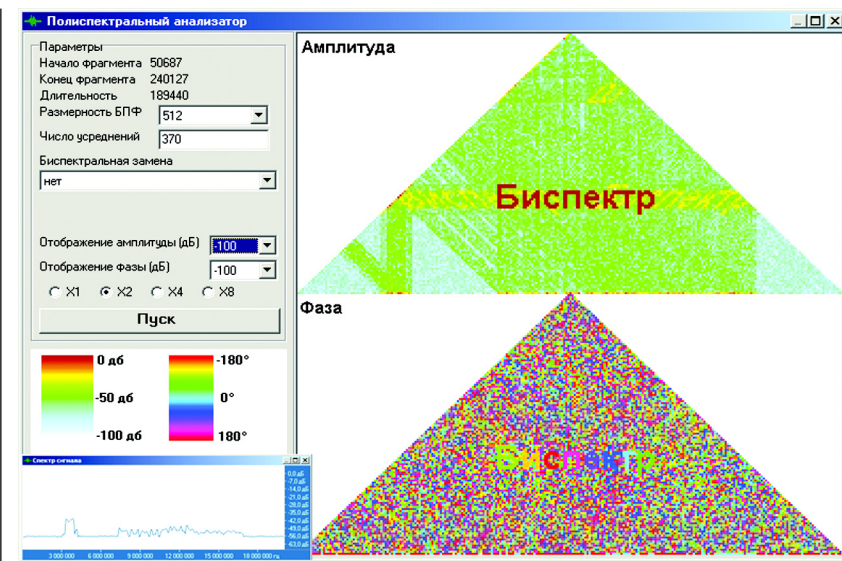


Рис. 2. Экранная форма главного окна программы «Полиспектральный анализатор»

ностью на уровне ядра процессора, а ввод/вывод данных в память на кристалле обеспечивают программируемые каналы EDMA процессора.

Результаты биспектрального преобразования с учетом симметрии биспектра (из матрицы биспектральных коэффициентов передается лишь треугольник, образованный диагоналями) поступают в ЭВМ, где они отображаются на мониторе. Экранная форма полиспектрального анализатора изображена на рис. 2. Здесь уместно отметить, что для высокоскоростной передачи данных использовался режим busmaster PCI, который присутствует в модуле TORNADO и позволяет передавать дан-

ные на скорости 80 Мбайт/с. Отображение результатов полиспектрального преобразования производится при помощи функций библиотеки DirectX.

Авторы благодарны руководству компании «МикроЛАБ Системс» и сотруднику ФГУП «ГКБ «Связь» Заривчацкому И. Г. за техническую поддержку и помощь в программировании аппаратной части полиспектрального анализатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проработки схемных решений, выбора и моделирования ал-

РЕЗОНИТ
www.rezonit.ru

СРОЧНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

124460, г. Москва, Зеленоград, а/я 31
(095) 777-8080, (095) 730-5000
pcb@rezonit.ru

197342, г. Санкт-Петербург,
ул. Сердобольская, д. 64,
литер Д, офис 322
(812) 608-8080
spb@rezonit.ru

TÜV CERT
ISO 9001 : 2000