

А. П. Войтер, М. И. Доронин, А. Н. Ковалев, А. А. Гаврилов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

ВОСЬМИКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АЦП С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ

Рассмотрены архитектура, принципы работы, программное обеспечение и конструкция восьмиканального спектрометрического АЦП с программируемой логикой для многопараметрических измерительных систем исследования ядерных реакций.

Ключевые слова: эксперимент, ядерные реакции, АЦП, ПЛИС, графический язык программирования.

Введение

Спектрометрический аналого-цифровой преобразователь (АЦП) является составной частью разрабатываемой измерительной системы с гибкой архитектурой для экспериментальных исследований ядерных реакций [1]. АЦП может использоваться как для параллельной оцифровки спектрометрических импульсов, поступающих от независимых источников (до восьми) в многодетекторных измерительных системах, так и для оцифровки импульсов от телескопов (до четырех) в системах идентификации заряженных частиц низких и средних энергий по методу измерения удельных потерь энергии и полной энергии ($E - \Delta E$).

АЦП разработан на основе программируемой логической интегральной микросхемы (ПЛИС) серии Cyclone фирмы Altera [2, 6]. Связь с персональным компьютером (ПК) осуществляется

по интерфейсу USB. Для работы в составе сложных измерительных систем в АЦП предусмотрена также системная шина данных и управления для интеграции с другими блоками ядерной электроники.

Архитектура и принципы работы

Структурная схема АЦП представлена на рис. 1. В его состав входит восемь идентичных независимых каналов оцифровки импульсов. Каждый из этих каналов состоит из входного дифференциального усилителя, схемы отбора импульсов, пикового детектора с запоминанием, АЦП последовательного приближения AD7654 и схемы управления на основе CPLD серии MAX3000. Для установки порогов отбора импульсов используется восьмиразрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

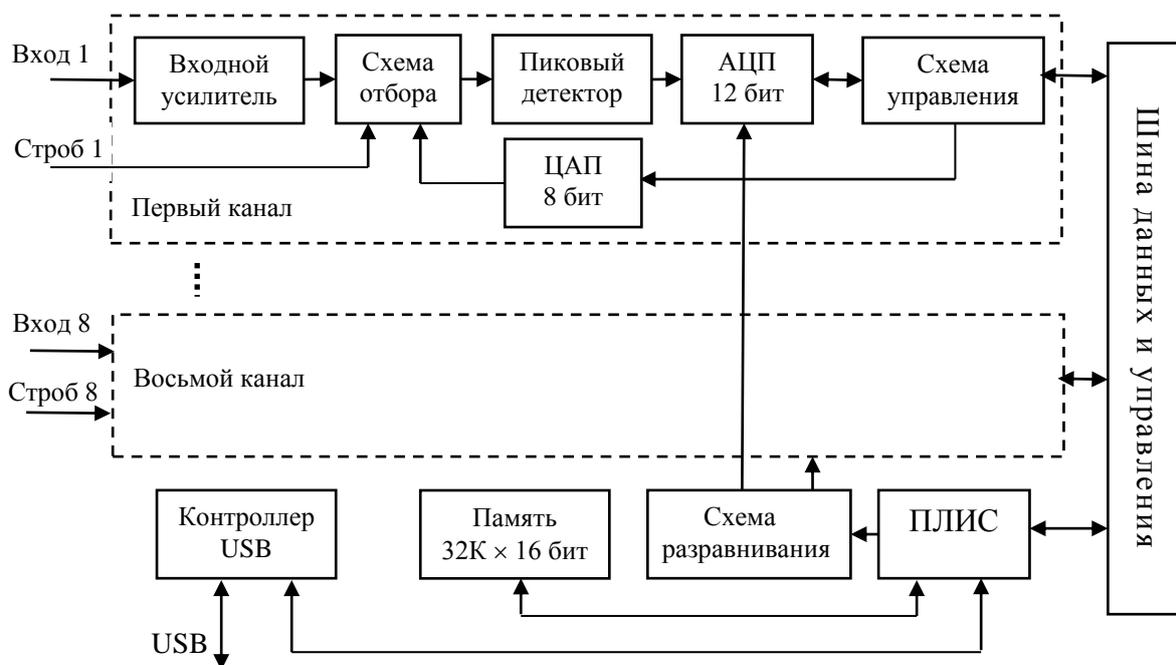


Рис. 1. Структурная схема АЦП.

© А. П. Войтер, М. И. Доронин, А. Н. Ковалев, А. А. Гаврилов, 2016

Каналы АЦП имеют индивидуальные входы стробирования, рассчитанные на прием положительных сигналов ТТЛ логики либо отрицательных NIM уровней на нагрузке 50 Ом. В каждом канале имеется возможность либо сразу передавать результат преобразования, либо накапливать данные в своей области гистограммной памяти модуля АЦП.

Обмен данными и управление режимами работы спектрометрического АЦП происходит либо по системной шине через 40-контактный разъем на передней панели модуля, либо по интерфейсу USB.

Аналоговые входы имеют связь по постоянному току и принимают положительные импульсы от стандартных спектрометрических усилителей с постоянной времени формирования от 0,25 до 20 мкс. Дифференциальные входы аналоговых каналов позволяют снизить влияние наводок на входные цепи модуля.

Каждый канал имеет свой дискриминатор нижнего уровня, порог которого регулируется с помощью 8-разрядного ЦАП в диапазоне от 0 до 2,55 В, и дискриминатор верхнего уровня с регулируемым порогом в диапазоне от 5 до 2,45 В.

Каждый из восьми каналов имеет пиковый детектор с запоминанием и принимает импульсы с амплитудами в диапазоне от 0 до +5 В. Сигналы с выходов пиковых детекторов оцифровываются 12-разрядными АЦП. Результат преобразования каждого канала представляет собой 16-разрядное слово, в котором 12 младших разрядов отведены для выходного кода АЦП и 3 старших разряда использованы для кода номера канала. Данные с выходов каналов передаются по системной шине в ПЛИС, в которой происходит коррекция, масштабирование кодов АЦП в зависимости от установленного режима работы и накопление спектров.

Программная установка параметров АЦП осуществляется 16-разрядными словами, в которых 8 старших разрядов использованы в качестве адресных и 8 младших разрядов использованы для передачи кода операции.

Для записи в регистры порогов используются следующие разряды слова:

D15-D13 – номер канала;

D10-D08 – код режима записи порогов;

D07-D00 – значения порогов.

Для записи в регистр управления используются разряды слова:

D10,D09 – код режима записи управляющего слова;

D06 – инкремент счетчика разравнивания/генератор псевдослучайных кодов;

D05 – запись в память восемь одномерных

спектров/запись в память два двумерных спектра;

D04 – память в режиме FIFO/память в режиме гистограмм;

D03 – совпадения/антисовпадения;

D02 – автозапуск/стробирование;

D01,D00 – коэффициент преобразования АЦП 512, 1024, 2048, 4096.

Для записи в регистр чтения используются разряды слова:

D15-D13 – номер канала;

D10,D09 – код режима чтения;

D04 – разрешение/запрет чтения временной метки;

D03 – чтение данных из каналов/чтение регистра состояния;

D02 – чтение двумерных спектров из памяти;

D01,D00 – чтение одномерных спектров из запоминающих устройств всех или выбранного канала.

Запуск работы канала может производиться либо в режиме автозапуска, либо в режиме стробирования. При автозапуске процесс преобразования инициируется входным сигналом, прошедшим через схему отбора импульсов, с амплитудой, которая соответствует выставленным значениям нижнего и верхнего порогов.

В режиме стробирования к этим условиям добавляется наличие на входе канала стробирующего импульса, который запускает процесс преобразования.

Индивидуальные входы стробирования каналов позволяют работать в режимах совпадений/антисовпадений.

Для коррекции дифференциальной нелинейности АЦП применена схема разравнивания с использованием метода скользящей шкалы, который уменьшает дифференциальную нелинейность АЦП в корень квадратный из M раз, где M – количество возможных состояний N -разрядной схемы разравнивания [7]. Работой разравнивающего ЦАП можно управлять либо с помощью счетчика, содержимое которого увеличивается на единицу после каждого завершения цикла преобразования микросхемы АЦП, либо с помощью генератора псевдослучайных кодов, реализованного в ПЛИС. Выбор производится при начальной установке режимов работы модуля.

Для улучшения линейности схемы разравнивания в микросхеме ЦАП используются только восемь старших разрядов.

В качестве собственной буферной памяти АЦП (далее по тексту – памяти) используется RAM-память микросхемы ПЛИС серии Cyclone. Блок памяти ПЛИС сконфигурирована как “true dual port memory”. Объем памяти позволяет записывать восемь одномерных спектров размером

4К × 16 разрядов либо два двухмерных спектра размером 128 × 128 × 16 разрядов.

Для подключения к ПК в АЦП используется контроллер USB. Он реализован на основе микросхемы универсального микроконтроллера Xmega128 A1 [4], микросхемы программируемой логики и микросхемы FT245R, реализующей мост между памятью типа FIFO и интерфейсом USB.

Конструкция

АЦП выполнен в стандартном модуле КАМАК двойной ширины. Предусмотрено два варианта конструкции АЦП. Первый вариант (слева на рис. 2) является универсальным и может использоваться в относительно несложных измерительных системах с количеством каналов не более восьми и подключается к ПК по интерфейсу USB. Этот АЦП состоит из двух печатных плат: собственно 8-канального АЦП и платы контроллера USB (рис. 3)

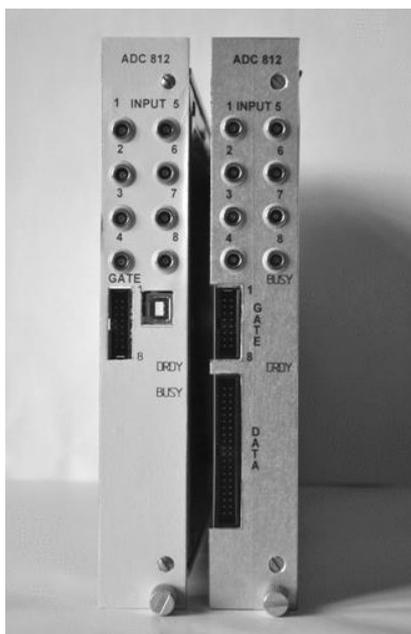


Рис. 2. Конструкция АЦП.

Второй вариант (справа на рис. 2) предназначен для работы в составе сложных многодетекторных систем и подключается к системной шине данных и управления через 40-контактный разъем на передней панели. Контроллер шины может обслуживать до четырех таких модулей, т.е. 32 измерительных канала.

На передней панели АЦП расположены 8 разъемов LEMO для аналоговых входов, 16-контактный разъем для входов стробирования, 40-контактный разъем системной шины (вариант 1) или разъем USB (вариант 2).

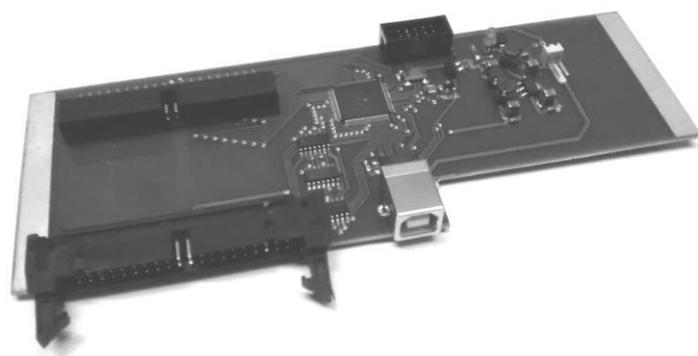


Рис. 3. Плата контроллера USB.

Технические характеристики

8 аналоговых входов с диапазоном сигналов от 0 до +5,0 В;

8 входов стробирования для сигналов ТТЛ/ NIM уровней (выбор с помощью микропереключателей);

«разрешение 9 - 12 бит (выбор программно)»;

дифференциальная нелинейность ±2 %;

интегральная нелинейность ±0,05 %;

наличие гистограммной памяти;

счетчик событий;

режимы автозапуска и стробирования;

время преобразования и считывания для каждого входа равно 3 мкс;

установка нижнего и верхнего порогов дискриминации для каждого входа;

собственная буферная память 32К × 16 бит;

интерфейсы: системная шина данных и управления, USB;

конструкция: модуль КАМАК двойной ширины.

Программное обеспечение

Программное обеспечение АЦП реализовано на графическом языке программирования G в среде Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW) [5].

Созданное программное обеспечение фактически является виртуальным прибором и состоит из трех основных частей:

лицевой панели (интерфейса оператора) АЦП на экране подключенного ПК;

блока диаграммы, содержащий код программы в графическом виде;

драйвера, через который программа работает с АЦП.

В отличие от языков с последовательным выполнением команд, таких как C и C ++, данное программное обеспечение содержит в себе информацию о том, какие части программы следует выполнять параллельно. Для максимального использования всех преимуществ многоядерной

архитектуры процессоров современных ПК предусмотрены участки программы, которые должны выполняться независимо, т.е. реализован многопоточный режим работы.

В качестве коммуникационного шлюза с АЦП программа использует наиболее распространенный в ПК порт USB 2.0.

Данные от АЦП поступают в программный буфер в памяти ПК. Далее, согласно расставленным приоритетам, обработанные данные записываются на жесткий носитель и параллельно отображаются на восьми графиках (в соответствии с количеством каналов) в виде гистограмм. Реализованные режимы работы: «СТАРТ», «ПАУЗА», «ПРОДОЛЖИТЬ», «СТОП». Первый и последний режимы соответствуют началу и концу эксперимента. Записанный файл данных в своем наименовании содержит дату и время начала эксперимента, а системные дата и время закрытия файла соответствуют его окончанию. К началу регистрации событий («СТАРТ»), а также в промежутке «ПАУЗА»/«ПРОДОЛЖИТЬ» оператор имеет возможность изменять начальные установки АЦП, например верхнего/нижнего порога дис-

криминаторов. Установка порогов происходит отдельно по каждому из восьми входов АЦП.

В программе предусмотрена защита от неосознанных действий оператора, которые могут привести к остановке или изменению хода измерений.

На рис. 4 представлен вид лицевой панели АЦП в режиме накопления. Программа позволяет одновременно вести накопление 8 спектров, при этом для построения гистограмм используются усредненные данные. 8191 канал превращается в 819, что вполне достаточно для понимания состояния текущих процессов.

В режиме измерений $E - \Delta E$ программа обеспечивает накопление данных по четырем парам входов АЦП (четырем телескопам) входных данных и результирующий график $E - \Delta E$ к каждой паре. Пример накопленного спектра в одном из восьми входных каналов представлен на рис. 5, при этом по нечетным входным каналам накапливаются спектры от детектора E , а по четным – ΔE .

На рис. 6 представлен пример лицевой панели программы в режиме отображения зависимости удельных потерь энергии от энергии для пяти типов заряженных частиц.

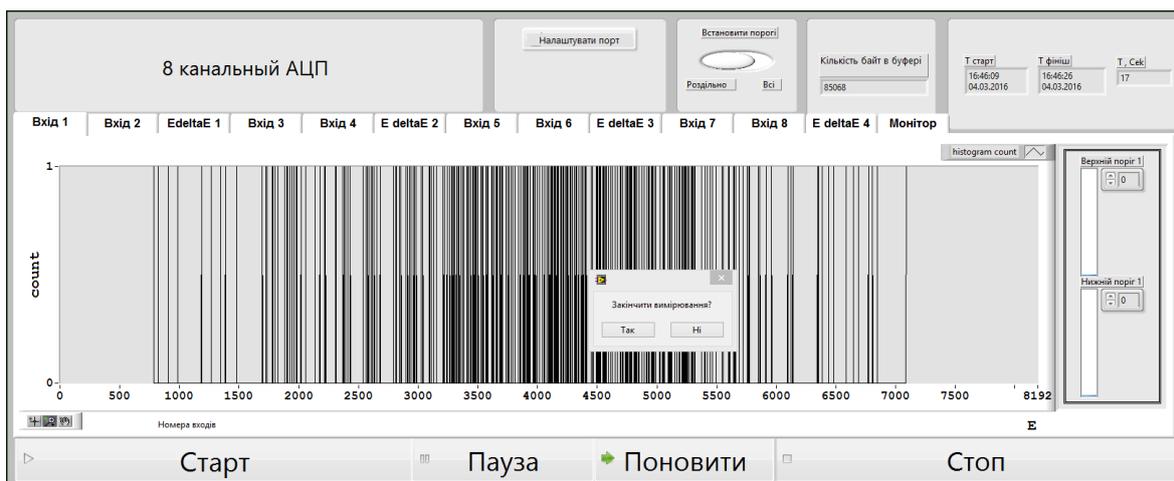


Рис. 4. Работа программы в режиме накопления.

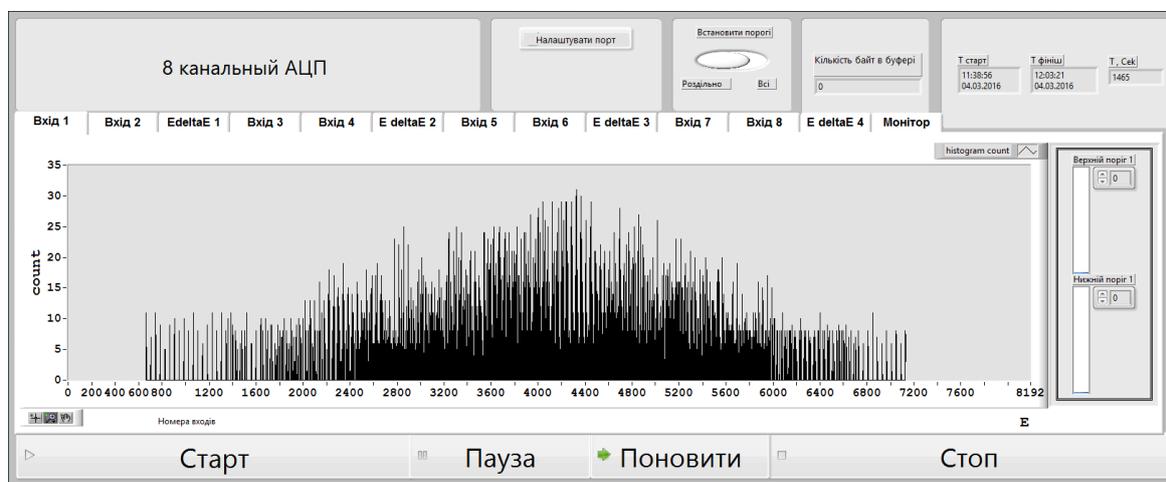


Рис. 5. Накопленный спектр в одном из входных каналов АЦП.

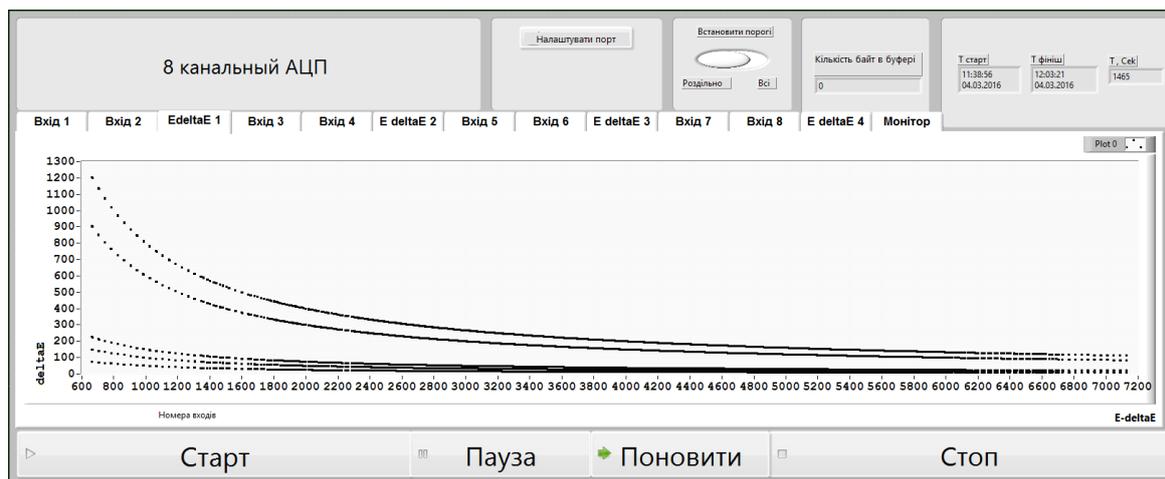


Рис. 6. Удельные потери энергии заряженных частиц.

Выводы

Использование программируемой логики и символьного программирования обеспечивают гибкую архитектуру, возможность вариации функциональных параметров рассмотренного АЦП применительно к конкретным методикам экспериментального исследования ядерных реакций. Наличие виртуальной панели АЦП делает его удобным в использовании. Стабильность работы и высокая пропускная способность представленного спектрометрического АЦП обеспечивается за счет:

- применения современной элементной базы;
- параллельной обработки сигналов от нескольких источников;
- применения для преобразования быстродействующих АЦП;
- использования быстрой системной шины передачи данных для сбора информации от нескольких модулей измерительной системы;
- наличия многофункциональной буферной памяти в АЦП;
- подключения к ПК по скоростному интерфейсу USB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтер А.П., Павленко Ю.М., Доронін М.І. та ін.* Вимірювальна система з гнучкою архітектурою // Щорічник-2011. - К.: Ін-т ядерних дослідж., 2012. - С. 83.
2. *Строгонов А.* Проектирование комбинационных схем на базе ПЛИС // Компоненты и технологии. - 2008. - № 5. - С. 148 - 151.
3. *Гаврилов Л.Е.* Основы ядерной электроники. Часть 1. - М.: НИЯУ МИФИ, 2010. - 164 с.
4. *Королев Н.* AVR-контроллеры: развитие семейства. Часть 1 // Компоненты и технологии. - 2010. - № 5. - С. 82 - 86.
5. *Мошкин В., Бессонов А., Батоврин В.* LabVIEW. Практикум по электронике и микропроцессорной технике. - М.: ДМК-Прес, 2014. - 182 с.
6. *Режим доступа к ресурсу:* www.altera.com
7. *Cottini C., Gatti E., Svelto V.* A new method of analog to digital conversion // Nucl. Instrum. Methods. - 1963. - Vol. 24. - P. 241 - 250.

А. П. Войтер, М. І. Доронін, О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

ВОСЬМИКАНАЛЬНИЙ СПЕКТРОМЕТРИЧНИЙ АЦП З ПРОГРАМОВАНОЮ ЛОГІКОЮ

Розглянуто архітектуру, принципи роботи, програмне забезпечення і конструкцію восьмиканального спектрометричного АЦП з програмованою логікою для багатопараметричних вимірювальних систем дослідження ядерних реакцій.

Ключові слова: експеримент, ядерні реакції, АЦП, ПЛИС, графічна мова програмування.

A. P. Voiter, M. I. Doronin, A. M. Kovalev, O. O. Gavrylov

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

EIGHT-CHANNEL SPECTROMETRIC ADC WITH PROGRAMMABLE LOGIC

The architecture, operating principles, software and design of eight-channel spectrometric ADC with programmable logic for multiparameter measurement systems research nuclear reactions is considered.

Keywords: experiment, nuclear reactions, ADC, FPGA graphical programming language.

REFERENCES

1. *Vojter A.P., Pavlenko Yu.M., Doronin M.I. et al.* // Annual report-2011. - Kyiv: In-t yadernikh doslidzh., 2012. - P. 83. (Ukr)
2. *Strogonov A.* // Komponenty i tekhnologii. - 2008. - No. 5. - P. 148 - 151. (Rus)
3. *Gavrilov L.E.* Fundamentals of nuclear electronics. Part 1. - Moskva: NIYaU MIFI, 2010. - 164 p. (Rus)
4. *Korolev N.* // Komponenty i tekhnologii. - 2010. - No. 5. - P. 82 - 86. (Rus)
5. *Moshkin V., Bessonov A., Batovrin V.* LabVIEW. Practical work on electronics and microprocessor technology. - Moskva: DMK-Pres, 2014. - 182 p. (Rus)
6. *Resource* access: www.altera.com
7. *Cottini C., Gatti E., Svelto V.* A new method of analog to digital conversion // Nucl. Instrum. Methods. - 1963. - Vol. 24. - P. 241 - 250.

Надійшла 26.01.2016

Received 26.01.2016