

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P10-94-87

В.А.Бутенко, В.А.Дроздов, А.С.Кирилов,
В.Е.Новожилов, А.И.Островной, В.И.Приходько,
В.Е.Резаев, Я.Судек*, Д.Крушински*

РТОF — КОРРЕЛЯТОР НА ОСНОВЕ
ЦИФРОВОГО СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА
TMS320C25 ДЛЯ ФУРЬЕ-ДИФРАКТОМЕТРА
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

*Институт проблем измерения АН Словакии, Братислава

Бутенко В.А. и др.
RTOF — коррелятор на основе цифрового сигнального процессора TMS320C25 для фурье-дифрактометра высокого разрешения

В работе содержится описание корреляционного анализатора на основе цифровых сигнальных процессоров TMS320C25 для импульсных источников нейтронов и приведены результаты измерения спектра образца на фурье-дифрактометре высокого разрешения (ФДВР) на импульсном реакторе ИБР-2. Предложен RTOF-коррелятор на 8000 каналов, реализованный на PC с тремя платами DSP и имеющий по сравнению с существующей аппаратурой на ФДРВ в десятки раз меньшую стоимость и небольшие габариты.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

Перевод автора

Butenko V.A. et al.

P10-94-87

RTOF — Correlator Based on Digital Signal Processor
TMS320C25 for the High Resolution Fourier Diffractometer

The DSP-TMS320C25 based correlation analyzer for the high resolution Fourier diffractometer (HRFD) at a pulsed neutron source is described. A test experiment for measuring spectra from a sample on the HRFD diffractometer at the IBR-2 pulsed reactor is reported. The proposed correlation analyzer for 8000 channels is based on three DSP-PC boards and thus will cost ten times less and will be essentially smaller in size than the RTOF-correlation parallel type which is now operating on the HRFD.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

В ЛНФ с 1992 года действует созданный по совместному российско-финскому проекту нейтронный фурье-дифрактометр высокого разрешения ФДВР [1], прототипом которого является дифрактометр СФИНКС на стационарном реакторе в ПИЯФ. Использование фурье-прерывателя в режиме корреляционного анализа обратного времени пролета позволяет существенно (примерно в 15 раз) улучшить разрешающую способность дифрактометра по сравнению с другими, работающими на ИБР-2 спектрометрами, при незначительном уменьшении светосилы. Одной из важных и дорогостоящих электронных частей дифрактометра является RTOF-коррелятор (Reverse time-of-flight) параллельного типа на 8196 временных каналов, разработанный в Центре технических исследований Эспоо в Финляндии [2]. Дальнейшее развитие установки требует увеличения количества временных каналов существующего анализатора. Кроме того, увеличение числа нейтронных детекторов потребует создания нескольких накопительных систем такого типа. В данной работе представлен разработанный авторами вариант RTOF-коррелятора на основе цифрового сигнального процессора, имеющий по сравнению с RTOF-коррелятором параллельного типа почти на два порядка меньшую стоимость и небольшие габариты.

1. Корреляционная спектрометрия на импульсных источниках нейтронов

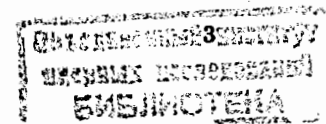
Для увеличения эффективности методов анализа по времени пролета нейтронов более 20 лет назад были предложены два метода - корреляционный и так называемый фурье-метод [3]. Однако только совсем недавно появились действующие установки, электроника которых достаточно полно удовлетворяет требованиям этих методов [4, 5].

Задача измерения спектра упруго рассеянных нейтронов методом модуляции пучка нейтронов может быть сведена к задаче определения импульсной характеристики линейной системы, на вход которой поступает сигнал, соответствующий функции модуляции пучка нейтронов, а выходным сигналом является интенсивность нейтронов, регистрируемых детектором. В такой системе выходной сигнал с точностью до фонового шума, не модулируемого прерывателем, определяется сверткой:

$$I(t) = \int V(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (1)$$

где $I(t)$ - выходной сигнал (регистрируемая интенсивность),
 $V(t)$ - входной сигнал (функция модуляции),
 $h(t)$ - импульсная характеристика (спектр нейтронов).

Известно, что для линейных систем с постоянными параметрами импульсная характеристика $h(t)$, определяемая как реакция системы на входной сигнал $\delta(t)$, связана преобразованием фурье с частотной характеристикой этой системы и может быть восстановлена по функции взаимной корреляции выходного и входного сигналов, если автокорреляционная функция входного сигнала ведет себя как δ -функция. Отсюда следуют три способа модуляции и, следовательно, три типа прерывателей, которые используются для определения импульсной характеристики (в нашем случае, спектра нейтронов по времени пролета). Это одноцелевой прерыватель Ферми, фурье-прерыватель и псевдослучайный прерыватель. На установках, работающих на импульсных источниках нейтронов, входной модулирующий сигнал определяется наложением импульса источника и модуляции, создаваемой прерывателем. Поэтому при использовании фурье-прерывателя невозможно прямое применение традиционного фурье-метода для восстановления спектра. Корреляционный метод



анализа является предпочтительным для импульсных источников нейтронов. В ЛНФ этот метод применяется с начала 70-х годов. В работах [6,7,8] дано описание аппаратуры для двухмерного корреляционного анализа с использованием псевдослучайного прерывателя. На действующем в настоящее время фурье-дифрактометре высокого разрешения также используется корреляционный метод анализа спектра. Отличие заключается в том, что используется фурье-прерыватель, работающий в специальном режиме изменения скорости и фазы вращения, а процесс формирования спектра идет в реальном времени.

Согласно корреляционному методу, временной спектр упруго рассеянных нейтронов можно найти по следующей формуле:

$$h(t) = \int I(\tau)B(\tau-t)d\tau. \quad (2)$$

С учётом двойной модуляции нейтронного пучка содержимое каждого временного канала $S(n)$ RTOF-коррелятора определяется выражением

$$S(n) = \int I(t)C(t-L_c/v_n)M(t-L_m/v_n)dt, \quad (3)$$

где

C - функция модуляции нейтронного пучка фурье-прерывателем;

M - импульс нейтронной вспышки реактора;

n - номер временного канала анализатора;

L_m - расстояние от источника нейтронов до детектора;

L_c - расстояние от прерывателя до детектора;

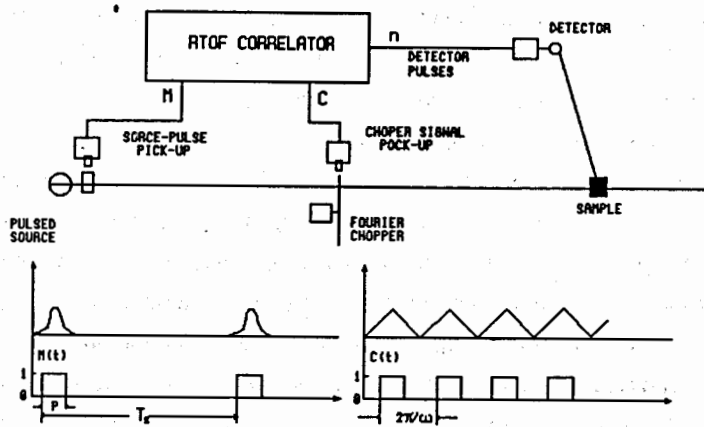
v_n - скорость нейтронов, соответствующая выбранному каналу анализатора.

Для реализации этой формулы в параллельном RTOF-корреляторе [5] используется аппроксимация модулирующих функций логическими сигналами и формирование задержанных

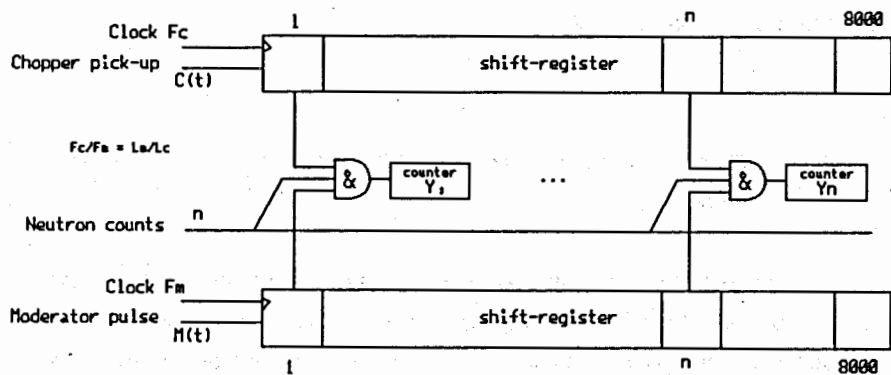
сигналов с помощью сдвиговых регистров. Накопление спектра ведется в параллельных счетных каналах, для которых разрешающий сигнал определяется логическим совпадением задержанных сигналов модуляции (рис.1а,б). Для формирования требуемых задержек сигналов для каждого счетного канала отношение частот сдвига регистров задается отношением расстояний L_m / L_c , а частота сдвига данных в регистре функции модуляции нейтронного пучка определяется шириной временного канала анализатора. Для подавления фоновой составляющей детекторного сигнала, не модулированной прерывателем, одновременно измеряются два спектра, соответствующих противоположным фазам сигнала модуляции прерывателя. Результирующий спектр высокого разрешения вычисляется по разности двух спектров. Электроника параллельного RTOF-коррелятора содержит два измерительных канала по 8196 анализаторных счетчиков каждый. Конструктивно анализатор построен по модульному принципу на основе заказных специализированных микросхем (ASIC) и занимает в еврокрейте 18 станций размером 9U.

2. RTOF-анализатор на основе цифрового сигнального процессора

RTOF-коррелятор на основе двойной линии задержки является анализатором параллельного типа, осуществляющим накопление спектра в реальном времени. Он предназначен для работы как на стационарных, так и на импульсных источниках нейтронов. Однако в случае импульсного источника нейтронов существует возможность разделить во времени процессы приема и обработки входных данных в каждом цикле реактора. Это позволяет применять вычислительные устройства, последовательно обрабатывающие данные для каждого канала



а) Функциональная схема фурье-дифрактометра на импульсном реакторе и временные диаграммы сигналов.



б) Структурная схема коррелятора на основе двойной линии задержки.

Рис. 1

анализатора в соответствии с формулой (3). Переходя к дискретной по времени версии сигналов, сумма отсчетов, накапливаемая в каждом канале за один импульс источника нейтронов, приближенно может быть представлена в следующем виде:

$$S(n) = \sum_{i=j}^{i=j+p} I_i \cdot C_{i-n}, \quad (4)$$

где $j = [n \times L_c / L_c]$,

P - ширина импульса источника нейтронов в дискретах временных интервалов,

I_i, C_i - дискретное представление сигналов $I(t), C(t)$.

Отсюда можно сделать вывод, что вычислительная система, выполняющая функции RTOF-коррелятора, должна обеспечивать выполнение $N \times P$ операций умножения и $N \times P$ операций суммирования за период следования импульсов источника. Для $N=8000$, где N - число каналов RTOF-анализатора, при существующих параметрах импульса реактора ИБР-2 (частота - 5 Гц, ширина импульса - 320 мкс), требуемая производительность вычислительной системы составляет 16 MIPS. С учетом вычисления положительной и отрицательной составляющей результирующего спектра эту величину, в принципе, надо удвоить. Такая производительность при вычислении корреляции в последовательной вычислительной системе может быть достигнута при использовании современных сигнальных процессоров. К отличительным особенностям этих процессоров относится наличие в наборе команд базовых операций, ориентированных на вычисление свертки, корреляции и преобразований Фурье. Так, выбранный нами сигнальный процессор TMS320C25 фирмы Texas Instruments [9] позволяет

выполнять операцию умножения двух 16-разрядных чисел и суммирование результата с 32-разрядным аккумулятором в одном цикле за 100 нс. Более современный процессор TMS320C52 обеспечивает производительность до 40 MIPS.

Для построения прототипа коррелятора был модернизирован разработанный ранее [10] модуль цифрового сигнального процессора для персональных ЭВМ. В мае 1993 года на установке ФДВР были проведены испытания разработанного авторами макетного варианта RTOF-анализатора, состоящего из двух изготовленных в стандарте IBM PC плат: входной платы и платы цифрового сигнального процессора (ЦСП) с шиной ISA. Было опробовано два алгоритма реализации на ЦСП вычисления корреляции согласно формуле (4). В первом случае использовались операции суммирования на участках не нулевых значений модулирующего сигнала при предварительном кодировании длительности полупериодов и во втором случае использовались команды умножения-суммирования (MAC) без предварительного анализа сигналов. При этом уменьшение времени вычислений в первом случае достигалось только на малых скоростях вращения прерывателя.

Структурная схема входной платы представлена на рисунке 2. Перед началом измерений управляющей программой персонального компьютера в соответствующие регистры входной платы заносятся значения задержки начала регистрации, времени регистрации информации за одну вспышку реактора, а также значение выбранной ширины временного канала. Ширина временного канала может выбираться в диапазоне от 1мкс до 32мкс. Программируемая задержка сигнала состояния прерывателя определяет начало регистрируемого спектра и имеет максимальное значение 16384 временных каналов. Передача информации на плату ЦСП разрешается при наличии сигнала "Enable". В счетчике I_1 , состоящем из двух поочередно работающих счетчиков, регистрируется количество детекторных

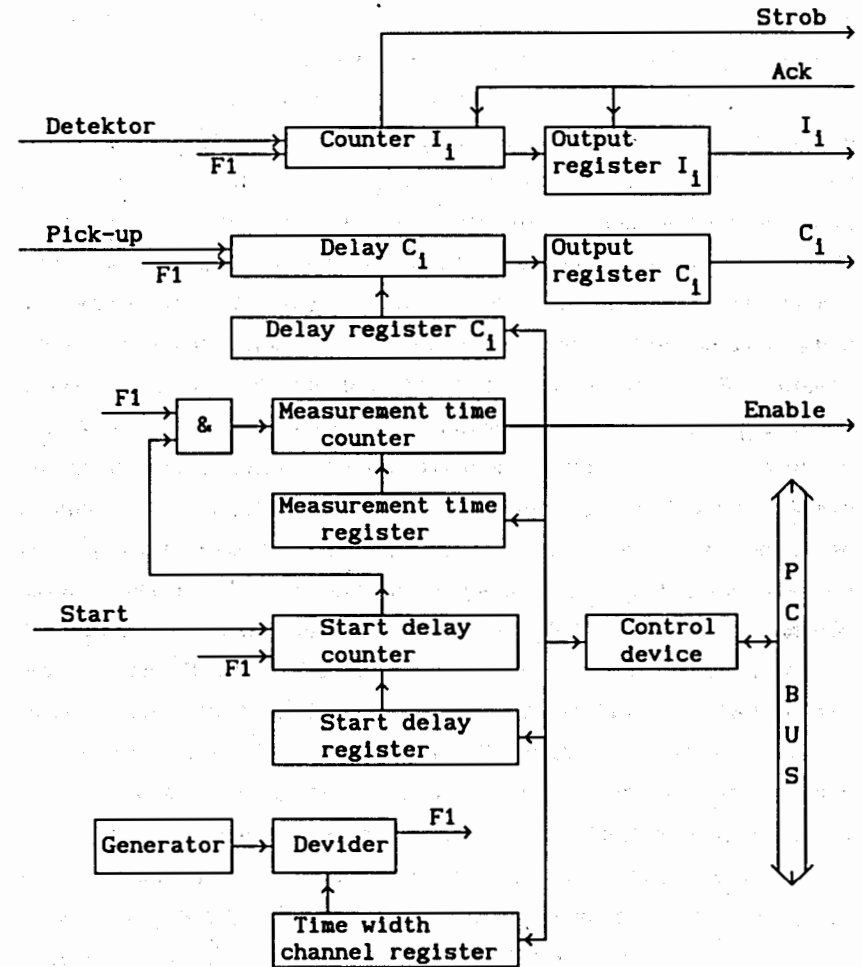


Рис. 2. Структурная схема входной платы RTOF-анализатора.

сигналов, пришедших за время длительности одного временного канала. В конце каждого временного канала вырабатывается сигнал готовности "Ready", по которому число зарегистрированных детекторных сигналов в данном интервале и состояния прерывателя передаются на плату ЦСП.

Структурная схема платы ЦСП представлена на рисунке 3.

Модуль содержит, кроме самого процессора TMS320C25 с тактовой частотой 40 МГц, память для программ (до 64К 16-разрядных слов) и память данных (64К*16), 4 коммуникационных регистра, контроллер шины ПК, селектор адресов портов и памяти, а также некоторые вспомогательные схемы. Один из 16-разрядных коммуникационных регистров используется для внешнего ввода данных. На этот порт приходят данные с входной платы, регистрирующей интенсивность нейтронов и состояние прерывателя в каждом временном канале. ОЗУ, помещенное на плате, служит в основном как рабочая память ЦСП. Запись регистрируемых входных данных в ОЗУ осуществляется под управлением ЦСП. Центральный процессор ПК может также обращаться к этому ОЗУ как к своей оперативной памяти. Для этого он должен перевести ЦСП в состояние HOLD. Перед началом измерений ПК записывает программу ЦСП в банк программной памяти. Во время работы ЦСП центральный процессор ПК может передавать данные или другие сообщения через один 16-разрядный и один 8-разрядный коммуникационные порты. ПК может также выполнить сброс ЦСП, может установить его в состояние HOLD, вызвать в ЦСП прерывания и сброс. ЦСП имеет возможность вызвать в ПК прерывание и передавать сообщения или данные посредством одного 16-разрядного порта. Кроме того, ЦСП может стать мастером на шине ПК и получить таким образом доступ в любую область оперативной памяти компьютера.

Программное обеспечение включает две части - управляющую программу, которая работает на ПК, и программу приема и обработки данных на сигнальном процессоре. Управляющая

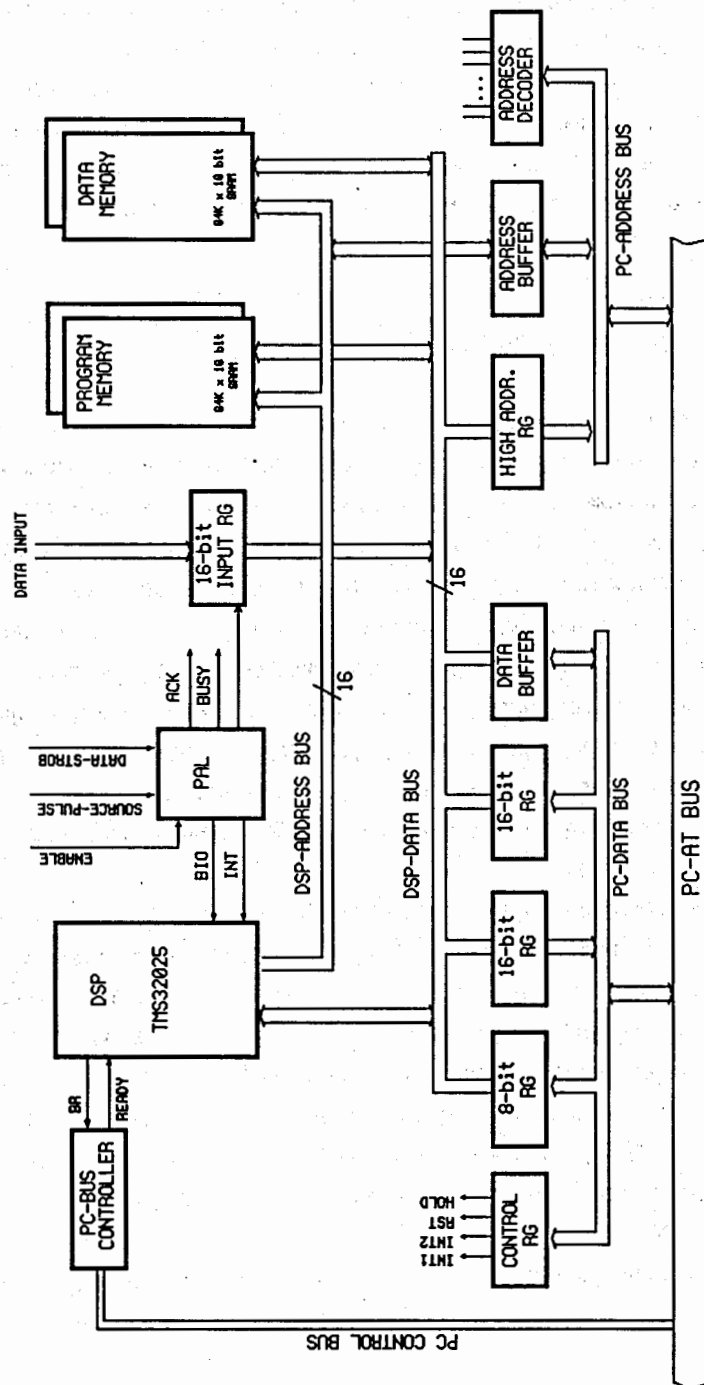


Рис. 3. Структурная схема платы ЦСП.

программа обеспечивает установку параметров эксперимента, загрузку программы и констант в модуль ЦСП, старт всей системы и считывание спектров после окончания цикла измерений. Программа ЦСП реализует обработку принимаемых данных согласно алгоритму RTOF-корреляции и накопление результирующих спектров низкого и высокого разрешения.

3. Результаты испытаний

В результате проведенных испытаний макетного варианта RTOF-коррелятора получены спектры на ≈ 2500 каналов с шириной временного канала 2 мкс и шириной стробирующего импульса старта реактора 450 мкс (число каналов ограничено производительностью сигнального процессора). Позитивная и негативная составляющие спектра высокого разрешения вычислялись на плате ЦСП одновременно. Сравнение с аналогичными спектрами, полученными на RTOF-корреляторе параллельного типа при тех же условиях и при одинаковой аппроксимации модулирующей функции прерывателя и импульса реактора, демонстрируют в пределах ошибок полное совпадение спектров (рис. 4).

К преимуществам предлагаемого RTOF-коррелятора относятся гибкость программирования алгоритма обработки данных, увеличение производительности (т.е. числа каналов) путём простого наращивания числа модулей ЦСП, а также возможность повышения разрешения за счёт учёта реальной функции модуляции интенсивности потока нейтронов. В настоящее время ведётся наладка RTOF-коррелятора на 8000 каналов на базе персонального компьютера, содержащего одну входную плату и три платы ЦСП.

Дальнейшее развитие системы связано с переходом на сигнальные процессоры типа TMS320C5X и использованием стандарта VME.

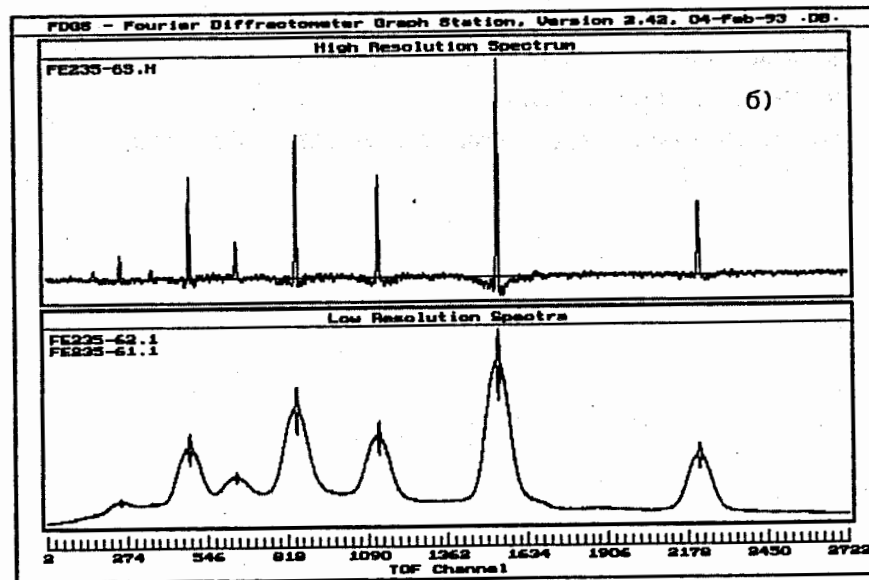
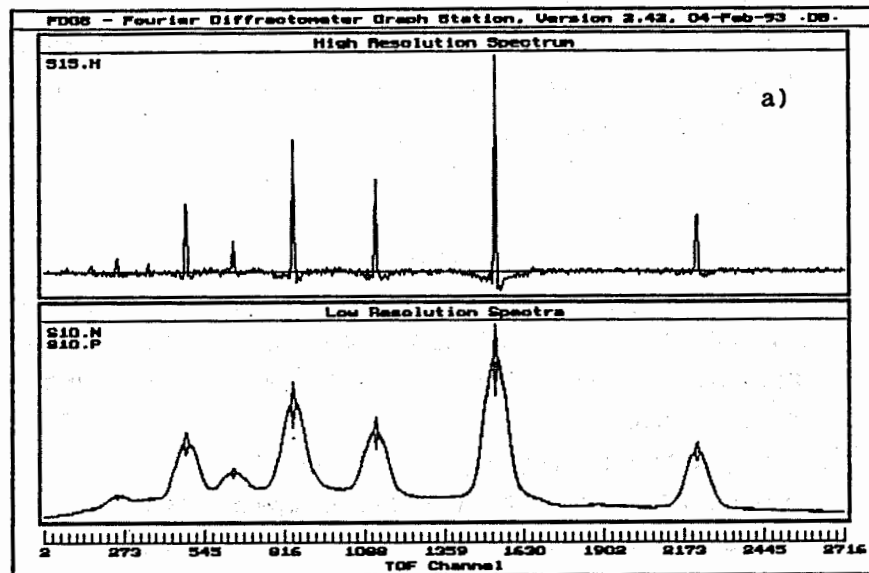


Рис. 4. Дифракционный спектр образца, полученный с помощью коррелятора на основе ЦСП (а) и коррелятора параллельного типа (б).

Авторы благодарят В. Л. Аксёнова, А. М. Балагурова, В. А. Трунова, П. Хиисмяки, А. Тиитта, В. А. Кудряшёва, В. Г. Муратова, В. В. Журавлёва, В. Г. Симкина, за интерес к работе и практическую помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aksenov V.L. et al. JINR, E13-92-456, Dubna, 1992.
 2. Hiismaki P, Poyry H, Tiitta A. -J. Appl. Cryst., 1988, 21, p.349-354.
 3. J.F.Colwell, S.R. Lehman, P.H.Miller N.I.M., 1969.
 4. Аксёнов В.Л. и др. ОИЯИ, P10-91-155, Дубна, 1991.
 5. Трунов В.А. и др. Препринт ПИЯФ, 1277, С-П., 1987.
 6. И. Визи, Д. Жигмонд и др. ОИЯИ, P13-8711, Дубна, 1975.
 7. И. А. Гладких, Н. Кроо и др. ОИЯИ, 14-9486, Дубна, 1976.
 8. Д. Мессинг ОИЯИ, P10-83-233, Дубна, 1983.
 9. TMS320C2X User's Guide.
 10. А. Л. Меньшиков и др. ОИЯИ, P10-92-182, Дубна, 1992.
-