

УДК 621.371.029.65

## СИСТЕМА СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

© 2007 г.

*В.И. Носов<sup>1</sup>, Е.И. Шкелев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

<sup>2</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

[shkelev@rf.unn.ru](mailto:shkelev@rf.unn.ru)

*Поступила в редакцию 9.04.2007*

Рассмотрен программно-аппаратурный комплекс сбора и обработки данных фильтрового микроволнового спектрорадиометра, предназначенного для диагностики озонового слоя атмосферы Земли на частоте 110836 МГц одной из линий вращательного спектра молекул озона. Особенностью комплекса является полностью цифровая обработка в реальном времени последетекторных сигналов спектрорадиометра по каждому из 32-х спектральных каналов при частоте дискретизации до 25 кГц.

### Введение

Средства автоматизации измерительных систем многочисленны и разнообразны как по областям применения, так и по характеру выполняемых функций. При разработке таких систем приходится решать две задачи. Одна из них связана с разработкой аппаратных средств, другая – с разработкой программного обеспечения, реализующего алгоритм взаимодействия с аппаратными модулями. Решение этих задач зависит от того, как функции измерительной системы (ИС) распределены по её аналоговому и цифровому (включая программные) составляющим. Если говорить о радиоприёмных устройствах, то здесь длительное время существует тенденция замены традиционных аналоговых средств обработки сигналов на цифровые.

Эффективность работы программного обеспечения во многом зависит от используемого интерфейса пользователя. Помимо средств, необходимых для контроля и управления измерительным процессом (например, для отображения или сохранения обрабатываемых данных) этот интерфейс должен обладать инструментами, с помощью которых можно устанавливать или изменять параметры ИС, менять их конфигурацию и производить тестирование. Это является одной из причин, что программы обслуживания ИС всё более часто оформляются как приложения, исполняемые под управлением операционных систем (ОС), для которых существуют развитые с точки зрения создания интерфейса пользователя средства разработки программного продукта. К таким системам относится ОС Windows, и именно как Windows-

приложение разрабатывалось описываемое ниже программное обеспечение.

Работа в среде такой ОС не гарантирует безошибочного выполнения процедур ввода данных и, в особенности, их сортировки по времени поступления. Связано это, с одной стороны, с функционированием самой операционной системы, а с другой – промышленные образцы устройств ввода/вывода (УВВ) становятся недоступными для программирования на регистровом уровне. Последнее отражает тенденцию развития измерительной техники, когда взаимодействие с УВВ возможно лишь с применением высокоуровневого программирования, а операции ввода/вывода реализуются путём вызова соответствующих процедур (или функций), входящих в состав библиотек программных модулей, реализующих способы взаимодействия с ними. Предоставляемые производителем программные средства не всегда достаточны, чтобы в полной мере обеспечить временную регламентацию операций по обмену данными. Это заставляет изыскивать дополнительные возможности, ориентируясь на конкретную ИС. Особенно важно это учитывать в тех случаях, когда обработка данных проводится в реальном масштабе времени и при высокой частоте дискретизации.

В данной работе рассмотрена система сбора и обработки данных для измерительного комплекса, назначением которого является измерение поглощения атмосферы Земли на частоте одной из линий вращательного спектра молекул озона (резонансная частота линии 110836 МГц) по принимаемому на поверхности Земли радиоизлучению. Система

функционирует как программно-аппаратная составляющая многоканального радиометрического приёмника с фильтровым способом спектрального анализа (спектрорадиометра), в котором применен высокоскоростной антенный обтюратор.

- от чёрного тела при температуре окружающей среды (закреплёно на поверхности одной из лопастей крыльчатки обтюлятора);
- от чёрного тела при температуре жидкого азота или (в зависимости от способа

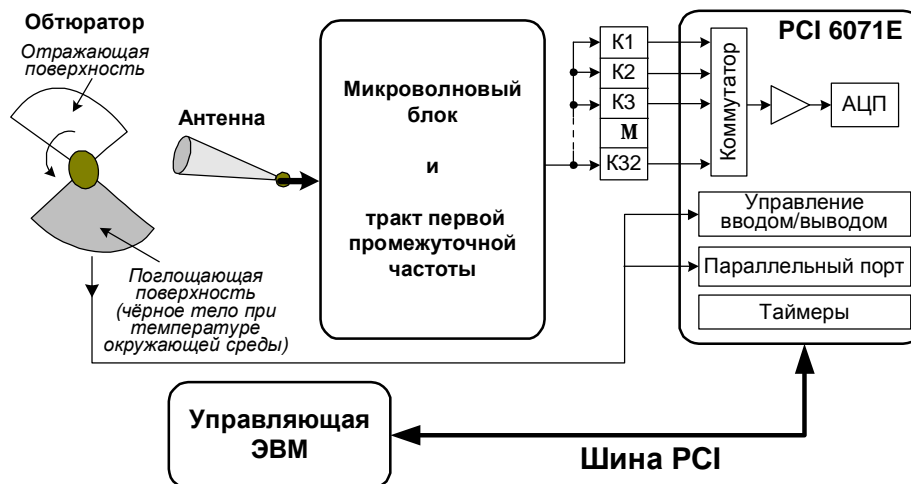


Рис. 1. Структурная схема аппаратной части спектрорадиометра

Структурное построение спектрорадиометра мало отличается от существующих (см., например, [1–3]). Особенность заключается в том, что ввод и последующая цифровая обработка данных по всем его каналам выполняется после квадратичного детектирования в реальном масштабе времени. В силу этого положение секторов обтюлятора и связанная с этим сортировка данных по принадлежности трём источникам принимаемого излучения (атмосфера и два источника для калибровки) выполняется программным способом<sup>1</sup>.

### Функциональные составляющие спектрорадиометра

Как уже отмечалось, спектрорадиометр состоит из двух основных компонент – аппаратной и программной. Структурная схема аппаратной части представлена на рис. 1, в ее составе:

1) микроволновый блок с рупорной антенной и антенным переключателем в виде обтюлятора, вращающимся со скоростью 214 об/мин и позволяющим принимать излучение от трёх источников:

- от атмосферы под заданным углом  $15^\circ$ ;

калибровки) от атмосферы в направлении на зенит;

2) фильтровой блок, имеющий 32 параллельных канала, избирательность и частота настройки которых соответствует форме наблюдаемой спектральной линии озона;

3) управляющая ЭВМ (персональный компьютер – ПК);

4) многофункциональное устройство ввода в виде специализированной платы PCI 6071E (изделие фирмы National Instruments, США), подключаемой к ПК через слот расширения шины PCI.

Особенностями измерительного комплекса являются:

- достаточно высокая скорость вращения обтюлятора, позволившая отказаться от традиционного модулятора на входе приемника при сохранении малого уровня флуктуаций, связанных с  $1/f$ -шумом. Благодаря высокой производительности ПК и PCI 6071E оказалось возможным осуществлять пересчет и калибровку данных измерений в реальном времени без использования аппаратных средств синхронного детектирования;

- более простая структура низкочастотного тракта, каждый из каналов которого ограничен последетекторными канальными усилителями постоянного тока с полосой пропускания около 10 кГц. В силу этого сократилось время выхода комплекса на рабочий режим и повысилась его надежность.

<sup>1</sup> На основании данных о положении секторов от связанного с обтюратором датчика.

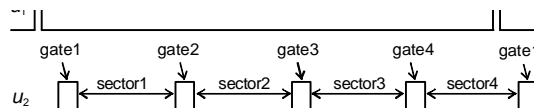


Рис. 2. Осциллограммы напряжений, поступающих от датчика секторов обтюлятора в параллельный порт устройства PCI 6071E

Ввод данных от всех каналов радиометра производится с помощью интегрированных в устройство PCI 6071E 32-канального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и буфера временного хранения на 512 отсчётов. Частота дискретизации  $f_D$  по каждому из каналов радиометра равна 25 кГц. Положение секторов обтюлятора и переходных зон между ними определяется по поступающим в параллельный порт устройства PCI 6071E сигналам с периодом  $T_{обт}$  от оптического ( $u_1$ ) и магнитных ( $u_2$ ) датчиков, установленных на обтюляторе (рис. 2). С помощью импульсов  $u_1$  определяется точка отсчёта временного положения секторов обтюлятора, вслед за которой следует первый сектор (sector1). Между сектором 1 и предшествующим ему по времени сектором 4 (sector4) лежит переходная область – импульс gate1. Временное положение трех других секторов (sector2-4) и переходных областей между ними определяется путем программного подсчета импульсов gate2-4 со сбросом по импульсу ( $u_1$ ).

Программная составляющая системы сбора и обработки данных реализует:

- 1) управление входящими в состав устройства PCI 6071E компонентами;
- 2) синхронизацию процесса сбора данных по каналам радиометра с вращением обтюлятора и их обработку;
- 3) интерфейс пользователя с необходимыми инструментами управления.

#### Алгоритм работы системы сбора и обработки данных

В управляющую программу входят три основные составляющие (рис. 3), выполняющие функции 1) инициализации ИС и ввода в программу параметров окружающей среды, в условиях которой выполняются спектральные измерения, 2) сбора и обработки данных в режиме измерений и 3) сбора и обработки данных в режиме тестирования ИС. Первоначально при входе в систему происходит её инициализация на основании данных, содержащихся в файле конфигурации. Пользователь по своему усмотрению может изменять параметры ИС, не выходя за установленные для этих параметров пределы, и при необходимости сохранять введённые изменения. Затем происходит переход в основную функцию программы, из которой вызываются функция спектральных измерений или функция тестирования.

Функции измерения и тестирования представляют собой повторяющиеся последовательности операций, исполнение которых зависит от положения секторов обтюлятора и занимает время, определяемое числом его оборотов  $Nt$  в одном цикле измерений. К числу таких операций относятся 1) вхождение в синхронизм с вращением обтюлятора и определения положения его секторов sector1-4, 2) считывание данных из циклического буфера и их распределения по секторам и по каналам, 3) определение средних значений и стандартных отклонений по каждому каналу и для каждого сектора, 4) сохранение полученных в измерительных циклах результатов в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) отдельно для каждого цикла измерений, а также 5) операции контроля корректности выполнения процедур, связанных с вводом данных.

Сортировка и первоначальное накопление данных от каналов радиометра выполняются в реальном масштабе времени. Поступающие от АЦП данные сначала сохраняются в циклическом буфере, расположенном в ОЗУ. Сортировка данных по каналам радиометра выполняется в соответствии с данными от датчика секторов и с информацией о текущем положении указателя циклического буфера  $pCurrent$ . Накопление и усреднение данных выполняется в два этапа. Первоначально данные усредняются и накапливаются в течение единичного цикла измерений. Результат накопления сохраняется в ОЗУ. Затем выполняется заданное количество (серия) циклов, и полученные данные снова усредняются по числу входящих в серию циклам измерений.

На аппаратном уровне сделано так, что в расчёт не принимаются данные, принадлежащие переходным областям вблизи границ секторов обтюлятора. Делается это путём стробирования АЦП импульсами gate1-4. Поток данных от АЦП преобразуется в последовательность кадров фиксированного (соответствующего числу каналов 32) размера. При формировании таких кадров возможны ошибки из-за того, что данные от АЦП поступают в циклический буфер хотя и без потерь, но с непредсказуемыми временными задержками. Они связаны, во-первых, с

разделением памяти и временного ресурса шины PCI, а, во-вторых, с накладными расходами, обусловленными вызовом используемых для ввода данных функций в многозадачной операционной системе, каковой является ОС Windows. По этой причине информация от датчика секторов и информация о текущем положении указателя буфера

Большая часть перечисленных выше задач решается основным программным циклом, являющимся составной частью процедуры измерений как в режиме тестирования, так и в режиме спектральных измерений. Работа основного программного цикла (рис. 4, 5) начинается после вхождения в синхронизм с вращением обтюлятора с того момента времени, когда в луч зрения антенны попадает сектор 1.

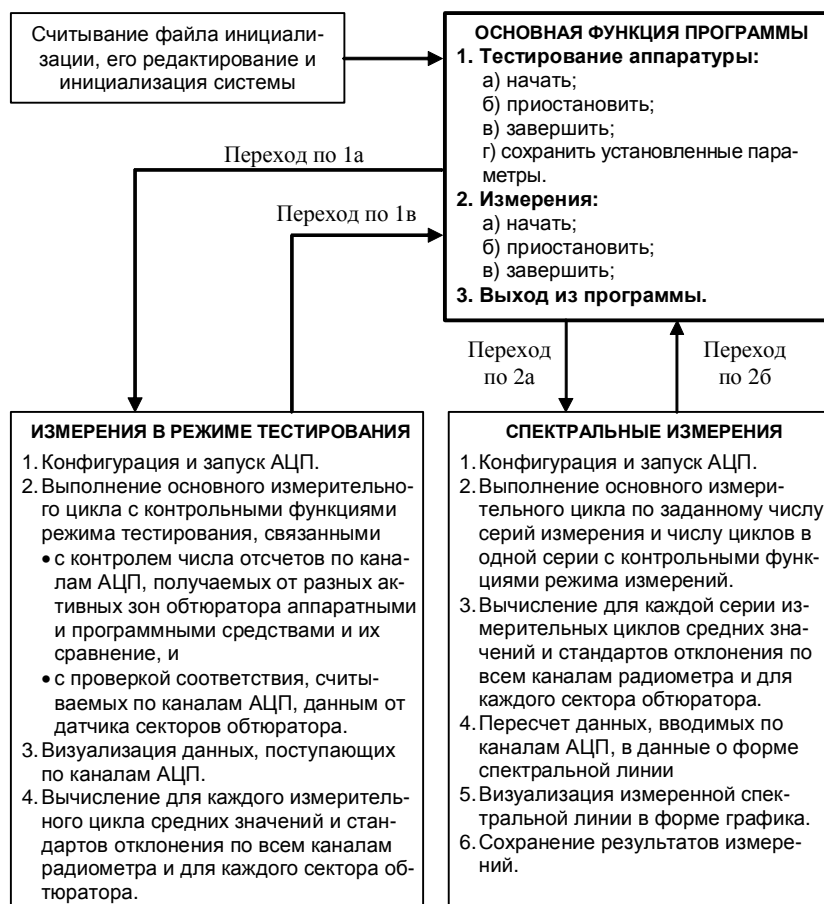


Рис. 3. Структура программы управления спектрометрией

$r_{Current}$  поступает в разное время. Разность времён уменьшается с ростом производительности управляющей ЭВМ. При этом, однако, уменьшается лишь вероятность, но не устраняется возможность появления задержек между временами получения значений параллельного порта  $Pattern$  и указателя  $r_{Current}$ , что недопустимо для временной селекции данных. Возникающие ошибки приходится контролировать, а ошибочные данные исключать из процесса обработки. Эта задача решается встроенными в программные циклы измерений и тестирования операциями подсчёта количества принятых из циклического буфера отсчётов и числа получившихся из них кадров данных.

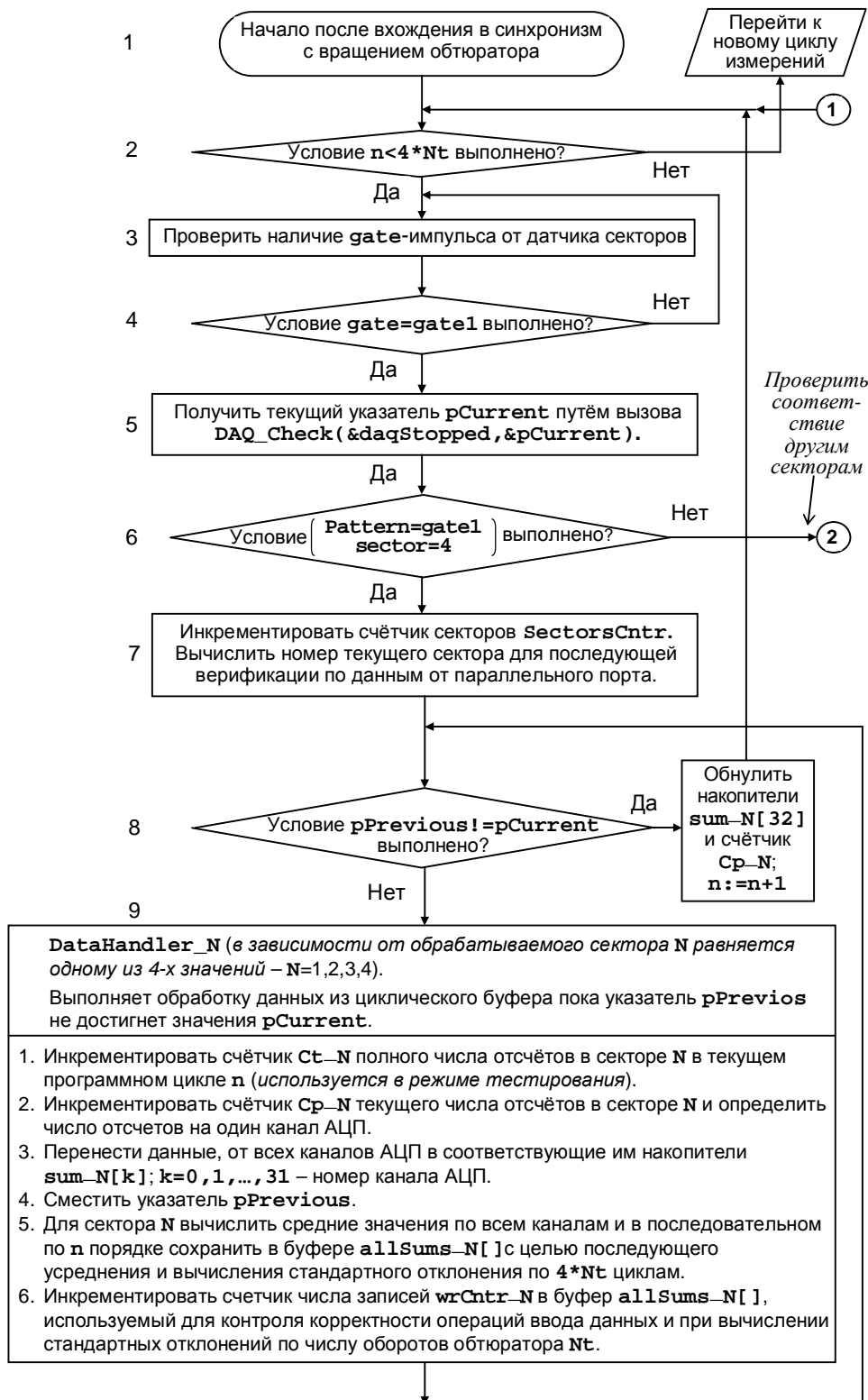
Для этой цели в программу управления включены операции, обеспечивающие безошибочное опознавание секторов обтюлятора. Эти операции выполняются перед началом каждого измерительного цикла. Кроме того, в сам измерительный цикл введены операции по поддержке синхронизма в течении производимых под его управлением измерений.

Основной программный цикл выполняется по заданному числу оборотов обтюлятора  $Nt$ . При этом число итераций  $n$  в программном цикле определяется числом  $4 \cdot Nt$  секторов, которые проходят через луч зрения антенны в каждом цикле измерений. Тело программного цикла начинается с ввода значения параллельного порта – с вызова функции  $DIG\_In\_Prt (Port, \&Pattern)$ , которая в

качестве параметров получает идентификатор порта Port и ссылку на переменную Pattern, где хранится принимаемый от датчика секторов двоичный код. Значение параллельного порта проверяется до тех пор, пока не будет опознан один из сигналов gate = gate1.

Затем посредством вызова функции DAQ\_Check(&daqStopped, &pCurrent) определяется значение указателя pCurrent циклического буфера, где хранятся данные от АЦП. Кроме ссылки на pCurrent функции DAQ\_Check() передаётся ссылка на

переменную daqStopped как на один из параметров, задающих режим работы АЦП – в данном случае режим непрерывного ввода в циклический буфер с заранее определенным размером. Число извлечённых из циклического буфера слов для каждого из секторов подсчитывается с помощью счётчика Cp\_N (N = 1, 2, 3, 4). Особенность сбора данных такова, что оцифровка и сохранение данных в циклическом буфере выполняются параллельно с их обработкой: пока АЦП принимает данные от текущего сектора, обрабатываются данные



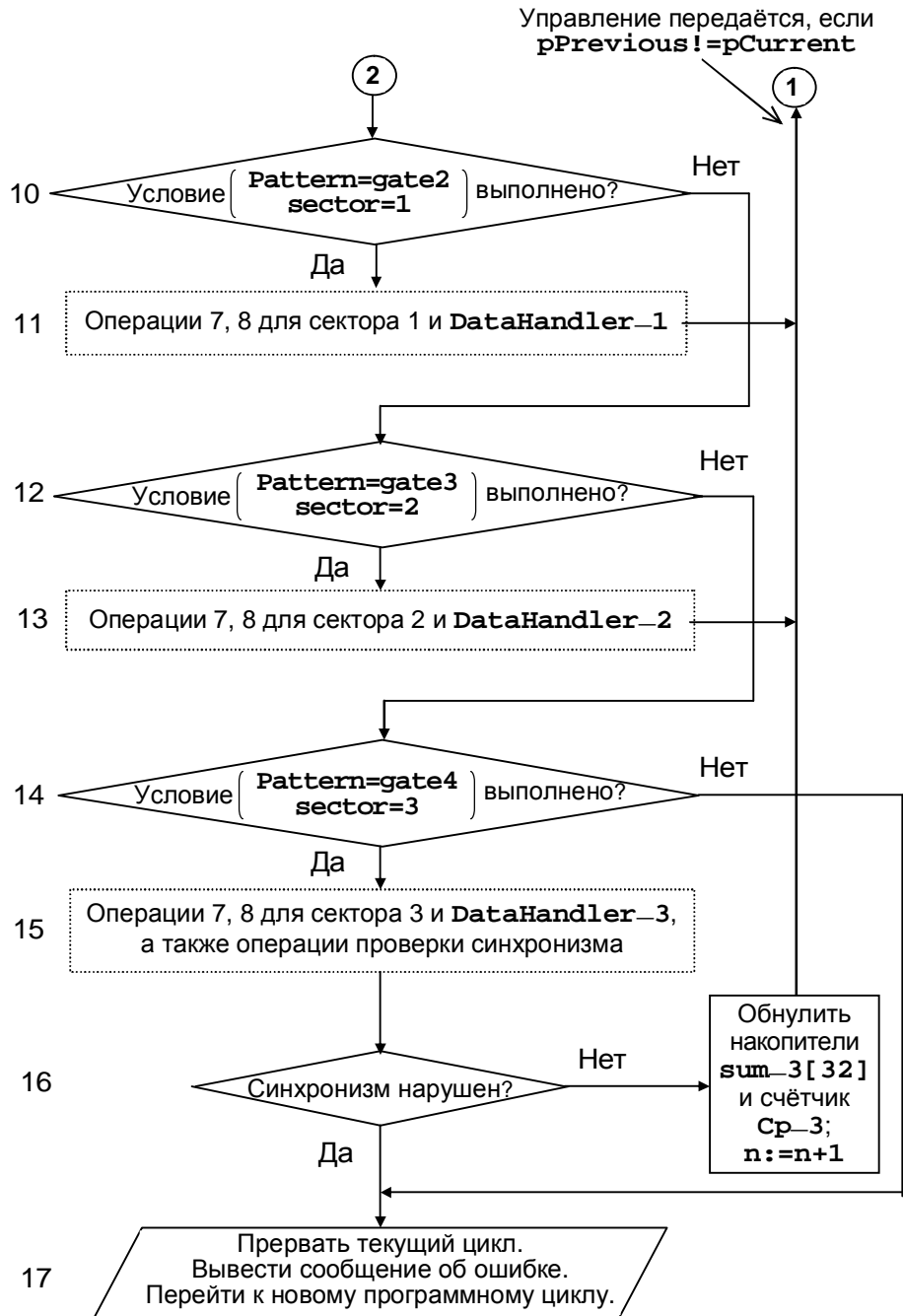


Рис. 5. Продолжение рисунка 4

предшествующего сектора.

Сбор данных от АЦП производится с учётом того, что датчик секторов может не вполне точно определять положение переходных областей и, как следствие, не вполне точно эти области могут быть отображены на массив поступающих от АЦП данных. Поэтому в измерительный цикл введены операторы, позволяющие корректировать «размеры» переходных областей программными средствами.

Текущий указатель буфера  $pCurrent$  на момент его прочтения с помощью функции `DAQ_Check()` содержит адрес последнего элемента данных. Предшествующие этому элементу данные принадлежат сектору обтюлятора, который был в поле зрения антенны до появления в нём переходной области, отмеченной соответствующим `gate`-сигналом. Может случиться так, что последние (отмеченные указателем  $pCurrent$ ) записи данных, будут относиться не к активной области сектора, а к следующей за ним

переходной области. Тогда часть этих данных следует исключить из процесса дальнейшей обработки, сместив указатель буфера на число кратное 32 – размеру одного кадра данных от АЦП. Это число как константа задается перед компиляцией программы. Точно также можно корректировать начальную границу обрабатываемых данных – указатель `pPrevious`, значение которого было получено как текущее значение `pCurrent` и сохранено как `pPrevious` в предшествующем вызове функции `DAQ_Check()`. Таким образом достигается соответствие `pPrevious` обрабатываемому массиву данных.

Получив текущий указатель циклического буфера, система приступает к обработке сохраненных в нём данных. Этот процесс начинается с определения `gate1`-сигнала и следующего за ним сектора `sector`<sup>2</sup>. При соответствии полученного от параллельного порта кода `Pattern` коду `gate1` и при значении `sector = 4` исполняются операции блоков 5-8 и обработчик данных `DataHandler_N` для сектора с номером `N = 4` (рис. 4). Исполнение операций обработки данных других секторов (рис. 5; блоки 11, 13, 15) зависит от того в каком из звеньев цепочки условных операторов 6, 10, 12, 14 (рис. 4, 5) обнаруживается совпадение текущих значений `Pattern` и `sector` и установленных для них признаков сравнения – значений `gateN` и `N`. Блоки 11, 13, 15 (рис. 5) по характеру выполняемых функций аналогичны блокам 5-8 и 9, представленным на рис. 4. Отличие имеется в блоке 15, куда добавлены операции проверки синхронности обработки данных и вращения обтюлятора. Поэтому расшифровка операций в блоках 11, 13, 15 не приводится.

Номер `sector` следующего (подлежащего обработке) сектора обтюлятора определяется в каждом текущем обработчике `DataHandler_N` и проверяется перед входом в процесс обработки данных следующего сектора. Каждый цикл обработки данных начинается с инкремента на 1 значения программного счётчика `SectorsCnt` (блок 7 на рис. 4), подсчитывающего общее число прошедших через луч зрения антенны секторов. Значение этого счётчика совместно с проверкой синхронизма операций ввода в конце цепочки условных операторов 6, 10, 12 и 14 позволяет избежать ошибок при определении порядкового

номера сектора и ошибок сортировки данных. Остальные операции обработки данных поясняет рис. 4.

Полученные в одном цикле измерений и усредненные по числу отсчётов данные сохраняются в принадлежащих каждому из секторов буферах `allSums_N[32*Nt]` ( $N = 1, 2, 3, 4$ ), размер которых равен размеру одного кадра данных АЦП, помноженному на число оборотов обтюлятора `Nt` в одном цикле измерений. Число произведенных в буферы `allSums_N[]` записей подсчитывается с помощью четырёх программных счётчиков `wrCntN_N`. В последующем значения этих счётчиков используются при вычислении средних значений и среднеквадратичных отклонений напряжений на выходах каналов радиометра.

По окончании сортировки, накопления, усреднения и сохранения данных, принадлежащих текущему обрабатываемому сектору `N`, сбрасывается счётчик отсчётов `Sp_N` и обнуляются накопители `sum_N[32]`, которые были использованы при работе с этим сектором.

Описываемый программный цикл реализован в двух вариантах, предназначенных для работы в режиме тестирования и в режиме спектральных измерений. Отличие цикла тестирования состоит в том, что в него включены дополнительные элементы, связанные с контролем работы измерительной системы. К таким элементам относится счётчик `Ct_N` общего числа отсчётов, принятых из циклического буфера за один измерительный цикл. Кроме того, в режиме тестовых измерений число принятых и вычисленных значений `Ct_N` кадров сравнивается с аппаратно подсчитанным (с помощью интегрированного в устройство PCI 6071E счётчика) числом циклов сканирования каналов АЦП. При этом аппаратный подсчёт происходит параллельно с работой АЦП на фоне выполнения основного измерительного цикла. В случае отсутствия совпадения результатов программного и аппаратного подсчёта кадров фиксируется ошибка ввода данных, измерительный цикл, в котором ошибка возникла, прерывается, а результаты его работы отбрасываются. В режиме атмосферных измерений эти элементы контроля не используются. Другим отличием является то, что количество повторных запусков в режиме тестирования неограниченно, в то время как в режиме тестовых измерений измерительные циклы группируются в серии с заданным количеством циклов измерений.

<sup>2</sup> При этом АЦП автономно выполняет работу по сбору данных от сектора `sector`.

Вместе с тем в режиме тестовых измерений происходит запоминание данных от АЦП и от параллельного порта с целью их последующей визуализации. Для этого организованы дополнительные относительно небольшого размера буферы, в которых сохраняются данные, принимаемые от всех 32-х каналов АЦП, и данные от параллельного порта, в которых содержится код положения секторов обтюлятора. В атмосферных измерениях эти контрольные средства также не используются.

#### **Выводы**

Основным результатом представленной здесь работы, явилось создание программного обеспечения для управляющей ЭВМ (ПК) спектрометрического 3-мм диапазона длин волн, используемого в настоящее время в исследованиях озонового слоя атмосферы Земли. Программа обработки работает в среде ОС Windows совместно с многофункциональным устройством PCI 6071E и позволяет при наличии высокоскоростного антенного обтюлятора в реальном масштабе времени выполнять последетекторную обработку данных по всем 32-м каналам

радиометра при частоте дискретизации до 25 кГц. Разработка системы велась с привлечением средств высокоуровневого программирования, включая разработанные производителем устройства PCI 6071E функции ввода данных с учётом специфики работы в среде многозадачной ОС, основной функцией которой является распределение ресурсов управляющей ЭВМ. Связанные с этим проблемы реального времени были разрешены введением средств контроля за ходом измерительного процесса и отбраковки данных при обнаружении ошибок их временной селекции.

**Работа выполнена в рамках проекта KR-634 по МНТЦ.**

#### *Список литературы*

1. Шкелев, Е.И. // Приборы и техника эксперимента / Е.И. Шкелев, А.Г. Кисляков, Д.В. Савельев. – 1995. – № 6. – С. 132.
2. Шкелев, Е.И. // Приборы и техника эксперимента / Е.И. Шкелев, И.П. Ястребов, А.О. Шулешов. – 2002. – № 4. – С. 92.
3. Кисляков, А.Г. // Радиотехника и электроника / А.Г. Кисляков, Д.В. Савельев, Е.И. Шкелев, В.Л. Вакс. – 1998. – Т. 43, № 6. – С. 668.

### **DATA ACQUISITION AND PROCESSING SYSTEM FOR THE SPECTRAL RADIOMETER OF THE MILLIMETER WAVE BAND**

*V.I. Nosov, E.I. Shkelev*

The data acquisition and data handling firmware for the microwave radiometer with a multichannel filtering spectral analyzer is considered. This radiometer is designed for atmospheric ozone monitoring by measuring the absorption at the frequency of one of rotational spectral lines in ozone molecules (110836 MHz). The radiometer's unique feature consists in the fully digital real time postdetection signal processing at the sampling frequency up to 25 kHz for each of 32 radiometer channels.