

А.П. Ростов

Двухканальный контроллер когерентного доплеровского ветрового лидара с управлением через Интернет

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 25.01.2005 г.

Разработаны двухканальный контроллер доплеровского ветрового лидара и его системное программное обеспечение с возможностью управления им через Интернет.

Введение

Начиная с 1970 г. доплеровские лидары находят все более широкое применение в атмосферных исследованиях и, в частности, в изучении пограничного слоя атмосферы [1–7]. В последние годы были выполнены исследования репрезентативности измерений скорости ветра когерентными доплеровскими лидарами и разработаны методы измерения параметров атмосферной турбулентности из оценок скорости ветра когерентными лидарами с непрерывным и импульсным излучением. Детальные теоретические и экспериментальные исследования эффективности использования когерентных ветровых лидаров в атмосферных приложениях выполнены в работах [8–25]. В этом же направлении получен

ряд результатов в рамках сотрудничества Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН и Института физики атмосферы (ИФА) Немецкого авиакосмического центра (Оберпфaffenхофен, Германия) [26–37]. Как дальнейшее развитие сотрудничества возникла идея создания когерентного доплеровского ветрового лидара в ИОА на основе оптических элементов лидара ADOLAR [38], разработанного в ИФА в конце 80-х гг.

В конце 2002 г. оптические элементы макета лидара ADOLAR с лазерным источником непрерывного излучения фирмы Ferranti были переданы в ИОА, и в течение последующего времени макет был доукомплектован недостающей оптикой и приемопередающим телескопом разработки ИОА. Макет лидара показан на рис. 1.

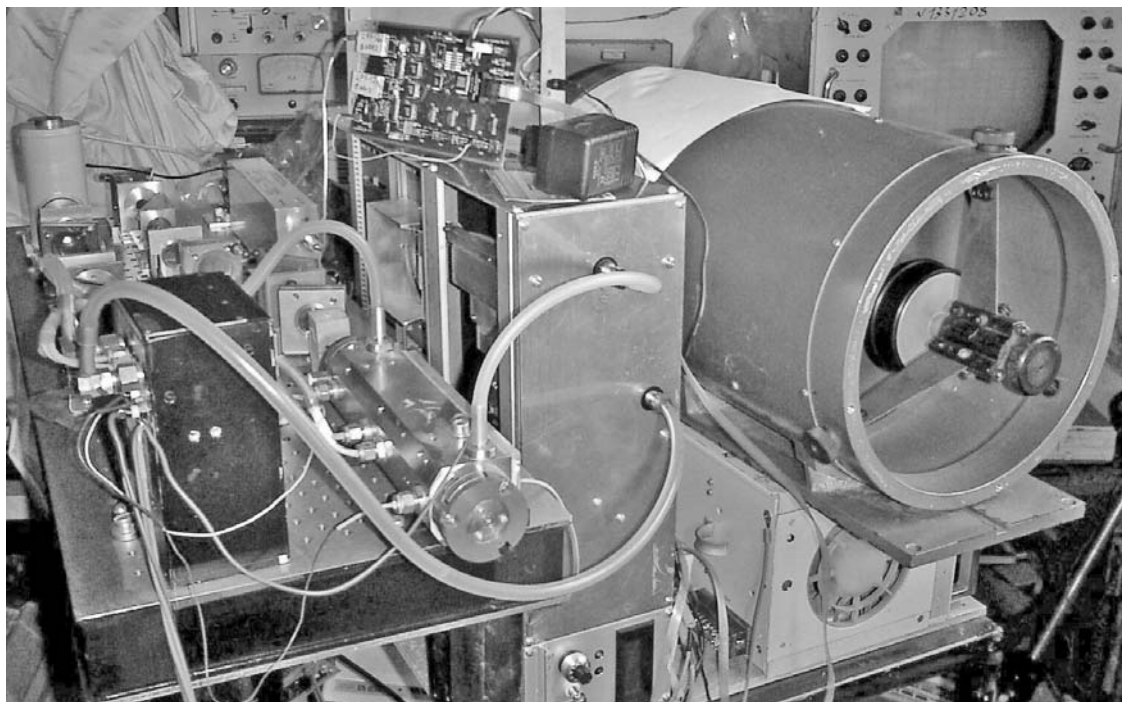


Рис. 1. Доплеровский ветровой лидар

Дополнительно необходимо было разработать контроллер для сбора и регистрации информации, а также управления оптико-механическим трактом.

Автором на протяжении последних 20 лет было разработано более десяти контроллеров для лидаров различного назначения. Идея создать аналогичное устройство для доплеровского лидара, которое могло бы автономно работать при управлении из любой точки земного шара, была заманчива. В статье дано описание такого устройства, разработанного с новым интерфейсом управления и на более современной элементной базе, чем использовавшаяся в предыдущих разработках.

Описание структурной схемы

Традиционно в структуру контроллеров аэрозольных лидаров входят: АЦП (аналого-цифровой преобразователь), ОЗУ (оперативное запоминающее устройство), логика управления и синхронизации, кварцевый генератор — источник стабильных временных интервалов, контроллер того или иного интерфейса передачи данных в ПК. Некоторые модели содержат дополнительно устройства контроля сервомеханизмами лидара и контроля параметров лазера [39].

Взяв за основу такое традиционное построение контроллера, решено было дополнительно оснастить его таким интерфейсом, который бы позволил дистанционно управлять режимами работы лидара. Для этих целей наиболее всего подходил интерфейс Ethernet.

Он имеет гальваническую развязку до 2 кВ, что немаловажно для работы в сложных условиях электромагнитных полей. Длина сегмента может достигать 150 м в случае использования недорогого кабеля витых пар категории 3. Это достаточно большое расстояние. Например, лидар, оснащенный таким контроллером, можно установить на достаточно высокой и необслуживаемой башне.

Динамический диапазон эхосигнала доплеровских лидаров не превышает 70 дБ. Поэтому для его преобразования в цифровую форму достаточно 12-разрядного АЦП.

Известно, что частота доплеровского сдвига, отраженного от объекта лазерного излучения, зависит от скорости этого объекта:

$$f_d = 2V/\lambda,$$

где V — скорость объекта; λ — длина волны лазерного излучения.

Простой расчет показывает, что частотный диапазон регистрируемого сигнала у доплеровских лидаров, работающих с непрерывным CO_2 -лазером на длине волны 10,6 мкм, при скорости ветра от 0 до 80 м/с лежит в диапазоне от 0 до 15 МГц. Учитывая, что при расчете скорости ветра из доплеровского эхосигнала будет использоваться частотный анализ, частоту дискретизации нам необходимо, как минимум, удвоить. Значит, для нашего контроллера вполне достаточно 12-разрядного АЦП с частотой преобразования более 30 МГц.

Учитывая, что разрабатываемый контроллер может применяться для аэрозольных лидаров другого назначения, в контроллер было заложено свойство замены АЦП на более быстрый и точный. Для этого в разработке вместо простого кварцевого генератора был применен интегральный цифровой умножитель частоты с встроенным кварцевым генератором. Это позволило менять тактирующую частоту АЦП от 4 до 80 МГц.

Также применена быстрая, до 10 нс, FIFO (First Input First Output)-память с 16-разрядным входом-выходом [40]. Общий объем памяти может достигать до 32 Кбайт на каждый канал и определяется только чипом FIFO-памяти этого типа-размера.

Для управления компонентами контроллера нужен был быстрый процессор, который бы обеспечивал передачу данных с FIFO-памяти в контроллер Ethernet интерфейса с максимальной скоростью, а также оперативное управление сервомеханизмами лидара и его компонентами. Такими как лазер и система его охлаждения.

В предыдущих разработках успешно применялись современные RISC-микроконтроллеры (Reduced Instruction Set Computer) компании ATMEL [41]. Это надежные и быстрые процессоры. Наиболее подходящей и недорогой кандидатурой оказался микроконтроллер ATmega-16, выпущенный в 2003 г. на рынок микроконтроллеров. Это 8-разрядные микроконтроллеры с Flash-памятью емкостью 16 Кбайт. AVR-ядро этого микроконтроллера базируется на усовершенствованной RISC-архитектуре, с регистровым файлом быстрого доступа, содержащим 32 регистра общего назначения, непосредственно связанных с арифметико-логическим устройством (ALU), и мощной системой команд. За один тактовый цикл из регистрового файла извлекаются два операнда, выполняется команда и результат записывается в регистр назначения. Такая высокоэффективная архитектура обеспечивает производительность почти в десять раз большую, чем стандартные CISC-микроконтроллеры.

Он имеет набор из 131 команды, большинство которых выполняется за один машинный цикл. Емкость внутрисистемной программируемой Flash-памяти 16 Кбайт, 1000 циклов стирания/записи, SPI-интерфейс для внутрисистемного программирования. Емкость встроенной EEPROM 512 байт, 100000 циклов стирания/записи. Есть также встроенная RAM емкостью 1 Кбайт, 32 8-разрядных регистра общего назначения, набор регистров управления периферией, 32 программируемые линии I/O, программируемые последовательные UART и SPI-интерфейсы. Диапазон напряжений питания от 2,7 до 6,0 В, а диапазон тактовых частот от 0 до 16 МГц. При этом обеспечивается производительность до 16 MIPS при частоте 16 МГц. Для получения временных интервалов и организации аналогового выхода есть два 8-разрядных таймера/счетчика с отдельным предделителем и широтно-импульсным модулятором (ШИМ) с разрядностью 8, 9 или 10 разрядов. Надежность работы программы обеспечивается программируемым сто-

рожевым таймером с встроенным генератором. Для приема аналоговых сигналов имеется аналоговый компаратор и 8-канальный 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь.

Далее для нашего прибора нужно было выбрать Ethernet-контроллер. Тут не очень большой выбор. В основном все контроллеры предназначены работать с ISA-16 и PCI шинами ПК. Совсем недавно появились 10/100 Мбит/с чипы с интерфейсом МII (Media Independent Interface). Однако для их обслуживания нужны процессоры на порядок быстрее, что довольно ощутимо увеличило бы стоимость. Компания CRYSTALL еще 5 лет назад выпустила на рынок интересный Ethernet-контроллер CS8900A [42]. Небольшие размеры чипа и встроенные в чип схемы фильтрации позволяют сэкономить место на печатной плате готового устройства. Все эти свойства чипа позволяют создать конкурентоспособное техническое решение в области высокопроизводительной Ethernet-коммуникации. Он имеет свойство работать с 8-разрядной шиной, что очень удобно для применения в автономных микропроцессорных системах.

Управление чипом CS8900A в 8-разрядном режиме работы осуществляется через его восемь 16-разрядных портов.

Смещение	Тип	Название
0000h	Чтение/Запись	Receive/Transmit Data (Port0)
0002h	Чтение/Запись	Receive/Transmit Data (Port1)
0004h	Запись	TxCMD (Transmit Command)
0006h	Запись	TxLength (Transmit Length)
0008h	Только чтение	Interrupt Status Queue
000Ah	Чтение/Запись	PacketPage Pointer
000Ch	Чтение/Запись	PacketPage Data (Port 0)
000Eh	Чтение/Запись	PacketPage Data (Port 1)

В системах, не использующих шину ISA, эти адреса обычно отображаются в область памяти данных системы. При этом надо учитывать, что программный драйвер должен читать или записывать оба байта данных/адреса при доступе к любому 16-разрядному регистру CS8900A.

С учетом вышеизложенного была разработана структурная схема контроллера (рис. 2).

Порт В контроллера используется как двунаправленная 8-разрядная шина данных. Младшие биты порта А (PA0-PA3) задействованы в управлении режимами записи/чтения и обслуживания прерываний от Ethernet-контроллера. Четыре младших бита порта В работают как однонаправленная адресная шина, а старшие используются для управления режимом чтения чипами FIFO-памяти.

Необходимым условием при преобразовании аналоговых, зашумленных сигналов в цифровую форму является применение фильтров нижних частот (ФНЧ) на входе АЦП [43]. Поскольку мы имеем дело с достаточно высокими частотами, то применение активных фильтров невозможно по причине их низкого быстродействия. Специально для доплеровского лидара, где частота тактирования АЦП равна 32 МГц, были разработаны и изготовлены пассивные ФНЧ 6-го порядка с частотами среза 15 МГц.

Работа контроллера поддерживается встроенным программным обеспечением. Оно содержит три основных модуля. Первый обеспечивает обмен информацией с контроллером через Интернет и поддерживает три протокола, необходимых для работы в этой сети Address Resolution Protocol (ARP), Internet Control Message Protocol (ICMP) и User Datagram Protocol (UDP) [44]. Также этот модуль конфигурирует Ethernet-чип в момент включения прибора.

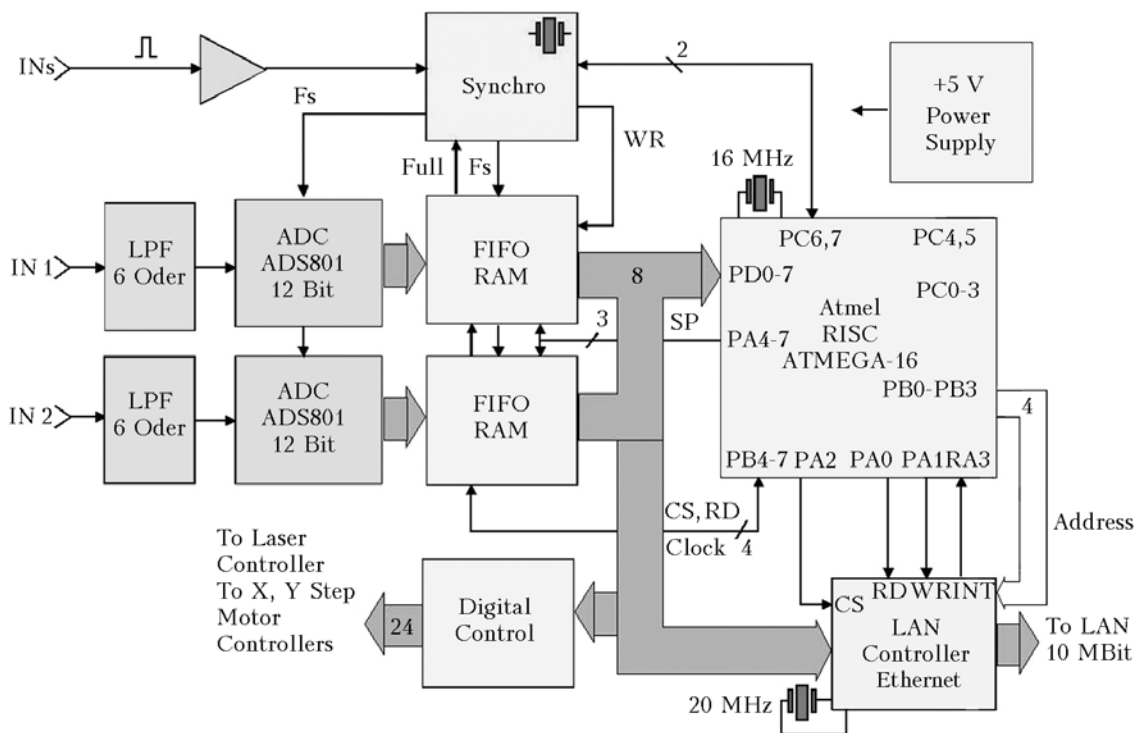


Рис. 2. Структурная схема контроллера

Адрес прибора в Интернет-сети или, по-другому, Medium Access Control (MAC)-адрес, и IP-адрес присваиваются контроллеру в момент программирования внутреннего ПЗУ микроконтроллера. MAC-адрес – это уникальное число длиной 48 бит, которое присваивается сетевому прибору производителем. IP-адрес – это 4-байтовый адрес прибора в конкретном сегменте сети Интернета.

Для ускорения обработки прерываний Ethernet-контроллера CS8900A его запрос подключен непосредственно к 3-му входу порта A микроконтроллера, а не на вход приема прерываний. Это дает вы-

игрыш во времени обработки прерывания порядка 374 нс на каждом запросе, плюс мы имеем полный контроль этого запроса, что очень важно для организации работы всего прибора в реальном времени.

Второй программный блок предназначен для управления процессом оцифровки входных эхосигналов и передачи полученного массива данных из FIFO-памяти в выходной буфер.

Третий блок – это диалог с пользователем. Контроллер поддерживает 13 рабочих и 3 служебные команды. Список и действие представлены в таблице.

№ команды	Команда	Hex-код команды	Комментарии
1	Разрешить синхронный запуск АЦП	0x0D	Разрешает запуск процесса оцифровки двух каналов от внешнего импульса
2	Запретить синхронный запуск АЦП	0x0E	Запрещает запуск процесса оцифровки
3	Установить IP соединение (рукопожатие)	0x55	Контроллер запоминает IP- и MAC-адреса компьютера пользователя
4	Выдать все содержимое FIFO-1 пользователю	0x10	Контроллер формирует многопакетную передачу данных массива данных памяти FIFO-1 пользователю через Интернет по UDP-протоколу
5	Выдать все содержимое FIFO-2 пользователю	0x11	Контроллер формирует многопакетную передачу данных массива данных памяти FIFO-2 пользователю через Интернет по UDP-протоколу
6	Установить счетчик адреса FIFO-памяти в «нуль»	0xB	Контроллер «обнуляет» внутренний счетчик адреса обоих блоков FIFO-памяти
7	Выдать текущий блок данных размером 128 слов (256 байт) из FIFO-1 пользователю	0x0C	Контроллер организует считывание одного текущего блока памяти FIFO-1 и передачу его через Интернет пользователю
8	Выдать текущий блок данных размером 128 слов (256 байт) из FIFO-2 пользователю	0x0A	Контроллер организует считывание одного текущего блока памяти FIFO-2 и передачу его через Интернет пользователю
9	Прочитать байт с адресного пространства микроконтроллера	0x01 + 2 байта адреса	Считывает байт с указанного адреса и передает его через Интернет пользователю
10	Записать байт в адресное пространство микроконтроллера	0x02 + 2 байта адреса + байт данных	Записывает байт по адресу, указанному в команде. Работает через Интернет
11	Прочитать текущий буфер данных	0x24	Считывает и передает через Интернет по UDP-протоколу пользователю буфер обмена
12	Установить привод азимута в исходное положение	0x13	Выдает импульсы шага и напряжение направления на контроллер азимутального шагового двигателя до срабатывания датчика ограничителя поворота
13	Установить привод угла места в исходное положение	0x14	Выдает импульсы шага и напряжение направления на контроллер шагового двигателя угла места до срабатывания датчика ограничителя поворота
14	Установить привод в заданную позицию	0x15	Выдает одновременно определенное количество импульсов и соответствующий уровень сигнала направления на контроллеры приводов углов места и азимута
15	Включить сканирование зеркала развертки	0x16	Выдает разрешение на запуск двигателя вращения зеркала развертки оптического канала лидара
16	Выключить сканирование зеркала развертки	0x17	Выдает команду останова двигателя вращения зеркала развертки оптического канала лидара

Это основные команды. Объем ПЗУ контроллера позволяет увеличить их для требуемого количества уже конкретной реализации лидара.

Конструкция контроллера

Учитывая, что в контроллере есть достаточно высокочастотные устройства (до 80 МГц), с целью уменьшения наводок цифровой части контроллера на аналоговую, решено было разработать 4-слойную печатную плату (ПП), в которой внутренние прово-

Летом 2004 г. контроллер был установлен в доплеровский лидар, на котором был сделан ряд измерений скорости ветра. Работа контроллера была устойчивой. Фрагмент доплеровской частоты принятого сигнала показан на рис. 6.

На рис. 7 показан спектр мощности этого сигнала. После небольшого вычисления, основанного на сглаживании спектра и нахождении его максимума, получен временной ряд продольного к оптической трассе скорости ветра из точки фокуса лидара ($L_f = 100$ м) (рис. 8).

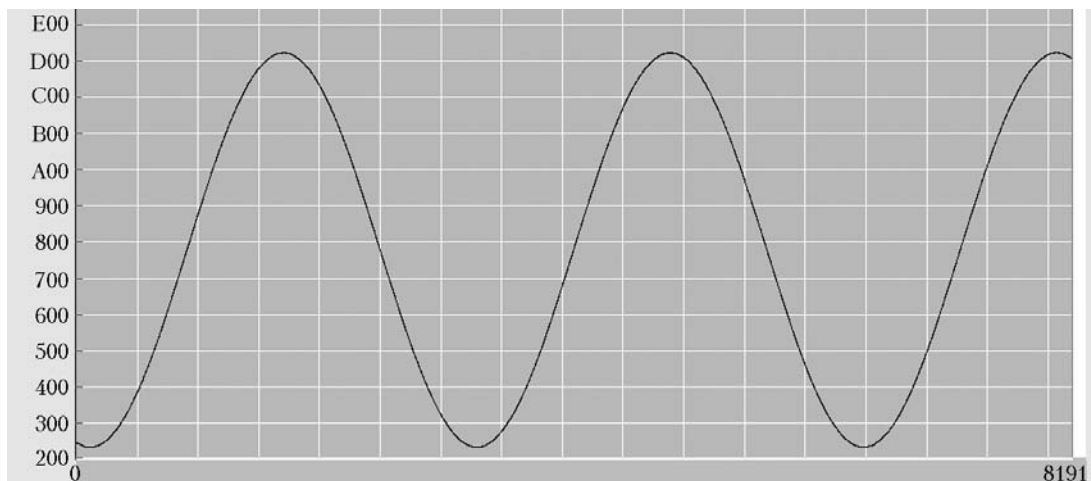


Рис. 3. Результат оцифровки синусоидального напряжения большой амплитуды

дящие слои были бы сплошными и служили бы одновременно шиной разводки питания. Испытания контроллера показали верность этого решения.

Блокировочные конденсаторы были равномерно размещены по всей площади ПП, что также понизило уровень излучения шин питания контроллера. В итоге получилось довольно компактное устройство размерами 220x100x30 мм.

Испытания контроллера

Контроллер был испытан на точность, стабильность, надежность работы. Также были проведены климатические испытания. На входы контроллера были поданы синусоидальные напряжения с генератора Г4-146 частотой 500 кГц и уровнем, чтобы работали все разряды АЦП. Полученные данные показаны на рис. 3. Видимые искажения сигнала не заметны.

Для более точного определения уровня искажений проводился спектральный анализ с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Результат показан на рис. 4, где хорошо видно, что уровень гармоник не превышает 70 дБ.

Для проверки собственных шумов контроллера на вход подавался синусоидальный сигнал малой амплитуды. Его цифровое представление показано на рис. 5. Отчетливо видно, что собственные шумы контроллера не превышают младшего разряда.

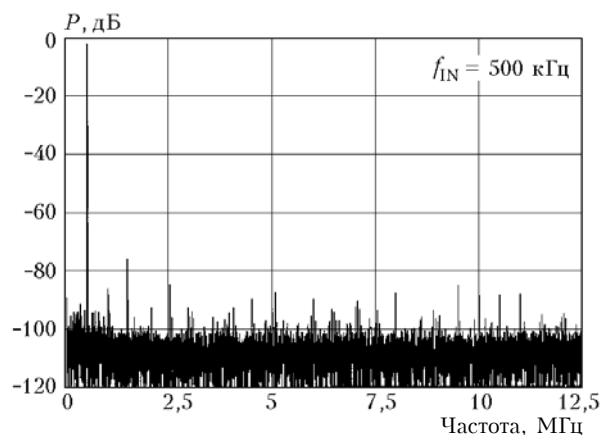


Рис. 4. Спектральный состав сигнала оцифровки контроллера синусоидального сигнала большой амплитуды и частотой 500 кГц



Рис. 5. Результат оцифровки синусоидального напряжения малой амплитуды

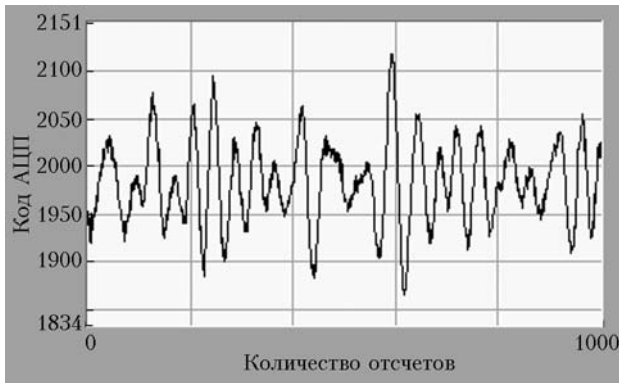


Рис. 6

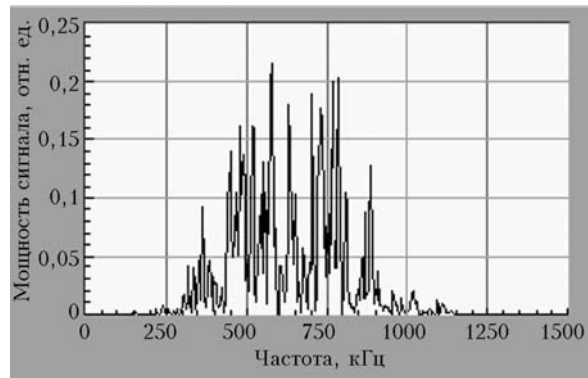


Рис. 7

Рис. 6. Сигнал доплеровской частоты 10,6 мкм CO₂-лазера

Рис. 7. Спектр мощности доплеровской частоты 10,6 мкм CO₂-лазера, скорость ветра порядка 3 м/с

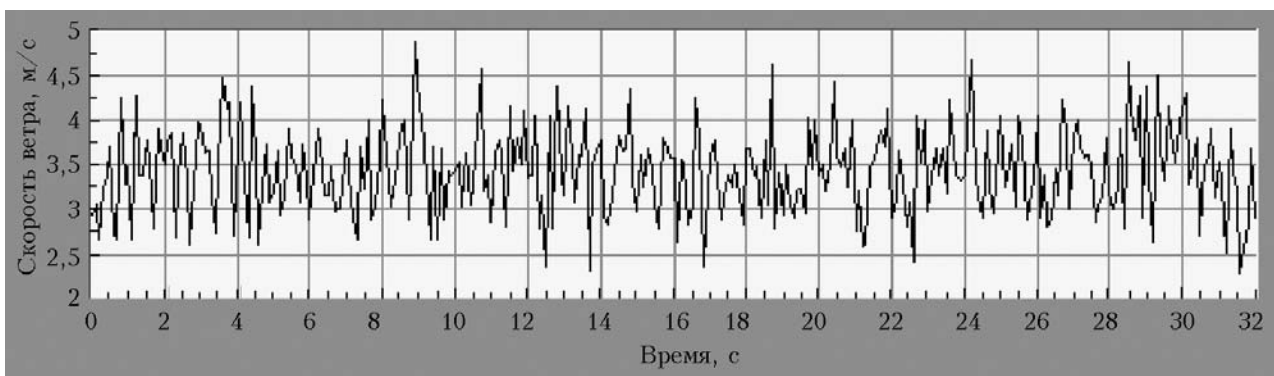


Рис. 8. Временной ряд скорости ветра, вычисленный из данных доплеровского лидара

Заключение

Разработанный контроллер имеет все необходимые свойства и функции для работы в составе как доплеровского когерентного лидара, так и любого другого аэрозольного лидара. Его первая апробация показала достаточно устойчивое управление прибором через интерфейс Ethernet как по локальной сети, так и через Интернет.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 03-05-64194).

- Henderson S.W., Sumi P.J.M., Hale C.P., Hannon S.M., Magee J.R., Bruns D.L., Yuen E.H. Coherent laser radar at 2.1 μm using solid-state lasers // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1993. V. 31. P. 4–15.
- Clifford S.F., Kaimal J.C., Lataitis R.J., Strauch R.G. Ground-based remote profiling in atmospheric studies: An over-view // Proc. IEEE. 1994. V. 82. P. 313–355.
- Huffaker M.R., and Hardesty R.M. Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid-state and CO₂ coherent laser systems // Proc. IEEE. 1996. V. 84. P. 181–204.
- Vaughan J.M., Steinvall O., Werner C., Flamant P.H. Coherent laser radar in Europe // Proc. IEEE. 1996. V. 84. P. 205–226.
- Wilczak J.M., Gossard E.E., Neff W.D., Eberhard W.L. Ground-based remote sensing of the atmospheric boundary layer: 25 years of progress // Boundary-Layer Meteorol. 1996. V. 78. P. 321–349.
- Werner Ch., Flamant P.H., Reitebuch O., Kopp F., Streicher J., Rahm S., Nagel E., Klier M., Herrmann H., Loth C., Delville P., Drobinski Ph., Romand B., Boitel Ch., Oh D., Lopez M., Meissonnier M., Brunneau D., Dabas A. Wind infrared Doppler lidar instrument // Opt. Eng. 2001. V. 40. P. 115–125.
- Reitebuch O., Werner Ch., Leike I., Delville P., Flamant P., Cress A., Engelbart D. Experimental validation of wind profiling performed by the airborne 10 μm-heterodyne Doppler lidar WIND // J. Atmos. Ocean. Technol. 2001. V. 18. P. 1331–1344.
- Frehlich R., Hannon S., Henderson S. Coherent Doppler lidar measurements of winds in the weak signal regime // Appl. Opt. 1997. V. 36. P. 3491–3499.
- Frehlich R., Hannon S., Henderson S. Coherent Doppler lidar measurements of wind field statistics // Boundary-Layer Meteorol. 1998. V. 86. P. 233–256.
- Drobinski Ph., Dabas A., Flamant P.H. Remote measurement of turbulent wind spectra by heterodyne Doppler lidar technique // J. Appl. Meteorol. 2000. V. 39. P. 2434–2451.
- Drobinski P., et al. Turbulence in a shear-driven nocturnal surface layer as observed by Doppler lidar, rawinsondes and sonic anemometer during the CASES'99

- experiment. Lidar remote sensing in atmospheric and earth sciences // Reviewed and revised papers presented at the twenty-first International Laser Radar Conference (ILRC21), Quebec, Canada, 8–12 July 2002. L.R. Bissonnette, G. Roy, G. Vallee, Editors. 2002. P. 853–856.
12. Reitebuch O., Volkert H., Werner Ch., Dabas A., Delville P., Drobinski Ph., Flamant P.H., Richard E. Determination of air flow across the Alpine ridge by a combination of airborne Doppler lidar, routine radiosounding and numerical simulation // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2003. V. 129. P. 715–728.
 13. Davies F., Collier G.G., Pearson G.N., Bozier K.E., Doppler lidar measurements of turbulent structure function over an urban area // J. Atmos. Ocean. Technol. 2004. V. 21. P. 753–761.
 14. Frehlich R.G. and Kavaya M.J. Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence // Appl. Opt. 1991. V. 30. N 36. P. 5325–5352.
 15. Frehlich R.G. Doppler lidar signal covariance including wind shear and wind turbulence // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 27. P. 6472–6481.
 16. Frehlich R.G., Yadlowsky M.J. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar // J. Atmos. Ocean. Technol. 1994. V. 11. P. 1217–1230.
 17. Frehlich R.G., Hannon S.M., Henderson S.W. Performance of a 2 μm coherent Doppler lidar for wind measurement // J. Atmos. Ocean. Technol. 1994. V. 11. N 6. P. 1517–1528.
 18. Frehlich R.G. Simulation of coherent Doppler lidar performance in the weak signal regime // J. Atmos. Ocean. Technol. 1996. V. 13. P. 646–658.
 19. Frehlich R.G. Effects of wind turbulence on coherent Doppler lidar performance // J. Atmos. Ocean. Technol. 1997. V. 14. P. 54–75.
 20. Frehlich R.G., Cornman L. Coherent Doppler lidar signal spectrum with wind turbulence // Appl. Opt. 1999. V. 38. N 36. P. 7456–7466.
 21. Frehlich R.G. Simulation of coherent Doppler lidar performance for space-based platforms // J. Appl. Meteorol. 2000. V. 39. P. 245–262.
 22. Frehlich R.G. Errors for space-based Doppler lidar wind measurements: Definition, performance, and verification // J. Atmos. Ocean. Technol. 2001. V. 18. P. 1749–1772.
 23. Frehlich R.G., Cornman L. Estimating spatial velocity statistics with coherent Doppler lidar // J. Atmos. Ocean. Technol. 2002. V. 19. P. 355–366.
 24. Frehlich R.G. Performance of coherent Doppler lidar velocity estimates with pulse accumulation // Proc. of 12-th Coherent Laser Radar Conference. Bar Harbor Maine, US. 2003. P. 139–142.
 25. Frehlich R.G. Velocity error for coherent Doppler lidar with pulse accumulation // J. Atmos. Ocean. Technol. 2004. V. 21. P. 905–920.
 26. Banakh V.A., Kopp F., Werner Ch., and Smalikho I.N. Measurement of turbulent energy dissipation rate with a CW Doppler lidar in the atmospheric boundary layer // J. Atmos. Ocean. Technol. 1999. V. 16. N 8. P. 1044–1061.
 27. Banakh V.A., Smalikho I.N. Determination of the turbulent energy dissipation rate from lidar sensing data // Atmos. Ocean. Opt. 1997. V. 10. N 4–5. P. 295–302.
 28. Banakh V.A., Werner Ch., Kopp F., Smalikho I.N. Measurement of the turbulent energy dissipation rate with a scanning Doppler lidar // Atmos. Ocean. Opt. 1996. V. 9. N 10. P. 849–853.
 29. Banakh V.A., Smalikho I.N., Kopp F. and Werner Ch. Representativity of the wind measurements by a CW Doppler lidar in the atmospheric boundary layer // Appl. Opt. 1995. V. 34. N 12. P. 2055–2067.
 30. Banakh V.A., Smalikho I.N. Estimation of the turbulence energy dissipation rate from the pulsed Doppler lidar data // Atmos. Ocean. Opt. 1997. V. 10. N 12. P. 957–965.
 31. Leike I., Streicher J., Werner Ch., Banakh V.A., Smalikho I.N., Wergen W., Cress A. Virtual Doppler Lidar Instrument // J. Atmos. Ocean. Technol. 2001. V. 18. P. 1447–1456.
 32. Banakh V.A., Smalikho I.N., Werner Ch. Effect of aerosol particle microstructure on statistics of CW Doppler lidar signal // Appl. Opt. 2000. V. 39. N 33. P. 5393–5402.
 33. Banakh V.A., Smalikho I.N., Werner Ch. Numerical simulation of effect of refractive turbulence on the statistics of a coherent lidar return in the atmosphere // Appl. Opt. 2000. V. 39. N 33. P. 5403–5414.
 34. Смалыхо И.Н., Банах В.А., Копп Ф., Вернер Х. Лидарные измерения среднего ветра // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 8. P. 672–679.
 35. Банах В.А., Фалиц А.В. Оценивание параметров атмосферной турбулентности из измерений скорости ветра импульсным когерентным CO₂ доплеровским лидаром // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 297–305.
 36. Вернер Х., Штрайхер Й., Райтебух О., Назель Е., Шнайдерхан Т., Кёниг Т., Ленер С., Банах В.А., Фалиц А.В., Дабас А., Делвиль П. Измерения скорости ветра и турбулентности над поверхностью моря доплеровским лидаром и радаром с синтезированной апертурой // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 8. С. 642–650.
 37. Banakh V.A., Werner Ch. Computer Simulation of coherent Doppler lidar measurement of wind velocity and retrieval of turbulent wind statistics // Opt. Eng. 2005 (в печати).
 38. Rahm S. Airborne cw Doppler Lidar – ADOLAR: Coherent Laser Radar Conference. Technical Digest Series. 1995. V. 19. P. 130–133.
 39. Гришин А.И., Матвиенко Г.Г. Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 47–53.
 40. www.idt.com
 41. www.atmel.com
 42. www.cirrus.com
 43. Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
 44. Postel J. (ed.). Internet Protocol – DARPA Internet Program Protocol Specification. RFC 791, USC/ Information Sciences Institute, September 1981.

A.P. Rostov. Two-channel controller of Internet-controllable Wind Doppler lidar.

The controller of Wind Doppler Lidar and it's system software for control from Internet is developed.