

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 004.772+551.501.755

**БОРТОВАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

© 2019 г. В. В. Волков^{а,*}, Г. Э. Колокутин^а, М. А. Струнин^а, Н. В. Базанин^а

^а Центральная аэрологическая обсерватория
Россия, 141700, Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3

*e-mail: volkov-vv@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2018 г.

После доработки 17.08.2018 г.

Принята к публикации 13.09.2018 г.

Описана бортовая система сбора данных для самолета-лаборатории нового поколения Як-42Д “Росгидромет”, предназначенного для исследования атмосферы и подстилающей поверхности. Наличие большого количества разнообразного научного оборудования, установленного на его борту, потребовало решения задач сбора, синхронизации, передачи и сохранения данных самолетных наблюдений. Приведено описание разработанного бортового измерительно-вычислительного комплекса, локальной вычислительной сети, представлено решение задач синхронизации данных высокочастотных измерений. Показаны возможности использования локальной сети для интеграции измерительных систем на борту самолета-лаборатории. Представленные в статье принципы организации единой системы сбора данных могут быть использованы для построения измерительных систем мобильных лабораторий любого класса.

DOI: 10.1134/S0032816219020332

ВВЕДЕНИЕ

Самолеты-лаборатории являются эффективным инструментом для исследования пространственных неоднородностей полей ветра, температуры, потоков радиации в атмосфере, микрофизических параметров облачности и других физических параметров атмосферы. Кроме того, самолет-лаборатория обеспечивает изучение атмосферы и поверхности в труднодоступных районах, где полностью отсутствуют другие средства наблюдения. В 2013 г. на базе пассажирского самолета Як-42Д был создан многофункциональный самолет-лаборатория, получивший наименование Як-42Д “Росгидромет”. Самолет-лаборатория создавался Экспериментальным машиностроительным заводом им. В.М. Мясищева по заказу и при участии организаций Росгидромета (Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО), Главной геофизической обсерватории, НПО “Тайфун”).

С начала мая 2014 г. самолет-лаборатория стал использоваться для регулярных исследований атмосферы и подстилающей поверхности. С его помощью были выполнены исследования атмосферы в Московском регионе, проведен цикл измерений в Арктическом регионе, осуществлена валидация сети наземных доплеровских радиолокаторов. Самолет-лаборатория неоднократно участвовал в на-

учно-производственных работах по активным воздействиям. Всего к июлю 2018 г. было выполнено более 110 исследовательских полетов с общим налетом более 360 летных часов, накоплены материалы наблюдений и создан архив данных, который послужил основой ряда исследований.

В состав измерительной системы самолета-лаборатории Як-42Д “Росгидромет” входят аппаратно-программные комплексы (АПК), которые объединяют работу более 60-ти измерительных приборов, датчиков и систем, предназначенных для контактного и дистанционного исследования атмосферы [1]. Получаемая информация имеет различные форматы и протоколы передачи данных, различается также и частота поступления данных на бортовые накопители.

Для регистрации и синхронизации измеренных параметров атмосферы было необходимо создать надежную бортовую систему сбора данных, объединяющую аппаратно-программные комплексы с помощью локальной вычислительной сети в единую информационную систему. Настоящая статья посвящена решению задач сбора, синхронизации и использования данных летных экспериментов.



Рис. 1. Принципиальная схема б.и.в.к. самолета-лаборатории Як-42Д "Росгидромет".

БОРТОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Бортовой измерительно-вычислительный комплекс (б.и.в.к.) самолета-лаборатории состоит из семи АПК, которые решают следующие задачи [2]:

- измерение термодинамических параметров атмосферы и навигационных параметров полета самолета-лаборатории (АПК₁);
- измерение газового состава атмосферы (АПК₂);
- измерение радиационных процессов в атмосфере (АПК₃);
- измерение радиоактивных загрязнений атмосферы и подстилающей поверхности (АПК₄);
- исследования микрофизической структуры облаков и аэрозольного состава атмосферы (АПК₅);
- измерение радиолокационной отражаемости облаков (АПК₆);
- измерение электрических параметров атмосферы (АПК₇).

Приборы, входящие в состав комплексов, имеют различные аналоговые и цифровые протоколы передачи данных – интерфейсы RS232, RS485, Arinc-429 с частотой измеряемых параметров от 0.1 до 40 Гц. Все приборы, датчики и измерительные системы подключены к компьютерам, объединенным локальной вычислительной сетью в единый бортовой измерительно-вычислительный ком-

плекс, который регистрирует всю полученную информацию.

В состав оборудования б.и.в.к. входят все компьютеры АПК, сетевое оборудование самолета, серверное оборудование, система обмена данными по радиоканалу (система диспетчеризации) и спутниковый канал связи. Принципиальная схема б.и.в.к. приведена на рис. 1.

Для обеспечения оперативной передачи данных эксперимента в наземный центр из любой точки мира, а также для организации сеансов голосовой связи и обмена текстовыми сообщениями на самолете установлена бортовая система спутниковой связи Inmarsat "ТТ Aero-SB LITE", обеспечивающая скорость передачи информации до 256 Кбит/с. Цифровой канал обмена данными между самолетом и наземным центром, а также телефонное соединение по спутниковому каналу организованы с помощью маршрутизаторов Cisco 2811.

Система диспетчеризации обеспечивает проведение производственных и научных работ с участием нескольких самолетов. Она передает данные летного эксперимента в наземный центр и принимает на борт данные наземных радиолокаторов. Система работает в ультракоротковолновом (у.к.в.) диапазоне и предназначена для осуществления работ в радиусе до 300 км.

ЛОКАЛЬНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ

Локальная вычислительная сеть (л.в.с.) обеспечивает обмен данными между измерительными комплексами. Компьютеры комплексов соединены в сеть экранированными кабелями Ethernet шестой категории. Сеть Ethernet позволяет использовать на борту стандартное сетевое оборудование и обеспечивает гибкое и надежное подключение новых компьютеров к б.и.в.к.

Соединение компьютеров осуществляется через сетевые адаптеры Ethernet 10/100/1000 Мбит/с, входящие в состав компьютеров АПК, сетевые промышленные коммутаторы EDS-316-M-SC-T фирмы MOXA, а также коммутаторы Cisco Catalyst 2955 и Cisco SG300-10P.

Управление сетевыми ресурсами осуществляется программой Cisco Network Assistant. Она решает многочисленные задачи по управлению: определяет загрузку сетевых устройств, состояние портов, настройку и статистику по сбоем и объему переданных кадров. Данные по статистике, собранные этой программой, показали, что при фактической загрузке гигабитных портов коммутаторов на 10% передача данных происходит без сбоев и потери кадров.

Б.и.в.к., интегрированный в локальную сеть, позволяет:

- синхронизировать данные по единому серверу времени;
- сохранять результаты измерений в самолетном архиве в виде базы данных (б.д.);
- отображать текущие данные в виде таблиц и графиков в режиме реального времени;
- использовать навигационные данные для построения карты полета на борту;
- объединять данные для передачи на землю через спутниковую систему;
- подключить устройства беспроводной передачи данных.

На всех компьютерах используется программа удаленного подключения UltraViewer, которая дает возможность управлять любым АПК с любой консоли, установленной на борту или на земле. Разработанное в ЦАО серверное программное обеспечение передает по локальной сети широковещательные послышки (UDP), в которых содержатся навигационные данные полета (время, координаты, высота, скорость, углы положения самолета и др.) и текущие данные о состоянии атмосферы (температура, влажность воздуха, скорость и направление ветра и др.). Эти данные выводятся на экраны АПК в формате, удобном для чтения. На экраны АПК могут выводиться географические карты с нанесенной линией маршрута полета, карты радиолокационной отражаемости облаков, полученные по данным бортовых радио-

локаторов и переданные с наземных пунктов управления экспериментами.

В состав л.в.с. самолета введен беспроводной коммутатор сети WiFi, что позволило подключить к локальной сети портативные устройства, увеличить число рабочих мест операторов, подсоединить дополнительное научное оборудование с минимальным модифицированием приборных стоек. Например, научный руководитель полета в реальном времени может корректировать ход летного эксперимента, находясь в любом удобном для него месте самолета, благодаря выводу необходимой информации на экран портативного устройства.

Цифровой спутниковый канал передачи данных на основе системы Inmarsat объединяет локальную сеть самолета и наземные компьютеры исследовательского центра, что позволяет наземному центру интерактивно участвовать в летном эксперименте.

МЕТОДЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ И МОДЕЛЬ БАЗЫ ДАННЫХ

Существующие методы резервирования и репликации (синхронная и асинхронная репликация данных) не могут обеспечить одновременно сохранность и оперативный доступ к данным. Для решения этой задачи была разработана архитектура, состоящая из распределенной и единой базы данных. Данные одновременно поступают в таблицы как распределенной б.д. (в локальные таблицы каждого АПК), так и единой б.д. на сервере. Такая модель обеспечивает сохранность результатов измерений в случае останова сервера, а использование единой б.д. позволяет синхронизировать эти измерения и организовать вычисления в реальном масштабе времени. Данные в таблицах б.д. обновляются в разных транзакциях, на разных устройствах, что обеспечивает высокую производительность всей системы.

Модель б.д. была построена на основе системы управления базами данных InterBase. Опыт эксплуатации показал высокую надежность работы и быстродействие этой системы. Модель б.д., реализованная в системе сбора данных на самолете, разрабатывалась таким образом, чтобы была возможность подключения новых устройств. В существующей в настоящий момент б.д. измерения каждого прибора записываются в отдельную таблицу. При установке нового прибора или измерительной системы на борт самолета в б.д. достаточно будет добавить новую таблицу без реорганизации самой б.д. Синхронизация результатов измерений, используемых в расчетах в реальном масштабе времени, осуществляется по последним полученным данным. Такое решение равносильно интерполяции нулевого порядка. К сожалению, система

управления б.д. InterBase не позволяет создавать эффективные SQL-запросы для получения последних сохраненных данных. Поэтому б.д. была дополнена циклическими таблицами, назначение которых – хранение последних полученных данных.

СИНХРОНИЗАЦИЯ И ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

Для решения задачи синхронизации и передачи данных все компьютеры на самолете имеют единое время, обеспечиваемое сетевым сервером времени Syncserver s250 фирмы Symmetricom. Это устройство имеет собственный таймер с точностью хода до 1 мс в сутки и имеет встроенный GPS-приемник, обеспечивающий точность хода таймера времени порядка 50 нс. Сервер подключен к л.в.с. и рассылает по ней NTP-сообщения (протокол сетевого времени), осуществляя синхронизацию часов компьютеров с точностью до микросекунд. Результаты измерений приборов регистрируются с одновременной записью текущего времени компьютеров.

Разработанная в ЦАО программа сравнивает время, переданное от сервера к АПК, и время таймера компьютера. Эти данные записываются в файл для контроля синхронизации компьютеров в течение всего летного эксперимента. Анализ контрольных файлов показал, что точность синхронизации компьютеров АПК и сервера находится в диапазоне 1–10 мс. Однако этой точности оказалось недостаточно для некоторых комплексов, поскольку входящие в них приборы регистрируют измерения с частотой до 40 Гц.

В ЦАО был создан трехуровневый метод регистрации данных для сохранения информации на бортовом сервере. Согласно этому методу, последовательно осуществляется прием измерительной информации, организация клиент-серверной связи внутри сети для передачи данных на сервер и запись в базу данных. Первый уровень реализует программное обеспечение, осуществляющее прием данных от измерительных устройств с различными протоколами и интерфейсами и сохранение данных в формате XML (eXtensible Markup Language – расширяемый язык разметки). Этим достигается унификация выходных данных, что позволяет согласовать эти протоколы с производителями программного обеспечения сторонних организаций (НПО “Тайфун” и др.). Например, программа первого уровня АПК₃ создает запросы к логерам Combilog 1022 фирмы Theodor Friedrichs&Co., считывая информацию с аналоговых и цифровых каналов, которые используются для измерительных сигналов актинометрических датчиков и расчетов потоков атмосферной радиации [3]. Второй уровень программного обеспечения – это программа клиента б.д., которая читает XML-файлы и передает данные измерения через

процедуру запроса транзакции записи б.д. Третий уровень программного обеспечения – это система управления базой данных Interbase, которая осуществляет обработку запросов программ-клиентов. Клиент-серверная технология обеспечивает сохранность информации, устойчива к сбоям, масштабируема, снижает нагрузку на сеть, повышает гибкость системы.

Использование трехуровневого метода позволило получить дополнительные преимущества:

- в случае, если произошла остановка б.д. на сервере и данные не были переданы, исходные данные сохраняются на компьютере АПК в XML-файлах, что исключает их потерю и дает возможность в дальнейшем загрузить их в б.д. после восстановления связи;
- данные, сохраненные в XML-файлах, синхронизированы по времени.

СИНХРОНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА КОМПОНЕНТ ВЕТРА

Основные термодинамические параметры атмосферы (температура воздуха, скорость и направление ветра, турбулентность и турбулентные потоки) рассчитываются по данным, измеряемым на борту самолета-лаборатории. Измеряются следующие первичные параметры: полное и статическое давление, индикаторная температура, разность давлений в полусферических насадках, углы положения самолета (курса, крена и тангажа), компонента путевой скорости самолета.

Метод определения истинной температуры воздуха T основывается на известных газодинамических формулах [4]:

$$T = \frac{T_i}{1 + 0.2rM^2}, \quad (1)$$

где T_i – индикаторная (измеренная) температура воздуха; r – коэффициент восстановления датчика температуры. Число Маха M потока определяется по измерениям полного p_0 и статического p давлений с помощью известного газодинамического соотношения:

$$\frac{p_0}{p} = (1 + 0.2M^2)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \quad (2)$$

где показатель адиабаты для воздуха $\kappa = 1.4$.

Истинная воздушная скорость самолета U , мс⁻¹, рассчитывается по формуле

$$U = 20.04M\sqrt{T}. \quad (3)$$

Расчет меридиональной u , зональной v и вертикальной w компонент скорости ветра осуществляется по известным формулам [5]:

Таблица 1. Перечень измерительной аппаратуры и характеристики измеряемых первичных параметров АПК₁

Измерительные приборы	Регистрируемый параметр	Диапазон изменения	Среднеквадратическая погрешность	Интерфейс и частота передачи данных
1. Система глобальной навигации GPS/ГЛОНАСС БПСН-2	Широта места Долгота места Геометрическая высота полета	от 80°N до 80°S от 180°W до 180°E от 0 до 10 км	0.0003° 0.0003° 0.01 км	ARINC-429 10 Гц
2. Инерциальная навигационная система Honeywell Laseref VI	Угол тангажа θ Угол крена φ Угол курса ψ Горизонтальные компоненты путевой скорости W_x и W_y Вертикальная компонента путевой скорости W_z	от -45° до +45° от -90° до +90° от 0 до 360° от -180 до +180 мс ⁻¹ от -15 до +15 мс ⁻¹	0.05° 0.05° 0.2° 0.11 мс ⁻¹ 0.07 мс ⁻¹	ARINC-429 10 Гц
5. Датчик MADT 2016В на подкрыльевой штанге	Барометрическая высота полета Число Маха M	от -350 до 10000 м от 0.1 до 0.8	4 м 0.0025	ARINC-429 10 Гц
6. Блок интерфейсов датчиков БИД-1 на подкрыльевой штанге	Статическое давление p Динамическое давление $q = p_0 - p$ Индикаторная температура воздуха, регистрируемая высокочастотным датчиком температуры Индикаторная температура воздуха, регистрируемая датчиком температуры Rosemount 102СТ2СВ	от 250 до 1050 гПа от 0 до 100 гПа от -70 до +50°С от -70 до +50°С	0.4 гПа 0.2 гПа 0.13°С 0.29°С	RS485 40 Гц

$$u = -U[\cos \alpha \cos \beta \sin \psi \cos \theta + \sin \beta(\cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi) + \sin \alpha(\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi)] + W_x - L(\dot{\theta} \sin \theta \sin \psi - \dot{\psi} \cos \psi \cos \theta); \quad (4)$$

$$v = -U[\cos \alpha \cos \beta \cos \psi \cos \theta - \sin \beta(\sin \psi \cos \varphi - \cos \psi \sin \theta \sin \varphi) + \sin \alpha(\cos \psi \sin \theta \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi)] + W_y - L(\dot{\psi} \sin \psi \cos \theta + \dot{\theta} \cos \psi \sin \theta); \quad (5)$$

$$w = -U(\cos \alpha \cos \beta \sin \theta - \sin \beta \cos \theta \sin \varphi - \sin \alpha \cos \theta \cos \varphi) + W_z + L\dot{\theta} \cos \theta. \quad (6)$$

В формулах (4)–(6) W_x , W_y , W_z – компоненты путевой скорости самолета в географической системе координат; θ , φ , ψ , α , β – углы тангажа, крена, курса, атаки и скольжения соответственно; $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$ – угловые скорости изменения тангажа и курса соответственно; L – расстояние между центром тяжести самолета и точкой измерения α и β .

Модуль скорости ветра V определяется по формуле

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (7)$$

а угол ветра ϕ в диапазоне $\pm 180^\circ$ – по формуле

$$\phi = 57.3 \operatorname{arctg} \frac{v}{u}. \quad (8)$$

Для обеспечения высокой точности расчета параметров величины давлений и температуры определяются с учетом аэродинамических возмущений, вносимых в набегающий поток самолетом.

Расчет параметров осуществляется следующими приборами: высокоточной инерциальной системой навигации Honeywell Laseref VI, спутниковой системой навигации, приемниками и преобразователями статического и полного давления, датчиками температуры (высокочастотным датчиком ВДТ производства ЦАО [6] и низкочастотными датчиками температуры 102СТ2СТ фирмы Rosemount), блоком интерфейсов датчиков. Число Маха и барометрическая высота полета измеряются блоком Rosemount MADT2016В. Координаты положения и геометрическая высота полета самолета-лаборатории по системе GPS/ГЛОНАСС определяются с помощью блока БПСН-2.

В табл. 1 приведены параметры, измеряемые этими системами, и их основные характеристики.

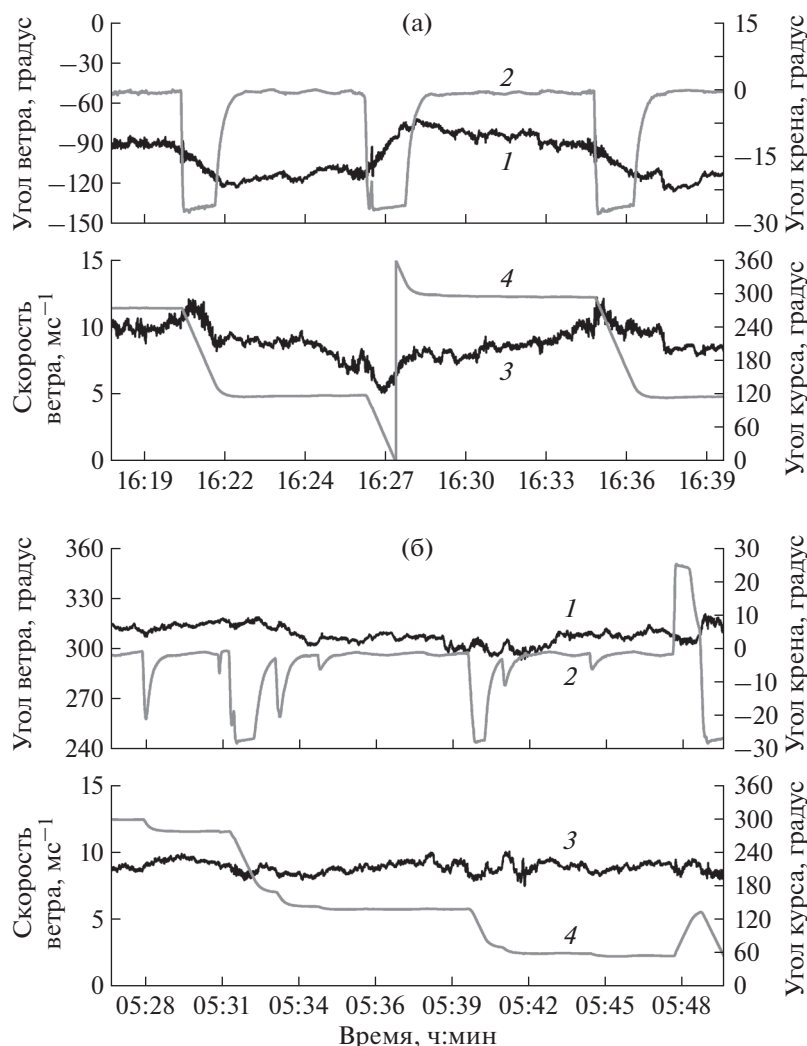


Рис. 2. Примеры рассчитанных значений направления и скорости ветра при несинхронной (а) и синхронной (б) регистрации первичных параметров во время глубоких маневров самолета-лаборатории по крену и тангажу. 1 – угол ветра; 2 – угол крена; 3 – модуль скорости ветра; 4 – угол курса.

Наиболее критичным с точки зрения точности является расчет скорости и направления ветра [7]. Рассмотрим возможные ошибки, вызываемые несинхронной регистрацией данных, на примере расчета горизонтальной компоненты скорости ветра. В выражении (4) первый член (в квадратных скобках) представляет собой горизонтальную компоненту воздушной скорости самолета (т.е. скорости самолета относительно воздушной массы), а второй и третий члены – вертикальную компоненту путевой скорости самолета относительно земной поверхности). Углы атаки α и скольжения β определяются по данным полусферического приемника давлений Rosemount 858AJ и регистрируются (так же как и воздушная скорость самолета U) одним бортовым компьютером. Значения углов курса ψ , крена ϕ и тангажа θ , а также компоненты путевой скорости самолета W_x поступают от инерциальной системы Laseref VI

на другой компьютер комплекса и регистрируются им. Если время внутренних часов двух компьютеров различается более чем на 10 мс, то при расчете компоненты скорости ветра возникает дополнительная систематическая погрешность за счет смещения по фазе компоненты воздушной скорости самолета относительно компоненты его путевой скорости. Очевидно, что временной сдвиг в измерениях параметров, входящих в формулы (4)–(8), неизбежно приведет к возникновению ложных значений скорости и направления ветра, поскольку смещение во времени одной большой величины относительно другой, даже на 0.01 с, вызывает появление погрешности, сопоставимой по величине с характерными значениями скорости ветра в атмосфере (5–10 мс⁻¹).

Примером влияния несинхронности измерений на качество расчета могут служить полученные в исследовательском полете за 9 мая 2017 г.

(см. рис. 2а) скорости и направления ветра (см. формулы (7)–(8)). В этот период регистрация первичных данных по протоколам RS232 и ARINC-429 осуществлялась различными компьютерами АПК, что при определенных условиях привело к временному смещению измеряемых параметров относительно друг друга. На рис. 2а представлены данные измерений на встречных курсах и во время глубоких маневров самолета — разворотов на 180° (с курса 300° на курс 120°), при этом углы крена достигали 30° .

Согласно рис. 2а, за время выполнения разворотов возникали ложные значения скорости ветра, достигавшие $\pm 2.5 \text{ мс}^{-1}$, что значительно превышало выполненные ранее оценки погрешности измерения 0.7 мс^{-1} для горизонтального полета [8]. Колебания угла ветра в момент разворота также были велики и составляли около $\pm 15^\circ$. Кроме того, в момент начала маневра возникал высокочастотный переходный процесс, также приводивший к появлению ложного значения пульсаций скорости ветра.

В дальнейшем регистрация первичных данных на одном компьютере позволила избавиться от проблемы несинхронности данных и существенно повысить точность расчетов. В качестве примера корректного расчета могут служить данные, полученные в исследовательском полете 9 мая 2018 г. (см. рис. 2б). Здесь представлены данные измерений на встречных курсах и во время стандартных разворотов самолета на 240° (с курса 300° на курс 60°), при этом угол крена достигал 30° . Согласно рис. 2б, за время выполнения разворота возникающие ложные значения скорости ветра не превышали оценочных значений погрешности $\pm 0.7 \text{ мс}^{-1}$, что не выходило за пределы естественной изменчивости скорости ветра в атмосфере. Колебания угла ветра в момент разворота также были невелики и находились в пределах природной изменчивости, 3° – 5° . Высокочастотный переходный процесс на фоне естественной изменчивости скорости ветра был пренебрежимо мал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана самолетная система сбора данных, позволяющая интегрировать разнородное научное оборудование в единую измерительную систему. Найденные решения вопросов синхронизации, передачи и регистрации данных обеспечили высокое качество измерений атмосферных параметров, а также оперативных расчетов в ходе летных экспериментов.

Система сбора данных, состоящая из аппаратно-программных комплексов и б.и.в.к., объединенных локальной вычислительной сетью, показала высокую эффективность в ходе более сотни исследовательских и научно-производственных полетов.

Данные, накопленные в ходе летных экспериментов, послужили материалом для ряда исследований: распространение аэрозольных примесей в Московском [9] и Арктическом регионах [10], изучение оптических явлений в облаках [11] и др.

Представляется, что предложенные принципы организации единой системы сбора данных могут быть использованы для построения информационно-измерительных систем мобильных лабораторий на базе самолетов, вертолетов, морских и речных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров А.С., Борисов Ю.А., Вакуловский С.М., Данелян Б.Г., Петров В.В., Синькевич А.А., Струнин М.А., Фомин Б.А., Хаттатов В.У. // Сб. научных трудов Международной научной конференции с элементами научной школы “Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата”. Ставрополь: СКФУ–ВГИ–РГГМУ, 2013. С. 102.
2. Базанин Н.В., Борисов Ю.А., Волков В.В., Дмитриев В.К., Живоглозов Д.Н., Макоско А.А., Струнин А.М., Струнин М.А. // Метеорология и гидрология. 2014. № 11. С. 109.
3. Колокутин Г.Э., Фомин Б.А., Петров В.В. // Метеорология и гидрология. 2018. № 3. С. 114.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. С. 24.
5. Lenschow D.H. The Measurements of Air Velocity and Temperature Using the NCAR Buffalo Aircraft Measuring System. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1972. P. 39.
6. Дмитриев В.К., Живоглозов Д.Н., Струнин А.М., Струнин М.А. // Мир измерений. 2014. № 9. С. 42.
7. Живоглозов Д.Н., Струнин М.А. // Труды II-й Всероссийской научной конференции “Экология и космос” им. академика К.Я. Кондратьева. СПб.: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 2015. С. 124.
8. Струнин М.А. Научно-методические основы исследования термодинамического состояния атмосферы с борта самолета-метеолaborатории. М.: Физматкнига, 2010.
9. Базанин Н.В., Волков В.В., Ганьшин А.В., Данелян Б.Г., Живоглозов Д.Н., Киринов Д.В., Крутиков Н.О., Куканова Е.А., Лукьянов А.Н., Струнин А.М., Струнин М.А. Вопросы физики облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия. Обнинск: ВНИИГМИ–МЦД, 2015. С. 89.
10. Живоглозов Д.Н., Захарова Е.В., Киринов Д.В., Крутиков Н.О., Струнин А.М., Струнин М.А. // Международная конференция “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященная 100-летию со дня рождения А.М. Обухова. М.: Физматкнига, 2018. С. 136.
11. Колокутин Г.Э., Волков В.В. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 840.