

Аэрологическое обеспечение пусков ракет космического назначения

О. В. Плохих^{1}, В. Э. Иванов¹, Н. В. Ширшов²*

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

² ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» (ЦЭНКИ), г. Москва, Россия

*o. v.plohih@urfu.ru

Аннотация. В статье обсуждаются вопросы аэрологического обеспечения пусков ракет космического назначения новыми отечественными системами радиозондирования. Приведены сведения о разработке навигационной СР «Полус». Далее обсуждаются состав и характеристики комплексной системы аэрологического зондирования атмосферы космодрома Восточный, часть подсистем которой выполнена на базе СР «Полус». Обсуждаются возможности системы зондирования, методы комплексирования данных разных подсистем и направления дальнейшего развития. Исследуются возможности получения информации о турбулентности атмосферы навигационными системами радиозондирования, использующими сигналы глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS. Показано, что точность измерения координат и скорости радиозонда по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем предоставляет новые возможности для измерения тонкой структуры ветра и оценки турбулентности атмосферы.

Ключевые слова. Система аэрологического зондирования атмосферы, радиозонд, спутниковые навигационные радиоэлектронные системы ГЛОНАСС/GPS, радиолокатор, ракета космического назначения, турбулентность атмосферы.

Aerological Provision of Space Carrier Rocket Launches

Oleg V. Plokhikh^{1}, Viacheslav E. Ivanov¹, Nikolay V. Shirshov¹*

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

² Center for operation of space ground based infrastructure, Moscow, Russian Federation

*o. v.plohih@urfu.ru

Abstract. The article discusses the issues of aerological support for launching space rockets with new Russian radiosonde systems. Information about the development of the navigation upper-air sounding system named “Polyus” is provided. Subsequently, the

structure and characteristics of the Vostochny Cosmodrome complex upper-air sounding system (VSCUASS) are discussed, some subsystems of which are developed on the basis of the “Polyus”. The possibilities of the VSCUASS, the methods of complexing data from different subsystems, and the direction of further development are discussed. Results of upper-air sounding for ensuring the “Soyuz-2.1a” rocket launching are discussed. These soundings are compared to calculations of average long-term aerological parameters from the reference atmosphere model. The possibilities of obtaining information about the atmosphere turbulence by navigational upper-air sounding systems using GLONASS and GPS global satellite navigation system signals are studied. It is demonstrated that the accuracy of the radiosonde coordinate and velocity measuring using the global satellite navigation system signals provides new possibilities for measuring the fine wind structure and estimating the atmosphere turbulence. The sounding coordinate and telemetry data used in the research are obtained by the “Polyus” domestic navigational upper-air sounding system. Questions of “Polyus” digital radio channel development are considered in the paper. Tests to decrease the channel out-of-band emission by the GFSK modulation are given.

Keywords. Upper-air sounding systems, radiosonde, satellite radio navigational system, GLONASS, GPS, atmospheric turbulence, space carrier rocket.

© Plokhikh O. V., Ivanov V. E., Shirshov N. V., 2018

Введение

Системы радиозондирования атмосферы (СР), построенные на принципе слежения за аэрологическими радиозондами (АРЗ), запускаемыми с помощью шаров-зондов в свободную атмосферу, являются основным средством получения аэрологической информации в нашей стране и за рубежом для обеспечения краткосрочных и долгосрочных прогнозов погоды, предупреждения природных и техногенных катастроф и др. [1]. СР обеспечивают потребителя метеорологической информацией о параметрах свободной атмосферы, таких как температура, влажность, давление, направление и скорость ветра, а также могут использоваться для измерения специальных параметров (радиации, уровня промышленных выбросов газов, аэрозолей и т. п.). Самостоятельное значение аэрологическая информация, получаемая средствами СР, имеет для метеорологического обеспечения полетов авиации, пусков ракет, стрельбы артиллерии.

В мировой практике сформировались два основных метода измерения координат АРЗ, определяющие структуру СР [1, 2]:

- угломерно-дальномерный метод, использующий радиолокационные станции (РЛС);
- разностно-дальномерный метод, использующий сигналы радионавигационных систем.

С начала 90-х гг. зарубежными фирмами Air, Vaisala, Graw разработаны и поставляются заказчикам СР, построенные на основе спут-

никовых радионавигационных систем (СРНС) GPS [3]. Эти станции имеют принципиальные преимущества по экономичности, габаритам, мобильности и использованию на подвижных объектах.

Специалисты УрФУ уже много лет занимаются исследованиями и разработкой различных средств радиозондирования атмосферы и обладают необходимыми навыками и опытом работ для создания подобных систем [1, 2]. В 2009 г. сотрудниками УрФУ был разработан рабочий макет навигационной СР. Макет успешно прошел испытания на аэрологической станции «Верхнее Дуброво» [4]. Затем при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218, УрФУ и ОАО «Радий» выполнили работы по созданию отечественной навигационной СР атмосферы «Полюс» на базе СРНС ГЛОНАСС/GPS и организации ее серийного производства. В 2011 г. был разработан и изготовлен первый опытный образец СР «Полюс». Этими работами заинтересовались специалисты Центра эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры (ФГУП «ЦЭНКИ»). С целью оценки эффективности работы антенного комплекса, аппаратуры базовой станции (БС) и радиозондов МРЗ-Н1, определения реальных технических характеристик в условиях эксплуатации для обеспечения аэрологической информацией пусков ракет, в ноябре 2011–2012 гг. на площадке № 6 космодрома Байконур были проведены сравнительные испытания СР «Полюс» и серийной радиолокационной СР на базе РЛС МАРЛ [5, 6]. По результатам испытаний было принято решение о вводе в опытную эксплуатацию СР «Полюс» на космодроме Байконур для метеорологического обеспечения пусков ракет.

Параллельно в рамках Федеральной космической программы России на 2006–2015 гг. ФГУП «ЦЭНКИ» начало работы по созданию системы метеорологического обеспечения (СМО) строящегося космодрома Восточный. Одна из подсистем СМО — это система аэрологического зондирования атмосферы (САЗА). Успешные испытания отечественной навигационной системы на космодроме Байконур повлияли на структуру САЗА, в состав которой были включены подсистемы на базе СР «Полюс». А УрФУ был задействован в качестве головного исполнителя работ по созданию САЗА, являющейся важнейшей составной частью системы метеорологического обеспечения, оперативно формирующей данные, необходимые для обеспечения пусков ракет-носителей (РН) и функционирования служб космодрома. Анализ организации и функционирования систем аэрологического обеспечения космодромов Байконур, Куру (Франция) и Ванденберг (США) выявляет необходимость проведения тщательного анализа состояния атмосферы в районе пусковой площадки космодрома всеми известными методами для получения точной, исчерпывающей, а возможно, даже избыточной информации для расчета полетного задания

и учета влияния атмосферных явлений на тропосферном и стратосферном участке траектории полета ракет-носителей (РН).

Структура, принцип работы и характеристики СР «Полюс»

СР состоит из наземной базовой станции слежения (БС) и запускаемого в свободный полет АРЗ. Опосредованно в СР «Полюс» включены СРНС ГЛОНАСС и GPS (рис. 1).

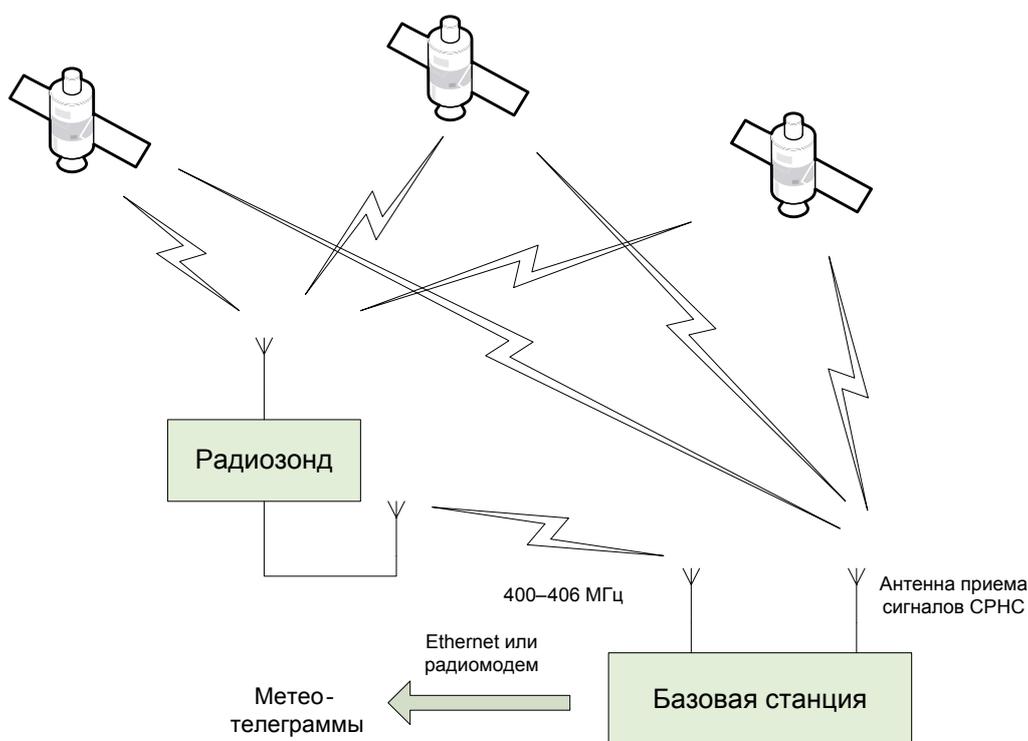


Рис. 1. Принцип работы СР «Полюс»

АРЗ измеряет параметры атмосферы, текущие координаты и вектор скорости и передает эту телеметрическую информацию по цифровому радиоканалу на БС. Радиоканал узкополосный, в диапазоне 400–406 МГц. Зарубежные аналоги СР «Полюс» имеют радиоканал со сходными параметрами. БС принимает телеметрический сигнал АРЗ, демодулирует его и выделяет пакеты с телеметрической информацией. Затем средствами ПЭВМ БС выполняется обработка, индикация и сохранение аэрологической информации. Обработку можно разделить на две части: первичную и вторичную. Первичная обработка включает в себя предварительную фильтрацию и позволяет получить профили аэрологических параметров атмосферы относительно высоты зондирования. Вторичная обработка подразумевает окончательную обработку данных (по всему пуску или по уже полученной части) и формирование метеорологических телеграмм. На БС может

быть установлен приемник сигналов ГЛОНАСС/GPS для определения координат БС или для формирования поправок в дифференциальном режиме. Дифференциальный режим применим только в стационарном исполнении СР, когда точно известны координаты БС.

Сигналы АРЗ принимаются антенно-фидерной системой (АФС) приема сигналов АРЗ БС, поступают на УКВ-приемник, который демодулирует сигнал АРЗ и передает его в ПЭВМ БС, где осуществляется окончательная обработка и сохранение информации. В АФС приема сигналов АРЗ входят две антенны (ближнего и дальнего канала) с модулем малошумящего усилителя. Антенна ближнего канала используется при больших значениях угла места АРЗ и ограниченной дальности до 30–40 км. Антенна дальнего канала имеет приплюснутую диаграмму направленности по углу места и включается при приеме сигналов от радиозонда с углом места ниже 40° и дальности свыше 40 км. Позднее был реализован вариант применения направленной антенны с игольчатой диаграммой направленности с механическим приводом управления для увеличения рабочей дальности зондирования. В этом случае управление приводом антенны осуществляется по измеренным координатам АРЗ и БС.

Особое внимание при разработке СР «Полюс» было уделено радиоканалу АРЗ. В серийных отечественных радиолокационных СР с аналоговым радиоканалом телеметрическая информация в АРЗ формируется в виде частоты видеоимпульсов вторичного измерительного преобразователя (измерительного генератора РС-типа), к которому последовательно подключается сопротивление опорного (калибровочного) резистора, датчика температуры и датчика влажности. АРЗ передает информацию о метеорологических параметрах атмосферы в течение одного 20-секундного цикла. В течение этого интервала последовательно (по 5 с) передаются измерительные частоты соответствующих каналов: частота опорного (калибровочного) канала и далее частоты телеметрических (измерительных) каналов температуры и влажности.

Оптимальный темп обновления телеметрической информации, поступающей по радиоканалу АРЗ-СР, определяется динамикой изменения параметров атмосферы по мере подъема (падения) зонда, характеристиками бортовых измерительных устройств и стоимостью аппаратуры. Наиболее критичным с точки зрения стоимости является АРЗ, поскольку это невозвратное устройство. В сети Росгидромета каждая станция выпускает по два зонда в сутки. Анализ данных зондирования и мировой опыт показывает, что для измерения температуры и влажности обновления данных 1 раз в секунду достаточно для стандартного зондирования. В навигационных СР координатную информацию желательно получать чаще, чтобы более эффективно фильтровать прецессию радиозонда на фале шара-оболочки [7]. На практике

темп выдачи координатной информации ограничен измерительным циклом навигационного модуля, равным 1 с.

В СР «Полюс» период обновления основных данных был выбран равным 2 с из-за особенностей работы схемы измерительного преобразователя температуры, а скорости АРЗ — 1 с. Типичная структура пакета и состав передаваемой радиозондом МРЗ-Н1 навигационной СР «Полюс» информации приведены в [5]. В зависимости от конкретной реализации длина передаваемого пакета в обычном режиме находится в диапазоне 50–80 байт (400–640 бит). Таким образом, минимально допустимая скорость передачи по радиоканалу равна 320 бит/с для двухсекундного интервала обновления и 640 для секундного. Дифференциальный режим навигационных измерений требует значительно большего объема передачи, поэтому разумно заложить некоторый запас в приемную и передающую аппаратуру для возможности ее программной модернизации.

Рабочая дальность канала от 0 до 250 км. Подразумевается работа в прямой видимости. В прямом зондировании угол места (в направлении АРЗ) на предельной дистанции равен 7° . Мощность передатчика АРЗ ограничивается энергоемкостью батареи питания. Мощность излучения зарубежных аналогов варьируется в диапазоне 60–200 мВт. При разработке СР «Полюс» мощность передатчика МРЗ-Н1 была выбрана равной 100 мВт, не более. Испытания показали, что при такой мощности время работы зонда от батареи питания не менее 5 ч. Этого достаточно для прямого зондирования и при необходимости последующего обратного. Был также разработан режим плавного увеличения мощности передатчика по мере подъема АРЗ с 10 до 100 мВт.

Диапазон 400–406 МГц выделен только для метеорологических систем. Благодаря канальной перестройке возможна одновременная работа нескольких СР. К сожалению, в этой полосе иногда появляются сигналы систем, не авторизованных для данного диапазона, в том числе и за счет внеполосных излучений. В таких случаях эффективна перестройка АРЗ на свободный от помех рабочий канал. В свободном канале на устойчивость приема сигнала АРЗ влияют флуктуационные помехи и замирения сигналов. Для борьбы с замираниями приходится вносить избыточность в передаваемую информацию. Из-за требования низкой себестоимости вычислительные мощности аппаратуры АРЗ существенно ограничены, поэтому в радиоканале СР «Полюс» избыточность реализуется простым повторением каждого пакета по несколько раз. Время критического падения мощности принимаемого сигнала при замираниях соизмеримо с периодом обновления телеметрической информации, поэтому чем больше будет повторений за период, тем эффективнее будут использованы паузы между замираниями. Избыточность обеспечивается повышением скорости передачи и расширением полосы частот канала, а значит, уменьшается средняя энергия элементарной посылки. В случае некогерентного приема это приводит

к снижению отношения С/Ш (для флуктуационной помехи), и соответственно, к снижению дальности канала и повышению вероятности ошибки. Повышение скорости передачи также увеличивает стоимость аппаратуры. Компромиссным значением можно считать 5–10 повторений пакета в течение 1–2 с. Итоговая скорость передачи в канале составила 2400 бит/с. Девиация выбрана равной ± 2 кГц, таким образом, эффективна полоса сигнала около 8 кГц. Многократные испытания показали хорошую работоспособность разработанного канала. Дальнейшим направлением улучшения устойчивости приема может быть применение помехоустойчивого кодирования [8].

Чувствительность УКВ-приемника БС – 153 дБ, не хуже. Модуляция сигнала частотно-импульсная (ЧИМ), с девиацией ± 2 кГц. Скорость передачи данных 2400 бит/с. Потребляемая мощность БС 400 Вт, не более. Ширина диаграммы направленности по азимуту антенны БС канала радиозонда составляет 360 град. Коэффициент усиления – 6 дБ. Среднеквадратические ошибки измерения: координат ± 15 м, скорости ветра $\pm 0,7$ м/с, направления ветра $\pm 1,5$ град.

Диапазон измеряемых метеопараметров:

- температура воздуха от -90 до $+50$ °С;
- относительная влажность от 2 до 98 %;
- скорость ветра от 0 до 150 м/с.

Для снижения уровня внеполосных излучений в передатчиках применяют ЧИМ с использованием фильтра Гаусса (ГЧИМ) для сглаживания частотных перестроек (модуляция GFSK). На базе передатчика АРЗ МРЗ-Н1 была выполнена экспериментальная оценка эффективности модуляции GFSK в канале СР «Полюс». Опыт показал, что передатчик на микросхеме АDF7012 (Analog Device) с 128-ступенчатой частотной перестройкой позволяет снизить уровень внеполосного излучения на 12–15 дБ по сравнению с аналогичным, но с обычной перестройкой частоты (рис. 2 и 3).

Система аэрологического зондирования космодрома Восточный

Структурная схема САЗА космодрома Восточный приведена на рис. 4. САЗА состоит из шести подсистем:

- аппаратно-программного комплекса (АПК) автоматизированной системы сбора, обработки и хранения данных (АССОиХД),
- радиолокационного аэрологического комплекса МАРЛ-А,
- стационарного комплекса СР «Полюс»,
- мобильного аэрологического комплекса (МАК),
- радиометрической системы определения профилей влажности и температуры (на базе профилемера НАТPRO-22),
- комплекта оборудования и расходных материалов для подготовки и выпуска аэрологических радиозондов (АРЗ).

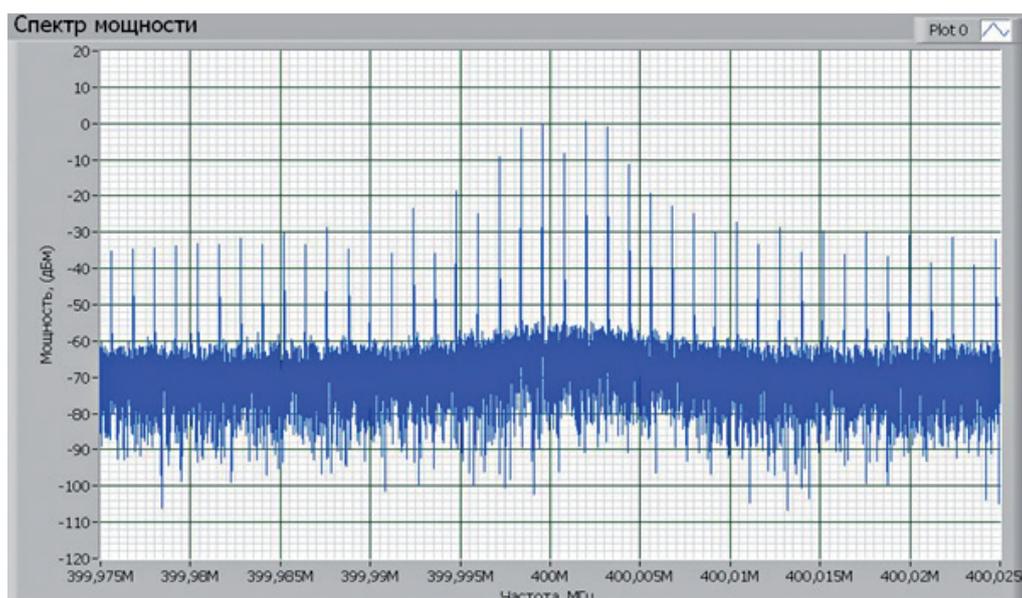


Рис. 2. Спектр ЧИМ сигнала АРЗ (модуляция меандром)

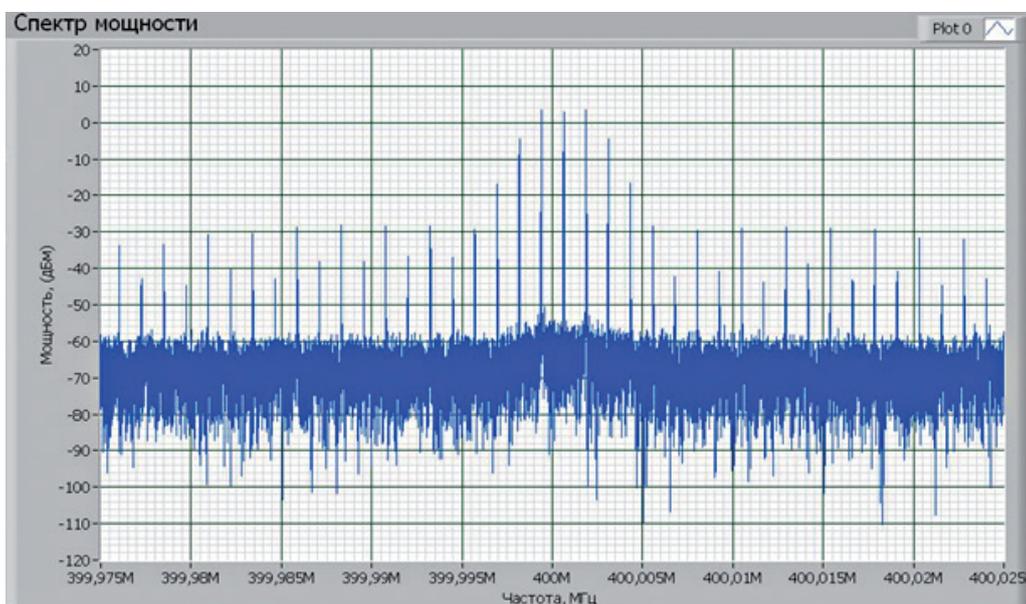


Рис. 3. Спектр ГЧИМ сигнала АРЗ (модуляция меандром) с 128-ступенчатой частотной перестройкой

Информация стационарных подсистем может передаваться по локальной компьютерной сети, а данные МАК — через транкинговую сеть радиосвязи ТЕТРА космодрома Восточный. АПК АССОиХД собирает и обрабатывает информацию со всех подсистем САЗА. Эта информация транслируется в систему сбора, обработки, передачи и хранения метеорологической информации СМО. Передаваемую по каналам связи информацию можно разделить на:

- необработанные (сырые) данные измерений;

- обработанные профили температуры, влажности, ветра (скорость, направление, меридиональная и зональная составляющие), атмосферного давления относительно высоты;
- стандартные метеотелеграммы;
- контрольную информацию (КИ) о состоянии и функционировании подсистем;
- вспомогательную информацию от других подсистем СМО (например, данные наземной метеостанции, доплеровского метеорологического радиолокатора).

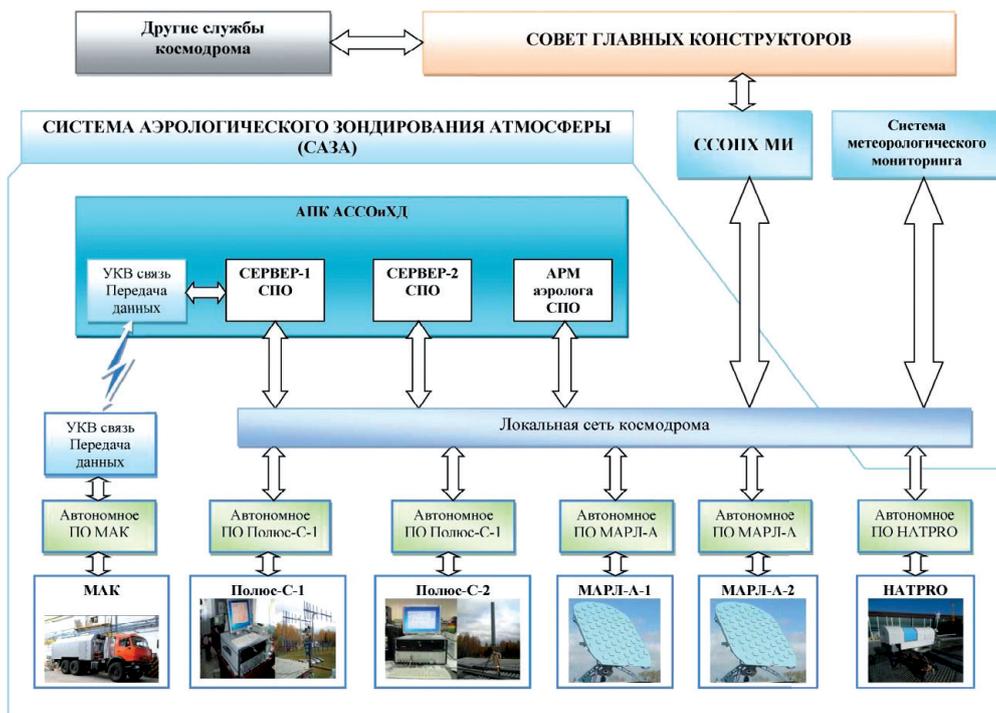


Рис. 4. Структура САЗА и взаимодействие с другими службами космодрома Восточный

САЗА космодрома Восточный представляет собой автоматизированный высокотехнологичный комплекс средств радиозондирования атмосферы. Аэрологический комплекс МАРЛ-А включает в себя два модернизированных аэрологических радиолокационных вычислительных комплекса (АРВК) МАРЛ-А. Модернизация заключается в доработке программного обеспечения (ПО) МАРЛ-А для работы с цифровым АРЗ МРЗ-3 МК в режиме пакетной передачи данных. Модернизация МРЗ-3 МК для работы в пакетном режиме также проводится в рамках работ по проекту. В МРЗ-3 МК период обновления телеметрической информации снижен до 2 с, а цифровой радиоканал повышает надежность и достоверность принимаемой информации. В настоящее время в Центральной аэрологической обсерватории

(ЦАО) уже проведены успешные испытания МАРЛ-А и МРЗ-3 МК в пакетном режиме. Модернизация МАРЛ-А и МРЗ-3 МК для работы в пакетном режиме проводится для того, чтобы приблизить характеристики радиолокационных систем по измерению температуры и влажности к параметрам СР «Полюс», где аналогичные принципы цифровой обработки и пакетной передачи данных в АРЗ были заложены изначально и уже реализованы. АРВК МАРЛ-А не могут выполнять радиозондирование с одной площадки одновременно, второй АРВК включен в состав САЗА в качестве резерва.

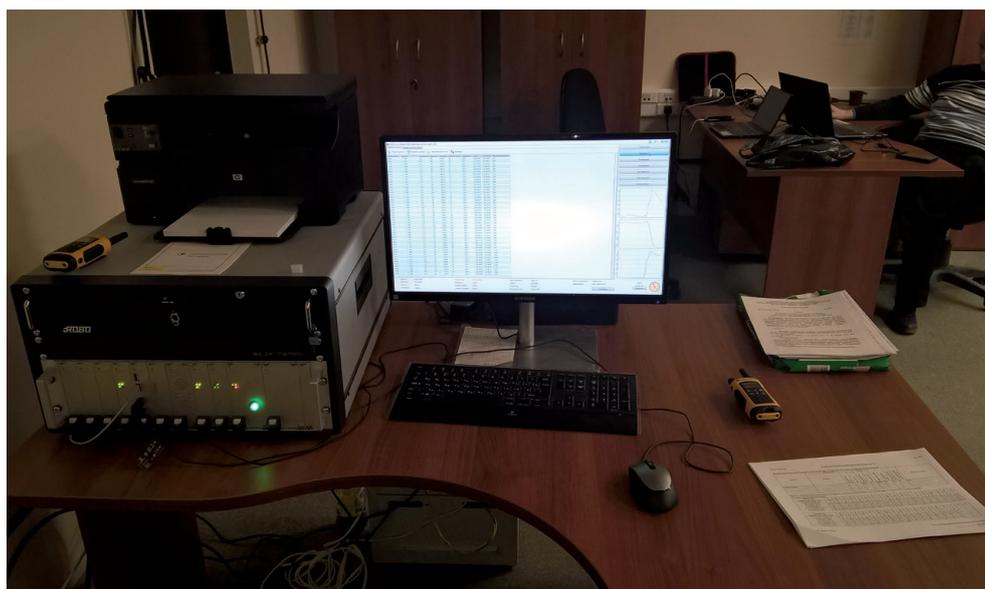


Рис. 5. Базовая станция стационарной СР «Полюс»

Стационарный комплекс СР «Полюс» также состоит из двух СР «Полюс», отличающихся друг от друга антенными системами. Одна СР «Полюс» имеет антенну с круговой диаграммой направленности по азимуту, которая обеспечивает рабочую дальность приема сигнала АРЗ до 250 км, а другая оборудована антенной с управляемой диаграммой направленности (АУДН), обеспечивающей рабочую дальность системы свыше 250 км за счет более высокого коэффициента направленного действия. Кроме того, АУДН повышает помехозащищенность СР за счет пространственной селекции. СР «Полюс» — это первая в РФ система радиозондирования, определяющая координаты и скорость движения АРЗ по спутниковым навигационным сигналам (ГЛОНАСС, GPS).

СР «Полюс» имеет очевидные преимущества перед РЛС в мобильности, поэтому введенный в состав САЗА МАК разрабатывался на базе этой системы. Аппаратура МАК установлена на шасси КАМА-343114 (рис. 6). СР «Полюс» не требуется геодезическая привязка и угловая ориентация антенной системы перед выпуском АРЗ, поэтому вся про-

цедура сводится к тому, чтобы доехать до заданной точки, наполнить оболочку и произвести выпуск зонда. МАК оснащен средствами радиосвязи, малогабаритной наземной метеостанцией, аппаратурой навигации, автономным дизельным генератором и другими средствами, обеспечивающими его автономную работу в течение суток. Кабина МАК оборудована подъемным устройством, приводящим антенну СР «Полюс» с круговой диаграммой направленности в рабочее положение перед выпуском.



Рис. 6. Запуск радиозонда для зондирования мобильным аэрологическим комплексом МАК на космодроме Восточный

28 апреля 2016 г. был выполнен первый пуск ракеты космического назначения (РКН) «Союз–2.1а» с космодрома Восточный. В 2017–2018 гг. были сделаны еще два запуска РН с космическими аппаратами. Получение необходимой для пуска информации о состоянии атмосферы обеспечивала разработанная для космодрома САЗА. Метеорологическая площадка космодрома Восточный еще не достроена, поэтому для обеспечения пусков по временной схеме была смонтирована одна из двух стационарных навигационных СР «Полюс-С», поставлен мобильный аэрологический комплекс (МАК) и комплект оборудования и расходных материалов для запуска АРЗ. Эти три компоненты САЗА и обеспечивали оперативный контроль параметров атмосферы перед пуском РКН.

МАК позволяет выполнять выпуски АРЗ и зондирование практически с любой открытой площадки космодрома. Время зондирования до высоты 20 км составляет немногим более 1 ч. Каждое измерение (скорости ветра, температуры, влажности, давления и плотности воздуха) синхронизировано (всемирное координированное время) со шкалой времени UTC непосредственно в радиозонде с помощью

приемника сигналов ГЛОНАСС. Темп обновления данных равен 2 с. Благодаря мобильности МАК можно планировать траекторию полета АРЗ так, чтобы она проходила в плоскости пускового комплекса на интересующих потребителя высотах в заданной зоне.

Помимо эксплуатационных преимуществ СР «Полюс» обладает высокой точностью и разрешением измерения скорости и направления ветра. Специально для обеспечения пусков РКН были разработаны форматы формирования выходных данных с высоким разрешением по высоте. Предельная дискретность исходных данных по высоте составляет 10–12 м, для РКН «Союз–2.1а» был разработан и согласован с НПО «Автоматика» формат сетки высот 100 м, в котором все параметры рассчитываются как средняя величина в соответствующем стометровом слое (таблица 1). Значения колонок таблицы: H [м] — высота относительно среднего уровня моря, HL [м] — высота относительно уровня стартовой площадки, t [с] — относительное время (по шкале UTC), E_v [м/с] — зональная составляющая ветра, N_v [м/с] — меридиональная составляющая ветра, V [м/с] — модуль вектора скорости ветра, D [град] — направление ветра, T [град] — температура воздуха, RH [%] — относительная влажность, P [гПа] — атмосферное давление, Den [г/м³] — плотность влажного воздуха.

Таблица 1

Фрагмент таблицы зондирования параметров атмосферы для РКН «Союз–2.1а»

H [м]	HL [м]	t [с]	E_v [м/с]	N_v [м/с]	V [м/с]	D [град]	T [град]	RH [%]	P [гПа]	Den [г/м ³]
284	2	0	–0,30	–1,67	1,7	10,0	6,2	39,9	1022,5	1270,6
300	18	4	0,86	–1,92	2,1	335,8	4,3	38,9	986,8	1235,2
400	118	18	0,31	0,74	0,8	202,4	3,4	40,5	974,7	1224,0
500	218	34	2,37	–1,27	2,7	298,2	2,2	43,2	962,8	1214,7
600	318	51	1,79	–1,39	2,3	307,9	1,3	46,5	950,9	1204,0
700	418	72	0,23	–3,48	3,5	356,2	0,3	50,0	939,1	1193,2
800	518	91	0,16	–4,23	4,2	357,9	–0,3	52,4	927,4	1181,3
900	618	106	–0,71	–3,56	3,6	11,3	–1,4	54,0	915,9	1171,4
1000	718	121	–0,99	–2,50	2,7	21,6	–2,1	55,6	904,4	1159,7

СР «Полюс» может формировать упрощенную таблицу с шагом 100 м до 4 км и с шагом 1000 м выше этого уровня, доступны также форматы ТАЕ03, КН-04. Кроме того, программное обеспечение (ПО) СР «Полюс» позволяет сохранять «сырые» (необработанные) данные измерений АРЗ в текстовом формате, что позволяет обрабатывать данные с помощью стороннего ПО со своими алгоритмами и форматами выходных данных. Во время разработки, модернизации СР «Полюс» и обеспечения первого пуска на космодроме Восточный эти «сырые»

данные использовались для внешнего контроля систем с помощью специально разработанного в среде LabView ПО. Сохранение данных в «сыром» формате также дает потребителю некоторую гибкость в обработке и интерпретации данных, позволяет впоследствии пересмотреть результаты зондирования по вновь появившейся методе. АРЗ перед пуском можно перестраивать на свободный от промышленных помех и других радиозондов узкополосный частотный канал в диапазоне 400–406 МГц. Поэтому МАК и стационарная СР «Полюс» могут следить за одним АРЗ, вести два разных зонда одновременно (по одному АРЗ на каждую СР) или бросить слежение за летящим зондом и начать новый выпуск.

Одной из особенностей радиозондирования является то, что зонд по мере полета перемещается вслед за воздушными массами по горизонтали. Поэтому часть измерений может быть выполнена на значительном удалении от стартового комплекса и траектории полета РКН. Благодаря мобильности МАК можно планировать траекторию полета АРЗ так, чтобы она проходила в плоскости пускового комплекса на интересующих потребителя высотах в заданной зоне. Для этого необходимо по предварительной информации о вертикальном профиле ветра (прогноз, данные предыдущего зондирования или др.) и планируемой зоне полета АРЗ рассчитать точку его выпуска. Аналогичный подход применим для сбрасываемого АРЗ. Технология сбрасываемого АРЗ отработана и может быть использована в САЗА космодрома для ускоренного зондирования перед пуском РКН.

Остальные компоненты САЗА будут смонтированы на космодроме после завершения строительства метеорологической площадки. Речь идет о двух модернизированных аэрологических радиолокационных вычислительных комплексах (АРВК) МАРЛ-А, второй стационарной СР «Полюс» с увеличенной рабочей дальностью и аппаратно-программном комплексе автоматизированной системы сбора, обработки и хранения данных (АПК АССОиХД, или более кратко, АПК). Модернизированный в процессе разработки САЗА АРВК МАРЛ отличается от серийного прототипа тем, что обеспечивает прием телеметрической информации радиолокационного АРЗ МРЗ-3 МК в пакетном режиме. Это существенно облегчает совместную обработку данных радиолокационного и навигационного зондирования. Данные от каждой СР будут оперативно поступать по каналам связи на серверы базы данных АПК САЗА и подсистемы сбора данных наблюдений.

Таким образом, в составе САЗА будут функционировать пять независимых СР, что позволяет существенно повысить надежность определения параметров атмосферы. Данные от каждой СР будут оперативно поступать по каналам связи на серверы базы данных АПК САЗА и подсистемы сбора данных наблюдений (часть базы данных верхне-

го уровня, в которой накапливаются данные от всех измерительных подсистем космодрома).

Аппаратно-программный комплекс и направления развития САЗА

Программное обеспечение рабочего места аэролога САЗА, которое входит в состав АПК АССОиХД, предназначено для мониторинга, обработки и анализа данных, поступающих от подсистем САЗА. На этом уровне вся поступающая информация по степени обработки делится на «сырую», первичную и вторичную. Первичные данные — это выходная информация подсистем САЗА, т. е. обработанные ими «сырые» данные. Вторичные данные — это обработанная АПК первичная информация. Именно эта вторичная обработка вкупе с автоматизацией сбора данных по каналам связи, в том числе от МАК, и собственной базой данных превращает САЗА из дорогостоящего набора независимых СР в уникальную систему аэрологического обеспечения нового типа.

Пока ПО АПК АССОиХД реализует самые простые алгоритмы и режимы вторичной обработки, которые в дальнейшем можно ощутимо развить и усовершенствовать. Общая концепция вторичной обработки, на базе которой построен АПК, следующая. Информация от всех подсистем САЗА, в том числе информация о состоянии и работоспособности, оперативно поступает по каналам связи в базу данных (БД) АССОиХД. Любые первичные данные, находящиеся в БД, могут быть выбраны аэрологом САЗА в качестве исходных для вторичной обработки. Возможно использование внешних данных, например, хранящихся в БД верхнего уровня. Исходные данные делятся на «источники» и «индикаторы». Вторичные данные получают путем автоматизированного преобразования данных категории «источники» по некоторому алгоритму. Данные категории «индикаторы» используются для формирования дополнительной оценки правдоподобия данных «источников». В качестве «источников» обычно используются оперативные первичные данные подсистем САЗА. Для вторичной обработки может быть выбрано несколько «источников». Аналогично можно выбрать несколько «индикаторов». В качестве «индикаторов» может выступать:

- устаревшая первичная информация, например данные вчерашнего зондирования;
- менее точная и детальная по сравнению с «источником» информация, например ветровые данные радиолокационной СР в сравнении с навигационной;
- данные статистической обработки хранящейся в БД первичной или вторичной информации;
- данные моделирования и прогнозов атмосферы.

Если выбран один «источник» без «индикаторов», то без вмешательства аэролога результат вторичной обработки будет повторять исходные данные. Аэролог может удалить из обработки часть недоверенной с его точки зрения информации, например одиночный выброс наблюдаемого параметра. Самый простой способ получения вторичной информации по нескольким «источникам» — это вычисление средних значений. Перед сведением данных все «источники» преобразуются методом аппроксимации в ряды с единой сеткой высот. Индикаторы могут использоваться для верификации данных «источников» или для их весовой обработки. Несмотря на простоту общей концепции, получение вторичной информации не является тривиальной задачей. Дело в том, что даже если исходные данные получены от одинаковых измерительных систем, они, вследствие ошибок измерения, воздействия помех, динамики атмосферы, сбоев и отказов аппаратуры, будут отличаться как друг от друга, так и от истинных параметров объекта контроля. Например, у одного из источников может быть пропуск данных на некотором участке высот, что не позволит вычислить средние значения не только на данном отрезке, но и на смежных с ним участках. Принятая концепция и состав САЗА подводят нас к тому, что «источники» могут быть получены от принципиально разных измерительных систем, а значит, обладают различными количественными и качественными характеристиками, поэтому необходимо разработать адекватную методику для их совместной обработки. Например, измерительная система навигационного радиозонда МРЗ-Н1 определяет среднюю температуру воздуха на интервале 1,5 с с темпом 2 с, а АРВК МАРЛ-А с АРЗ МРЗ-3 А выполняют аналогичные преобразования на интервале усреднения 5 с и периодом обновления 20 с. В зависимости от типа используемого датчика температуры его постоянная времени также может варьироваться в широких пределах. То же самое можно сказать об измерении других параметров, в том числе скорости ветра. Для повышения совместимости данных навигационного и радиолокационного АРЗ о температуре, влажности, давлении, плотности воздуха была проведена модернизация АРВК МАРЛ-А, в результате которой МАРЛ-А может выполнять зондирование с новым радиозондом МРЗ-3 МК с пакетным режимом передачи данных. МРЗ-3 МК и МРЗ-Н1 оснащены одинаковыми измерительными датчиками, период обновления данных тоже совпадает. Тем не менее при сведении разных интегральных оценок уместно учитывать апертуру (интервал усреднения) и частоту дискретного преобразования.

Другим направлением усовершенствования ПО АПК САЗА является использование в расчетах в качестве «индикаторов» средних многолетних значений метеопараметров «Глобальной справочной модели атмосферы». В частности, сравнение данных справочной модели с данными зондирования перед пуском РКН «Союз-2.1а» с космо-

дрома Восточный дало хорошее совпадение основных параметров (рис. 7 и 8), хотя в нижней 15-километровой зоне разница существенная благодаря более высокой изменчивости тропосферы.

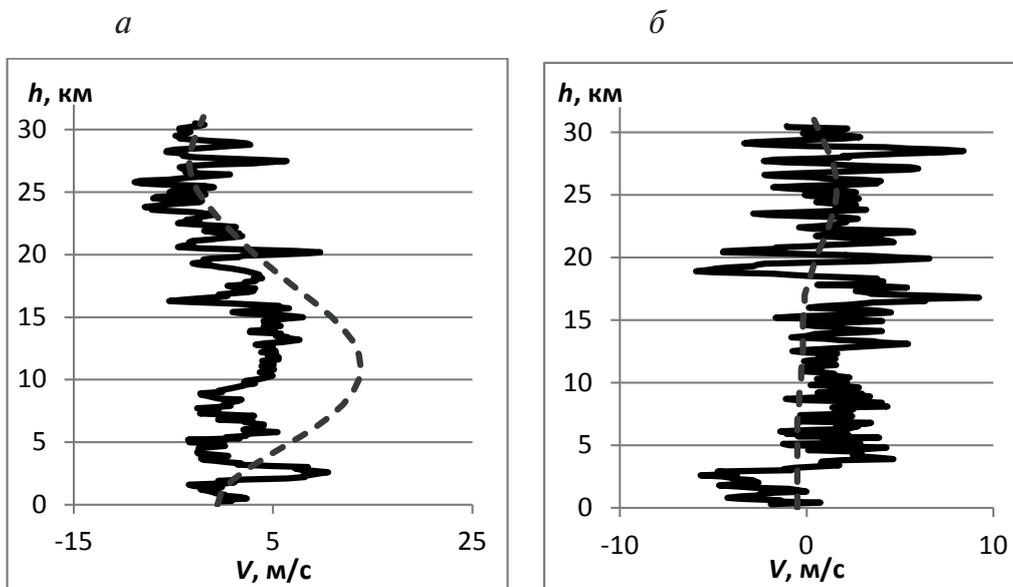


Рис. 7. Сравнение зональной (а) и меридиональной (б) составляющих ветра по данным зондирования на космодроме Восточный (сплошная линия) со средними многолетними значениями, полученными по «Глобальной справочной модели атмосферы» (пунктирная линия)

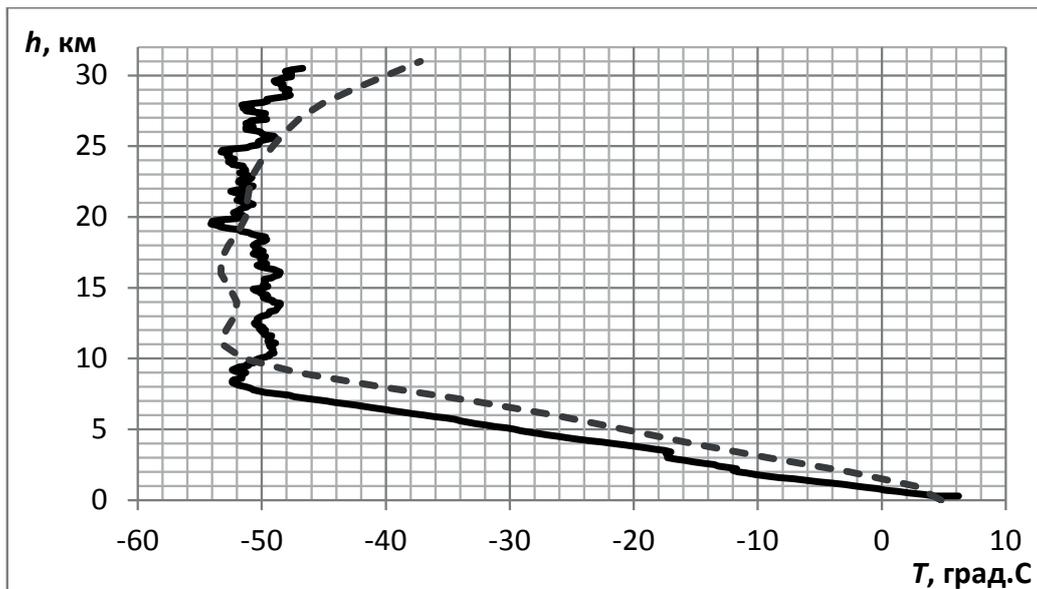


Рис. 8. Сравнение профиля температуры измеренного СР на космодроме Восточный 25.04.2016 (сплошная линия) со средними многолетними значениями, полученными по «Глобальной справочной модели атмосферы» (пунктирная линия)

Для повышения оперативности контроля перспективно включение в состав САЗА измерительных систем других типов, например радиолокационного ветрового профайлера [9], доплеровского метеорологического радиолокатора [10]. Возможна разработка новых образцов профайлеров, работающих в других диапазонах частот. Существуют методы повышения оперативности контроля радиозондовыми измерительными системами. Одна из стационарных СР «Полюс» САЗА изготовлена в модификации с антенной с управляемой диаграммой направленности, что позволяет увеличить потенциал телеметрического радиоканала АРЗ и использовать технологию обратного зондирования для повторного измерения параметров как во время подъема, так и во время падения радиозонда вплоть до поверхности Земли. Для этого между шаром и АРЗ обычно подвешивают замедляющий падение парашют. Отдельный интерес представляет зондирование с помощью радиозонда, сбрасываемого с самолета или беспилотного летательного аппарата. За рубежом также производят СР, в которых радиозонд доставляется в точку сброса небольшой ракетой. В СР со сбрасываемыми АРЗ время зондирования может быть уменьшено за счет увеличения скорости падения зонда в сравнении с прямым зондированием (снизу вверх).

САЗА в полном составе позволяет вести одновременное зондирование четырьмя радиозондами. Запуская их с интервалом 15–30 минут, можно организовать режим непрерывного конвейерного зондирования, при котором в каждом из четырех секторов интересующего нас диапазона высот всегда находится один из запущенных АРЗ. Сведение данных конвейерного зондирования в одну динамически пересчитываемую выходную таблицу позволит обновлять данные зондирования на выбранном интервале высот с периодом, равным интервалу между выпусками радиозондов.

В ряде случаев потребителей интересует дополнительная информация о движении воздушных потоков, такая как турбулентность, сдвиги и градиенты ветра. Метод радиозондирования позволяет получать хорошие средние оценки скорости ветра в слое. По вертикальному профилю ветра можно определить градиенты и сдвиги, масштабы которых превышают толщину текущего слоя. В теории турбулентности сформулированы ряд критериев, определяющих турбулентное состояние атмосферы. В качестве примера можно привести число Ричардсона [11]

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\frac{dT}{dz} + \gamma_a}{\left(\frac{dV}{dz}\right)^2}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, T — средняя температура в слое, $\gamma_a = 0,01$ °С/м — адиабатический градиент температуры,

z — высота. Турбулентность должна наблюдаться в тех слоях, где Ri не превышает некоторого критического значения. Для вычисления Ri по результатам температурно-ветрового зондирования требуется хорошее разрешение по высоте. Вычисление числа Ричардсона по данным радиолокационного зондирования не нашло широкого практического применения из-за больших ошибок его определения. Навигационные СР обеспечивают необходимое разрешение с запасом.

Тщательный анализ координатной информации зондирования СР «Полюс» позволил нам предложить новый способ поиска зон с резким изменением скорости и направления ветра, характерных для турбулентных участков, завихрений и границы слоев среды с отличающимися динамическими характеристиками. Как было отмечено выше, АРЗ раскачивается на фале шара. Разрешение навигационной СР позволяет отслеживать прецессию (колебания) зонда, подвешенного к газонаполненной оболочке на расстоянии 10–20 м. Упрощенно систему шар — зонд можно представить в виде маятника с подвижной точкой подвеса, а колебания по осям трехмерной системы координат условно считать гармоническими с медленным затуханием. Трение оболочки с воздухом при подъеме приводит к возникновению турбулентных завихрений в кильватере шара и флуктуациям точки привязки радиозонда. Когда шар-оболочка попадает в слой воздуха, скорость и направление движения которого существенно отличаются от предыдущего, фаза колебания зонда должна скачкообразно измениться.

Таким образом, модель движения АРЗ можно представить в виде траектории движения шара по ветру и гармонического сигнала в общем виде со случайной фазой и амплитудой. В области спокойного течения воздуха наблюдаются случайные скачки фазы в результате завихрений в кильватере шара, в зоне турбулентности и резкой смены ветра изменения фазы сопровождаются изменением амплитуды. Аналогичная ситуация наблюдается в канале скорости навигационного АРЗ. На рис. 9 приведен пример выделенного сигнала изменения фазы колебаний по одной координате. Чем больше и продолжительнее фазовый сдвиг, тем большее воздействие получил шар, входя в новый слой. Выделение фазовой и амплитудной информации о прецессии АРЗ из последовательности координат и скорости дает возможность определять высоты, на которых произошло быстрое изменение скорости движения оболочки.

Выделяя и анализируя информацию о фазе и амплитуде колебаний АРЗ, можно параллельно решать две смежные задачи: а) формировать новый индикатор для поиска зон турбулентности, б) адаптивно фильтровать координаты и скорость АРЗ. Успешное решение последней приводит к снижению динамической ошибки измерения ветра и усиливает возможности оценки тонкой структуры поля ветра. Дополнительно можно оценивать скорость вертикального подъ-

ема АРЗ. Увеличение скорости подъема связано с наличием восходящих потоков воздуха, участвующих в механизме возникновения турбулентности (рис. 10).

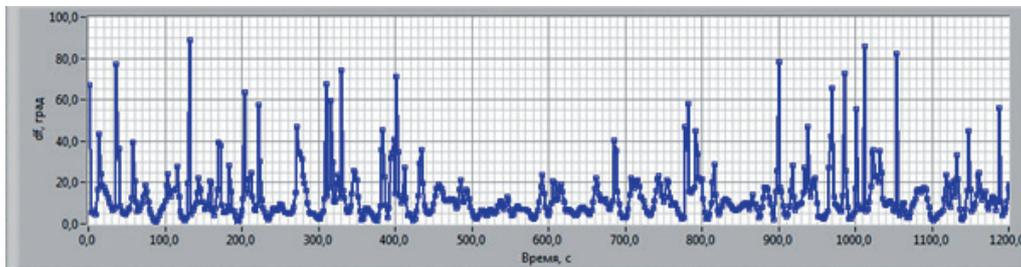


Рис. 9. Производная фазы колебаний радиозонда во время зондирования

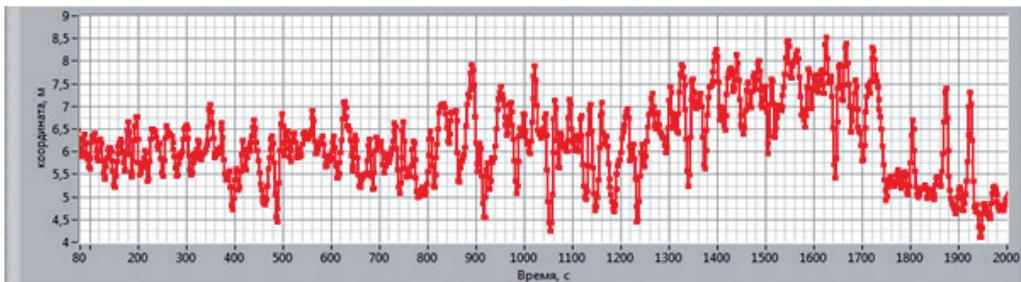


Рис. 10. Изменение скорости подъема радиозонда во время полета

Заключение

В 2013–2015 гг. для КЦ Восточный ЦЭНКИ и УрФУ с привлечением предприятий-соисполнителей АО «Радий» (г. Касли, Челябинская обл.), АО «Вектор» (г. Екатеринбург) и АО «СЭМЗ» (г. Солнечногорск, Московская обл.) была разработана современная комплексная система аэрологического зондирования атмосферы. Часть подсистем САЗА успешно прошли испытания и использовались для обеспечения первого пуска РКН на космодроме.

В статье были предложены пути дальнейшего усовершенствования САЗА для повышения точности и надежности оперативного контроля параметров атмосферы, обсуждались методы измерения показателей турбулентности. Показано, что точность и высокое разрешение навигационных СР на базе ГЛОНАСС/GPS позволяют получать такие оценки, но требуется разработать соответствующие алгоритмы, провести комплексные испытания. Доработка программного обеспечения АПК АССОиХД, в том числе включение в АПК «Глобальной справочной модели атмосферы», позволит создать новую гибкую технологию получения и обработки данных о параметрах атмосферы для обеспечения пусков РКН.

Список литературы

1. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / под ред. В. Э. Иванова. Екатеринбург : УрО РАН, 2004. 596 с.
2. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России / В. Э. Иванов, А. В. Гусев, К. А. Игнатков [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 9. С. 3–49.
3. Novius W., Monna W. A., Rothe R. A. A comparison of radiosonde windfinding methods OMEGA, LORAN-C, and GPS // Instruments and observing methods. 1998. Report № 70. WMO/TD-№ 877.
4. Плохих О. В., Иванов В. Э. Некоторые результаты разработки системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных платформ GPS — ГЛОНАСС // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2009. Вып. 6 (тематический выпуск «Широкополосные сигналы и системы»). С. 66–74.
5. Структурная схема, тактико-технические характеристики и основные особенности функционирования навигационной системы радиозондирования атмосферы «Полюс» / Н. В. Ширшов, О. В. Плохих, О. А. Черных [и др.] // Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / под общ. ред. С. С. Суворова. СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2012. Т. 1. 432 с. С. 136–142.
6. Результаты испытаний навигационной системы радиозондирования атмосферы «Полюс» на полигоне Байконур / Н. В. Ширшов, С. А. Курташкин, В. Э. Иванов [и др.] // Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / под общ. ред. С. С. Суворова. СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2012. Т. 1. 432 с. С. 269–275.
7. Плохих О. В. Повышение эффективности оценки скорости ветра в системах радиозондирования атмосферы // 25-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015) (Севастополь, 6–12 сентября 2015 г.) : матер. конф. в 2 т. Севастополь, 2015. С. 1194–1195.
8. Плохих О. В., Гусев А. В., Кудинов С. И. Моделирование цифрового радиоканала навигационной системы радиозондирования атмосферы // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017) (Севастополь, 10–16 сентября 2017 г.) : рефераты докладов. Москва ; Минск ; Севастополь, 2017. Т. 7. С. 1548–1554.

9. Натурные измерения ветрового поля с помощью радиолокационных станций КА диапазона и интерпретация сложных сигналов / А. Г. Горелик, Д. В. Ермилов, В. М. Калмыков ; под ред. Ю. В. Кулешова // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. Выпуск 653. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. С. 151–154.

10. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов / В. С. Ефремов, Б. М. Вовшин, И. С. Вылегжанин [и др.]. Журнал радиоэлектроники. 2009. № 10.

11. Обухов А. М. Турбулентность и динамика атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. 413 с.

References

1. Ivanov V. E., Fridzon M. B., Essjak S. P. *Radiozondirovanie atmosfery. Tehnicheskie i metrologicheskie aspekty razrabotki i primenenija radiozondovyh izmeritel'nyh sredstv* [Upper-air sounding. Technical and metrological aspects of development and application of radiosonde measuring means], Yekaterinburg, UrO RAN, 2004, 596 p. (In Russian).

2. Ivanov V. E., Gusev A. V., Ignatkov K. A., Kudinov S. I., Malyigin I. V., Noskov V. Ya., Plohih O. V., Ryisev V. V., Chernyih O. A. [Current Status and Development Prospects of Atmosphere Radio Sensing Systems in Russia]. *Uspehi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern electronic engineering], 2013, no. 9, pp. 3–49. (In Russian).

3. Hovius W., Monna W. A., Rothe R. A. A comparison of radiosonde windfinding methods OMEGA, LORAN-C, and GPS, *Instruments and observing methods*, 1998, report № 70, WMO/TD- № 877.

4. Plokhikh O. V., Ivanov V. E. [Some results of development of the upper-air sounding system based on the satellite navigation GPS-GLONASS platforms]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radioelektronika*, 2009, vol. 6, pp. 66–74. (In Russian).

5. Shirshov N. V., Plokhikh O. V., Chernykh O. A., Ivanov V. E., Surkov D. V. [Block diagram, performance characteristics and main operation features of Polyus navigational upper-air sounding system] (ed. by S.S Suvorov). *Trudy II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy"*. Saint Petersburg, VKA imeni A. F. Mozhaiskogo, 2012, vol. 1, pp. 136–142. (In Russian).

6. Shirshov N. V., Kurtashkin S. A., Ivanov V. E., Plokhikh O. V., Chernykh O. A. [Test results of the "Polyus" navigational upper-air sounding system at the Baikonur] (ed. by S.S Suvorov). *Trudy II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy»*. Saint Petersburg, VKA imeni A. F. Mozhaiskogo, 2012, vol. 1, pp. 269–275. (In Russian).

7. Plokhikh O. V. [Efficiency increase of the wind velocity estimation in the upper-air sounding systems]. *25th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"* (CriMiCo'2015). Sevastopol, 2015, pp. 1194–1195. (In Russian).

8. Plokhikh O. V., Gusev A. V., Kudinov S. I. [Modeling of a digital radio channel of the navigational upper-air sounding system]. *27th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"* (CriMiCo'2017). Sevastopol, 2017, vol. 7, pp. 1548–1554.

9. Gorelik A. G., Ermilov D. V., Kalmykov V. M., Kononov M. A., Kulikovskii K. V., Sterlyadkin V. V., Khomyakov A. V., Shirshov N. V. Wind field in-situ measurements by means of the Ka-range radar stations and interpretation of compound signals. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo*. Vypusk 653. Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy (ed. by Yu. V. Kuleshova). Saint Petersburg, VKA im. A. F. Mozhaiskogo, 2016, pp. 151–154. (In Russian).

10. Efremov V. S., Vovshin B. M., Vylegzhanin I. S., Lavrukevich V. V., Sedletskii R. M. Poliarizatsionnyi doplerovskii meteorologicheskii radiolokator S-diapazona so szhatiem impulsov [Polarization Doppler weather radar C-band with pulse compression]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2009, № 10.

11. Obukhov A. M. [*Turbulence and dynamics of the atmosphere*]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988, 413 p. (In Russian).

Информация об авторах

Олег Васильевич Плохих — старший преподаватель Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, г. Екатеринбург). Сфера научных интересов — системы радиозондирования атмосферы, цифровая обработка, радиолокация и радионавигация, средства связи.

Вячеслав Элизбарович Иванов — д-р техн. наук, профессор Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург). Сфера научных интересов — системы радиозондирования атмосферы, системы ближней радиолокации и связи, приемопередающие устройства СВЧ-диапазона.

Николай Васильевич Ширшов — канд. физ.-мат. наук, начальник Геофизического отдела Центра эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры (ФГУП «ЦЭНКИ») (Россия, г. Москва). Сфера научных интересов — ракетная техника и объекты космической наземной инфраструктуры, геофизическое и метеорологическое обеспечение пусков ракет космического назначения, системы метеорологического обеспечения.

Information about the authors

Oleg V. Plokhikh is a senior lecturer at the Institute of Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, Yekaterinburg. His research interests are upper-air sounding systems, digital processing, radiolocation and radio navigation, communication facilities.

Viacheslav E. Ivanov is a Doctor of Technical Sciences, professor of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin, Yekaterinburg. His scientific interests are upper-air sounding systems, near-field radiolocation and communication systems, microwave transceivers.

Nikolay V. Shirshov is a Candidate of Physical and Mathematical Sciences, head of the Geophysical department of the Center for Operation of Space Ground Based Infrastructure, Russia, Moscow. His research interests include rocketry and space ground based infrastructure, geophysical and meteorological support for space rocket carrier launches, meteorological support systems.