
АДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.371

КОМПЛЕКСИРОВАННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ АТМОСФЕРНЫХ ВЕЛИЧИН

С.И. БАБКИН, Г.В. ГРУША, И.А. ДЕЛОВ, Е.Г. ПРОШКИН

Представлены исследования реального комплексирования радиоэлектронных систем, содержащих акустический локатор в составе системы радиоакустического зондирования, для контроля метеорологических величин и параметров атмосферной турбулентности при различном уровне их вертикальной изменчивости и различной степени турбулентности атмосферы. Рассмотрены результаты влияния неоднородностей атмосферы и создания аппаратно-программного комплекса для автоматической обработки измеряемой информации, математического моделирования, испытания макетов и проведения натурных экспериментов.

The investigation of practical integration of radio electronic systems including the acoustic radar as a part of a radio acoustic system for monitoring of meteorological values and atmospheric turbulence parameters under a different level of their vertical variability and various extent of atmosphere turbulence are presented. The results of influence of atmospheric inhomogeneities and creation of hardware - controlled complex for automatic processing of measured information, computer modeling, patterns testing and natural experiments are considered.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектронные системы контроля атмосферных параметров для метеорологического прогнозирования на основе профилирования наземными аппаратными средствами могут стать источником информации как для экологического мониторинга атмосферы, так и для проектирования трасс радиорелейных линий прямой видимости и тропосферных радиорелейных линий. Для одновременного профилирования метеорологических величин и параметров турбулентности в последние годы внедряется комплексирование аппаратуры, реализованное в виде систем «ветровой профилиер – аппаратура радиоакустического зондирования» [1] и «содар – аппаратура радиоакустического зондирования» [2] для измерения профилей скорости ветра и температуры воздуха, а также их флуктуаций. В частности, принципы совмещения содара и системы радиоакустического зондирования (РАЗ) в одной установке начали разрабатываться в 80-е годы [3] для уточнения измерения температурных профилей и коэффициента поглощения звука [4]. В Проблемной лаборатории зондирования атмосферы ХНУРЭ создавалась и совершенствовалась комплексированная система содар-РАЗ, в которой было достигнуто совмещение зондирования этими средствами в пространстве и времени, поскольку регистрируется каждый акустический импульс, отражаемый турбулентностью, который сам является отражателем для радиоволн системы РАЗ. Первая реализация системы имела целью введение данных о скорости вертикальных потоков воздуха в

процесс восстановления температурных профилей [5]. Позже в состав системы был введен двухчастотный акустический локатор для измерения еще одной важной метеовеличины – атмосферной влажности. Такое совмещенное в пространстве и времени профилирование трех метеовеличин возможно на основе разностно-фазового метода, базирующегося на использовании дисперсии скорости звука во влажном воздухе [6]. В работах авторов [7] были созданы теоретические соотношения фазового метода и проведено их подтверждение в натурных экспериментах.

Цель статьи – обобщение результатов усовершенствования методик совмещенного зондирования для профилирования нескольких метеорологических величин и турбулентных параметров атмосферы с учетом их взаимного влияния.

1. АППАРАТУРА КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СОДАР-РАЗ

Структурная схема первой реализации комплекса аппаратуры совмещенного зондирования для измерения профилей вертикального компонента скорости ветра и температуры воздуха с учетом этого компонента [5] изображена на рис. 1.

Данный комплекс включает в себя систему РАЗ температурного зондирования (блок 1), акустический локатор для измерения скорости вертикальных потоков воздуха (блок 2) и блок 3 обработки и представления измеряемых данных комплекса на базе ПК. Доплеровский радиолокатор системы РАЗ (блок 1) работает

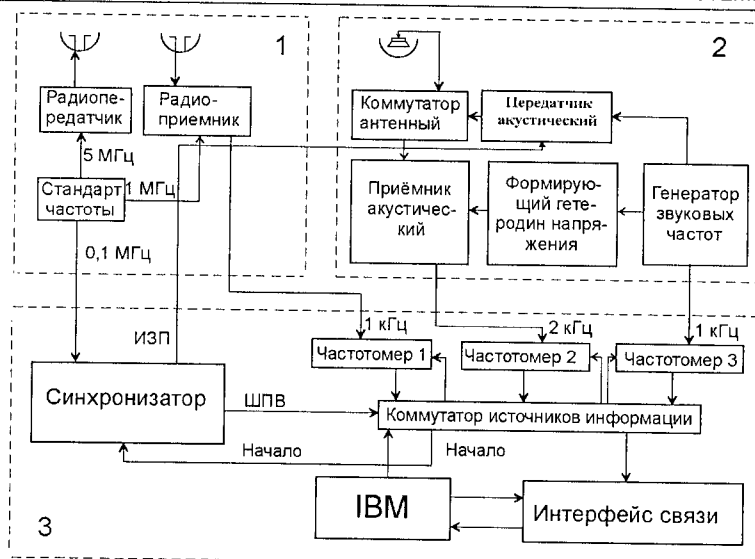


Рис. 1. Структурная схема комплексированной системы содар-РАЗ для уточненного профилирования температуры воздуха

на частоте 440 МГц. Радиопередатчик функционирует в соответствии с принципом переноса стабильных высокочастотных колебаний опорного (стандарт частоты) генератора в СВЧ-диапазон, выходная электрическая мощность передатчика – 5 Вт. Чтобы обеспечить возможность регистрации вертикальных профилей температуры воздуха в нижней части пограничного слоя, передатчик радиолокатора работает в режиме непрерывного излучения радиоволн. В состав радиоприемника с «нулевой» промежуточной частотой входят антенный усилитель радиочастоты, двухдиодный смеситель и усилитель доплеровской частоты, чувствительность приемника в полосе 300 Гц составляет около 1 мкВ. Средняя рабочая частота акустического локатора (блок 2) равна 1 кГц. Электрическая мощность акустического передатчика – 100 Вт, режим работы – импульсный (длительность импульса составляет 50–70 мс). Особенностью работы акустического локатора при совмещении его с аппаратурой РАЗ является необходимость перестройки частоты звукового генератора для поддержания условия Брэгга с целью сохранения высокой эффективности РАЗ при суточных и сезонных изменениях температуры воздуха, в то время как для точных измерений доплеровского сдвига частоты отраженных акустических сигналов частоту этого генератора необходимо стабилизировать, например, с помощью кварцевого резонатора. В данной разработке приемник содара построен по известному принципу стабилизации промежуточной частоты. Чувствительность акустического приемника составляет 0,5 мкВ в полосе частот 20 Гц. В блок обработки данных 3 входят: синхронизатор, измерительная аппаратура (три частотомера), коммутатор источников измеряемой информации, персональный компьютер с интерфейсом связи. Синхронизатор в схеме на рис. 1 позволяет задавать период зондирования (2 с), шаг регистрации информации по высоте – через 34 м при радиоакустическом зондировании и через 17 м при акустическом зон-

дировании, а также очередность передачи данных зондирования от источников информации в ПК.

Антенное устройство комплекса включает в себя передающую и приемную антенны радиоканала, разнесенные на 5 м и экранированные друг от друга, а также приемно-передающую акустическую антенну с защитной шахтой, которая размещена между антеннами радиоканала. В качестве антенн для обоих локаторов использованы длиннофокусные параболические зеркала диаметром 1,8 м.

Во второй реализации этого комплекса для синхронного измерения влажности воздуха вертикальным зондированием акустический локатор должен был работать в двухчастотном режиме, поэтому в структурную схему были включены делитель частоты акустического сигнала, а также цифровой импульсный фазометр и блок умножителей частоты в составе регистрирующей аппаратуры. Для измерения акустическим локатором относительных изменений амплитуды звуковых эхо-сигналов, принятых на двух частотах, схема также содержит амплитудный регистратор, содержащий АЦП. Основные технические параметры комплекса:

- частота доплеровского радиолокатора 440 МГц;
- выходная электрическая мощность передатчика 5 Вт;
- чувствительность приемника радиоканала 1 мкВ;
- диаметр зеркальных параболических радиоантенн 1,8 м;
- разнос между антеннами радиоканала 5 м;
- частоты акустического локатора 1 и 4 кГц;
- диаметр акустической антенны с параболическим отражателем 1,85 м;
- период зондирования 2 с;
- электрическая мощность акустического передатчика (в импульсе) 100 Вт.

Структурная схема данной радиоэлектронной системы приведена на рис. 2.

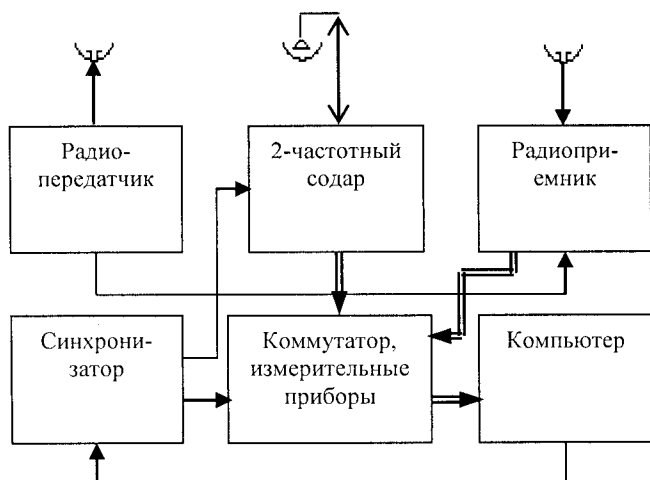


Рис. 2. Структурная схема комплексированной радиоэлектронной системы для профилирования температуры и влажности воздуха

Изображенные на рис. 2 радиопередатчик и радиоприемник входят в состав системы РАЗ, имеющей такое же устройство, как на рис. 1. Данная радиоэлектронная система имеет тот же принцип работы: система РАЗ — бистатическая, работает в режиме непрерывного излучения радиоволн, акустический локатор — моностатический, работает в импульсном режиме. Основные отличия системы от изображенной на рис. 1 состоят в следующем. В состав передающего устройства акустического канала входит кроме перестраиваемого генератора звуковых частот делитель частоты. Обработывающая аппаратура состоит из модернизированной регистрирующей аппаратуры (содержит кроме трех частотомеров цифровой импульсный фазометр с блоком умножителей частоты и АЦП), а также адаптированного к данной задаче коммутатора источников информации, синхронизатора излучения и регистрации импульсов акустических волн двух частот, персонального компьютера и встроенной платы интерфейса связи источников информации с компьютером. При длительности акустических импульсов 70 мс шаг регистрации информации — 17 м для выходных данных акустического зондирования и 34 м — для выходных данных системы РАЗ.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БАЗИС МЕТОДА ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Теоретические основы профилирования комплексированной радиоэлектронной системой содар-РАЗ представляют собой объединение теоретических разработок хорошо известного способа восстановления температуры воздуха по данным о скорости звука, измеренной доплеровской системой РАЗ, и фазового способа измерения влажности воздуха двухчастотным содаром при вертикальном излучении акустических волн.

В ряде работ, принятых во внимание при комплексировании, была отмечена важность поправки на скорость вертикальных потоков воздуха [8] при измерении его температуры T с требуемой точностью 0,1...0,3 К. Поскольку скорость звука C , вычисляемая по доплеровским сдвигам радиочастоты сигналов РАЗ, зависит от скорости этих потоков согласно известной формуле:

$$C = 20,0789\sqrt{T}(1 + 0,14e/P) + W, \quad (1)$$

где e — парциальное давление водяного пара, P — атмосферное давление, погрешность измерения температуры воздуха σ_T , равная

$$\sigma_T^2 = \left(\frac{2T\sigma_C}{C} \right)^2 + \left(\frac{2T\sigma_W}{C} \right)^2,$$

чувствительна к малым вариациям скорости звука.

Теоретические соотношения восстановления влажности воздуха на основе измеренных значений фазовых сдвигов принимаемых акустических волн наиболее полно изложены в [7]. В основе метода — максимальное выделение эффекта дисперсии скорости звука в значениях разностей фаз акустических волн двух кратных частот f_1 и f_2 , накапливающихся на пути распространения акустических волн от излучателя до приемника $2Z$, где Z — высота отражающей области:

$$\Delta\varphi = 4\pi fZ \left(\Delta C / C^2 \right) (1 + 2W/C), \quad (2)$$

где $\Delta C = C_2 - C_1$; f — большая из частот (на выходе акустического приемника проводится целочисленное преобразование сигнала меньшей частоты). Разность скоростей звука ΔC , зависящая от релаксационной частоты влажного воздуха f_p , является очень малой величиной (согласно численным оценкам авторов — порядка 0,1–0,001 м/с в зависимости от температуры, влажности воздуха и акустических частот в диапазоне 1–20 кГц). Однако на основе известной эмпирической формулы [6, 7]:

$$f_p = 3,06 \cdot 10^4 h^{1,3}, \text{ Гц}, \quad (3)$$

где $h = \left(\frac{e}{P} \right) 100\%$ — молярная концентрация водяного пара, удалось доказать, что разность акустических фаз $\Delta\varphi$ содержится в пределах от 0,001 до 0,7 °м (в зависимости от температуры и влажности на частотах 1 и 4 кГц, например), допускающих возможность ее экспериментальной регистрации при зондировании на высотах приземного и пограничного слоев. На рис. 3 изображена зависимость разности фаз акустических волн $\Delta\varphi$, °/м, приходящейся на 1 м, на частотах зондирования 1 и 4 КГц от температуры воздуха (указана справа над кривыми в градусах Цельсия) и относительной влажности воздуха $H, \%$.

Ожидаемая аппаратурная точность фазового метода профилирования влажности воздуха при аппаратурной погрешности измерения скорости звука $\sigma_C/C \approx 10^{-3}$, погрешности регистрации частоты принимаемой радиоволны $\sigma_f/f \approx 10^{-4}$ в диапазоне частот акустического зондирования 1...15 кГц характеризуется соотношением:

$$\sigma_H/H \approx 0,385R \left[\left(\frac{\sigma_Z}{Z} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta\varphi}}{\Delta\varphi} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где $R=1$ при росте температуры воздуха, когда релаксационные частоты много больше зондирующих.

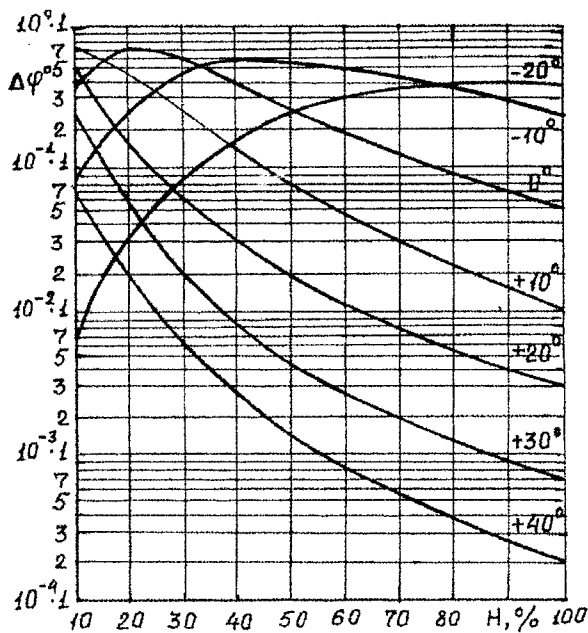


Рис. 3. Дисперсионная разность фаз акустических волн на частотах 1 и 4 кГц

График зависимости относительной аппаратурной погрешности σ_H / H измерения относительной влажности воздуха акустическим зондированием по разности фаз на частотах 1 и 4 кГц от относительной влажности воздуха $H, \%$ при нескольких значениях температуры воздуха (указаны над кривыми) приведен на рис. 4.

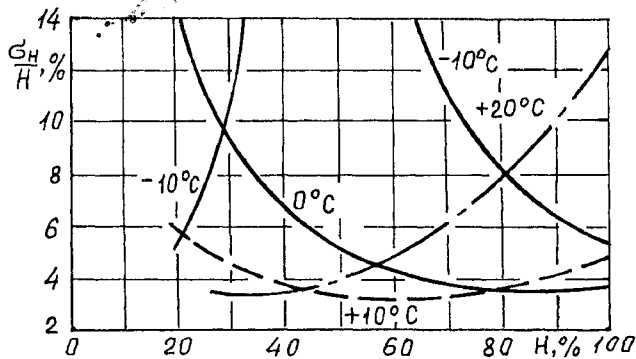


Рис. 4. Относительная аппаратурная погрешность измерения относительной влажности воздуха

Результаты численных оценок, представленные на рис. 3 и 4, свидетельствуют о том, что на основе изложенной теории профилирование влажности воздуха фазовым методом возможно при некоторых упрощающих условиях (вертикальная однородность атмосферы, температура воздуха $0...+20^\circ\text{C}$, развитие атмосферной турбулентности не разрушает фазовую структуру распространяющейся акустической волны в излучаемом и отраженном сигналах) и достаточно точной информации о скорости звука в зондируемом слое.

3. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ТУРБУЛИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Влияние атмосферной турбулентности на точность измерения выходных метеопараметров комплексиро-

ванной системы можно рассмотреть независимо для радиоакустического и акустического сигналов. По мере развития степени турбулизации атмосферы растет уровень акустического эхо-сигнала, что позволяет проводить более точные измерения структурных функций флуктуаций температуры воздуха. Иначе влияет рост степени турбулизации атмосферы на точность измерения метеорологических характеристик. Так, по оценкам, приведенным в [4], среднее значение доплеровского сдвига радиочастоты системы РАЗ пренебрежимо мало изменяется под влиянием нарушения когерентности фазовой поверхности акустической волны в турбулентной среде. Позже, однако, было обосновано появление турбулентной погрешности температуры воздуха, измеренной доплеровскими системами РАЗ, под влиянием роста средней скорости звука в турбулентной среде и флуктуаций скорости ветра (обзор данных работ приведен в [8]). В Лаборатории зондирования атмосферы ХНУРЭ было проведено математическое исследование погрешности измерения влажности воздуха вертикальным двухчастотным акустическим зондированием в зависимости от степени турбулизации атмосферы. Ранее подобные исследования, которые показали преимущество фазового метода в точности перед амплитудным методом, проводились для профилирования температуры и влажности воздуха двухчастотной системой радиоакустического зондирования [9]. Теоретические расчеты погрешностей измерения влажности воздуха амплитудным радиоакустическим методом показали существенное влияние локально-изотропной атмосферной турбулентности, связанное с нарушением поперечной когерентности фазовой поверхности акустических волн. Поэтому для двухчастотной комплексированной системы вертикального зондирования с измерением влажности воздуха по дисперсионной разности фаз акустических волн были детально рассмотрены следующие источники погрешностей: накопление деформаций фазового фронта вдоль всего пути распространения акустических волн, турбулентные флуктуации скорости звука и их корреляции с флуктуациями фазового фронта акустических волн, а также влияние обратного рассеяния отражающим турбулентным слоем с флуктуациями скорости вертикальных потоков воздуха, приводящее к возникновению спектра частот в акустических эхо-сигналах. При выводе формул для акустических пучков использовались математические методы теории распространения ограниченного гауссова пучка в турбулентной среде со спектром Кармана, развитые для оптических волн [10]. Предполагалось гауссово распределение флуктуаций скорости звука и сдвига фаз при условии их малости. В результате теоретического исследования, выполненного на основе формулы восстановления влажности, полученной авторами, турбулентная погрешность измерения относительной влажности H данной системой определяется выражением:

$$\left(\frac{\sigma_H}{H}\right)^2 = \left(\frac{0,38}{\Delta\phi}\right)^2 \langle \Delta\phi^2 \rangle + 0,89 \langle \Delta\phi C' \rangle + \left(\frac{1,1}{C}\right)^2 \langle C^2 \rangle,$$

где среднеквадратичные флуктуации разности фаз в распространяющейся вперед акустической волне согласно методу плавных возмущений ограничены соотношениями:

$$\langle \Delta\phi^2 \rangle \leq 3,64 \cdot 10^{-2} C_n^2 L_0^{5/3} (\Delta\phi)^2 / Z,$$

$$\frac{\langle \Delta\phi C' \rangle}{\langle \Delta\phi C \rangle} = -1,2 \frac{\langle \Delta\phi^2 \rangle}{\Delta\phi^2}.$$

Здесь C_n^2 — структурная характеристика флуктуаций коэффициента преломления акустических волн, L_0 — внешний масштаб мелкомасштабной изотропной турбулентности.

Для турбулентной погрешности, возникающей при обратном рассеянии акустических волн, получено соотношение:

$$\sigma_H / H = 0,385 \frac{\sqrt{\langle \Delta\phi^2 \rangle}}{\Delta\phi_0},$$

где $\frac{\langle \Delta\phi^2 \rangle}{\Delta\phi_0^2} \approx \frac{\Delta f_C^2}{f_0^2}$. Здесь Δf_C — эффективная среднеквадратичная ширина спектра, $\Delta\phi_0$ — дисперсионная разность фаз акустических волн на центральной частоте f_0 спектра принятого акустического сигнала после целочисленного преобразования частоты в приемнике.

Численные оценки, проведенные для высот приземного слоя (до 200 м) на основе известных эмпирических высотных зависимостей структурных функций флуктуаций температуры воздуха и абсолютной величины вектора скорости ветра V :

$$C_T^2 = 2,9Z^{-4/3}, C_V^2 = 0,04 + 0,33Z^{-2/3},$$

где расстояние Z , на котором оцениваются структурные функции, измеряется в метрах, позволяют утверждать, что относительная среднеквадратическая турбулентная погрешность измерения влажности составляет: $\sigma_H / H \leq 0,6\%$ — за счет нарушения поперечной когерентности фазового фронта и флуктуаций скорости звука; $\sigma_H / H \leq 0,4\%$ — за счет обратного рассеяния турбулентными флуктуациями температуры воздуха по эмпирическим данным о ширине спектра частот. Рост суммарной турбулентной погрешности при росте высоты двухчастотного акустического зондирования очень медленный, определяется скоростью роста внешнего масштаба турбулентности. Причина такой медленной зависимости состоит в том, что среди рассмотренных четырех источников турбулентной погрешности на больших высотах доминируют флуктуации скорости звука, в результате чего на пути распро-

странения акустических волн до отражателя и обратно $2Z$ выполняется соотношение:

$$\sigma_H / H = 1,15 \sqrt{\langle C^2 \rangle} / C^2 = 1,63 \sqrt{C_n^2} L_0^{1/3},$$

где $\langle C^2 \rangle = 2C_n^2 C^2 L_0^{2/3}$.

В тропосфере $L_0 \leq 100$ м и при зондировании до высот 1000 м турбулентная погрешность может возрасти в 1,4 раза, оставаясь менее 1 %.

4. ЗОНДИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТОВ МЕТЕОВЕЛИЧИН

Учет вертикальной изменчивости температуры и влажности воздуха весьма важен при создании методики измерений фазовых сдвигов и их обработки, поскольку должны измеряться очень малые разности акустических фаз. Важность подобного уточнения подтверждается эмпирическими и расчетными оценками. Так, при сухадиабатическом градиенте температуры воздуха вариация скорости звука на высоте 100 м составляет $\delta C \approx 0,6$ м/с, превышая дисперсионную разность скоростей звука $\Delta C \approx 0,12$ м/с (при температуре воздуха $+20$ °С). Еще большее превышение может наблюдаться в неустойчиво стратифицированной атмосфере или при сильных температурных инверсиях. В статье [11] дан последовательный вывод соотношений для фазовой поверхности акустических волн с учетом молекулярной релаксации и вертикальной изменчивости метеопараметров в атмосферном пограничном слое, основанный на следующих результатах. Процесс молекулярной релаксации в акустической волне является адиабатическим [6]. Если атмосфера горизонтально однородна и изменчива только в вертикальном направлении, при вертикальном излучении акустических волн не происходит поворот нормали к их фазовой поверхности и уравнение эйконала сводится к линейному дифференциальному уравнению $\frac{d(\phi/k)}{dZ} = \frac{C}{C+W}$. Представление для двухчастотной разности фаз акустических волн в виде интеграла вдоль пути распространения преобразовано к сумме интегралов вдоль слоев воздуха малой толщины ΔZ_i с линейным разложением фазовой скорости звука в слое с градиентом $\frac{dC}{dZ} = \gamma_C + \gamma_W$. Применяя таким образом метод геометрической акустики в условиях молекулярной релаксации, можно получить рекуррентные соотношения, определяющие разность набегов акустических фаз между соседними слоями, находящимися на расстоянии ΔZ :

$$\Delta\phi_{i+1} - \Delta\phi_i = 4\pi f \frac{\Delta Z_i}{C_i^2} (1 - \beta_i) \Delta C_i. \quad (4)$$

Здесь β_i линейно зависит от ΔZ_i с коэффициентом, определяемым градиентами температуры γ_T , влажности γ_e и скорости ветра γ_W , от которых зависят градиенты скорости звука γ_C и $\gamma_{\Delta C}$:

$$\beta_i = \frac{\Delta Z_i}{2} \left(\frac{2\gamma_C}{C} + \frac{2\gamma_W}{C} - \frac{\gamma_{\Delta C}}{\Delta C} \right), \quad (5)$$

где ΔC_i — разность скоростей звука двух частот в i -м слое. В результате применения соотношений молекулярной релаксации и формулы Лапласа зависимость коэффициентов рекуррентных соотношений (4) от градиентов метеорологических параметров при частотах релаксации, значительно превышающих частоты зондирования, имеет вид:

$$\beta_i = \frac{\Delta Z_i}{2} \left(\frac{\gamma_T}{T} \left(\frac{5}{2} - \frac{\Theta}{T} \right) + \frac{2\gamma_W}{C} + 2,6 \frac{\gamma_h}{h} \right),$$

где Θ — характеристическая температура воздуха.

В частности, зависимость коэффициента β_i от градиента температуры воздуха была оценена в виде

$\beta_i = 20 \frac{\gamma_T}{T} \Delta Z_i$, а также получены численные оценки для слоя 17 м: $|\beta_i| \leq 4\%$ при градиентах температуры воздуха $\gamma_T \leq 3^\circ/100$ м в случае очень малых градиентов относительной влажности и $|\beta_i| \leq 20\%$ при $\gamma_e \leq 0,1 \text{ мб} \cdot \text{м}^{-1}$ [11]. Данные численные оценки представляют интерес при планировании экспериментальных исследований сильных температурных инверсий и структур приморского тумана.

Применение алгоритма обработки экспериментальных данных по слоям, дополненное практически градиентными измерениями температуры воздуха и вертикальной скорости ветра, должно обеспечить приемлемую точность измерений в вертикально изменчивой (в том числе стратифицированной) атмосфере, поскольку исключается накопление подобной погрешности вдоль всего пути зондирования.

5. УТОЧНЯЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика профилирования комплексированной радиоэлектронной системой содар-РАЗ, охарактеризованной в п. 2, состоит в импульсном излучении акустических волн двух кратных частот, непрерывном излучении радиоволн на одной из частот, измерении доплеровских сдвигов частоты отраженного атмосферной турбулентностью акустического сигнала и его амплитуды, а также в измерении доплеровских сдвигов частоты радиосигнала, отраженного волновым фронтом акустической волны, и измерении разности фаз между принятыми акустическими сигналами двух кратных частот при вертикальном зондировании. Уровни высоты при профилировании задаются длиной акустического импульса, периодом запуска измерительной аппаратуры в цикле измерений, длительностью работы частотомера и временем задержки при запуске акустического импульса [5]. На основе компьютерной обработки данных измерительных приборов согласно

разработанному для комплексного эксперимента алгоритму восстанавливаются значения скорости звука, вертикального компонента скорости ветра, температуры воздуха и его влажности в каждом слое зондирования в реальном масштабе времени. Значения структурной характеристики флуктуаций температуры воздуха восстанавливаются известным способом на основе данных амплитудного регистратора. В процессе отладки экспериментальной методики в радиоканале проводилось компьютерное моделирование доплеровского сдвига радиочастоты при изменении температуры и влажности в диапазоне наблюдаемых в атмосфере значений.

Алгоритм восстановления температуры воздуха без учета поправки на скорость ветра по результатам измерения доплеровского сдвига частоты отраженного радиосигнала при вертикальном зондировании бистатической радиоакустической системой известен и был реализован в автоматизированном обрабатывающем комплексе, разработанном в лаборатории ранее [12]. Для сокращения счетного времени при каждом обращении в программном комплексе к формулам восстановления представляется полезным преобразовать формулу восстановления абсолютной температуры воздуха в неподвижной атмосфере к более простому виду, не содержащему тригонометрических функций от обратных тригонометрических функций высоты:

$$T = 286,7351 \cdot 10^6 A \left[1 + (\rho_0 / Z)^2 \right] / T_D^2, \quad (6)$$

где T_D , в мкс — период доплеровского сдвига частоты сигнала в радиоприемном устройстве; ρ_0 — расстояние между акустической антенной и радиоприемной антенной; коэффициент A указан на основе вычислений повышенной точности [4]:

$$A = \frac{3 + e/P}{(1 + 0.378e/P)(3 + 0.714e/P)}.$$

Входящий далее в качестве поправки к значениям температуры воздуха, вычисленным по формуле (6), вертикальный компонент скорости атмосферного ветра W задается известным выражением

$$W = \frac{1}{2} C f_D T_u \cdot 10^{-6}, \quad (7)$$

где T_u , в мкс — период высшей частоты акустических волн, излучаемых при зондировании; f_D — доплеровский сдвиг частоты принимаемой акустической волны в Гц, вычисляемый по данным нескольких частотомеров с учетом нестабильности частоты перестраиваемого генератора, требующейся для подгонки частоты под условие Брэгга [4, 5]; C — скорость распространения акустических волн, которая может быть выбрана по данным измерения температуры воздуха наземным термометром или системой радиоакустического зондирования в том же слое. Скорость звука в атмосфере

с ветровыми движениями воздушных масс при бистатическом радиоакустическом зондировании можно вычислить по экспериментальным значениям доплеровских сдвигов радиочастоты $1/T_D$ и известной формуле для доплеровского смещения частоты зеркально отраженного акустическим пакетом радиосигнала, в результате чего:

$$C = \lambda \cdot 10^6 \sqrt{1 + (\rho_0 / Z)^2} / T_D,$$

где λ — длина радиоволны; T_D в мкс.

В результате, исходя из кажущейся температуры воздуха T , определенной по формуле алгоритма (6), и соотношения (1), в котором учтена формула Лапласа для скорости звука, был определен алгоритм вычисления температуры T_w , в котором учитываются вертикальные движения воздушных масс:

$$T_w = T - W \sqrt{T} / B + (W / 2B)^2, \quad (8)$$

где $B = 10,0395(1 + 0,14e/P)$.

Основным отличием разработанной комплексированной системы является возможность на основе полученных значений скорости вертикальных потоков воздуха W , отобранных через один уровень, а также скорости звука C и уточненной температуры воздуха T_w , используемых как входные параметры для обработки результатов, полученных с помощью двухчастотной моды акустического локатора, определить относительную влажность воздуха в слое зондирования H по формуле:

$$H = 3,54 \cdot 10^{-4} \frac{e_{\text{нас}}}{P} \left[Q + \sqrt{Q^2 - f_1^2 f_2^2} \right]^{0,385}, \quad (9)$$

где $e_{\text{нас}}$ — упругость насыщенного водяного пара; Q зависит от обеих акустических частот и величины $S = \pi f Z \epsilon / C \Delta \phi$, где ϵ — релаксационная сила [6]:

$$Q = \frac{f_1^2 + f_2^2}{2} - S(f_2^2 - f_1^2).$$

Полученные значения атмосферной влажности в слое зондирования могут использоваться как входные данные для уточнения коэффициентов A и B при обработке данных системы РАЗ для температурных измерений. Схема взаимного уточнения измеряемых параметров изображена на рис. 5.

Программный комплекс для автоматической обработки экспериментальных данных согласно изложенному алгоритму был составлен из двух модулей (управляющего и процедурного) на языке TURBO-Pascal, имеет общее название «ВИДОСМИ» (Ввод измеряемых данных, обработка и сохранение метеорологической информации), под которым прошел приемочные испытания в ХНУРЭ. Для получения информации от регистрирующей аппаратуры используется встроенный в программную оболочку язык ASSEMBLER.

Реализованный комплексный алгоритм предполагает измерение параметров принимаемых сигналов на каждом высотном уровне после очистки принимаемых сигналов от шумов и численной фильтрации. Для оценки влияния разброса входных данных обрабатываемого комплекса на среднеквадратичные отклонения температуры воздуха (с учетом коррекции скорости ветра) и влажности (с учетом коррекции температуры) проводилось компьютерное моделирование серии замеров. В процессе моделирования генерировались флуктуации периодов частотомеров в интервалах — до 20 мкс в излучаемом и до 5 мкс в принимаемых акустическом и радиосигналах. При этом в результате расчета мгновенных значений метеопараметров появлялись пульсации $W' \leq 1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; $T' \leq 2^\circ \text{C}$. Также генерировались значения фазовых сдвигов (на основе приземных данных $\Delta \phi_{i+1} - \Delta \phi_i = 2,4^\circ$ после приведения к рабочей частоте частотомера 32 кГц) с флуктуациями $\Delta \phi' \leq 0,6^\circ$. Пульсации относительной влажности при этом составляли 8 %. Приземные значения метеопараметров задавались в виде: температура воздуха — 15°C , относительная влажность — 90%, атмосферное давление — 1013 мб (условия стандартной атмосферы).

На основе формулы (8) среднеквадратичные отклонения уточненной температуры воздуха должны расти с ростом дисперсии скорости ветра:

$$\sigma_{T_w}^2 = \sigma_T^2 + (T_w - T)^2 (\sigma_w / W)^2.$$

Учитывая, что в АПС $|T_w - T| \leq 0,5^\circ \text{C}$ [8] при $\sigma_T \approx 1^\circ \text{C}$ увеличение дисперсии невелико, если $|\sigma_w / W| \leq 0,5$. Среднеквадратичные отклонения относительной влажности на пяти высотных уровнях приземного слоя при моделировании составляли около 5 %.

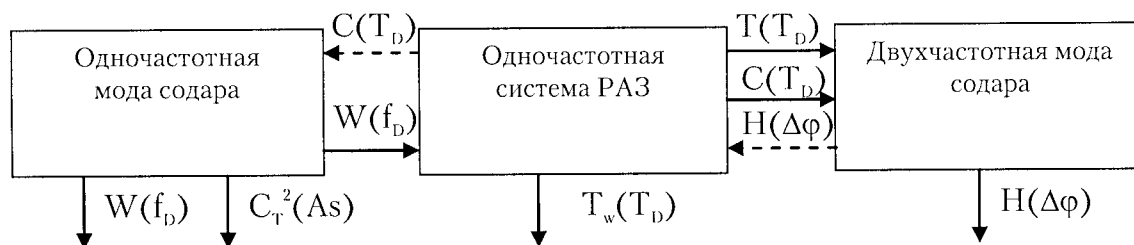


Рис. 5. Схема взаимного уточнения измеряемых параметров

6. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования возможности измерения температуры и влажности воздуха комплексированной аппаратурой содар-РАЗ проводились с целью решения двух вопросов: 1) подтверждение существования фазовых сдвигов при двухчастотном акустическом зондировании и сопоставление результатов их измерения с теоретически рассчитанными на основе формулы (2); 2) исследование пригодности наблюдаемых выходных параметров содара и системы РАЗ, комплексированных в единую систему, для взаимного уточнения измерений по схеме, изображенной на рис. 5. В обоих случаях основной задачей была многократная модернизация всего аппаратного комплекса.

Результаты натурных экспериментов по регистрации фазовых сдвигов (значений разностей фаз между слоями и гистограмм их распределений), проводившихся при двухчастотной моде работы акустического лоатора, кратко представлены в [7]. Средние значения фазовых сдвигов во всех экспериментах, проводившихся в разных погодных условиях и в разные сезоны года, имели устойчивый характер при методиках одновременного и последовательного измерения сдвигов фаз во времени, их дисперсия зависела от погодных условий и прохождения облаков над зондируемым слоем. Полученные реализации фазовременных характеристик содержали пульсации в пределах $0...360^\circ$ при начальном сдвиге фаз 150° , однако фазовые сдвиги не были распределены равномерно. На рис. 6 приведены гистограммы распределений фазовых сдвигов на высотах 34 и 51 м, построенные по результатам статистической обработки сдвигов фаз, зафиксированных в мае 1995 года в 22 часа.

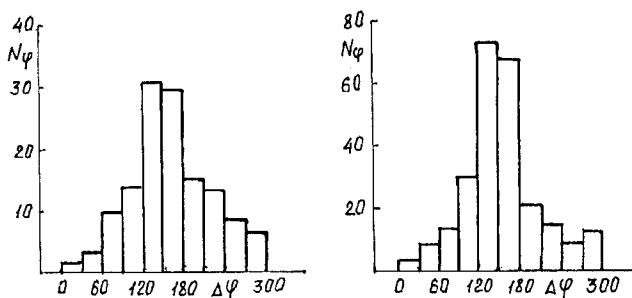


Рис. 6. Гистограммы распределений разностей фаз акустических волн

Эти и другие распределения фазовых сдвигов оказались близки к нормальным. Средние значения фазовых сдвигов качественно согласовывались с теоретическими значениями (например, в результате измерений, проведенных в мае 1995 г., $\Delta\varphi/\Delta Z \approx 4,5 \cdot 10^{-2}$ град·м⁻¹ при теоретическом значении $\Delta\varphi/\Delta Z \approx 10^{-2}$ град·м⁻¹). Такое совпадение теоретических и экспериментальных результатов следует признать удовлетворительным, поскольку при экспериментах в акустическом канале системы зондирования использовались данные приземных метеозмерений.

Натурные эксперименты второго типа с регистрацией данных синхронных измерений содара и РАЗ, комплексированных в единую радиоэлектронную систему, на нескольких уровнях высоты в приземном слое атмосферы проводились при отладке экспериментальной методики. В ходе экспериментов, проводившихся с 1999 г., основная трудность сводилась к поиску достаточного уровня сигнала обоих устройств. Трудность при зондировании комплексированной аппаратурой содар-РАЗ состоит в том, что с усилением турбулизации атмосферы принимаемый содаром сигнал возрастает, а принимаемый сигнал РАЗ ослабевает, поэтому серьезное внимание уделялось настройке антенной системы, снижению уровня паразитного сигнала и методам подстройки частоты излучаемого сигнала под условие Брэгга при температурном зондировании. Программа полевых испытаний аппаратуры радиоакустической системы включала оценку эффективности электромагнитных экранов: исследование влияния отдельных конструктивных элементов антенного устройства и местных предметов на результирующий уровень развязки приемной антенны от передающей; проверку достаточности энергетического потенциала доплеровского радиолоатора и мощности акустического передатчика для получения отраженного сигнала; оценку подавления акустических шумов звукозащитной шахтой.

Результаты испытаний в ходе натурального эксперимента одночастотной моды работы акустического лоатора комплексированной радиоэлектронной системы были, в основном, успешны. В благоприятных атмосферных условиях измерения скорости ветра акустическим лоатором давали мгновенные значения в пределах $|W| \leq 2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ с хорошей статистикой, средними значениями до $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и среднеквадратичными отклонениями до $0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, при этом соблюдалось условие $\sigma_W/W \leq 0,5$.

Результаты испытаний в ходе натурального эксперимента приемлемости данных температурного зондирования были весьма изменчивы. Поскольку в этом случае производились испытания синхронной работы всей комплексированной системы содар-РАЗ в одночастотном режиме, проверялась также правильность работы аппаратуры обрабатывающего комплекса, порядка подключения измерительных приборов и ввода измеряемых данных в программный комплекс, включающего проверку наличия каждого устройства и ожидание готовности каждого устройства, проверку появления фронта импульса запуска передатчика и шага по высоте. При проведении натурных экспериментов была предусмотрена возможность ввода оператором критериев отбора экспериментальных данных и выбора одного из трех режимов работы комплексированной системы (1 – измерения только вертикальной скорости ветра, 2 – измерения температуры воздуха с поправкой на скорость ветра и без нее, 3 – измерения влажности воздуха с учетом только приземной либо профилированной температуры воздуха). Серия измерений со-

стояла из ряда циклов, повторяющихся через 2 с (период запуска акустического генератора). В результатах натурных экспериментов анализировались как флуктуации трех метеорологических величин, так и их статистические моменты (средние значения и дисперсии флуктуаций). Статистическая обработка производилась в программном модуле.

После того как развязка антенн системы РАЗ после увеличения высоты электромагнитных экранов достигла ожидаемых значений, принимаемый радиосигнал регистрировался устойчиво, однако массивы значений периодов доплеровских сдвигов радиочастоты нередко содержали разброс, выходящий за пределы ожидаемого, с малой статистикой в полосе 5 мкс в цикле измерений. Несмотря на высокий уровень шумов в сигнале РАЗ при отладке после фильтрации удавалось получить значения температуры воздуха, качественно согласующиеся с приземными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические исследования возможности создания радиоэлектронных систем с совмещением в пространстве и времени вертикального профилирования трех метеорологических величин (температуры и влажности воздуха, скорости ветра) и их флуктуаций, аппаратные разработки, испытания макетов и проведение натурных экспериментов подтверждают практическую целесообразность данной задачи. Совмещение аппаратуры содар-РАЗ позволяет разрабатывать методику взаимного уточнения измеряемых профилей температуры и влажности воздуха, в том числе в стратифицированных слоях атмосферы, а также методику исследования других статистических моментов флуктуаций метеовеличин. Кроме того, экспериментальные данные комплекса содержат дополнительные параметры — скорость вертикальных потоков воздуха и амплитуды акустического эха, которые могут использоваться для восстановления вертикальных профилей турбулентных характеристик атмосферы.

Литература: 1. *Gorsdorf U., Lehmann V., Steinhagen H., and Ulrych P.* Availability of Wind and Temperature Profiles Measured with the 1290 MHz and 482 MHz Wind Profiler/RASS, COST-76 Profiler Workshop, May 12–16, 1997, Engelberg, Switzerland, Ext. Abstr., v. 2, p. 11–14. 2. *Peterman K. R., Frederick G. L., Zeigler G. S., and Millican R.* The Development of Mobile Radar/RASS Atmospheric Profiler Technology, опублик. там же, Ext. Abstr., v. 2, p. 132–134. 3. *Петенко И.В., Шурыгин Е.А.* Радиосодарный комплекс для дистанционных синхронных измерений скорости ветра, температуры и ее флуктуаций // Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1984. Т. 20, № 8. — С. 771–775. 4. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы, — М.: Наука, 1985. — 187 с. 5. *Babkin S.I., Delov I.A., Proshkin E.G.* Remote sounding means integration with a view to increase the air temperature measuring accuracy // Osterreichische Beitrage zu Meteorologie und Geophysik, 1998, Heft 17. 6. *Кнезер Г.* Релаксационные процессы в газах. В кн.: Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона, — М.: Мир, 1968. — Т. 2. — Ч. А. — С. 155–221.

7. *Babkin S.I., Grusha G.V., Delov I.A., and Proshkin Ye.G.* Measuring the Atmospheric Humidity by the Phase Shift-Depended Acoustic Sounding: Methods and Applicability Estimation // Telecommunications and Radio Engineering, 2001, v. 55, № 12, p. 17–26. 8. *Gorsdorf U.* The Accuracy of Temperature Measurements with RASS, COST-76 Profiler Workshop, May 12–14, 1997, Engelberg, Ext. Ab., v. 2, p. 231–234. 9. *Babkin S.I., Grusha G. V., Proshkin E. G.* The measurement of the air humidity by two – frequency radioacoustic sounding // 4-th Intern. Sympos. On Tropospheric Profiling. Ext. Abstr., 1998, v. 1, Snowmass, Colorado, USA. 10. *Лукин В.П., Миронов В.Л., Покасов В.В., Хмелевцев С.С.* Флуктуации фазы оптических волн, распространяющихся в турбулентной атмосфере // Радиотехника и электроника, 1975. — Т. 20. — № 6. — С. 1064–1070. 11. *Бабкин С.И., Груша Г.В., Прошкин Е.Г., Слипченко Н.И.* Некоторые исследования фазовой поверхности акустических волн для задач радиометеорологии // Радиотехника. — 2001. — Вып. 119. — С. 215–220. 12. *Бабкин С.И., Куценко В.И., Максимова Н.Г. и др.* Автоматизированная обработка данных при радиоакустическом зондировании пограничного слоя атмосферы // Проблемы контроля и защита атмосферы от загрязнения, 1986. — Вып. 12. — С. 29–32.

Поступила в редколлегию 08.04.2004



Прошкин Евгений Григорьевич, доктор технических наук, профессор, академик Академии наук Прикладной радиоэлектроники, профессор кафедры РЭС ХНУРЭ, научный руководитель ПНИЛ зондирования атмосферы. Область научных интересов: дистанционное зондирование атмосферы.



Бабкин Станислав Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры РЭС ХНУРЭ, заведующий ПНИЛ зондирования атмосферы. Область научных интересов: радиоакустическое зондирование атмосферы, тропосферные системы связи.



Груша Галина Валентиновна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ПНИЛ зондирования атмосферы ХНУРЭ. Область научных интересов: дистанционное зондирование атмосферы, рассеяние электромагнитных и акустических волн тропосферными неоднородностями, характеристики сигналов в системах связи и дистанционного зондирования.



Делов Иван Акиндинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ПНИЛ зондирования атмосферы ХНУРЭ, работает в области зондирования атмосферы (с 1958 г. — с помощью радиолокации метеорологических следов, с 1983 г. — с помощью акустического зондирования). Область научных интересов: исследование анизотропии атмосферных процессов.