

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

Одним из методов, развиваемых специалистами по радиометеорологии для получения сведений о вертикальном распределении метеовеличин в атмосфере, является радиоакустическое зондирование (РАЗ). К настоящему времени предложен целый ряд технологий извлечения информации об основных метеорологических величинах: скорости и направлении ветра, температуре и влажности воздуха. Такая информация об атмосфере и, особенно, о ее пограничном слое чрезвычайно важна для эффективного осуществления многих видов человеческой деятельности. Важными требованиями, предъявляемыми потребителями к современным средствам метеонаблюдений, являются их многофункциональность, достоверность, метрологическая обеспеченность, простота процесса зондирования, возможность широкой автоматизации измерений, невысокая стоимость. Несоответствие этим требованиям известных к настоящему времени технологий и средств РАЗ существенно задерживают внедрение радиоэлектронных дистанционных средств в практику метеонаблюдений.

Цель данной работы – поиск новых технологий получения метеоинформации методом РАЗ, в большей степени соответствующих указанным требованиям.

1. Наклонное зондирование

Метод радиоакустического зондирования с момента своего возникновения разрабатывался для дистанционного измерения скорости и направления ветра. Исходным способом измерения параметров ветра, который используется для разработки радиоакустических способов измерения ветра, явился известный метод Гринхау [1]. Ряд технологий многократного наклонного РАЗ для измерения параметров ветра, описание созданных для этого радиолокационных систем, а также результаты натурных экспериментов изложены в основательной монографии [2]. Упрощение технологии получения данных зондирования и алгоритмов их обработки может дать технология измерения горизонтальной скорости ветра в локальном объеме атмосферы, предложенная в работах [3 – 4]. Отличительной чертой нижней части пограничного слоя атмосферы является существование заметного сдвига ветра, большей частью за счет изменения (усиления) скорости ветра, а не его направления. Поэтому для измерения скорости ветра (особенно ее больших значений) в слое до 120 – 150 м возможно использование наклонного РАЗ атмосферы в одном направлении (по направлению ветра или против направления ветра). При двух наклонных зондированиях, выполненных в плоскости ветра, неопределенность в значении температуры воздуха в зондируемом слое исключается проведением наклонных зондирований в противоположных направлениях 1 и 2 (см. рис.1).

Известно, частота звуковых волн F' , распространяющихся вдоль трассы зондирования в направлении 2, с учетом доплеровского сдвига частоты под действием радиального (по лучу) ветра определяется выражением

$$F' = F + \frac{V}{\lambda}, \quad (1)$$

где F – частота излученных звуковых волн, V – радиальная скорость ветра, λ – длина звуковой волны.

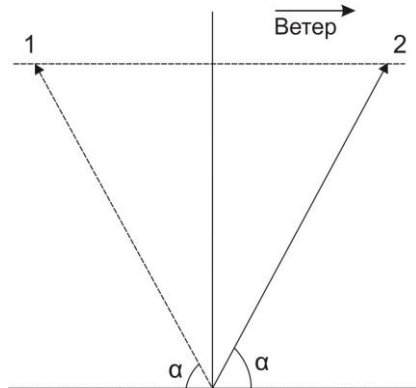


Рис. 1

первого порядка дифракции, используемого для лизации метода РАЗ, условие Вульфа – Брэгга при мальном падении радиоволн звуковые волны шется
где

$$\frac{\lambda_e}{2} = \lambda + \frac{V}{\lambda}, \quad (2)$$

λ_e – длина радиоволн.

В случае выполнения условия Вульфа – Брэгга частота звуковых волн, распространяющихся в атмосфере, равна значению доплеровского сдвига частоты принятых радиолокационных сигналов, т.е. $F' = F_d$. Используя это выражение и выражения (1) и (2), получим выражение для расчета горизонтальной скорости ветра в виде

$$W = \frac{\lambda_e}{2} \frac{F}{F_d} \frac{F_d - F}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

где α – угол места излучения звуковых и электромагнитных волн.

Оценки среднеквадратической относительной погрешности измерения скорости ветра с использованием рассматриваемой технологии зондирования, проведенные в соответствии с известными методиками (например, [5]) показывают, что ее значение при использовании обычной доплеровской схмотехники составляет около $\delta W \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$. Абсолютная погрешность измерения при скорости ветра 10 м/с имеет значение $\Delta W \approx 0,002$ м/с.

В работе [4] экспериментально подтверждена справедливость рассуждений, положенных в основу разработки технологии однократного наклонного зондирования для измерения горизонтальной скорости ветра. Рассмотренная технология может найти широкое применение для метеорологического обеспечения взлета и посадки самолетов (зондирование вдоль взлетно-посадочной полосы), поскольку удовлетворяет требованиям Комиссии ИКАО по необходимым высотам измерения (высоты 30, 60, 90, 120 и 150 м) и разрешающей способности измерения горизонтальной скорости ветра. Значения перечисленных тактических параметров можно достичь использованием сантиметровых систем РАЗ, имеющих приемлемые габаритные размеры и пригодных для размещения на летном поле аэропорта.

При технологиях наклонного зондирования атмосферы, предложенных для измерения параметров ветра, экспериментаторами использовалась или предлагается к использованию доплеровская обработка принятых радиосигналов: сначала выделяется доплеровский сдвиг частоты принятых сигналов в аналоговой форме, затем осуществляется оцифровка значений частоты Доплера (измерением или вычислением методом БПФ), далее производится расчет значений параметров ветра по алгоритмам, разработанным для каждой технологии.

2. Вертикальное зондирование

Основой разработки технологий дистанционной регистрации профилей параметров ветра при вертикальном РАЗ атмосферы стало осознание исследователями рассматриваемого метода того факта, что при отражении электромагнитных волн сферическими звуковыми волнами имеет место фокусирование отраженных волн на подстилающую поверхность в пятно некоторых размеров; размеры этого пятна определяются конкретными размерами антенн: радио (передающей и приемной) и акустической [7 – 9]. Горизонтальный ветер

сдвигает зондирующий пакет акустических волн параллельно подстилающей поверхности, вследствие чего пятно отраженных электромагнитных сигналов “блуждает” по этой поверхности. Различные способы отслеживания положения этого пятна на подстилающей поверхности и являются сущностью предлагаемых технологий и систем РАЗ.

В отличие от технологий наклонного зондирования для дистанционной регистрации вертикальных профилей параметров ветра, которые можно назвать частотными (по обрабатываемому параметру отраженных радиосигналов – частоты их доплеровского сдвига), технологии вертикального зондирования можно отнести к амплитудным. Информационным

параметром отраженных сигналов в данном случае является их амплитуда.

К настоящему времени известен ряд технологий РАЗ атмосферы, предложенных для определения метеовеличин вертикальным зондированием [10 – 13].

Применение распределенного акустического излучателя. Модификацией технологии измерения скорости ветра по измеренным значениям сдвига акустического излучателя [2] стало применение в системе РАЗ распределенного излучателя [14].

Рассмотрим нередкий случай существования в атмосфере сильного ветра, когда $W(R) \approx const$, а вертикальный градиент температуры воздуха $\gamma_T \approx 0$. В этих условиях смещение ветром пятна рассеянных сигналов можно вычислить по выражению

$$d \approx \frac{W_2 \cdot R}{C_a}. \quad (4)$$

Для двух фиксированных точек A' и A'' (см. рис.2) излучение акустических пакетов, разнесенных на расстояние d' , можно записать как

$$D_1 \approx \frac{W_2 \cdot r_1}{C_a} \quad \text{и} \quad D_2 \approx \frac{W_2 \cdot r_2}{C_a}. \quad (5)$$

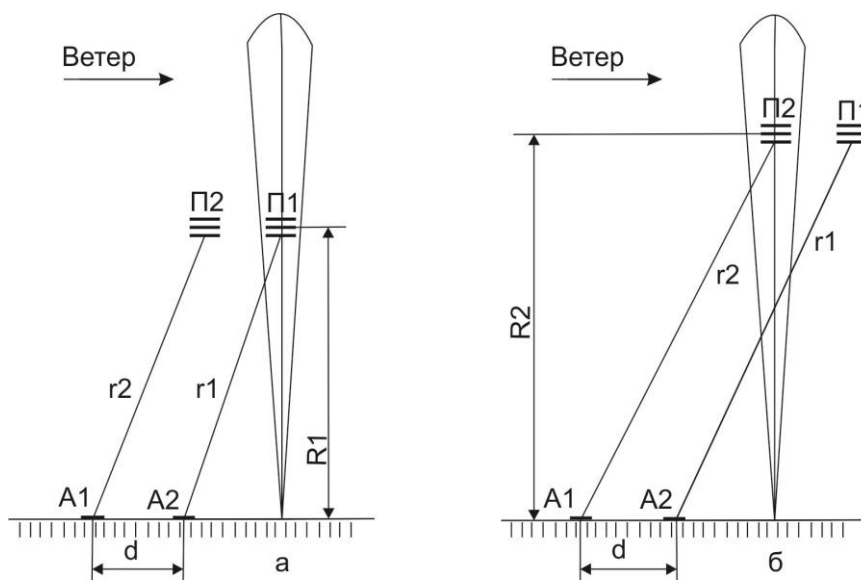


Рис. 2

Решая (5) относительно горизонтальной скорости ветра, найдем, что

$$W_2 = \frac{D_2 - D_1}{r_2 - r_1} C_a = \frac{d'}{r_2 - r_1}. \quad (6)$$

При небольших значениях D_1 и D_2 (по сравнению с высотой зондирования R) можно записать приближенные выражения (ввиду малости углов между вертикалью OO' и трассами распространения акустических пакетов r_1 и r_2) вида $r_1 \approx ct_1$ и $r_2 \approx ct_2$, с учетом которых выражение (6) принимает вид

$$W_2 = \frac{D_2 - D_1}{t_2 - t_1} C_a = \frac{d'}{\Delta t}. \quad (7)$$

В общем случае, когда скорости ветра и звука зависят от высоты слоя, выражение (7) остается в силе, поскольку горизонтальная однородность атмосферы (которая примерно в 500 раз выше вертикальной) и синхронность излучения акустических пакетов из двух точек, обеспечивая таким образом одинаковые условия распространения пакетов, позволяют выделять горизонтальный перенос обоих пакетов через линию OO' . Выделение интервала времени Δt производят путем регистрации максимума огибающей амплитуд принятых сигналов в моменты времени t_1 и t_2 . Эту операцию можно выполнить либо с помощью ЭВМ – методом перебора значений числового массива амплитуд либо путем использования аналого-цифрового пикового детектора.

Для регистрации профиля скорости ветра рассматриваемым способом необходимо применять несколько акустических излучателей, число которых зависит от заданной высоты наблюдений и максимальной регистрируемой скорости ветра. Для учета поворота ветра с высотой акустические излучатели целесообразно размещать не вдоль прямой линии, а по некоторой кривой, аналогичной спирали Экмана. Преимущество данной технологии состоит в оперативности регистрации профиля скорости ветра и повышении точности измерения, поскольку в данном случае используются не значения амплитуды сами по себе, а моменты времени, когда изменяющаяся во времени амплитуда сигналов достигает своего максимального значения. Повышению точности рассмотренной технологии содействует также и то, что при его реализации используются относительные измерения амплитуды, а не абсолютные. Кроме того, измерение доплеровского сдвига частоты в момент наступления максимума

амплитуды отраженных сигналов позволит определять значения температуры воздуха. Достоинством применения распределенного излучателя в системе РАЗ является, на наш взгляд, возможность разработки технологии одновременной регистрации и вертикального профиля влажности [14, 16]. Сущность такой технологии заключается в измерении максимумов огибающих амплитуд, отраженных от акустических пакетов, излученных распределенным излучателем, и построением экспоненты, позволяющей найти коэффициент молекулярного

поглощения энергии звуковых волн. Такая экспонента позволяет значительно более точно, по сравнению с известной технологией двухчастотного амплитудного зондирования [2], определить значение этого коэффициента.

Обработка большого массива данных измерений ветра показала хорошее совпадение средних значений, полученных с помощью системы РАЗ с распределенным акустическим излучателем и датчиком ветра М63-М, однако дисперсия значений скорости ветра для дистанционного средства оказалась в 2-3 раза выше дисперсии значений ветра для метеорологического датчика [14, 15]. Объяснить такие высокие значения дисперсии измерений скорости ветра таким способом можно существованием вертикальных градиентов температуры и скорости ветра, вызывающих наклон фазовых фронтов акустических волн, порывистостью ветра и изменчивостью его направления.

Пассивная радиолокация пятна. Как уже отмечалось, при РАЗ атмосферы сферические волновые фронты акустического пакета фокусируют электромагнитные волны в объеме некоторых размеров, определяемых характеристиками антенн и турбулентностью. Если этот “сгусток” электромагнитной энергии падает на плоскую границу, разделяющую

две среды с различной диэлектрической проницаемостью, то такая граница становится источником электромагнитного излучения. В случае, когда граница двух сред неподвижна, рассеянное ею электромагнитное излучение сохраняет доплеровский сдвиг частоты, обусловленный движением акустического пакета, сферические волновые фронты которого сформировали этот “сгусток” в своем фокусе. Принимая электромагнитные волны, отраженные от границы раздела двух сред, например воздух – подстилающая поверхность, можно определять метеорологические величины: температуру воздуха, скорость и направление ветра [17]. В работе [14] представлена возможная схема реализации радиоакустического зондирования, предполагающая не совпадение фокального пятна рассеянных сигналов с апертурой приемной радиоантенны, а поиск местоположения этого пятна с помощью приемной радиоантенны путем совмещения максимума диаграммы направленности с центром фокального пятна (точнее, с центром тяжести фигуры проекции пятна на подстилающую поверхность); такое совмещение обеспечивает максимальную амплитуду выходных сигналов приемника при применении остронаправленной радиоантенны. Оценка энергетического потенциала аппаратуры РАЗ для реализации пассивной радиолокации пятна сфокусированных сигналов приводит к значениям в 210 – 250 дБ [14], что находится на уровне этого технического параметра для современных радиолокационных систем [18]. Для решения задачи измерения скорости и направления ветра данным способом достаточно отслеживать положение пятна на подстилающей поверхности с помощью остронаправленной приемной радиоантенны, регистрируя таким образом годограф скорости ветра.

Отметим, что разрешающая способность измерения параметров ветра по слоям данным способом, как и в радиолокации, определяется разрешением по азимуту и углу зондирования, в отличие от разрешающей способности технологии трех измерений амплитуды отраженных сигналов [2], где разрешающая способность зависит от измеряемой скорости ветра, так как форма огибающей амплитуд отраженных сигналов зависит от времени прохождения пятна по апертуре приемной антенны; при уменьшении скорости ветра, например увеличивается толщина слоя, в котором производится измерение скорости ветра. Практичная технология измерения параметров ветра с использованием пассивной радиолокации пятна рассмотрена в работе [14].

Наиболее целесообразным представляется использование аппаратуры РАЗ с пассивной радиолокацией пятна для метеорологического обеспечения функционирования ТЭЦ, АЭС, площадок хранилищ энергоносителей (нефти, газа и пр.).

3. Комбинированная обработка данных вертикального зондирования

В процессе вертикального радиоакустического зондирования атмосферы амплитуда электромагнитных колебаний, отраженных акустическим импульсом, зависит от технических параметров аппаратуры радиоакустического зондирования, заданной высоты зондирования и ряда метеорологических величин, значение которых создают конкретную метеорологическую ситуацию. Наибольшее влияние на уменьшение амплитуды принятых радиосигналов вызывает горизонтальный ветер, который выносит акустический импульс из диаграмм направленности радиоантенн [6].

При корреляционной обработке сигналов радиоакустического зондирования для извлечения данных о метеорологических величинах информационным параметром является параметр расстройки условия Брэгга q . Поскольку в данном случае для определения q используется именно амплитуда принятых радиосигналов, то, учитывая преобладающий вклад ветра в ослабление амплитуды радиосигналов, целесообразно использовать данный эффект для измерения горизонтальной скорости ветра.

При отсутствии ветра амплитуда принятых с заданной высоты радиосигналов, описываемая главным лепестком функции $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$, равна A_T , которая соответствует значению q_1 , и определяется только действием изменения температуры с высотой на скорость акустического импульса C_a (см. рис.3). При наличии ветра значение амплитуды принятых радиосигналов с той же высоты составит A_Σ , определяемое суммарным действием температуры и ветра на значение амплитуды этих сигналов, которому соответствует значение уже параметра q_2 , которому, в свою очередь, отвечает виртуальная скорость акустического импульса C_{a1}^1 . Для разделения влияния температуры воздуха и горизонтального ветра на результаты измерения горизонтального ветра целесообразно применить два вида одновременной обработки принятых радиосигналов: доплеровскую и корреляционную, при которых в качестве информационных используются два параметра отраженного сигнала – частота и его амплитуда.

Для заданной высоты h_1 трассы зондирования с помощью доплеровской обработки находят доплеровский сдвиг частоты принимаемого радиосигнала F_{d1} . Рассчитать скорость акустического импульса C_a за счет температуры воздуха на заданной высоте h_1 можно, используя выражение

$$C_{a1} = \frac{F_{d1}\lambda_e}{2}. \quad (8)$$

С помощью корреляционной обработки находят q_1 и рассчитывают значение

$$C_{a1}^1 = \frac{2\pi F}{\frac{4\pi f_e}{c} - q_1}, \quad (9)$$

где $F = C_a / \lambda$.

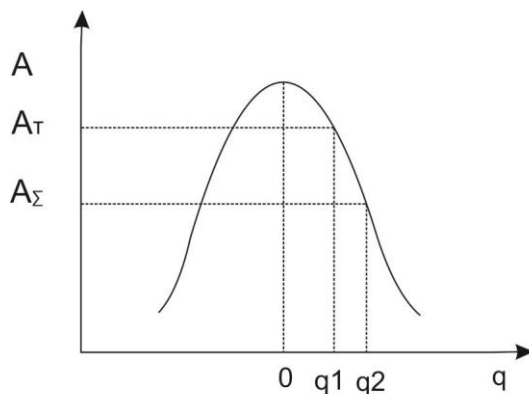


Рис. 3

Значение горизонтальной скорости ветра получают по формуле

$$W_z = C_{a1}^1 - C_{a1} = \frac{2\pi F}{\frac{4\pi f_e}{c} - q_1} - \frac{F_{d1}\lambda_e}{2}. \quad (10)$$

Таким образом, одновременное использование доплеровской и корреляционной обработки принятых сигналов при вертикальном РАЗ атмосферы позволяет исключить

применение механических устройств в системе РАЗ, что упрощает технологию температурно-ветрового зондирования.

Относительная среднеквадратическая погрешность вычисления горизонтальной скорости ветра по выражению (10) может быть записана в виде уравнения полной погрешности (при условии некоррелированности источников погрешности) в соответствии с [5]:

$$\frac{\sigma W_z}{W_z} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_z}{\partial F} \frac{\sigma F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial f} \frac{\sigma f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial c} \frac{\sigma c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial F_{d1}} \frac{\sigma F_{d1}}{F_{d1}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial \lambda_e} \frac{\sigma \lambda_e}{\lambda_e}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial q_1} \frac{\sigma q_1}{q_1}\right)^2}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_z}{\partial F} &= \frac{2\pi c}{4\pi f - cq_1}; & \frac{\partial W_z}{\partial f} &= -\frac{8\pi^2 Fc}{(cq - 4\pi f)^2}, & \frac{\partial W_z}{\partial c} &= \frac{2\pi Fcq}{(cq - 4\pi f)^2}, \\ \frac{\partial W_z}{\partial F_{d1}} &= -\frac{\lambda_e}{2}, & \frac{\partial W_z}{\partial \lambda_e} &= -\frac{F_{d1}}{2}, & \frac{\partial W_z}{\partial q_1} &= \frac{2\pi Fc^2}{(cq - 4\pi f)^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для оценки значения относительной среднеквадратической погрешности измерения горизонтальной скорости ветра необходимо задаться значениями параметров, входящих в расчетное выражение (10). К примеру, 10-сантиметровая система РАЗ, использованная в сериях сравнительных экспериментов [2], имела такие параметры: $F = 6800 \text{ Гц}$ и $f = 3 \cdot 10^9 \text{ Гц}$, а при $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $T \approx 18 \text{ }^\circ\text{С}$, $C_a = 342 \text{ м/с}$, $q = 0,5$, $F_{d1} = 6840 \text{ Гц}$ (в предположении, что $W_z = 0$). Значения коэффициентов влияния в (12) в этом случае таковы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_z}{\partial F} &= 5 \cdot 10^{-2}; & \frac{\partial W_z}{\partial f} &= 1,14 \cdot 10^{-7}; & \frac{\partial W_z}{\partial c} &= 4,5 \cdot 10^{-9}; \\ \frac{\partial W_z}{\partial F_{d1}} &= 5 \cdot 10^{-2}; & \frac{\partial W_z}{\partial \lambda_e} &= 3420; & \frac{\partial W_z}{\partial q_1} &= 2,7. \end{aligned} \quad (13)$$

Анализируя результаты (13), следует отметить, что наибольшее влияние на среднеквадратическую погрешность вычисления горизонтальной скорости ветра в (10) оказывают погрешности измерения (воспроизведения) длины волны радиопередатчика и параметра Брэгга, в меньшей степени – погрешности измерения частоты зондирующего звука и частоты доплеровского сдвига.

Значения большинства относительных среднеквадратических погрешностей измерения параметров, входящих в выражение (11), могут быть оценены по известным методикам:

$$\frac{\sigma F}{F} = 15 \cdot 10^{-12} \text{ и } \frac{\sigma f}{f} = 0,3 \cdot 10^{-16} \text{ [19]; } \frac{\sigma c}{c} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ [20]}. \quad (14)$$

Подставляя данные из (13), (14) и данные оценок погрешности измерения скорости звука из работы [21] в уравнение погрешности (11), а также используя критерий ничтожной погрешности, получаем значение относительной среднеквадратической погрешности измерения горизонтальной скорости ветра

$$\frac{\sigma W_z}{W_z} = 4 \cdot 10^{-2},$$

что при измеряемой скорости ветра $W_z = 10 \text{ м/с}$ даст среднеквадратическую погрешность измерения $\sigma W_z = 0,4 \text{ м/с}$.

Такая технология является достаточно простой и приемлемой, особенно при использовании систем РАЗ для метеорологического обеспечения работ по исследованию уровня загрязнения атмосферного воздуха. Кроме того, она позволяет исключить применение механических устройств в радиотехнической системе.

Выводы

1. Рассмотренные технологии РАЗ атмосферы позволяют одновременно измерять температуру воздуха и горизонтальную скорость ветра.
2. При использовании распределенного акустического излучателя можно производить измерение еще одной важной метеовеличины – влажности воздуха.
3. Применение комбинированной обработки принятых радиосигналов исключает применение механических устройств в системе РАЗ, что упрощает технологию зондирования при измерении метеовеличин.

Список литературы: 1. *Greenhow, J.S.* Systematic wind measurements of altitudes 80-100 km using radio echoes from meter trails // *Philos. Mag.*, 1954, ser.7, v.5. N.364. 2. *Радиоакустическое зондирование атмосферы* / Прошкин Е.Г., Бабкин С.И., Г.В.Груша и др. Разд.2 // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Кашеева Б.Л., Прошкина Е.Г., Лагутина М.Ф. – Харьков : Коллегиум, 2002. – С.44 – 98. 3. *Бабкин, С.И.* Радиоакустический способ измерения горизонтальной скорости ветра. А.С.№ 1501745. 4. *Бабкин, С.И.* Измерение горизонтальной скорости ветра в локальном объеме атмосферы радиоакустическим зондированием // Тр. 10 Всесоюз. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2. – Томск : ТФ СО АН СССР, 1989. – С.79 – 83. 5. *Бабкин, С.И.* Анализ погрешностей регистрации профилей температуры воздуха доплеровским и корреляционным способами // *Радиотехника.* – 2012. – Вып. 169. – С. 72 – 78. 6. *Прошкин, Е.Г., Карташов, В.М., Бабкин С.И., Волох, А.В.* Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования // *Радиотехника.* – 2007. – Вып. 150. – С. 5 – 16. 7. *Бабкин С.И., Ульянов Ю.Н., Пахомов Ю.А.* Влияние метеорологических условий на радиоакустическое зондирование атмосферы // Тезисы докладов 6-й Всесоюз. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. – Томск : ИОА АН СССР, 1980. –С. 185-188. 8. *Frankel, M.S., Chang, N.I. and Sanders, M.I. Ir.* A High-Frequency Radio Acooustic Sounder for Remote Measurement of Atmospheric Winds and Temperature. – *BAMS*, v. 58, № 9. 1977. – Pp. 928-934. 9. *Каллистратова, М.А., Кон, А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 195 с. 10. *Юрчак, Б.С.* Определение некоторых метеовеличин по амплитудным характеристикам радиоакустического сигнала // Труды 10-го Всесоюз. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2. – Томск : ТФ СО АН СССР, 1989. – С. 93 – 96. 11. *А.С. №1122986.* СССР МКИ⁴ G01S 13/95. Способ определения сдвига ветра / М.Ю.Орлов и Б.С.Юрчак // БИ № 41 (СССР). – 1984. 12. *А.С. №1252749.* СССР МКИ⁴ G01S 13/95. Радиоакустический способ измерения профиля ветровых потоков / В. И. Алехин, А.И. Ключин, И.В., Корытцев и Сидоров Г.И. // БИ №31(СССР). – 1986. 13. *А.С. №1290881.* СССР МКИ⁴ G01S 13/95. Радиоакустический способ измерения температуры и скорости ветра в атмосфере / А.Л.Фабрикант. 1986 (СССР). 14. *Разработать* методику радиоакустического зондирования атмосферы для исследования влияния бризовой циркуляции на вертикальное распределение показателя преломления для радиоволн // Отчет о НИР (заключительный). 1.5.6.4 а. Харьковский ордена Трудового Красного Знамени институт радиозлектроники им. М.К.Янгеля (ХИРЭ) ; науч. рук. Бабкин С.И. Гос. рег.№0187.0011690. – Харьков, 1990. – 157 с. 15. *Бабкин, С.И., Васильченко, Е.А.* Эффективность вертикального радиоакустического зондирования при измерении горизонтального ветра // Тез. докл. 2-й Междунар. конф. “Теория и техника передачи, приема и обработки информации”, ч.2. 17-19 сентября 1996 года, Харьков-Туапсе. – С.58 – 59. 16. *А.С.№ 1780071.* СССР МКИ⁴ G01S 13/95. Способ определения влажности воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы / С.И. Бабкин. (СССР). 17. *А.С. №1658105.* СССР МКИ⁴ G01S 13/95. Радиоакустический способ зондирования атмосферы / С.И. Бабкин. (СССР). 18. *Радиолокационные устройства* / В.В.Васин, О.В.Власов, В.В. Григорин-Рябов и др. ; под ред. В.В.Григорина-Рябова. – М. : Сов. радио, 1970. – 680 с. 19. *Орнатский, П.П.* Автоматические измерения и приборы (цифровые и аналоговые). – Киев : Вища шк., 1986. – 504 с. 20. *Разработать* методику оперативного выявления неблагоприятных

метеорологических ситуаций, приводящих к повышенным уровням загрязнения атмосферы (2.220.175.77 (а) // Отчет по НИР. Гос. Рег.№ 77065488. Ч.2 ; науч. рук. Прошкин Е.Г. – Харьков : ХИРЭ, 1979. – 64 с. 21. *Бабкин С.И.* О точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором // Радиотехника. – Харьков : Вища шк., 1979. – Вып. 50. – С. 67 – 72.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 21.06.2014