

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ДОПЛЕРОВСКИМ И КОРРЕЛЯЦИОННЫМ СПОСОБАМИ

Введение

Метод радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы разрабатывается для дистанционной регистрации профилей основных метеорологических величин – температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра. В течение длительного времени этот метод развивался на базе доплеровской радиолокации пакета акустических волн, распространяющегося в атмосфере в направлении зондирования. Однако ряд особенностей, присущих только методу РАЗ и существенно отличающих такой метод от доплеровской радиолокации точечных целей, заметно затруднил внедрение его в практику метеонаблюдений. В частности, это необходимость непрерывного поддержания условия Брэгга при распространении акустического пакета по трассе зондирования; при этом достигается потенциальная точность регистрации температуры воздуха [1]. Различные способы поддержания условия Брэгга либо снижают оперативность регистрации профиля [2, 3], либо усложняют техническую реализацию метода [4]. Второй особенностью метода РАЗ является то, что, в отличие от радиолокации точечных целей, при которой формируется поле рассеянных сигналов, при радиолокации акустического пакета на подстилающей поверхности формируется пятно рассеянных сигналов, размеры и положение которого определяются шириной диаграмм направленности радио- и акустического передатчиков, высотой зондирования и метеоусловиями, в которых производится зондирование.

Авторами работы [5] предложен корреляционный метод обработки отраженного от акустического пакета радиосигнала, предположительно позволяющий снизить зависимость погрешности регистрации профиля температуры от точности поддержания условия Брэгга. Информацию о скорости акустического пакета в этом способе несет параметр расстройки условия Брэгга. В отличие от доплеровского способа, технически реализованного и практически проверенного в сравнительных измерениях метеовеличин 10-сантиметровой системой РАЗ и датчиками высотной метеомачты [6], данных о теоретической и практической погрешности регистрации профилей температуры воздуха корреляционным способом нет.

В то же время погрешность регистрации метеовеличин, в частности вертикальных профилей температуры воздуха, аппаратурой дистанционного зондирования в настоящее время не всегда отвечает запросам практики метеонаблюдений. Например, погрешность измерения температуры воздуха при исследованиях микрофизических характеристик туманов различного происхождения должна быть не выше 0,01 К.

Данная работа посвящена сравнительному анализу погрешностей регистрации вертикальных профилей температуры воздуха доплеровским и корреляционным способами при радиоакустическом зондировании атмосферы.

Погрешность регистрации профилей температуры воздуха доплеровским способом

Доплеровский способ регистрации вертикальных профилей температуры воздуха методом РАЗ основан на измерении скорости пакета акустических волн в атмосфере C_n , которая связана с температурой выражением

$$C_n = a\sqrt{T} \pm V, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура воздуха, V – проекция скорости ветра на направление зондирования, a – коэффициент, зависящий от состава воздуха; для сухого воздуха $a = 20,0789 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1/2}$.

Оценка инструментальной среднеквадратичной погрешности измерения температуры воздуха доплеровским радиолокатором, выполненном по обычной схематехнике, произведена в работе [7]; погрешность этого вида зависит от стабильности частотных характеристик зондирующей аппаратуры и при соотношении сигнал/шум не менее 10 составляет $\sigma T \approx 0,25 - 0,3 \text{ К}$. Применение современных способов и средств формирования высокостабильных СВЧ колебаний (управляемых синтезаторов частоты и эффективных умножителей) позволит заметно снизить погрешность этого вида [8].

В ряде натуральных экспериментов была корректно исследована погрешность регистрации вертикальных профилей температуры воздуха доплеровским способом при РАЗ атмосферы и штатными датчиками, принятыми в качестве эталонных и размещенными на 13 балконах высотной 300-метровой метеомачты Института экспериментальной метеорологии (г. Обнинск) [6]. В этих экспериментах среднеквадратические отклонения результатов сравнительных измерений составили 0,1 – 0,5 К в зависимости от метеоусловий. Следует заметить, что полученные значения среднеквадратических отклонений включают в себя методические погрешности, вызванные: влиянием влажности и наличием вертикальных воздушных потоков (дополнительно изменяющих скорость звука в реальной атмосфере), флуктуационным характером принятых радиосигналов, а также конструктивным разносом антенн радиоканала. Погрешность измерения температуры воздуха за счет каждого неучтенного 1 м/с вертикального ветра составляет 1,68 К; максимальная погрешность измерения температуры при полном отсутствии информации о влажности воздуха – 2,25 К [1].

Существование высотного хода температуры воздуха в атмосфере, особенно заметного в пограничном ее слое, приводит к нарушению условия Брэгга, в результате чего имеют место несколько эффектов:

- частота доплеровского сдвига принятого сигнала не совпадает с частотой синусоидального заполнения зондирующего акустического пакета; погрешность регистрации профиля температуры в точках, где нарушается условие Брэгга, может достигать 1 – 2 К [1];

- снижение интенсивности рассеяния радиоволн от пакета акустических волн, что ведет к снижению отношения сигнал/шум на выходе радиоприемника, особенно существенного при большой протяженности пакета.

Экспериментальное подтверждение роста погрешности регистрации профиля температуры воздуха по мере нарушения условия Брэгга приведено в работе [3], где показано, что характер изменения этой погрешности вдоль профиля может быть описан тангенсоидой с минимальным её значением на высоте, где точно выполняется условие Брэгга.

Погрешность регистрации профиля температуры воздуха корреляционным способом

При корреляционном способе регистрации вертикальных профилей температуры воздуха значение скорости акустического пакета в атмосфере может быть найдено по формуле [5]

$$C_n = \frac{2\pi f_n}{4\pi f / c - q}, \quad (2)$$

где f_n – частота синусоидального заполнения акустического пакета; f – рабочая частота радиолокатора; c – скорость распространения радиоволн; q – параметр расстройки условия Брэгга.

Используя (2), можно найти выражение для расчета температуры воздуха в виде

$$T, K = \left[\frac{2\pi f_n}{a \left(\frac{4\pi f}{c} - q \right)} \right]^2. \quad (3)$$

В формуле (3) учтено выражение (1), а также предполагается, что вертикальная составляющая скорости ветра, во-первых, существенно ниже скорости звука и ею можно пренебречь, а, во-вторых, является знакопеременной величиной [9]. Выполнив в эксперименте оценку параметра расстройки q по всей трассе зондирования, можно провести регистрацию вертикального профиля температуры воздуха. Методика такого зондирования изложена в работе [10].

Относительная среднеквадратическая погрешность вычисления температуры воздуха по выражению (3) может быть записана в виде уравнения полной погрешности (при условии некоррелированности источников погрешности) в соответствии с [11]:

$$\frac{\sigma T}{T} = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial f_n} \frac{\sigma f_n}{f_n} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial f} \frac{\sigma f}{f} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial c} \frac{\sigma c}{c} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial a} \frac{\sigma a}{a} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial q} \frac{\sigma q}{q} \right)^2}. \quad (4)$$

Частные производные по всем параметрам (коэффициенты влияния):

$$\frac{\partial T}{\partial f_n} = \frac{8\pi^2 f_n}{a^2 b^2}; \quad \frac{\partial T}{\partial f} = \frac{16\pi^2 f_n}{a^2 b^3 c}; \quad \frac{\partial T}{\partial c} = -\frac{16\pi^2 f_n f}{b^2 c^2}; \quad \frac{\partial T}{\partial q} = -\frac{4\pi f_n}{a b^3}; \quad \frac{\partial T}{\partial a} = -\frac{8\pi^2 f_n^2}{a^3 b^2}, \quad (5)$$

где $b = \frac{4\pi f}{c} - q$.

Для оценки значения относительной среднеквадратической погрешности измерения температуры необходимо задаться значениями параметров, входящих в расчетное выражение (4). Для примера, 10-сантиметровая система РАЗ [6], использованная в сериях сравнительных экспериментов, имела такие параметры: $f_n = 6800 \text{ Гц}$ и $f = 3 \cdot 10^9 \text{ Гц}$, а при $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $a = 20,0789 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1/2}$ и $q = 0,5$ значение $b = 125,1 \text{ м}^{-1}$.

Значения коэффициентов влияния в (5) в этом случае таковы:

$$\frac{\partial T}{\partial f_n} = 8,5 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\partial T}{\partial f} = 5,72 \cdot 10^{-14}; \quad \frac{\partial T}{\partial c} = -8,93 \cdot 10^{-9}; \quad \frac{\partial T}{\partial q} = -2 \cdot 10^{-3}; \quad \frac{\partial T}{\partial a} = -23 \cdot 10^{-2}. \quad (6)$$

Анализируя результаты (6), следует отметить, что наиболее влияние на среднеквадратическую погрешность измерения температуры в (4) оказывают неопределенности по частоте зондирующего звука, влажности воздуха и параметру расстройки.

Частота звука формируется техническими устройствами зондирующей системы и ее стабильность может быть обеспечена применением необходимых способов стабилизации. Влажность воздуха есть физический параметр атмосферы, информация о котором может быть получена различными способами (синхронными измерениями, модельными расчетами и т.п.); в ряде случаев, как, например, при зондировании пограничного слоя атмосферы, она может быть принята как постоянная величина. Параметр q является искомой величиной, а поэтому погрешности его определения следует уделить особое влияние.

Значения большинства относительных среднеквадратических погрешностей измерения параметров, входящих в выражение (4), могут быть оценены по известным методикам:

$$\frac{\sigma f_n}{f_n} = 15 \cdot 10^{-12} \text{ и } \frac{\sigma f}{f} = 0,3 \cdot 10^{-16} \text{ [12]; } \frac{\sigma a}{a} = 10^{-4} \text{ и } \frac{\sigma c}{c} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ [13].} \quad (7)$$

Общепринятой методики расчета погрешности оценки величины q пока нет, так как эта величина и не может быть измерена – она оценивается по максимуму корреляционного интеграла, полученному путем перемножения опорного напряжения, сформированного в соответствии с некоторым значением q , с реальным выходным напряжением радиоприемного устройства, полученного с заданной высоты зондирования [10].

Одной из отправных может стать методика определения этой погрешности, исходящая от обратного: необходимо сначала задаться погрешностью измерения температуры, удовлетворяющей конкретным требованиям практики метеонаблюдений (вид прогноза, научные исследования по физике атмосферы, контроль загрязнения атмосферы и пр.). Затем следует найти необходимые разрешения по параметру расстройки Брэгга – Δq и число градаций этого параметра N . Последним этапом такой методики является нахождение погрешности определения величины q . В данном случае, как и обычно, следует разделять методическую и случайную составляющие этой погрешности.

Случайная составляющая погрешности определения q зависит от погрешности воспроизведения опорного напряжения и, в особенности, от уровня выходного напряжения радиоприемного устройства на входе коррелятора, которое соответствует значению реализации рассеянного сигнала, принятого с заданной высоты. При этом следует предположить, что $\delta q \leq \Delta q$ (δq – погрешность определения q), а $\sigma T \leq \Delta T$.

Рассмотрим роль радиоприемного устройства в формировании погрешности определения параметра расстройки q . Как представляется, его значение в процессе подготовки принятого сигнала к корреляционной обработке является решающим. Основным параметром, определяющим точность фиксации параметра q , является отношение сигнал/шум. Известно, например [14, 15], что оценка мощности случайного сигнала при корреляционной обработке может быть выполнена с погрешностью 10 % при отношении сигнал/шум, равном 10 дБ. При этом автором [14] не указано, какая имеется в виду погрешность – максимальная или среднеквадратическая. Если для упрощения анализа принять, что в данном исследовании определена среднеквадратическая погрешность, то из предположения о нормальном распределении погрешности оценки мощности случайного сигнала станет понятно, что максимальная погрешность оценки составит около 30% при том же отношении сигнал/шум. Зависимость принимаемой мощности радиосигнала P от параметра расстройки Брэгга q описывается

экспонентой вида $e(-q^2)$ [1], то $q \approx \sqrt{-\ln P}$, а $\frac{\partial q}{\partial P} \approx (\sqrt{-\ln P})' = \left(-\frac{1}{2 \ln P \sqrt{-\ln P}} \right)$ и

$$\frac{\sigma q}{q} \approx \sqrt{\left\{ \frac{\partial q}{\partial P} \frac{\sigma P}{P} \right\}^2}.$$

Далее можно записать $\frac{\sigma q}{q} \approx \sqrt{\frac{1}{4(\ln P)^3}} \sqrt{\left\{ \frac{\sigma P}{P} \right\}^2}$, откуда видно, что погрешность определения параметра Брэгга, как и следовало бы ожидать, существенно зависит от значения принимаемой мощности и от погрешности ее измерения. Для 10-сантиметровой системы РАЗ [2] уровень принимаемой мощности, обеспечивающий приемлемую погрешность измерений температуры, лежит в пределах $10^{-12} \dots 10^{-14}$ Вт или порядка 1 мкВт. Тогда

$$\frac{\sigma q}{q} \approx 1,4 \cdot 10^{-2}. \quad (8)$$

С учетом (6) и (8) относительная среднеквадратическая погрешность измерения температуры (подчеркнем – инструментальная) корреляционным способом составит $\frac{\sigma T}{T} \approx 3 \cdot 10^{-5}$, а среднеквадратичная погрешность измерения температуры воздуха в стандартной атмосфере – $\sigma T \approx 0,01K$.

Рассмотрение источников методических погрешностей начнем с погрешности, зависящей от заданной разрешающей способности регистрации вертикальных профилей температуры.

Разрешающая способность измерения температуры воздуха по слоям ΔT для разных приложений различная. Если предполагается использование систем РАЗ для регистрации вертикальных профилей температуры воздуха, то следует иметь в виду возможные значения вертикального градиента температуры воздуха в реальных условиях зондирования; среднее значение этой величины для стандартной атмосферы составляет $\gamma = 0,62 K/100 м$ [9]. В отдельных случаях, например при возникновении бризовых ячеек, значения вертикальных градиентов температуры могут достигать 1 – 2 К на 100 м [16]. Максимальная разрешающая способность измерения температуры требуется при определении вертикальных градиентов коэффициента преломления для радиоволн сантиметрового диапазона волн [17], для этого приложения пространственное разрешение по вертикали для температурных измерений лежит в пределах $\Delta R = 25 – 30 м$. Это означает, что для надежного определения значения вертикального коэффициента преломления необходимо обеспечить $\Delta T = 0,25-0,3 K$.

В связи с этим весьма важным при использовании корреляционного способа регистрации вертикального профиля температуры методом РАЗ становится число градаций параметра расстройки Брэгга, необходимое для обеспечения заданной разрешающей способности по температуре, и, соответственно, число каналов корреляционного приема.

Интервал значений q (иными словами, ширина главного лепестка функции $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$, определяющего существенное брэгговское рассеяние), в зависимости от количества длин волн n в зондирующем акустическом пакете лежит в пределах $[-1,8; 2,2]$ при $n = 10$ и в пределах $[-0,0018; 0,0022]$ при $n = 100$ [1, 18].

Если принять, что $n = 10$ и $\Delta q = 0,1$ то количество градаций $N = 40$, а изменение температуры при таком скачке q составит $\Delta T = 1,39K$. Полученное значение разрешающей способности по температуре ΔT ставит под сомнение возможность эффективного зондирования атмосферы с использованием корреляционного способа обработки принятого сигнала при контроле пограничного слоя атмосферы методом РАЗ. В таком режиме зондирования этот метод пригоден, наверное, для регистрации профилей метеорологических величин до верхней границы стратосферы.

Для реализации необходимой разрешающей способности при зондировании пограничного слоя атмосферы нужно обеспечить выполнение условия $\Delta q \leq 0,05$. Тогда $\Delta T = 0,2K$. Следовательно, для реализации указанной разрешающей способности измерения температуры с использованием корреляционного способа потребуется, как минимум, 80 каналов для обработки принятых сигналов. Если ставить задачу обеспечения большей разрешающей способности при применении корреляционного способа обработки принятых сигналов, то необходимо далее увеличивать число каналов коррелятора.

В случае, если для зондирования используется акустический пакет с количеством длин волн $n = 100$, то ширина главного лепестка функции $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ уменьшается на три порядка, а вид самой функции носит многолепестковый характер с глубокими провалами (теоретически, до нуля). В сравнительных экспериментах по зондированию атмосферы короткими и длинными акустическими пакетами нами обнаружено, что при использовании длинных

пакетов заметно увеличиваются флуктуации принимаемых сигналов, не связанные с пульсациями параметра q . Такой характер принимаемых сигналов затруднит корреляционную обработку сигналов и приведет к увеличению погрешности определения q .

При определении методической погрешности необходимо также отметить и ряд физических факторов, существующих в атмосфере и влияющих на эффективность радиоакустического зондирования. Прежде всего, это горизонтальный перенос акустического пакета, причем и средним ветром и его порывами. Такой перенос пакета не вызывает изменения параметра q , но из-за выноса пакета из диаграмм направленностей антенн радиоканала происходит уменьшение мощности принимаемых сигналов. Примерно такое же влияние оказывает и поворот фазового фронта акустической волны вследствие действия на него вертикальных градиентов температуры воздуха и скорости ветра. В результате действия этих эффектов на пятно рассеянных сигналов оно "соскальзывает" с апертуры приемной радиоантенны [19] и мощность принимаемых сигналов дополнительно снижается. Свой вклад в погрешность этого типа вносит также и турбулентность через вариацию радиуса поперечной и продольной когерентности фазовых фронтов звуковых волн, также снижающая мощность рассеянных радиосигналов. Заметное влияние на погрешность регистрации вертикального профиля температуры, как следует из (6), оказывает и коэффициент a , зависящий от содержания в воздухе водяного пара e и атмосферного давления P_a , обычно изменяющихся с высотой [9, 17]; это видно из выражения, описывающего скорость звука при любых значениях T, e, P_a [2, 13]:

$$C_n = 20,0789 \cdot d \cdot \sqrt{T},$$

где $d = \sqrt{\frac{1 + \frac{\chi_1 - \chi_2}{\chi_1(\chi_2 - 1)} \cdot \frac{e}{P_a}}{1 - 0,378 \frac{e}{P_a} + \frac{\chi_1 - \chi_2}{\chi_2 - 1} \cdot \frac{e}{P_a}}}$, а χ_1 – отношение теплоемкостей сухого воздуха

и χ_2 – то же для водяного пара [20].

С другой стороны, мощность принимаемых радиосигналов снижается и за счет поглощения энергии звуковых волн, возникающего вследствие релаксационных процессов, происходящих при распространении этих волн во влажном атмосферном воздухе [1, 18].

Методические погрешности, возникающие из-за отсутствия априорной информации о метеорологических величинах и атмосферных процессах в различных условиях зондирования с использованием различных видов обработки сигналов, можно снизить привлечением необходимой информации, получаемой либо от соответствующих метеорологических датчиков либо по данным модельных расчетов. Такой подход был использован при исследовании возможностей доплеровского способа при экспериментальном зондировании атмосферы в реальных метеоусловиях [6] и при регистрации профилей температуры воздуха на разных стадиях существования теплых туманов на границе суша-море [18].

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Инструментальная погрешность измерения температуры воздуха аппаратурой РАЗ с использованием корреляционной обработки принятых сигналов ниже, чем при доплеровской обработке, однако устройство корреляционной обработки нуждается в усложнении (в частности, в увеличении числа каналов).

2. При корреляционной обработке сигналов заметно увеличивается количество изменчивых по высоте атмосферных факторов, которые формируют методическую погрешность регистрации профилей температуры, что требует дальнейших исследований.

Список литературы. 1. *Каллистратова, М.А., Кон, А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 195с. 2. *Оценка погрешностей двух методик радиоакустического температурного зондирования атмосферы. Сообщение 1. Разработка эксперимента / Бабкин С.И., Куценко В.И., Максимова Н.Г. и др. // Радиотехника : Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков : Вища шк., 1987. – Вып. 82. – С. 78-83.* 3. *Оценка погрешностей двух методик радиоакустического температурного зондирования атмосферы. Сообщение 2. / Бабкин С.И., Куценко В.И., Максимова Н.Г. и др.// Радиотехника : Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков : Вища шк., 1988. – Вып. 84. – С. 98-105.* 4. *Горелик, А.Г., Жежерин, В.Р., Каллистратова, М.А. и др.* Оперативные измерения профиля температуры методом радиоакустического зондирования с автоматической подстройкой под условие Брега // XIV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн : тез. докл., Ленинград, октябрь 1984. – М. : Наука, 1984. – Ч. 2. С.276-278. 5. *Карташов, В.М., Волох, А.В., Радионова, В.В.* Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Харків : ХНУРЕ, 2007. – Вып. 150. – С. 94 -99. 6. *Бабкин, С.И., Милосердова, Г.Н., Орлов М.Ю. и др.* Определение температуры, скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. – 1980. **20**, № 6. – С.495-500. 7. *Бабкин, С.И.* О точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором // Радиотехника : Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков : Вища шк., 1979. – Вып. 50. – С. 67-72. 8. *Зубков, О.В.* Розширення зони огляду і поліпшення технічних характеристик комплексу вертикального радіолокаційного зондування атмосферного прикордонного шару : автореф. дис....канд. техн. наук. спец. 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Харків, 2004. – С. 9. *Хрґіан, А.Х.* Физика атмосферы.- Л.: Гидрометеоиздат,1969. – 647 с. 10. *Патент України. № 89344.* Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для дистанційної реєстрації вертикального профіля температури повітря / Карташов В.М., Бабкін С.І., Волох А.В., Семеняка А.В., Пашенко С.В., Яценко П.О. Опубл. бюл.№1 від 11.01.2010 р. 11. *Кукуш, В.Д.* Определение погрешностей результатов и средств измерений. – Харьков : ХПИ,1979. – 113 с. 12. *Орнатский, П.П.* Автоматические измерения и приборы (цифровые и аналоговые). – Киев : Вища шк. -1986. – 504 с. 13. *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.* 14. *Орлов, В.В.* Оценка мощности случайного сигнала на основе корреляционной пространственной обработки. – ААЭКС, № 1 (11), 2003. Информационно-управляющие комплексы и системы. 15. *Михалев, Л.А., Новичков, И.С., Сталенков, С.Е.* Исследование побочных электромагнитных излучений технических средств. <http://www.bre.ru/security/4498.html>. (дата обращения 14.09.2011 г.). 16. *Лужбин, А.М., Саркисянц, В.А.* Структура поля коэффициента преломления в инверсионных слоях вблизи границы суша-море // Радиофизические методы и средства для исследования окружающей среды в миллиметровом диапазоне. – 1988. – С. 87-91. 17. *Бин, Б.Р., Даттон, Е. Дж.* Радиометеорология. – Л. : Гидрометеоиздат. – 1971. – 362 с. 18. *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.* 19. *Прошкин, Е.Г., Карташов, В.М., Бабкин, С.И., Волох, А.С.* Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 150. – С. 5 -16. 20. *Головин Н.Я.* Акустические артиллерийские приборы. Ч.1.Физические основы устройства акустических приборов. – М. : Воениздат, 1940. – 410 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 15.04.2012