

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПИСАНИЯ ЭХОГРАММ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ЗОНЕ МЕГАПОЛИСА

Введение

Современные проблемы экологии, климатологии, глобального потепления климата планеты, краткосрочного и сверхкраткосрочного прогнозирования термодинамических процессов в атмосферном пограничном слое (АПС) заставляют искать пути создания новых и усовершенствования известных радиотехнических методов и средств, предназначенных для обеспечения массовых измерений физических величин и параметров состояния в АПС.

В настоящее время в экспериментальных исследованиях по изучению пограничного слоя атмосферы все больше внимания уделяется развитию и применению метеорологических локационных систем (МЛС), а именно: радиолокационных, акустических локационных и радиоакустических систем.

Тактико-технические требования, предъявляемые к МЛС, определяются характеристиками объекта наблюдения – турбулентностью атмосферы.

Турбулентность АПС, являясь в общем случае процессом случайным, имеет некоторую детерминированную составляющую, которая определяется квазистационарными закономерностями притока и преобразования тепла. Эти закономерности реализуются в понятии «термодинамическое состояние» (ТДС), которое имеет некоторый обобщающий смысл и характеризует процессы притока и преобразования тепла (турбулентный, конвективный, адвективный) в широком диапазоне пространственно-временных масштабов атмосферных движений.

Классификация типа ТДС дает возможность указать на аналитические описания полей физических величин или процессов, включая и процессы притока тепла, в виде уравнений состояния при данном термодинамическом процессе.

Такие уравнения являются основой для описания, например, конфигурации зоны загрязнения, определения вида уравнений усредненного профиля коэффициента преломления радиоволн, аналитического выражения дистанционной зависимости ослабления электромагнитного поля, функции поглощения и рассеяния радио- и акустических волн турбулентностью АПС, расчета вероятности возникновения слоя ветрового сдвига, его высоты и мощности в зоне взлетно-посадочной полосы аэропортов.

Таким образом, за решением задачи классификации ТДС следует выбор системы уравнений и (или) переменных коэффициентов, обеспечивающих решение приведенных выше прикладных задач и расчет притока тепла при данном состоянии АПС.

Измерение количества тепла, поступающего в АПС в зоне мегаполиса, является также важной самостоятельной прикладной задачей климатологии, так как есть основание предполагать, что приток тепла в зоне мегаполиса достаточно велик для того, чтобы повлиять на тепловой баланс атмосферы Земли.

Основанием к выдвигению такой гипотезы являются следующие положения:

- общая площадь поверхности всех зданий, сооружений и дорог, составляющих средний мегаполис, представляется значительной, так как общая эффективная поверхность, участвующая в процессе теплопередачи, приблизительно в три – пять раз больше, чем площадь, занимаемая мегаполисом на поверхности Земли;
- мегаполисы занимают настолько большую часть площади поверхности континентов, что их влиянием на тепловой баланс атмосферы уже нельзя пренебрегать, при этом площадь мегаполисов постоянно увеличивается;
- материалы, из которых изготавливаются сооружения мегаполисов, как правило, обладают большой теплоемкостью, а поглощаемое ими тепло не преобразуется в другие виды энергии (для сравнения, в зоне хвойного леса только 1% энергии солнечных лучей, прошед-

ших в приземный слой, достигает поверхности земли; в зоне лиственного леса – от 2 до 7 %. Можно предположить, что в зоне мегаполиса зданиями поглощается порядка 50 % падающей энергии солнечных лучей);

инфраструктура (здания, сооружения) создают значительные препятствия движению основного потока ветра, что создает интенсивную турбулентность в поле скорости и способствует ускорению теплообмена между нагретыми элементами мегаполиса и воздушной средой.

В настоящее время для решения задачи идентификации типа ТДС реально доступны только исходные данные в виде профилей температуры, получаемые с помощью стандартного аэрологического зондирования. Следствием этого положения является слишком большая пространственно-временная область, для которой могут быть получены оценки типов ТДС (по времени – от 6 часов и более, по пространству – более 100 км).

Идея создания и использования систем акустического зондирования (АЗ) для идентификации типов ТДС в слое атмосферы высотой h порядка $h \cong 600$ м создает хорошую перспективу для решения приведенных выше задач, так как позволяет организовать регулярные массовые наблюдения и, следовательно, получать практически неограниченный объем информации о термодинамических процессах в АПС.

При использовании систем акустического зондирования информация о состоянии атмосферы содержится как в параметрах одиночного эхо-сигнала, так и в характеристиках ансамблей последовательно полученных профилей эхо-сигналов – эхограмм.

Прием эхо-сигналов акустического зондирования всегда происходит на фоне нестационарных акустических помех, динамический диапазон которых составляет величину порядка 70 ДБ. В связи с этим поимпульсное измерение параметров эхосигналов в большинстве случаев связано с неопределенностью оценки соотношения сигнал/шум при каждом измерении.

Очевидно, что эхограммы АЗ содержат много больший объем информации, так как описывают пространственно-временное изменение интенсивности турбулентного движения прежде всего в поле температуры. Поэтому разработку методов извлечения информации в системах АЗ целесообразно сосредоточить на анализе эхограмм.

В современном АЗ описаниям структур эхо-сигналов ставится в соответствие тип ТДС [1-4]. Следовательно, формализация описания эхограмм является основной задачей в области анализа эхо-сигналов акустического зондирования.

Цель настоящей работы – изучение статистической структуры выборок эхо-сигналов (эхограмм) акустического зондирования для решения задачи их формализованного описания и автоматической классификации процессов теплообмена в пограничном слое атмосферы.

В работе уделяется особое внимание параметризации выборок эхо-сигналов, полученных при развитом процессе притока явного тепла в атмосферу, который поддерживается процессом турбулентного теплообмена в режиме контактной конвекции в приземном слое атмосферы. Такие состояния, помимо «накачки» явного тепла в АПС, также оказывают решающее влияние на процессы рассеяния (или накопления) вредных выбросов в приземном слое атмосферы над мегаполисом.

Исходные положения формализованного описания эхограмм

Для того чтобы систему формализованного описания эхограмм сделать компактной, в основу положим принцип обусловленности структуры эхо-сигналов структурными компонентами термодинамического процесса.

Исходя из того, что при акустическом зондировании атмосферы возможное разнообразие объектов (эхограмм) значительно превосходит число действий, которые необходимо предпринять по результатам анализа этих объектов, задачу анализа эхограмм следует отнести к классификационным задачам.

Так как при данном типе ТДС реализации эхограмм имеют существенные формальные различия, задача классификации эхограмм есть задача распознавания образов (описаний эхограмм), которая может быть решена с использованием принципа общности свойств.

Процессы теплообмена в приземном слое атмосферы всегда происходят в режиме турбулентного движения, то есть сопровождаются интенсивными пульсациями температуры. Современное представление о формировании эхо-сигналов базируется на известном положении [5 – 6], состоящем в том, что обратное рассеяние акустической волны происходит именно на турбулентных пульсациях поля температуры. Следовательно, для решения задачи измерения притока тепла можно принять в рассмотрение (классифицировать) только те ТДС, которые приводят к возникновению эхо-сигналов. Тогда получим следующую систему классов ТДС:

1. Приток явного тепла в режиме контактной конвекции в результате прямого прогрева подстилающей поверхности солнечной радиацией;
2. Турбулентный теплообмен в режиме радиационного выхолаживания подстилающей поверхности;
3. Турбулентные движения, возникающие в результате смешения воздушных масс с различным тепло- и влагосодержанием;
4. Отсутствие теплообмена или нейтральный режим выделяется в отдельный класс как состояние АПС, при котором эхосигнал отсутствует.

Результатом классификация типа ТДС по основным классам будет решение относительно применения адекватной модели расчета притока тепла в АПС.

Поток тепла в пределах каждого из классов состояний АПС в общем случае следует рассматривать как случайный нестационарный процесс, состоящий из некоторой совокупности отдельных относительно короткопериодных квазистационарных процессов – структурных элементов. К такому выводу приводит визуальный анализ эхограмм, приведенных в первых работах по акустическому зондированию [6, 1]. Этот вывод подтверждается результатом работы [7], а также результатами экспериментальных исследований, приводимых далее в настоящей работе.

Для первого из приведенных выше основных типов ТДС структурным компонентом является композиция «взрывов плавучести» в виде термических струй, продолжительность которых в среднем составляет несколько минут, и пауз. Для второго состояния – это квазипериодические волновые движения в устойчиво стратифицированном слое АПС, которые модулируют интенсивность турбулентного распада. В третьем случае – это волновые движения на границе раздела атмосферных слоев с различной температурой и влагосодержанием.

В реальной атмосфере между основными термодинамическими состояниями АПС имеют место также и переходные процессы, которые вносят дополнительную и весьма существенную нестационарность в процессы теплообмена. Типичный пример записи эхо-сигналов при зондировании переходного процесса в АПС, приведен в работе [7].

Следовательно, исходя из особенностей турбулентного движения, для наиболее полного описания процессов теплообмена и расчета притока тепла, модели соответствующих процессов должны быть представлены системой уравнений с переменными параметрами, каждое из которых описывает процесс теплообмена на некотором участке стационарности, в пределах которого происходит известный процесс теплопередачи.

На основании выдвинутых положений, приходим к следующей структуре процедуры формализованного описания эхограмм: классификация состояний по основным классам, выделение, классификация и измерение параметров отдельных структурных элементов. Исходя из нестационарности процессов теплообмена, реальная система зондирования атмосферы функционирует в режиме мониторинга. В результате производится непрерывная запись и периодическая обработка эхо-сигналов в соответствии с принятой структурой системы анализа эхо-сигналов.

Очевидно, что модели теплообмена целесообразно строить только при том условии, что классификатор состояний уже создан и разработана методика параметризации структурных элементов эхограммы. Поэтому первым этапом реализации системы формализованного описания эхограмм есть создание перечня структурных элементов и разработка правил их выделения из выборок эхо-сигналов акустического зондирования.

Замечания к существующим подходам к обработке эхограмм

Впервые в систематизированном виде целесообразность классификации эхограмм была высказана в работе [8]. В основу системы классификации был положен принцип визуального анализа.

В работе [9] выдвинуто положение об определяющем значении вертикальной компоненты скорости ветра при классификации эхограмм. Однако следует заметить, что при ее определении возникают технические сложности, связанные с необходимостью измерения частотных спектров одиночных реализаций профиля эхо-сигнала при воздействии нестационарных акустических помех. При этом необходимо учитывать, что собственно «цель» акустического лоатора имеет распределенный характер, а изменения «мгновенного» значения эффективного сечения рассеяния «цели» есть случайный нестационарный процесс.

В работе [7] впервые высказывается мысль о новом подходе к анализу эхограмм как к процедуре распознавания образов, предложена структура обобщенного алгоритма классификации эхограмм, в которой учитываются данные прямых контактных измерений в приземном слое атмосферы, а также данные аэрологического зондирования.

Свойства эхограмм при развитом турбулентном потоке явного тепла

В результате экспериментальных исследований, проведенных на действующей станции акустического зондирования Харьковского национального университета радиоэлектроники в период с 2007 по 2009 г., получен обширный экспериментальный материал в виде эхограмм акустического зондирования, записанных в цифровом виде в формате матриц-выборок (МВ).

Система акустического зондирования имеет следующие показатели, определяющие тактико-технические характеристики системы: система зондирования – бистатическая вертикального зондирования; передающая антенна – 16-тиэлементная фазированная решетка; приемная антенна – рефлекторно-параболического типа, диаметр зеркала $d = 1,2 м$; мощность излучения (электрическая) $P_t = 320 Вт$; длительность зондирующего импульса $\tau_u = 29 \cdot 10^{-3} с$, что дает значение разрешающей способности по высоте $\Delta h \cong 5 м$ при температуре воздуха $t_a \cong 27^\circ C$; несущая частота зондирующего сигнала $f_o = 1800 Гц$, период повторения зондирующих импульсов $T_u = 2 с$.

В приемном тракте системы, с целью сжатия динамического диапазона амплитуды сигнала, используется звено временного управления усилением с модулем коэффициента передачи $k_{up} = 0$ при $t_o \leq t \leq t_o + \tau_u$, и $k_{up} = t/T_u$ при $(t_o + \tau_u) < t \leq (t_o + T_u - \tau_u)$.

Высота зондируемого слоя атмосферы $h_z = h_o + c_s \cdot 0,5T_u$, где c_s – скорость распространения акустической волны, h_o – высота установки системы. Так как $c_s \cong 20,05 \sqrt{t_a + 273}$ при $t_a \cong 27^\circ C$ и $h_o = 25 м$, получим $h_z \cong 372,3 м$, высота слоя, в пределах которого производится управление усилением приемника составляет $h_{up} \cong 367,3 м$.

На рис. 1 приведен пример эхограммы, полученной в жаркий летний день с помощью бистатической системы АЗ, установленной на крыше пятиэтажного здания, расположенной в центре мегаполиса. Такой вид эхограммы можно считать типичным для данных условий наблюдения.

Горизонтальные полосы, которые просматриваются на эхограмме, обусловлены отражением от близко расположенных зданий.

Основными факторами, ограничивающими эффективность использования систем акустического зондирования в зоне мегаполиса, как известно, являются акустические помехи и отражения от местных предметов. Поэтому в качестве первого параметра, который характеризует эхограмму, примем вид усредненного профиля эхосигнала.

На рис. 2 приведены профили эхо-сигнала и его среднеквадратичного отклонения (СКО), полученных путем обработки данных матрицы-выборки эхо-сигналов, изображение которой приведено на рис. 1. Как следует из рис. 2, высоту возмущенного слоя можно оценить величиной $h_v \cong 210 \text{ м}$. При $U/U_{max} = \text{max}$ среднеквадратичное отклонение $\sigma[U/U_{max}] = 0$, из чего следует, что на этом интервале высоты наблюдается ограничение эхо-сигнала в приемном тракте.

Визуальный анализ эхограммы показывает, что в процессе теплообмена наблюдаются квазипериодические возмущения длительностью $t_{вз}$ в пределах $(0,5 < t_{вз} \leq 6) \text{ мин}$. Для выделения признаков, формализующих описание этого явления, выполним следующие процедуры. Проведем послойное усреднение МВ с шагом высоты $\Delta h_s = 20 \text{ м}$ в диапазоне значений высоты $50 \leq h \leq 270 \text{ м}$ и их временную фильтрацию методом скользящего усреднения при значениях E окна усреднения $(0,5 \leq E \leq 6) \text{ мин}$. Результаты расчетов показали, что в данном случае максимум СКО усредненных сечений МВ наблюдается при значении $E = 3 \text{ мин}$. На рис. 3 приведены горизонтальные сечения МВ для значения окна усреднения $E = 3 \text{ мин}$. Из полученного результата следует, что явно выраженные возмущения наблюдаются до высоты $h_{вз} \leq 170 \text{ м}$. Формализуем эту оценку методом определения минимума зависимости коэффициента корреляции между смежными зависимостями, в виде функции от номера слоя. Результат расчетов приведен на рис. 4, из которого следует, что в полученной зависимости имеет место явно выраженное значение минимума, легко различимое программно, так как по-

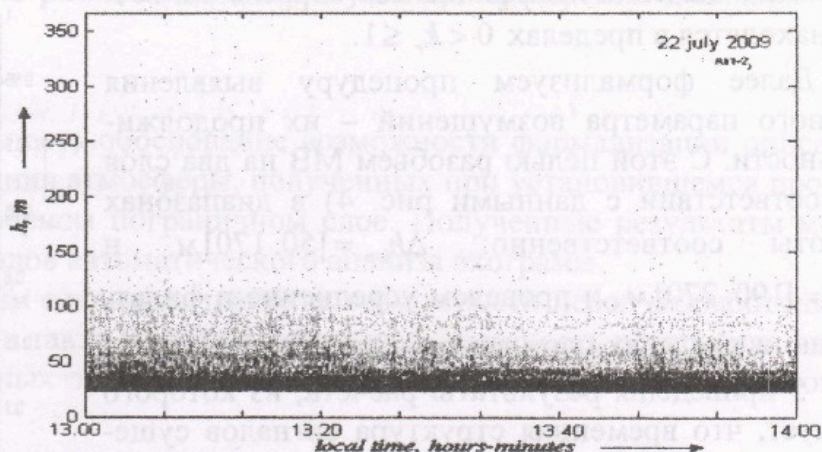


Рис. 1. Эхограмма акустического зондирования

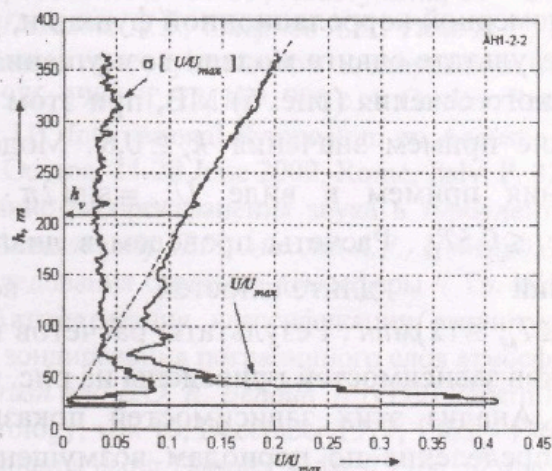


Рис. 2. Профили усредненной относительной амплитуды эхо-сигналов и ее среднеквадратичного отклонения

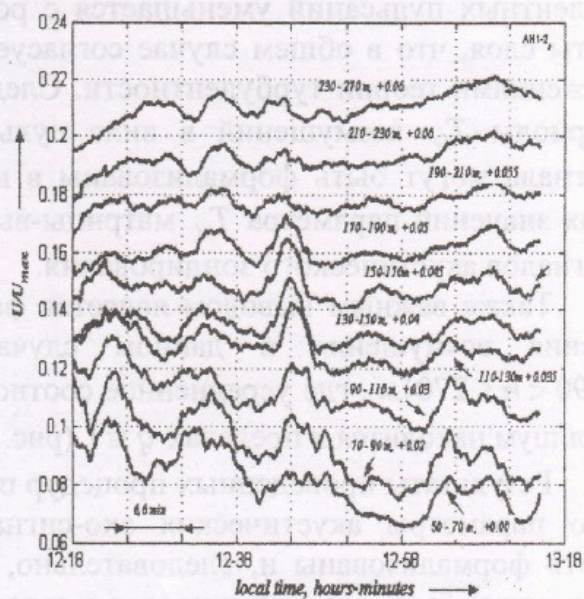


Рис. 3. Эхо-сигналы, усредненные по слоям высоты

лученные значения коэффициентов корреляции всегда находятся в пределах $0 < k_r \leq 1$.

Далее формализуем процедуру выявления важного параметра возмущений – их продолжительности. С этой целью разобьем МВ на два слоя (в соответствии с данными рис. 4) в диапазонах высоты соответственно: $\Delta h_{163} = [50, 170] \text{ м}$ и $h_{263} = [190, 270] \text{ м}$, и проведем усреднение и фильтрацию в пределах слоя высоты при $E = 3 \text{ мин}$. На рис. 5 приведены результаты расчета, из которого следует, что временная структура сигналов существенно различается. Для определения значений длительности возмущений используем модельно-корреляционный анализ, при этом рассчитаем зависимость суммы коэффициентов корреляции k_r одномерной корреляционной функции, полученной в результате сдвига модели возмущения вдоль реального сечения (рис. 5) МВ, при этом в рассмотрение примем значения $k_r \geq 0,8$. Модель возмущения примем в виде $U_M = \sin(2\pi \cdot t/T_M)$ при $0 \leq t \leq 0,5T_M$. Расчеты проведем в диапазоне значений длительностей возмущения ($2 \leq T_M \leq 12$) мин. Результаты расчетов в виде графиков зависимостей приведены на рис. 6.

Анализ этих зависимостей показывает, что распределение по периодам возмущений в нижнем слое имеет две явно выраженные составляющие с периодами $T_M = 5,4 \text{ мин}$ и $T_M = 8,66 \text{ мин}$. Аналогичное распределение в выше расположенном слое, разграниченном значением $k_r = \text{min}$, теряет одну из составляющих, то есть частота турбулентных пульсаций уменьшается с ростом высоты слоя, что в общем случае согласуется с положениями теории турбулентности. Следовательно, периоды T_M возмущений в виде пульсаций эхо-сигнала могут быть формализованы в виде числовых значений параметра T_M матрицы-выборки эхо-сигналов акустического зондирования.

Также важным выводом является факт обнаружения возмущения в данном случае в слое ($190 < h \leq 270$) м, где усредненное соотношение сигнал/шум находится в пределах $q \cong 1$ (рис. 2).

Результаты проведенных процедур показывают, что параметры акустических эхо-сигналов могут быть формализованы и, следовательно, тип сигналов может быть классифицирован в автоматическом режиме. Признаками сигналов рассмотренного типа есть существование корреляционной связи между

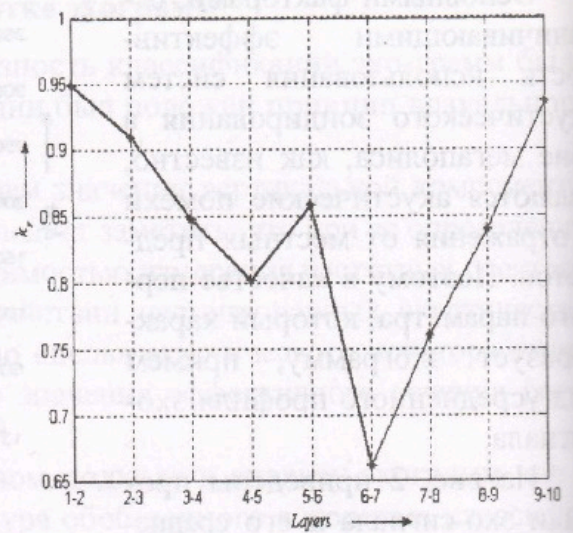


Рис. 4. Коэффициенты корреляции между смежными слоями матрицы-выборки эхо-сигналов

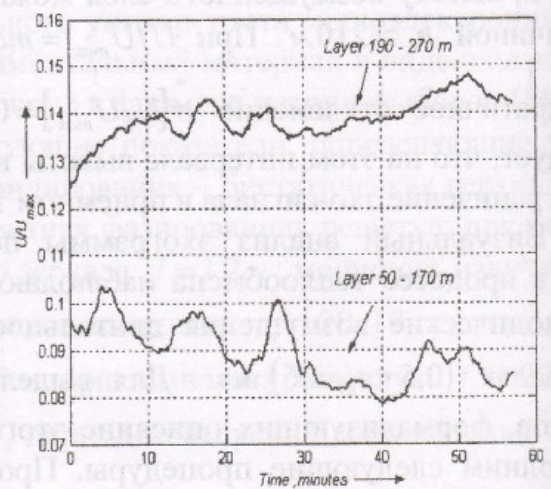


Рис. 5. Усредненные зависимости эхо-сигналов для двух слоев высоты

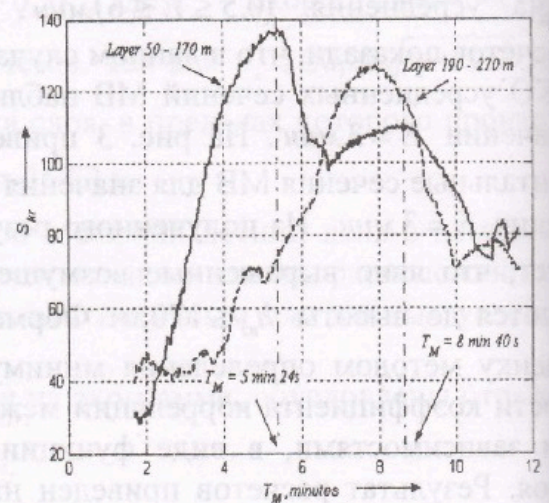


Рис. 6. Зависимость суммы коэффициентов корреляции от длительности импульса возмущения

слоями эхо-сигналов, и программно различные максимумы при измерении длительностей возмущений.

Заключение

Основным результатом работы есть обоснование возможности формализации описаний эхограмм акустического зондирования атмосферы, полученных при установившемся процессе притока явного тепла в атмосферном пограничном слое. Полученные результаты могут служить основой к разработке методов автоматического анализа эхограмм.

Формализация анализа эхограмм открывает широкие возможности перед разработчиками термодинамических моделей АПС, а также обосновывает целесообразность построения развитой библиотеки моделей структурных элементов термодинамических процессов при возмущенных состояниях АПС.

Список литературы: 1. *Brown E.H., Holl F.F.* Advances in atmospheric acoustics // Rev. Geophys. Space Phys. 1978. Vol. 16, №1. P.47-110. 2. *Каллистратова М.А., Карюкин Г.А.* Исследование вертикальной структуры флуктуаций показателя преломления методом акустического зондирования. Астроклимат и эффект. Телескопов // Тр. Всесоз. конф. РГ Астроклимат астросовета АН СССР, Абастумани, 23 – 26 ноября 1981. Вып. 6. 3. *Каллистратова М.А., Нестерова Т.Н., Петенко И.В., Смирнов А.С., Тиме Н.С., Шурьгин Е.А.* измерение статистических характеристик эхо-сигнала при акустическом зондировании атмосферы // Известия АН СССР. Физика Атмосферы и Океана. 1986, 1987. Т. 22, №9. 990 с. 4. *Coulter.* Remote sensing of micrometeorological quantities // Proceedings of the 11th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the atmosphere and Oceans. 24-28 June 2002, Rome, Italy. P. 321 – 327. 5. *Каллистратова М.А.* Экспериментальное исследование распространения звука в турбулентной атмосфере // Докл. АН СССР. 1959. Т. 125, № 1. С. 69-72 6. *Макалюстер Л.Г., Махони А.Р., Поллард Д.Р., Шоу П.Д.Р.* Акустическое зондирование – новый метод исследования строения атмосферы // Тр. ИИЭР. 1968. №4. С.231-240. 7. *Леонидов В.И., Сидоров Г.И.* Автоматизация классификации амплитудно-временных структур эхо-сигналов в системах акустического зондирования пограничного слоя атмосферы // Радиотехника. 2004. №137. С.123-129. 8. *G.H.Clark, E Charash and E.O. K. Bendun* // NTES Pattern Recognition Studies in Acoustic Sounding, Journal of applied meteorology, vol. 16, December 1977, 1365 – 1368 p. 9. *Ye. A. Shurygin.* On automatic recognition of echo-sounder patterns using Doppler sodar // Proc. 8th International Symposium on Acoustic Remote Sensing, 1996, Moscow, Russia, 3.61 – 3.66.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 14.01.2010