УДК 551.501.7

В.И. ЛЕОНИДОВ, канд. техн. наук, В.В. СЕМЕНЕЦ, д-р техн. наук

АНАЛИЗ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУР ЭХОСИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

Достоверность прогнозирования погодных условий всегда имела большое практическое значение. В настоящее время метеорологическое обеспечение является наиболее востребованным в таких интенсивно развивающихся направлениях жизнедеятельности, как авиация, судовождение, исследование причин изменения погодных и климатических условий на планете, создание каналов передачи информации, построенных на основе явлений ДТР и явлений приповерхностного волноводного распространения радиоволн, и в некоторых других.

Формирование и изменение погодных условий на планете происходит в результате нестационарности процессов притока и преобразования тепла, как в пространстве, так и во времени. Поэтому информация о текущем состоянии тепловых полей атмосферы является экспериментальной основой для разработки методов повышения достоверности прогнозирования погодных условий, включая и климатические изменения в планетарном масштабе.

Главным источником тепла для атмосферы является нагретая земная поверхность. Турбулентные моли, получившие тепло от подстилающей поверхности за счет прямой теплопередачи, перемещаются по вертикали под действием сил плавучести, создавая термодинамические возмущения, а при определенных условиях – и так называемые «взрывы плавучести» [1] в приземном слое. Таким образом, приток тепла в пограничном слое атмосферы (ПСА) создает возмущенные термодинамические состояния (ТДС), сопровождающиеся возникновением термических струй и конвективных движений. Следовательно, теплообмен всегда происходит в режиме турбулентного движения и регистрация динамики «мгновенного» пространственного распределения турбулентных молей в поле температуры является энергетической характеристикой термодинамического процесса.

Количественное описание процесса теплообмена может быть получено на основании измерений теплосодержания каждого отдельного турбулентного моля в пределах возмущенного слоя ПСА, например мониторинг «мгновенного профиля» турбулентных молей. Однако в настоящее время отсутствуют средства, позволяющие реализовать такую процедуру.

Известно, что присутствие турбулентных молей на трассе распространения акустической волны приводит к частичному рассеянию ее энергии. Однако отсутствует теория, выявляющая связь между параметрами эхосигналов акустического зондирования и теплосодержанием турбулентных молей.

Следовательно, описание процессов теплообмена может быть развито только на основе модельного подхода. Очевидно, что при этом подходе модели притока и преобразования тепла могут быть построены только относительно некоторого перечня квазистационарных термодинамических состояний ПСА.

В настоящей работе развивается одно из практических приложений метода акустического зондирования [2, 3], частично рассмотренное в работах [4 – 6], а именно – создание методов идентификации термодинамического состояния ПСА, построенных на основе формализованного анализа эхосигналов акустического зондирования. Мы хотим расширить перечень классов моделей теплообмена, которым могут быть поставлены в соответствие классы эхограмм, полученные при различных типах ТДС. При этом мы исходим из очевидного положения о том, что амплитудно-временная структура эхограммы определяется типом ТДС.

Такой подход позволит использовать развитую библиотеку готовых решений для широкого перечня моделей ПСА, построенных для каждого из классов ТДС и, следовательно, типов эхограмм, и таким образом снизить ошибку восстановления профилей метеовеличин и параметров состояния ПСА при решении обратной задачи.

Настоящая работа является продолжением исследования, начатого в работах [4 – 6], и посвящена формализации исследования эхограмм, которые предположительно имеют периодическую структуру. Такой тип структуры эхосигналов существенно отличен от структур, которые были исследованы в работе [6] и, поскольку эхосигналы такой структуры наблюдаются относительно часто и по большей части тоже в летнее время года, мы посчитали целесообразным провести разработку их формализованного анализа.

Формализация анализа эхограмм

На рис.1. приведена эхограмма акустического зондирования, которая представляет собой пример одного из относительно часто встречающихся классов акустических эхосигналов. Эхограмма получена в жаркий летний день при скорости ветра $V = 2 м/с$, мощной кучевой облачности при нижнем уровне $h_{\min} = (1000-1500) м$. Антенные системы станции акустического зондирования размещены на крыше здания на высоте $h_0 = 25 м$.

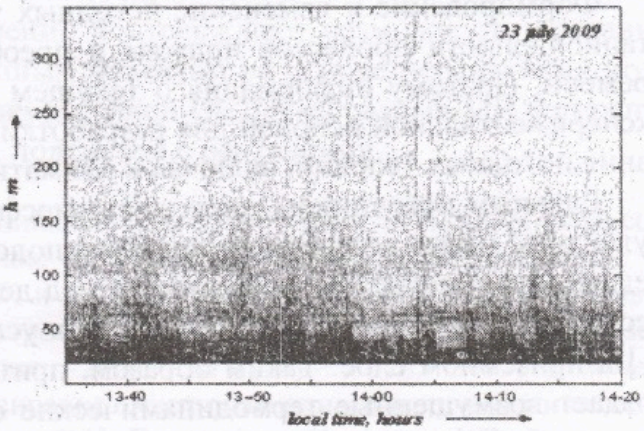

Рис.1. Эхограмма акустического зондирования

В данном исследовании будем интересоваться выявлением отличительных признаков амплитудно-временной структуры (АВС) эхосигналов, которая является следствием формирования в ПСА развитого процесса теплообмена.

Визуальный анализ эхограммы показывает явно выраженную организованную структуру в виде периодических тепловых струй (вертикально ориентированные амплитудно-временные фрагменты). На записи также явно наблюдаются отражения в виде горизонтальных линий, флуктуирующих по амплитуде, на высотах $h \cong (67, 110,) м$, а также слабо различимые на высотах, $h \cong (200, 300) м$. Эти сигналы обусловлены отражениями от местных предметов – окружающих зданий.

Определим параметры, формализующие тип эхограммы для данного термодинамического состояния ПСА. Для этого проведем анализ соответствующей матрицы-выборки $W_s(m \times n)$ выходных сигналов акустического локатора, эхограмма которой представлена на рис.1.

Продолжительность T_c сеанса зондирования составляет $T_c = 45 мин$, следовательно, при периоде повторения T_u зондирующих импульсов $T_u = 2c$ матрица W_s содержит $n = 1350$ одиночных профилей эхосигналов. Каждый профиль представляется в виде $m = 346$ измерений напряжения на выходе приемного устройства, взятых с интервалом времени $\Delta t_d = 2\Delta h_d / c_s$, где Δh – дискретный шаг высоты, $\Delta h = 1 м$ при температуре воздуха $t_в = 27^{\circ}C$, c_s – скорость распространения звуковых волн.

С целью определения высоты h_{mp} возмущенного слоя атмосферы, в пределах которого наблюдается эхосигнал, рассмотрим усредненный профиль $\overline{U}_r(h)$ относительной амплитуды напряжения $U_r = U/U_{\max}$ на выходе приемного устройства:

$$\overline{U}_r(h) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_{ri}(h), \qquad (1),$$

где $U_{ri}(h)$ – одиночный профиль смеси сигнала и помехи, $U_{ri} = U_{n\Sigma} + U_s$, $U_{n\Sigma} = U_T + U_{ac}$ – аддитивная смесь собственного теплового шума приемника U_T и внешнего акустического шума U_{ac}, U_s – эхосигнал, h – высота.

На рис.2 представлены усредненный профиль выходного сигнала $\overline{U}_r(h)$ и профиль его среднеквадратичного отклонения (СКО) $\overline{S}_r(h)$, штрихпунктирной линией показан профиль $\overline{U}_{n\Sigma}(h)=\overline{U}_T(h)+\overline{U}_{ac}(h)$.

Уровень шума от высоты h, как известно, не зависит. Поэтому профиль $\overline{U}_{n\Sigma}(h)$ построен формально как функция времени t на основании соотношения $h=c_s\cdot t$ при $t_0\le t\le T_s+t_0$, где T_s – период повторения зондирующих импульсов, t_0 – момент времени начала посылки зондирующего импульса.

Наклон прямой объясняется действием в приемном устройстве звена управления коэффициентом усиления по линейному закону $k_{\text{var}}(t)=(t-t_0)/T_s$ при $t=[t_0,T_s]$, то есть $k=[0,1]$.

Принимая условие $U_s(h=h_{\max})=0$, получим уравнение «профиля» шума $\overline{U}_{n\Sigma}(h)=[k_{\text{var}}(T_s)\cdot\overline{U}_{n\Sigma m}/h_m]\cdot h$, где

$$\overline{U}_{n\Sigma m}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}U_s(m,i).$$

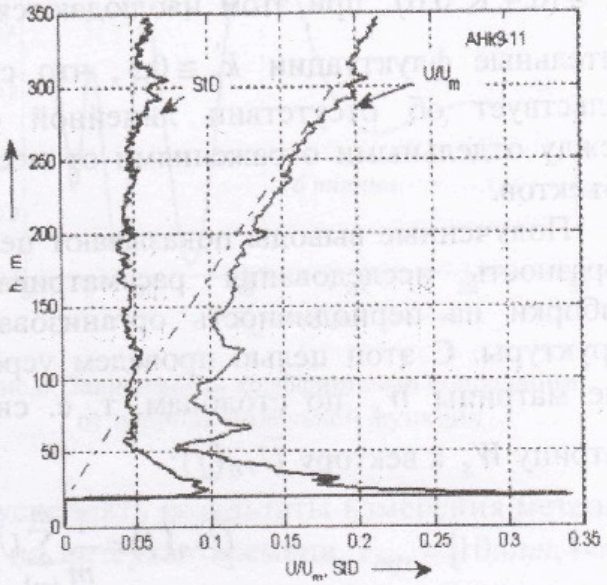

Рис.2. Профили усредненного эхосигнала и среднеквадратичного отклонения

Очевидно, что профиль $\overline{U}_r(h)$ также оказывается умноженным на k_{var}.

На усредненных профилях отражения от местных предметов, определенных по эхограмме, наблюдаются в виде выбросов на соответствующих высотах.

Следует отметить, что в данном эксперименте $\overline{S}_r(h)$ слабо зависит от высоты, увеличение СКО в областях отражений от местных предметов, выражено неявно. Из этого можно сделать вывод о том, что в этой части в смеси эхосигналов превалирует отражение, представленное в виде некоторой средней амплитуды.

Из анализа экспериментальных данных (рис.2) следует, что $\overline{U}_r(h)-\overline{U}_{n\Sigma}(h)>0$ на интервале $h\cong[h_0,h_{\max}]$, т.е. на этом интервале усредненное соотношение сигнал/шум по напряжению $\overline{q}_U$ на выходе приемника отвечает неравенству $\overline{q}_U(h)>1$. Этот вывод, а также явно выраженная организованная структура эхограммы дают основание к анализу корреляционных связей между смежными «слоями» эхосигналов. С этой целью рассчитаем зависимость нормированного коэффициента корреляции k_r между смежными строками матрицы-выборки W_s в виде функции номера строки:

$$k_r(i)=\frac{1}{\overset{*}{\sigma}_{ri}\,\overset{*}{\sigma}_{r(i+1)}(n-1)}\sum_{j=1}^{n}\left\{U_{ri}(j)-\overset{*}{M}[U_{ri}]\right\}\cdot\left\{U_{r(i+1)}(j)-\overset{*}{M}[U_{r(i+1)}]\right\},\quad i=(1,\text{K}\ m-1),\quad (2)$$

где $\overset{*}{\sigma}_{ri}$ и $\overset{*}{M}[U_{ri}]$ – оценки СКО и математического ожидания i-й строки матрицы W_s соответственно. Результат расчета приведен на рис.3.

Рассматривая зависимость рис.3 совместно с данными рис.1 и 2, нетрудно заметить, что в среднем коэффициент корреляции остается относительно высоким $k_r\cong(0.7,\text{K}\ 0.85)$.

Следовательно, в данном эксперименте организованная структура прослеживается во всем исследуемом слое атмосферы.

В зонах отражений от местных предметов $k_r \cong (0{,}4, \text{K}\ 0{,}6)$, при этом наблюдаются значительные флуктуации $k_r' \cong 0{,}3$, что свидетельствует об отсутствии линейной связи между отдельными отражениями от местных объектов.

Полученные выводы показывают целесообразность исследования рассматриваемой выборки на периодичность организованной структуры. С этой целью проведем усреднение матрицы W_s по столбцам, т. е. сведем матрицу W_s к вектору $\overline{U}_{rn}(j)$:

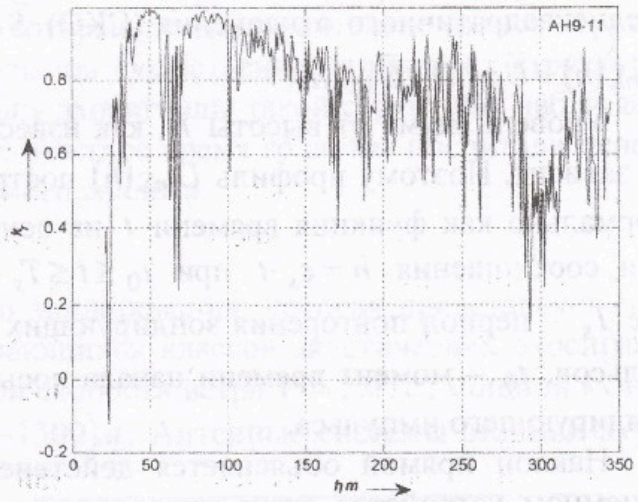

Рис.3. Зависимость коэффициента корреляции между смежными строками матрицы W_s

$$\overline{U}_{rn}(j) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} U_r(i,j) \text{ при } j = (1\text{K}\ n) \qquad (3)$$

и проведем временную фильтрацию методом скользящего усреднения при значении окна усреднения $E = 3мин$ [6].

Полученная зависимость приведена на рис.4. Из ее визуального анализа следует, что организованная структура рассматриваемой выборки, возможно, содержит гармонический компонент. Для проверки этой гипотезы рассчитаем автокорреляционную функцию зависимости (3) в виде

$$R_a(\tau) = \frac{1}{n-\tau}\sum_{\tau=1}^{n-p} \overline{U}_{nr}(j)\cdot\overline{U}_{nr}(j+\tau-1), \qquad (4)$$

$$при\ j = (1, 2, \text{K}\ n-\tau+1)$$

где $R_a(\tau)$ – модифицированная автокорреляционная функция, p – минимально допустимое число элементов вектора $\overline{U}_{nr}(j)$, при $\tau = \tau_{\max}$, примем $p = 150$.

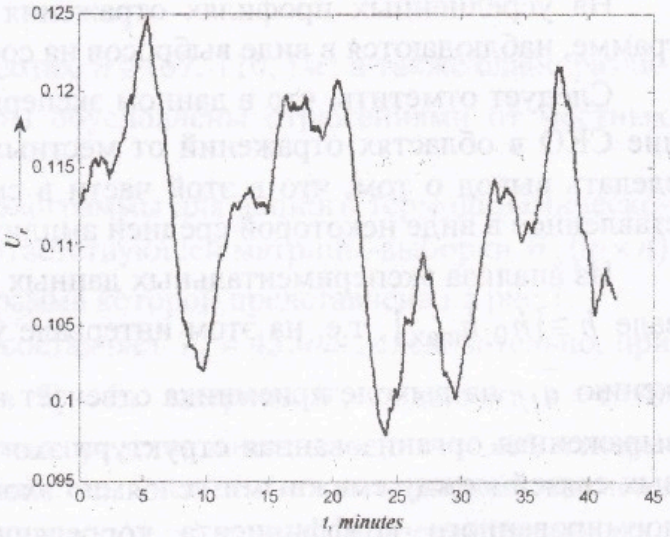

Рис.4. Вектор-строка, получена усреднением значений матрицы W_s по столбцам

Вид функции $R_a(\tau)$ (рис.5) подтверждает присутствие гармонического компонента в амплитудно-временной структуре W_s. Для определения его «веса» используем модельно-корреляционный анализ функции $R_a(\tau)$. В качестве модели используем функцию

$$R_{Ma} = \cos(2\pi j/n_T),\ j = (1, \text{K}\ n-p),\ n_T = (200, \text{K}\ 600),\ T_M = n_T \cdot T_u \qquad (5)$$

и рассчитаем коэффициент корреляции в виде $k_r[R_a, R_M] = F(T_M)$ при $T_M = [7, 20]мин$. Результат расчетов представлен в графическом виде на рис.6.

Из зависимости рис.6 следует, что в структуре эхограммы присутствуют явно выраженные компоненты с дискретными периодами, однако основной «вес» приходится на гармонику с периодом $T_M \cong 16\,мин$, при этом коэффициент корреляции имеет значение $k_r \cong 0{,}8$.

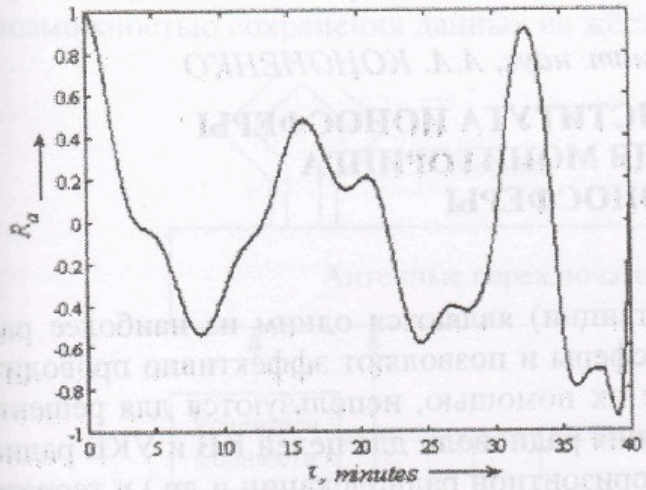

Рис.5.Модифицированная автокорреляционная функция

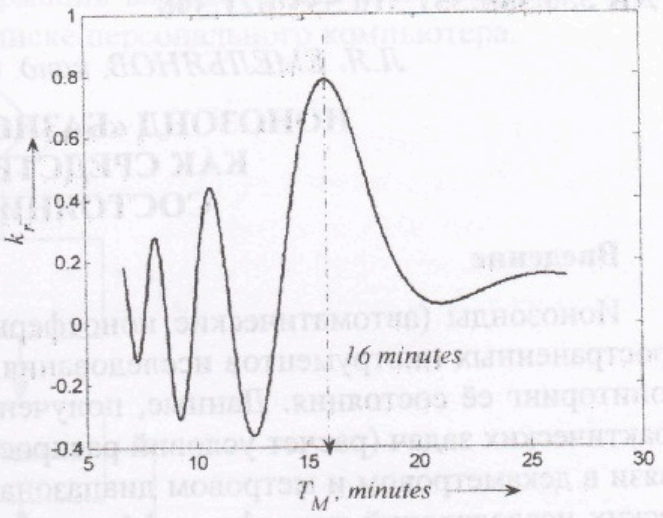

Рис.6. Зависимость коэффициента корреляции от периода модельной функции

Важно отметить, что в метеорологии принято усреднять результаты измерения метеовеличин на интервале времени $T_{ср} \geq 10 мин$, так как на интервал времени $T_{тр} = [10 мин, 1 час]$ приходится плоский минимум в спектре периодов турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры воздуха. В данном эксперименте обнаружено, что наибольший «вес» имеет составляющая при периоде $T_{тр} = 16 мин$, и, следовательно, интервал усреднения метеовеличин при рассматриваемом типе ТДС должен отвечать неравенству $T_{ср} \geq 30 мин$.

Заключение

Основным результатом данной работы является обоснование возможности формализации анализа еще одного важного класса эхосигналов акустического зондирования атмосферы – квазипериодических амплитудно-временных структур.

Также важным является факт обнаружения ряда дискретных составляющих спектра амплитудно-временной структуры эхосигналов.

На основании результатов проведенного анализа можно предположить, что возникновение указанных компонентов спектра эхограмм может быть следствием расщепления основного потока элементами инфраструктуры мегаполиса. Основная гармоника при периоде $T_{тр} = 16 мин$ может быть следствием возникновения в АПС ячейковой конвекции, описанной, например в работе [7].

Список литературы: 1. *Мигем, Ж.В.* Энергетика атмосферы : под ред. Л.Т. Матвеева. – Л. : Гидрометиздат, 1977. – 328 с. 2. *Clark, G.H., E Charash and E.O. K. Bendun.* NTES Pattern Recognition Studies in Acoustic Sounding // Journal of applied meteorology. – December, 1977. – vol. 16. – P.1365 – 1368. 3. *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. 4. *Семенец, В.В., Леонидов, В.И.* Методика акустического зондирования в задаче экологического контроля пограничного слоя атмосферы // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4. – №3. – С. 274-279. 5. *Бондаренко, М.Ф., Семенец, В.В., Леонидов, В.И.* Исследование эхо-сигналов акустического зондирования атмосферы в зоне мегаполиса // 3-й междунар. радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – 2008. – Т. 1, ч. 1. – С.87- 90. 6. *Формализация* описания эхограмм акустического зондирования атмосферы в зоне мегаполиса / В.И. Леонидов, В.В. Семенец // Радиотехника. – 2009. – Вып.160. – С 177 -183. 7. *Иванов, В.Н., Орданович, А.Е., Петрова, Л.И.* Некоторые особенности спектров скорости ветра и температуры в низкочастотном диапазоне при конвекции // Физика атмосферы и океана. – 1973.– Т.IX, № 8.– С.787 – 800.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 10.10.2011