

ОСОБЕННОСТИ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

Характеристики акустических помех существенно изменяются в зависимости от места проведения наблюдений системой акустического зондирования атмосферы. Это может быть район мегаполиса, судно в открытом море, зона аэропорта, открытая местность, производственное предприятие и так далее [1 – 8].

Для каждого из этих районов роль и назначение системы акустического зондирования различаются. Например, в зоне аэропортов важным параметром, подлежащим измерению в режиме мониторинга, являются вертикальные сдвиги ветра, вертикальная составляющая скорости ветра (скорость вертикальных потоков) [1, 4, 6], а также обнаружение и классификация источников акустических помех [7, 8].

В океане важным параметром является величина вертикальных потоков тепла и влаги, обнаружение и измерение параметров приповерхностных волноводов, определяющих условия распространения радиоволн.

В зонах предприятий, создающих вредные выбросы или имеющих потенциальную возможность создавать их, роль систем акустического зондирования состоит в классификации типов термодинамических состояний атмосферы, способствующих накоплению или рассеиванию вредных выбросов [5].

Система акустического зондирования [2, 3] атмосферы представляет собой импульсный акустический локатор, который излучает в атмосферу короткие акустические сигналы и принимает эхосигналы, рассеянные турбулентными пульсациями физических величин атмосферы. Для надежного функционирования акустических систем необходимы усовершенствованные алгоритмы приема и обработки эхосигналов, оптимизированные к текущему состоянию помех в зоне действия акустического локатора [4, 7], так как мощность помех в большом числе случаев может превышать мощность полезных эхосигналов. Это наиболее общая особенность метода акустического зондирования, ограничивает его функциональные возможности и требует особого внимания к разработке методов повышения помехозащищенности.

Цель работы – анализ свойств наиболее сложных акустических помех, создаваемых комплексными конструктивными агрегатами или изделиями, которые содержат некоторое количество функционально связанных источников акустического шума и работающих одновременно.

Основные положения

Предположительно, помехи, создаваемые устройствами такого типа, должны быть представлены рядом гармоник, амплитуды и частоты которых находятся в некоторой функциональной связи, т.е. взаимозависимы. Такие помехи относятся к сложным структурно-временным сигналам. Их удобно определить как «комбинационные помехи», в связи с тем, что они создаются конструктивно комплексными устройствами.

При анализе помех такого типа важно выявить *число гармонических составляющих, их энергетический и частотный состав, а также характеристику изменчивости этих параметров во времени*. Такая информация позволит синтезировать зондирующие сигналы акустического локатора, оптимальные при текущей структуре акустических помех.

Нетрудно предположить, что режим работы комплексного источника акустических помех может изменяться во времени непрерывно и случайным образом. Из этого положения следует, что в полученном экспериментальном материале целесообразно анализировать изменчивость периода частотных составляющих исследуемого процесса на относительно небольших интервалах времени.

В настоящем исследовании акустические помехи регистрируются приемным устройством акустического локатора сеансами длительностью 10 мин при выключенном зондирующем устройстве. Далее полученная реализация в цифровом виде анализируется на содержание гармонических составляющих в диапазоне работы акустического локатора. Исследование проводится методом модельно-структурного анализа [2, 3]. В качестве модели s_M используется синусоидальная функция, ограниченная по времени целым числом p_M периодов:

$$s_M = \sin(2\pi \cdot t_M / T_{Mi}) \quad (1)$$

где t_M – длительность модели структурного элемента сигнала помехи, T_{Mi} – период i -й синусоидальной функции модели структурного элемента, $t_M = p_M T_{Mi}$, p_M – число периодов в модели структурного элемента, определяет длительность модельной функции.

Длительность t_N анализируемой выборки s_N помехи отвечает условию $t_N \gg t_M$.

В процессе обработки помехи рассчитываются зависимости коэффициента корреляции $k_r(\tau)$ между моделью s_M структурного элемента помехи и фрагментом s_{NM} помехи длительностью t_{NM} при условии $t_M = t_{NM}$ от параметра временного сдвига τ функции s_M вдоль выборки помехи s_N для каждого значения периода T_{Mi} , устанавливаемого из ряда

$$T_M(i) = (20 + i) \cdot \Delta t \text{ при } i = [1, \dots, 150], \quad (2)$$

где Δt – дискретный шаг квантования выборки по времени $\Delta t = 1/F_q$, $F_q = 48 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ – частота квантования, т.е. рассчитывается ансамбль зависимостей $k_r(\tau, T_M)$, где $\tau = j \cdot \Delta t$, при $j \in [1 : 50000]$, откуда $\tau_{\max} \cong 1c$.

В результате расчетов получим ансамбль зависимостей, которые удобно представить в виде $(m \times n)$ матрицы M_{kr} , где $m = \max(i)$, $n = \max(j)$, при этом вдоль строк располагаются коэффициенты корреляции, полученные при условии $T_{Mi} = \text{const}$, а число строк определяется числом итераций периода T_{Mi} модельной функции согласно выражению (2).

Величина параметра p_M определяет полосу пропускания Δf эквивалентного полосового фильтра, т.е. $\Delta f \sim 1/p_M$. Поэтому значение p_M определяется как компромисс между необходимостью определения числа гармоник и выявлением флуктуаций их периода.

Рабочий диапазон частот реальных систем акустического зондирования атмосферы сверху ограничен эффектом поглощения энергии акустической волны атмосферным газом, а снизу – требованием к обеспечению направленности антенной системы и, исходя из этого, находится в пределах интервала $D_F = [0,5 \dots 3] \text{ кГц}$. В связи с этим положением, спектр исследуемого сигнала помехи предварительно ограничивается с помощью последовательно включенных фильтров верхних и нижних частот.

Результаты экспериментальных наблюдений

Для получения новых научных знаний в области создания средств контроля состояния окружающей среды методами акустической локации, на территории университета создана станция акустического зондирования атмосферы [1 – 8], на которой проводятся систематические экспериментальные наблюдения за состоянием процессов в атмосфере и временной амплитудно-частотной структурой акустических помех.

На рис. 1, 2 в качестве примера приведено графическое изображение двух фрагментов результатов расчета ансамбля зависимостей $k_r(\tau, T_M)$, полученных при значении $p_M = 10$.

Визуальный анализ изображений показывает, что наблюдаемые процессы явно структурированы. В обоих случаях выделяются две области при среднем значении периода $T_1 \cong 3 \cdot 10^{-3} c$ и $T_2 \cong 1,5 \cdot 10^{-3} c$.

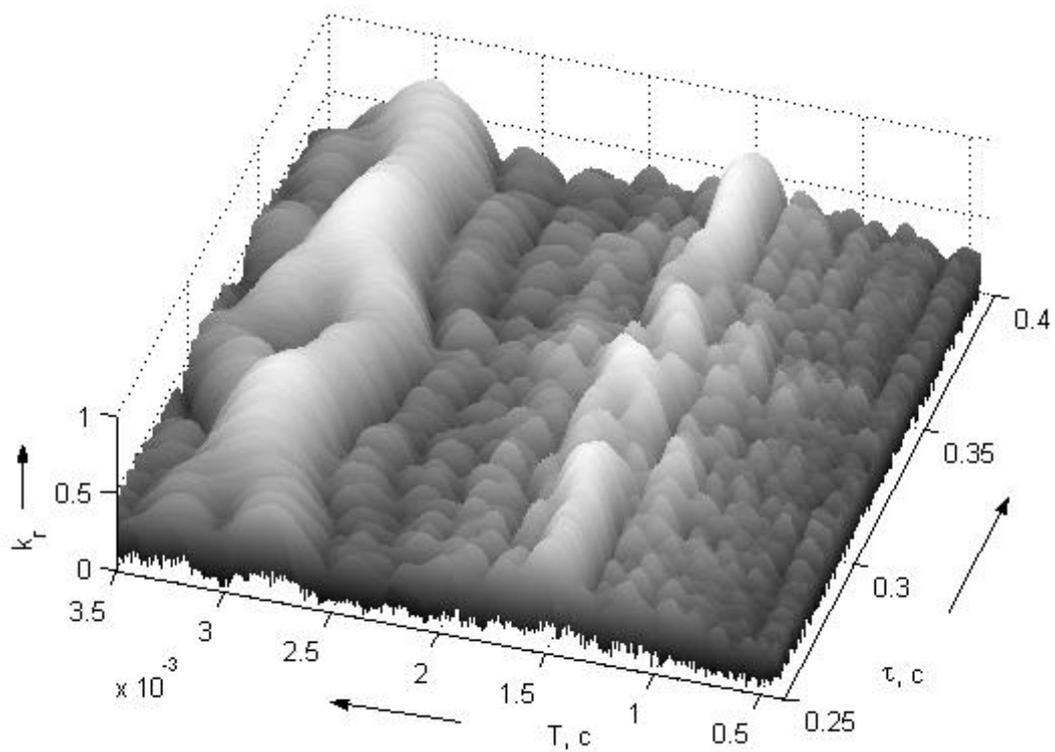


Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляции от параметра сдвига и периода синусоидальной модели (фрагмент 1)

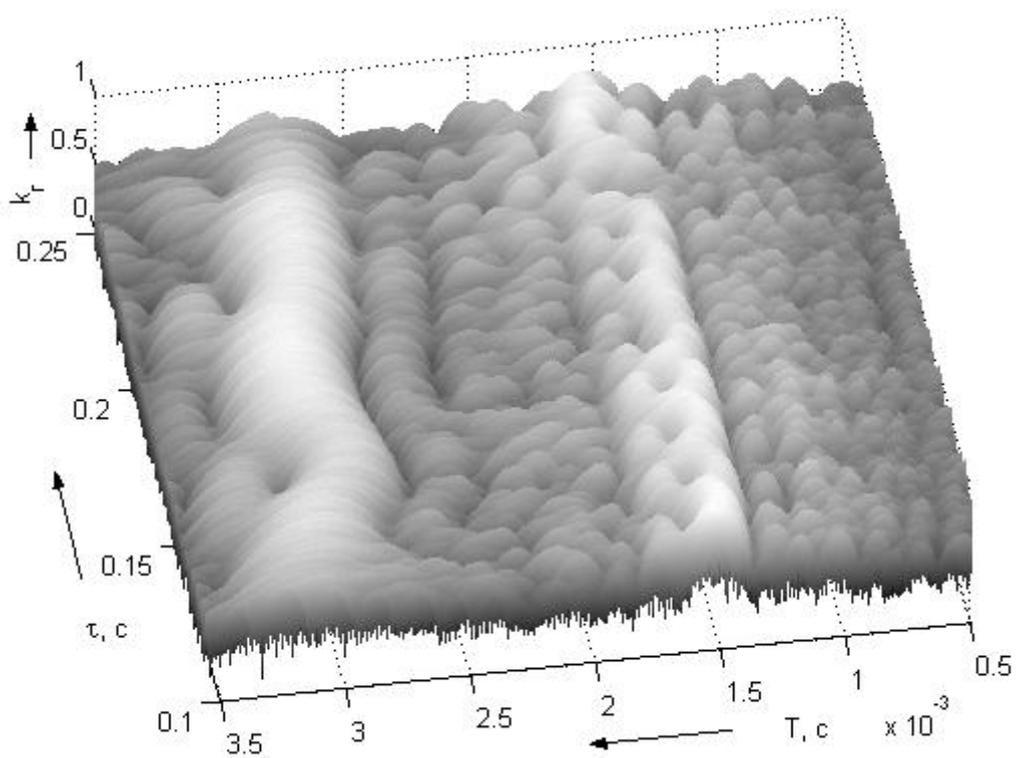


Рис. 2. Зависимость коэффициента корреляции от параметра сдвига и периода синусоидальной модели (фрагмент 2)

В первом случае флуктуации периода колебаний можно объяснить изменением режима работы основного источника акустического шума (вынуждающей силы) некоторого сложного агрегата. Это колебание можно определить как основное. Структура изменения периода в этой области показывает, что устройство, создающее помехи имеет как минимум два источника вынуждающей силы, например два или больше электроприводов. В области, прилежащей к этому колебанию ($T_{1,2} \cong (2,5 \dots 2,25) \cdot 10^{-3} c$), наблюдаются колебания, у которых период изменяется синхронно с изменением периода основного колебания. Возникновение этих колебаний можно объяснить процессом нелинейного распространения основного колебания в пределах конструкции устройства.

В области $T_2 \cong 1,5 \cdot 10^{-3} c$ наблюдается колебательный процесс с чередующимися возмущениями при относительно неизменном среднем значении периоде колебаний. Это явление можно объяснить как возникновение вынужденного колебания в некоторой области системы, обладающей собственной резонансной частотой, при воздействии на нее основного колебания как вынуждающей силы.

Общим свойством наблюдаемого процесса является малая продолжительность временных интервалов t_T , на которых период T_N сохраняет относительно постоянное значение, т.е., исходя из анализа зависимости рис. 1, 2, можно считать, что $T_N \cong const$ при $t_T \leq 0,05 s$.

Расчет значений $k_r(\tau)$ матрицы M_{kr} выполнялся при значении $p_M = 10$. Это значение было получено как оптимальное в результате анализа ряда матриц M_{krp} , которые рассчитывались по методике расчета M_{kr} , но для расчета каждой из матриц M_{krp} использовались различные, постоянные для данной матрицы значения $p_{Mi} = const$, взятые из ряда: $p_M = [2; 3; 5; 10; 20]$. В результате были получены и проанализированы пять матриц (по числу итераций периода модели) M_{krp} .

По каждой из матриц M_{krp} рассчитывался столбец Y_{sp} , каждый член γ_{sp} которого представляет собой сумму членов k_r вдоль строк M_{krp} : $\gamma_{sp}(T_M) = \sum_{j=1}^n k_{rjp}(T_M)$. Каждый из полученных столбцов Y_{sp} представляет собой зависимость $Y_s = F(T_M, p_M = const)$ суммарного коэффициента корреляции от длительности T_M периода модели для одного из значений p_M . На рис. 3 приведено семейство зависимостей Y_{sp} , нормированных на их максимальное значение $Y_s = 1/\max(Y_{sp})$.

Из приведенных зависимостей наглядно следует, что анализируемый процесс содержит не менее двух гармоник, однако их различимость уменьшается при уменьшении числа периодов в модели фрагмента помехи.

С целью формализации выбора оптимального значения p_M рассмотрим совместно зависимости $K_{rm}(p_M)$ и $Q(p_M)$, где $K_{rm} = \max[Y_{sp}(p_M)]$ – зависимость максимального значения функций Y_{sp} от величины p_M , и $Q(p_M)$ – коэффициент различимости гармоник, который вводится в виде $Q(p_M) = \sum_{i=1}^{m-1} |k_{ris}(T_{Mi} + 1) - k_{ris}(T_{Mi})|$ и представляет собой сумму конечных приращений функций Y_{sp} (аналог первой производной) полученных для каждого из значений T_M .

На рис. 4 приведены зависимости максимального значения $K_{rm}(p_M)$ коэффициента корреляции и коэффициента различимости Q гармоник нормированные на их максимальные значения от числа периодов p_M модели структурного элемента помехи.

Как следует из рис. 4, при $p_M > 10$ величина K_{rm} принимает значения $K_{rm} < 0,8$, при этом $Q > 0,9$. Следовательно, в области $p_M > 10$ показатель K_{rm} принимает весьма малые значения и, следовательно, для матриц значений M_{kr} при $p_M > 10$ в массиве данных отсутствуют фрагменты, отвечающие условию $T_N \cong const$.

В альтернативном случае при $p_M < 10$ наблюдается уменьшение различимости гармоник по значениям периодов, что выглядит как сливающиеся полосы на рис. 1, 2.

Исходя из приведенных выводов при расчетах ансамблей $k_r(\tau, T_M)$ было принято значение $p_M = 10$.

Следующим важным параметром является распределение по длительностям интервалов времени, в течение которых период помехи сохраняет постоянное значение.

Первым шагом в этом разделе является формирование числового массива, содержащего информацию о существовании гармоник помехи при данном значении периода T_M модели ее фрагмента, длительность которого определяется также и выбранным значением $p_M = 10$. Такой массив формируется применением операции сравнения каждого члена $k_r(\tau, T_M = const)$ исходной матрицы M_{kr} с пороговым k_{rp} значением. В настоящем исследовании принято значение $k_{rp} = 0,65$. В результате сравнения принимаются решения:

$$M_{kr0,65}(j,i) = 1 \text{ при } M_{kr}(j,i) \geq 0,65,$$

$$M_{kr0,65}(j,i) = 0 \text{ при } M_{kr}(j,i) < 0,65$$

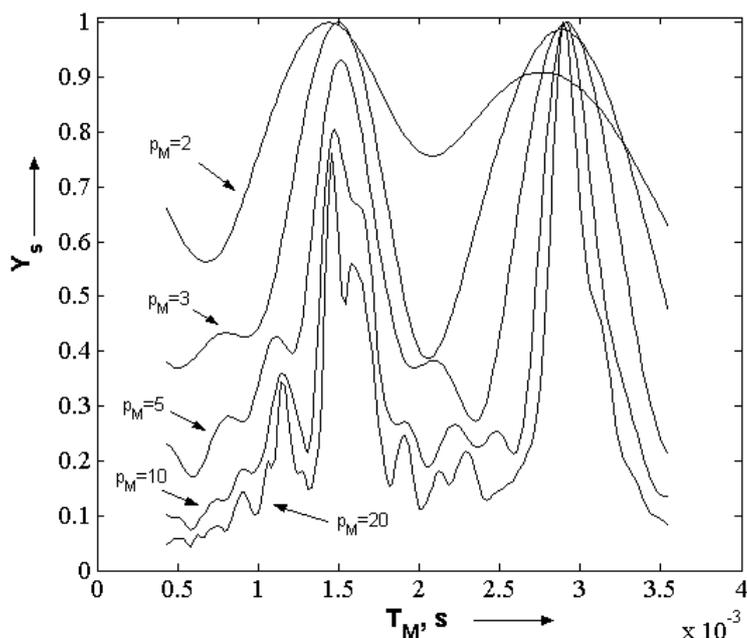


Рис. 3. Зависимости относительного суммарного коэффициента корреляции от длительности периода модели структурного элемента для ряда значений p_M

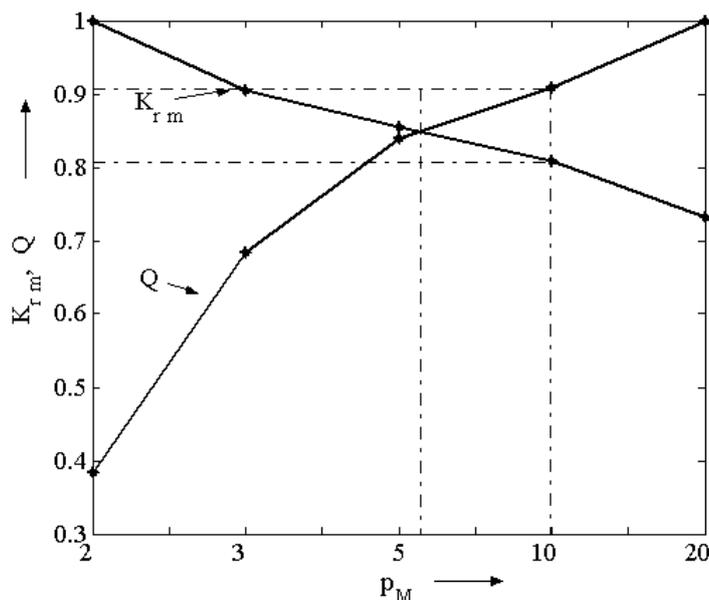


Рис. 4. Зависимость максимального коэффициента корреляции K_{rm} и коэффициента различимости Q от количества периодов в модели структурного элемента помехи

и формируется массив в виде матрицы $M_{kr0,65}$, содержащей только бинарные члены.

Далее вдоль строк матрицы $M_{kr0,65}$ выделяются фрагменты в виде элементарных массивов M_{onsi} данных, в пределах которых единичные значения присутствуют непрерывно, без нулевых промежутков и подсчитывается количество n_{onsi} этих единичных значений в каждом i - ht фрагменте данных. Очевидно, что длительность таких фрагментов $\tau_{gi} = n_{onsi} \cdot \Delta t$. В результате получаем вектор $T = [\tau_{g1} \dots \tau_{gN}]$ значений длительностей интервалов времени, в пределах которых период сигнала акустической помехи находится в некоторой временной области, определяемой значением $dT \sim p_M$ с центральным значением $T = T_M$, где N – общее число полученных фрагментов помехи.

На рис. 5 приведена гистограмма распределения статистической частоты $P^*[\tau_{gi}]$ значений τ_{gi} , рассчитанная по данным вектора $T = [\tau_{g1} \dots \tau_{gN}]$. Как следует из данных рис. 5, практически все распределение укладывается в области значений $\tau_g = [3 \dots 30] \cdot 10^{-3} c$. На число фрагментов с длительностью $\tau_g = [40 \dots 70] \cdot 10^{-3} c$ приходится менее одного процента вероятности.

Следовательно, анализируемый сигнал представлен небольшим числом гармонических составляющих, из которых явно выделяются только две, причем одна из них может рассматриваться как вынуждающая сила, остальные как вынужденные колебания со своими резонансными частотами.

Амплитудно-временная структура помехи показывает, что изменение частоты основной гармоники во времени имеет случайный характер, при этом частота вынужденного колебания изменяется синхронно с частотой основного колебания, сохраняя приблизительно постоянное значение разности этих частот.

Выводы

Рассмотрен процесс, содержащий только две явно выраженные гармоники, из которых одна является основной (вынуждающей), а вторая вынужденной (резонансной). На практике возможно существование источников помех и с большим числом основных гармоник, поэтому рассмотренную методику анализа следует в дальнейшем дополнить операциями выявления числа гармоник в исследуемом процессе.

Основным результатом работы является обоснование выдвинутого положения относительно преобладающего существования в зонах мегаполиса и аэропортов акустических помех со сложной амплитудно-временной структурой, которые определены как «комбинационные помехи». Показано, что такого типа помехи представлены несколькими гармониками, периоды и амплитуды которых изменяются во времени случайным образом, сохраняя при этом синхронность изменения и приближенно постоянное значение разности частот. Это положение может быть исходным при синтезе оптимально адаптивных алгоритмов функционирования систем акустического зондирования в условиях интенсивных акустических помех.

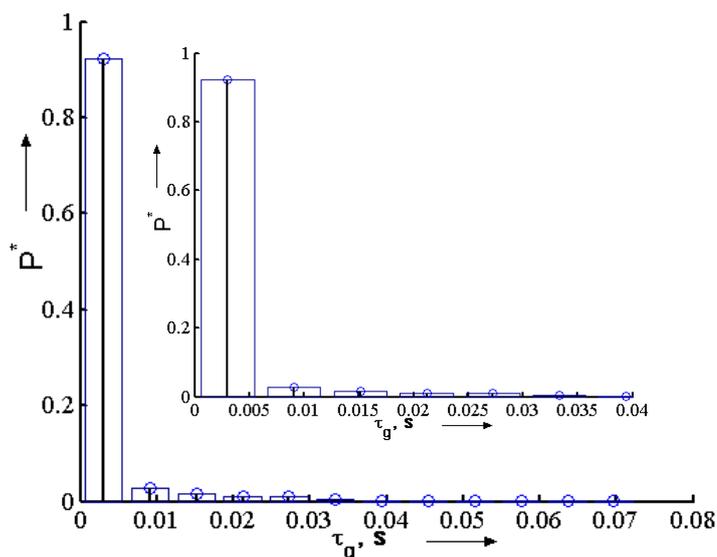


Рис. 5. Гистограмма распределения длительностей τ_{gi} фрагментов помехи

Продолжительность интервалов времени, на которых период гармоник сохраняет стабильность в некотором узком интервале периодов, мала и не превышает длительности $\tau_g \leq 70 \cdot 10^{-3} c$. Из этого следует, что частотный анализ помех такого типа на интервалах времени порядка нескольких секунд будет малоэффективным с точки зрения оптимизации параметров системы акустического зондирования атмосферы.

Список литературы:

1. Leonidov V.I., Semenets V.V. Analysis of methods for wind shear detection in area of airports by data of atmosphere acoustic sounding // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. 77(4). P.363-372.
2. Leonidov V.I. Acoustic sounding in the problem of finding and registration of thermodynamic perturbations in the surface layer of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2015. 74(3). P.269-279.
3. Леонидов В.И. Анализ квазипериодических амплитудно-временных структур эхо-сигналов акустического зондирования атмосферы / В.И. Леонидов, В.В. Семенец // Радиотехника. 2011. Вып. 167. С. 27-31.
4. Леонидов В.И. Статистические характеристики эхо-сигналов акустического зондирования в зоне мегаполиса // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. №6/4, (60). С.46-50.
5. Semenets V.V., Kartashov V.M., Leonidov V.I. Registration of refraction phenomenon in the problem of acoustic sounding // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. 77(5). P. 461-468.
6. Leonidov V.I., Semenets V.V. Coordinate method for estimation of radial velocity in systems of acoustic sounding of the atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. 76(3). P. 245-251.
7. Леонидов В.И. Задача обнаружения сигналов в системах акустического зондирования атмосферы / В.И. Леонидов, О.В. Зубков // Радиотехника. 2014. Вып. 178. С.13-19.
8. Leonidov V.I. Analysis of the models and structure of echo signals of the atmospheric acoustic sounding // Telecommunications and Radio Engineering. 2014. 73(16). P. 1497-1502.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 07.05.2019