

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СУХИХ ХРИПОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

И. В. ВОВК, В. Ю. СЕМЕНОВ

*Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03680, Киев-180, ГСП, Украина
тел. (044) 456-69-83; e-mail: semenov@deltacorp.net*

Предложен эффективный метод детектирования сухих хрипов в дыхательных шумах. Получено соотношение, связывающее мощности периодической и шумовой компонент дыхательного сигнала с пиковым значением автокорреляционной функции. На основе этого соотношения предложен способ выявления сухих хрипов, основанный на сравнении пикового значения автокорреляционной функции с переменным порогом. Важной особенностью метода является то, что он не только выполняет классификацию дыхательного сигнала по принципу “шумовой/периодический”, но и позволяет определять значения всех частотных составляющих, присутствующих в сухом хрипе.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка систем автоматического детектирования присутствия сухих хрипов в дыхательных шумах является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное прикладное значение [1,2]. Трудности создания таких систем обусловлены отсутствием для дыхательных шумов достаточно четких количественных критериев, ибо медицинская диагностика этих шумов до сих пор основывается главным образом на традиционных вербальных моделях, в которых изначально была заложена значительная доля субъективизма (см. [3] и библиографию в нем). Проблема усложняется и тем обстоятельством, что характер спектра дыхательных шумов может меняться не только на протяжении одного дыхательного цикла, но и на значительно меньших временных интервалах.

Как известно [1,2,3, 4,7], сухие хрипы в основном представляют собой периодические сигналы с ярко выраженным музыкальным тембром и которые могут иметь как квазигармонический характер, так и состоять из более сложных повторяющихся структур. Таким образом, в частотной области сухие хрипы характеризуются пиками в спектре мощности дыхательного шума (см. рис. 1). Несмотря на столь простое определение, на сегодняшний день не существует единых надежных алгоритмов автоматического их обнаружения, применимых к различным типам сухих хрипов и являющихся эффективными в контексте многообразия характеристик регистрирующего оборудования, фоновых помех и бишумов.

Существующие методы анализа хрипов часто насыщены эмпирическими константами [4], что указывает, прежде всего, на частный характер их применимости. Так, в работе [6] приводится алгоритм обнаружения спектральных пиков, в котором фигурируют пять эмпирически подобранных величин. Очевидно, что эмпирические константы, тщательно подобранные для конкретных условий, могут оказаться непригодными,

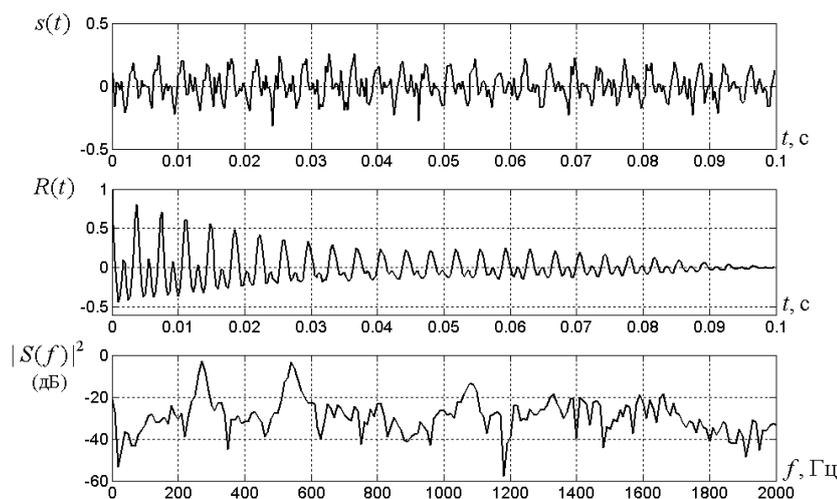


Рис. 1. Временная зависимость $s(t)$, автокорреляционная функция $R(t)$ и спектр мощности $|S(f)|^2$ фрагмента трахейного хрипа длительностью 100 мс.

например, при переходе на новую частоту дискретизации сигналов дыхательных шумов, или при использовании других длин интервалов спектрального анализа. Кроме того, некоторые существующие эмпирические правила не приспособлены к обнаружению множественных гармоник, присущих некоторым видам сухих хрипов [7].

Анализ существующих алгоритмов выявления периодических структур в сигнале дыхательных шумов показывает, что практически все они основаны на анализе спектра мощности. В то же время, из области цифровой обработки речевых сигналов [8] известно, что весьма надежным средством анализа периодичности временного сигнала (фонограммы) $s(t)$ является его автокорреляционная функция, представляющая собой обратное преобразование Фурье от спектра мощности $|S(f)|^2$:

$$R(t) = \bar{F}\{|S(f)|^2\} = \bar{F}\{|F\{s(t)\}|^2\}, \quad (1)$$

где F и \bar{F} являются символами прямого и обратного преобразований Фурье соответственно. На рис. 1 представлены графики временной зависимости (фонограммы) трахейного хрипа, его автокорреляционной функции $R(t)$ и спектра мощности $|S(f)|^2$. Как видно из рисунка, автокорреляционная функция содержит пик в точке $t_0 = 0.00375$ сек, соответствующий присутствующей в сигнале гармонике с частотой $f_0 = 1/t_0 = 267$ Гц.

Имея в виду вышесказанное, целью данной работы является построение эффективного метода автоматического детектирования сухих хрипов в дыхательных шумах на основе анализа их автокорреляционных функций.

1 ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Будем полагать, что наличие хрипа в дыхательном сигнале означает преобладание периодической компоненты сигнала над шумовой. Поэтому, представим исходный

фрагмент сигнала $s(n)$ в виде суммы периодической ($s_1(n)$) и шумовой ($s_2(n)$) компонент:

$$s(n) = s_1(n) + s_2(n), \quad (2)$$

Автокорреляционные функции исходного сигнала, его периодической и шумовой компонент обозначим соответственно как $R(t)$, $R_1(t)$ и $R_2(t)$. Пусть t_0 - точка максимума функции $R(t)$, принадлежащая диапазону изменения возможных значений фундаментальной частоты сухого хрипа (например, от 80 до 3100 Гц [5,3]). Используя некоррелированность периодической и шумовой компонент сигнала, преобразуем выражение для пикового значения нормированной автокорреляционной функции:

$$\begin{aligned} \frac{R(t=t_0)}{R(t=0)} &= \frac{R_1(t=t_0) + R_2(t=t_0)}{R_1(t=0) + R_2(t=0)} = \frac{R_1(t=t_0)}{R_1(t=0) + R_2(t=0)} = \\ &= \frac{R_1(t=t_0)/R_1(t=0)}{1 + R_2(t=0)/R_1(t=0)} = \frac{1 - t_0/T}{1 + 1/\delta}, \end{aligned} \quad (3)$$

где величина $R_1(t=0)/R_2(t=0) = 1 - t_0/T$ характеризует количество периодов, помещающихся на временном интервале длиной T , а параметр δ определяет соотношение мощностей периодической и шумовой компонент:

$$\delta = \frac{R_1(t=0)}{R_2(t=0)}.$$

Очевидно, что наиболее логичным критерием преобладания в сигнале периодической компоненты является выполнение неравенства $\delta > \delta_{\text{пор.}}$, где $\delta_{\text{пор.}}$ - пороговое значение отношения мощностей периодической и шумовой компонент сигнала. С учетом соотношения (3) данный критерий может быть переписан в виде:

$$\frac{R(t=t_0)}{R(t=0)} > \frac{\delta_{\text{пор.}}}{1 + \delta_{\text{пор.}}} \left(1 - \frac{t_0}{T}\right), \quad (4)$$

Из формулы (4) следует простая графическая интерпретация полученного результата. Если значение нормированной автокорреляционной функции превосходит в точке максимума линейный убывающий во времени порог, то в сигнале преобладает периодическая компонента. В противном случае, должно быть вынесено решение о преобладании в сигнале шумовой компоненты. Как следует из формулы (4), зависящий от времени порог представляет собой прямую, проходящую через точки $\{0, \delta_{\text{пор.}}/(1 + \delta_{\text{пор.}})\}$ и $\{T, 0\}$.

Проиллюстрируем предлагаемый подход на конкретном примере. Пороговое соотношение мощностей шумовой и периодической компонент $\delta_{\text{пор.}}$ в критерии (4) примем равным единице, что сводит суть процедуры к сравнению мощностей периодической и шумовой компонент, присутствующих в сигнале. Все фрагменты рассмотренных в дальнейшем сигналов имели длительность $T = 100$ мс и были дискретизированы с частотой $f_s = 4000$ Гц.

Рассмотрим случай, в котором фонограмма содержит как везикулярное дыхание (т.е. шумовой сигнал), так и сухой хрип, содержащий одну ярко выраженную частоту. На рис. 2 представлены такая фонограмма, соответствующая ей функция $R(t)$ и спектр мощности $|S(f)|^2$.

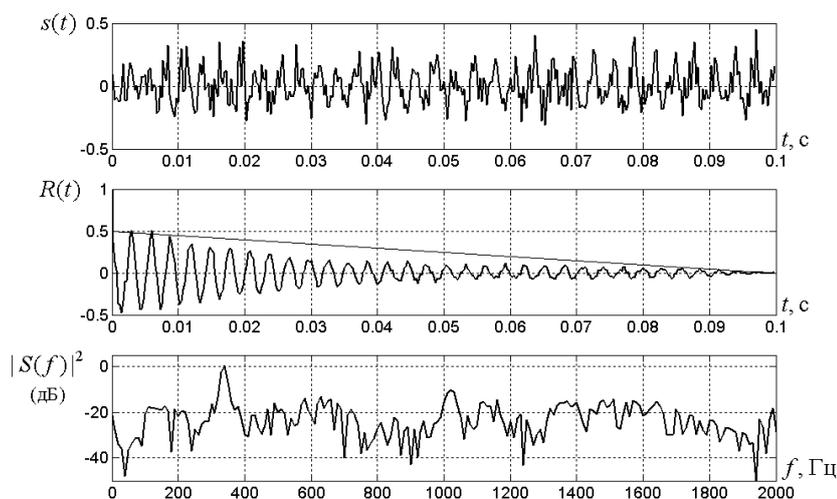


Рис. 2. Фонограмма $s(t)$, автокорреляционная функция $R(t)$ и спектр мощности $|S(f)|^2$ фрагмента трахейного хрипа.

Как следует из визуального анализа временной зависимости, в данном сложном сигнале преобладает периодическая компонента. Это в полной мере подтверждается и анализом функции $R(t)$, где видно, что ее пиковое значение (в момент времени $t_0 = 6$ мс, что соответствует частоте $f_0 = 1/t_0 = 167$ Гц) превосходит соответствующее значение переменного порога. Таким образом, принимается решение о преобладании в данном сигнале периодической компоненты. Отметим, что частота, соответствующая пику автокорреляционной функции, может отличаться в целое число раз от частоты, преобладающей в спектре мощности сигнала. Поэтому, если ставится задача не только обнаружения хрипа, но и точного вычисления преобладающих в нем частот, это должно производиться путем поиска максимума в спектре мощности. В данном примере преобладающей в спектре сигнала является частота $2f_0 = 334$ Гц.

2 ОБНАРУЖЕНИЕ В СУХОМ ХРИПЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ ГАРМОНИК

Рассмотрим сложный случай, когда в состав сигнала сухого хрипа входит несколько гармоник. Хорошо известно, что при диагностировании патологий дыхательных путей весьма важным является не только обнаружение наличия периодических компонент в сигнале, но и выявление всех доминирующих в сигнале частот, а также оценка соотношений между ними [3]. Кроме того, в дыхательном сигнале могут присутствовать несколько видов хрипов, связанных с разными источниками их возбуждения [5]. В данном разделе предлагается простой двухшаговый алгоритм анализа различных частотных составляющих, присутствующих в сигнале.

Первый шаг - производится классификация исходного сигнала по принципу “шумовой/периодичный” с помощью метода, описанного в предыдущем разделе. Если



Рис. 3. Фонограмма хрипа, содержащего несколько гармоник, автокорреляционные функции, соответствующие пяти итерациям предложенного алгоритма выявления частот, доминирующих в спектре сигнала, и спектр мощности.

сигнал классифицирован, как “шумовой”, работа алгоритма прекращается. В противном случае, переходим к следующему шагу.

Второй шаг - в спектре мощности исходного сигнала определяется доминирующая частота, после чего она удаляется из сигнала (например, простым обнулением соответствующих ей спектральных отсчетов) и производится переход к первому шагу.

Продemonстрируем работу данного алгоритма на примере бронхиального сухого хрипа. На графиках рис. 3 представлены фрагмент фонограммы такого хрипа, нормированные автокорреляционные функции $R^{(k)}(t)$, $k = 1, \dots, 5$, соответствующие каждой из итераций алгоритма, и спектр мощности $|S(f)|^2$. В результате выполнения четырех итераций было установлено наличие в сигнале периодических компонент с частотами 83, 165, 248 и 329 Гц, которые образуют между собой соотношение 1:1.99:2.99:3.97.

На каждой из итераций вышеописанного алгоритма может быть вычислена относительная интенсивность соответствующей гармоники с помощью соотношения (4). После завершения выявления всех частотных составляющих $\{f_k, k = 1, \dots, m\}$ можно, таким образом, сформировать искусственный гармонический сигнал, имитирующий частотный состав рассмотренного фрагмента.

3 ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

На основе предложенного выше метода было создано программное обеспечение, предназначенное для анализа дыхательных шумов. Структура интерфейса данного программного продукта представлена на рис. 4. Отображаемые в основном окне результаты работы программы включают в себя процентные доли интервалов, содержащих хрипы

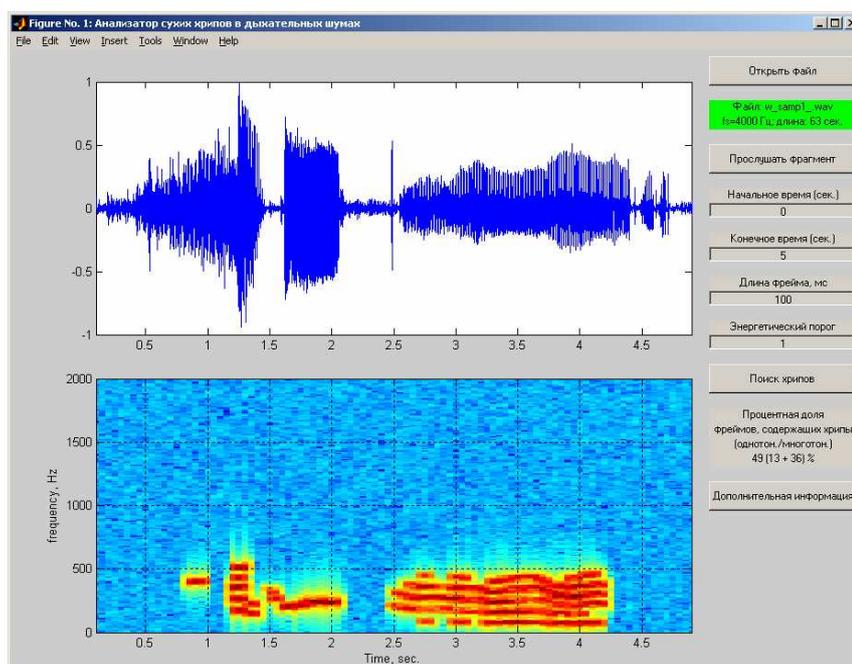


Рис. 4. Интерфейс разработанного программного обеспечения для автоматического обнаружения сухих хрипов.

(с указанием долей хрипов с единичными и множественными гармониками) и визуализацию результатов работы алгоритма, заключающуюся в построении спектрограммы искусственного гармонического сигнала, имитирующего частотный состав рассмотренного фрагмента.

Интерфейс разработанного программного обеспечения, отображенный на рис. 4, соответствует анализу участка бронхиального сигнала длительностью 5 сек. Спектрограмма результирующего искусственного сигнала, обеспечивающего визуализацию результатов работы предложенного метода, представлена на нижнем графике. Отметим, что в полученной спектрограмме четко (без помех шумовой составляющей исходного сигнала) видны все основные присутствующие в сигнале частотные составляющие. При этом, чем выше относительная интенсивность частотной компоненты в исходном сигнале, тем четче выражено ее присутствие в сгенерированном искусственном сигнале.

ВЫВОДЫ

1. Получено соотношение, связывающее мощности периодической и шумовой компонент сигнала с пиковым значением автокорреляционной функции.
2. На основе данного соотношения предложен способ выявления сухих хрипов, основанный на сравнении пикового значения автокорреляционной функции с переменным порогом.
3. Метод был опробован на некоторых типах дыхательных шумов и в целом показал удовлетворительные результаты.

4. Важной особенностью метода является то, что он не только выполняет классификацию рассматриваемого фрагмента дыхательного сигнала по принципу “шумовой/периодический”, но и позволяет определить значения всех частотных составляющих, присутствующих в сигнале.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bentur L., Beck R., Berkowitz D., Hasnin G., Berger I., Irving C., Gavriely N.* Adenosine bronchial provocation in chronic cough - a study with automatic wheeze detection // 25th International Conference on Lung Sounds.– Chicago, Illinois, 2000.– P. .
2. *Murphy R., Vyshedskiy A., Paciej R.* Automated analysis of squawks // 29th International Conference on Lung Sounds.– Glasgow, Scotland, 2004.– P. .
3. *Вовк И.В., Гринченко В.Т., Дажнов С.Л., Крижановский В.В., Олійник В.Н.* Шумы дыхания человека: объективизация аускультативных признаков // Акуст. вісн.– 1999.– **2**, N 3.– С. 11–32.
4. *Gavriely N., Cugell D.* Breath sounds methodology.– Boca Raton, Fla: CRC Press, 1995.– p.
5. *Басовский В.Г., Вовк И.В., Вовк О.И.* О возможности генерирования тональных звуковых колебаний потоком воздуха в бронхах со стенозом // Акуст. вісн.– 2003.– **6**, N 1.– С. 3–21.
6. *Shabtai-Musih Y., Grotberg J.B., Gavriely N.* Spectral content of forced expiratory wheezes during air, He and SF6 breathing in normal humans // J. Appl. Physiol.– 1992.– **72**.– P. 625–635.
7. *Fenton T.R., Pasterkamp H., Tal A., Chernick V.* Automated spectral characterization of wheezing in asthmatic children // IEEE Trans. Biomed. Eng.– 1985.– **32**.– P. 50–55.
8. *Рабинер Л., Шафер Р.* Цифровая обработка речевых сигналов.– М.: Радио и связь, 1981.– 496 с.