

Метод неинвазивной диагностики состояния барабанной перепонки с использованием зондирующих полигармонических звуковых сигналов

Аннотация

Изложен оригинальный метод неинвазивного исследования барабанной перепонки, основанный на регистрации и обработке отраженных ею зондирующих полигармонических звуковых сигналов; описан комплекс технических средств, необходимых для реализации разработанного метода в отоларингологической практике.

Барабанная перепонка является границей между наружным и средним ухом и представляет собой тонкую мембрану, непроницаемую для воздуха и жидкости. За счет фиксации в циркулярном желобе волокнисто-хрящевого кольца большая часть барабанной перепонки находится в натянутом состоянии (в верхне-переднем отделе она не натянута из-за отсутствия желоба и среднего фиброзного слоя). Под воздействием колебаний звукопроводящего окружения барабанная перепонка подвергается упругим вибрациям, динамические характеристики которых позволяют оценить ее состояние, что имеет существенное значение для диагностики заболеваний органа слуха [1], [2].

В клинической практике для диагностики состояния барабанной перепонки используют осмотр при помощи воронки Зигле, под операционным микроскопом, с одновременным проведением пробы Вальсальвы или применяют объективные методики – акустическую импедансометрию или многочастотную тимпанометрию [1]-[6]. Однако методы визуального наблюдения за барабанной перепонкой под увеличением при проведении барометрических проб являются субъективными и не позволяют дать объективную оценку подвижности структур среднего уха. Акустическая импедансометрия и многочастотная тимпанометрия требуют создания в наружном слуховом проходе избыточного давления с переменным градиентом и излучения в наружный слуховой проход ультразвука и высокоинтенсивного звука, что снижает объективность их результатов вследствие невозможности нивелировать методические погрешности, обусловленные вышеназванными особенностями. Кроме того, применение акустической импедансометрии и многочастотной тимпанометрии невозможно при исследовании барабанной перепонки в послеоперационном периоде, после хирургических вмешательств, выполненных для улучшения слуховой функции.

Разработанные в последнее время высокочувствительные методы неинвазивной диагностики состояния барабанной перепонки, основанные на голографической интерферометрии и лазерной доплеровской виброметрии, также имеют существенные недостатки [3]-[7]. Голографическую интерферометрию не применяют в клинической практике ввиду размеров и громоздкости установки, а в лазерной доплеровской виброметрии оперируют скоростью перемещения различных отделов барабанной перепонки, что существенно затрудняет интерпретацию получаемых результатов.

Для создания широкодоступной универсальной аппаратуры неинвазивной диагностики состояния барабанной перепонки разработан метод, позволяющий выполнить такое исследование на основании анализа зондирующего полигармонического звукового сигнала, отраженного барабанной перепонкой.

Математическое обеспечение метода

Теоретической основой разработанного метода неинвазивной диагностики состояния барабанной перепонки является модифицированный метод двух микрофонов [8]-[11]. Звуковые колебания, возбудившие на барабанную перепонку, вызывают ее вибрацию, частично проходят через барабанную перепонку и частично отражаются от ее поверхности. При этом отраженные звуковые колебания имеют меньшую амплитуду

(уровень звукового давления) и сдвинуты по фазе относительно падающей звуковой волны. Уменьшение амплитуды и сдвиг фазы отраженных звуковых колебаний зависят от жесткости барабанной перепонки. Таким образом, на основании анализа изменения амплитуды и сдвига фазы звуковых колебаний, отраженных барабанной перепонкой, можно сделать вывод о ее состоянии.

Для этого для каждой частоты f отраженного барабанной перепонкой зондирующего полигармонического сигнала определяют амплитуду (уровень звукового давления) и разность фаз φ сигналов, регистрируемых измерительными микрофонами в двух точках P_1 и P_2 .

По результатам измерений определяют комплексный коэффициент отражения

$$r = |r| \exp(i\theta),$$

где $|r|$ и θ – соответственно модуль и аргумент коэффициента отражения:

$$|r| = \frac{\sqrt{[(N^2 - 1) + 4N^2 (\cos^2 kL + \cos^2 \varphi) - 4N(N^2 + 1)\cos \varphi \cdot \cos kL]}}{[N^2 + 1 - 2N \cos(kL + \varphi)]},$$

$$\theta = \arctg\{[2N \sin kL \cdot (N \cos kL - \cos \varphi)] /$$

$$/ [N^2 - 1 - 2N \cos kL \cdot (N \cos kL - \cos \varphi)]\},$$

где $N = P_1 / P_2$ – соотношение измеренных значений уровня звукового давления в двух точках; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число (пространственная частота) [8]-[11]. Далее вычисляют:

- коэффициент поглощения

$$\alpha = 1 - r^2;$$

- комплексный импеданс барабанной перепонки для каждой частоты

$$Z = R + jY,$$

где R – резистанс (активная компонента импеданса); Y – реактанс (реактивная компонента импеданса):

$$R = \frac{1 - r^2}{1 + r^2 + 2r \cdot \cos \theta}; \quad Y = \frac{-2r \sin \theta}{1 + r^2 + 2r \cdot \cos \theta}.$$

Затем определяют частоты полигармонического сигнала, на которых реактанс изменяет знак (резонансные частоты): вследствие физиологических особенностей слухового анализатора в звуковом частотном диапазоне таких частот три:

- 1) первая резонансная частота (первый резонанс) f_1 , на которой реактанс равен нулю при изменении знака с отрицательного на положительный, а при ее отсутствии представляет собой среднее арифметическое двух смежных частот звукового сигнала, на меньшей из которых знак реактанса отрицательный, а на большей – положительный;
- 2) вторая частота (антирезонанс) f_2 , на которой реактанс стал равен нулю при изменении знака с положительного на отрицательный, а при ее отсутствии представляет собой среднее арифметическое двух смежных частот звукового сигнала, на меньшей из которых знак реактанса положительный, а на большей – отрицательный;

3) третья частота (второй резонанс) f_3 – вторая частота, на которой реактанс стал равен нулю при изменении знака с отрицательного на положительный, а при ее отсутствии представляет собой среднее арифметическое двух смежных частот звукового сигнала, на меньшей из которых знак реактанса отрицательный, а на большей – положительный.

На основании полученных величин рассчитывают оценку состояния барабанной перепонки исследуемого уха K :

$$K = 0,01(|f_1 - 430| + |f_2 - 980| + |f_3 - 2300|) + \\ + 10(|\alpha_1 - 0,9| + |\alpha_2 - 0,2| + |\alpha_3 - 0,8|) + \\ + 0,5(|R_1 - 2| + |R_2 - 20| + |R_3 - 2,6|)$$

и при $K > 10$ диагностируют патологию барабанной перепонки, требующую углубленного обследования отоларингологом.

Аппаратное обеспечение реализации метода

Для реализации разработанного метода требуется аппаратный комплекс, включающий в себя волновод-интерферометр, один конец которого оборудован перфорированной панелью и трубкой для герметичного сочленения с ушным вкладышем, а другой конец – громкоговорителем, соединенным с генератором полигармонического сигнала звуковой частоты.

Волновод-интерферометр изготовлен из металла, толщина его стенки составляет 2,5 мм. Длина волновода-интерферометра превышает 1/20 максимальной длины волны используемого полигармонического сигнала, а площадь его поперечного сечения равна 1 см² [8]-[11]. Отношение площади отверстия перфорированной панели к площади поперечного сечения волновода-интерферометра не превышает 0,1. Ушной вкладыш (диаметр – 7 мм, длина – 5...8 мм) изготовлен из легко деформируемого материала, способного принимать форму слухового канала.

В двух точках боковой поверхности волновода установлены измерительные микрофоны конденсаторного типа, имеющие линейную частотную характеристику во всем диапазоне звуковых частот, так, что:

- расстояние от любого микрофона до конца волновода превышает 10 диаметров волновода (это обеспечивает формирование в волноводе плоской волны) [8];
- расстояние между микрофонами L удовлетворяет соотношению

$$0,025\lambda_{max} < L < \lambda_{min} / 2,$$

где λ_{min} , λ_{max} – минимальная и максимальная длина звуковой волны, излучаемой генератором, м.

Измерительные микрофоны через аналого-цифровой преобразователь соединены с компьютером, в котором осуществляют обработку информации.

Методика исследования

Пациента усаживают на стул, в его ухо устанавливают ушной вкладыш, герметично сочлененный с концом волновода-интерферометра. С выхода генератора сигналов звуковой частоты в громкоговоритель подают полигармонические звуковые сигналы с априорно заданным (из клинических соображений) частотным диапазоном, образованные набором тональных сигналов с шагом по частоте, определяемым требуемой точностью исследования. Одновременно в компьютер передают информацию с измерительных микрофонов. На одном ухе рекомендуется повторять измерения 2-3 раза (усредняя их результаты), затем ушной вкладыш устанавливают в другое ухо и выполняют те же действия. В итоге для каждого уха каждого пациента получают значения характерных частот $f_1...f_3$ и комплексного импеданса барабанной перепонки на каждой частоте.

Невозможность определения хотя бы одной из частот $f_1...f_3$ свидетельствует о негерметичности сочленения ушного вкладыша с концом волновода-интерферометра или о несоответствии диаметра ушного вкладыша диаметру слухового про-

да человека. В этом случае необходимо повторить измерения, обеспечив выполнение условий их проведения.

Экспериментальная апробация

Апробацию метода проводили в ходе экспериментальных исследований состояния барабанной перепонки 35 пациентов; было выявлено 17 здоровых ушей (выполнено 49 измерений) и 53 больных уха (выполнено 155 измерений). В качестве референтного метода использовали отоскопическое исследование, проводимое врачом-отоларингологом, имеющим 37-летний стаж профессиональной деятельности в отоларингологическом отделении госпиталя.

Зондирующие полигармонические звуковые сигналы формировали набором тональных сигналов с шагом по частоте 10 Гц в частотном диапазоне от 340 до 3300 Гц. Длительность одного исследования составляла 15 с, после чего измерения повторяли еще по два раза на том же ухе. Затем ушной вкладыш устанавливали в другое ухо и выполняли те же действия. В результате для каждого уха каждого пациента были получены значения характерных частот $f_1...f_3$ и комплексного импеданса барабанной перепонки на каждой частоте. По полученным данным рассчитывали оценку состояния барабанной перепонки исследуемого уха K .

Пользуясь методиками работы [12], показано, что разработанный метод обладает чувствительностью 96,8 % и специфичностью 91,8 %, что в сочетании с малым временем обследования удовлетворяет требованиям отоларингологической практики.

Заключение

Использование зондирующих полигармонических звуковых сигналов исключило необходимость создавать при диагностике состояния барабанной перепонки избыточное давление в наружном слуховом проходе и излучать в него ультразвук и высокоинтенсивный звук, за счет чего удалось устранить выраженные помеховые факторы, повысить точность диагностического исследования и обеспечить безопасность его проведения.

Возможность управлять частотным диапазоном используемых полигармонических сигналов и шагом образующих их тональных сигналов обеспечивает возможность диагностического исследования состояния барабанной перепонки с любым шагом в любом поддиапазоне звукового диапазона частот.

Изложенное позволяет рекомендовать разработанный метод для использования как при фундаментальных физиологических и биомеханических исследованиях слухового анализатора, так и в прикладных (диагностических) целях.

Список литературы:

1. Jerger J. Clinical experience with impedance audiometry // Archives of Otolaryngology. 1970. № 92 (4). PP. 311-324.
2. Альтман Я.А., Таварткиладзе Г.А. Руководство по аудиологии. – М.: ДМК Пресс, 2003. 360 с.
3. Стратиева О.В. Путеводитель по акустической импедансометрии. – Уфа: Издательство Башкирского государственного медицинского университета, 2001. 140 с.
4. Дайхес Н.А., Мареев О.В., Мареев Г.О., Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Результаты применения лазерного автодина для исследования подвижности барабанной перепонки // Саратовский научно-медицинский журнал. 2011. Т. 7. № 4. С. 894-897.
5. Бегун П.И., Као Л.Д. Математическое моделирование и исследование барабанной перепонки в норме и при патологии среднего уха // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 12.
6. Мареев Г.О., Мареев О.В. Диапазон смещений барабанной перепонки в норме и при различной патологии уха // Кубанский научный медицинский вестник. 2012. № 1. С. 114-118.

7. Драган С.П., Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Солдатов С.К., Дроздов С.В. Акустическая эффективность средств защиты от шума // Медицинская техника. 2013. № 3. С. 34-36.
8. Богомолов А.В., Драган С.П. Новый подход к исследованию импедансных характеристик барабанной перепонки // Доклады Академии наук. 2015. Т. 464. № 1. С. 105.
9. Лебедева И.В., Драган С.П. Определение акустических характеристик в трубах с помощью двух микрофонов // Измерительная техника. 1988. № 8. С. 52.
10. Драган С.П., Лебедева И.В. Поглощение интенсивного звука на отверстиях в экране // Акустический журнал. 1998. Т. 44. № 2. С. 206.
11. Драган С.П., Лебедева И.В. Нелинейное звукопоглощение // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 1994. Т. 35. № 6. С. 104-113.
12. Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Математическое обеспечение мета-анализа результатов независимых экспериментальных медико-биологических исследований // Информатика и системы управления. 2011. № 4. С. 65-74.

Сергей Павлович Драган,
канд. техн. наук, заслуженный конструктор РФ,
ведущий научный сотрудник,
Алексей Валерьевич Богомолов,
д-р техн. наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Государственный научный центр
Российской Федерации – Федеральный
медицинский биофизический центр
им. А.И. Бурназяна,
г. Москва,
e-mail: s.p.dragan@rambler.ru

И.В. Горбунов, А.А. Зайцев, Р.В. Мещеряков, И.А. Ходашинский

Система поддержки принятия решений при назначении комплексов немедикаментозной реабилитации

Аннотация

Описано построение рекомендательной системы выбора одного из пяти реабилитационных комплексов немедикаментозной реабилитации участников вооруженных конфликтов и чрезвычайных ситуаций. Разработанные в Томском НИИ курортологии и физиотерапии ФМБА России реабилитационные технологии позволяют предупредить возможную хронизацию патологических процессов, повысить адаптационные резервы организма и улучшить качество жизни лиц, пострадавших в чрезвычайных ситуациях. Для каждого комплекса сформирован набор признаков, позволяющий наиболее точно идентифицировать данный комплекс. Принцип построения рекомендательной системы носит инструментальный характер, позволяющий использовать ее не только в центрах реабилитации и восстановительного лечения, но и в других учреждениях здравоохранения.

Введение

Одной из наиболее важных задач восстановительной медицины является оценка эффективности применения немедикаментозных технологий. Актуальность данной проблемы проявляется также и в необходимости прогнозирования лечебного эффекта, а следовательно, в выборе наиболее эффективных средств и методов профилактики, лечения и реабилитации.

В решении задач медицинской диагностики, мониторинга и прогнозирования успешно применяются методы статистики и вычислительного интеллекта, такие как анализ выживания, логистическая регрессия, сети Байеса, кластерный анализ, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, деревья решений. С точки зрения обнаружения новых закономерностей в медицинских данных, методы вычислительного интеллекта являются более перспективными по сравнению с традиционными статистическими методами [1].

Подавляющее большинство работ по созданию моделей и программных средств в области медицины направлено на диагностику болезней. Меньшая часть проводимых математических и компьютерных исследований направлена на разработку методов и средств лечения, и совсем незначительная часть – на выбор комплексов реабилитации. В обзорной статье [2] авторы отмечают, что работ по применению машинных методов обучения для решения задач диагностики рака на порядок больше, чем работ по прогнозу этого заболевания.

Решение задач медицинской классификации и прогнозирования, как правило, ведется в условиях дефицита экспериментальных данных, поэтому не всегда удается построить алгоритм, восстанавливающий искомую зависимость. В связи с тем, что число признаков в таблице наблюдений превышает число

самих наблюдений (обследованных пациентов), применение таких статистических методов, как логистическая регрессия и дискриминантный анализ, является затруднительным и даже невозможным [3].

Пребывание в зонах вооруженных конфликтов вызывает выраженные нарушения стресс-лимитирующих систем организма: стойкую избыточную активацию симпатoadреналовой системы, развитие иммунодефицитных состояний, снижение антиоксидантного потенциала крови и активацию процессов липопероксидации, увеличение концентрации атерогенных фракций холестерина и нарушение стабильности мембран гепатоцитов. Выявленные изменения, протекающие на фоне хронического стресса, и нарушение психологического статуса без проведения соответствующей коррекции могут развиваться в ряд соматических заболеваний, таких как гипертоническая болезнь, ишемическая болезнь сердца, заболевания желудочно-кишечного тракта и периферической нервной системы. Разработанные в Томском НИИ курортологии и физиотерапии ФМБА России реабилитационные технологии позволяют предупредить возможную хронизацию патологических процессов, повысить адаптационные резервы организма и улучшить качество жизни лиц, пострадавших в чрезвычайных ситуациях. В Томском НИИ курортологии и физиотерапии накоплены ретроспективные данные и определены методики оценки состояния пациентов после реабилитации назначенными комплексами.

Целью рассматриваемой работы является описание рекомендательной системы, позволяющей прогнозировать результат реабилитации вновь поступившего пациента по данным его анализов. Выделено два важных этапа: 1) отбор информативных признаков из ретроспективных данных, максимально влияющих на изменение интегрального индекса здоровья;