

Неинвазивная диагностика одновременно нескольких заболеваний верхних дыхательных путей по параметрам речевого сигнала

Аннотация

Разработан алгоритм принятия диагностического решения по параметрам речевого сигнала, обеспечивающий диагностику сочетаний таких заболеваний верхних дыхательных путей, как искривление носовой перегородки, полипозный синусит, ринит, тонзиллит. Показано, что при диагностике ошибки пропуска правильного диагноза пациента (ошибки первого рода) случаи наличия двух сочетанных диагнозов заболеваний при разделении пациентов по гендерному и возрастному признакам составляют 7,8...17 %, а ошибки ложного диагностирования (ошибки второго рода) – 14,5...21,5 %.

Введение

Необходимость разработки и совершенствования методов неинвазивной диагностики заболеваний верхних дыхательных путей (ВДП) определяется повышенными требованиями к стандартам и качеству оказания медицинских услуг в РФ, а также опасными последствиями несвоевременного лечения [1]. Дистанционная диагностика заболеваний ВДП по речевому сигналу (РС) обеспечит охват больших групп обследуемых, например детей, в детских учебно-воспитательных учреждениях и увеличит надежность принятия решения о необходимости их диспансеризации.

В работе [2] предлагается метод принятия диагностического решения на основе анализа параметров РС в случае наличия у пациента сочетаний таких заболеваний ВДП, как искривление носовой перегородки (Инп), полипозный синусит (Псн), ринит (Рнт), тонзиллит (Тнз). Из результатов клинической практики диагностики в лор-отделении ГБУ «Областная клиническая больница им. Н.А. Семашко», г. Рязань, (ГБУ РО «ОКБ им. Н.А. Семашко»), заболеваний ВДП следует, что в 5...15 % случаев у одного пациента могут присутствовать одновременно два сочетанных заболевания, присутствие одновременно трех заболеваний практически не встречается. Это определяется физиологией воспалительных процессов, например Инп нередко сопутствует возникновению ринитов и полипозных синуситов. Данные обстоятельства требуют уточнения алгоритмов диагностики, а также учета гендерно-возрастных особенностей пациентов.

Цель исследования – разработать алгоритм принятия диагностических решений в случае наличия двух сочетанных заболеваний ВДП с учетом возрастных и гендерных различий пациентов.

Описание диагностируемого материала и исследуемых параметров речевого сигнала

В исследовании приняли участие 294 пациента (167 мужчин и 127 женщин). Возраст испытуемых находился в пределах от 18 до 81 года, обследуемые имели одно или несколько из перечисленных выше заболеваний, требующих хирургического вмешательства в процессе лечения. Пациенты с указанными заболеваниями поступали в лор-отделение ГБУ РО «ОКБ им. Н.А. Семашко», г. Рязань, на операционное лечение. Запись фонограмм осуществлялась в отдельной комнате, изолированной от внешних акустических воздействий, на широкополосный диктофон с частотой дискретизации 48 кГц и разрядностью квантования 24 бита в формате WAV (PCM). В составе пациентов с диагнозом полипозный синусит присутствовало 40 мужчин и 23 женщины, с искривлением носовой перегородки – соответственно 54 и 23, с хроническим ринитом – 12 и 15, с тонзиллитом – 19 и 29. В клинической практике диагностики обычно встречаются три пары сочетаний диагнозов: (Псн + Инп) – 9 и 11, (Инп + Рнт) – 24 и 16, (Псн + Рнт) – 9 и 10 мужчин и женщин. В соответствии с составом полученных групп пациентов было сформировано по восемь выборок пациентов с указанными диагнозами для мужчин и женщин в отдельности, а также для смешанной группы мужчин и женщин, общее число выборок составило 24. Голос

пациента регистрировался в ходе двух сеансов, до операции и после, по истечении месяца для выявления других возможных сопутствующих диагнозов. Фонограммы пациентов включали в себя изолированно произнесенные гласные фонемы, слоги, наиболее часто встречающиеся в русской речи, слова, слитный текст, с преобладающим содержанием вокализованных звуков (более 75 %) в соответствии с ГОСТ Р 50840–95. С каждым из пациентов было записано до 34 речевых фрагментов, итоговый состав содержал около 4676 фонограмм, из которых формировались выборки фонетического материала пациентов с соответствующим диагнозом. Контрольная группа здоровых людей составляла 285 человек, из них 190 мужчин и 95 женщин.

Исследовались следующие группы параметров РС во временной и частотной областях [2]:

- 1) параметры частоты основного тона (ОТ): частота, первые 6 гармоник, максимальное и минимальное значения, нестабильность частоты и амплитуды, джиттер, шиммер на интервале длительности фонограммы;
- 2) частота, амплитуда и ширина полосы первых четырех формант;
- 3) кратковременная энергия на интервале анализа, минимальное и максимальное значения энергии фонограммы, динамический диапазон фонограммы, время максимальной фонации;
- 4) мел-частотные кепстральные коэффициенты;
- 5) коэффициенты линейного предсказания, которые вычисляются по известным методикам;
- 6) параметры нелинейной модели РС и параметры импульса голосового источника, разработанные авторами [3], [4] в интересах построения алгоритмов синтеза РС в задачах распознавания речи.

Влияние заболеваний ВДП на параметры РС, исследованное в работе [2], показало наличие статистически достоверных, значимых различий числовых характеристик как при сравнении выборок параметров РС пациентов с заболеваниями ВДП и контрольной выборкой здоровых людей, так и при сравнении между собой выборок параметров РС пациентов с разными диагнозами заболеваний.

Количество вычисляемых параметров одного пациента по всем группам составляло 98, но при построении и анализе алгоритма диагностики на основе метода группового учета аргумента (МГУА) в создаваемых для каждой выборки моделях использовались не все 98 параметров РС одновременно, а наборы, сформированные из указанных выше групп, число которых составило 13. Предварительный выбор набора для выборки осуществлялся экспериментально, по максимальному числу значений целевой функции (ЦФ) пациента соответствующей выборки, близких к эталону, принятому при моделировании. Это позволило оперировать векторами параметров меньшей размерности, а также оценить диагностическую значимость каждой группы параметров РС в отдельности и при этом сократить вычислительные затраты, требуемый объем оперативной памяти и время диагностики.

Обоснование алгоритма диагностики заболеваний ВДП при наличии сочетанных заболеваний

В случае необходимости принятия диагностического решения при наличии двух сочетанных диагнозов заболевания, как

и при одном диагнозе [2], предлагается для оценки связи параметров РС с конкретным видом заболевания также использовать МГУА [5]. Обычно метод применяется для идентификации характеристик систем управления при малом числе исходных данных. Цель использования метода:

- 1) разработать алгоритмы принятия диагностических решений на основе результатов применения МГУА для диагностики двух сочетанных заболеваний пациента;
- 2) определить минимальное число параметров РС в наборах и комплектах наборов, необходимое для правильной диагностики.

В качестве базовой модели использовался полином Колмогорова-Габора [5]

$$\tilde{y}_{l,j} = a_{0,j} + \sum_{i=1}^m a_{i,j} p_{i,l} + \sum_{i=1}^m \sum_{c=1}^m a_{ic,j} p_{i,l} p_{c,l} + \sum_{i=1}^m \sum_{c=1}^m \sum_{n=1}^m a_{icn,j} p_{i,l} p_{c,l} p_{n,l} + \dots, \quad (1)$$

где $\tilde{y}_{l,j}$ – значение ЦФ j -го сочетанного диагноза l -го пациента; $j = 1 \dots 3$; $\bar{A} = \{a_i, a_{ic}, a_{icn}, \dots\}$; $i, c, n, \dots = 1, \dots, m$ – вектор коэффициентов; $\bar{P} = \{p_i\}$, $i = 1, \dots, m$ – вектор аргументов, в качестве которых используются значения параметров РС соответствующего набора; m – порядок модели, определяемый числом используемых параметров. Обучение модели (1) производилось для каждого набора параметров РС соответствующей выборки двух сочетанных заболеваний ВДП. Вычислительные векторы коэффициентов ЦФ выполнялось методом наименьших квадратов [5]:

$$\bar{A} = (\bar{X}^T \bar{X})^{-1} \bar{X}^T \bar{Y}, \quad (2)$$

где $\bar{X}^T$ – транспонированная матрица аргументов, формируемая из векторов параметров РС пациентов, состоящих, в свою очередь, из определенных наборов в каждом комплекте; $\bar{Y}$ – вектор значений ЦФ для каждого j -го сочетанного заболевания, принимаемый при моделировании.

В случае наличия двух сочетанных диагнозов заболевания, как и при одном диагнозе [2], при обучении алгоритма для каждого набора параметров РС соответствующего сочетания диагнозов заболевания ВДП на основании вычисленных по выражению (1) значений ЦФ $\tilde{y}_{l,j}$ использовался критерий принятия диагностического решения по минимуму ошибки ЦФ

$$\min \epsilon_{l,j} \Rightarrow \left\{ \epsilon_{l,j} = \left(\left| \hat{y}_j - \tilde{y}_{l,j} \right| / \hat{y}_j \right) \cdot 100 \%, j_{\min} \right\}, \quad (3)$$

где $\hat{y}_j$ – эталонное значение ЦФ для j -го сочетанного диагноза заболевания. При таком условии формируется j -й элемент вектора принятия диагностических решений по числу возможных диагнозов, равному 3; при этом значение элемента вектора $w_{i,j} (\min \epsilon_{l,j}) = 1$, а в других случаях $w_{i,j} (\epsilon_{l,j}) = 0$. Пример вектора принятия диагностических решений имеет вид $\bar{W}_l = [0; 1; 0]$ в случае сочетанного диагноза пациента при $j = 2$.

С целью уменьшения процента ошибки пропуска правильного диагноза пациента, т. е. ошибки первого рода P1, и ошибки ложного диагностирования, т. е. ошибки второго рода P2, для каждой пары сочетанных диагнозов формируются несколько комплектов наборов параметров РС, что дает возможность принятия диагностического решения по нескольким значениям ЦФ для каждого рассматриваемого сочетания заболеваний и уменьшает ошибку по сравнению с принятием решения по одному комплекту, когда номер сочетания диагнозов пациента может быть определен неверно. В этом случае обучение алгоритма проводится дополнительно для каждого комплекта наборов. Набор в комплекте соответствует отдельной выборке со своим сочетанием диагнозов.

Векторы принятия диагностических решений по критерию (3) для одного комплекта наборов параметров РС формируют матрицу принятия диагностических решений $\bar{R}_l$ по нескольким комплектам наборов для каждого пациента. Для примера приведем вид матрицы для трех комплектов наборов параметров:

$$\bar{R}_l = \begin{bmatrix} 1, 0, 0 \\ 0, 1, 0 \\ 1, 0, 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для каждой полученной матрицы, формируется по столбцам вектор средних значений, характеризующий число верно определенных номеров j -го сочетанного диагноза заболевания пациента по всем комплектам наборов параметров:

$$\bar{Q}_\epsilon(j) = \sum_{k=1}^K [r_l(k, j)] / K, \quad (5)$$

где $r_l(k, j)$ – элемент матрицы (4) для k -го комплекта наборов; j – номера сочетанных диагнозов. Для приведенного выше примера вектор (5) для матрицы (4) может иметь вид $\bar{Q}_\epsilon(j) = [0,6; 0,3; 0]$. На основании выражения (5) критерий принятия диагностического решения j по k комплектам наборов имеет вид

$$j = \max_j \{ \bar{Q}_\epsilon(j) \}. \quad (6)$$

Далее, как в работе [2], производилось определение минимального числа параметров РС в наборах, необходимого для правильной диагностики пациентов по выборке, путем отбрасывания коэффициентов ЦФ, модуль значения которых был минимальным для исследуемого набора, до тех пор пока значение ошибки пропуска правильного решения не повышалась на 0,01.

Для сочетанных диагнозов формируются отдельные выборки, для которых создаются свои модели МГУА и используются свои наборы параметров РС, как и в случае одиночных диагнозов.

Для оценки процента ошибок пропуска правильного диагноза пациента и ложного диагностирования каждого из рассматриваемых двух сочетанных диагнозов заболеваний необходимо формирование статистик значений вектора принятия решений (5), которое осуществляется для всех пациентов, входящих в обучающие выборки по каждой паре сочетанных диагнозов заболеваний.

При обучении алгоритма, в случае двух сочетанных диагнозов заболевания, значения вектора (5) $Q_\epsilon(l, j)$ для каждого j -го сочетания диагнозов для первого пациента формируют статистику по всем пациентам исследуемой выборки. На основании полученных статистик вычисляется процент ошибки пропуска правильного диагноза P1 и ошибки ложного диагностирования P2 путем сравнения статистик выборок соответствующих сочетанных заболеваний.

Результаты исследований

Было построено 24 модели МГУА для кодирования одиночных и парных сочетанных диагнозов, соответственно по восемь моделей для выборок мужчин, женщин и смешанной группы, описанных выше. Окончательное количество параметров РС для моделей составило от 4 до 7, с использованием разных наборов. Количество параметров РС определяет порядок моделей в соответствии с выражением (1) базовой модели.

Проверка работоспособности разработанного алгоритма диагностики осуществлялась отдельно для каждой выборки пациентов с двумя сочетанными диагнозами. По полученным при обучении на выборке по векторам коэффициентов (2) вычислялись значения ЦФ в соответствии с выражением (1) для всех дикторов выборки по определенным в процессе обучения комплектам наборам параметров РС. По критерию (3) и решающим правилам (5), (6) определялось число пациентов с правильно определенными сочетанными диагнозами в проверяемой выборке, для которых значение ЦФ, вычисленное по выражению (1), близко к эталонному, принятому при обучении для данной выборки. Полученное число пациентов с правильными диагнозами относилось к числу всех пациентов в проверяемой выборке, и данное отношение вычиталось из единицы; таким образом получали значения процента ошибок

первого рода, т. е. пропуска правильного диагноза пациента P1, приведенные в числителе *табл. 1*.

Таблица 1

Процент ошибок пропуска правильного диагноза пациента и ложного диагностирования в случае двух сочетанных диагнозов заболевания

Диагноз	Инп + Псн	Инп + Рнт	Псн + Рнт	Выборки по возрасту
P1 / P2				
Мужчины и женщины	30,7 / 28,5	28,7 / 24,5	31 / 18	18...81
	22,7 / 21,5	23,5 / 17	24,7 / 14	18...35
	22,7 / 22	22,7 / 17,5	22,8 / 14,5	36...60
	34,4 / 35,5	32,6 / 27,5	35,4 / 24	61...81
Женщины	27,7 / 24,5	26,7 / 23	28 / 17,5	18...81
	12,7 / 19,5	7,8 / 16	10,7 / 14,5	18...35
	15,7 / 21,5	10,7 / 18,5	12,8 / 19	36...60
	30,4 / 29,5	31,6 / 25,5	33,4 / 22,5	61...81
Мужчины	27,7 / 26,5	26,7 / 23	30 / 19,5	18...81
	12,7 / 21,5	9,5 / 18	10,7 / 15,5	18...35
	16,7 / 21,5	11,7 / 18,5	13,8 / 16	36...60
	32,4 / 31,5	31,6 / 25,5	34,4 / 23,5	61...81

Для вычисления процента ошибок второго рода, т. е. ложного диагностирования пациента, формировалась выборка объектов со всеми возможными диагнозами и их сочетаниями, не включающая в себя проверяемое правильное сочетание диагнозов. Для всех объектов полученной выборки вычислялись значения ЦФ по выражению (1) по вектору коэффициентов (2), обученному на выборке с правильным диагнозом. При близости значений ЦФ (1) объекта неизвестной выборки с эталонным значением ЦФ по выражению (1), принятым при моделировании для выборки с правильным диагнозом, выносится решение о диагностировании такого пациента неизвестной выборки сочетанием заболеваний, относящимся к выборке с правильным диагнозом. Этот результат является ложным диагностированием пациента. Число ложно диагностированных пациентов относилось к числу всех пациентов неизвестной выборки. Таким образом находили процент ошибок второго рода, т. е. ложного диагностирования P2, приведенный в знаменателе *табл. 1*. Разбиение пациентов на группы по возрасту осуществлено в соответствии с возрастной периодизацией.

Заключение

Для пациентов в случае двух сочетанных диагнозов на смешанной выборке ошибка первого рода, т. е. пропуск правильного диагноза, составляет 28...31 %, а ошибка второго рода, т. е. ложное диагностирование, – 18...28,5 %, в зависимости от сочетанного заболевания. При гендерном разделении процент ошибок снижался соответственно на 3...14 и 5...9 %, а при возрастном разделении – соответственно на 7...15 и 4...7 %. В пожилом возрасте (более 61 года) обе ошибки возрастали на величину до 15 % по очевидной причине усиления возрастного тремора мышц гортани и других составляющих частей речевого тракта.

* * * * *

Разработан алгоритм диагностики заболеваний ВДП, использующий формирование исходных данных для принятия диагностического решения на основе комплектов наборов параметров РС, а также учитывающий вероятностные характеристики вектора принятия диагностических решений на основе данных обучающих выборок. Алгоритм является инструментом решения задачи выявления риска нескольких сопутствующих заболеваний у одного пациента с учетом вариативности индивидуальных характеристик РС.

Программный комплекс, реализующий разработанный алгоритм неинвазивной диагностики, развернутый на ПК с частотой процессора 2,58 ГГц и ОЗУ 4 Гбайт обеспечивал время диагностики пациента за 3...5 мин.

Список литературы:

1. Панкова В.Б. Основные направления профилактики патологии лор-органов / XVI Российский конгресс оториноларингологов. «Наука и практика в оториноларингологии». – М., 2017. С. 19-21.
2. Кириллов С.Н., Кучуркин А.Н., Мамушев Д.Ю. Метод поддержки принятия диагностических решений при заболеваниях верхних дыхательных путей по параметрам речевого сигнала // Биомедицинская радиоэлектроника. 2019. Т. 22. № 4. С. 68-76.
3. Кириллов С.Н., Шустиков О.Е., Мамушев Д.Ю. Идентификационная значимость статических и динамических признаков речевого сигнала в системах распознавания дикторов // Вестник РГРТА. 2000. Вып. 7. С. 92-97.
4. Кириллов С.Н., Мамушев Д.Ю., Хахулин С.С. Распознавание и идентификация речевых команд на основе нелинейной модели голоса диктора / Сб. труд. XVIII сессии Российского акустического общества. 2006. С. 55-57.
5. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – Киев: Техніка, 1975. 312 с.

Сергей Николаевич Кириллов,
академик Международной академии связи,
член-кор. Академии военных наук,
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,
Дмитрий Юрьевич Мамушев,
инженер,
кафедра радиоуправления и связи,
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный
радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»,
Алексей Николаевич Кучуркин,
врач высшей квалификационной категории,
зав. лор-отделением,
Екатерина Викторовна Бань,
канд. мед. наук, зам. главного врача
по медицинской части,
ГБУ РО «ОКБ им. Н.А. Семашко»,
г. Рязань,
e-mail: mamushev_du@bk.ru