

Розрахунково-графічна робота

Прогнозне оцінювання розбірливості мови, що маскується шумовою завадою, методом аналітичного моделювання

Мета роботи: Здобуття навичок розрахунку (прогнозування) розбірливості мови, що маскується шумовою завадою.

Підготовка до роботи:

- 1) ознайомитися із *Додатком 1* (теоретичні засади до даної лабораторної роботи);
- 2) ознайомитися із текстами програм для прогнозування розбірливості мови у *Додатку 2* (текст керуючої програми **main_formant_simple_2.m** для Matlab) та із додатковими програмами-функціями (файли цих програм містяться теці «*Programs_RGR_COBRAS*»);
- 3) ознайомитися у *Додатку 3* із *калькулятором розбірливості мови* - текстом керуючої програми **main_formant_simple_func_manager.m** та текстом програми-функції **[STI,R] = main_formant_simple_func(r,p)** (файли цих програм містяться у теці «*Programs_RGR_COBRAS*»).

Робоче завдання:

1. Налаштуйте керуючу програму **main_formant_simple_2.m** (Додаток 2, тека «*Programs_RGR_COBRAS*») для обчислення розбірливості мови в діапазоні значень SNR_0 від -26 дБ до +20 дБ
2. Обчисліть словесну розбірливість W , за трьома версіями формантного методу (версії Покровського, Сапожкова та кафедри АМЕС), а також обчисліть індекс розбірливості мови STI.
3. Порівняйте отримані вами результати із такими, що наведені на графіках рис. 2 Додатку 1.
4. Налаштуйте керуючу програму **main_formant_simple_func_manager.m** (Додаток 3, тека «*Programs_RGR_COBRAS*») для обчислення словесної розбірливості в приміщеннях (аудиторія, офіс) та на вулиці (тиха вулиця, шумна вулиця).
5. *Отримані вами результати занесіть у Звіт та прокоментуйте у Звіті.*
6. *У Звіті також наведіть результати обґрунтованого критичного аналізу використаних вами комп'ютерних програм.*
7. *За результатами вашого критичного аналізу, спробуйте покращити використані вами комп'ютерні програми та наведіть скрипти покращених програм у вашому Звіті.*
8. Захист вашого Звіту зробіть у час, призначений викладачем.

Контрольні запитання:

1. В чому полягає принципова схожість формантного та модуляційного методів? Чим зумовлена така схожість?
2. В чому полягають переваги та недоліки кожного із методів, формантного та модуляційного?
3. Чим відрізняються версії формантного методу, що розглянуто в даній роботі?
4. Що таке SNR_0 та чим воно відрізняється від SNR ? Чому в Додатку 1 стверджується, що задавати SNR_0 для приміщень досить важко?
5. Який спосіб коригування частотного розподілу дисперсій сигналу або шуму реалізовано в програмі **main_formant_simple_2.m**?

6. Чому при розрахунках замість частотного розподілу сигналу та шуму можна використовувати спектри потужності (Додаток 1, співвідношення (16))?
7. Чим відрізняються шуми, які розглядаються в даній роботі, та в чому їх схожість?
8. Яким чином, на вашу думку, отримано дані для таблиці 2 із Додатку 1?
9. На рис. 3 Додатку 1 наведено результати суб'єктивного оцінювання розбірливості мови (артикуляційних випробувань), які не збігаються із прогнозними оцінками при малих відношеннях сигнал-шум. Якими можуть бути причини відсутності такого збігу?
10. Скільки часу, *приблизно*, було витрачено вашим комп'ютером на виконання обчислень *одним методом для одного значення* SNR_0 ? Як ви робите ці обчислення? Вкажіть конфігурацію вашого ПК.

Література до Лабораторної роботи №1:

1. Harasiuk, A. O., Myronov, M. V., Lozinsky, V. V., Thanh Vy, N., Darchuk, A. V., & Prodeus, A. M. (2019). Predictive Estimation of Speech Intelligibility Masked by Noise Interference Using Analytical Modeling. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, 24(5), 48–55. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.5.192893> (Додаток 1 є чернеткою даної статті)

Додаток 1

Прогнозное оценивание разборчивости речи, маскируемой шумовой помехой, методом аналитического моделирования (черновик вышеуказанной статьи)

Аннотация. - Представлено детальное описание алгоритма прогнозирования разборчивости речи методом аналитического моделирования. Работоспособность предложенного алгоритма проверена для 4-х видов шумовой помехи: белой, розовой, коричневой и типовой для учебных помещений. Согласованность полученных результатов с известными аналогичными результатами свидетельствует о корректности предложенных компонентов аналитического алгоритма. Кроме того, произведено сопоставление результатов оценивания разборчивости речи, полученных в соответствии с «классическим» подходом, с результатами оценивания индекса разборчивости речи STI, что позволило подтвердить тезис о низкой маскировочной способности белого шума при малых отношениях сигнал-шум.

Ключевые слова: разборчивость речи; прогнозная оценка; компьютерное моделирование; аналитическое моделирование; шумовая помеха.

1. Введение

Задача расчета и измерения разборчивости речи не является новой, ее возраст сегодня составляет 90 лет, если отсчет вести от пионерской работы [1]. Тем не менее, сфера приложений оценивания разборчивости речи постоянно расширяется, технические средства инженеров изменяются и совершенствуются, возрастает перечень факторов, учитываемых при оценивании разборчивости речи. Как следствие, возникает необходимость в постоянном обновлении соответствующего математического и программного обеспечения.

За рубежом наибольшее распространение получили такие версии формантного метода оценивания разборчивости речи как индекс артикуляции AI (Articulation Index) [3] и индекс разборчивости речи SII (Speech Intelligibility Index) [4]. В СССР к концу 50-х годов сформировалось несколько научных школ, возглавляемых Н.Б. Покровским, М.А.

Сапожковым и Ю.С. Быковым, где развивались свои версии формантного метода [5], [6], [7].

В 1973 году появился модуляционный метод, где мерой разборчивости речи служит индекс передачи речи STI (Speech Transmission Index) [2]. Поскольку модуляционный метод обладает способностью учитывать влияние не только шума, но и реверберации на разборчивость речи, в некоторых работах даже появились высказывания об «устарелости» формантного метода [8]. Вместе с тем, тщательное сопоставление потенциальных возможностей формантного и модуляционного методов свидетельствует, что формантный метод превосходит своего конкурента по точности и скорости вычислений в условиях, когда действие шума преобладает над действием реверберации [9].

2. Постановка задачи

Алгоритм компьютерного моделирования оценивания разборчивости зашумленной речи, реализующий «классический» формантный метод описан в [4], [5]. Структура этого алгоритма представлена на рис. 1. На первом этапе вычислений осуществляется формирование первичных моделей речевого сигнала и шума в виде массивов выборок стационарных случайных процессов с заданными спектральными характеристиками. Затем выполняется коррекция дисперсий этих модельных процессов, чтобы обеспечить требуемое интегральное отношение сигнал-шум SNR_0 . После такой коррекции оцениваются парциальные отношения сигнал-шум E_k . На заключительном этапе вычисляются меры разборчивости речи: формантная разборчивость A и словесная разборчивость W .

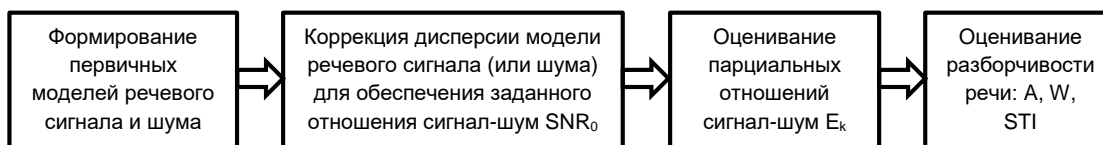


Рис. 1. Структура алгоритма компьютерного моделирования

Сущность формантного метода оценивания разборчивости речи состоит в следующем. Область частот речевого сигнала разбивают на K смежных частотных полос, с центральными частотами f_{0k} и граничными частотами f_{hk} и f_{ek} , в пределах каждой из которых спектры речи и шума можно считать практически неизменными [5]. Словесную разборчивость W вычисляют через формантную разборчивость A [10]:

$$W = \begin{cases} 1.54 \cdot A^{0.25} [1 - \exp(-11 \cdot A)], & A < 0.15; \\ 1 - \exp\left(\frac{11 \cdot A}{1 + 0.7 \cdot A}\right), & A \geq 0.15 \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \sum_{k=1}^K p_k \cdot P(E'_k), \quad (2)$$

где p_k - вероятность пребывания формант в k -той полосе частот:

$$p_k = F(f_{ek}) - F(f_{hk}), \quad (3)$$

$$F(f) = \begin{cases} 2.57 \cdot 10^{-8} \cdot f^{2.4}, & 100 < f \leq 400 \text{Гц}, \\ 1 - 1.074 \cdot \exp(-10^{-4} \cdot f^{1.18}), & 400 < f \leq 10000 \text{Гц}, \end{cases} \quad (4)$$

$P(E'_k)$ - коэффициент восприятия речи.

В соответствии с методикой Н.Б. Покровского [5],

$$P(E'_k) = \begin{cases} \frac{0.78 + 5.46 \exp[-4.3 \cdot 10^{-3} \cdot (27.3 - |E'_k|)^2]}{1 + 10^{0.1|E'_k|}}, & E'_k \leq 0, \\ 1 - \frac{0.78 + 5.46 \exp[-4.3 \cdot 10^{-3} \cdot (27.3 - |E'_k|)^2]}{1 + 10^{0.1|E'_k|}}, & E'_k > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

E'_k - эффективный уровень ощущения формант в k -той полосе частот:

$$E'_k = E_k - \Delta B(f_{0k}), \quad (6)$$

E_k - эффективный уровень ощущения речевого сигнала в k -той полосе частот, равный (при достаточно больших уровнях шума) отношению сигнал-шум q_k в этой полосе частот:

$$E_k = q_k = 10 \lg \frac{D_{sk}}{D_{nk}}, \quad (7)$$

где D_{sk} и D_{nk} - дисперсии сигнала и шума в k -той полосе частот; $\Delta B(f)$ - разница между усредненными спектрами речи и формант:

$$\Delta B(f) = \begin{cases} 200/f^{0.43} - 0.37, & f \leq 1000 \Gamma\text{ц}, \\ 1.37 + 1000/f^{0.69}, & f > 1000 \Gamma\text{ц} \end{cases}. \quad (8)$$

Следуя методике М.А. Сапожкова, спектр формант считают практически совпадающим со спектром речи, т.е. $\Delta B(f)=0$, откуда следует $E'_k = E_k$ [6]. Кроме того, как показано в [11], зависимость $P(E'_k)$ М.А. Сапожкова отличается от таковой Н.Б. Покровского.

В [12] методика М.А. Сапожкова уточнена путем учета зависимости коэффициентов восприятия от полосы частот. В этом случае вместо (1) используют соотношение

$$A = \sum_{k=1}^K p_k \cdot P_k(E_k), \quad (9)$$

где коэффициенты восприятия $P_k(E_k)$ описываются полиномиальными зависимостями (Приложение 1).

Достоинством модуляционного метода, по сравнению с формантным методом, является возможность учитывать действие не только шумовой помехи, но и реверберации [2]. Однако это преимущество достигается ценой усложнения вычислений и увеличения времени измерений. В последние годы, однако, наметилась тенденция к частичной унификации формантного и модуляционного методов оценивания разборчивости речи. Так, например, согласно упрощенной методике оценивания разборчивости речи, представленной в ГОСТ Р ИСО 24504-2015, разборчивость речи оценивают с помощью индекса STI:

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot T_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \cdot \sqrt{T_k \cdot T_{k+1}}, \quad (10)$$

$$T_k = \begin{cases} 0, & E_k < -15; \\ (E_k + 15)/30, & -15 < E_k < +15; \\ 1, & E_k > +15; \end{cases}, \quad (11)$$

где α_k - весовые коэффициенты, β_k - коэффициенты избыточности, значения которых для октавных полос с центральными частотами f_0 приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Весовые коэффициенты и коэффициенты избыточности для октавных полос

f_{0k} , Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α_k	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
β_k	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-

Нетрудно видеть принципиальное сходство соотношений (2) и (9), с одной стороны, и (10), с другой стороны. При этом второе слагаемое в (10) является поправкой, учитывающей коррелированность речевых сигналов в смежных полосах частот, а соотношение (11) можно трактовать как результат линеаризации коэффициента восприятия $P(E'_k)$.

Несмотря на то, что компьютерное моделирование позволяет оценивать работоспособность и эффективность прототипов программного обеспечения (ПО) реальных цифровых измерительных систем, не менее актуальной задачей является прогнозное оценивание разборчивости речи. Решать задачу прогнозирования методом компьютерного моделирования можно, но вряд ли рационально, учитывая ресурсоемкость данного метода. Более экономным является метод аналитического моделирования, согласно которому модели речевого сигнала и шума описываются детерминированными функциями в виде распределений мощностей или спектральных плотностей мощности.

В сущности, этапы аналитического и компьютерного моделирования подобны. Более того, соотношения (1)-(11), используемые на финальном этапе, одинаковы для обоих видов моделирования. Однако вопрос аналитического описания начального и промежуточных этапов в литературе освещен недостаточно хорошо. Одна из целей данной работы состоит в устранении этого пробела. Другая цель состоит в сопоставлении результатов оценивания с использованием соотношений (1), (2) и (10). Несмотря на очевидную полезность такого сопоставления, оно не было реализовано до последнего времени.

3. Алгоритм прогнозирования разборчивости зашумленной речи

Структура предлагаемого алгоритма прогнозирования разборчивости зашумленной речи аналогична структуре рис. 1. Отличается лишь способ реализации отдельных этапов алгоритма, основанный на аналитическом описании спектральных свойств речевого сигнала и шума. Детализируем описание каждого из этапов.

Этап 1. Формирование входных данных:

- задание аналитической спектральной модели речевого сигнала в виде распределения дисперсий D_{sk} , где k - номер полосы частот;
- создание аналитической спектральной модели шума в виде распределения дисперсий D_{nk} ;
- задание ожидаемого интегрального отношения сигнал-шум SNR_0 для прослушиваемого сигнала.

Этап 2. Корректировка распределения дисперсий речевого сигнала (или шума) для обеспечения заданного интегрального отношения сигнал-шум SNR_0 :

- вычисление «первичного» значения интегрального отношения сигнал-шум

$$SNR = D_s / D_n = \frac{\sum_{k=1}^K D_{sk}}{\sum_{k=1}^K D_{nk}}, \quad (12)$$

- вычисление поправочного коэффициента

$$T = SNR_0/SNR; \quad (13)$$

- корректировка распределения дисперсий речевого сигнала в соответствии с соотношением

$$D_{0sk} = TD_{sk} \quad (14a)$$

- либо корректировка распределения дисперсий шума в соответствии с соотношением

$$D_{0nk} = D_{nk}/T. \quad (14b)$$

Этап 3. Вычисление парциальных отношений сигнал-шум для заданного SNR_0 :

- вычисление парциальных отношений сигнал-шум с учетом (14a) и (14b)

$$E_{0k} = 10\lg \frac{D_{0sk}}{D_{nk}} = 10\lg \frac{D_{sk}}{D_{nk}} + 10\lg(T), \quad (15)$$

- корректировка значений E_{0k} в соответствии с (6), если используется методика Покровского.

Этап 4. Формирование выходных данных:

- вычисление артикуляционной разборчивости и словесной разборчивости в соответствии с (1)-(2) либо вычисление индекса разборчивости в соответствии с (11).

Сделаем несколько замечаний об этапе формирования входных данных.

В качестве исходных данных можно использовать плотности вероятностей сигнала и помехи, если учесть связь между дисперсией D_k случайного стационарного процесса в k -й полосе частот Δf_k и средним значением спектральной плотности мощности P_k в пределах этой полосы частот

$$P_k = D_k/\Delta f_k. \quad (16)$$

Очевидно, при расчете разборчивости речи в линиях связи, значение ожидаемого интегрального отношения сигнал-шум SNR_0 следует задавать, исходя из типичных условий эксплуатации линии связи. Несколько сложнее задавать SNR_0 , если речь прослушивается в помещениях.

При расчете разборчивости речи в помещениях с открытой планировкой (стандарт ISO 3382-3-2013), к которым относятся офисы, библиотечные залы, учебные помещения, для небольших (2-4 м) расстояний R между диктором и слушателем можно предположить, что речевой сигнал ослабляется так же, как в свободном пространстве, т.е. на 6 дБ с удвоением расстояния. С увеличением R , однако, данная закономерность нарушается, и тогда расчет уровня сигнала в точке прослушивания несколько усложняется.

4. Проверка работоспособности алгоритма

Работоспособность предложенного алгоритма проверялась для 4-х видов шумов: белого, розового, коричневого и типового для учебных помещений (табл. 2). Заметим, что типовое распределение уровней шума $D_{nk,dB}$ по частотным каналам для учебных помещений заимствовано из нормативного документа [13], а параметры долговременного спектра речи заимствованы из [5].

Таблица 2. Первичные распределения дисперсий речи и шума

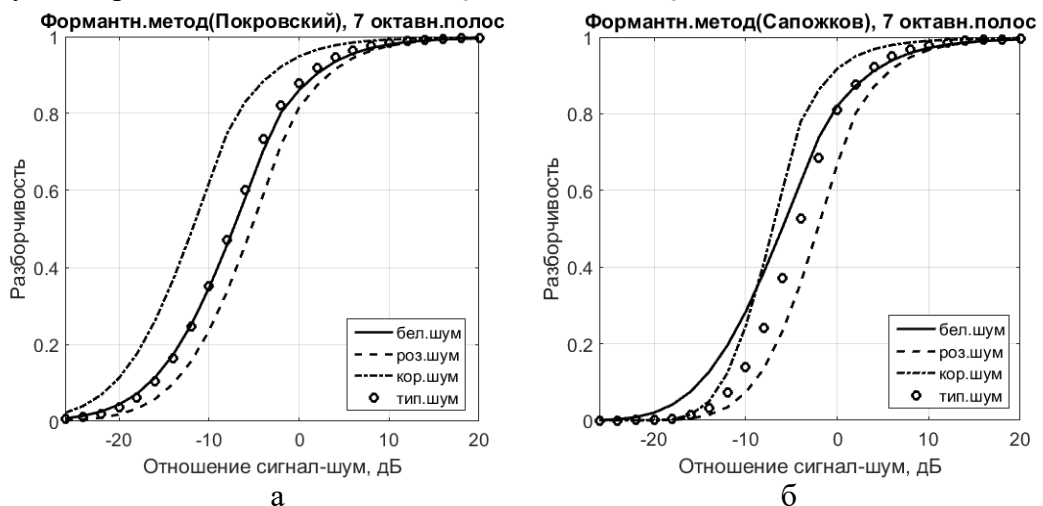
Параметры частотных каналов							
f_{0k}	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Δf_k	90	175	355	690	1400	2800	5270
Параметры белого шума							
D_{nk}	0,130	0,254	0,514	1	2,029	4,058	7,638
Параметры розового шума							
D_{nk}	1,043	1,014	1,029	1	1,014	1,014	0,955
Параметры коричневого шума							
D_{nk}	8,348	4,058	2,058	1	0,507	0,254	0,119
Параметры типовой шумовой помехи							
$D_{nk,dB}$	61	54	49	45	42	40	38
D_{nk}	5,193	2,017	1,284	1	1,023	1,273	1,5471
Параметры долговременного спектра речи							
$P_{sk,dB}$	60	70	68	59,5	52	46	40,5
D_{sk}	0,146	2,846	3,642	1	0,361	0,181	0,096

Для максимального облегчения последующих вычислений, приведенные в табл. 2 значения распределений дисперсий нормированы по значению дисперсии в четвертом частотном канале ($f_{04} = 1000$ кГц).

На рис. 2 представлены результаты прогнозных расчетов в виде зависимостей оценок разборчивости речи от ожидаемого отношения сигнал-шум SNR_0 в диапазоне значений $SNR_0 = -26...+20$ дБ. Графики рис. 2а, 2б и 2в, построенные с использованием коэффициентов восприятия Н.Б. Покровского, М.А. Сапожкова и коэффициентов восприятия из Приложения 1, хорошо согласуются с результатами, представленными в [11] и [12]. На рис. 2г представлены оценки STI (рис. 2).

Сравнивая между собой приведенные графики, видим, что графики, полученные для коэффициентов восприятия Н.Б. Покровского (рис. 2а), принципиально отличаются от остальных графиков тем, что во всем диапазоне рассмотренных значений SNR_0 маскирующие свойства белого шума оказываются лучшими, чем у коричневого шума. Между тем, в [11] и [12] впервые было отмечена и исправлена некорректность коэффициентов восприятия Н.Б. Покровского.

Графики рис. 2б и 2в, построенные с использованием откорректированных коэффициентов восприятия, свидетельствуют, что для малых SNR_0 ($SNR_0 < -8$ дБ) маскирующие свойства белого шума уступают таковым для коричневого шума. Примечательно, что этот результат согласуется с поведением графиков рис. 2г, хотя в этом случае пороговым значением SNR_0 является $SNR_0 = -13$ дБ.



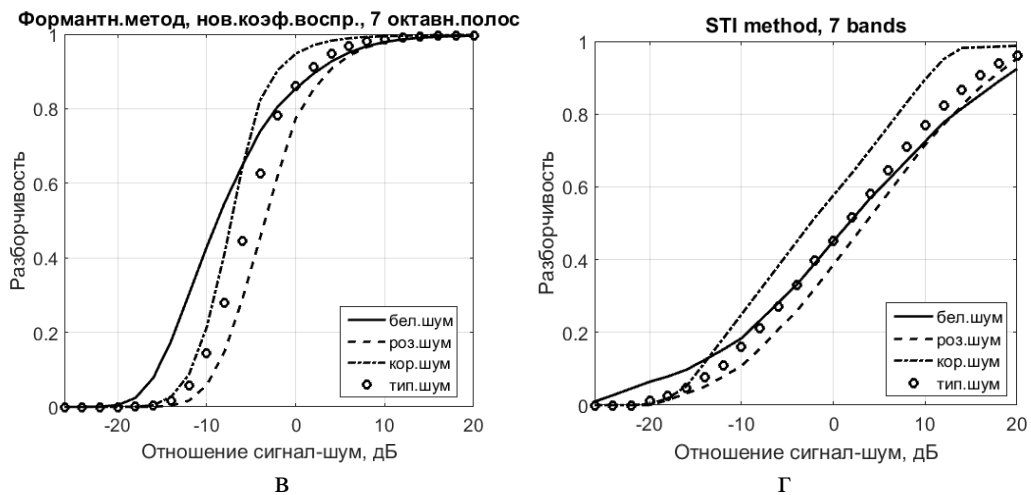


Рис. 2. Оценки словесной (а, б, в) разборчивости и индекса разборчивости (г)

Представленные на рис. 3 результаты субъективных артикуляционных испытаний [14] также свидетельствуют о выраженной тенденции к ухудшению маскирующих свойств белого шума при малых значениях отношения сигнал-шум SNR_0 . Отсутствие явного проигрыша белого шума в данном случае может быть объяснено недостаточной корректностью организации артикуляционных испытаний.

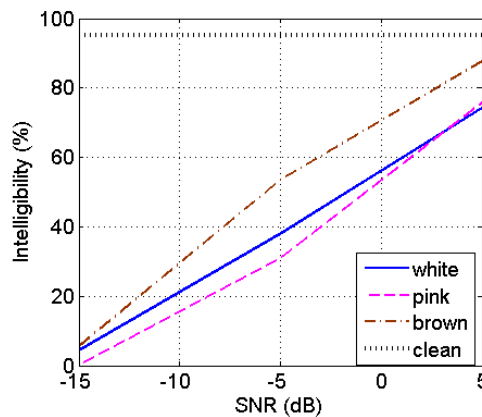


Рис. 3. Субъективные оценки слоговой разборчивости [14]

Как и ожидалось, время вычислений при аналитическом моделировании оказалось на порядок меньше времени, необходимого при компьютерном моделировании, и не превышало 1 с для ПВМ с тактовой частотой 2,66 ГГц, ОЗУ объемом 4 ГБ, 32-разрядной ОС.

5. Заключение

Представлено детальное описание начального и промежуточных этапов алгоритма прогнозирования разборчивости речи методом аналитического моделирования. Работоспособность предложенного алгоритма проверена для 4-х видов шумовой помехи: белой, розовой, коричневой и типовой для учебных помещений. Согласованность полученных результатов с известными аналогичными результатами свидетельствует о корректности предложенных компонентов аналитического алгоритма.

Сопоставление результатов оценивания разборчивости речи, полученных в соответствии с «классическим» подходом, с результатами оценивания индекса разборчивости речи STI позволило подтвердить тезис о низкой маскировочной способности белого шума при малых отношениях сигнал-шум. В дальнейшем

целесообразно осуществить дополнительную проверку этого тезиса методом артикуляционных испытаний.

Литература (к статье):

1. Collard J.A. Theoretical Study of the Articulation and Intelligibility of a Telephone Circuit // *Electrical Communication*. – 1929. -- Vol.7. – P. 168.
2. Steeneken, H.J.M., and Houtgast, T. "A physical method for measuring speech-transmission quality" *J.Acoust. Soc. Am.* 67, 1980. - P. 318-326.
3. Kryter, K.D., and Ball, J.H. "SCIM -- A meter for measuring the performance of speech communicationsystems" *Techn. Doc. report No. ESD-TDR-64-674*, 1964.
4. K. Rhebergen, "A Speech Intelligibility Index-based approach to predict the speech reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal-hearing listeners," *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (4), Pt. 1, April 2005, p.2181-2192.
5. Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи. – М.,Связьиздат,1962,390с.
6. Сапожков М.А. Речевой сигнал в кибернетике и связи. – М.: Связьиздат, 1963. – 472 с.
7. Быков Ю.С. Теория разборчивости речи и повышение эффективности радиотелефонной связи. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 350 с.
8. Алдошина И., Приттс Р. Музыкальная акустика. – С-Пб.: Композитор, Санкт-Петербург, 2006. - 717 с.
9. Продеус А.Н., Дронжевская Л.Б., Климков В.А., Шагитова Д.А. Формантный и формантно-модуляционный методы оценки разборчивости речи. Часть 2. Точность и скорость измерений. // *Электроника и связь*. – 2011. – Т. 64. – №6. – С. 16–24.
10. Железняк В.К., Макаров Ю.К.,Хорев А.А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации//*Специальная техника*. – М.: 2000.– № 4.
11. Продеус А.Н., Гавриленко А.В., Дидковский В.С. Сопоставление версий формантного метода оценки разборчивости речи. - *Электроника и связь, тематический выпуск "Проблемы электроники"*, ч.1, 2008. С.227-231.
12. Дидковский В.С., Дидковская М.В., Продеус А.Н. Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации. Монография. – К., «Имекс-ЛТД», 2008. – 420 с.
13. ДСН 3.3.6.037-99 Державні санітарні норми. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку, Київ, 1999.
14. A. Prodeus, K. Bukhta, P. Morozko, O. Serhiienko, I. Kotvytskyi, O. Dvornyk, "Automated Subjective Assessment of Speech Intelligibility in Various Listening Modes," ISSN 2523-4447. *Microsystems, Electronics and Acoustics*, 2018, vol. 23, no. 3, pp.49-57. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.3.130367>

Приложение 1

Аналитическое описание коэффициентов восприятия для семи октавных полос частот

Коэффициенты восприятия описываются выражением:

$$P'_i(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x'_{\min}; \\ \sum_{n=0}^{N'} a'_n x^n, & x'_{\min} < x \leq 0 \\ \sum_{m=0}^{M'} b'_m x^m, & 0 < x \leq x'_{\max}; \\ 1, & x > x'_{\max}. \end{cases} \quad (\text{П1.1})$$

где значения коэффициентов a'_n и b'_m представлены в табл. П1.1 и П1.2. Данные коэффициенты восприятия отличаются от коэффициентов, приведенных в [12], наличием не пяти, а семи октавных полос частот.

Таблица П1.1. Коэффициенты a'_n

n f _{cp} , Гц	0	1	2	3	4	5
125	0,324508	0,086098	0,004887	-0,00053	-6,56E-05	-1,87E-06
250	0,358141	0,070497	-0,00767	-0,00311	-0,00029	-8,76E-06
500	0,309301	0,054827	-0,00207	-0,00104	-7,77E-05	-1,82E-06
1000	0,19779	0,028848	0,000603	-0,00011	-7,30E-06	-1,45E-07
2000	0,238407	0,042094	0,000906	-0,00028	-2,29E-05	-5,43E-07
4000	0,231306	0,040168	0,001327	-0,00014	-1,07E-05	-2,07E-07
8000	0,178871	0,01705	-0,00064	-6,50E-05	2,91E-06	1,91E-07

Таблица П1.2. Коэффициенты b'_m

m f _{cp} , Гц	0	1	2	3	4	5
125	0,315151	0,057481	-0,00116	-4,45E-05	2,10E-06	-2,22E-08
250	0,35763	0,088259	-0,00646	0,000232	-3,89E-06	2,46E-08
500	0,301964	0,07124	-0,00382	9,63E-05	-8,28E-07	-9,67E-10
1000	0,195479	0,032135	0,000349	-2,04E-05	-1,22E-07	5,59E-09
2000	0,238336	0,042175	0,002185	-0,00025	7,53E-06	-7,75E-08
4000	0,233574	0,037324	0,003033	-0,0003	8,87E-06	-9,05E-08
8000	0,185163	0,01171	0,002126	-2,81E-05	-2,24E-06	4,55E-08

Додаток 2

Керуюча програма Matlab для розрахунку розбірливості мови

```
% === main_formant_simple_2.m === главная прогр. формантного метода ===
% === Назначение: оценка словесн.разборч. на фоне шумовой помехи ===
% === Особенности: 1) проверка правильности расчетной формулы;
% === 2) сопоставление результатов вычислений для отечественных и
% === зарубежной (STI) формул расчета разборчивости речи на фоне шума
%
% ===== входные параметры: SNR0,T,Fs,color_noise,avtr,bnd =====
% SNR0 - желаемое интегральное отношение сигнал-шум
```

```

% T - время анализа, секунды
% Fs - частота дискретизации, Гц
% color - окрашен. шума: белый:color=1;розовый:=2;коричн.::=3;типов.::=4
% avtr - автор (Покров.: avtr=1;Сапожк.:avtr=2;мы:avtr=3;STI:avtr=4)
% bnd - кол-во октавных полос частот: 5 полос: bnd=5; 7 полос: bnd=7
%
% --- План вычислений: ---
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание параметров (SNR0,T,Fs,color,avtr,bnd) ---
% --- 2) считывание коэф-тов гребенки фильтров ---
% --- Часть 2: формирование тестового и принятого сигнала ---
% --- 3) формирование тестового сигнала (окрашенность) ---
% --- Часть 3: формирование шума
% --- 4) первичное формирование шума (окрашенность) ---
% --- 5) коррекция мощности шума для обеспечения заданного SNR0 --
% --- Часть 4: оценивание разборчивости речи формантным методом --
% --- 6) вычисление парциальных отношений сигнал-шум ---
% --- 7) вычисл. артикул. и словесн. Разборч. по Покровскому ---
% --- 8) вычисл. артикуляц. и словесной разборч. по Сапожкову ---
% --- 9) вычисл. артикул. и словесн разборч. по нашим коэф.воспр -
% --- Часть 5: построение графиков ---
% --- 10) запись результатов на диск
% --- 11) построение графиков W=W(SNR) ---
%
% === Вычисления: ===
clear; clc;
avtr = 4;
bnd = 7;
% --- Часть 1: подготовка к вычислениям
% --- 1) задание параметров (SNR0,color_sig,color_noise,avtr,bnd) ---
df = [90 175 355 690 1400 2800 5270]; % октавн. полосы частот
SNR0min = 0; SNR0max = 20; SNR0step = 2;
color_sig_db = [60 70 68 59.5 52 46 40.5]; % спектр речи в дБ
color_sig = 10.^(0.1*color_sig_db); % в разгах по мощности
Dsk = color_sig.*df; % распред. дисперсий сигн.по 7 полосам
Dsk = Dsk/Dsk(4); % нормировка
Dsk5 = Dsk(2:6); % распред. дисперсий сигн.по 5 полосам
color_noise = [1 1 1 1 1 1 1;8 4 2 1 1/2 1/4 1/8;...
64 16 4 1 1/4 1/16 1/64; 6.31^2 2.82^2 1.58^2 1 0.71^2 0.56^2 0.45^2];
alfa = [0.085 0.127 0.230 0.233 0.309 0.224 0.173]; % для расчета STI
beta = [0.085 0.078 0.065 0.011 0.047 0.095]; % для расчета STI
Dnk = zeros(4,7);
for r = 1:4
    Dnk(r,:) = color_noise(r,:).*df; % распред. дисперсий шума по 7 полосам

```

```

    Dnk(r,:) = Dnk(r,:)/Dnk(r,4);
end
Dnk5 = Dnk(:,2:6);      % распредел. дисперсий шума по 5 полосам
Ds = sum(Dsk);          % начальн. дисперсия сигнала 7 полос
Ds5 = sum(Dsk5);        % начальн. дисперсия сигнала 5 полос
Dn = sum(Dnk,2);        % начальн. дисперсия шума 7 полос
Dn5 = sum(Dnk5,2);      % начальн. дисперсия шума 5 полос
SNR = Ds./Dn;
SNR5 = Ds5./Dn5;

tic      % начало работы счетчика времени
colornum = 4;          % количество цветных шумов
SNR0num = (SNR0max-SNR0min)/SNR0step + 1; % кол-во интегр.отнош.сигн.-шум
W7pokr = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
W5pokr = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч. W7sap =
zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
W5sap = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
Wmy7 = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
Wmy5 = zeros(SNR0num,colornum); % нач.состоян.массивов разборч.
sti = zeros(SNR0num,colornum); % начальные состояния массивов STI
sti5 = zeros(SNR0num,colornum); % начальные состояния массивов STI
for color = 1:colornum      % перебор окрашенностей шума
    disp('color = '); disp(num2str(color));

    for SNR0 = SNR0min:SNR0step:SNR0max      % перебор значений SNR0
        isnr0 = (SNR0-SNR0min)/SNR0step + 1; %номер строки W7 и W5

        % --- Часть 4: оценивание разборчивости речи формантным методом ---
        % --- 6) вычисление парциальных отношений сигнал-шум ---
        Ek = 10*log10(Dsk./Dnk(color,:))+SNR0-10*log10(SNR(color)); % для 7 окт полос
        Ek5 = 10*log10(Dsk5./Dnk5(color,:))+SNR0-10*log10(SNR5(color)); % для 5 окт полос
        % --- 7) вычисление словесной разборчивости по Покровскому ---
        if avtr == 1
            if bnd == 7
                W7pokr(isnr0,color) = razbor_pokr(Ek); % 7 полос частот
            else
                W5pokr(isnr0,color) = razb1(Ek5); % 5 полос частот
            end
        end
        % --- 8) вычисление словесной разборчивости по Сапожкову ---
        if avtr == 2
            if bnd == 7
                W7sap(isnr0,color) = razb_sapoz_7(Ek); % 7 полос частот
            else

```

```

        W5sap(isnr0,color) = razb_sapoz_5(Ek5); % 5 полос частот
    end
end
% --- 9) вычисление словесной разборч. по нашим коэфф.восприятия ---
if avtr == 3
    if bnd == 7
        Wmy7(isnr0,color) = razb_we(Ek);
        %Wmy7(isnr0,color) = razb_we_sti(Ek); % проба приближ к STI
    else
        Wmy5(isnr0,color) = razb_we_5(Ek5);
    end
end
% --- 10) вычисление STI ---
if avtr == 4
    if bnd == 7
        sti(isnr0,color) = razb_sti(Ek);
    else
        sti5(isnr0,color) = 0;
    end
end
end
end

% --- Часть 5: построение графиков ---
% --- 10) запись результатов на диск ---
% --- по Покровскому ---
if avtr == 1
    if bnd == 7 % для 7 полос частот
        W7pokr_struct =
        struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',W7pokr);
        save W7pokr_struct W7pokr_struct;
    else % для 5 полос частот
        W5pokr_struct =
        struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',W5pokr);
        save W5pokr_struct W5pokr_struct;
    end
end

% --- по Сапожкову ---
if avtr == 2
    if bnd == 7 % для 7 полос частот
        W7sap_struct =
        struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',W7sap);
        save W7sap_struct W7sap_struct;
    end
end

```

```

else      % для 5 полос частот
    W5sap_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',W5sap);
    save W5sap_struct W5sap_struct;
end
end

% --- по нашим коэффициентам ---
if avtr == 3
    if bnd == 7 % для 7 полос частот
        Wmy_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',Wmy7);
        save Wmy_struct Wmy_struct;
    else      % для 5 полос частот
        Wmy5_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',Wmy5);
        save Wmy5_struct Wmy5_struct;
    end
end

% --- по Steeneken ---
if avtr == 4
    if bnd == 7 % для 7 полос частот
        sti_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',sti);
        save sti_struct sti_struct;
    else      % для 5 полос частот
        sti5_struct =
struct('SNR0min',SNR0min,'SNR0max',SNR0max,'SNR0step',SNR0step,'func',sti5);
        save sti5_struct sti5_struct;
    end
end

% --- 11) построение графиков W=W(SNR) ---
if avtr == 1 % по Покровскому
    if bnd == 7 % 7 полос
        load W7pokr_struct;
        xmin7 = W7pokr_struct.SNR0min;
        xmax7 = W7pokr_struct.SNR0max;
        xstep7 = W7pokr_struct.SNR0step;
        x7 = xmin7:xstep7:xmax7;
        y7 = W7pokr_struct.func;
        figure; plot(x7,y7(:,1),'-k',x7,y7(:,2),'--r',x7,y7(:,3),'-.m',x7,y7(:,4),'ok','LineWidth',2); grid on;
        xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
    end
end

```

```

title('Формантн.метод(Покровский), 7 октавн.полос');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
else % 5 полос
load W5pokr_struct;
xmin5 = W5pokr_struct.SNR0min;
xmax5 = W5pokr_struct.SNR0max;
xstep5 = W5pokr_struct.SNR0step;
x5 = xmin5:xstep5:xmax5;
y5 = W5pokr_struct.func;
figure; plot(x5,y5(:,1),'-k',x5,y5(:,2),'--k',x5,y5(:,3),'-k',x5,y5(:,4),'ok','LineWidth',2); grid on;
xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
title('Формантн.метод(Покровский), 5 октавн.полос');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
end
end

if avtr == 2 % по Сапожкову
if bnd == 7 % 7 полос
load W7sap_struct;
xmin7 = W7sap_struct.SNR0min;
xmax7 = W7sap_struct.SNR0max;
xstep7 = W7sap_struct.SNR0step;
x7 = xmin7:xstep7:xmax7;
y7 = W7sap_struct.func;
figure; plot(x7,y7(:,1),'-k',x7,y7(:,2),'--r',x7,y7(:,3),'-m',x7,y7(:,4),'ok','LineWidth',2); grid on;
xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
title('Формантн.метод(Сапожков), 7 октавн.полос');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
else % 5 полос
load W5sap_struct;
xmin5 = W5sap_struct.SNR0min;
xmax5 = W5sap_struct.SNR0max;
xstep5 = W5sap_struct.SNR0step;
x5 = xmin5:xstep5:xmax5;
y5 = W5sap_struct.func;
figure; plot(x5,y5(:,1),'-k',x5,y5(:,2),'--r',x5,y5(:,3),'-m',x5,y5(:,4),'ok','LineWidth',2);
grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
title('Формантн.метод(Сапожков), 5 октавн.полос');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
end
end

if avtr == 3 % по нашим коэффициентам
if bnd == 7 % 7 полос

```

```

load Wmy_struct;
xmin_my = Wmy_struct.SNR0min;
xmax_my = Wmy_struct.SNR0max;
xstep_my = Wmy_struct.SNR0step;
x_my = xmin_my:xstep_my:xmax_my;
y_my = Wmy_struct.func;
figure; plot(x_my,y_my(:,1),'-k',x_my,y_my(:,2),'--r',x_my,y_my(:,3),'-
.m',x_my,y_my(:,4),'ok','LineWidth',2);
grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
title('Формантн.метод, нов.коэф.воспр., 7 октавн.полос');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
else % 5 полос
load Wmy5_struct;
xmin_my = Wmy5_struct.SNR0min;
xmax_my = Wmy5_struct.SNR0max;
xstep_my = Wmy5_struct.SNR0step;
x_my = xmin_my:xstep_my:xmax_my;
y_my = Wmy5_struct.func;
figure; plot(x_my,y_my(:,1),'-k',x_my,y_my(:,2),'--r',x_my,y_my(:,3),'-
.m',x_my,y_my(:,4),'ok','LineWidth',2);
grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
title('Формантн.метод, нов.коэф.воспр., 5 октавн.полос');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
end
end

if avtr == 4 % по Steeneken
if bnd == 7 % 7 полос
load sti_struct;
xmin_sti = sti_struct.SNR0min;
xmax_sti = sti_struct.SNR0max;
xstep_sti = sti_struct.SNR0step;
x_sti = xmin_sti:xstep_sti:xmax_sti;
y_sti = sti_struct.func;
figure; plot(x_sti,y_sti(:,1),'-k',x_sti,y_sti(:,2),'--r',x_sti,y_sti(:,3),'-
.m',x_sti,y_sti(:,4),'ok','LineWidth',2);
grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
title('STI method, 7 bands');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
else % 5 полос
load sti5_struct;
xmin_sti = sti5_struct.SNR0min;
xmax_sti = sti5_struct.SNR0max;
xstep_sti = sti5_struct.SNR0step;

```



```

x_sti = xmin_sti:xstep_sti:xmax_sti;
y_sti = sti5_struct.func;
figure; plot(x_sti,y_sti(:,1),'-k',x_sti,y_sti(:,2),'--k',x_sti,y_sti(:,3),'-
.k',x_sti,y_sti(:,4),'ok','LineWidth',2);
grid on; xlabel('Отношение сигнал-шум, дБ');ylabel('Разборчивость');
title('STI method, 5 bands');
legend('бел.шум','роз.шум','кор.шум','тип.шум');
end
end
toc      % конец работы счетчика времени

```

Додаток 3

Програма-калькулятор для розрахунку розбірливості мови

```

% === main_formant_simple_func_manager.m ===
% === Назначение: управляющая программа для main_formant_simple_func.m -
% прогноза словесн.разборч. на фоне шумовой помехи ===
%
% ===== входные параметры: r, p =====
% r - дистанция от слушателя до диктора в метрах
% p - вид пространства (1-аудитория, 2-офис, 3-тих. улица, 4-шумн. улица)

% ===== выходные параметры: STI, R =====
% STI - индекс разборчивости STI
% R - оценка разборчивости по 5-балльной шкале
%
% --- ввод исходных данных ---
clc;
disp('Вы можете оценить разборчивость речи для ситуаций:');
disp(' ');
disp('1 - аудитория');
disp('2 - офис');
disp('3 - тихая улица');
disp('4 - шумная улица');
disp(' ');
p = input('Укажите номер ситуации: ');
r = input('Укажите дистанцию до диктора (не менее 1 метра): ');

% --- вычисления разборчивости речи ---
[STI,R] = main_formant_simple_func(r,p);

% --- вывод результатов вычислений на монитор ---
disp(' ');
disp(['Разборчивость речи = ' num2str(R) ' (по 5-балльной шкале)']);
disp(['Индекс STI = ' num2str(STI)]);

function [STI,R] = main_formant_simple_func(r,p)
% === Назначение: прогноз словесн.разборч. на фоне шумовой помехи ===
%
% ===== входные параметры: r, p =====
% r - дистанция от слушателя до диктора в метрах

```

% p - вид пространства (1-аудитор, 2-офис, 3-тих. улица, 4-шумн. улица)

% ===== выходные параметры: STI, R =====

% STI - индекс разборчивости STI

% R - оценка разборчивости по 5-балльной шкале

%

% --- подготовка к вычислениям ---

Dsk = [0.146 2.846 3.642 1 0.361 0.181 0.096]; % распрд. дисперсий сигн.по 7
полосам

Dnk = [5.193 2.017 1.284 1 1.023 1.273 1.5471]; % распрд. дисперсий шума по 7
полосам

alfa = [0.085 0.127 0.230 0.233 0.309 0.224 0.173]; % для расчета STI

beta = [0.085 0.078 0.065 0.011 0.047 0.095]; % для расчета STI

Ls0 = 70; % уровень сигнала на расст. 1 м от рта

r0 = 1; % эталон. расстоян. 1 м

Ln = [50 60 60 70]; % варианты уровня шума

% --- вычисление Ls ---

if p < 3

Ls = Ls0+20*log10(r0/r);

else

if r < 3

Ls = Ls0+20*log10(r0/r);

else

Ls = Ls0+20*log10(r0/r)+10*log10(1+r^2/(r^2+9));

end

end

% --- выбор уровня шума Ln ---

Ln = Lnm(p);

% --- отношение сигнал-шум SNR0 в заданной точке ---

SNR0 = Ls - Ln;

% --- первичное отношение сигнал-шум SNR ---

SNR = 10*log10(sum(Dsk)/sum(Dnk));

% --- парциальные отношения сигнал-шум Ek ---

Ek = zeros(1,7);

for k = 1:7

Ek(k) = 10*log10(Dsk(k)/Dnk(k)) + SNR0 - SNR;

end

% --- индекс STI ---

T = zeros(1,7);

for k = 1:7

if (Ek(k)<(-15))

T(k) = 0;

elseif (Ek(k)>=(-15))&&(Ek(k)<=15)

T(k) = (Ek(k)+15)/30;

else

T(k) = 1;

end

end

```

I1 = 0; I2 = 0;
for k = 1:7
    I1 = I1 + alfa(k)*T(k);
end
for k = 1:6
    I2 = I2 + beta(k)*sqrt(T(k)*T(k+1));
end
STI = sum(I1)-sum(I2);

% --- оценка разборчивости R по 5-балльной шкале ---
if STI > 0.75
    R = 5;
elseif (STI <= 0.75 ) && (STI > 0.6)
    R = 4;
elseif (STI <= 0.6 ) && (STI > 0.45)
    R = 3;
elseif (STI <= 0.45 ) && (STI > 0.3)
    R = 2;
elseif (STI <= 0.3 )
    R = 1;
end

```