

О СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ВДОЛЬ БАЗИЛЯРНОЙ МЕМБРАНЫ СЛУХОВОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Жиляков Е.Г.¹, Белов С.П.², Белов А.С.², Медведева А.А.¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, РФ

² Белгородский университет кооперации экономики и права, Белгород, РФ

E-mail: belov@bsu.edu.ru

Слуховая система человека играет ведущую роль в его жизнедеятельности и прежде всего в процессах информационного обмена на основе звуковых сигналов, особенно устной речи. В связи с этим во многих странах проводятся исследования особенностей восприятия звуков человеком на основе создания различного вида моделей. Это необходимо для совершенствования слуховых аппаратов, разработки систем автоматического распознавания устной речи в системах искусственного интеллекта, оптимизации технологий обработки речевых сигналов при хранении и передаче речевых сообщений. В рамках данной статьи разработан метод оценивания скорости распространения вдоль базилярной мембраны возмущений, создаваемых при воздействиях на овальное окно. При этом используются достаточно простые представления о свойствах, возникающих в среде перилимфа – базилярная мембрана физических процессов.

Ключевые слова: слуховая система человека, базилярная мембрана, базилярные волокна, психоакустика

Введение

В настоящее время достаточно широко и интенсивно проводятся исследования процессов восприятия звуков, что принято именовать психоакустикой [1–9]. Установлено, что при акустических тональных воздействиях на барабанную перепонку (БП) вида

$$u(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

во внутреннем ухе слуховой системы вдоль базилярной мембраны (БМ) распространяются бегущие волны. Важным свойством этих волн является зависимость амплитуды их огибающих от проходимого расстояния, так что она сначала увеличивается и в зависимости от частоты воздействия f в определенной точке (координате) БМ достигает максимума, после чего достаточно резко уменьшается. Расстояние максимума амплитуды поперечных колебаний от овального окна внутреннего уха тем больше, чем ниже частота воздействия.

При этом отмечается [2; 4], что скорость бегущих волн уменьшается с увеличением расстояния от овального окна. Этот эффект принято [2] объяснять соответствующим уменьшением жесткости БМ, так что скорость может уменьшаться почти в 30 раз. Однако в настоящее время отсутствуют математические модели, позволяющие оценить скорость распространения волн в тех или иных точках БМ в зависимости от начальной скорости возмущений, определяемых в том числе интенсивностями воздействий.

В связи с этим в статье представлен новый метод оценивания скорости распространения вдоль

базилярной мембраны возмущений, создаваемых при воздействиях на овальное окно.

В основе построения математических моделей распространяющихся во внутреннем ухе возмущений используются приводимые во многих литературных источниках результаты экспериментальных исследований свойств слуховой системы человека, и прежде всего, строение БМ.

В рамках данной статьи габаритные размеры измеряются в миллиметрах (мм), а время – в миллисекундах (мс). Полагая, что в развернутом виде длина БМ (расстояние от овальной мембраны l) составляет

$$l_{\max} = 35. \quad (2)$$

Известно также, что БМ покрыта несколькими тысячами поперечных узких базилярных волокон, длины $s(l)$ которых увеличиваются монотонно от овального окна к концу БМ (геликоте́рме). Во многих случаях в литературных источниках приводятся следующие экспериментальные значения длин базилярных волокон в начале и конце БМ:

$$s(0) = s_{\min} = 0,1; \quad s(l_{\max}) = s_{\max} = 0,5. \quad (3)$$

В экспериментах по тональным воздействиям вида (1) определено, что максимумы огибающих возникающих при этом бегущих волн $l(f)$, после которых они затухают, проявляются тем дальше от овального окна, чем ниже частота воздействия. Таким образом, если для частот воздействий имеет место

$$f_1 < f_2, \quad (4)$$

то для координат соответствующих максимумов огибающих выполняется неравенство

$$l(f_1) > l(f_2). \quad (5)$$

При этом максимальной координате (ширине БМ) соответствует минимальная частота воздействия

$$f_{\min} = 50, \quad (6)$$

то есть

$$l(f_{\min}) = l_{\max}. \quad (7)$$

Положения максимумов огибающих бегущих волн

В описаниях результатов экспериментов по тональным возбуждениям отмечается, что положения максимумов огибающих соответствующих бегущих волн связаны с частотами возбуждения логарифмической зависимостью. Выразим ее в следующем виде:

$$l(f_2) = l(f_1) - l_{nah} \ln(f_2 / f_1), \quad (8)$$

где параметр l_{nah} должен обеспечивать соответствие экспериментальным данным. Очевидно, что с учетом (6) и (7) этому соотношению можно придать нормированный вид

$$l(f) = l_{\max} - l_{nah} \ln(f / f_{\min}). \quad (9)$$

Одним из важных психоакустических эффектов является октавное сходство звуков, вызываемых воздействиями при удвоении частот возбуждений (октавная шкала) [1; 5]. По имеющимся оценкам всего насчитывается десять градаций такой шкалы. Поэтому (9) дает следующее значение рассматриваемого параметра:

$$l_{nah} = l_{\max} / (1 + 9 \ln(2)) = 4,835. \quad (10)$$

Использование (10) на основе (9) позволяет достаточно точно воспроизвести данные рисунка 1.1 из [1], которые иллюстрируют результаты экспериментов Бекеша. Таким образом, соотношение (9) с параметром (10) адекватно отражает имеющиеся эмпирические данные.

Как следствие на основе (8) и (10) можно получить размер сдвига по БМ максимумов огибающих волн при удвоении частот воздействий

$$\Delta l = l(f_1) - l(f_2) = \ln ah \ln 2 = 3,35. \quad (11)$$

Возможно, что постоянство расстояния между координатами максимумов огибающих и отражается в интеллектуальной подсистеме слуховой системы в виде октавного сходства соответствующих тональных воздействий. Важно отметить, что обращение соотношения (9) позволяет получить представление частоты воздействия, при котором в заданной точке БМ будет достигаться максимум возбуждаемой бегущей волны

Таблица. Координаты максимумов огибающих бегущих волн

f	100	200	300
l_{me}	31,2	28,5	26,1
$l(f)$	31,65	28,30	26,33

$$f(l) = f_{\min} \exp((l_{\max} - l) / l_{nah}). \quad (12)$$

В таблице приведены значения оцененных по рисунку 1.1 в [2] (см. вторую строку) координат максимумов огибающих бегущих волн, вычисленных согласно (9) и (10) – см. третью строку. Очевидно, что приведенные эмпирические и расчетные данные достаточно близки.

Длины базилярных волокон, покрывающих БМ

Известно [1–9], что внутреннее ухо заполнено несжимаемой жидкостью, в которую погружена БМ. Именно вдоль БМ распространяются бегущие волны. Именно наличие неоднородностей в виде покрывающих БМ базилярных волокон приводит к резонансам в поперечных по отношению к БМ колебаниях, которые проявляются в виде максимумов огибающих этих волн, которые затем быстро затухают. Монотонное увеличение длин этих базилярных волокон при увеличении расстояния от овального окна позволяет в соответствии с (5) записать неравенство

$$s(l(f_1)) > s(l(f_2)), \quad (13)$$

если выполняется неравенство (4) для частот тональных воздействий, вызывающих максимумы бегущих волн в соответствующих точках БМ. При этом в соответствии с (3) и (7) имеет место равенство

$$s(l(f_{\min})) = s(l_{\max}) = s_{\max}. \quad (14)$$

Представляет интерес получение соотношения, определяющее частоты резонансных поперечных колебаний в зависимости от длин соответствующих базилярных волокон. При этом соотношение (9) позволяет получить зависимость длин базилярных волокон от координаты БМ. В основе вывода этих соотношений естественно использовать энергетические соображения. В самом деле, в точке резонанса l размах поперечных колебаний будет пропорционален $s(l)$, а их скорость при воздействии вида (1) будет определяться соответствующей производной

$$w(l, t) = cs(l) f(l) \cos(2\pi f(l)t), \quad (15)$$

где $c > 0$ – коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех координат. Поэтому за период колебаний будет затрачена кинетическая энергия, определяемая соотношением

$$\begin{aligned}
 E(l) &= m(l)c^2s^2(l)f^2(l) \times \\
 &\times \int_0^{1/f(l)} \cos^2(2\pi f(l)t)dt = \\
 &= m(l)c^2s^2(l)f(l) / 4\pi,
 \end{aligned} \quad (16)$$

где $m(l)$ – вовлекаемая в движение масса несжимаемой жидкости. Полагая, что в процессе колебаний описывается круг, диаметр которого пропорционален длине ленточки, можно положить

$$m(l) = zdl s^2(l), \quad (17)$$

где $z > 0$ – коэффициент пропорциональности, а dl – малый элемент длительности. Таким образом, соотношение (16) можно привести к следующему виду:

$$E(l) = zc^2s^4(l)f(l) / 4\pi. \quad (18)$$

Считая, что во всех точках БМ на поддержание резонансных колебаний затрачивается одинаковая энергия, то есть

$$E(l_1) = E(l_2), \quad (19)$$

на основе (18) получаем исходное соотношение между длинами базилярных волокон и частотами возбуждения резонансов

$$s(l_2) = s(l_1)(f(l_1) / f(l_2))^{1/4}. \quad (20)$$

Отсюда с учетом (14) нетрудно получить нормированный вид зависимости

$$s(l) = s_{\max}(f_{\min} / f(l))^{1/4}. \quad (21)$$

В свою очередь, на основе (12) нетрудно получить зависимость длин базилярных волокон от координаты БМ, отсчитываемой от овального окна:

$$s(l) = s_{\max} \exp((l - l_{\max}) / 4l_{nah}). \quad (22)$$

Это соотношение определяет длины базилярных волокон в местах, где возможны резонансы, то есть когда выполняется неравенство

$$l \geq l_{nah}. \quad (23)$$

При этом соотношение (12) дает следующее значение частоты соответствующего тонального воздействия:

$$f(l_{nah}) = f_{\min} \exp(l_{\max} / l_{nah} - 1) = 25614. \quad (24)$$

Отметим, что такое значение получено при отношении $l_{\max} / l_{nah} = 7,23$. Если оно будет равно 7, то правая часть (24) даст значение 20 кГц, которое часто упоминается как верхний предел частот воспринимаемых (слышимых) человеком тональных воздействий. Таким образом, условие (23) не противоречит тому, что слух человека воспринимает тональные воздействия частотой порядка 20 кГц, а при исследованиях слуховой системы человека максимумы фиксировались

только для частот тональных воздействий не выше 1,6 кГц [4].

Линейная скорость распространения кратковременных возмущений

Рассмотрим процесс распространения вдоль БМ максимальных по амплитуде возмущений, вызываемых очень кратковременными (импульсными) воздействиями на овальное окно в виде зависимости их координат от времени:

$$l(t) = \int_0^t v(l(z))dz, \quad (25)$$

где $v(z) \geq 0$ – скорость распространения, которая зависит от пройденного расстояния. Ясно, что возмущение в виде максимального вспучивания над БМ распространяется, насколько хватает запаса энергии начального воздействия, хотя в каждой пройденной точке БМ возможны затухающие переколебания.

Далее полагаем, что энергии начального воздействия достаточно, чтобы в процессе начального вспучивания в точках l_2 и l_1 БМ описывались окружности, площади кругов которых пропорциональны $s^2(l_2)$ и $s^2(l_1)$ (как соответствующим диаметрам). Тогда, считая точки БМ близкими, можно записать условие равенства вовлекаемых в движения масс как равенства соответствующих объемов жидкости (dt здесь означает достаточно малый по величине промежуток времени):

$$v(l_2)dts^2(l_2) = v(l_1)dts^2(l_1), \quad (26)$$

откуда и следует искомое соотношение для скоростей в заданных точках БМ

$$v(l_1) = v(l_2)(s(l_2)/s(l_1))^2. \quad (27)$$

Если воспользоваться размерами (3) базилярных волокон в начале и конце БМ, то для отношения скоростей в конце и начале БМ получаем

$$v(0) / v(l_{\max}) = (s_{\max} / s_{\min})^2 = 25. \quad (28)$$

Это соотношение соответствует оценкам отношения скоростей от 10 до 30 раз, которые приводятся в [2] на основе физических характеристик БМ. Иными словами, с этих позиций можно сделать вывод об адекватности представления (27) эмпирическим данным. Очевидно также, что соотношение (27) порождает дифференциальное уравнение для положения на БМ максимума возмущения при импульсном воздействии

$$dl(t) / dt = v(0)(s_{\min} / s(l(t)))^2, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (28)$$

где $v(0)$ – начальная скорость, которая определяется воздействием механизма среднего уха на овальное окно; T – время распространения, которое не превосходит интервала времени, за который возмущение достигнет конца БМ.

Ясно, что для начального значения расстояния справедливо равенство

$$l(0) = 0, \quad (29)$$

и постановку начальной задачи решения дифференциального уравнения (28) необходимо дополнить соотношением (22), определяющим длину базиллярных волокон в зависимости от координаты. В этих условиях для численного решения уравнения (28) естественно использовать метод Эйлера [10], схема которого принимает следующий вид:

$$l_{k+1} = l_k + V_0 (s_{\min} / s_k)^2, \quad l_1 = 0; \quad s_1 = s_{\min}, \quad (30)$$

$$s_{k+1} = s_{\max} \exp((l_{k+1} - l_{\max}) / 4l_{\max}). \quad (31)$$

Здесь V_0 – параметр, который определяется начальной скоростью и шагом дискретизации по времени

$$V_0 = v(0)T / N = v(0)\Delta t, \quad (32)$$

и имеются в виду пошаговые вычисления, когда $k = 1, \dots, N$.

Очевидно, что кроме начальных значений должны достигаться граничные значения для длины БМ и максимальной длины покрывающих ее базиллярных волокон

$$l_{N+1} = l_{\max}; \quad s_{N+1} = s_{\max}. \quad (33)$$

Представляет существенный интерес определение такого минимального значения параметра (32), когда не только выполняются условия (33), но и обеспечивается монотонность роста оценок для базиллярных волокон

$$s_{k+1} > s_k, \quad k = 1, \dots, N. \quad (34)$$

В соответствии с определением оценкой скорости распространения возмущений служит величина

$$v_k = V_0 (s_{\min} / s_k)^2 / \Delta t, \quad (35)$$

причем должно выполняться условие монотонного убывания

$$v_{k+1} < v_k. \quad (36)$$

Для оценки адекватности получаемого решения следует осуществлять его сопоставление с результатами экспериментальных измерений фазовых скоростей бегущих волн. В [4] показано, что при тональном воздействии с частотой 200 Гц в районе максимума огибающей бегущей волны фазовая скорость приблизительно равна

$$v_\varphi(l(200)) \approx 1,25 \text{ мм / мс}, \quad (37)$$

причем имеется в виду следующее значение координаты максимума:

$$l(200) \approx 28,5. \quad (38)$$

Скорость оценивается на интервале левее этой точки. Основываясь на эмпирических результа-

тах Бекешы [2; 4], можно принять, что максимум огибающей волны, возбуждаемой воздействием с частотой 50 Гц, достигается в конце БМ за время, равное 3/4 периода, то есть за 15 мс,

$$T = 15. \quad (39)$$

Проведенные нами в этих условиях вычислительные эксперименты показали, что для выполнения сформулированных выше требований к значениям получаемой на основе вычислительной схемы (30), (31) последовательностей необходимо скорректировать значения длин базиллярных волокон в начале и конце БМ, положив

$$s_{\min} = s(0) = 0,09; \quad s_{\max} = s(l_{\max}) = 0,55 \quad (40)$$

и выбрав следующее значение параметра (32):

$$V_0 = 23,3T/N. \quad (41)$$

Такому значению параметра соответствует следующее значение начальной скорости, м/с:

$$V_0 = 23,3. \quad (42)$$

Это значение примерно в 14 раз меньше фазовой скорости звука в воздухе, что соответствует приведенной в [4] оценке изменения в среднем ухе акустического импеданса (порядка 20).

На рисунках 1–3 представлены графики полученных на основе (30), (31) и (35) зависимостей проходимого расстояния от времени; длин базиллярных волокон и скорости распространения возмущения в зависимости от расстояния до овального окна.

Заключение

В статье получены соотношения, позволяющие вычислить положения максимумов огибающих бегущих волн, возбуждаемых тональными воздействиями определенной частоты,

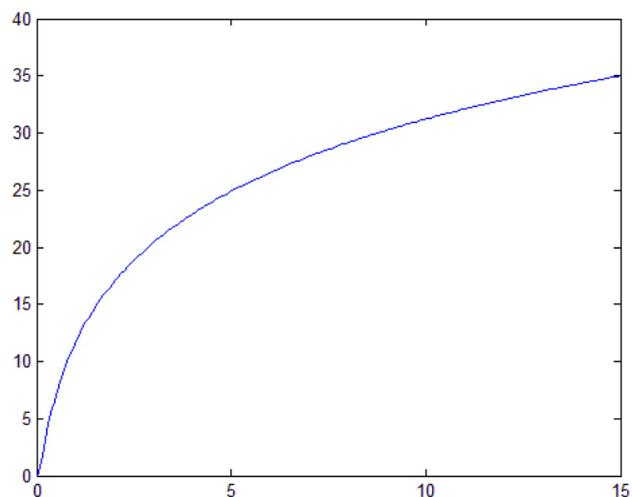


Рисунок 1. Зависимость пройденного возмущением расстояния, мм – по вертикали; от времени, мс его распространения – по горизонтали

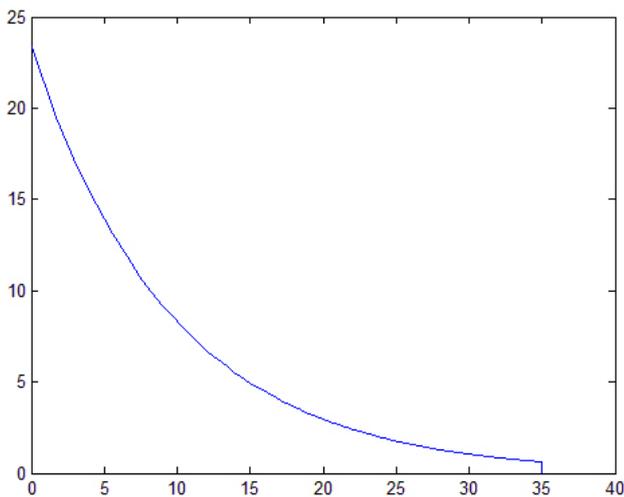


Рисунок 2. Зависимость скорости распространения возмущения, м/с – по вертикали; от пройденного расстояния, мм – по горизонтали

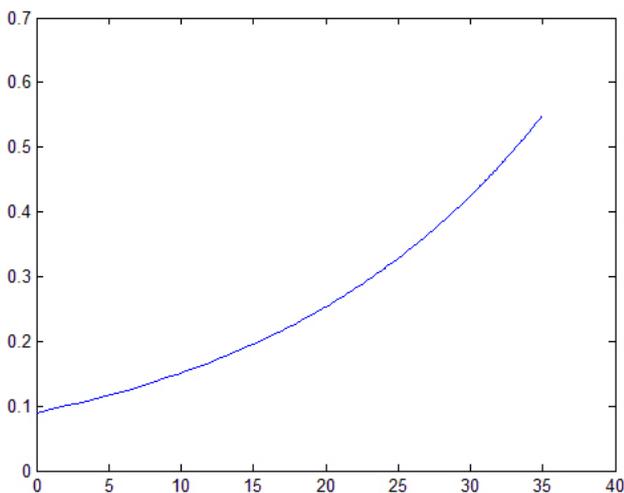


Рисунок 3. Зависимость длин базилярных волокон, мм – по вертикали; от расстояния до овального окна, мм – по горизонтали

зависимость длин покрывающих БМ базилярных волокон от расстояния от овального окна и зависимость скорости распространения кратковременных возмущений вдоль БМ. Вывод расчетных формул основан на достаточно простых физических соображениях и результатах экспериментальных исследований слуховой системы

человека, известных по литературным источникам. Полученные математические соотношения представляют собой элементы феноменологической модели гидромеханической части внутреннего уха. Адекватность предложенных элементов феноменологической модели иллюстрируется на основе воспроизведения экспериментальных результатов. В частности, рисунок 2 демонстрирует совпадение при $l \approx 28,5$ значений оценки скорости со значением (37).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-07-00215.

Литература

1. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации / пер. с нем. под ред. Б.Г. Белкина. М.: Связь, 1971. 255 с.
2. Молчанов А.П., Бабкина Л.Н. Электрические модели улитки органа слуха. Л.: Наука, 1978. 181 с.
3. Гельфанд С.А. Слух: введение в психол. и физиол. акустику / пер. с англ. М.: Медицина, 1984. 350 с.
4. Schroeder M.R. Models of hearing // Proceedings of the IEEE. 1975. Vol. 63. № 9. P. 1332–1350. DOI: 10.1109/PROC.1975.9941.
5. Алдошина И. Основы психоакустики. Ч. 1 // Звукорежиссер. 1999. № 6. С. 1–14.
6. Альтман Я.А. Слуховая система. Л.: Наука, 1990. 620 с.
7. Алдошина И. Основы психоакустики. Слух и речь. Ч. 1 // Звукорежиссер. 2002. № 1. С. 38–44.
8. Алдошина И. Основы психоакустики. Слух и речь. Ч. 2 // Звукорежиссер. 2002. № 3. С. 54–58.
9. Алдошина И. Основы психоакустики. Слух и речь. Ч. 3 // Звукорежиссер. 2002. № 4. С. 38–44.
10. Калиткин Н.Н. Численные методы. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 586 с.

Получено 20.02.2020

Жиляков Евгений Георгиевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий (ИТСТ) Белгородского государственного национального исследовательского университета (БелГНИУ). 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-92. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

Белов Сергей Павлович, д.т.н., профессор кафедры организации и технологии защиты информации (ОТЗИ) Белгородского университета кооперации экономики и права (БелУКЭП). 308023, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Садовая, 116а. Тел. +7 980 323-61-04. E-mail: belovssergei@gmail.com

Белов Александр Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры ОТЗИ БелУКЭП. 308023, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Садовая, 116а. Тел. +7 472 226-38-31. E-mail: belov_as@bsu.edu.ru

Медведева Александра Александровна, к.т.н., доцент кафедры ИТСТ БелГНИУ. 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-92. E-mail: medvedeva_aa@bsu.edu.ru

ON THE PROPAGATION VELOCITY OF DISTURBANCES ALONG A BASILAR MEMBRANE OF THE HUMAN AUDITORY SYSTEM

Zhilyakov E.G.¹, Belov S.P.², Belov A.S.², Medvedev A.A.¹

¹ *Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation*

² *Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, Belgorod, Russian Federation*
E-mail: belov@bsu.edu.ru

The auditory system of a person plays a leading role in their life and, above all, in the processes of information exchange based on sound signals, especially during oral speech. In this regard, many countries conduct studies on the characteristics of the human sound perception based on the creation of various types of models. These are necessary for improving hearing aids, developing systems for the automatic recognition of oral speech in artificial intelligence systems and optimizing the processing of speech signals during storage and transmission of voice messages. In the framework of this paper, a method has been developed for estimating the propagation velocity of disturbances along the basilar membrane created when the oval window is exposed. Fairly simple ideas about the properties that take place in the environment of the perilymph are used – the basilar membrane of physical processes.

Keywords: *human auditory system, basilar membrane, basilar fibers, psychoacoustics*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.2.09

Zhilyakov Evgeny Georgievich, Belgorod State National Research University, 85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; Doctor of Technical Sciences, Head of Information and Telecommunication Systems and Technologies Department. Tel. + 7 472 230-13-92. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

Belov Sergey Pavlovich, Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, 116a, Sadovaya Street, Belgorod, 308023, Russian Federation; Doctor of Technical Sciences, Professor of Organization and Technology of Information Protection Department. Tel. + 7 980 323-61-04. E-mail: belovssergei@gmail.com

Belov Alexander Sergeevich, Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, 116a, Sadovaya Street, Belgorod, 308023, Russian Federation; PhD in Technical Science, Associate Professor of Organization and Technology of Information Protection Department. Tel. + 7 472 226-38-31. E-mail: belov_as@bsu.edu.ru

Medvedeva Alexandra Aleksandrovna, Belgorod State National Research University, 85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; PhD in Technical Science, Associate Professor of Organization and Technology of Information Protection Department. Tel. + 7 472 230-13-00 (2774). E-mail: medvedeva_aa@bsu.edu.ru

References

1. Cviker E., Fel'dkeller R. *Ear as a receiver of information*. Trans. from German by B.G. Belkina. Moscow: Svyaz', 1971, 256 p. (In Russian.)
2. Molchanov A.P., Babkina L.N. *Electric models of the cochlea of the organ of hearing*. Leningrad: Nauka, 1978, 181 p. (In Russian.)
3. Gel'fand S.A. *Hearing: An introduction to psychol. and fziol. of acoustics*. Trans. from English O.K. Fedorovoj, O.P. Tokareva. Moscow: Medicina, 1984, 350 p. (In Russian.)

4. Schroeder M.R. Models of hearing. *Proceedings of the IEEE*, 1975, vol. 63, no. 9, pp. 1332–1350. DOI: 10.1109/PROC.1975.9941.
5. Aldoshina I. Fundamentals of psychoacoustics. Part 1. *Zvukorezhisser*, 1999, no. 6, pp. 1–14. (In Russian).
6. Altman Ya.A. *Auditory system*. Leningrad: Nauka, 1990, 620 p. (In Russian.)
7. Aldoshina I. Fundamentals of psychoacoustics. Hearing and speaking. Part 1. *Zvukorezhisser*, 2002, no. 1, pp. 38–44. (In Russian.)
8. Aldoshina I. Fundamentals of psychoacoustics. Hearing and speaking. Part 2. *Zvukorezhisser*, 2002, no. 3, pp. 54–58. (In Russian.)
9. Aldoshina I. Fundamentals of psychoacoustics. Hearing and speaking. Part 3. *Zvukorezhisser*, 2002, no. 4, pp. 38–44. (In Russian.)
10. Kalitkin N.N. *Numerical methods*. 2nd ed. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2011, 586 p. (In Russian).

Received 20.02.2020

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УДК 936.016.21

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МОДЕМОВ OFDM ДЛЯ РАДИОКАНАЛОВ С ЗАМИРАНИЯМИ СИГНАЛА

Мишин Д.В., Тяжев А.И.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: mishin@psati.ru, tyagev@psati.ru*

Рассматриваются способы реализации модемов сигналов с ортогональными поднесущими Orthogonal Frequency Division Modulation (OFDM), предназначенных для высокоскоростной передачи цифровых сигналов по радиоканалам с замираниями сигналов, причем длительность замирания сигнала в радиоканале в сотни и тысячи раз превышает длительность передаваемых посылок цифрового сигнала. В таких условиях избыточное кодирование и перемежение не обеспечивают гарантированной передачи цифровой информации, а модуляция OFDM обеспечивает высокоскоростную передачу цифровых сигналов по радиоканалам с замираниями сигналов. В статье приводятся расчеты достижимой в модемах OFDM скорости передачи цифровой информации в зависимости от длительности замираний сигнала в радиоканале и от параметров процессоров быстрого преобразования Фурье, на которых реализуются модемы сигналов OFDM. Показано, что скорость передачи цифрового потока B или пропускная способность модемов OFDM в радиоканалах с замираниями сигнала растет за счет увеличения числа поднесущих, равных числу точек обработки процессором быстрого преобразования Фурье, числа позиций передаваемого сигнала на каждой поднесущей и за счет уменьшения длительности замираний сигнала. При этом время обработки всех точек процессором быстрого преобразования Фурье должно быть меньше длительности символа на каждой поднесущей.

Ключевые слова: модуляция OFDM, многопозиционные виды модуляции, дискретное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, пропускная способность модемов OFDM, производительность процессоров быстрого преобразования Фурье

Принцип работы модуляторов OFDM

Если для передачи цифровой информации использовать двухпозиционные виды модуляции, такие как амплитудная модуляция (АМ) или фазовая модуляция (ФМ), то связь между скоростью передачи B и полосой пропускания канала Π определяется выражением:

$$\Pi = B(1 + r), \quad (1)$$

где коэффициент r изменяется от нуля до единицы в зависимости от характеристик фильтра на

выходе модулятора. В дальнейшем будем считать, что фильтр хороший, а коэффициент $r = 0$. Тогда $\Pi = B$. Для передачи цифровой информации по радиоканалам с замираниями сигнала широко используются модемы сигналов с ортогональными поднесущими (Orthogonal Frequency Division Modulation – OFDM) [1; 2]. Модуляция OFDM подразумевает, что в частотном канале с полосой

$$\Pi = NF \quad (2)$$