

РАДИОТЕХНИКА И РАДИОЛОКАЦИЯ

УДК 621.395

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЁХКАНАЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ХУРГИНА – ЯКОВЛЕВА В АЛГОРИТМАХ ПЕРВИЧНОГО КОДИРОВАНИЯ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

В. Т. Дмитриев, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru

Ву Хоанг Шон, аспирант кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0004-7428-5296, e-mail: vuhoangson.adaf@gmail.com

Проведены исследования модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трехканальной реализации для повышения качества в первичных кодеках речевых сигналов. Целью работы является модификация амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик синтезирующих фильтров с целью упрощения реализации и минимизации ошибки восстановления сигнала, а также исследование первичных кодеков, в которых используется предложенная модификация при действии помех в канале связи. Разработана структурная схема трехканальной системы обработки и передачи речевых сигналов на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева. Получены оценки качества восстановленного речевого сигнала на выходе различных кодеков при действии помех в канале связи для предложенной модификации алгоритма Хургина – Яковлева, а также проведено их сравнение с системами, построенными на теореме В.А. Котельникова. Показано, что применение предложенной трехканальной модификации алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает улучшение качественных характеристик и помехоустойчивости передаваемой речевой информации.

Ключевые слова: модификация алгоритма Хургина – Яковлева, теорема В.А. Котельникова, первичное кодирование, кодеки речевых сигналов, помехоустойчивость, помехи в канале связи, оценка качества речи.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-3-14

Введение

Известные алгоритмы кодирования речевых сигналов являются важной частью современных систем передачи речевой информации. Они во многом определяют скорость передачи в канале связи, а вследствие этого эффективность использования ресурса канала и качество восстановленной речи на выходе. Так как речевой сигнал (РС) представляет собой нестационарный процесс, необходима разработка интеллектуальных алгоритмов выделения избыточности РС с целью более эффективного сокращения избыточности передаваемой информации. В связи с применением все более интеллектуальных алгоритмов обработки технология кодирования речи вызывает все больший интерес со стороны исследовательских сообществ.

Алгоритмы первичного кодирования РС, как и все алгоритмы цифровой обработки сигналов в целом, основаны на теореме отсчетов В.А. Котельникова. При использовании в алгоритмах обработки РС теоремы В.А. Котельникова возникают ошибки усечения и наложения, обусловленные ограниченностью во времени реализаций случайных процессов, что было рассмотрено в работах А. Дж. Джерри, Я.И. Хургина, В.П. Яковлева и др. [1, 2].

Для снижения данных ошибок Я.И. Хургиным, В.П. Яковлевым предложено представление сигнала с финитным спектром в виде отсчетов сигнала и его $N-1$ производных [1]. Было

показано, что алгоритм Хургина – Яковлева снижает вычислительную нагрузку через эффективное распараллеливание операций и повышает устойчивость к воздействию помех [3-9]. Однако использование данного алгоритма приводит к неточности восстановления сигнала и в первую очередь его фазового спектра, что ограничивает применимость алгоритма в практических задачах. Для решения данной проблемы предложена модификация алгоритма, цель которой – уменьшить ошибку восстановления РС за счёт коррекции фазочастотных характеристик (ФЧХ) синтезирующего фильтра.

Ранее рассмотрена модификация алгоритма Хургина – Яковлева при двухканальной реализации [3-9]. Показано, что применение данной модификации обеспечивает не только снижение вычислительных затрат за счёт возможности распараллеливания вычислений и более простую реализацию синтезирующих фильтров, но и выигрыш в помехоустойчивости за счёт того, что отсчеты сигнала и его первой производной имеют фазовый сдвиг, равный 90° . При трехканальной реализации модификации алгоритма Хургина – Яковлева для передачи сигнала используются прореженные в три раза отсчеты сигнала, а также первой и второй производных, обеспечивая фазовый сдвиг 90° и 180° . Таким образом, данное представление теоретически может обеспечить больший выигрыш по помехоустойчивости, чем двухканальная модификация.

Целью данной работы является разработка и анализ эффективности алгоритмов первичного кодирования при трехканальной реализации системы передачи на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при наличии или отсутствии шумов в канале связи и сравнительный анализ с аналогичной системой передачи на основе теоремы В.А. Котельникова.

Трёхканальная модификация алгоритма Хургина – Яковлева

Алгоритм Хургина – Яковлева позволяет восстанавливать сигнал с финитным спектром $f(t)$ по его отсчетам и $(N-1)$ его производным, взятым с частотой дискретизации $2F/N$, используя следующее представление в виде [1, 3]:

$$f(t) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{f^{(m)}(NnT)}{m!} (t - NnT)^m \left[\frac{\sin \frac{\pi}{NT} (t - NnT)}{\frac{\pi}{NT} (t - NnT)} \right]^N, \quad (1)$$

где $f^{(m)}(NnT)$ – m -я производная сигнала, $T \leq 1/2F$ – величина интервала между моментами отсчетов, определенных по теореме В.А. Котельникова.

При реализации системы передачи и обработки РС с тремя каналами, когда осуществляется передача отсчетов сигнала и его первых двух производных ($N=3$), формула (1) принимает следующий вид:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(3nT) \left[\frac{\sin \frac{\pi}{3T} (t - 3nT)}{\frac{\pi}{3T} (t - 3nT)} \right]^3 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} f'(3nT) (t - 3nT) \left[\frac{\sin \frac{\pi}{3T} (t - 3nT)}{\frac{\pi}{3T} (t - 3nT)} \right]^3 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{f''(3nT)}{2} (t - 3nT)^2 \left[\frac{\sin \frac{\pi}{3T} (t - 3nT)}{\frac{\pi}{3T} (t - 3nT)} \right]^3. \quad (2)$$

Методика обработки сигнала, использующая формулу (2), выглядит следующим образом. Передаваемый сигнал $f(t)$ имеет финитный спектр, сосредоточенный в диапазоне $(-\pi/T; \pi/T)$. Через интервалы времени длительности 3Δ выбираются отсчетные значения сигнала $f(3nT)$, его первой $f'(3nT)$ и второй производных $f''(3nT)$. Эти величины кодируются в виде коротких импульсов, амплитуды которых пропорциональны соответствующим

щим величинам. После этого на приемной стороне они поступают на синтезирующие фильтры с импульсными переходными функциями, описываемыми следующими формулами:

– для отсчетов сигнала:

$$\theta_1(t) = \left[\frac{\sin \frac{\pi}{3T}(t-3nT)}{\frac{\pi}{3T}(t-3nT)} \right]^3; \quad (3)$$

– для отсчетов первой производной сигнала:

$$\theta_2(t) = (t-3nT) \left[\frac{\sin \frac{\pi}{3T}(t-3nT)}{\frac{\pi}{3T}(t-3nT)} \right]^3; \quad (4)$$

– для отсчетов второй производной сигнала:

$$\theta_3(t) = (t-3nT)^2 \left[\frac{\sin \frac{\pi}{3T}(t-3nT)}{\frac{\pi}{3T}(t-3nT)} \right]^3. \quad (5)$$

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и ФЧХ синтезирующих фильтров, полученных для каналов прореженного сигнала и двух его первых производных, приведены на рисунке 1.

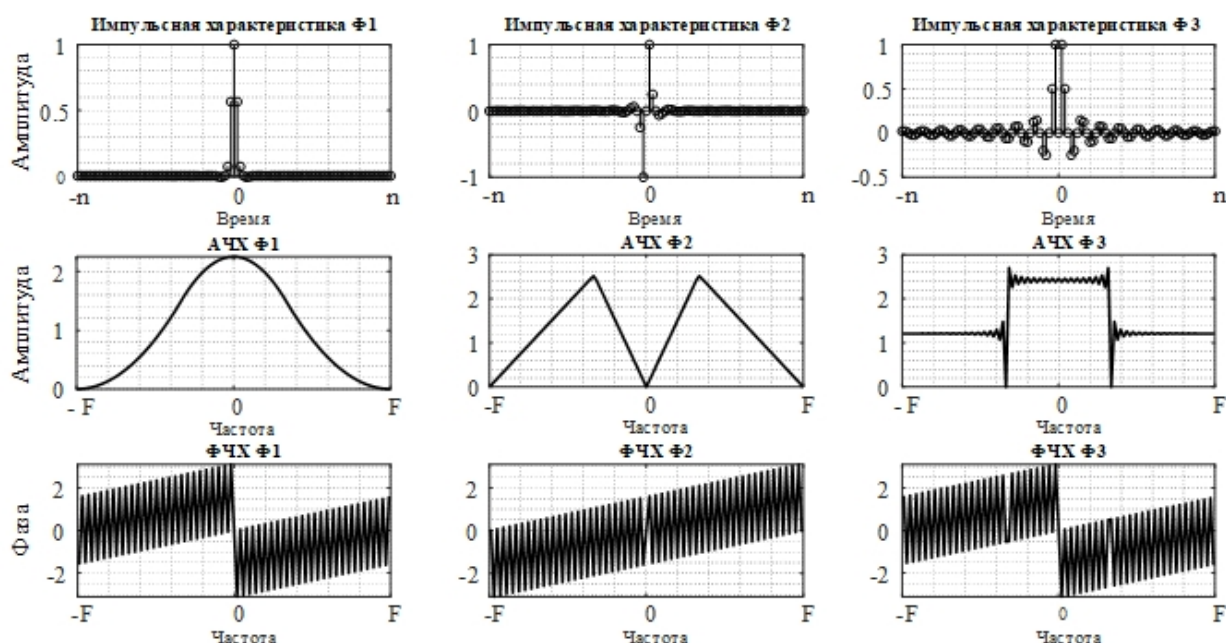


Рисунок 1 – АЧХ и ФЧХ синтезирующих фильтров алгоритма Хургина – Яковлева при трёхканальной реализации

Figure 1 – Amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of synthesizing filters of the Khurgin – Yakovlev algorithm with three-channel implementation

На основе анализа рисунка 1 видно, что ФЧХ синтезирующих фильтров не обеспечивают точного восстановления сигналов. Чтобы устранить этот недостаток, предполагается провести модификацию алгоритма. С этой целью для расчета АЧХ синтезирующих фильтров и вывода универсального уравнения требуется применение методов аппроксимации, позволяющих рассчитать желаемый частотный отклик с помощью полиномов и кусочно-линейной аппроксимации. АЧХ $A(f)$ и ФЧХ $\Phi(f)$ синтезирующих фильтров для модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трёхканальной реализации имеют следующий вид, представленный на рисунке 2.

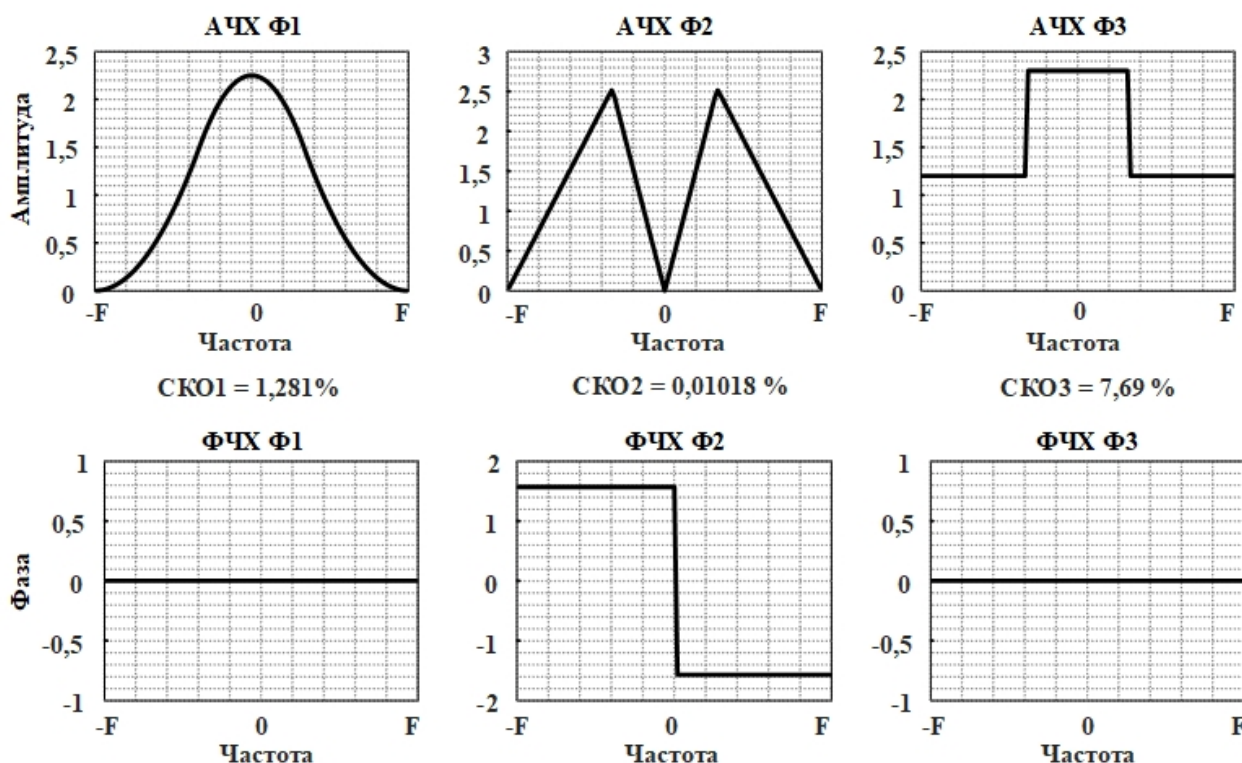


Рисунок 2 – АЧХ и ФЧХ синтезирующих фильтров модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трёхканальной реализации
Figure 2 – Frequency response and phase response of synthesizing filters of the Khurgin – Yakovlev algorithm modification with three-channel implementation

Для первого синтезирующего фильтра АЧХ и ФЧХ имеют следующий вид:

$$A_1(f) = 2,22 + 1,25(f/F) - 16,27(f/F)^2 + 20,45(f/F)^3 - 7,67(f/F)^4, \quad (6)$$

$$\Phi_1(f) = 0.$$

Для второго синтезирующего фильтра АЧХ и ФЧХ имеют следующий вид:

$$A_2(f) = \begin{cases} 4,26(f/F) & \text{при } f \leq 0,36F \\ -2,15(f/F) + 2,15 & \text{при } 0,36F < f \leq F, \end{cases} \quad (7)$$

$$\Phi_2(f) = \begin{cases} -\pi/2 & \text{при } f \leq F \\ \pi/2 & \text{при } F < f \leq 2F. \end{cases}$$

Для третьего синтезирующего фильтра АЧХ и ФЧХ имеют следующий вид:

$$A_3(f) = \begin{cases} 1,37 & \text{при } f \leq 0,36F \\ 0,69 & \text{при } 0,36F < f \leq F, \end{cases} \quad (8)$$

$$\Phi_3(f) = 0.$$

Структурная схема системы обработки и передачи сигналов на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева имеет вид, представленный на рисунке 3.

Первоначально происходит дискретизация исходного сигнала с частотой, определенной по теореме В.А. Котельникова $f'_k(n)$. После этого дискретизированный сигнал поступает в дифференциатор Д, на выходе которого формируются отсчеты первой $f'_k(n)$ и второй $f''_k(n)$ производных сигнала. Как показано в [3], дифференциатор Д, основанный на алгоритме получения производной частотной области, обеспечивает наилучшие результаты. Согласно [10] оценка дискретных отсчетов производной осуществляется путем применения быстрого преобразования Фурье к отсчетам исходного сигнала, последующего умножения полученных отсчетов спектра на множитель $(j\omega)$ и выполнения обратного быстрого преобразования Фурье.

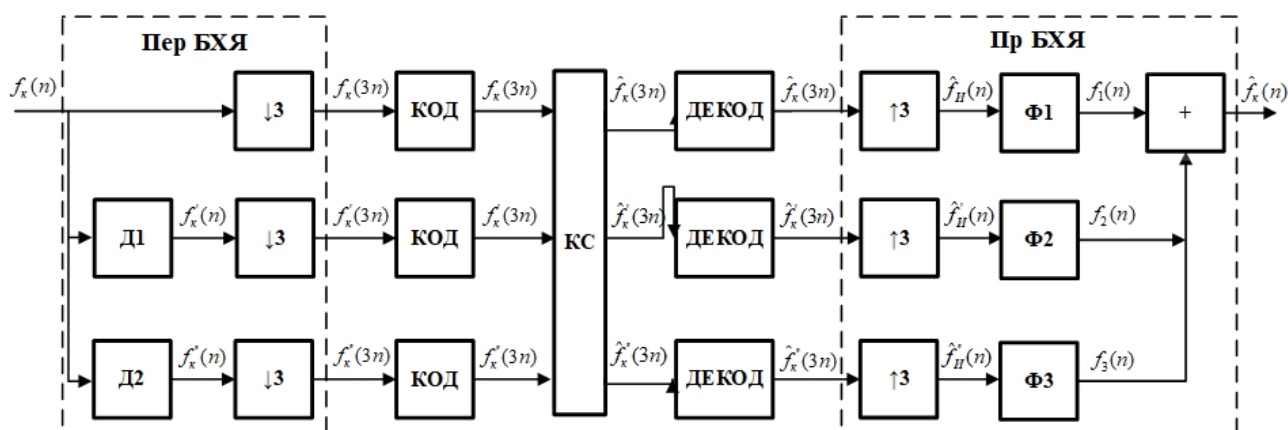


Рисунок 3 – Структурная схема системы обработки и передачи сигналов на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трёхканальной реализации
Figure 3 – Block diagram of signal processing and transmission system based on a modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm with three-channel implementation

Определить спектры первой $S_{ПР1}(\omega_n)$ и второй $S_{ПР2}(\omega_n)$ производных возможно, используя спектральные данные исходного сигнала $S_C(\omega_n)$ с применением следующих формул:

$$S_{ПР1}(\omega_n) = j\omega_n S_C(\omega_n) = \omega_n S_C(\omega_n) e^{j\pi/2}; \quad (9)$$

$$S_{ПР2}(\omega_n) = (j\omega_n)^2 S_C(\omega_n) = \omega_n S_C(\omega_n) e^{j\pi}. \quad (10)$$

Следующим этапом является процесс децимации ($\downarrow 3$): из группы трёх отсчетов отбрасывается каждый второй и третий отсчеты как исходного сигнала, так и его первой и второй производных. В итоге мы получаем прореженные в 3 раза отсчеты сигнала и его отсчеты первой и второй производных, обозначаемые как $f_k(3n), f_k'(3n), f_k''(3n)$ соответственно. Затем обработанные отсчеты направляются в кодер (КОД) и передаются в канал связи (КС). После прохождения канала связи, закодированные отсчеты поступают в трёхканальный приёмник. В декодере (ДЕКОД) происходит их декодирование и последующая передача на интерполятор ($\uparrow 3$), осуществляющий вставку двух нулевых отсчетов между исходными отсчетами сигнала. На выходе интерполятора получаем отсчеты сигнала и его отсчеты первой и второй производных $f_{\hat{k}}(3n), f_{\hat{k}}'(3n), f_{\hat{k}}''(3n)$ соответственно. Затем эти отсчеты поступают на соответствующие синтезирующие фильтры (Ф1, Ф2, Ф3), после чего поступают на сумматор (+), на выходе которого восстанавливается исходный РС.

Описание эксперимента

Экспериментальные исследования проводились согласно структурной схеме, показанной на рисунке 4.

Согласно данной структурной схеме для записи фраз применялся микрофон. В данном исследовании в качестве микрофона использован диктофон Olympus LS-10 (Linear PCM Recorder), обеспечивающий возможность записи РС со следующими параметрами: формат .wav, частота дискретизации – 44,1 кГц, разрядность квантования – 16 бит, кодирование с помощью ИКМ кодера.

Исследование производилось для записей 10 речевых сообщений, озвученных дикторами, среди которых было 6 мужчин и 4 женщины, представляющих разные возрастные категории. В результате было получено 10 уникальных фраз, записанных каждым диктором, длительностью от четырех до десяти секунд каждая, что соответствует требованиям ГОСТ Р 50840-95[11]. Исходный РС, записанный с частотой дискретизации 44,1 кГц, поступает на полосовой фильтр (ПФ) с полосой пропускания 0,3-3,4 кГц. Структурная схема передатчика блока Хургина – Яковлева (Пер БХЯ) и приемника блока Хургина – Яковлева (Пр БХЯ) представлена на рисунке 3.

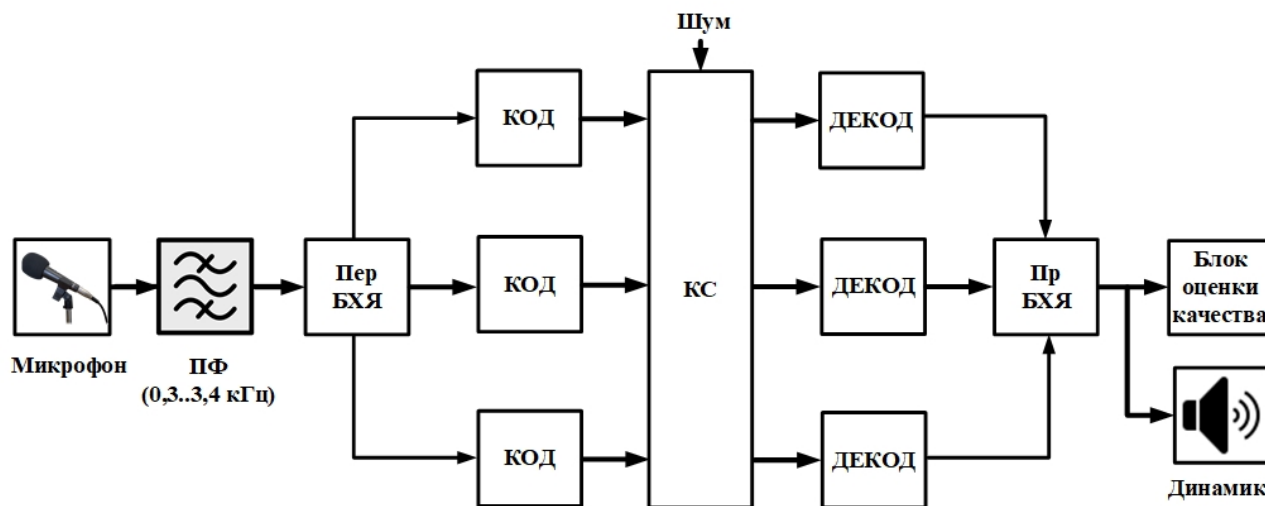


Рисунок 4 – Структурная схема проведения экспериментального исследования на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева

Figure 4 – Block diagram of an experimental study based on a modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm

В блоке Пер БХЯ осуществляется получение прореженных в три раза отсчетов сигнала и его двух первых производных по методике, описанной ранее. В блоке Пр БХЯ осуществляется обработка принятых прореженных отсчетов и восстановление исходного РС. При этом возникает ошибка восстановления сигнала $\varepsilon_{восм}$, которая наряду с ошибками квантования $\varepsilon_{кв}$ снижает качество восстановленной речи на приеме. При действии помех на отсчеты сигнала в канале связи также возникает ошибка ε_n , и результирующая ошибка на выходе кодека для системы на основе теоремы В.А. Котельникова имеет следующий вид:

$$\varepsilon_K = \varepsilon_{восмK} + \varepsilon_{квK} + \varepsilon_{nK}. \quad (11)$$

Для системы на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева выражение для ошибки на выходе кодека имеет следующий вид:

$$\varepsilon_X = \varepsilon_{восмX} + \varepsilon_{квX} + \varepsilon_{nX}. \quad (12)$$

Для модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трехканальной реализации $\varepsilon_{восмK} < \varepsilon_{восмX}$ за счет ошибки в синтезирующих фильтрах, что позволяет понизить ошибки квантования $\varepsilon_{квK} > \varepsilon_{квX}$ и ошибки за счет действия помех в канале связи $\varepsilon_{nK} > \varepsilon_{nX}$.

С выхода блока передатчика Пер БХЯ прореженные отсчеты сигнала и его двух первых производных подавались на первичные кодеки. С помощью программного обеспечения «Speech Pro Voice DEMO» исходный РС подвергался обработке с использованием первичного кодека. Экспериментальное исследование включало анализ трёх главных групп кодеков, классифицированных по скоростям передачи: низкоскоростных, среднескоростных и высокоскоростных, которые обобщены в таблице 1 [12-16]. Для отсчетов сигнала и его производных использовались одинаковые алгоритмы первичного кодирования.

После первичного кодирования, передачи, декодирования и восстановления РС с выхода Пр БХЯ поступает в блок оценки качества РС. Для получения объективной оценки качества РС производились экспериментальные исследования с помощью специального алгоритма автоматизированной оценки качества принимаемой речи PESQ (указанного в рекомендациях МСЭ-Т Р.800.1 [17]), в котором осуществлялась объективная оценка качества восстановленной речи. Полученные оценки качества РС приведены по шкале MOS-LQO (PESQ) [17]. Результаты этой оценки сравниваются с результатами восстановленного РС на основе теоремы В.А. Котельникова.

Таблица 1 – Характеристики первичных кодеков речевых сигналов
Table 1 – Characteristics of primary speech codecs

Классификация	Стандарт	Алгоритм	Скорость	Название
Низкоскоростные	MMBE	MBE-LPC	1,2/2,4 кбит/с	Mixed Multi-Band Excitation
	LBRAMR	AMR	1/1,2/2,4 кбит/с	Модифицированный алгоритм AMR
Среднескоростные	ICELP	CELP	4,8/6/8 кбит/с	Improved CodeExcited Linear Prediction
	G.723.1	MP-MLQ	5,3/6,3 кбит/с	Многоимпульсное квантование с максимальным правдоподобием
	G.729a	CS-ACELP	8 кбит/с	Линейное прогнозирование, генерируемое алгебраическим кодом сопряженной структуры
Высокоскоростные	G.728i	LD-CELP	16 кбит/с	Линейное прогнозирование, генерируемое кодом с низкой задержкой
	G.726	ADPCM	16/24/32/40 кбит/с	Адаптивная дифференциальная импульсно – кодовая модуляция

Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований проанализировано воздействие известных первичных кодеков на качество восстановленной речи в двух различных случаях.

Проведены исследования эффективности первичного кодирования в трехканальной системе модификации алгоритма Хургина – Яковлева без помех в канале связи. Рассмотрим работу системы, представленной на рисунке 4, при условии идентичного применения первичного речевого кодека для отсчетов сигнала и его производных. Усредненные результаты оценки качества восстановления 10 различных РС на выходе кодеков на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева в трехканальной системе (K_{x3}) сравниваются с двухканальной системой (K_{x2}), а также с системой, основанной на основе теореме В.А. Котельникова (K_K). Степени выигрыша качества восстановленной речи двухканальной системы ($\Delta K_2 = K_{x2} - K_K$) и трехканальной системы ($\Delta K_3 = K_{x3} - K_K$) представлены в таблице 2. Из анализа результатов экспериментальных исследований, представленных в таблице 2, видно, что системы, базирующиеся на модификации алгоритма Хургина – Яковлева на основе трехканальной реализации, показывают различную эффективность для разных первичных кодеков. Для низкоскоростных кодеков лучшее качество восстановленной речи обеспечивается при использовании алгоритма LBRAMR со скоростью передачи 2,4 кбит/с. Для среднескоростных кодеков наиболее эффективен алгоритм G.729a со скоростью передачи 8 кбит/с. Для высокоскоростных кодеков предпочтительным является использование G.726 со скоростью передачи 40 кбит/с.

По сравнению с системой, основанной на теореме В.А. Котельникова, предложенная система на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трёхканальной реализации имеет выигрыш только при реализации в алгоритмах низкоскоростных кодеков и некоторых алгоритмах среднескоростных кодеков. В частности, для низкоскоростных первичных кодеков алгоритм LBRAMR 1,2 кбит/с, для среднескоростных алгоритм ICELP 4,8 кбит/с обеспечивают наилучший выигрыш.

По сравнению с кодеками на основе двухканальной реализации модификации алгоритма Хургина – Яковлева трехканальная реализация обеспечивает наилучшее качество восстановленной речи для низкоскоростных кодеков, для среднескоростных кодеков обеспечивает в

целом сходные результаты, а для высокоскоростных кодеков проигрывает не только двухканальной реализации, но аналогичным кодекам на основе теоремы – В.А. Котельникова. Это объясняется тем, что для низкоскоростных кодеков используется низкая точность представления РС, по сравнению с которой ошибкой восстановления в системе синтезирующих фильтров можно пренебречь.

Таблица 2 – Сравнение кодеков на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева и теоремы В.А. Котельникова

Table 2 – Comparison of codecs based on a modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm and V.A. Kotelnikov theorem

№	Кодек	На основе теоремы В.А. Котельникова (K_K)	На основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева			
			Двухканальная система		Трехканальная система	
			K_{X2}	ΔK_2	K_{X3}	ΔK_3
НИЗКОСКОРОСТНЫЕ						
1	MMBE 1,2 кбит/с	2,31	2,31	0	2,40	0,09
2	MMBE 2,4 кбит/с	2,42	2,42	0	2,49	0,07
3	LBRAMR 1 кбит/с	2,49	2,54	0,05	2,57	0,08
4	LBRAMR 1,2 кбит/с	2,30	2,32	0,02	2,50	0,20
5	LBRAMR 2,4 кбит/с	2,50	2,50	0	2,60	0,10
СРЕДНЕСКОРОСТНЫЕ						
6	G.723.1 5,3 кбит/с	3,40	3,40	0	3,45	0,05
7	G.723.1 6,3 кбит/с	3,57	3,72	0,15	3,62	0,05
8	G.729a 8 кбит/с	3,67	3,77	0,1	3,63	-0,04
9	ICELP 4,8 кбит/с	3,22	3,32	0,1	3,32	0,10
10	ICELP 6 кбит/с	3,41	3,46	0,05	3,50	0,09
ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ						
11	G.726 16 кбит/с	3,04	3,09	0,05	3,20	0,16
12	G.726 24 кбит/с	3,72	3,77	0,05	3,69	-0,03
13	G.726 32 кбит/с	4,13	4,13	0	3,91	-0,22
14	G.726 40 кбит/с	4,20	4,25	0,05	3,96	-0,24
15	G.728i 16 кбит/с	4,03	4,03	0	3,94	-0,09

Рассмотрим исследование эффективности первичного кодирования в трехканальной системе модификации алгоритма Хургина – Яковлева в условиях действия помех в канале связи. Авторами проведены экспериментальные исследования качества восстановленной речи в зависимости от вероятности ошибки в канале связи в диапазоне от 0,1 % до 5 %.

На рисунке 5 представлены зависимости выигрыша качества ΔK восстановленной речи на выходе разработанной системы от вероятности ошибок в канале связи (Pe %) при использовании низкоскоростных кодеков (под цифрой 1 показана кривая выигрыша качества восстановленной речи на выходе системы передачи для кодека LBRAMR со скоростью передачи 1 кбит/с; под цифрой 2 – кодека LBRAMR со скоростью передачи 1,2 кбит/с; под цифрой 3 – кодека LBRAMR со скоростью передачи 2,4 кбит/с; под цифрой 4 – кодека MMBE со скоростью передачи 1,2 кбит/с; под цифрой 5 – кодека MMBE со скоростью передачи 2,4 кбит/с), среднескоростных кодеков (под цифрой 6 – кодека G.723.1 со скоростью передачи 6,3 кбит/с; под цифрой 7 – кодека G.729a со скоростью передачи 8 кбит/с), высокоскоростных кодеков (под цифрой 8 – кодека G.728i со скоростью передачи 16 кбит/с; под цифрой 9 – кодека G.726 со скоростью передачи 16 кбит/с; под цифрой 10 – кодека G.726 со скоростью передачи 24 кбит/с; под цифрой 11 – кодека G.726 со скоростью передачи 32 кбит/с; под цифрой 12 – кодека G.726 со скоростью передачи 40 кбит/с).

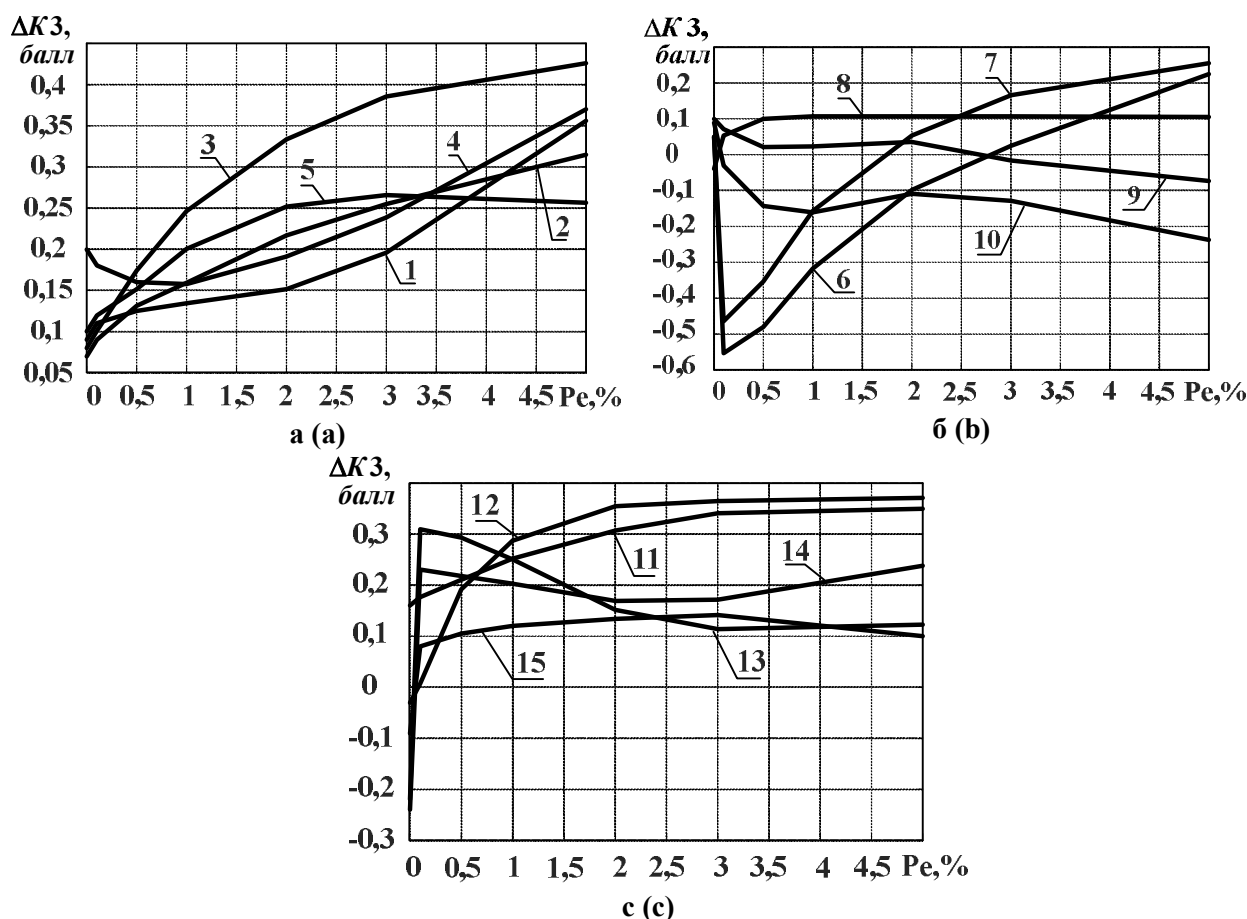


Рисунок 5 – Выигрыш качества восстановления речевых сигналов в условиях помех в канале связи при использовании низкоскоростных кодеков (а), среднескоростных кодеков (б) и высокоскоростных кодеков (с)

Figure 5 – Gain in speech signals restoration quality under the conditions of interference in a communication channel using low-speed codecs (a), medium-speed codecs (b) and high-speed codecs (c)

Полученные результаты представляет собой среднюю оценку качества восстановления РС. Сравнение качества восстановления сигнала системы, построенной на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева, с системой на основе теоремы В.А. Котельникова выражается через выигрыш качества $\Delta K_3 = K_{\text{ХЗ}} - K_{\text{К}}$. Анализ рисунка 5 позволяет сделать вывод, что использование различных алгоритмов первичного кодирования РС оказывает значительное влияние на качество восстановления сигнала после его передачи по зашумлённым каналам:

- Применение данного алгоритма низкоскоростного алгоритма первичного кодирования предоставляет улучшение качества восстановления РС во всех испытанных случаях с показателями выигрыша колеблющимися между 0,01 и 0,43 балла, согласно шкале MOS-LQO (PESQ). Среди них алгоритм LBRAMR со скоростью передачи 1 кбит/с дает лучший выигрыш в качестве восстановленной речи.

- При среднескоростном кодировании РС кодек G.729a со скоростью передачи 8 кбит/с демонстрирует стабильное преимущество в условиях различных помеховых ситуаций (выигрыш качества ΔK всегда положительный).

- Так же, как и при низкоскоростном кодировании, при использовании высокоскоростного кодирования обнаруживается выигрыш качества восстановленной речи с показателями выигрыша, варьирующимися от 0,005 до 0,37. В частности, применение кодека G.726 со скоростью передачи 24 кбит/с выделяется как особенно эффективное, обеспечивая наиболее заметное улучшение качества РС.

Сравнение результатов показывает преимущество кодирования РС на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трехканальной реализации по сравнению с теоремой В.А. Котельникова при действии помех в канале связи. Выигрыш в качестве восстановленной речи для систем на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева обусловлен их способностью к восстановлению части информации за счет значений сигнала и его производных, а также фазовых сдвигов, присутствующих между отсчетами [3].

Заключение

В работе предложен алгоритм передачи и обработки РС в радиоканале на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трехканальной реализации. В рамках данной работы модифицированы АЧХ и ФЧХ синтезирующих фильтров и предложена структурная схема системы передачи.

Приведены результаты экспериментальных исследований качества восстановленной речи на выходе системы передачи на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трехканальной реализации, и приведено их сравнение с аналогичными кодеками на основе теоремы В.А. Котельникова и модификации алгоритма Хургина – Яковлева при двухканальной реализации. В результате экспериментальных исследований показано, что применение данной модификации обеспечивает повышение помехоустойчивости передаваемой речевой информации и обеспечивает повышение качества восстановленной речи по сравнению с аналогичными системами на основе теоремы В.А. Котельникова.

При наличии помех в канале связи использование разработанного алгоритма в сочетании с низкоскоростным алгоритмом первичного кодирования позволяет повысить качество восстановления РС на 0,01 до 0,43 балла; со среднескоростным алгоритмом может составить - до 0,28 балла; в то время как для высокоскоростных алгоритмов первичного кодирования выигрыш составляет от 0,005 до 0,37 балла по шкале MOS-LQO (PESQ).

Таким образом, показано, что применение предложенной модификации алгоритма Хургина – Яковлева при трехканальной реализации целесообразно в низкоскоростных кодеках, а также в среднескоростных и низкоскоростных кодеках при наличии помех и искажений в канале связи.

Библиографический список

1. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. 220 с.
2. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 832 с.
3. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Реализационные возможности и помехоустойчивость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина – Яковлева // Радиотехника. 2003. № 1. С. 73-75.
4. Дмитриев В.Т. Адаптация кодеков речевых сигналов на основе теоремы В.А. Котельникова и модификации алгоритма Хургина – Яковлева к шумам в канале связи // Цифровая обработка сигналов. № 2. 2023. С. 55-60.
5. Дмитриев В.Т., Смирнов М.С. Исследование помехоустойчивой и защищенной системы передачи речевых сигналов на основе представления Хургина – Яковлева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 27-37.
6. Дмитриев В.Т. Помехоустойчивость кодеков речи на основе алгоритма Хургина – Яковлева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2003. № 12. С.133-136.
7. Дмитриев В.Т. Адаптация кода CELP к воздействию акустических помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 76. С.25-34.
8. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Устойчивость первичных кодеков речевых сигналов на основе представления Хургина – Яковлева к действию акустических шумов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 69. С.17-25.
9. Дмитриев В.Т., Лукьянов Д.И. Алгоритм маскирования на основе представления Хургина – Яковлева с использованием производных второго и третьего порядков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 42-1. С.13-17.

10. Бахурин С.А., Дмитриев, В.Т. Исследование точности алгоритмов оценки отсчетов производной в радиотехнических устройствах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета № 13. 2004. С.32-35.

11. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. М.: Изд-во стандартов, 1995. 60 с.

12. Кодек G.723.1 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.univers-spb.ru/technologys/voip.php?print=Y> (дата обращения 08.12.2016).

13. Кодек G.726 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.voip-info.org/wiki/view/ITU%20G.726> (дата обращения 08.12.2016).

14. Кодек LBRAMR, MMBE [Электронный ресурс]. URL: <http://spiritdsp.com> (дата обращения 08.12.2016).

15. ICELP [Электронный ресурс]. URL: <http://spiritdsp.com/> (дата обращения 08.12.2016).

16. Bernard Widrow, Samuel D. Stearns Adaptive signal processing. Prentice-Hall. 1985. 474 с.

17. Рекомендация МСЭ-Т Р.800.1 (07/2006) [Электронный ресурс] / URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=8860&lang=en> (Дата обращения: 29.12.2021).

UDK 621.395

APPLICATION OF THREE-CHANNEL MODIFICATION OF THE KHURGIN – YAKOVLEV ALGORITHM IN THE ALGORITHMS FOR PRIMARY CODING OF SPEECH SIGNALS

V. T. Dmitriev, Doctor in Technical Sciences, department of radio control and communication, Head of the department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru

Vu Hoang Son, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0004-7428-5296, e-mail: vuhoangson.adaf@gmail.com

Research on modifying the Khurgin-Yakovlev algorithm with three-channel implementation to improve the quality in speech signals primary codecs has been carried out. The aim of the work is to modify amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of synthesis filters in order to simplify the implementation and minimize signal reconstruction error, as well as to study primary codecs that use the proposed modification when exposed to interference in a communication channel. A block diagram of three-channel system for processing and transmitting speech signals has been developed based on a modification of the Khurgin-Yakovlev algorithm. Estimates of reconstructed speech signal quality at the output of various codecs under the influence of interference in a communication channel were obtained for the proposed modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm, and were compared with the systems built on the theorem of V.A. Kotelnikov. The authors show that the application of the proposed three-channel modification of the Khurgin-Yakovlev algorithm improves quality characteristics and noise immunity of transmitted speech information.

Keywords: modification of the Khurgin-Yakovlev algorithm, theorem of V.A. Kotelnikov, primary coding, speech signal codecs, noise immunity, noise in communication channel, speech quality assessment.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-3-14

References

1. Hurgin Ya.I., Yakovlev V.P. *Metody teorii celykh funktsiy v radiofizike, teorii svyazi i optike*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury. 1962. 220 p. (in Russian).

2. Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike*. Moscow: Izd-vo inostrannoy literatury. 1963. 832 p. (in Russian).

3. Kirillov S.N., Dmitriev V.T. Realizacionnye vozmozhnosti i pomekhoustoichivost' procedury vostanovleniya signalov na osnove algoritma Hurgina – Yakovleva. *Radiotekhnika*. 2003, no. 1, pp. 73-75. (in Russian).

4. **Dmitriev V.T.** Adaptaciya kodekov rechevyh signalov na osnove teoremy V.A. Kotel'-nikova i modifikacii algoritma Hurgina – Yakovleva k shumam v kanale svyazi. *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2023, no. 2, pp. 55-60. (in Russian).
5. **Dmitriev V.T., Smirnov M.S.** Issledovanie pomekhoustojchivoj i zashchishchennoj sistemy peredachi rechevyh signalov na osnove predstavleniya Hurgina – Yakovleva. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 82, pp. 27-37. (in Russian).
6. **Dmitriev V.T.** Pomekhoustojchivost' kodekov rechi na osnove algoritma Hurgina – Yakovleva. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennoj radiotekhnicheskoy akademii*. 2003, no. 12, pp. 133-136. (in Russian).
7. **Dmitriev V.T.** Adaptaciya kodeka CELP k vozdeystviyu akusticheskikh pomekh. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 76, pp. 25-34. (in Russian).
8. **Kirillov S.N., Dmitriev V.T.** Ustojchivost' pervichnyh kodekov rechevyh signalov na osnove predstavleniya Hurgina – Yakovleva k deystviyu akusticheskikh шумов. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 69, pp. 17-25. (in Russian).
9. **Dmitriev V.T., Luk'yanov D.I.** Algoritm maskirovaniya na osnove predstavleniya Hurgina – Yakovleva s ispol'zovaniem proizvodnyh vtorogo i tret'ego poryadkov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2012, no. 42-1, pp.13-17. (in Russian).
10. **Bahurin S.A., Dmitriev V.T.** Issledovanie tochnosti algoritmov ocenki otschetov proizvodnoj v radiotekhnicheskikh ustroystvah. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennoj radiotekhnicheskoy akademii*. 2004, no. 13, pp.32-35. (in Russian).
11. GOST R 50840-95. *Peredacha rechi po traktam svyazi. Metody ocenki kachestva, razborchivosti i uznavaemosti*. Moscow: Izd-vo standartov. 1995. 60 p. (in Russian).
12. *Kodek G.723.1* [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.univers-spb.ru/technologys/voip.php?print=Y> (data obrashcheniya 08.12.2016). (in Russian).
13. *Kodek G.726* [Elektronnyj resurs]. URL: [http://www.voip-info.org/wiki/view/ITU% 20G.726](http://www.voip-info.org/wiki/view/ITU%20G.726) (data obrashcheniya 08.12.2016). (in Russian).
14. *Kodek LBRAMR, MMBE* [Elektronnyj resurs]. URL: <http://spiritdsp.com> (data obrashcheniya 08.12.2016). (in Russian).
15. *ICELP* [Elektronnyj resurs]. URL: <http://http://spiritdsp.com/> (data obrashcheniya 08.12.2016). (in Russian).
16. **Bernard Widrow, Samuel D.** Stearns *Adaptive signal processing*. Prentice-Hall. 1985. 474 c.
17. *Rekomendaciya MSE-T P.800.1 (07/2006)* [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=8860&lang=en> (Data obrashcheniya: 29.12.2021). (in Russian).