

УДК 004.056.2

М.Е. Коллар

Цифровое маркирование аудиосигналов, основанное на модуляции MCLT-коэффициентов

Методы сокрытия данных в аудиосигналах имеют различные приложения, такие как цифровое маркирование и стеганография. Производится краткое описание нового разработанного метода цифрового маркирования аудиосигналов, который основывается на модулированном комплексном перекрывающем преобразовании, MCLT-преобразовании. Особенность данного алгоритма маркирования – сохранение качества звучания маркированных сигналов. Исследуются зависимости между изменяемыми параметрами метода и качеством звучания аудиосигнала, а также поведение встроенного в сигнал маркера при проведении атак на аудиосигнал. На основании проведенных экспериментов делается вывод о возможности использования разработанного метода цифрового маркирования для подтверждения аутентичности звуковых файлов, распространяемых в сети Интернет или подтверждения целостности передаваемых аудиофайлов.

Ключевые слова: сокрытие данных в аудиосигналах, цифровое маркирование, целостность, аутентичность, MCLT-преобразование.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-57-61

Применение аудиостеганографии имеет широкие возможности использования в аудиоиндустрии, криминалистике, защите данных. В статье описывается разработанный метод маркирования? способный сохранять качество звучания аудиосигнала после внедрения данных. Разработанный метод будет использоваться для подтверждения целостности маркированных аудиофайлов. В связи с этим встраиваемый маркер должен легко разрушаться при негативных воздействиях.

На данный момент существует множество вариантов маркирования и преобразования аудиосигналов. Чтобы выявить наиболее подходящую основу для разработанного метода, проведен анализ существующих методов маркирования.

Анализ существующих методов

Метод сокрытия информации в наименьших значащих битах широко применяется для внедрения цифровых маркеров в несжатые аудиосигналы. Основное достоинство данного метода заключается в возможности внедрить большой объем информации в небольшой аудиосигнал [1]. К недостаткам относятся невысокая скрытность внедренного маркера и широкая известность применяемого алгоритма маркирования.

Преимущество метода, основанного на изменении амплитуды, скорости затухания и сдвига аудиосигнала, заключается в высокой скрытности внедряемого маркера и сохранении качества звучания. Недостатками являются малый объем встраиваемых данных, битов маркера и высокие вычислительные затраты [2].

Метод внедрения данных в фазу сигнала признан наиболее подходящим для дальнейшего исследования [3]. Это связано с тем, что он обладает высокой скрытностью и позволяет сохранить качество аудиосигнала при маркировании. Также данный метод маркирования более устойчив к влиянию случайных воздействий на аудиосигнал. Недостаток данного метода – возможное появление эха в марки-

рованном аудиосигнале – может быть устранен при использовании подходящего преобразования аудиосигнала.

Разработанный алгоритм цифрового маркирования аудиосигналов, не искажающий качества звучания, пригодный для подтверждения целостности аудиосигналов, основан на модулированном комплексном перекрывающем преобразовании, далее – MCLT-преобразовании [4–6].

MCLT – обратимое преобразование с перекрытием. С его помощью возможно осуществить быстрое преобразование данных из цифровой формы в комплексную, с которой удобно работать при фазовой модуляции, а также легко их восстановить без потери качества и затирания внедренной информации. Еще одним достоинством MCLT-преобразования является его нераспространенность, что позволило разработать новый метод маркирования.

Ранее уже производились попытки использования MCLT-преобразования для маркирования аудиосигналов. Так, замена только фазы MCLT-коэффициентов – комплексных чисел [7] приводит к появлению эха в маркированном сигнале. Когда используется метод маркирования с изменяемой силой встраивания [4, 8, 9], тогда при увеличении силы встраивания количество верно извлеченных из сигнала символов маркера увеличивается, но качество сигнала становится неприемлемым.

Методы встраивания и извлечения данных

Разработанный метод цифрового маркирования – доработанная версия метода [4], который является результатом слияния алгоритмов изменения фазы MCLT-коэффициентов [6] и внедрения данных с определенной силой встраивания [8]. Его особенность – внедрение данных в фазовую и амплитудную составляющие MCLT-коэффициентов с определенной силой встраивания. Так, изменению подвергаются мнимая, и действительная части выбранного для встраивания MCLT-коэффициента (1)–(3). Для извлечения данных принятый звуковой сигнал под-

вергается прямому MCLT-преобразованию. Принятие решения относительно встроенной единицы или нуля основывается на формуле (4).

$$\operatorname{Re}(C'(i, j)) = \begin{cases} \frac{\operatorname{Re}(C(i, j))}{S} S + S \frac{3}{4}, & \text{встраивается 1;} \\ \frac{\operatorname{Re}(C(i, j))}{S} S + \frac{S}{4}, & \text{встраивается 0.} \end{cases} \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(C'(i, j)) = \begin{cases} \frac{\operatorname{Im}(C(i, j))}{S} S + S \frac{3}{4}, & \text{при встраивании 1;} \\ \frac{\operatorname{Im}(C(i, j))}{S} S + \frac{S}{4}, & \text{при встраивании 0.} \end{cases} \quad (2)$$

$$C'(i, j) = \operatorname{Re}(C'(i, j)) + \operatorname{Im}(C'(i, j))I. \quad (3)$$

$$Z_i = \begin{cases} \left\lfloor 1, \operatorname{Re}(C''(i, j)) - \left\lfloor \frac{\operatorname{Re}(C''(i, j))}{S} \right\rfloor S + \right. \\ \left. + \operatorname{Im}(C''(i, j)) - \left\lfloor \frac{\operatorname{Im}(C''(i, j))}{S} \right\rfloor S \right\rfloor \geq S; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где $C(i, j)$ – MCLT-коэффициент; $C'(i, j)$ – коэффициент после внедрения данных; $\operatorname{Re}(C(i, j))$ – действительная часть коэффициента; $\operatorname{Im}(C(i, j))$ – мнимая часть коэффициента; S – сила встраивания; I – мнимая единица; $\lfloor \rfloor$ – взятие наибольшего целого, меньшего или равного данному вещественному числу (оператор «пол»); Z_i – извлекаемый бит; $C''(i, j)$ – MCLT-коэффициент, полученный после прямого преобразования при извлечении данных.

Исследование изменяемых параметров встраивания

В предложенном методе встраивания данных существуют параметры, изменение которых ведет к получению различных характеристик маркированного сигнала. Данные параметры: исходный сигнал, длина MCLT-фрейма, сила встраивания, шаг встраивания. Для верного извлечения встроенного маркера должны быть известны длина MCLT-фрейма, сила встраивания и шаг встраивания.

Проведены эксперименты по внедрению двоичной последовательности в звуковые сигналы, относящиеся к разным музыкальным жанрам: рок, классика и поп. При этом изменялись перечисленные выше параметры. Длина MCLT-фрейма в серии опытов была равна четырем. Результаты экспериментов приведены в сводной табл. 1.

По результатам установлено, что при длине MCLT-фрейма, равной четырем, доля верно извлеченных символов близка к 100%. Также выявлена зависимость между шагом встраивания процентом верно извлеченных символов и отношением сигнал/шум при силе встраивания равной одному. Так, чем больше шаг встраивания, тем меньше данных внедряется в сигнал, тем больше отношение сигнал/шум и, соответственно, лучше качество звучания сигнала.

Проверка помехоустойчивости встроенного маркера

Проверка стойкости встраиваемого маркера необходима, чтобы установить, пригоден ли разработанный метод цифрового маркирования для подтверждения целостности аудиосигналов. Требуется, чтобы при малейшем изменении аудиосигнала маркер разрушался. Для проверки данного свойства маркера смоделированы атаки на маркированные аудиосигналы.

Предполагается, что цель злоумышленника – удаление или изменение внедренного маркера [1, 10–12] без ухудшения качества маркированного аудиосигнала. Поэтому требуется определить параметры атак аудиосигналов, при которых качество исходного сигнала не ухудшается. Изменениям будут подвержены также эталонные, немаркированные сигналы. Таким образом, будут установлены такие параметры атаки, при которых факт произведенной атаки нельзя установить без специальной проверки. Качество звучания проверяется субъективно, а также аналитически с помощью расчета параметра сигнал/шум.

В идеальных условиях, когда маркированный аудиосигнал не подвергается негативным влияниям, удастся верно извлечь 95–100% внедренного маркера. Если же доля совпадения внедренной и извлеченной двоичной последовательности составляет менее 70%, считается, что аутентичность сигнала не доказана.

Для проведения проверок выбраны следующие типы атак [12–14]:

- зашумление сигнала – воздействие на сигнал аддитивного белого Гауссовского шума. Реализуется путем прибавления к информационному сигналу случайной компоненты [15];
- фильтрация сигнала осуществляется с помощью использования фильтра нижних частот Баттлерворта, реализованного в MatLabе.
- реверберация аудиосигнала – постепенное уменьшение интенсивности звука при его многократных отражениях [16].

Подготовка исходных данных

К исходным данным относятся исходный маркер, три эталонных аудиосигнала разных жанров музыки, 30 маркированных файлов, по 10 файлов каждого жанра. Аудиосигналы маркируются с разными шагами встраивания от 50 до 500.

Характеристики исходных маркированных сигналов представлены в сводной табл. 1. К ним относятся качество звучания аудиосигнала (отношение сигнал/шум), процент верно извлеченных символов двоичной последовательности. В таблице отображается зависимость данных характеристик от шага встраивания маркера. Качество маркированных аудиофайлов определялось на слух и было признано удовлетворительным.

Выбор параметров атак.

Атака эталонных аудиосигналов

Для выбора параметров осуществляются атаки на эталонные сигналы. Критерии выбора параметров атаки – приемлемое аналитическое и субъективное качество звучания аудиосигнала. Качество

аудиосигнала считается приемлемым, если отношение сигнал/шум больше или равно 30. При проведении данного этапа исследования три эталонных звуковых файла с музыкальными композициями разных жанров подвергаются негативным воздействиям. После атаки с использованием различных параметров измеряется качество звучания сигнала. Результаты атак эталонных сигналов приведены в сводной табл. 2.

– Зашумление аудиосигнала.

С увеличением параметра шума происходит незначительное снижение отношения сигнал/шум. Однако при проведении субъективной оценки слышимости атака заметна.

– Фильтрация аудиосигнала.

Качество звучания аудиосигнала при фильтрации для выбранных параметров признано приемлемым при проведении субъективного и аналитического анализа.

– Реверберация аудиосигнала.

При уменьшении значения изменяемого параметра не происходит значительного изменения сигнала, при увеличении появляется эхо, слышимое без использования специальной аппаратуры. Несмотря на то, что отношение сигнал/шум имеет невысокие значения, субъективно воздействие атаки на сигнал не заметно.

Таблица 1

Характеристики исходного маркированного аудиосигнала. Зависимость между шагом встраивания и качеством звучания

Шаг	Встроенно бит	Классика			Рок			Поп		
		Сигнал/шум	Извлечено бит	%	Сигнал/шум	Извлечено бит	%	Сигнал/шум	Извлечено бит	%
50	1024	19,7	1011	98,7	12,5	981	95,8	23,2	1012	98,8
100	512	22,9	507	99,0	15,4	499	97,5	26,1	507	99,0
150	341	24,55	335	98,2	17,1	325	95,3	28,1	339	99,4
200	256	25,7	253	98,8	18,4	248	96,9	28,6	255	99,6
250	205	26,6	203	99,0	19,2	198	96,6	30,2	204	99,5
300	170	27,3	168	98,8	19,9	160	94,1	30,7	168	98,8
350	146	27,9	145	99,3	20,6	140	95,9	31,6	143	97,9
400	128	28,3	127	99,2	21,4	124	96,9	31,9	127	99,2
450	114	28,8	113	99,1	21,9	108	94,7	32,5	114	100
500	102	29,2	101	99,0	22,3	100	98,0	32,7	102	100

Таблица 2

Зависимость качества звучания эталонного сигнала при его зашумлении, фильтрации и реверберации

Параметр шума	Зашумление аудиосигнала			Параметр фильтра	Фильтрация аудиосигнала			Параметр Реверб.	Реверберация аудиосигнала		
	Отношение сигнал/шум				Отношение сигнал/шум				Отношение сигнал/шум		
	Классика	Поп	Рок		Классика	Поп	Рок		Классика	Поп	Рок
1×10^{-5}	36,9	40,4	31,1	0,05	6,4	4,9	3,24	0,01	9,5	8,4	5,7
2×10^{-5}	33,9	37,4	28,2	0,1	10,9	7,7	5,21	0,02	9,5	9,4	5,3
3×10^{-5}	32,1	35,6	26,4	0,2	16,3	11,5	8,21	0,04	10,1	9,4	5,3
4×10^{-5}	30,9	34,4	25,1	0,3	20,1	14,3	10,62	0,06	10,2	9,4	6,2
5×10^{-5}	29,9	33,4	24,3	0,4	23,1	16,6	12,79	0,08	10,2	9,2	5,6
6×10^{-5}	29,1	32,6	23,2	0,5	25,8	18,8	14,96	0,1	10,3	9,3	5,6
7×10^{-5}	28,5	31,9	22,5	0,6	28,5	21,2	17,29				
8×10^{-5}	27,9	31,4	21,9	0,7	31,6	23,9	20,06				
9×10^{-5}	27,4	30,1	21,4	0,8	35,5	27,7	23,74				
1×10^{-4}	26,9	30,4	21,1	0,9	41,7	33,7	29,84				

Таблица 3

Процент верно извлеченных символов маркера при проведении атак зашумления сигнала, фильтрации сигнала и реверберации сигнала

Параметр Шума	Зашумление аудиосигнала			Параметр фильтра	Фильтрация аудиосигнала			Параметр реверб.	Реверберация аудиосигнала		
	%				%				%		
	Классика	Поп	Рок		Классика	Поп	Рок		Классика	Поп	Рок
1×10^{-5}	22,4	22,5	23,3	0,05	23,9	22,7	23,4	0,01	24,5	23,8	24,5
2×10^{-5}	22,9	22,9	24,4	0,1	21,4	22,3	23,7	0,02	23,4	24,9	24,9
3×10^{-5}	22,6	22,4	24,2	0,2	23,3	23,8	25,9	0,04	22,8	24,9	24,9
4×10^{-5}	24,6	24,9	25,9	0,3	22,6	25,7	25,8	0,06	22,7	23,1	23,1
5×10^{-5}	25,3	25,3	26,1	0,4	23,1	22,8	26,9	0,08	22,6	25,8	25,8
6×10^{-5}	25,9	25,9	23,7	0,5	21,1	23,7	25,8	0,1	22,5	23,8	23,1
7×10^{-5}	28,6	28,9	21,5	0,6	24,5	25,6	24,8				
8×10^{-5}	27,5	27,8	31,8	0,7	23,9	25,8	27,9				
9×10^{-5}	20,1	20,2	23,6	0,8	21,7	19,7	24,1				
1×10^{-4}	22,5	22,5	19,9	0,9	19,4	28,3	22,6				

Атаки маркированных аудиосигналов

Далее атакам подвергаются исходные маркированные аудиосигналы, при этом использовались параметры атак, представленные в сводной табл. 2. Результаты исследования представлены в сводной табл. 3, при этом перечислены средние значения процентов верно извлеченных маркеров при указанных параметрах атак.

Из полученных результатов видно, что встраиваемый в аудиосигналы маркер теряет свою целостность под воздействием атак. Так, при осуществлении негативных воздействий указанными ранее способами верно удалось извлечь не более 35% от внедренного маркера. Данная закономерность выявлена для всех используемых типов атак.

Заключение

В рамках данной работы разработан метод цифрового маркирования, основанный на MCLT-преобразовании. Алгоритм позволяет маркировать аудиосигналы без ухудшения качества их звучания.

В ходе проведения исследований выявлены параметры, при которых достигаются высокое качество звучания аудиосигнала, измеренное с помощью отношения сигнал/шум, и наибольшая доля верно извлеченных символов маркера.

На основании проведенных исследований установлено, что маркер является «хрупким». Это свидетельствует о том, что целостность маркированных аудиофайлов нарушается при изменениях аудиосигнала. В связи с этим разработанный алгоритм может применяться для подтверждения подлинности передаваемых аудиофайлов.

Литература

1. Гофман М.В. Методика цифрового маркирования аудиосигналов для скрытой акустической связи через воздушный аудиоканал / М.В. Гофман, А.А. Корниенко, Е.Т. Мирончиков // Известия СПб. ун-та путей сообщения. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 280–294.
2. Тутубалин П.И. Вероятностные модели обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем обработки информации и управления / П.И. Тутубалин, В.С. Моисеев. – Казань: Школа, 2008. – 151 с.
3. Грибунин В.Г. Цифровая стеганография: учеб. пособие / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. – М.: Солон-пресс, 2020. – 263 с.
4. Литвинцева М.Е. Методы встраивания информации в аудиосигнал путем фазовой модуляции MCLT-коэффициентов / М.Е. Литвинцева, М.В. Гофман // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. тр. LXXXIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ПГУПС, 2019. – С. 200–203.
5. Гофман М.В. Скрытая передача данных через воздушный аудиоканал маркированными аудиосигналами / М.В. Гофман, А.А. Корниенко // Сб. науч. статей VIII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО–2019)». – СПб.: СПбГУТ, 2019. – С. 361–365.
6. Malvar H. Modulated Complex Lapped Transform and its Applications to Audio Processing // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – Phoenix: IEEE, 1999. – Vol. 1. – P. 1421–1424.
7. Kiho C. Robust Data Hiding for MCLT Based Acoustic Data Transmission / C. Kiho, S.Y. Hwan, S.K. Nam // IEEE

Signal Processing Letters. – 2010. – Vol. 17, No. 7 – P. 715–718.

8. Efficiently Self-Synchronized Audio Watermarking for Assured Audio Data Transmission / W. Shaoquan, H. Jiwu, H. Daren, Q.S. Yun // IEEE Transactions on Broadcasting. – 2005. – Vol. 51, No. 1. – P. 69–76.

9. Гофман М.В. Метод трехэтапной скрытой передачи информации маркированными цифровыми аудиосигналами / М.В. Гофман, А.А. Корниенко // Информационная безопасность регионов России (ИБРР–2019). XI СПб. межрег. конф. – СПб.: СПОИСУ, 2019. – С. 312–313.

10. Detection of audio covert channels using statistical footprints of hidden messages / H. Ozer, I. Avcıba, B. Sankur, N. Memon // Digital Signal Processing. – 2016. – Vol. 16, No. 4. – P. 389–401.

11. Steganalysis of audio based on audio quality metrics / H. Ozer, I. Avcıba, B. Sankur, N. Memon // Proceedings of the Conference on Security, Steganography and Watermarking of Multimedia, Contents V. – Hong Kong: MECS Press, 2003. – Vol. 5020. – P. 55–66.

12. Multi-Level Reversible Data Anonymization via Compressive Sensing and Data Hiding / M. Yamac, N. Passalis, M. Ahishali, J. Raitoharju // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2021. – Vol. 16. – P. 1014–1028.

13. StirMark Benchmark: Audio Watermarking Attacks / M. Steinebach, F. Petitcolas, F. Raynal, J. Dittmann, C. Fontaine, S. Seibel, N. Fates // International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC). – Las Vegas: IEEE, 2001. – Vol. 1. – P. 49–54.

14. Kang H. Two-stage noise aware training using asymmetric deep denoising autoencoder / H. Kang, J. Shin, W. Hyun // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2016. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7472782> (дата обращения: 01.02.2021).

15. Yamac M. Robust Data Hiding Scheme for Compressively Sensed Signals / M. Yamac, B. Sankur, M. Gabbouj // 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). – Rome: IEEE, 2018. – Vol. 1. – P. 1760–1764.

16. Гинкин Г.Г. Справочник по радиотехнике: учеб. пособие. – М. – Л.: Гос. энерг. изд-во, 1948. – 821 с.

Коллар Мария Евгеньевна

Студентка каф. информатики и информационной безопасности Петербургского государственного университета путей сообщения Александра I Московский пр-т, 9, г. Санкт-Петербург, 190031
Тел.: +7-911-132-27-62
Эл. почта: mashuny.lit@gmail.com

Kollar M.E.

Digital audio watermarking based on the modulation of MCLT-coefficients

Audio data hiding techniques have various applications such as audio watermarking and steganography. This article provides a brief description of a new method of digital audio watermarking that has been developed based on a modulated complex lapped transform (MCLT). The new audio watermarking algorithm saves the sound quality of the marked signals. The experimental results show the dependence of the sound quality of the marked audio signal on the parameters of

the marking method. Moreover, the results of the experiments show the influence of various attacks on the marked audio signal. Based on conducted experiments, it is concluded that the new method of digital audio watermarking can be used to confirm the authenticity of audio files distributed through the Internet or to confirm the integrity of the transmitted audio files.

Keywords: audio data hiding, digital audio watermarking, integrity, authenticity, modulated complex lapped transform.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-57-61

References

1. Gofman M.V., Kornienko A.A., Mironchinkov E.T. Methodology of digital marking of audio signals for hidden acoustic communication through an air audio channel. *Izvestiya Petersburg Transport State University*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 280–294 (in Russ.).
2. Tutubalin P.I., Moiseev V.S. *Veroyatnostnie modeli obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti avtomatizirovannih sistem obrabotki informatsii i upravleniya* [Probabilistic models for ensuring information security of automated information processing and management systems]. Kazan, Shkola Publ., 2008, 151 p.
3. Gribunin V.G., Okov I.N., Turincev I.V. *Cifrovaya steganografiya* [Digital steganography]. Moscow, Solon-press Publ., 2020, 263 p.
4. Litvintseva M.E., Gofman M.V. Metodi vstraivaniy informatsii v audiosignal putyom fazovoi modulyatsii MCLT koefitsientov [Methods of embedding information in an audio signal by phase modulation of MCLT-coefficients]. *Transport: problem, idei, perspektivi*. Sbornik trudov LXXXIX Vserossiyskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodih uchonych [Transport: problems, ideas, prospects. Proceedings of the LXXXIX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, postgraduates and young scientists]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2019, vol. 1, pp. 200–203 (in Russ.).
5. Gofman M.V., Kornienko A.A. Skritaya peredacha dannih cherez vosduhnyy audiokanal markirovannimi audiosignalami [Hidden data transmission via an aerial audio channel with labeled audio signals]. Sbornik nauchnih statey VIII Mejdunarodnoy nauchno-tehnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferentsii *Aktualnie problem infotelekomunikatsiy v nauke i obrazovanii (APINO 2019)* [Proc. of scientific articles of the VIII International scientific-technical and scientific-methodological conference *Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education (APINO 2019)*], SPb., SPbGUT Publ., 2019, vol. 1, pp. 361–365 (in Russ.).
6. Malvar H. Modulated Complex Lapped Transform and its Applications to Audio Processing. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Phoenix, IEEE Publ., 1999, vol. 1, pp. 1421–1424.
7. Kiho C., Hwan S.Y., Nam S.K. Robust Data Hiding for MCLT Based Acoustic Data Transmission. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, vol. 17, no. 7, pp. 715–718.
8. Shaoquan W., Jiwu H., Daren H., Yun Q.S. Efficiently Self-Synchronized Audio Watermarking for Assured Audio Data Transmission. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2005, vol. 51, no. 1, pp. 69–76.
9. Gofman M.V., Kornienko A.A. *Metod trehetapnoi skritoy peredachi informatsii markirovannimi cifrovimi audiosignalami* [The method of three-stage hidden transmission of information by labeled digital audio signals]. *Informatsionnaya besopasnost regionov Rossii (IBRR-2019)*. XI Sankt-Peterburgskaya mejregionalnaya konferentsiya [Information security of the regions of Russia (IBRR-2019)]. XI St. Petersburg Interregional Conference]. SPb., SPOISU Publ., 2019, vol. 1, pp. 312–313 (in Russ.).
10. Ozer H., Avci I., Sankur B., Memon N. Detection of audio covert channels using statistical footprints of hidden messages. *Digital Signal Processing*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 389–401.
11. Ozer H., Avci I., Sankur B., Memon N. Steganalysis of audio based on audio quality metrics. Proceedings of the Conference on *Security, Steganography and Watermarking of Multimedia, Contents V*. Hong Kong, MECS Press Publ., 2003, vol. 5020, pp. 55–66.
12. Yamac M., Passalis N., Ahishali M., Raitoharju J. Multi-Level Reversible Data Anonymization via Compressive Sensing and Data Hiding. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, vol. 16, pp. 1014–1028.
13. Steinebach M., Petitcolas F., Raynal F., Dittmann G., Fontaine C., Seibel S., Fates N. StirMark Benchmark: Audio Watermarking Attacks International Conference on *Information Technology: Coding and Computing (ITCC)*. Las Vegas, IEEE Publ., 2001, vol. 1, pp. 49–54.
14. Kang H., Shin J., Hyun W. Two-stage noise aware training using asymmetric deep denoising autoencoder. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2016, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7472782> (Accessed: February 01, 2021).
15. Yamac M., Sankur B., Gabbouj M. Robust Data Hiding Scheme for Compressively Sensed Signals. *26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. Rome, IEEE Publ., 2018, vol. 1, pp. 1760–1764.
16. Ginkin G.G. *Spravochnik po radiotekhnike* [Handbook of Radio Engineering]. Moscow-Leningrad, Gosudarstvennoe energeticheskoe izdanie Publ., 1948, 821 p.

Mariia E. Kollar

Student, Department of Information Technology and IT Security, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
9, Moskovskiy st., St. Petersburg, Russia, 190031
Phone: +7-911-132-27-62
Email: mashuny.lit@gmail.com