

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ АУДИОСТЕГОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МАРКИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ АУДИОСИГНАЛОВ¹

DEVELOPMENT OF A MODEL OF A MULTI-CHANNEL AUDIO STEGOSYSTEM BASED ON DIGITAL AUDIO WATERMARKING²

M. Gofman

Summary. The article develops a model of an audio stegosystem based on digital audio watermarking. A feature of the model is its focus on channels with multiple input and output, which is relevant in the case of watermarking digital audio consisting of several digital audio tracks. The model consists of several interconnected blocks: creating a stegkey, creating a marker, embedding a marker, detecting a marker, extracting information from a detected marker.

Keywords: steganography, audio stegosystem, digital audio signal, audio watermarking

Гофман Максим Викторович

К.т.н., доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
maxgof@gmail.com

Аннотация. В статье выполняется разработка модели аудиостегосистемы на основе маркирования цифровых аудиосигналов. Особенностью модели является её ориентированность на каналы с множественным входом и выходом, что является актуальным в случае маркирования цифровых аудиосигналов, состоящих из нескольких аудиодорожек. Модель состоит из нескольких взаимосвязанных блоков: создание стегоключа, создание маркера, внедрение маркера, обнаружение маркера, выделение информации из обнаруженного маркера.

Ключевые слова: стеганография, аудиостегосистема, цифровой аудиосигнал, маркирование аудиосигналов.

Введение

Маркирование цифровых аудиосигналов уже несколько десятилетий используется в качестве способа внедрения дополнительной информации в аудиосигнал [1, 2]. В статьях [3, 4, 5, 6, 7] представлены примеры методов маркирования аудиосигналов.

В серии статей [8, 9, 10, 11] последовательно выполнялась разработка метода маркирования цифровых аудиосигналов, ориентированного на воздушные акустические каналы связи. Эффективность метода маркирования цифровых аудиосигналов можно оценить в рамках определённой модели аудиостегосистемы.

Многоканальная аудиостегосистема на основе маркирования цифровых аудиосигналов используется для решения задачи стеганографической передачи информации с помощью маркирования цифровых аудиосигналов в условиях передачи по каналам с множественным входом и множественным выходом. Эту задачу можно разделить на следующую последовательность подзадач:

1. создание стегоключа из параметров маркируемого цифрового аудиосигнала и параметров канала связи;
2. создание маркера из передаваемой цифровой информации с помощью стегоключа;
3. внедрение маркера в цифровой аудиосигнал;
4. передача маркированного цифрового аудиосигнала через канал связи;
5. обнаружение маркера с помощью стегоключа в аудиосигнале, полученном с выхода канала связи;
6. извлечение принятой цифровой информации из обнаруженного маркера.

Создание стегоключа

Стеганографический ключ или стегоключ используется и на стороне отправителя, и на стороне получателя. На стороне отправителя стегоключ используется при создании маркера и внедрении маркера в цифровой аудиосигнал (маркировании). На стороне получателя стегоключ используется при обнаружении мар-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ; Соглашение № 7/2020)

² The reported study was funded by Russian Ministry of Science (information security № 7/2020)

кера в цифровом аудиосигнале, полученном из канала связи.

Стежоклюк представляет собой следующее множество параметров:

- ♦ множество двоичных последовательностей $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_{Tx}}\}$, $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_{Tx}}\}$, $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{N_{Tx}}\}$, используемых в процессе преобразования передаваемого информационного бита в элементы маркера; при этом $i \in \{1, 2, \dots, N_{Tx}\}$, где N_{Tx} — это требуемое для внедрения маркера количество аудиодорожек в маркируемом цифровом аудиосигнале;
- ♦ количество $N_{блок}$ отсчетов в блоках, на которые делятся аудиодорожки маркируемого цифрового аудиосигнала;
- ♦ частота F_s дискретизации маркируемого цифрового аудиосигнала.

Последовательности

$$\alpha_i = (\alpha_{i,1} \ \alpha_{i,2} \ \dots \ \alpha_{i,N_\alpha})$$

и

$$\beta_i = (\beta_{i,1} \ \beta_{i,2} \ \dots \ \beta_{i,N_\beta})$$

могут представлять собой, например, последовательности Голда и Касами, обладающие хорошими корреляционными свойствами. Последовательности

$$\gamma_i = (\gamma_{i,1} \ \gamma_{i,2} \ \dots \ \gamma_{i,N_\gamma})$$

строятся такими, чтобы можно было воспользоваться свойством обычных цифровых аудиосигналов, состоящем в том, что амплитудные спектры Фурье смежных последовательностей отсчетов аудиодорожки обычно оказываются похожими. В работах [8, 9] предлагается два метода построения последовательностей γ_i . Так, например, последовательность γ_i может быть построена в соответствии со следующим равенством

$$\gamma_i = \varphi_i \otimes \mathbf{RZ}_{код}$$

где \otimes — это оператор произведения Кронекера, φ_i — двоичная последовательность, $\mathbf{RZ}_{код}$ — последовательность четной длины, первая половина которой состоит из единиц, а вторая — из минус единиц. Для повышения эффективности процесса детектирования маркеров в отдельной аудиодорожке цифрового аудиосигнала, принимаемого из канала связи, элементы множества последовательностей $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N_{Tx}}\}$ должны обладать хорошими корреляционными свойствами.

Создание маркера

Маркер — это целочисленная матрица

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,2} & \dots & Y_{1,N_\alpha N_\beta N_\gamma} \\ Y_{2,1} & Y_{2,2} & \dots & Y_{2,N_\alpha N_\beta N_\gamma} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N_{Tx}, N_\alpha N_\beta N_\gamma} & Y_{N_{Tx}, N_\alpha N_\beta N_\gamma} & \dots & Y_{N_{Tx}, N_\alpha N_\beta N_\gamma} \end{pmatrix},$$

получаемая из передаваемой двоичной информационной числовой последовательности

$$\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N_{Tx}})$$

при помощи стежоклюка. Элементы маркера удовлетворяют следующему равенству

$$Y_{i,j} = (2x_i - 1)\alpha_{i,a}\beta_{i,b}\gamma_{i,c},$$

где $i \in \{1, \dots, N_{Tx}\}$, $j \in \{1, \dots, N_\alpha N_\beta N_\gamma\}$, $x_i \in \{0, 1\}$ — это информационный бит,

$$a = \left\lfloor \frac{j-1}{N_\beta N_\gamma} \right\rfloor + 1,$$

$$b = ((j-1) \bmod N_\beta) + 1,$$

$$c = \left(\left\lfloor \frac{j-1}{N_\beta} \right\rfloor \bmod N_\gamma \right) + 1,$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ — это целая часть вещественного числа.

Внедрение маркера

Для выполнения процесса внедрения требуется маркер, стежоклюк и цифровой аудиосигнал, который будет подвергаться маркированию. Пусть требуется внедрить маркер в цифровой аудиосигнал, представленный в форме вещественной матрицы

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,N_\alpha N_{блок} N_\gamma} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \dots & S_{2,N_\alpha N_{блок} N_\gamma} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N_{Tx},1} & S_{N_{Tx},2} & \dots & S_{N_{Tx},N_\alpha N_{блок} N_\gamma} \end{pmatrix},$$

элементы которой обычно принимают значения из диапазона от -1 до 1 и определяют отсчеты аудиосигнала; при этом $N_{блок}$ — это четное число, удовлетворяющее равенству $N_{блок} = 2(N_\beta + 1)$. Каждая строка в этой матрице — это отдельная аудиодорожка. Если

$$C(i, f, k) = \begin{cases} B(i, f, k), & \text{если } k \in \{1, N_{\text{блок}}/2 + 1\}, \\ B(i, f, k)(1 + \rho Y_{i,a}), & \text{если } k \in \{2, \dots, N_{\text{блок}}/2\}, \\ B(i, f, k)(1 + \rho Y_{i,b}), & \text{если } k \in \{N_{\text{блок}}/2 + 2, \dots, N_{\text{блок}}\} \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{S}_{i,j} = \begin{cases} \frac{D(i, f, m)}{\max_{m \in \{1, \dots, N_{\text{блок}}\}} |D(i, f, m)|}, & \text{если } \max_{m \in \{1, \dots, N_{\text{блок}}\}} |D(i, f, m)| > 1, \\ D(i, f, m), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

передача осуществляется через акустический канал связи, то отдельная аудиодорожка передается отдельным излучателем акустических сигналов (например, акустическим динамиком).

Маркированный цифровой аудиосигнал также можно представить в форме матрицы

$$\hat{\mathbf{S}} = \begin{pmatrix} \hat{S}_{1,1} & \hat{S}_{1,2} & \dots & \hat{S}_{1,N_{\alpha}N_{\text{блок}}N_{\gamma}} \\ \hat{S}_{2,1} & \hat{S}_{2,2} & \dots & \hat{S}_{2,N_{\alpha}N_{\text{блок}}N_{\gamma}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{S}_{N_{\text{Тх}},1} & \hat{S}_{N_{\text{Тх}},2} & \dots & \hat{S}_{N_{\text{Тх}},N_{\alpha}N_{\text{блок}}N_{\gamma}} \end{pmatrix},$$

которая получается из матрицы **S** и маркера **Y** по следующему алгоритму.

1) Последовательности отсчетов, составляющие аудиодорожки во временной области, делятся на непрерывающиеся блоки по $N_{\text{блок}}$ отсчетов в каждом. Таким образом, получается, что m -й отсчет в f -м блоке в i -й аудиодорожке — это вещественное число

$$A(i, f, m) = S_{i,j},$$

где

$$j = (f - 1)N_{\text{блок}} + m,$$

при этом $i \in \{1, \dots, N_{\text{Тх}}\}, f \in \{1, 2, \dots\}, m \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}\}$.

2) Эти блоки отсчетов преобразуются в частотную область с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Таким образом, получается, что k -я частотная составляющая спектра f -го блока i -й аудиодорожки — это комплексное число

$$B(i, f, k) = \sum_{m=1}^{N_{\text{блок}}} A(i, f, m) e^{-\frac{2\pi I}{N_{\text{блок}}}(k-1)(m-1)},$$

где I — это мнимая единица, $k \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}\}$.

3) Частотные составляющие спектров блоков модифицируются в соответствии со значениями элементов маркера так, что модифицированные частотные составляющие, обозначаемые $C(i, f, k)$, удовлетворяют равенству (1), где ρ — это сила внедрения маркера, представляющая собой вещественное число, значительно меньшее единицы, при этом между индексами f, k, a, b выполняются следующие равенства:

$$a = (f - 1)N_{\beta} + k - 1,$$

$$b = fN_{\beta} - k + \frac{N_{\text{блок}}}{2} + 2.$$

4) Маркированный цифровой аудиосигнал во временной области получается из блоков модифицированных частотных составляющих с помощью обратного дискретного преобразования Фурье этих блоков:

$$D(i, f, m) = \frac{1}{N_{\text{блок}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{блок}}} C(i, f, k) e^{\frac{2\pi I}{N_{\text{блок}}}(k-1)(m-1)}.$$

5) В завершение отсчеты маркированного цифрового аудиосигнала по блокам подвергаются нормировке амплитуд в диапазон значений от -1 до 1 , по правилу (2).

где

$$j = (f - 1)N_{\text{блок}} + m.$$

Канал связи с множественными ВХОДОМ И ВЫХОДОМ

Архитектура разрабатываемой аудиостегосистемы основана на предположении о том, что в качестве канала связи используется канал с множественным входом и множественным выходом. Это означает, что отправитель использует несколько передатчиков, а получатель использует несколько приемников.

Так, например, когда в качестве канала связи используется акустический канал связи, то для кор-

$$\widehat{B}(i_{\text{шаг}}(r, t), f, k) = \ln \left| \sum_{m=1}^{N_{\text{блок}}} \widehat{A}(i_{\text{шаг}}(r, t), f, m) e^{-\frac{2\pi I}{N_{\text{блок}}}(k-1)(m-1)} \right|, \quad (3)$$

ректной передачи аудиосигнала состоящего из $N_{Tx}N_{Tx}$ аудиодорожек, потребуется такое же количество преобразователей электрических сигналов в акустические — акустических динамиков. Получателю для осуществления, по меньшей мере, стереозаписи потребуется два преобразователя акустических сигналов в электрические — пара микрофонов.

Процесс маркирования, используемый в разрабатываемой аудиостегосистеме, основан на предположении, что вход и выход канала связи являются цифровыми. Поэтому, если, например, используется акустический канал связи, то вход канала связи должен включать в себя блок цифро-аналогового преобразования, а выход — блок аналого-цифрового преобразования.

Помимо акустического канала могут использоваться другие каналы связи, обладающий множественным входом и множественным выходом. Например, это может быть цифровой канал, в котором маркированный цифровой аудиосигнал подвергается цифровым преобразованиям: сжатие с потерями, добавление акустических эффектов и т.д.

Обнаружение маркера

На выходе канала связи в результате оказанного им воздействия будет искажённый маркированный цифровой аудиосигнал. Процесс обнаружения маркера выполняется в цифровом аудиосигнале

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \dots \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \\ R_{N_{Rx},1} & R_{N_{Rx},2} & \dots \end{pmatrix},$$

получаемом с выхода канала связи. При этом отсчеты $R_{i,j}$ — это вещественные числа, принимающие значения из диапазона от -1 до 1 , а N_{Rx} — это количество аудиодорожек в принятом цифровом аудиосигнале. Каждая аудиодорожка принятого цифрового аудиосигнала в процессе обнаружения рассматривается, как линейная комбинация аудиодорожек отправленного в канал цифрового аудиосигнала, при этом аудиодорожки в процессе обнаружения маркера обрабатываются независимо друг от друга. Для обнаружения маркеров в аудиодорожках авторизованный получатель использует стегоключ, использованный отправителем в процессе внедрения маркера.

Алгоритм обнаружения в r -й ($r \in \{1, \dots, N_{Rx}\}$) аудиодорожке принятого цифрового аудиосигнала \mathbf{R} маркера, который содержался в t -й ($t \in \{1, \dots, N_{Tx}\}$) аудиодорожке отправленного в канал маркированного цифрового аудиосигнала $\widehat{\mathbf{S}}$, представляет собой следующую последовательность действий.

1) Последовательность отсчетов r -й аудиодорожки, начинающуюся с отсчета с порядковым номером $i_{\text{шаг}}(r, t) \in \{1, 2, \dots\}$, делится на смежные неперекрывающиеся блоки по $N_{\text{блок}}$ отсчетов в каждом блоке. Таким образом, получается, что m -й отсчет в f -м блоке в r -й аудиодорожке — это вещественное число

$$\widehat{A}(i_{\text{шаг}}(i, t), f, m) = R_{i, j+i_{\text{шаг}}(i, t)-1},$$

где $j = (f - 1)N_{\text{блок}} + m, r \in \{1, \dots, N_{Rx}\}, f \in \{1, 2, \dots\}, m \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}\}$.

2) Блоки отсчетов преобразуются в частотную область с помощью дискретного преобразования Фурье, а затем вычисляются натуральные логарифмы амплитуд частотных составляющих получаемых спектров Фурье блоков. Так, натуральный логарифм от амплитуды k -й частотной составляющей спектра f -го блока r -й аудиодорожки — это (3)

где I — это мнимая единица, $k \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}\}$.

3) Вычисляется нормированная корреляция между последовательностью величин $\widehat{B}(i_{\text{шаг}}(r, t), f, k)$ и последовательностями $\alpha_t, \beta_t, \gamma_t$ по следующей формуле:

$$\rho(i_{\text{шаг}}(r, t)) = \frac{\sum_{a=1}^{N_\alpha} \alpha_{t,a} \left(\widehat{C}(a) - \frac{1}{N_\alpha} \sum_{a=1}^{N_\alpha} \widehat{C}(a) \right)}{\sqrt{\sum_{a=1}^{N_\alpha} \left(\alpha_{t,a} \left(\widehat{C}(a) - \frac{1}{N_\alpha} \sum_{a=1}^{N_\alpha} \widehat{C}(a) \right) \right)^2}}$$

где

$$\widehat{C}(a) = \sum_{b=1}^{N_\beta} \beta_{t,b} \sum_{c=1}^{N_\gamma} \gamma_{t,c} \widehat{B}(i_{\text{шаг}}(r, t), d, e),$$

при этом

$$d = (a - 1)N_\beta N_\gamma + (c - 1)N_\beta + 1,$$

$$e = b + 1.$$

4) Вычисляется эксцесс нормированной корреляции по следующей формуле:

$$\mu(i_{\text{шаг}}(r, t), W) = \frac{\sum_{a=i_{\text{шаг}}(r, t)}^{i_{\text{шаг}}(r, t)+W-1} (\rho(a) - \widehat{D})^4}{W} \bigg/ \left(\sqrt{\frac{\sum_{a=i_{\text{шаг}}(r, t)}^{i_{\text{шаг}}(r, t)+W-1} (\rho(a) - \widehat{D})^2}{W}} \right)^4,$$

где W — это целое число, которое следует выбирать не меньшим 8193, а

$$\widehat{D} = \frac{1}{W} \sum_{b=i_{\text{шаг}}(r, t)}^{i_{\text{шаг}}(r, t)+W-1} \rho(b).$$

5) Вычисляется пик-фактор эксцесса по следующей формуле:

$$\eta(i_{\text{шаг}}(r, t), W) = \frac{\max_{\forall a \in \{i_{\text{шаг}}(r, t), \dots, i_{\text{шаг}}(r, t)+W-1\}} \mu(a, W)}{\sqrt{\frac{1}{W} \sum_{b=i_{\text{шаг}}(r, t)}^{i_{\text{шаг}}(r, t)+W-1} (\mu(b, W))^2}}.$$

6) Последовательно увеличивая значения величины $i_{\text{шаг}}(r, t)$, начиная от значения 1, остановиться на таком значении этой величины, обозначим его $i_{\text{шагИтого}}(r, t)$, при котором выполняется следующее неравенство:

$$\eta(i_{\text{шагИтого}}(r, t), W) > \eta_{\text{вп}},$$

где $\eta_{\text{вп}}$ — это задаваемое положительное вещественное число, обозначающее верхнее пороговое значение для пик-фактора эксцесса. Обычно в качестве $\eta_{\text{вп}}$ следует брать число чуть превышающее 1, например, 1.1.

7) Если $i_{\text{шагИтого}}(r, t)$ найден, то определить в последовательности натуральных чисел ближайшие слева и справа от $i_{\text{шагИтого}}(r, t)$ такие значения $i_{\text{шаг}}(r, t)$, обозначим их соответственно $i_{\text{шагСлева}}(r, t)$ и $i_{\text{шагСправа}}(r, t)$, для которых выполняются следующие неравенства:

$$\eta(i_{\text{шагСлева}}(r, t), W) < \eta_{\text{нп}}$$

и

$$\eta(i_{\text{шагСправа}}(r, t), W) < \eta_{\text{нп}},$$

в которых $\eta_{\text{нп}}$ — это задаваемое положительное вещественное число, обозначающее нижнее пороговое значение для пик-фактора эксцесса. В качестве $\eta_{\text{нп}}$ сле-

дует брать число, меньшее $\eta_{\text{вп}}$, но также чуть превышающее 1, например, 1.03.

8) В последовательности чисел $\rho(i_{\text{шаг}}(r, t))$, когда порядковые номера

$$i_{\text{шаг}}(r, t) \in \{i_{\text{шагСлева}}(r, t), \dots, i_{\text{шагСправа}}(r, t)\},$$

определить границы всех подпоследовательностей, состоящих из чисел с одинаковым знаком. Обозначим через N_K количество таких подпоследовательностей, а через n_1, n_2, \dots, n_{N_K} возрастающую последовательность порядковых номеров первых чисел каждой из этих подпоследовательностей. Первая такая последовательность начинается с числа $\rho(n_1)$ с порядковым номером $n_1 = i_{\text{шагСлева}}(r, t)$, а последняя оканчивается числом

$$\rho(i_{\text{шагСправа}}(r, t)),$$

имеющим порядковый номер $i_{\text{шагСправа}}(r, t)$.

9) Используя найденную возрастающую последовательность порядковых номеров n_1, n_2, \dots, n_{N_K} , определить такое целое число ε из множества чисел $\{1, 2, \dots, N_K\}$, при котором выполняется следующее равенство:

$$\zeta(n_\varepsilon) = \max\{\zeta(n_1), \zeta(n_2), \dots, \zeta(n_{N_K})\},$$

где

$$\zeta(n_k) = \frac{1}{2F_s(n_{k+1} - n_k)} \left| \sum_{a=n_k}^{n_{k+1}-1} (\rho(a) + \rho(a+1)) \right|,$$

где $k \in \{1, 2, \dots, N_K\}$, при этом $n_{N_K+1} = i_{\text{шагСправа}}(r, t)$.

10) Среди порядковых номеров от n_ε до $n_{\varepsilon+1}$ найти такой, обозначим его $i_{\text{шагМАХ}}(r, t)$, при котором выполняется следующее равенство:

$$\begin{aligned} & |\rho(i_{\text{шагМАХ}}(r, t))| = \\ & = \max\{|\rho(n_\varepsilon)|, |\rho(n_\varepsilon + 1)|, \dots, |\rho(n_{\varepsilon+1})|\}. \end{aligned}$$

Как только найдены порядковые номера $i_{\text{шагМАХ}}(r, t)$ и связанные с ними значения нормированной корреляционной функции $\rho(i_{\text{шагМАХ}}(r, t))$ для всех $r \in \{1, \dots, N_{\text{Rx}}\}$ и $t \in \{1, \dots, N_{\text{Tx}}\}$, этап обнаружения завершается.

Извлечение цифровой информации

После успешного завершения этапа обнаружения маркера начинается этап извлечения цифровой информации. В результате этого этапа получается матрица

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{1,1} & \hat{x}_{1,2} & \dots & \hat{x}_{1,N_{\text{TX}}} \\ \hat{x}_{2,1} & \hat{x}_{2,2} & \dots & \hat{x}_{2,N_{\text{TX}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{N_{\text{RX}},1} & \hat{x}_{N_{\text{RX}},2} & \dots & \hat{x}_{N_{\text{RX}},N_{\text{TX}}} \end{pmatrix},$$

в которой

$$\hat{x}_{r,t} = \frac{\text{sign}(\rho(i_{\text{шарMAX}}(r, t))) + 1}{2},$$

где

$$\text{sign}(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a > 0, \\ -1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

В случае отсутствия значительных искажений в канале число $\hat{x}_{r,t}$ будет равно информационному биту $x_{r,t}$, переданному с помощью t -го передатчика отправителя и принятому с помощью r -го приемника получателя.

Заключение

В статье предложена модель аудиостегосистемы, основанная на методе маркирования, последовательно разрабатывавшемся в статьях [8, 9, 10, 11]. Представленная модель аудиостегосистемы позволяет выполнять оценку устойчивости используемой в ней системы маркирования цифровых аудиосигналов к воздействиям акустического канала связи с множественным входом и множественным выходом, а также к воздействиям, оказываемым цифровой обработкой маркированных аудиосигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелухин О.И., Канаев С.Д. Стеганография. Алгоритмы и программная реализация: Под. редакцией проф. Шелухина О.И. — Москва: Горячая линия-Телеком. — 2017. — 592 с.
2. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. — Москва: СОЛОН-ПРЕСС. — 2009. — 272 с.
3. Yun H. S., Cho K., Kim N. S. Acoustic data transmission based on modulated complex lapped transform // IEEE Signal Processing Letters. — 2010. — Т. 17. — № 1. — С. 67–70.
4. Cho K., Baek S., Moon H. G., Kim N. S. Multi-microphone approach for reliable acoustic data transmission // 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). — IEEE. — 2016. — С. 557–560.
5. Zhou M., Wang Q., Ren K., Koutsonikolas D., Su L., Chen Y. Dolphin: Real-time hidden acoustic signal capture with smartphones // IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2018. — Т. 18. — Вып 3. — С. 560–573.
6. Lee H., Kim T. H., Choi J. W., Choi S. Chirp signal-based aerial acoustic communication for smart devices // 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). — IEEE. — 2015. — С. 2407–2415.
7. Nandakumar R., Chintalapudi K. K., Padmanabhan V., Venkatesan R. Dhvani: secure peer-to-peer acoustic NFC // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. — 2013. — Т. 43. — № 4. — С. 63–74.
8. Гофман М. В. Методика скрытой передачи данных при связи через воздушный аудиоканал // Труды СПИИРАН. — 2017. — Вып 2. — С. 97–122.
9. Гофман М.В., Корниенко А. А., Мирончиков Е. Т., Никитин А. Б. Цифровое маркирование аудиосигналов для робастной скрытой акустической связи через воздушный аудиоканал // Труды СПИИРАН. — 2017. — Вып. 6. — С. 185–215.
10. Гофман М.В., Корниенко А. А., Глухарев М. Л. Метод детектирования маркера в цифровом аудиосигнале авторизованным получателем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2020. — Вып. 4. — С. 58–71.
11. Гофман М. В. Обнаружение маркера в цифровом аудиосигнале авторизованным получателем // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2021. — № 02. — С. 45–50. DOI 10.37882/2223–2966.2021.02.09

© Гофман Максим Викторович (maxgof@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»