

# DSPA:

## Вопросы применения цифровой обработки сигналов

**№1**

**2023**



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОДОВЫХ КНИГ В СИСТЕМАХ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С РАЗРЕЖЕННЫМИ КОДАМИ SCMA</b>	<b>4</b>
<b>Бреднев О.В., Балобанов А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ СУПЕРРАЗРЕШЕНИЯ И АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕТОДОВ</b>	<b>12</b>
<b>Гадасин Д.В., Шведов А.В., Егорова Ю.Д., Шайдулина И.Р. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАЖОРИТАРНОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТИ</b>	<b>20</b>
<b>Ву Ши Дао, Горгадзе С.Ф. ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТРОЙСТВА ГРУБОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА</b>	<b>31</b>
<b>Магеррамов В.А., Мансуров Т.М. ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ КЛЮЧЕЙ ШИФРОВАНИЯ</b>	<b>40</b>
<b>Максимов С.Ю., Ларин А.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПРИ НЕЙРОСЕТЕВОМ КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОГОДЫ</b>	<b>47</b>

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОДОВЫХ КНИГ В СИСТЕМАХ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С РАЗРЕЖЕННЫМИ КОДАМИ SCMA

**Бакулин Михаил Германович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент, к.т.н., Москва, Россия*

**Бен Режеб Тауфик Бен Камель,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент, к.т.н., Москва, Россия*

[benrejebt@yandex.ru](mailto:benrejebt@yandex.ru)

**Крейнделин Виталий Борисович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, зав. кафедрой, профессор, д.т.н., Москва, Россия*

**Панкратов Денис Юрьевич,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент, к.т.н., Москва, Россия*

**Смирнов Алексей Эдуардович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент, к.т.н., Москва, Россия*

## **Аннотация**

*Существующие системы беспроводной связи используют уже ставшие традиционными технологии ортогонального множественного доступа. Требования к новым системам связи неумолимо растут и для их выполнения нужны новые методы и алгоритмы. Неортогональный множественный доступ часто упоминается в новых стандартах систем беспроводной связи. Эта работа посвящена одной из разновидностей неортогонального множественного доступа – системам с разреженными кодами, а именно эффективности применения различных кодовых книг в таких системах.*

**Ключевые слова:** *неортогональный множественный доступ, NOMA, разреженные коды, кодовая книга, SCMA.*

## **Введение**

Важной новеллой новых поколений систем беспроводной связи, включая системы мобильной связи, является технология неортогонального множественного доступа NOMA (Non-orthogonal multiple access). Неортогональный множественный доступ должен стать фундаментальной технологией систем 6-го и последующих поколений мобильной связи, заменив уже исчерпавшие свои возможности технологии ортогонального множественного доступа. На новые возможности систем неортогонального доступа уже достаточно долгое время направлены усилия разработчиков и исследователей, результатом чего стало появление множества разновидностей систем неортогонального множественного доступа [8,9, 12-25]. В этой работе мы сфокусировались на технологии неортогонального множественного доступа с разреженными кодовыми последовательностями SCMA (Sparse code multiple access). В системах SCMA сигналы формируются с помощью кодовых книг, синтез и оптимизация которых является крайне перспективной задачей. В этой работе мы постарались сравнить эффективность кодовых книг, доступных в источниках на тему систем SCMA.

## **Модель системы**

Для описания модели системы связи с технологией SCMA сначала введем ряд необходимых обозначений:

- $K$  — количество абонентов в системе;
- $N_{res}$  — число имеющихся ортогональных ресурсов, выделенных для организации множественного доступа.

•  $N_{codewords}$  — количество кодовых слов, которое содержит каждая матрица кодовой книги, предназначенная определенному абоненту (количество точек модуляции).

Система связи с технологией NOMA работают в режиме перегрузки, что означается  $K > N_{res}$ , т.е. количество абонентов превышает количество доступных для множественного доступа ортогональных ресурсов. Таким образом, один ресурс может быть использован несколькими абонентами одновременно. В этом заключается главное преимущество систем неортогонального множественного доступа.

Ключевым понятием для систем SCMA является кодовая книга, представляющая набор матриц, столбцы которой используются для модуляции исходных информационных сигналов. Кроме того, кодовая книга также и определяет правила распределения ограниченного числа ортогональных ресурсов между абонентами системы.

Рассмотрим подробнее процесс формирования сигнала SCMA на примере системы с 6 активными абонентами 4 доступными ортогональными ресурсами (рис. 1). Основной идеей, является использования кодовых слов (столбцов) каждой кодовой матрицы в качестве выбранного значения комплексного информационного символа, соответствующего заданной последовательности бит. На рисунке 1 проиллюстрирована кодовая книги, каждая матрица которой содержит 4 кодовых слова, что соответствует двухбитовой модуляции с 4 точками.

У каждого абонента системы есть своя кодовая матрица  $\mathbf{X}_k$ , состоящая из  $N_{res}$  строк и  $N_{codewords}$  столбцов [2]:

$$\mathbf{X}_k = [\mathbf{x}_{k1} \quad \mathbf{x}_{k2} \quad \dots \quad \mathbf{x}_{kN_{codewords}}] \in \mathbb{C}^{N_{res} \times N_{codewords}} \quad (1)$$

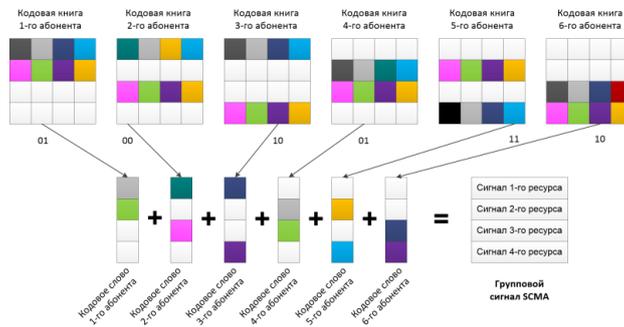


Рис. 1. Процесс формирования сигнала SCMA.

Каждый столбец  $\mathbf{X}_k$  кодовой матрицы абонента соответствует своей комбинации информационных бит. В примере на рисунке 1 проиллюстрирована двухбитовая модуляция, то кодовая книга каждого пользователя будет иметь  $N_{codewords} = 4$  столбца и

- комбинации бит {00} соответствует 1-й столбец  $\mathbf{X}_k$  ;
- комбинации бит {01} соответствует 2-й столбец  $\mathbf{X}_k$  ;
- комбинации бит {10} соответствует 3-й столбец  $\mathbf{X}_k$  ;
- комбинации бит {11} соответствует 4-й столбец  $\mathbf{X}_k$  .

На рисунке 2 изображена структура системы SCMA в «нисходящем» канале.

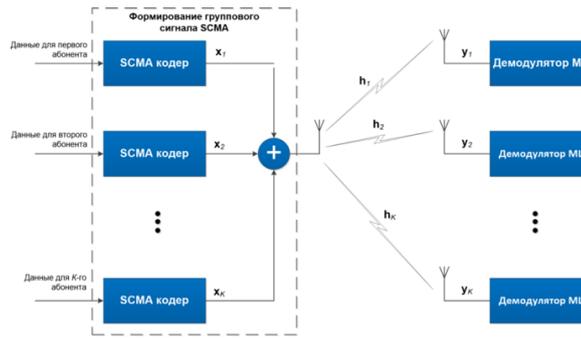


Рис. 2. Структура системы SCMA на линии «вниз» DL

На линии «вниз» формирование группового сигнала происходит на стороне базовой станции. Наблюдаемый сигнал на входе приемника  $k$ -го пользователя можно представить в следующей форме [2]:

$$\mathbf{y}_i = \text{diag}(\mathbf{h}_i) \cdot \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}_i, \quad (2)$$

где  $\mathbf{y}_i = [y_{i1} \ y_{i2} \ \dots \ y_{iN_{res}}]^T$  — наблюдаемый сигнал на входе приемника  $i$ -го пользователя;  $\mathbf{h}_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ \dots \ h_{iN_{res}}]$  - вектор комплексных множителей канала для  $i$ -го пользователя;  $\mathbf{x}_k = [x_{k1} \ x_{k2} \ \dots \ x_{kN_{res}}]^T$  - передаваемое кодовое слово пользователя;  $P_k$  - мощность сигнала для  $k$ -го пользователя;  $\boldsymbol{\eta}_i$  - комплексный вектор шума наблюдения, имеющий нулевое среднее и корреляционную матрицу  $2\sigma_\eta^2 \cdot \mathbf{1}$ .

На линии «вверх» формирование сигналов происходит индивидуально на стороне пользователей с помощью собственных кодовых матриц, а сложение сигналов производится уже в канале (рис. 3).

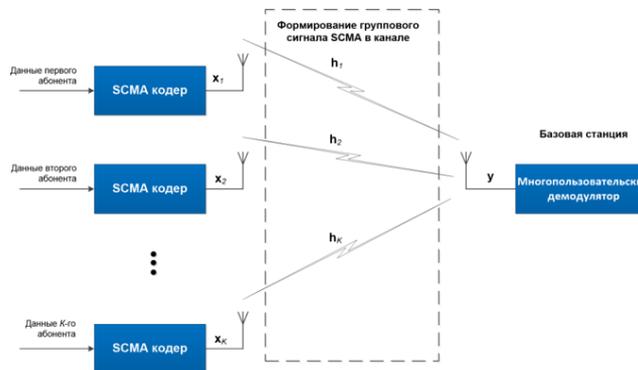


Рис. 3. Структура системы SCMA на линии «вверх» UL.

Сигнал, наблюдаемый на входе приёмника базовой станции, можно представить следующим образом:

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \cdot \text{diag}(\mathbf{h}_k) \cdot \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{y}$  — вектор наблюдаемых сигналов абонентов на входе приёмника базовой станции;  $\mathbf{h}_k = [h_{1k} \ h_{2k} \ \dots \ h_{N_{res}k}]$  — вектор комплексных множителей канала для  $k$ -го пользователя;  $\boldsymbol{\eta}$  —  $N_{res}$ -мерный комплексный вектор шума наблюдения, имеющий нулевое среднее и корреляционную матрицу  $2\sigma_\eta^2 \cdot \mathbf{1}$ . Остальные обозначения соответствуют обозначениям, принятым в (2).

Ключевые для систем SCMA параметры  $K$ ,  $N_{res}$  и  $N_{codewords}$  определяют конфигурацию системы и для каждой конфигурации требуется отдельная кодовая книга, т.е. в случае изменения количества абонентов и или смены количества точек модуляции требуется смена кодовой книги.

Наиболее упоминаемой в источниках, посвященных системам SCMA, является кодовая книга, приведенная в [1].

В работе [3], посвященной синтезу кодовых книг для систем SCMA, также приведены кодовые книги, одна из которых оптимизирована для канала с аддитивным белым гауссовским шумом, а вторая для канала с замираниями.

В работе [5] авторы также производят оптимизацию кодовой книги SCMA преследуя критерий максимизации минимального евклидова расстояния между кодовыми словами.

### Синтез и оптимизация кодовых книг

Помехоустойчивость систем связи с неортогональным доступом на основе разреженных последовательностей напрямую зависит от используемых кодовых книг [2, 4]. Для синтеза кодовых книг обычно используются квазиоптимальные алгоритмы. Задача синтеза кодовой книги для систем SCMA может быть сформулирована следующим образом [4, 5]:

$$R_s \leq I(\mathbf{y}, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_K), \quad (4)$$

где  $\mathbf{y}$  - вектор наблюдаемого сигнала размерности  $N_{res}$ ;  $I(\mathbf{y}, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_K)$  - взаимная информация между принятым сигналом  $\mathbf{y}$  и кодовыми матрицами  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_K$  всех абонентов системы.

Согласно выражению (4) синтез оптимальной кодовой книги возможен при достижении максимальной суммарной скорости передачи (пропускной способности) для всех абонентов. Исходя из этого, оптимальные кодовые матрицы абонентов  $\mathbf{X}_1^{opt}, \mathbf{X}_2^{opt}, \dots, \mathbf{X}_K^{opt}$ , обеспечивающие максимально возможную суммарную пропускную способность абонентов, являются решением следующей оптимизационной задачи:

$$\{\mathbf{X}_1^{opt}, \mathbf{X}_2^{opt}, \dots, \mathbf{X}_K^{opt}\} = \arg \max_{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_K} I(\mathbf{y}, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_K) \quad (5)$$

Пусть  $d$  - число пользователей, для передачи сигналов которых используется один ортогональный ресурс. После демодуляции информация каждого пользователя должна быть выделена из группового сигнала. Выбор положения точек созвездия в кодовой книге необходимо производить таким образом, чтобы суммы точек максимально различались.

Пусть  $\mathbf{Y}$  - принимаемый вектор на одном ортогональном ресурсе;  $\mathbf{S}$  - сумма кодовых слов  $d$  пользователей. Алфавит  $\Theta$ , в который входят все возможные состояния вектора  $\mathbf{S}$ , содержит  $N_{codewords}^d$  возможных значений сумм кодовых слов:

$$\Theta = \{\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{N_{codewords}^d}\}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{N_{codewords}^d}$  - множество возможных значений сумм кодовых слов.

Взаимная информация между  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{S}$  выражается следующим образом [4, 5]:

$$\begin{aligned} I(\mathbf{Y}, \mathbf{S}) &= \log_2(M^d) - \frac{1}{M^d} \times \\ &\times \sum_{m=1}^{M^d} \frac{1}{\pi\sigma_\eta^2} \cdot \int_{\mathbf{y} \in \mathbf{C}} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{y} - \mathbf{s}_m\|^2}{2\sigma_\eta^2}\right) \times \\ &\times \log_2 \left[ \sum_{n=1}^{M^d} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{y} - \mathbf{s}_m\|^2 - \|\mathbf{y} - \mathbf{s}_n\|^2}{2\sigma_\eta^2}\right) \right] d\mathbf{y}. \end{aligned} \quad (7)$$

Точное решение оптимизационной задачи (5) для функции (7) имеет чрезвычайно высокую сложность. Поэтому можно воспользоваться вместо выражения (7) следующей нижней границей  $I^{low}(\mathbf{Y}, \mathbf{S})$  для взаимной информации [4, 5]:

$$I^{low}(\mathbf{Y}, \mathbf{S}) = \log_2(M^d) - \frac{1}{M^d} \cdot \log_2 \left[ 1 + \sum_{m=1}^{M^d} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^{M^d} \exp \left( -\frac{\|\mathbf{s}_m - \mathbf{s}_n\|^2}{4\sigma_\eta^2} \right) \right] dy. \quad (8)$$

Известно, что хороший энергетический выигрыш можно получить, используя круговые сигнальные созвездия [4, 5, 10, 11].

Зачастую используются круговые сигнальные созвездия, но лучше использовать нерегулярность формы созвездия, что позволит получить дополнительный энергетический выигрыш. Величина энергетического выигрыша при минимальном расстоянии  $R$  между точками созвездия определяется следующим выражением [4, 6]:

$$\gamma(R) = \frac{[V(R)]^{\frac{2}{n}}}{6E_{av}}, \quad (9)$$

где  $V(R)$  - объем гипершара размерности  $n$  и радиуса  $R$ ;  $E_{av}$  - средняя энергия используемого сигнального созвездия.

Рассмотрим случай  $N_{codewords} = 4$ ,  $N = 2$  и  $d = 3$ . Допустим, что первый пользователь использует следующее созвездие:  $U_1 = \{-1, -0.333, 0.333, 1\}$ . Созвездия двух других пользователей  $U_2$  и  $U_3$ , являющиеся помехами для первого пользователя, могут быть сформированы путем поворота созвездия пользователя  $U_1$ . Углы поворота  $\varphi_2, \varphi_3$  созвездий  $U_2$  и  $U_3$  выбираются путем максимизации нижней границы для взаимной информации (8):

$$[\varphi_2^{opt}, \varphi_3^{opt}] = \arg \max_{\varphi_2 \in [0; 2\pi], \varphi_3 \in [0; 2\pi]} I^{low} \quad (10)$$

Минимальное Евклидово расстояние является важнейшим параметром при синтезе кодовых книг. В процессе оптимизации кодовых книг Евклидово расстояние между точками созвездий остается неизменным. Распределение сигналов пользователей с помощью кодовой книги по ортогональным ресурсам можно представить следующим образом:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} U_1 & 0 & U_2 & 0 & U_3 & 0 \\ 0 & U_2 & U_3 & 0 & 0 & U_1 \\ U_2 & 0 & 0 & U_1 & 0 & U_3 \\ 0 & U_1 & 0 & U_3 & U_2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для случая отношения сигнал/шум 10 дБ в канале оптимальными углами поворота являются  $\varphi_2 = 60^\circ, \varphi_3 = 120^\circ$ . С учетом этого, результирующее созвездие имеет вид:

$$\begin{aligned} U_1 &= \{-1, -0.333, 0.333, 1\}; \\ U_2 &= \{-0.1109 - 0.3j, 0.6 + j, -0.6 - j, 0.1109 + 0.3j\}; \\ U_3 &= \{0.3 - 0.3j, -0.6 + j, 0.6 - j, -0.3 + 0.3j\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя (11) и (12), получим следующие выражения для кодовых книг для всех шести пользователей системы SCMA:

Таблица 1

Кодовая книга 2 с конфигурацией 4x4x6 [2]

№ аб.	Кодовая книга
1	$\begin{bmatrix} -1 & -0,333 & 0,333 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,1109-0,3i & 0,6+1i & -0,6-1i & 0,1109+0,3i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
2	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,1109-0,3i & 0,6+1i & -0,6-1i & 0,1109+0,3i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -0,333 & 0,333 & 1 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} -0,6-1i & -0,1109-0,3i & 0,1109+0,3i & 0,6+1i \\ 0,3-0,3i & -0,6+1i & 0,6-1i & -0,3+0,3i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
4	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -0,333 & 0,333 & 1 \\ 0,3-0,3i & -0,6+1i & 0,6-1i & -0,3+0,3i \end{bmatrix}$
5	$\begin{bmatrix} 0,3-0,3i & -0,6+1i & 0,6-1i & -0,3+0,3i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,6-1i & -0,1109-0,3i & 0,1109+0,3i & 0,6+1i \end{bmatrix}$
6	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -0,333 & 0,333 & 1 \\ 0,3-0,3i & -0,6+1i & 0,6-1i & -0,3+0,3i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

**Результаты компьютерного моделирования**

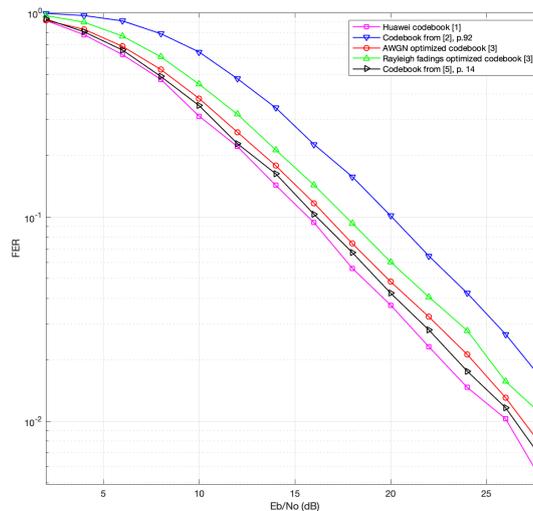
Сравнение эффективности применения различных кодовых книг производилось с помощью компьютерного моделирования. Результаты моделирования получены для канала связи с дружными замираниями с использованием турбокодирования со скоростью  $\frac{1}{2}$  [10], [11]. Для системы ОМА при моделировании использовалась модуляция QPSK.

Результаты моделирования получены с переменным количеством экспериментов для разных точек ОСШ для повышения адекватности моделирования. Результаты моделирования для точек от 2 до 12 дБ получены с помощью усреднения наблюдений 5000 экспериментов, для точек ОСШ от 14 до 18 дБ с помощью 10000 экспериментов, для точек ОСШ от 20 до 28 использовались результаты усреднения 20000 экспериментов. Кратко параметры моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры компьютерного моделирования

Множественный доступ	Неортогональный доступ SCMA
Конфигурация системы	4x4x6 (4 ортогональных ресурса, 4 кодовых слова для каждого абонента, 6 абонентов)
Канал	Линия «вниз» Downlink Релеевский канал с замираниями (дружные по ресурсам, времени и по абонентам)
Длина кадра	568 бит
Помехоустойчивое кодирование	Турбокодер со скоростью 1/2
Демодуляция	Мягкая оценка. Логарифм отношений правдоподобия.
Количество экспериментов	5000 – 20000



**Рис. 4.** Зависимости величин FER отношения сигнал/шум в канале для различных кодовых книг для системы SCMA

На рисунке 4 приведены зависимости величин FER (вероятность появления ошибочного кадра) от отношения сигнал/шум в канале в системе SCMA при использовании упомянутых кодовых книг.

Из полученных результатов на рисунке 4 можно сделать вывод, что наилучшей помехоустойчивостью обладает кодовая книга, представленная в [1]. Вопрос синтеза кодовых книг для систем SCMA до сих пор остается слабо освещенным в источниках и литературе, кроме того, не разработаны эффективные алгоритмы синтеза кодовых книг несмотря на то, что SCMA как разновидность систем NOMA является перспективной для включения для международных стандартов для систем 6G.

### Литература

1. Altera Innovate Asia website, Presentation “1st 5G Algorithm Innovation Competition-ENV1.0-SCMA”, <http://www.innovateasia.com/5g/en/gp2.html>.
2. Manish Mandloi, Devendra Gurjar, Prabina Pattanayak, Ha Nguyen. 5G and Beyond Wireless Systems. PHY Layer Perspective. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021, 425 p.
3. Deka K., Priyadarsini M., Sharma S., Beferull-Lozano B. Design of SCMA Codebooks using Differential Evolution // 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145202.
4. Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding H. Vincent Poor. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Switzerland, Springer, 2019, 670 p.
5. Huang C., Su B., Lin T., Huang Y. Downlink SCMA Codebook Design With Low Error Rate by Maximizing Minimum Euclidean Distance of Superimposed Codewords // IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 5, pp. 5231-5245, May 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3155627.
6. Zhang S., Xiao K., Xiao B., Chen Z., Xia B., Chen D., Ma S. A capacity-based codebook design method for sparse code multiple access systems // 2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2016, pp. 1-5.
7. Forney G.D., Wei L. -. Multidimensional constellations. I. Introduction, figures of merit, and generalized cross constellations // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Aug. 1989, vol. 7, no. 6, pp. 877-892.
8. Bakulin M., Rejeb T. B., Kreyndelin V., Pankratov D., Smirnov A. Uplink NOMA-MIMO Systems with Rayleigh Power Distribution // Sensors. 2022. Vol. 22. No 11. DOI 10.3390/s22114002. EDN SXZTHL
9. Ben Rejeb T., Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Pankratov D., Smirnov A. Performance Analysis of Uplink Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings, Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744088. EDN BAOMPS
10. Kreyndelin V.B., Smirnov A.E., Rejeb T.B. Comparison of Limited Feedback Techniques for Multiuser MIMO Communication Systems // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814271

11. *Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Pankratov D.Y.* Analysis of the capacity of MIMO channel in fading conditions // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456962
12. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю.* Анализ пропускной способности канала MIMO в условиях замираний // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 2. С. 13-20.
13. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б.* Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах связи 6G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 2. С. 25-31.
14. *Крейнделин В.Б., Резнёв А.А.* Матрица пространственно-временного кода высокой размерности типа "Голден" // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 6. С. 34-40.
15. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю.* Алгоритмы нелинейной фильтрации двоичной ЛРП со случайной задержкой и случайной начальной фазой // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2019. Т. 10. № 2. С. 45-51.
16. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю.* Методы приема псевдослучайных последовательностей в системах радиосвязи // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2018. Т. 8. № 1. С. 108-112.
17. *Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д.* Анализ быстрого алгоритма умножения матриц и векторов для банка цифровых фильтров // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 1. С. 4-10.
18. *Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э.* Способы минимизации объёма передаваемой информации в обратном канале многоантенных систем MIMO // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 3. С. 17-24.
19. *Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю.* Применение технологии MIMO в современных системах беспроводной связи разных поколений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 4. С. 4-12.
20. *Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д.* Реализация банка цифровых фильтров с пониженной вычислительной сложностью // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 7. С. 48-53.
21. *Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г.* Компьютерное моделирование технологии MIMO для систем радиосвязи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 12. С. 33-37.
22. *Панкратов Д.Ю., Сердюков А.А.* Моделирование системы MIMO в режиме Beamforming. DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11. № 2. С. 12-21.
23. *Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э.* Технология NOMA с кодовым разделением в 3GPP: 5G или 6G? // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 1. С. 4-
24. *Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Миронов Ю.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э.* Схемы модуляции для систем сотовой связи 5G/IMT-2020 и 6G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 3. С. 11-17.
25. *Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Смирнов А.Э.* Схемы NOMA с обработкой на уровне символов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 5. С. 4-14.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ СУПЕРРАЗРЕШЕНИЯ И АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕТОДОВ

**Бреднев Олег Владимирович,**

*Московский технический Университет Связи и Информатики, аспирант, Москва, Россия,*  
[olegmoose@gmail.com](mailto:olegmoose@gmail.com)

**Балобанов Андрей Владимирович,**

*Московский технический Университет Связи и Информатики, к.т.н., доцент, Москва, Россия,*  
[andrey\\_sam@mail.ru](mailto:andrey_sam@mail.ru)

## **Аннотация**

*В работе анализируются и исследуются методы увеличения качества кадров видеопоследовательностей с применением суперразрешения. Используемые алгоритмы по увеличению разрешения и улучшению качества изображения основаны на системах нейронных сетей, которые учитывают разные типы деградации изображения. Проводимый сравнительный анализ исследуемых приёмов по входному и выходному изображению направлен на определение наилучших из применяемых методов.*

**Ключевые слова:** суперразрешение, BSRGAN, RealWorldVSR, качество, шум, деградация

## **Введение**

В настоящее время, сфера обработки изображений бурно развивается за счёт использования нового набора инструментов в виде нейронных сетей. Используя алгоритмы деградации изображения, появилась возможность в увеличении качества не только статичных кадров, но и их динамичных последовательностей. Аналогичные методы используют большие корпорации в своих закрытых, запатентованных алгоритмах, где на базе процессоров формируется улучшенного качества.

Основными параметрами, с которыми борются при обработке изображений и увеличении его разрешения стали шум, размытие и субдискретизация [14-21]. Их интенсивность отражается на процессе восстановления, а точнее конечном результате. Из-за этого становится крайне проблематичным добиться чёткой детализации и прийти к увеличению информативности кадра.

Проблема так же и в обучении систем для видео с суперразрешением (VSR). Большинство актуальных на сегодняшний день методов VSR, которые обучаются на основе заранее определённых деградаций и являются специфическими под каждый тип реального [1] или синтетического [2] видео не способны обработать материал с неизвестным типом искажений. Но несмотря на это появилось несколько вариантов универсальной обработки видеопоследовательностей. Такими на сегодняшний день являются RealWorldVSR [3] и BSRGAN [4].

Причина выбора именно этих систем заключается в разном подходе к проблеме универсального использования к разного типа искажениям. Метод BSRGAN состоит из случайного перемешивания размытых, понижения дискретизации и деградации шума. В частности, размытия аппроксимируются двумя свёртками, с изотропным и анизотропным ядрами Гаусса; понижающая дискретизация выбирается случайным образом из ближайших, билинейных и бикубических интерполяций; шум синтезируется путём добавления Гауссовского шума с различными уровнями шума, применяя сжатие JPEG с различными коэффициентами качества и генерации обработанного шума сенсора камеры (ISP- image signal processing) в обратном направлении и модели шума изображения типа RAW [4]. Модель RealWorldVSR проводит анализ видео с предварительной чисткой, чтобы устранить ухудшения входного видео. Тем самым предполагается избежать усиления артефактов и обеспечить улучшение качества вывода. После многократно применяется фильтрация для устранения чрезмерного ухудшения с динамической системой уточнения [5].

Целью данной работы является выявление лидирующих методов и принципов фильтрации, на основе разных алгоритмов, анализ выходных изображений на основе тестирования и формирование цепи обработки на основе полученных данных для наилучшего результата.

### Исследование принципов обработки изображений BSRGAN.

Одно изображение сверхвысокого разрешения (SISR), целью которого является воссоздание естественного и четкого детализированного аналога с высоким разрешением из изображения с низким разрешением, недавно привлекло значительное внимание из-за его высокой практической ценности. С развитием глубинных нейронных сетей (DNN) наблюдается резкий рост их использования с прямой связью для быстрого и эффективного увеличения качества и устранения искажений в кадре.

Метод SISR сопоставляет изображение низкого разрешения с его аналогом, только в высоком разрешении, для определения модели деградации. Двумя репрезентативными моделями деградации являются бикубическая деградация [4] и традиционная деградация [5,6]. Первый генерирует LR-изображение посредством бикубической интерполяции. Последняя может быть математически смоделирована по формуле:

$$y = (x \otimes k) \downarrow_s + n. \quad (1)$$

Предполагается, что низкокачественное изображение, полученное путем свертки высококачественного изображения с фильтром нижних частот с ядром Гаусса  $k$  [7] для получения размытого изображения  $x \otimes k$  с последующей операцией понижающей дискретизации  $\downarrow_s$  с масштабным коэффициентом  $s$  и добавлением белого гауссовского шума  $n$  со стандартным отклонением  $\sigma$ . В частности, бикубическую деградацию можно рассматривать как частный случай традиционной деградации, поскольку ее можно аппроксимировать, задав правильное ядро с нулевым шумом. Модель деградации обычно характеризуется несколькими факторами, такими как ядро размытия и уровень шума. В зависимости от того, известны ли эти факторы заранее или нет, методы SISR на основе DNN можно разделить на слепой и не слепой.

Не слепые методы SISR в основном предназначались для бикубической деградации [7]. Хотя были достигнуты значительные улучшения PSNR и качество восприятия, такие методы обычно плохо работают на реальных изображениях, модели деградаций которых не известны заранее. Стоит отметить, что это справедливо и для глубоких моделей, обученных с генеративно-состязательной потерей. Причина в том, что ядра размытия играют важную роль для успешного использования методов SISR [7], а бикубическое ядро слишком простое. Чтобы исправить это, в некоторых работах используется более сложная модель деградации, включающая ядро размытия и аддитивный белый гауссовский шум, а также не слепая сеть, которая принимает ядро размытия и уровень шума в качестве условных входных данных. По сравнению с методами, основанными на бикубической деградации, они более применимы в условиях реального изображения. Тем не менее, им нужна точная оценка ядра и уровня шума.

В противном случае производительность серьезно ухудшается. Между тем, лишь несколько методов специально разработаны для ядерной оценки SISR с использованием слепых методов предлагают объединить оценку ядра в дизайн сети. Но такие методы по-прежнему не дают визуально приятных результатов для большинства реальных изображений. В соответствии с другой линией слепой работы SISR с непарными обучающими данными LR/HR ядро и шум сначала извлекаются из изображений LR, а затем используются для синтеза изображений LR из изображений HR для парного обучения [8]. Примечательно, что без ядерной оценки слепая модель по-прежнему имеет многообещающую производительность. С другой стороны, сложно собрать точные ядра размытия и модели шума из реальных изображений.

Все вышеперечисленные факты определились как основные нововведения для модели BSRGAN. В ней были учтены такие проблемы как создание практичной модели SISR-деградации для реальных изображений и эффективной глубокой слепой модели, которая может увеличивать качество в большинстве реальных изображений.

Стоит так же упомянуть следующие факты о бикубической и традиционной моделях деградации:

1. В соответствии с традиционной моделью деградации есть три ключевых фактора: размытие, понижение дискретизации и шум, которые влияют на деградацию реальных изображений.

2. Поскольку изображения как низкого, так и высокого разрешения могут быть зашумленными и размытыми, нет необходимости использовать конвейер размытия/понижения дискретизации/добавления шума, как в традиционной модели деградации, для создания изображений с понижением качества.

3. Пространство ядра размытия традиционной модели деградации должно варьироваться в зависимости от масштаба, что на практике затрудняет его определение для изображений большого размера.

4. Хотя бикубическая деградация редко подходит для реальных изображений низкого качества, ее можно использовать для увеличения данных, и она действительно является хорошим выбором для получения чистых и четких изображений со сверхвысоким разрешением.

Основываясь на первом факте, способ повышения практичности моделей деградации в BSRGAN состоит в том, чтобы сделать пространство деградации трех ключевых факторов максимально большим и реалистичным. Основываясь на втором факте, происходит расширение пространства деградации, принимая стратегию случайного перемешивания для трех ключевых факторов. Таким образом, зашумленное, уменьшенное и размытое низкокачественное изображение является версией высококачественного изображения. Чтобы справиться с третьим фактом, применяется аналитический расчет ядра для кадра высокого качества из кадра низкого качества. Альтернативой, в соответствии с четвертым фактом, для большого масштабного коэффициента является бикубическое (или билинейное) масштабирование перед деградацией с масштабным коэффициентом 2 и 4.

Для борьбы с размытием применяется следующий методика. Обычно применяемая в средних моделях деградации SISR изображение сначала размывается сверткой с ядром размытия. Это размытие высококачественного изображения направлено на устранение алиасинга и сохранения информативности кадра после последующей дискретизации. Реальное размытие низкокачественного изображения служит для его моделирования в LR-пространстве. Далее, учитывая задачи SISR, для которых достаточно гауссовых ядер, выполняется две операции гауссовского размытия, т. е.  $B_{iso}$  с изотропными гауссовыми ядрами и  $B_{aniso}$  с анизотропными гауссовыми ядрами.

Для настройки ядра размытия размер последовательно выбирается из  $\{7 \times 7, 9 \times 9, \dots, 21 \times 21\}$ , изотропное ядро Гаусса выбирает ширину ядра из  $[0.1, 2.4]$  и  $[0.1, 2.8]$  для коэффициентов масштабирования 2 и 4 соответственно, в то время как анизотропное ядро Гаусса поочередно выбирает угол поворота из  $[0, \pi]$  и длину каждой оси для коэффициентов 2 и 4 из  $[0.5, 6]$  и  $[0.5, 8]$ . Заполнение отражения используется для обеспечения неизменности пространственного размера размытого вывода. Поскольку изотропное гауссово ядро шириной 0,1 соответствует дельта-ядру, мы всегда можем применить две операции размытия.

Для понижения частоты дискретизации изображения высокого разрешения используется прямой способ - интерполяция ближайшего соседа. В результате изображение низкого качества будет иметь смещение  $0,5 \times (s - 1)$  пикс. по направлению к верхнему левому углу [9]. В качестве исправления мы смещаем центрированное изотропное ядро Гаусса  $21 \times 21$  на  $0,5 \times (s - 1)$  пикселей с помощью метода интерполяции 2D-линейной сетки [5] и применяем его для свертки до ближайшего соседа по низу выборки. Ширина ядра Гаусса выбирается случайным образом из  $[0,1, 0,6 \times s]$ . Обозначим такое понижение дискретизации как ближайшее. Кроме того, мы также принимаем бикубический и билинейный методы понижающей дискретизации, обозначаемые  $D_{bilinear}^s$  и  $D_{bicubic}^s$  соответственно.

Кроме того, метод выборки с понижением  $D_{down-up}^s = D_{down}^{s/a} D_{up}^a$ , который сначала понижает разрешение изображения вниз-вверх, вниз-вверх с коэффициентом масштабирования  $s/a$ , а затем увеличивает масштаб с коэффициентом масштабирования  $a$ . Здесь методы интерполяции выбирается случайным образом из билинейной и бикубической интерполяций, а  $a$  выбирается из  $[1/2, s]$ .

Вышеупомянутые четыре метода понижающей дискретизации имеют шаг размытия в пространстве высокого разрешения, в то время как  $D_{\text{down-up}}$  может вводить размытие, вызванное повышением масштаба, в пространстве низкого разрешения, когда коэффициент  $\alpha$  меньше 1. Данный тип связан с процессом субдискретизации и не используется. Вместо этого происходит равномерное смешивание четырёх субдискретизаций, чтобы уменьшить масштаб изображения HR.

Уменьшение шума происходит посредством синтезирования гауссовского шума из трёхмерной модели гауссовского шума с нулевым средним  $\mathcal{N}(0, \Sigma)$  с ковариационной матрицей  $\Sigma$ . Такая модель шума имеет два частных случая: когда  $\Sigma = \sigma^2 I$ , где  $I$  — единичная матрица, она превращается в широко используемую модель независимого от канала аддитивного белого гауссовского шума (AWGN); когда  $\Sigma = \sigma^2 I$ , где  $I$  — матрица  $3 \times 3$ , все элементы которой равны единице, она превращается в широко используемую модель AWGN в градациях серого. В модели деградации всегда добавляется гауссовский шум для синтеза данных. В частности, вероятности применения общего случая и двух частных случаев устанавливаются равными 0,2, 0,4, 0,4 соответственно. Что касается  $\sigma$ , то он равномерно выбирается из  $\{1/255, 2/255, \dots, 25/255\}$ .

Дополнительно нейронная сеть учитывает стандарты сжатия изображений для уменьшения пропускной способности и объема памяти. Она вводит блокирующие артефакты/шум  $8 \times 8$ , особенно в случае высокой степени сжатия. Степень сжатия определяется добротностью, которая представляет собой целое число в диапазоне  $[0, 100]$ . Коэффициент качества 0 означает более низкое качество и более высокую степень сжатия, и наоборот.

Так же учитывается шум, вызываемый путём пропускания необработанных данных с сенсора камеры через конвейер обработки сигнала изображения (ISP). Если конвейер ISP не выполняет шаг шумоподавления, обработанный шум сенсора ухудшит выходное изображение, внося негауссов шум. Чтобы синтезировать такой шум, получаемое необработанное изображение из изображения RGB, которое повторно проходит через обратный конвейер ISP, а затем реконструируется зашумленным изображением RGB через прямой конвейер после добавления шума к синтетическому необработанному изображению. Этот конвейер ISP состоит из демозаикизации, компенсации экспозиции, баланса белого, которые используются для преобразования камеры в цветовое пространство XYZ (D50), XYZ (D50) в линейный цвет RGB с помощью которого возможны преобразование пространства, отображение тонов и гамма-коррекция.

### **Исследование методов обработки изображений RealWorldVSR.**

Сети видеопоследовательностей высокого разрешения повышают детализацию и улучшают качество восприятия за счет агрегирования информации из нескольких кадров. Но в случае невидимых ухудшений сеть может не отличить нежелательные артефакты от благоприятных деталей. Следовательно, такие артефакты и шумы усиливаются за счет распространения во времени. Для этого переобучается BasicVSR для реального видео суперразрешения. BasicVSR принимает последовательности произвольной длины, что позволяет исследовать эффекты распространения во времени, регулируя длину последовательности. BasicVSR обучается со схемой деградации и настройками Real-ESRGAN [10].

В неслепых условиях, когда длина последовательности  $L$  увеличивается, BasicVSR может агрегировать полезную информацию посредством долгосрочного распространения, генерируя больше деталей в выходных данных. Напротив, в реальном мире VSR, хоть распространение помогает улучшить детализацию в случаях незначительного ухудшения качества, распространение через более длинную последовательность может усилить шумы и артефакты. При восстановлении последовательности с использованием только одного кадра BasicVSR может удалить шумы во входных данных и создать плавные выходные данные, но распространение по всей последовательности приводит к выходным данным с серьезными артефактами. Это приводит к тому, что использование долговременной информации помогает синтезировать мелкие детали, но оно также может приводить к появлению дополнительных артефактов.

Для того что бы избежать синтезирования деградаций в выходном изображении в системе RealWorldVSR применяют систему предварительной очистки входного изображения для устранения деградации.  $X$  является  $i$ -м изображением входной последовательности, а  $C$  модуль очистки изображения.

Затем чистая последовательность передается в VSR сети  $S$  для супер-разрешения:

$$\{y_i\} = S(\{\tilde{x}_i\}) \quad (3)$$

Чтобы управлять модулем очистки изображений, происходит ограничение выходных данных модуля очистки с помощью ground-truth с низким разрешением.

$$\mathcal{L}_{truth} = \sum_i \rho(x_i - d(z_i)) \quad (4)$$

где  $z_i$  — это достоверное изображение с высоким разрешением, а  $d$  — оператор понижающей дискретизации.  $\rho$  представляет потери Шарбонье [11]. В дополнение к потерям при очистке учитываются потери точности вывода для управления модулем очистки.

$$\mathcal{L}_{out} = \sum_i \rho(y_i - z_i) \quad (4)$$

Модуль очистки отделяется от perceptual loss и adversarial loss, когда мы настраиваем сеть с учетом этих двух потерь.

Функция perceptual loss измеряет перцептуальные и семантические различия между изображениями. Функция использует сеть потерь, которая предварительно обучена для классификации изображений, perceptual loss функция является глубокой сверточной нейронной сетью [4]. Adversarial loss является состязательной функцией для обучения сети, инвариантной относительно домена.

Один вход в модуль очистки не может эффективно устранить чрезмерную деградацию во многих сложных случаях. Простой, но эффективный метод заключается в дальнейшем подавлении деградации с помощью еще одного прохода к модулю очистки. Схема уточнения, которая динамически устраняет деградацию во время тестирования:

$$\begin{cases} x_i^{j+1} = C(x_i^j) \quad (|x_i^{j+1} - x_i^j| \geq \theta, \\ x_i^j = x_i^{j+1} \end{cases} \quad (5)$$

где  $x_i^j = x_i$  и  $\theta$  — заданный критерий останова.  $\theta = 1,5$  для моделей, не основанных на GAN, и  $\theta = 5$  для моделей, основанных на GAN, являются универсальными настройками.

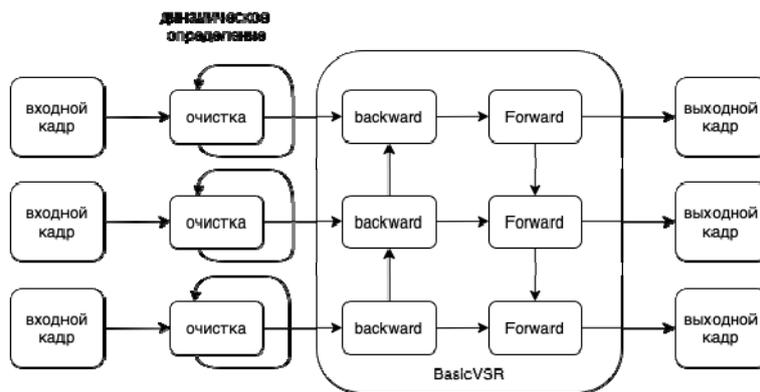


Рис 1. Принцип работы RealWorldVSR

### Оценка работы методов и анализ

Для проведения исследования эффективности работы метода было принято решение использовать базу данных Youtube-8M. Преимуществом упомянутого набора данных для проведения подобных тестов является наличие видеофрагментов разного разрешения и содержания, так как собрана она из материалов с одноимённого видео хостинга.

При анализе и выводе видео последовательностей применяются видео фрагменты длительностью 100 кадров, что позволит оценить работу при длительном распределении.

Дополнительно взятые фрагменты предварительно будут скачены как в самом высоком разрешении и с показателем качества в 4 раза ниже. Данная процедура предназначена для более точного определения конечного результата в сравнении с оригиналом.

Оба алгоритма BRSGAN и RealWorldVSR проходили тестирование на базе переобученных моделей от создателя.

Применяемые эталонные метрики, по которым будет производится оценка стали PSNR, SSIM и так же не эталонные NIQE и BRISQUE.

Метрика NIQE основана на построении набора статистических характеристик «с учетом качества», основанного на простой и успешной модели статистики естественной сцены (NSS) в пространственной области. Эти функции получены из данных естественных неискаженных изображений. Версия программного обеспечения доступна [12]. Метод оценки BRISQUE подобен эталонному SSIM, в его основе лежит статистика естественной сцены, которая извлекает точечную данные локальных нормированных сигналов яркости и измеряет естественность изображения. Анализ происходит на основе полученных измерений об отклонении от модели, сформированной на естественном изображении. Также происходит моделированное распределений попарных статистических данных соседних нормализованных сигналов яркости, что обеспечивает информацию об ориентации искажения [13].

По результатам сравнительного исследования были получены следующие данные, представленные в таблице 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

	Ориг. вк	Ориг. нк	BRSGAN	RealWorldVSR
NIQE	9	3.8	6.1	7.2
BRISQUE	35	19.4	2.361	3.132
PSNR(дБ)	45,5	20.6	28,36	32.79
SSIM	1	0.4	0.57	0.64

Таблица 2



BRSKAN



RealWorldVSR



### Заключение

При сравнении двух систем для очистки изображения и увеличения параметра их качества на основе полученных результатов можно сделать следующий вывод.

Работа алгоритма BRSKAN описанная ранее на примере испытания, результаты которого представлены в таблице 2, уменьшает шумы и увеличивает качество изображение, но также теряет информативность за счёт сильного шумоподавления. Так же проблематичным оказались динамические сцены, где размытие только увеличилось. В свою очередь результатом RealWorldVSR стало более детализированное изображение, а в работе с видеорядом, где наблюдаемый объект изначально имел размытый контур, получил очертания. Также стоит отметить, что параметр контрастности в выходном изображении обоих методов изменился за счёт преобразования.

На основе данного исследования становится возможным выявить преимущества каждой из современных систем для суперразрешения и провести ряд заключений по поводу усовершенствований для будущих методов.

### Литература

1. Yang X., Xiang W., Zeng H., Zhang L. Real-world Video Super-resolution: A Benchmark Dataset and A Decomposition based Learning Scheme," 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 4761-4770, doi: 10.1109/ICCV48922.2021.00474
2. Zhengxiong Luo, Yan Huang, Shang Li, Liang Wang, and Tieniu Tan. Unfolding the alternating optimization for blind super resolution. NIPS'20: 34th International Conference on Neural Information Processing Systems Vancouver BC Canada December 6-12, 2020
3. Kelvin C.K., Chan Shangchen, Zhou Xiangyu, Xu Chen. Investigating Tradeoffs in Real-World Video Super-Resolution 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, 2021.
4. Radu Timofte, Eirikur Agustsson, Luc Van Gool, Ming-Hsuan Yang, and Lei Zhang. Ntire 2017 challenge on single image super-resolution: Methods and results., 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). In CVPR Workshops, 2017.
5. Liu C., Sun D. On Bayesian Adaptive Video Super Resolution // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 36, no. 2, pp. 346-360, Feb. 2014, doi: 10.1109/TPAMI.2013.127
6. Assaf Shocher, Nadav Cohen, and Michal Irani. "zero-shot" super-resolution using deep internal learning. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, In ICCV, 2018.
7. Netalee Efrat, Daniel Glasner, Alexander Apartsin, Boaz Nadler, and Anat Levin. Accurate blur models vs. image pri- ors in single image super-resolution. In ICCV, pp. 2832-2839, 2013.
8. Xiaozhong Ji, Yun Cao, Ying Tai. Chengjie Wang, Jilin Li, and Feiyue Huang. Real-world super-resolution via kernel estimation and noise injection. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), In CVPR Workshops, pages. 2020.
9. Zhang K., Van Gool L., Timofte R. Deep Unfolding Network for Image Super-Resolution // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Seattle, WA, USA, 2020, pp. 3214-3223, doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00328

10. *Xintao Wang, Liangbin Xie, Chao Dong, Ying Shan.* Real-ESRGAN: Training real-world blind super-resolution with pure synthetic data. 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), In ICCVW, 2021.
11. *Charbonnier P., Blanc-Feraud L., Aubert G., Barlaud M.* Two deterministic half-quadratic regularization algorithms for computed imaging // Proceedings of 1st International Conference on Image Processing, Austin, TX, USA, 1994, pp. 168-172 vol.2, doi: 10.1109/ICIP.1994.413553.
12. *Chao Ma, Chih-Yuan Yang, Xiaokang Yang, and Ming- Hsuan Yang.* Learning a no reference quality metric for single-image super-resolution. Computer Vision and Image Understanding, 2017.
13. *Mittal A., Moorthy A.K., Bovik A.C.* Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator // 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), Pacific Grove, CA, USA, 2011, pp. 723-727, doi: 10.1109/ACSSC.2011.6190099.
14. *Valitskaya N.S., Vlasyuk I.V., Potashnikov A.M.* Video compression method on the basis of discrete wavelet transform for application in video information systems with non-standard parameters // T-Comm. 2020. Т. 14. № 3. С. 47-53.
15. *Поташиников А.М., Власюк И.В.* Метод построения равноконтрастного цветового пространства для заданной системы отображения информации и условий контроля // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 4. С. 15-22.
16. *Валицкая Н.С., Власюк И.В.* Методы синхронизации потоков в видеоинформационных системах // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Т. 6. № 2. С. 51-57.
17. *Валицкая Н.С., Власюк И.В.* Протоколы и стандарты передачи медиаконтента по IP-сетям // Телекоммуникации и информационные технологии. 2020. Т. 7. № 2. С. 5-12.
18. *Егоров Д.А., Федоров В.Д., Лейман В.В., Власюк И.В.* Методика оценки пространственно-частотной характеристики камер на основе генеративных случайных последовательностей // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11. № 1. С. 47-53.
19. *Иванчев В.В., Калужских Е.А., Власюк И.В.* Разработка локального метода сжатия динамического диапазона // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11. № 2. С. 31-43.
20. *Можсаева А.И., Власюк И.В., Поташиников А.М., Стритер Ли.* Эталонная объективная метрика оценки качества видео совместимая с PSNR учитывающая частотные и периферическую характеристики зрения человека // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11. № 2. С. 44-54.
21. *Кремлева Э.А., Власюк И.В.* Оценка эффективности методов визуализации одноканальных изображений в условных цветах // Телекоммуникации и информационные технологии. 2021. Т. 8. № 1. С. 29-37.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАЖОРИТАРНОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТИ**

**Гадасин Денис Вадимович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, доцент кафедры СИТус, к.т.н.,  
Москва, Россия,  
[dengadiplom@mail.ru](mailto:dengadiplom@mail.ru)*

**Шведов Андрей Вячеславович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, старший преподаватель  
кафедры СИТус, Москва, Россия,  
[a.v.shvedov@mtuci.ru](mailto:a.v.shvedov@mtuci.ru)*

**Егорова Юлия Дмитриевна,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, бакалавр гр. БСТ1903,  
Москва, Россия,  
[sleepingwithsirens12368@gmail.com](mailto:sleepingwithsirens12368@gmail.com)*

**Шайдулина Ильвира Рустамовна,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, бакалавр гр. БСТ1903, Москва,  
Россия,  
[ilvira241@mail.ru](mailto:ilvira241@mail.ru)*

### **Аннотация**

*Для организации обмена пакетами данных между маршрутизаторами в сетях передачи данных применяются различные алгоритмы маршрутизации и протоколы, основанные на этих алгоритмах. Подавляющая часть таких алгоритмов при организации маршрута строится на топологии связей между маршрутизаторами, а остальные принимают во внимание и количественные параметры данных связей, например, параметры QoS (пропускная способность, задержка, надежность и пр.). Для большинства сетей характеристики транспортных потоков данных между двумя любыми узлами детерминированы в рамках границ, определенных параметрами качества обслуживания, поэтому есть возможность заранее определить оптимальную траекторию маршрута для каждого из потоков на основе параметра задержки. Целью данной статьи является рассмотрение вопросов, связанных с применением метода мажоритарного кодирования в системах маршрутизации для определения оптимального маршрута передачи данных в сети.*

**Ключевые слова:** *Маршрутизация, маршрут, метрика маршрута, протокол маршрутизации, мажоритарное кодирование, качество обслуживания, QoS, RIB, FIB.*

### **Введение**

Алгоритмы маршрутизации и протоколы, применяющие их, делятся на статические и динамические [1, 11-23]. Применяя теорию массового обслуживания возможно определить математическое ожидание задержки доставки пакета для каждой конкретной связи между двумя маршрутизаторами [2]. Расчеты базируются на описании видов связей между маршрутизаторами, на основе которых для маршрутизаторов строится матрица трафика  $T_{i,j}$ , в которой отражается скорость обработки пакетов за единицу времени и матрица параметров каналов между маршрутизаторами  $V_{i,j}$ , включающая в себя пропускную способность канала за единицу времени.

На основе двух этих матриц строится матрица задержек между двумя любыми узлами  $i$  и  $j$ , принадлежащих данной сети:

$$delay_{i,j} = \frac{1}{(p \cdot V_{i,j} - T_{i,j})}, \quad (1)$$

где, параметр  $p$  определяет средний размер пакета, передаваемый по сети.

На основе полученной матрицы задержек возможно сформировать граф  $G$  на котором отразить все кратчайшие маршруты.

В данном алгоритме построения и выбора кратчайшего пути протокол маршрутизации не применяется, а его роль сводится исключительно к формированию таблицы маршрутизации.

Для ускорения процесса выбора маршрута и соответственно уменьшения параметра задержки желательно один из маршрутизаторов сети обозначить центральным и хранить в нем всю маршрутную информацию для всей сети. Основным недостатком такой модели заключается в увеличении количества шагов алгоритма выбора маршрута для любой пары  $i, j$  узлов сети.

Еще одним способом маршрутной оптимизации является разбиение сети на две составляющие: опорная сеть (backbone) и автономная сеть. В автономной сети определяется единая политика маршрутизации, т.е. один, определенный протокол, который строит маршрут. Любая автономная сеть подключается только к одной опорной сети через определенный узловой маршрутизатор, таким образом одна опорная сеть связана с определенным множеством автономных сетей. Связь между опорными сетями осуществляется посредством шлюза [3] (Рис. 1).

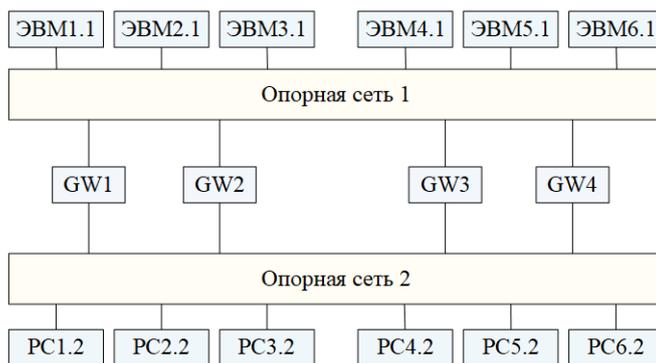


Рис. 1. Связь нескольких опорных сетей между собой

Основной проблемой при такой организации сети является сложность алгоритмов пересылки пакетов между двумя узлами, в которой содержится маршрутная информация. В следствии того, что пакет, в котором содержится маршрутная информация проходит через множество транзитных узлов, в каждом из которых значение поля TTL последовательно уменьшается, может сложиться ситуация, когда один из маршрутизаторов получит новые сведения о топологии сети, а другой нет. Данная проблема может приводить к закликиванию пакетов или осцилляции маршрутов из-за возникновения обратных связей.

Наиболее простой способ решения такой проблемы — это синхронизация всех узлов путем широковещательной рассылки им маршрутных пакетов, с одновременным их упорядочиванием. Тогда короткий анализ номера служебного пакета позволит маршрутизатору дублировать информацию и не принимать во внимание уже устаревшие данные. При получении пакета с маршрутной информацией, маршрутизатор пересылает его через все интерфейсы, которые у него открыты, за исключением того, через который данный пакет был им получен.

Использование данного алгоритма должно включать в себя счетчик остановки исполнения, так как в следствии особенностей передачи пакетов, пакеты, отправленные с одного узла в адрес другого, не обязательно приходят в том порядке, в котором они были отправлены, то есть пакет с меньшим номером может поступить после пакета с большим номером. Тогда данный пакет должен

отбрасываться маршрутизатором и не рассматриваться так как информация в нем считается устаревшей.

Еще одна сложность заключается в том, что маршрутизатор может быть отключен и начать свою работу после какой-либо внештатной ситуации. Следовательно, происходит рассинхронизация, и он не обладает информацией, какие номера пакетов истинны. Для решения данных проблем возможно совместное использование поля, в котором будет проводиться подсчет пакетов и поля TTL. Приоритет будет у поля TTL, т.е. при обнулении счетчика пакет уничтожается.

Так же проблему счетчика пакетов можно решить аналогично с решением проблемы с пакетами ВУЕ в протоколе TCP. В протоколе TCP после получения пакета ВУЕ делается задержка на определенное время для получения «опоздавших» пакетов, после чего сессия разрывается. Для решения проблемы счетчика предлагается создать буфер, в который помещается широкоэмитательный пакет, предполагается, что если произошел сбой при получении нумерованных пакетов, то за время нахождения пакета в буфере «заблудившиеся» пакеты достигнут узлов и тем самым произойдет выравнивание порядковых номеров, а если будет дублирование номеров, то пакет уничтожается. Для обеспечения надежности получение пакетов, в которых содержится маршрутная информация должно квитироваться.

### Определение источников получения маршрутной информации

Источниками информации о том или ином маршруте могут, в частности, являться протоколы динамической маршрутизации [4], например:

- BGP;
- EIGRP;
- IS-IS;
- OSPF;
- RIP.

Информация может поступать как от одного из протоколов, так и от нескольких одновременно. Вся поступившая маршрутная информация обрабатывается и хранится в специальных таблицах маршрутизации, которые существуют для каждого инициализированного на устройстве протокола маршрутизации. При этом вся необходимая информация для определения оптимального маршрута хранится в основной таблице маршрутизации.

Пакеты с маршрутной информацией поступают периодически, для каждого протокола определен свой период поступления таких пакетов, но алгоритм работы примерно одинаковый и состоит из следующих действий:

1. В течении определенного периода времени маршрутизатор получает маршрутную информацию от соседних маршрутизаторов (время обновления);

2. Если в течении времени обновления маршрутизатор не получил информацию с маршрутной информацией, то он ожидает определенный период времени, который кратен времени обновления, для разных протоколов он составляет от 3 до 6 (время старения);

3. Если маршрутизатор не получает данные о маршруте в течении времени старения, то производится удаление маршрута из таблицы маршрутизации, но он остается в таблице маршрутизации протокола, с помощью которого данный маршрут был получен, т.к. возможно, что произошёл сбой в связи. На восстановление связи так же выделяется временной отрезок, кратный времени обновления, обычно от 2 до 4 (время восстановления связи);

4. Если за время восстановления связи маршрутизатор не получил пакета с маршрутной информацией, то маршрут удаляется из таблицы маршрутизации протокола, с помощью которого он был получен.

Если информация о маршруте, полученная из всех доступных источников, предназначена для **разных** сетей назначения, то каждая из них помещается в таблицу маршрутизации (Routing Information Base, RIB), а также, с некоторыми изменениями, в таблицу для маршрутизации пакетов (Forwarding Information Base, FIB) [5]. В обычном случае в таблицу маршрутизации заносится маршрут, у которого префикс более длинный (то есть маска подсети больше).

В случае идентичности префиксов для определения маршрута, который необходимо поместить в таблицу маршрутизации используется параметр административного расстояния (**Administrative distance, AD**) [6]. Административное расстояние — это целое числовое значение, которое назначается как динамическим и статическим маршрутам, так и непосредственно подключенным маршрутам. Исходя из конечного значения производится упорядочивание и выставление приоритетов. Самым высшим приоритетом к одному и тому же адресу назначения обладают те маршруты, у которых значение административного расстояния минимальны. Показатели приоритета могут также использоваться как мера достоверности маршрута при определении надежности исходящего узла по сравнению с другими [7].

Большинство современных протоколов динамической маршрутизации может работать как с несколькими протоколами, так и с несколькими типами сервисов [8]. Под типом сервиса будем иметь в виду возможность оптимизации маршрута исходя из сложившейся динамической ситуации в сети по параметрам пропускной способности, надежности, задержки или других параметров, характеризующих качество обслуживания (QoS) [9]. Например, метрики, отражающие надежность пути и/или коэффициент загрузки канала, могут способствовать нахождению наиболее оптимального маршрута при динамически изменяющемся состоянии сети.

### Применение алгоритма с использованием метода мажоритарного кодирования

Для уменьшения времени непроизводительной работы, т.е. времени, затрачиваемого на переформирование таблиц маршрутизации из-за изменения параметров маршрута, необходимо обеспечить стабильность топологических связей маршрутизаторов.

Такая стабильность может быть обеспечена за счет соблюдения следующего правила. Пусть есть два маршрутизатора *A* и *B*, при этом маршрутизатор *A* связан с сетью 1 и сетью 2, а маршрутизатор *B* связан только с сетью 2 (рис. 2). Так как маршрутизаторы *A* и *B* связаны с одной сетью, то маршрутизатор *A* передает маршрутизатору *B* маршрутную информацию для достижимости сети 1. В том случае, когда маршрутизатор *B* пересылает пакеты, в которых содержится маршрутная информация, то в маршрутизатор *A* строго не должны поступать пакеты об изменении маршрута для сети 1, т.е. пакеты, в которых содержится маршрутная информация, направленные какому-либо маршрутизатору, не должны содержать данные о сетях, с которыми напрямую данный маршрутизатор связан.

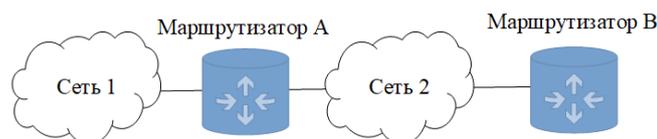


Рис. 2. Пример сети

Пакеты с маршрутной информацией должны содержать следующую информацию:

- адреса сетей, с которыми маршрутизатор связан непосредственно;
- пропускную способность каждой из сетей;
- топологическую задержку каждой из сетей;
- надежность передачи пакетов для каждой сети;
- загруженность канала для каждой сети;
- MTU для каждой сети.

Таким образом, пакет с маршрутной информацией должен включать в себя следующие информационные поля:

- Number – 4 октета IP-адреса;
- Delay (задержка) – 3 октета;
- Bandwidth (пропускная способность) – 3 октета;
- Uchar MTU – 2 октета;
- Reliability (процент успешно переданных пакетов Tx/Rx) – 1 октет;
- Load (процент занятости канала) – 1 октет;

- Hopcount (количество перенаправлений) – 1 октет.

Итого для описания структуры маршрута используется 15 октетов, а информация о маршруте содержится в 11 октетах или 88 битах.

На определенных устаревших моделях маршрутизаторов предельное число записей в таблице маршрутизации составляет 512 тысяч записей [10]. Данные метрики содержатся в каждой записи в таблице маршрутизации, которая определяет все возможные маршруты. Тогда для того, что бы пронумеровать данные маршруты в двоичном виде, потребуется двоичное число, число разрядов в котором будет меньше или равно  $\lceil \log_2 n \rceil$ , где  $n$  – число маршрутов, а знак  $\lceil \rceil$  означает округление вверх до ближайшего целого.

Представим маршрут в виде записи, которая включает в себя характеристики маршрута и номер маршрута:

$$\begin{aligned}
 S &= \text{struct \& numberway} \\
 S &= \text{Number \& delay \& bandwidth \& ucharMTU \&} \\
 &\text{\&reliability \& load \& hopcount \& numberway} \\
 S &= \text{Octet1.Octet2....Octet14.} \underbrace{00 \dots 0}_{19 \text{ digits}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Как только маршрутизатор получает пакет с маршрутной информацией он производит поиск в таблице маршрутизации. Максимальное количество шагов, за которое маршрутизатор находит нужную запись составляет  $\tau = \log_2 n$  шагов, где  $n$  – количество записей в таблице маршрутизации.

Исходя из алгоритма работы, если маршрутизатор в течении какого-то времени не получает сообщений от соседних маршрутизаторов, то происходит удаление записи как из RIB и FIB, так и из таблицы маршрутизации протокола, с помощью которого он был получен. Если после этого приходит пакет с маршрутной информацией от удаленного узла, то информацию о маршруте необходимо будет внести в базы, для проводится проверка таблиц маршрутизации (что соответствует  $\tau$  шагов), обращение к основному блоку, изменение индексного блока (так как записи в таблице маршрутизации проиндексированы), а также обращения для записи в основную область. Тогда общее количество шагов определяется формулой:

$$\tau = \log_2 n + \alpha + \beta + \gamma \tag{3}$$

На выполнение каждого шага расходуются вычислительные ресурсы, которые можно выразить в количестве тактов процессора и соответственно время, затрачиваемое на выполнение операции, составляет:

$$t = \tau \cdot k \cdot h_{\text{процесс}}, \tag{4}$$

где  $k$  – среднее число тактов на выполнение  $i$ -го шага, а  $h_{\text{процесс}}$  – тактовая частота процессора.

Исходя из логики работы устройства, процессор маршрутизатора останавливает обработку входящих пакетов на данное время для обновления таблицы маршрутизации. Если же информация о маршруте не изменилась, то в каждом временном отрезке, в котором поступает пакет, содержащий информацию о маршруте, маршрутизатор не обрабатывает основной поток информации в течении времени:

$$t = \log_2 n \cdot k \cdot h_{\text{процес}} \tag{5}$$

Число тактов  $k$  определяется алгоритмом сравнения как префикса, так и маршрутной информации. Данные ресурсы расходуются для пакета, поступившего от любого протокола, их может быть несколько.

Для того, чтобы избежать необходимого простоя при работе с таблицей маршрутизации предлагается проводить проверку маршрутной информации отдельно, а изменения в таблицу вносить только при необходимости.

Тогда информация о маршруте будет включать в себя только 131 разряд, 112 разрядов отведено под информационную часть, а 19 под номер маршрутизатора. В таком случае, маршрут можно представить в виде вектора, состоящего из 131 координаты. Задача обнаружения изменения маршрутной информации сводится к тому, чтобы определить относится ли полученный вектор к векторам, которые разрешены в данном векторном пространстве. Необходимо провести умножение вектора на проверочную матрицу, которая формируется исходя из известной таблицы маршрутизации.

Абстрактно сеть можно представить в виде матрицы размерностью  $m \times n$ , максимально приближенной к квадратной. Квадратная матрица будет являться частным случаем представления сети, если квадратный корень из общего количества маршрутизаторов, составляющих сеть, есть целое число.

Ячейка, образованная пересечением столбцов и строк матрицы, показывает связь между маршрутизатором  $m_i$  и  $n_i$ , если в данной ячейке указано любое положительное число, отличное от 0, значит можно говорить, что между двумя маршрутизаторами установлен путь и его значение равно определенному количеству единиц.

Таким образом, зная начальный и конечный маршрутизатор возможно определить существует ли путь между двумя любыми маршрутизаторами и его длину.

Рассмотрим процесс определения изменения параметров маршрута исходя из проверочной матрицы для кода Хемминга с параметрами (7,4):

$$H_{(7,4)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Преобразуем данную матрицу в проверочную матрицу для кода с параметром (7,3), который позволяет проводить проверку на четность:

$$H_{(7,3)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Данной матрицы эквивалентна проверочная матрица, соответствующая порождающему многочлену вида  $G(x) = (x+1) \cdot (x^3 + x + 1)$ :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Полученное сообщение с параметрами маршрута можно принять за вектор  $V(x)$  с координатами  $\overline{V(x)} = (v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6)$ , в том случае, если произошли изменения в параметрах маршрута, то изменятся координаты вектора, что можно считать как ошибочный вектор по отношению к эталону. Каждая координата проверяется отдельно на соответствие исходному в соответствии с системой уравнений, устанавливающую ее взаимосвязь с остальными координатами. Такая система уравнений строится исходя из проверочной матрицы.

Исходя из проверочной матрицы, в первой строке координата  $v_0 = 1$ . Также не нулевыми являются координаты  $v_1$  и  $v_3$ . Примем тогда, что:

$$v_0 + v_1 + v_3 = 0 \quad (9)$$

На следующем шаге необходимо выразить координату  $v_0$  через другие, таким образом, чтобы они входили в систему уравнений только один раз. Для этого, произведем сложение по модулю 2 первой, второй и третьей строк матрицы, а также первой, второй и четвертой строк. После этого получим систему уравнений:

$$\begin{cases} v_0 + v_1 + v_3 = 0 \\ v_0 + v_4 + v_5 = 0 \\ v_0 + v_2 + v_6 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Выразим координату  $v_0$  через другие координаты. Если осуществлять преобразование математически, то тогда координата  $v_0 = -v_1 - v_3$ , но исходя из того, что преобразование производится в двоичной системе координат, то заменим знак «минус» на знак  $\oplus$ , тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} v_0 = v_1 \oplus v_3 \\ v_0 = v_4 \oplus v_5 \\ v_0 = v_2 \oplus v_6 \end{cases} \quad (11)$$

Для того, чтобы составить проверочные уравнения для других координат необходимо произвести сдвиг на одну единицу вправо порядкового номера координаты из предшествующей системы. Так, например, для координаты  $v_1$  система будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} v_1 = v_2 \oplus v_4 \\ v_1 = v_5 \oplus v_6 \\ v_1 = v_3 \oplus v_0 \end{cases} \quad (12)$$

Проводя последовательное сложение определяется были ли изменены координаты полученного вектора по отношению к исходному. Если для одной координаты не выполняется хотя бы одно равенство, значит полученные значения отличаются от исходного. Данная проверка является корректной исходя из того, что координаты только один раз участвуют в процессе суммирования в одной системе. Таким образом, если одна из координат изменена, то равенство нарушается только в одном из уравнений системы.

Для того, чтобы определить, какое истинное значение было у координаты  $v_0$  определим вектор, состоящий из исходного значения  $v_0$  и значений всех сумм для  $v_0$ ,  $\overline{v_0} = (v_0^0, v_0^1, v_0^2, v_0^3)$ .

$$\begin{cases} v_0^0 = v_0 \\ v_0^1 = v_1 \oplus v_3 \\ v_0^2 = v_4 \oplus v_5 \\ v_0^3 = v_2 \oplus v_6 \end{cases} \quad (13)$$

После этого подсчитаем количество нулевых и ненулевых координат в данном векторе. Если количество значений, равных 0, больше, чем количество значений, равных 1, то истинным значением является 0, если наоборот, то 1. Если же имеет место быть равенство, то невозможно определить истинное значение и констатируется, что произошла ошибка.

Сообщение, которое поступает на вход можно рассматривать как двоичное число (двоичный циклический код), соответственно, схему анализа данного числа можно довольно просто реализовать исходя из общей схемы компаратора. В схему реализации включаются: сумматор, ячейки памяти и логическая схема, которая осуществляет сравнение количества нулей и единиц для вектора  $\bar{v}_i$ . Для исходной матрицы кода с параметрами (7,3) он выглядит следующим образом (рис. 3).

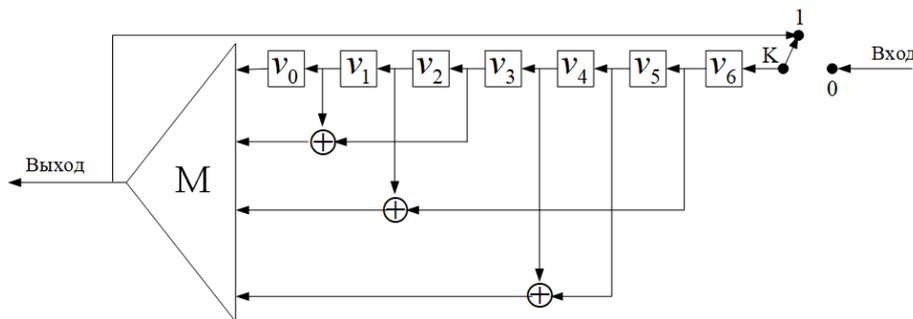


Рис. 3. Схема анализа и проверки сообщения на наличие изменений на этапе 1

В данной схеме  $M (Sum)$  – логический элемент, который осуществляет сравнение (сумматор), а  $K(Sw)$  – переключатель. Если переключатель замкнут (находится в положении 0), то происходит прием сообщения, а если разомкнут (находится в положении 1), то происходит проверка сообщения. На Рис. 3 показана ситуация, когда сообщение полностью поступило в запоминающий регистр и происходит его проверка на наличие изменений.

На первом этапе проверки на вход сумматора подаются значения:  $v_0, v_1 \oplus v_3, v_4 \oplus v_5, v_2 \oplus v_6$ .

Результатом суммирования является 0 или 1, в зависимости от того, каких значений больше поступило на вход сумматора. Это значение присваивается параметру  $v'_0$ .

На втором этапе проверки в регистре производится сдвиг сообщения на одну позицию, а значение  $v'_0$  записывается в последнюю ячейку памяти (рис. 4).

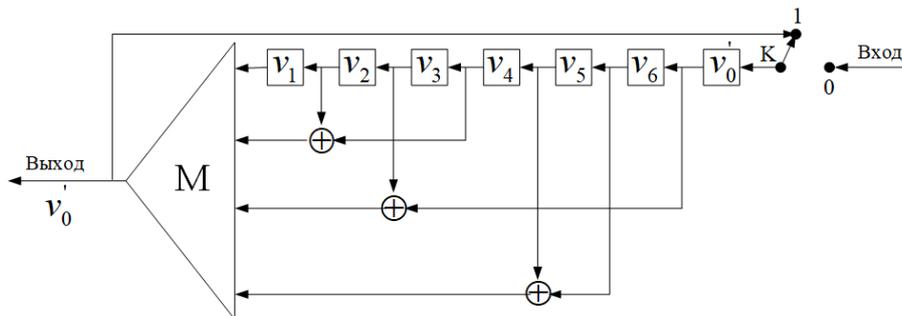


Рис. 4. Схема анализа и проверки сообщения на наличие изменений на этапе 2

После чего производится аналогичная операция суммирования для вектора  $\bar{v}_1$  :

$$\bar{v}_1 = (v_1^1, v_1^1, v_1^2, v_1^3) = (v_1, v_2 \oplus v_4, v_5 \oplus v_6, v_3 \oplus v'_0) \quad (14)$$

Результатом данного этапа является значение  $v'_1$ .

Аналогично производится вычисления для оставшихся битов. В случае выявления несовпадения операция сравнения останавливается и происходит внесение новой полученной информации в таблицу маршрутизации.

При реализации данного алгоритма работа производится только с получаемой информацией, т.е. не используется никакая другая дополнительная информация. Таким образом, избегается необходимость для хранения большого объема исходных данных.

Применение данного алгоритма позволят как минимум обнаруживать, а как максимум и исправлять несовпадающие данные (ошибки), кратность которых превышает значение  $\frac{d-1}{2}$ .

Сумматор можно представить в виде регистра, где количество разрядов равно:

$$\lceil \log_2 n \rceil + 1, \quad (15)$$

где  $n$  – число проверочных уравнений, которое зависит от длины проверяемой последовательности и в общем случае равно  $\frac{n}{2}$ . Один добавочный бит в сумматоре используется как бит перехода через 0 при общем количестве подсчета нулей и единиц.

Пусть в таблице маршрутизации содержится  $n$  записей. Одна запись соответствует одному маршруту.

Будем считать что любой маршрутизатор отправляет сведения соседнему маршрутизатору о маршруте строго в один и тот же момент времени с интервалом равным  $t=30$  сек. Исходим из того, что надежность маршрутизатора, т.е. возможность сохранять значения установленных параметров функционирования в определённых пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортирования составляет 99,9999%. Примем данную цифру за исходную. Тогда, получение маршрутизатором информации о смене маршрутной информации ведет к внесению данных в таблицу маршрутизации и временной невозможности функционирования маршрутизатора в заданных пределах. Такую ситуацию будем называть отказом.

Отказ в работе происходит в следствии изменения маршрутной информации от любого другого маршрутизатора, с которым он связан. Информация об изменении параметров маршрута одним маршрутизатором никак не связана с изменением параметров маршрута от другого маршрутизатора, т.е. такие события являются взаимонезависимыми. Для упрощения работы и определения границы вычисления положим, что все маршрутизаторы взаимонезависимы друг от друга и отсылают хотя бы одно сообщение, в котором содержится маршрутная информация один раз в 30 сек.

Для данной ситуации можно предложить модель, в которой  $n-1$  маршрутизатор, заменить на один, который будет связан только с одним  $n$ -ым маршрутизатором и будет генерировать  $n-1$  сообщение о маршрутной информации в течении интервала времени равным 30 сек, т.е. связь один ко многим заменим связью один к одному, а модель одно сообщение – один маршрутизатор заменим моделью  $n-1$  сообщение для одного маршрутизатора.

Зная то, что поступающие сообщения взаимонезависимы и каждое обладает одним и тем же значением надежности  $P$ , всегда можно определить необходимое число сообщений  $n'$ , получение которых соответствует определенному порогу работоспособности  $\rho$ :

$$n' = \log_P \rho \quad (16)$$

### Заключение

Данный метод проверки поступающей информации от маршрутизатора о параметрах маршрута возможно применять, если для каждого входного параметра  $v_i$  возможно построить систему проверок:

$$v_i = \begin{cases} \sum_{n=1}^j s_{1n} \cdot v_n \\ \sum_{n=1}^j s_{2n} \cdot v_n, \text{ где для } \forall v_n, n \neq i \\ \dots \\ \sum_{n=1}^j s_{jn} \cdot v_n \end{cases} \quad (17)$$

То есть, для каждого  $v_i$  операция суммирования происходит со всеми битами, за исключением бита  $v_i$  и любой из этих битов входит только в одну проверочную сумму, т.е. проверочная система является ортогональной (разделенной).

Число ошибок, которые могут быть исправлены при применении данного метода зависит от числа уравнений, которые входят в систему определения истинности символа. Исходя из того, что система проверок ортогональна, то ошибка, которая произошла в любом символе последовательности влияет только на одну проверку, поэтому для любых  $v_n$  системы уравнений. Для любой системы, состоящей из  $n$  уравнений, возможно исправить  $p < \frac{n+1}{2}$  ошибок.

Если количество уравнений  $n$  нечетное и при подсчете получилось равенство нулей и единиц, т.е.  $p = \frac{n+1}{2}$ , то в неправильный символ только обнаруживается и его нельзя исправить. При этом это не сильно влияет на работу, так как проверочную матрицу необходимо будет перестроить.

Желательно стремиться к тому, чтобы число уравнений  $n$  было на единицу меньше кодового расстояния  $d$ , то есть  $n=d-1$ . Данная система уравнений будет полностью ортогонализуема. Для такой системы применение мажоритарного метода позволит полностью реализовать корректирующие свойства кода.

### Литература

1. *Гадасин Д. В., Веденеев П. С., Шведов А. В.* Уязвимости системы маршрутизации глобальной сети Интернет и возможные пути их преодоления // Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ-2019 : Материалы XIII международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Владимир, 03-05 июля 2019 года. Том 1. Владимир: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2019. С. 94-96. EDN YFEIAH
2. *Марченко Д. О., Клыгина О. Г., Гадасин Д. В., Шведов А. В.* Обеспечение механизмов балансировки нагрузки в сетях с сегментной маршрутизацией на основе данных мониторинга // Перспективные технологии в средствах передачи информации : материалы 14-ой международной научно-технической конференции, Владимир, 06-07 октября 2021 года. Владимир: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2021. С. 419-422. EDN ZSCNIR
3. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Klygina O. G., Shulginov I. V.* Routing Management system formation for machine-to-machine interaction in a decentralized environment // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 - Conference Proceedings, Saint-Petersburg, 31 мая – 04 2021 года. Saint-Petersburg, 2021. P. 9470710. DOI 10.1109/WECONF51603.2021.9470710. EDN RUMWBY
4. *Shvedov A. V., Gadasin D. V., Alyoshintsev A. V.* Segment routing in data transmission networks // T-Comm. 2022. Vol. 16. No 5. P. 56-62. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-5-56-62. EDN VAYLJQ
5. *Шведов А. В., Гадасин Д. В., Клыгина О. Г.* Организация взаимодействия туманных вычислений и сегментной маршрутизации для предоставления сервисов IOT в smart grid // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2022. Т. 13. № 3. С. 40-49. EDN TRRYZN
6. *Марченко Д. О., Клыгина О. Г., Гадасин Д. В., Шведов А. В.* Обеспечение механизмов балансировки нагрузки в сетях с сегментной маршрутизацией на основе данных мониторинга // Перспективные технологии в средствах передачи информации : материалы 14-ой международной научно-технической конференции, Владимир, 06-07 октября 2021 года. Владимир: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2021. С. 419-422. EDN ZSCNIR.

7. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Koltsova A. V.* Cluster model for edge computing // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 - Proceedings, Vienna, 20-22 октября 2020 года. Vienna, 2020. P. 9261538. DOI 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261538. EDN FGDL5A.
8. *Gadasin D. V., Koltsova A. V., Gadasin D. D.* Algorithm for Building a Cluster for Implementing the 'Memory as a Service' Service in the IoT Concept // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings, Moscow, 16-18 марта 2021 г. Moscow, 2021. P. 9416112. DOI 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416112. EDN VRPCFG
9. *Назаров М. Д., Шведов А. В.* Корреляция атрибутов соглашения об уровне обслуживания с основными параметрами QoS в корпоративных сетях // Телекоммуникации и информационные технологии. 2020. Т. 7. № 2. С. 73-79. EDN VQHDTJ.
10. *Гадасин Д. В., Шведов А. В., Усачева Д. И.* Механизмы обеспечения безопасности маршрутизации в сети Интернет // III Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019 : Материалы XXI Международной научно-технической конференции, Казань, 18-22 ноября 2019 года. Том 1. Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2019. С. 292-293. EDN OSAFRG
11. *Шведов А.В., Гадасин Д.В., Цыгулёва А.В., Вакурин И.С.* Разгрузка очереди сети при помощи Гамильтонова цикла // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2021. Т. 11. № 3. С. 45-53.
12. *Гадасин Д.В., Шведов А.В., Клыгина О.Г., Гадасин Д.Д.* Реализация платформы туманных вычислений для предоставления сервисов IoT // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2021. Т. 11. № 2. С. 65-75.
13. *Kalmykov N.S., Dokuchaev V.A.* Segment routing as a basis for software defined network // T-Comm. 2021. Т. 15. № 7. С. 50-54.
14. *Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Statev V.Yu.* Classification of personal data security threats in information systems // T-Comm. 2020. Т. 14. № 1. С. 56-60.
15. *Докучаев В.А., Маклачкова В.В., Статьев В.Ю.* Цифровизация субъекта персональных данных // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 6. С. 27-32.
16. *Pavlov S.V., Dokuchaev V.A., Mytenkov S.S.* Model of a fuzzy dynamic decision support system // T-Comm. 2020. Т. 14. № 9. С. 43-47.
17. *Pavlov S.V., Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Mytenkov S.S.* Features of supporting decision making in modern enterprise infocommunication systems // T-Comm. 2019. Т. 13. № 3. С. 71-74.
18. *Гадасин Д.В., Кольцова А.В., Гадасин Д.Д., Полякова А.Н.* Оценка вероятности формирования виртуального кластера // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. Т. 12. № 1. С. 4-12.
19. *Кузин И.А., Гадасин Д.В.* Модель контейнера данных для минимизации трафика при передаче субъективных характеристик объектов на изображении трехмерной сцены // Телекоммуникации и информационные технологии. 2021. Т. 8. № 2. С. 96-100.
20. *Гадасин Д.В., Кольцова А.В., Полякова А.Н.* Модель построения кластера для пограничных вычислений // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2020. № 1. С. 86-92.
21. *Усачева Д.И., Шишкин М.О., Гадасин Д.В., Гузев А.В.* Применение OLAP-технологий для анализа многомерных данных в контакт-центре // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Т. 6. № 1. С. 142-149.
22. *Гадасин Д.В., Кузин И.А.* Модель представления цветовых и глубинометрических характеристик объектов на изображении // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11. № 1. С. 31-38.
23. *Гадасин Д.В., Нестерова Е.А.* Особенности проведения практических занятий по дисциплине мультимедийные информационные системы для стадии "исследование и обоснование создания информационной системы" // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2021. Т. 10. № 1. С. 15-21.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТРОЙСТВА ГРУБОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА

**Ву Ши Дао**

*Московский технический университет связи и информатики, аспирант, Москва, Россия*  
[vusydaomtusi@gmail.com](mailto:vusydaomtusi@gmail.com)

**Горгадзе Светлана Феликсовна**

*Московский технический университет связи и информатики, профессор, д.т.н., Москва, Россия*  
[svetlana-gorgadze@yandex.ru](mailto:svetlana-gorgadze@yandex.ru)

### **Аннотация**

*Рассмотрена функциональная схема устройства грубой оценки параметров синхронизации периодического шумоподобного сложного сигнала с прямым расширением спектра. Основу устройства составляет блок ускоренной цифровой свертки принимаемого и опорного сигналов. В качестве основного критерия эффективности его работы рассматривается длительность времени вхождения в синхронизм с принимаемым сигналом по параметрам синхронизации в зависимости от отношения сигнал/шум на входе приемника. Как показано, эта длительность связана с длиной псевдослучайного кода, на основе которого сформирован сигнал, энергию которого необходимо накопить в устройстве свертки для обеспечения заданных значений вероятностных характеристик правильной оценки параметров синхронизации с заранее известными погрешностями.*

**Ключевые слова:** *Грубая оценка параметров синхронизации, синхронизация шумоподобного сигнала с прямым расширением спектра, цифровая свертка принимаемого и опорного сигналов, вероятностные характеристики оценки параметров синхронизации, цифровое устройство свертки псевдослучайных последовательностей.*

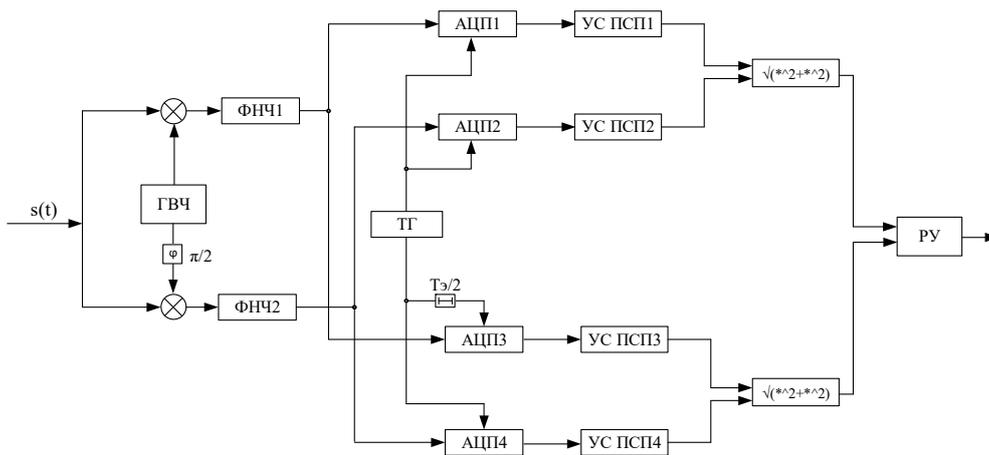
### **Введение**

Грубая оценка параметров синхронизации шумоподобного сложного сигнала (СлС) – частоты и задержки по времени – обычно осуществляется с заранее известной точностью, определяющей размеры проекции основного пика модуля его функции неопределенности (ФН) на плоскость частота-время, над которой она строится, формой этого пика и отношением сигнал/шум на входе решающего устройства (РУ) приемника [1-3]. Формально такая оценка соответствует процедуре обнаружения-различения квазиортогональных сигналов, являющихся различимыми копиями принимаемого сигнала, сдвинутыми друг относительно друга по частоте и времени, на фоне белого гауссовского шума [1]. При этом ФН, вычисляемая в приемнике, формируется как множественная свертка принимаемого и опорных СлС [4].

Целью работы является разработка методики исследования эффективности грубой оценки параметров синхронизации периодического шумоподобного СлС с учетом ограничений на длительность псевдослучайной последовательности (ПСП), которая может обрабатываться в устройстве его цифровой свертки. Отметим, что периодические СлС с прямым расширением спектра часто используются в различных цифровых радиосистемах в качестве синхросигналов, а также в спутниковых радионавигационных системах [3,4].

### **Функциональная схема устройства грубой оценки параметров синхронизации**

В соответствии с критерием максимального правдоподобия грубая оценка частоты и задержки по времени СлС, формируемого на основе двоичной ПСП, на фоне белого гауссовского шума может осуществляться в устройстве, функциональная схема которого приведена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Функциональная схема устройства грубой оценки параметров частоты и задержки по времени

Его успешная работа, ориентированная только на оценку задержки СлС по времени, возможна лишь в случае, если отклонение его несущей частоты от известного ее значения не больше, чем это допустимо [1,2,6-8]. Поэтому в случае, если базовым элементом приемного устройства является цифровое устройство свертки ПСП (УСПСП), на основе которой сформирован СлС, то необходима последовательная дискретная перестройка сигнала опорной частоты на его входе с целью выделения соответствующего видеосигнала. В более сложном варианте устройства грубой оценки параметров синхронизации необходимо параллельное формирование опорных частот с одинаковым шагом по частоте, перекрывающих всю область неопределенности СлС по частоте, или ее часть. В последних случаях необходимо одновременно использовать УСПСП, число которых соответствует числу формируемых опорных частот. Таким образом, будет реализована и грубая оценка частоты принимаемого СлС.

На рисунке 1 показан блок оценки времени задержки СлС, когда генератор высокой частоты (ГВЧ) формирует одну опорную частоту  $f_0$ , то есть для синфазного канала - сигнал  $2 \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$ , а для квадратурного канала - сигнал  $-2 \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$ . Тогда при действии на входе приемника аддитивной смеси полезного СлС  $s(t)$  и белого гауссовского шума сигнальная составляющая на выходе ФНЧ1 будет формироваться как функция  $Re[\dot{S}(t) \exp(j(2\pi\Delta f t + \varphi))]$ , а на выходе ФНЧ2 - как  $Im[\dot{S}(t) \exp(j(2\pi\Delta f t + \varphi))]$ , где  $\dot{S}(t)$  - комплексная огибающая  $s(t)$  [2],  $\Delta f$  - разница между  $f_0$  и несущей частотой  $s(t)$ , а  $\varphi$  - случайный сдвиг фазы между сигналами этих частот. Далее, с целью использования цифрового устройства свертки ПСП (УСПСП) полученные сигналы необходимо дискретизировать по времени с помощью АЦП с тактовой частотой  $f_T$ , вырабатываемой тактовым генератором (ТГ) и, согласно теореме Котельникова, в два раза превышающей тактовую частоту СлС. В данном случае  $f_T$ , вырабатываемая ТГ, должна быть равна тактовой частоте СлС  $1/T_s$ , а ее удвоение реализуется путем вторичной дискретизации сигнала с той же частотой, но со сдвигом на половину длительности элементарного символа СлС, где  $T_s$  - длительность его элементарного импульса.

Необходимо учитывать, что  $f_T$  в действительности не может точно соответствовать тактовой частоте принимаемого сигнала из-за нестабильностей задающих тактовых генераторов как на передающей, так и на приемной стороне. Кроме того, на этапе грубой оценки параметров синхронизации тактовая синхронизация принимаемого сигнала еще не может быть произведена. В случае малых отношений сигнал/шум, когда последний в сотни раз может превосходить уровень полезного сигнала на входе приемника, тактовая синхронизация СлС производится лишь на последующих этапах при ее уточнении в устройстве автоматической подстройки времени [1,2].

В результате этого спустя некоторый промежуток времени на выходе любого из АЦП (АЦП1 или АЦП2) обязательно произойдет так называемое проскальзывание, то есть два отсчета СлС будут приходиться на один и тот же его элементарный импульс, либо один такой импульс будет пропущен. Но благодаря сдвигу отсчетов СлС на входах УСПСП3 и УСПСП4 относительно отсчетов на входах УСПСП1 и УСПСП2 на  $T_3/2$  проскальзывание никогда не будет происходить на входах этих устройств одновременно. Тем не менее, очевидно, что длительность СлС, обрабатываемого в любом из УСПСП, не должна быть больше длительности времени между двумя соседними проскальзываниями.

Отметим, что при известной относительной нестабильности задающих тактовых генераторов  $\delta$  эту длительность легко рассчитать, поскольку каждый следующий отсчет СлС в АЦП будет произведен не через промежуток времени, равный  $T_3$ , а через  $T_3 + \delta T_3$  или  $T_3 - \delta T_3$ . В результате, проскальзывание произойдет через  $\delta^{-1}$  отсчетов СлС, что соответствует допустимой длине ПСП, которая может обрабатываться в любом УСПСП. Предполагается, что значение  $\delta$  соответствует максимально возможному относительному отклонению частоты любого из задающих тактовых генераторов от ее номинального значения.

На выходах УСПСП получаем отсчеты по времени синфазных и квадратурных составляющих ФН СлС  $\chi(\tau, \Delta f, \varphi)$ , где  $\tau$  - сдвиг по времени принимаемого СлС относительно опорного. Для усреднения по  $\varphi$  вычисляется модуль этой функции  $|\chi(\tau, \Delta f)|$ . Решение о значении  $\tau$  в РУ принимается при превышении порогового уровня отсчетами на двух его входах, либо на любом из них.

Отметим, что в случае, если  $\Delta f$  превышает размеры проекции основного пика ФН на плоскость частота-время, то СлС с высокой вероятностью не будет обнаружен. Потому необходима последовательная перестройка  $f_0$  каждый раз на шаг, соответствующий интервалу дискретизации СлС по частоте, связанному с размерами проекции основного пика его ФН на плоскость частота-время.

### Вероятностные характеристики эффективности правильной грубой оценки параметров

Показателем эффективности грубой оценки частоты и задержки по времени СлС является вероятность его правильного обнаружения  $p_{обн}$  в одном из интервалов области неопределенности по этим параметрам при заданной вероятности ложной тревоги  $p_{лт}$  в зависимости от отношения сигнал/шум на входе решающего устройства (РУ) приемника при наличии входного сигнала. Но это отношение зависит от длительности времени накопления энергии сигнала в приемнике, поэтому при заданных  $p_{обн}$  и  $p_{лт}$  основным показателем эффективности грубой оценки параметров синхронизации будет функция от необходимой длительности этого накопления, то есть длительности СлС, свертки которого вычисляются в приемнике. Но, как показано выше, существуют ограничения на длительность ПСП, обрабатываемой в УСПСП. Поэтому с целью обеспечения требуемых значений  $p_{обн}$  и  $p_{лт}$  в устройстве грубой оценки параметров синхронизации СлС при любом отношении сигнал/шум на входе приемника можно рассматривать использование энергетического накопителя на выходе устройства свертки.

Вероятность ложного обнаружения-различения  $m$  ортогональных сигналов на фоне белого гауссовского шума можно записать в следующем виде [7]:

$$p_{лт} = 1 - (1 - p_{лт0})^m, \quad (1)$$

где

$$p_{лт0} = \int_{bq}^{\infty} z \exp(-z^2 / 2) dz = \exp(-b^2 q^2 / 2) \approx m p_{лт0} \quad (2)$$

– вероятность ложного обнаружения сигнала, в действительности отсутствующего на входе приемника при некогерентном приеме;

$$m = 2Nm_q \quad (3)$$

и в данном случае пропорционально числу двумерных интервалов области неопределенности СлС по времени и частоте, размеры каждого из которых соответствуют размерам проекции основного пика его ФН на плоскость частота-время ( $N$  – длина (период) ПСП,  $m_q = F / 2F_s$  – число опорных частот, формируемых на входе УСПСП,  $F$  и  $F_s$  – ширина области неопределенности по частоте и ширина спектра СлС соответственно);  $b$  – пороговый уровень, нормированный относительно максимального значения сигнальной составляющей на выходе УСПСП,  $q^2$  – отношение сигнал/шум по мощности на входе РУ приемника.

Как следует из (2),

$$bq = \sqrt{2 \ln\left(\frac{m}{P_{\text{лт}}}\right)}, \quad (4)$$

то есть отношение сигнал/шум, требующееся для обеспечения заданного  $p_{\text{лт}}$ , пропорционально квадратному корню из  $\ln m$ .

Вероятность правильной грубой оценки параметров синхронизации СлС [1]:

$$p_{\text{обн}} = \int_{bq}^{\infty} z \exp\left(-\frac{z^2 + q^2}{2}\right) I_0(zq) [1 - \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)]^{m-1} dz, \quad (5)$$

где  $I_0(\cdot)$  – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка. Заметим, что если функцию  $[1 - \exp(-\frac{z^2}{2})]^{m-1}$  аппроксимировать единичным скачком, то есть считать ее значения равными нулю при  $z < z_0$  и равными единице при  $z \geq z_0$ , то при  $q > z_0$  вероятность правильной грубой оценки параметров синхронизации приблизительно равна единице, где  $z_0 = \sqrt{2 \ln(m-1)}$ . На практике это невозможно, так как в этом случае  $bq$  должно быть меньше  $q$ . Но так как значение порогового уровня  $bq$  больше  $z_0$ , то вероятность правильно грубой оценки параметров синхронизации стремится к единице тогда, когда

$$q^2 > 2 \ln\left(\frac{m}{P_{\text{лт}}}\right) \quad (6)$$

Из (6) следует, что для увеличения вероятности правильной оценки параметров синхронизации необходимо увеличивать отношение сигнал/шум на входе РУ.

При заданных  $p_{\text{обн}}$  и  $p_{\text{лт}}$  необходимое отношение сигнал/шум на входе РУ приемника, то есть  $q^2$ , определяется отношением шум/сигнал на его входе  $\left[\frac{P_{\text{ш}}}{P_{\text{с}}}\right]_{\text{вх}}$  и длительностью времени накопления энергии периодического сигнала в нем, то есть от величины  $kN$ , где  $k$  – доля периода ПСП или число ее периодов, на основе которых сформирован СлС, энергия которого накапливается в приемнике. Таким образом, на выходе устройства свертки СлС максимальное значение отношения сигнал/шум составит  $q^2 = kN / \left(\left[\frac{P_{\text{ш}}}{P_{\text{с}}}\right]_{\text{вх}} + \sigma^2\right)$ , где  $\sigma^2$  – дисперсия боковых пиков нормированной автокорреляционной функции (АКФ) ПСП длиной  $kN$  [4]. В данном случае рассматривается гауссовская аппроксимация боковых пиков АКФ, значения  $\sigma^2$  которых для типичных типов ПСП, использующихся для формирования СлС, исследованы и приведены в таблицы 3.2.7 из [4].

Тогда согласно [9]

$$p_{\text{обн}} = \int_{bq}^{\infty} z \exp\left(-\frac{z^2 + q^2}{2}\right) I_0(zq) dz \quad (7)$$

Отметим, что при  $k < 1$  в УСПСП вычисляется так называемая аperiodическая автокорреляционная функция (АПАКФ) сегмента ПСП, при  $k = 1$  – ее периодическая автокорреляционная функция (ПАКФ), при  $k > 1$  – комбинация этих функций.

Для случая формирования СлС на основе М-последовательности (МП) рассчитанные зависимости  $p_{\text{обн}}$  от  $\left[\frac{P_{\text{ш}}}{P_{\text{с}}}\right]_{\text{вх}}$  при  $p_{\text{лт}} = 10^{-4}$  и  $10^{-6}$ ,  $k = 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 50$ ,  $m_{\text{и}} = 10$  приводятся на рис. 2 и рис 3. При расчетах учитывалась оконная функция Дольфа-Чебышева, используемая при формировании СлС [11].

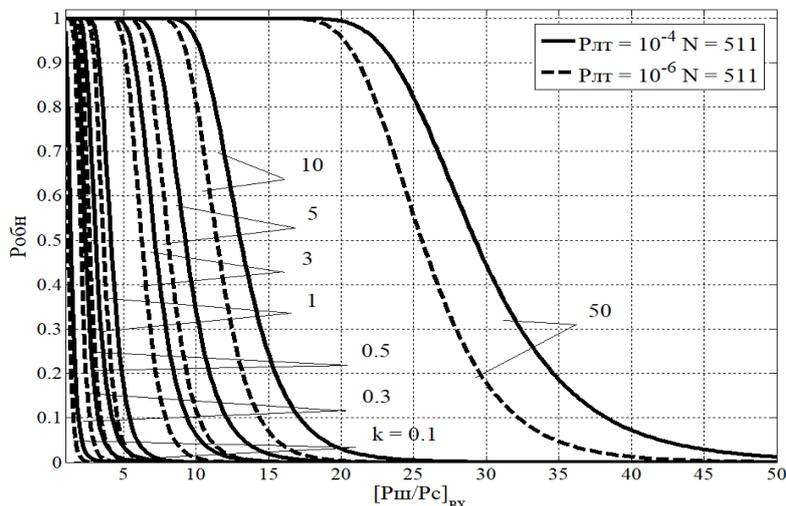


Рис. 2. Вероятностные характеристики правильной грубой оценки параметров синхронизации СлС на основе МП при  $N = 511$ .

Как следует из анализа этих рисунков, уровень боковых пиков АКФ СлС влияет на вероятность правильной грубой оценки их параметров синхронизации только при малых отношениях шум/сигнал на входе приемника, меньших 10 (то есть, когда шум по мощности превосходит полезных сигнал не более чем в 10 раз). При слабых сигналах, когда требуется накапливать энергию нескольких десятков периодов СлС, можно не учитывать характеристики корреляционных функций используемых ПСП, поскольку основное влияние на вероятность правильной грубой оценки параметров синхронизации оказывает уровень шума на входе приемника.

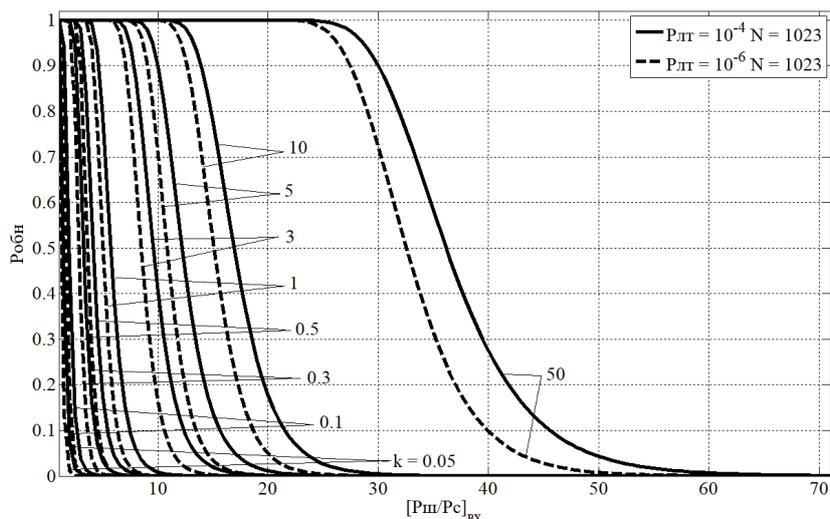
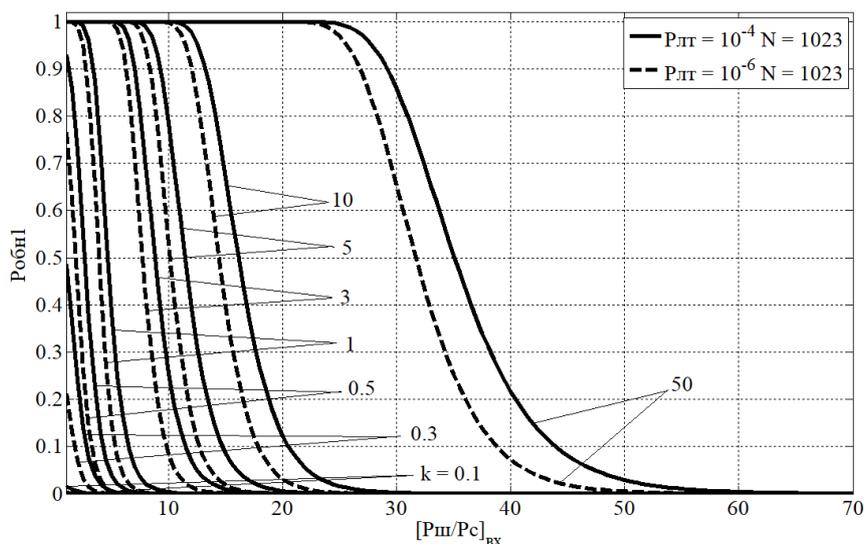


Рис. 3. Вероятностные характеристики правильной грубой оценки параметров синхронизации СлС на основе МП при  $N = 1023$

Рассматриваемое устройство грубой оценки параметров синхронизации СлС может использоваться и при наличии на входе приемника нескольких копий одного и того же СлС, сдвинутых друг относительно друга по времени больше, чем на  $T_3$ , и, возможно, по частоте.

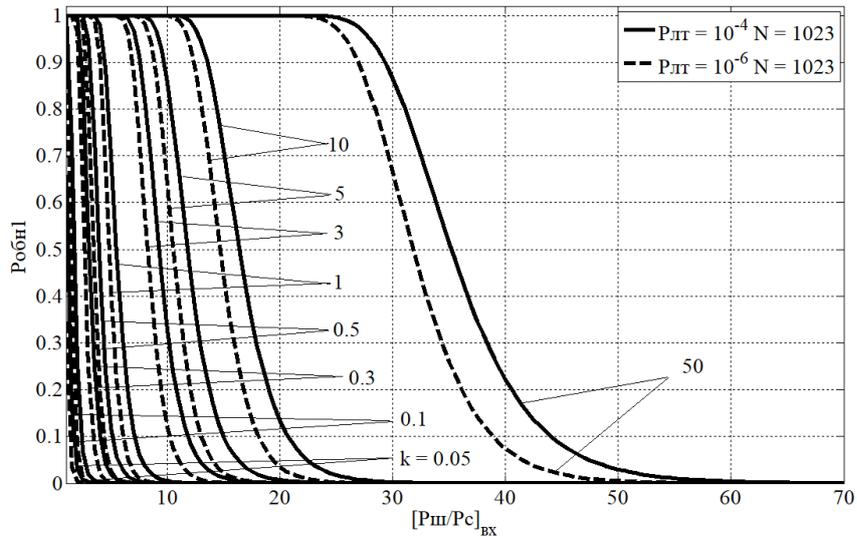
В этом случае  $q^2 = kN / \left( \left[ \frac{P_{ш}}{P_c} \right]_{вх} + N_c \sigma^2 \right)$ , где  $N_c$  – число копий одного и того же СлС, одновременно присутствующих на входе приемника. Кроме того, вероятность правильной грубой оценки параметров синхронизации  $p_{обн1} = p_{обн}^{N_c}$ . Соответствующие вероятностные характеристики в случае присутствия на входе приемника одновременно трех СлС, сформированных на основе МП, приводятся на рис. 4, а на основе кодов Голда – на рисунке 5.



**Рис. 4.** Вероятностные характеристики правильной грубой оценки параметров синхронизации одновременно трех копий одного и того же СлС, рассогласованных по времени и частоте, при их формировании на основе МП с  $N = 1023$ .

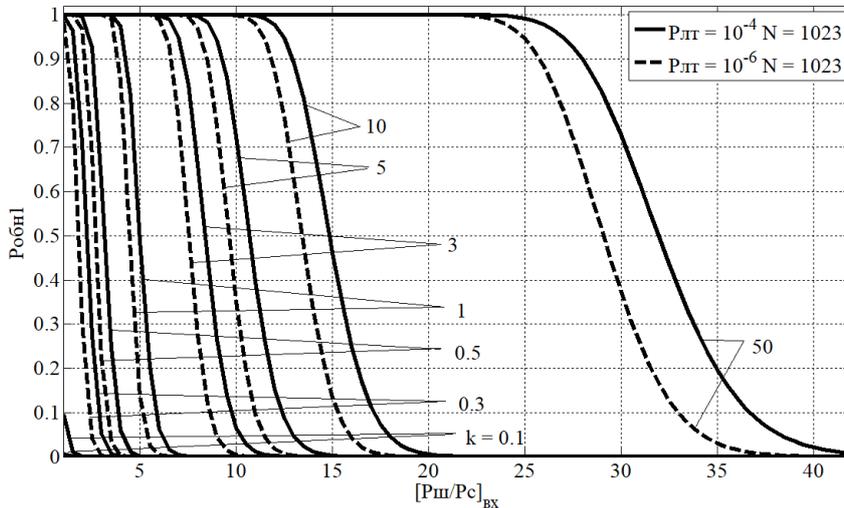
Как следует из анализа этих рисунков, при увеличении  $N_c$  характеристики эффективности оценки параметров синхронизации одновременно всех копий СлС, рассогласованных по времени и частоте, незначительно ухудшаются, по сравнению со случаем оценки параметров лишь одного сигнала. Кроме того, при слабых сигналах, то есть при больших значениях  $\left[ \frac{P_{ш}}{P_c} \right]_{вх}$  не имеет значения, какие ПСП используются для формирования СлС – МП или коды Голда.

Кроме того, можно рассматривать вариант УСПСП, содержащий блоки вычисления сверток сразу нескольких ожидаемых СлС, сформированных на основе разных ПСП одного и того же типа. В этом случае для расчета вероятностных характеристик правильной оценки параметров синхронизации в вышеприведенных формулах необходимо вместо  $t$  использовать  $tN_c$ , где  $N_c$  – число разных сигналов, одновременно присутствующих на входе приемника.



**Рис. 5.** Вероятностные характеристики правильной грубой оценки параметров синхронизации одновременно трех копий одного и того же СлС, рассогласованных по времени и частоте, при их формировании на основе кода Голда с  $N = 1023$ .

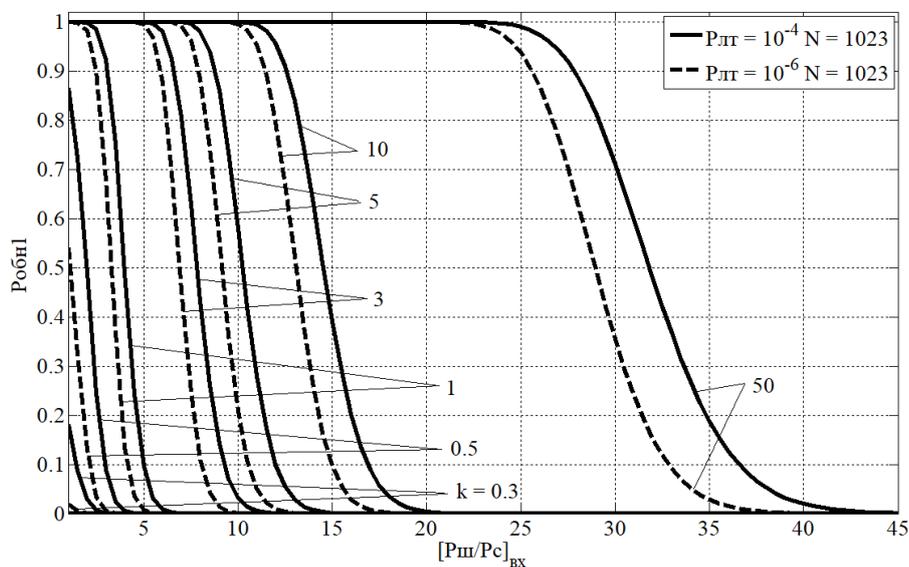
Кроме того,  $q^2 = kN / \left( \left[ \frac{P_{ш}}{P_c} \right]_{вх} + N_c (\sigma^2 + \sigma_{взл}^2) \right)$ , а результирующая вероятность правильной грубой синхронизации так же, как и в предыдущем случае  $p_{обнл} = p_{обн}^{N_c}$ , где  $\sigma_{взл}^2$  – дисперсия взаимно корреляционных функций ПСП. Значения этих дисперсий также приведены в [4]. Вероятностные характеристики правильной грубой оценки параметров синхронизации трех СлС, сформированных на основе разных МП, в общем случае рассогласованных по времени и частоте, приводятся на рисунке 6, а на основе кодов Голда [10] – на рисунке 7.



**Рис. 6.** Вероятностные характеристики правильной грубой оценки параметров синхронизации одновременно трех разных СлС, рассогласованных по времени и частоте, при их формировании на основе МП с  $N = 1023$ .

Как следует из анализа этих рисунков, вероятностные характеристики правильной грубой оценки параметров синхронизации одновременно нескольких разных СлС, рассогласованных по времени и частоте, несколько хуже, чем в случае рассогласованных копий одного и того же сигнала. Это

объясняется увеличением числа двумерных интервалов области неопределенности  $m$ , которые необходимо просматривать в РУ.



**Рис. 7.** Вероятностные характеристики правильной грубой оценки параметров синхронизации одновременно трех разных СлС, рассогласованных по времени и частоте, при их формировании на основе кодов Голда с  $N = 1023$ .

### Длительность времени грубой оценки параметров синхронизации

Длительность времени грубой оценки параметров синхронизации зависит от времени вычисления сверток в УСПСП. Формально это время пропорционально числу блоков, приведенных на рис.1 и равному числу опорных частот, перекрывающих часть области неопределенности СлС по частоте. Очевидно, что минимальная длительность времени вхождения в синхронизм по частоте и времени будет в случае, если формируемая сетка частот перекрывает сразу всю область неопределенности по частоте, а максимальная – если опорные частоты формируются по очереди.

Если рассматривать только один блок устройства, приведенный на рис.1, то длительность времени его работы определяется быстродействием цифрового сигнального процессора, на котором реализована процедура свертки ПСП, длиной обрабатываемой ПСП  $kN$ , а также алгоритмом вычисления свертки. В случае простого корреляционного алгоритма вычислительная сложность процедуры цифровой свертки пропорциональна  $(kN)^2$ , но известны ускоренные алгоритмы [5].

### Заключение

Разработана методика оценки эффективности правильной грубой оценки параметров синхронизации шумоподобных сложных сигналов с заранее известной точностью, соответствующей размерам проекции основного пика их функции неопределенности на плоскость частота-время, над которой она строиться. Эта эффективность соответствует длительности времени накопления энергии СлС, необходимой для его обнаружения с заданными заранее значениями их вероятностных характеристик при любом отношении сигнал/шум на входе приемника. Основу методики составляет гауссовская аппроксимация боковых пиков автокорреляционных функций СлС и пиков их взаимно корреляционных функций.

### Литература

1. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связи, 1985. 384 с.
2. *Горгадзе С.Ф.* Синхронизация в инфокоммуникационных системах: учебное пособие. М.: МТУСИ, 2022. 48 с.
3. *Beard C., Stallings W.* Wireless Communication Networks and Systems. L.: Pearson, 2016.
4. *Пестряков В.Б., Афанасьев В.П., Гурвиц В.Н.* Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / Под ред. В.Б. Пестрякова. М.: Сов. радио. 1973. 424 с.
5. *Ву Ш.Д., Горгадзе С.Ф.* Устройство ускоренного поиска шумоподобного сигнала // Технологии информационного общества. Сборник трудов XVI Международной отраслевой научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 88-90.
6. *Гут Т.М., Горгадзе С.Ф.* Характеристики ковариационных функций и оценка параметров шумоподобного сигнала // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Т. 6. № 2. С. 35-41.
7. *Горгадзе С.Ф.* Ускоренный цифровой алгоритм синхронизации шумоподобных сигналов по времени и частоте // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2016. Т. 7. № 4. С. 16-18.
8. *Горгадзе С.Ф., Бойков В.В.* Измерительные сигналы с многопозиционными поднесущими для спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 3. С. 264.
9. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966. 219 с.
10. *Кузнецов В.С., Шевченко И.В., Волков А.С., Солодков А.В.* Генерация ансамблей кодов Голда для систем прямого расширения спектра/ Труды МАИ. 2017. Выпуск No 96. <http://trudymai.ru/>
11. *Дворкович В.П., Дворкович А.В.* Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2014. 105 с.

## ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ КЛЮЧЕЙ ШИФРОВАНИЯ

**Магеррамов Вагиф Али оглы,**

*Азербайджанский Технический Университет, профессор, доктор физико-математических наук,  
Баку, Азербайджан,  
[mvg476@mail.ru](mailto:mvg476@mail.ru)*

**Мансуров Тофиг Магомед оглы,**

*Азербайджанский Технический Университет, профессор, доктор технических наук,  
Баку, Азербайджан  
[tofiq-mansurov@rambler.ru](mailto:tofiq-mansurov@rambler.ru)*

### **Аннотация**

*На основе SMART полупрозрачных зеркал разработаны оптические ответвители, разветвители, коммутаторы, мультиплексоры, демультимплексоры и принцип распределения секретных ключей шифрования. Указано, что имеется возможность повышения быстродействия процесса коммутации и мультиплексирования информационных потоков по сравнению с существующими механическими коммутаторами. Наряду с этими предложено схемное решение построения полностью оптической сети, позволяющее формировать и распределять сформированных секретных ключей шифрования между разрешенными санкционированными пользователями.*

**Ключевые слова:** *Спутанное состояние фотонов, квантовая механика, секретный ключ, защищенный канал связи, конфиденциальная информация, несанкционированный пользователь, коммутатор, оптический шум, статистика фотона.*

### **Введение**

В решении Нобелевского комитета указано, что лауреаты Нобелевской премии в 2022 году провели эксперименты со спутанными состояниями фотонов и тем самым доказали нарушения неравенств Белла и положили начало квантовой информатики.

Исследование по этому направлению началась еще в середине 1930-х годов со статьи Альберта Эйнштейна, Бориса Подольского и Натана Розена, в которой авторы пытались доказать противоречивость квантовой механики. Понять этот парадокс позволил в конечном итоге лучше понять квантовую основу этого направления.

Идея защиты передаваемой информации с применением квантовых методов была предложена в 1970 году Стефаном Вейснером. Спустя некоторого времени и зная работу С. Вейснера Ч. Беннет и Ж. Brassard, предложили сформировать и передавать ключ секретности с применением квантовых объектов. Кроме того, в 1984 году была предложен принцип создания защищенного оптического канала связи с использованием отдельных квантовых состояний [1]. Всесторонний обзор теоретических и экспериментальных работ в данном направлении был сделан в работе [2].

В последние годы развитие квантовой физики позволило превратить абстрактные идеи использования квантовой механики в практическое применение по защите информации при передаче по оптическому каналу связи, созданными с использованием оптического волокна.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования в области квантовой защиты информации и предложенные протоколы для передачи данных и ключа шифрования в простом случае участвует два санкционированных пользователей. При одновременном участии большого числа санкционированных пользователей практически затрудняется обеспечения единство

переданного ключа шифрования с целью обеспечения защиты информации или его конфиденциальности.

Впервые эта задача была рассмотрена в работе [3] и предложен существенно отличающийся новый подход, суть которого заключается в том, что для передачи конфиденциальной информации по оптическим линиям связи передача ключа шифрования осуществляется в том случае, если санкционированные пользователи полностью убедятся в отсутствии несанкционированных проникновений к оптическим линиям связи. Наряду с этим, для обнаружения несанкционированных пользователей производится контроль параметров оптического шума в канале связи с заданной статистикой фотона, которая известна только разрешенным, т.е. санкционированным пользователям.

В этом случае основной задачей защиты информации является поиск необходимых алгоритмов и разработка функциональной схемы для практической реализации процесса передачи конфиденциальной информации с использованием конкретных квантовых объектов, т.е. одиночных фотонов [2,4].

Система кодирования данных в системах телекоммуникации основана на использовании ключей шифрования, а для расшифровки, которых необходимо определить большие числа и раскладывать их на простые множители. Это связано с тем, что быстрые алгоритмы определения больших чисел не существует в современных компьютеров. Необходимо отметить, что для квантовых компьютеров алгоритмы определения больших чисел разработаны, это и дает возможность обеспечения необходимой секретности.

Однако имеется предположения о том, что в ближайшем будущем алгоритмы больших чисел будут разработаны и как результат, приведет к разрушению система защиты информации. Поэтому для обеспечения защиты передаваемой информации в качестве ключей секретности можно использовать последовательности случайных чисел, используемые всего один раз, для передачи защищенной информации от пункта отправителя к пункту получателя, которые не могут быть определены объектами несанкционированного проникновения. В соответствии с утверждением [5], передача данных не поддается расшифровке в том случае, если передаваемая информация зашифрована одноразовым случайным ключом шифрования. В данном случае длина ключа секретности равна длине передаваемой информации и этого ключа секретности знают только санкционированные пользователи.

Целью данной работы является разработка квантовой информационной системы безопасного распределения ключей шифрования в оптических телекоммуникационных сетях между избранными (4-х и более) санкционированными пользователями, а также способов формирования, передачи и приема ключей шифрования в реальном масштабе времени. В связи с этим возникает необходимость разработки ответвителей, разветвителей, коммутаторов, мультиплексоров, демультиплексоров и др.

### **Новый подход коммутации и мультиплексирования информационных потоков.**

В процессе разработки волоконно-оптических сетей связи приходится сталкиваться с рядом сложных научно-технических проблем. Одной из них является создание быстродействующих разветвителей информационных оптических потоков, выполняющие функции, как оптического коммутатора, так и мультиплексора, обеспечивающие требуемую точность пространственной модуляции, либо спектральной селекции потока и тем самым стабилизацию положения оптического потока в фокальной поверхности приемника или передатчика оптической информации [6, 7].

Основным преимуществом оптических телекоммуникационных сетей является их практически неограниченная скорость передачи конфиденциальной информации и большая пропускная способность. Основной отличительной стороны данного свойства заключается в многократном увеличении скорости передачи конфиденциальной информации по волоконно-оптическим каналам связи. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что проведения исследования основных компонентов оптических телекоммуникационных сетей является задачей теоретического и экспериментального исследования.

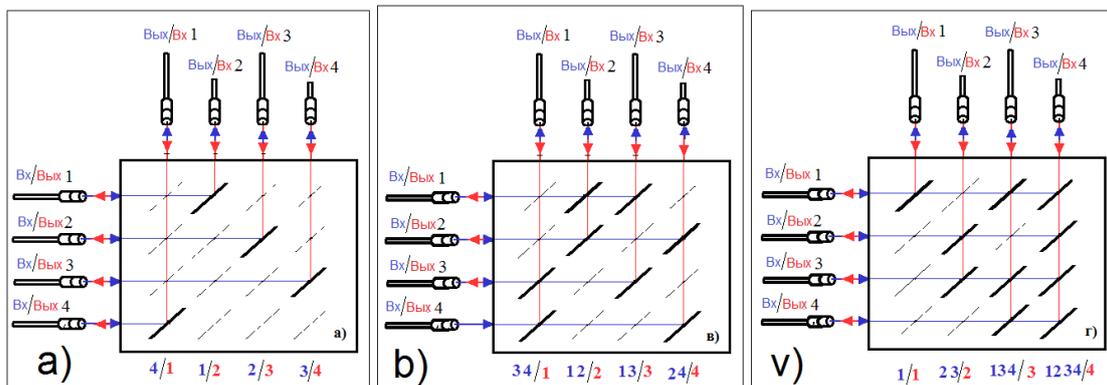
Наряду с улучшением параметров и оптимизацией конструкций существующих волоконно-оптических кабелей связи, стоит вопрос о создании высоконадежных и доступных по стоимости компонентов оптических систем передачи оптического излучения, без применения которых ограничивается возможность построения оптических сетей [8].

Как известно, оптические коммутаторы являются одним из наиболее важных компонентов оптических систем передачи информации. Применение оптических коммутаторов дает возможность автоматически управлять процессом передачи данных и проведения мониторинга по оптическим телекоммуникационным сетям.

При наличии разнообразия различных устройств, применяемых в области связи и осуществляющих коммутации оптических излучений, определяется частными особенностями их применения в конкретном виде оптической телекоммуникационной сети [9].

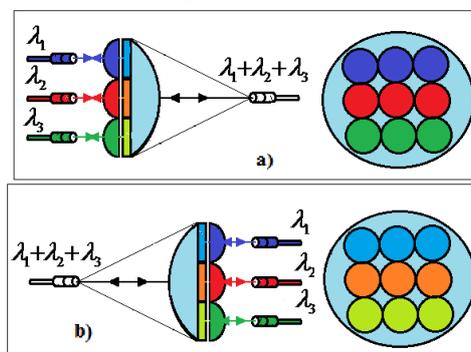
Одна из таких технологий, предложенной авторами, как принцип распределения ключей шифрования, на основе двунаправленного мультиплексирования сигналов оптического излучения рассмотрен в [7, 8].

Как известно основой построения полностью оптических сетей является создание принципиально новых схемных решений при коммутации и мультиплексировании информационных потоков. На рисунке 1 показано варианты схемных решений коммутации и мультиплексирования информационных потоков на основе подвижных smart зеркал.



**Рис. 1.** Варианты коммутации и мультиплексирования информационных потоков на основе подвижных Smart зеркал

Подобные же коммутаторы и мультиплексоры может быть созданы из сбора оптических линз в виде, показанном как на рисунке 2.



**Рис. 2.** Технология коммутация и мультиплексирования оптических потоков на основе фокусирующих линз

Все оптические фильтры изготовлены в виде полупрозрачное дихроическое зеркало работающие на избранном длине волны [8, 9].

### Принцип распределения квантовых ключей (ПРКК), построенных с применением полупрозрачных зеркал

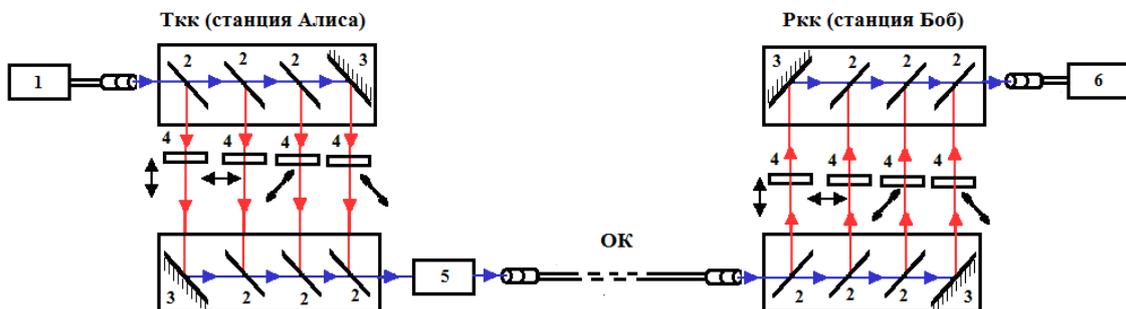
Одной из важных проблем защиты передаваемой информации по каналам связи всегда была и остается проблема правильного распределения ключей секретности между санкционированными пользователями. Можно предположить, что данная проблема решается с применением асимметричных алгоритмов шифрования передаваемой информации с закрытым ключом, который не покидает своего владельца.

В настоящее время для передачи конфиденциальной информации применяются ряд протоколов, применяемых в квантовой криптографии для распределения ключей секретности. Можно сделать вывод о том, что первой реализацией системы квантового распределения ключей секретности была поляризационная схема кодирования передаваемой информации, работающая по протоколу BB84 [10].

Наряду с этим, стойкость данного и многих других алгоритмов формирования ключей секретности на данный момент обеспечивается отсутствием необходимых мощностей для успешного проведения криптографических анализов. Исходя из этого, возникает важная необходимость разработки новых методов, технологий и аппаратных средств для распределения ключей секретности.

В настоящее время одной из таких технологий является поляризационное кодирование, которое как известно, было предложено в [6]. Принцип квантового распределения ключей шифрования основан на двунаправленном мультиплексировании потоков передачи данных с использованием отличительных особенностей оптического разветвителя и полупрозрачного зеркала.

Предложена схема установки квантовой криптографии с поляризационным кодированием, которая приведена на рисунке 3.



**Рис. 3.** Схема распределения квантовых ключей шифрования при двунаправленном мультиплексировании потоков передачи данных:  $T_{кк}$  – передатчик ключа шифрования (станция Алиса);  $P_{кк}$  – приемник ключа шифрования (станция Боб); ОК – волоконно-оптический кабель; 1 – лазерное устройство; 2 – зеркала, работающие как оптический разветвитель (ОР); 3 – зеркала отражения; 4 – поляризаторы; 5 – поглощающий фильтр; 6 – однофотонный детектор.

На оконечной передающей станции передатчик квантового ключа шифрования из полупроводникового лазера формирует короткие импульсы сигнала оптического излучения с длительностью 1,0нс.

На данной схеме лазерное устройство может работать и в непрерывном режиме. В этом случае в зависимости от требуемой плоскости поляризации короткие импульсы может быть сформированы с помощью оптическим разветвителем. Тогда умное полупрозрачное зеркало переводится в активное положение. Плоскости поляризации сформированных одиночных фотонов может быть составит  $-45^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $+45^{\circ}$  и  $90^{\circ}$ . Для передачи одного фотона с требуемой плоскости поляризации активизируется соответственно этой степени поляризации, избранной умными полупрозрачными зеркалами в  $T_{кк}$ . С другой стороны, имеется возможность одновременной передачи имеющихся четырех типов поляризации.

Условие однофотонности обеспечивается ослаблением данных импульсов поглощающими фильтрами. Тогда среднее количество фотонов в одном импульсе необходимо выбрать менее одного. После формирования фотон излучается по волоконно-оптической линии связи к приемной станции квантового ключа дешифрования (станции Боб).

Как известно, важным условием правильного детектирования информации приемной станцией (станция Боб) является сохранение существующей поляризации фотонов в волоконно-оптической линии связи.

Импульсы, достигая приемной станции квантового ключа (станции Боб), проходят через определенное количество умных полупрозрачных зеркал и в итоге автоматически определяется исходное состояние поляризации фотонов. Поступая в однофотонный детектор из фотодиода детектируется в соответствующие коды состояния. Здесь необходимо отметить что, если внешний злоумышленник на тракте передачи от Алисы к Бобу будет замечен передающей или приемной станцией конфиденциальной информации, то приемо-передающая станция со своей стороны имеет возможность автоматически изменить направления передачи конфиденциальной информации, отмеченное в [6,7,11,12].

Предложенная функциональная схема установки квантовой криптографии с поляризационным кодированием отличается своей простотой реализации, быстродействием процесса детектирования и высокой надежностью. После разработки SMART оптических разделителей (OP), мультиплексоров (MUX), демультимплексоров (DMUX) и принципа распределения квантового ключей (ПРКК) секретности можно разработать оптическую сеть, которая может формировать и распределять квантовые ключи секретности между пользователями.

### **Построение оптической сети, формирующей и распределяющей квантовые ключи секретности между санкционированными пользователями**

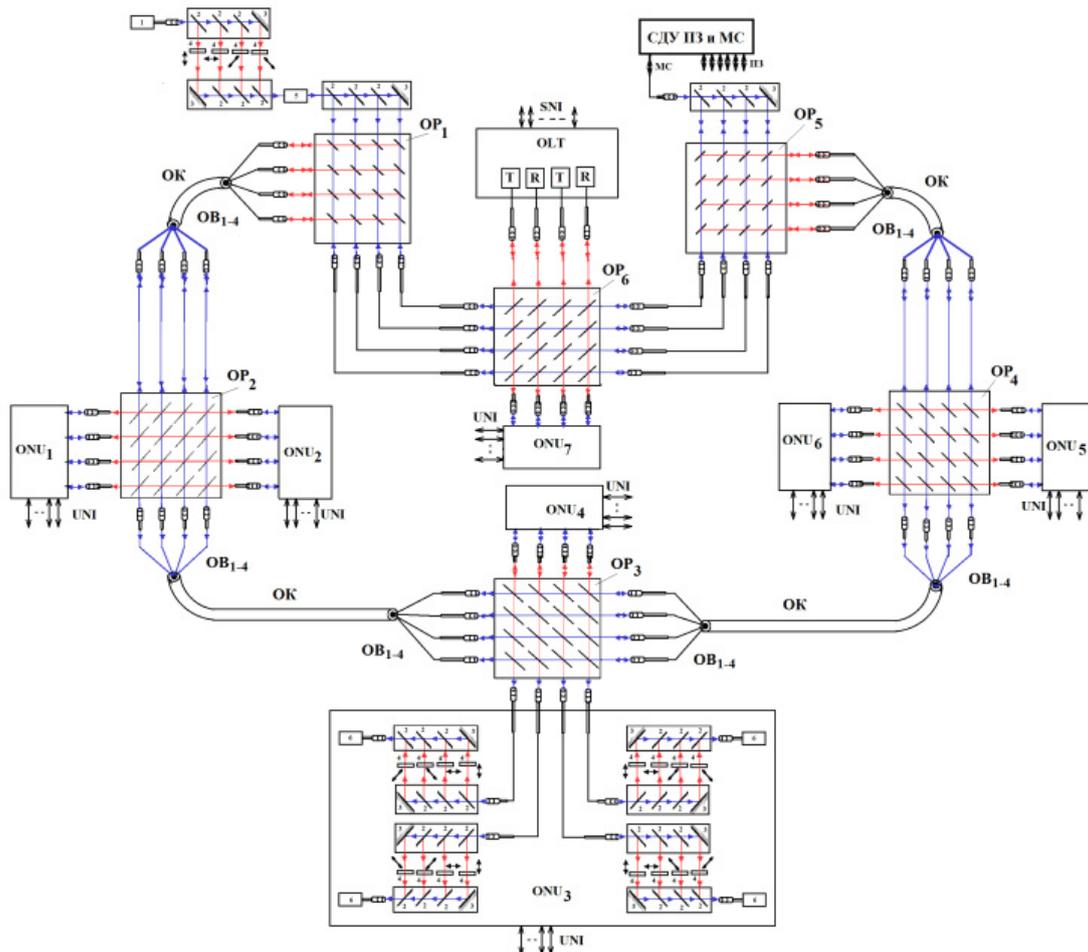
Как было отмечено в работе [3], наиболее приемлемыми способами защиты передаваемой информации по волоконно-оптической линии связи, являются методы квантовой криптографии.

По предложенной схеме, не имеется возможность разработки системы формирования и распределения ключей секретности между двумя и более санкционированными пользователями.

В связи с этим, впервые в работе [9] предлагался новый подход к разработке системы, формирующая и распределяющая ключи секретности между двумя и более санкционированными пользователями.

На основе данной идеи, на рисунке 4 предложена функциональная схема оптической сети, где формируются и распределяются квантовые ключи секретности между санкционированными абонентами [13]. В данном случае, оптическая телекоммуникационная сеть, основана на принципе построения сетей с использованием оптических разветвителей с умными зеркалами, рассмотренная в работе [7].

Функционирование схемы данной оптической сети аналогично схеме, описанной на рисунке 3, а также работе сетей, описанных в работах [3,9,13]. Если обнаружены несанкционированные злоумышленники с определенными местами проникновения в среду передачи, то санкционированный пользователь известного абонентского узла отключает сеть приема информации или изменяет маршрут, используя возможности универсального оптического разветвителя [6,7].



**Рис. 4.** Функциональная схема полностью оптической сети: SNI - магистральные интерфейсы подключения; OLT – центральный узел; ONU1-ONU7 – оконечные абонентские узлы, UNI - интерфейсы абонентского подключения; т – основные и резервные передающие устройства; R – основные и резервные приемные устройства; СДУ ПЗ и МС – система проведения дистанционного управления умных полупрозрачных зеркал и мониторинга оптической сети; ОК – волоконно-оптический кабель; OB1÷4 –оптоволокна; OP1÷OP7 – оптические разветвители; 1- лазерное устройство; 2-умные полупрозрачные зеркало; 3- зеркало отражения; 4-поляризатор; 5- фильтр поглощения; 6-лавинный фотодиод.

### Заключение

Учитывая разработанных пассивных компонентов, принцип построения умных полупрозрачных зеркал, оптических разветвителей, мультиплексоров и демультиплексоров, вариант построения полностью оптической сети с использованием оптических разветвителей с умными прозрачными зеркалами, принципа распределения квантовых ключей шифрования на основе двунаправленного мультиплексирования потоков оптического излучения, позволили разработать оптическую сеть, имеющую возможность формирования и распределения квантовых ключей секретности между санкционированными пользователями.

С другой стороны, преимуществом данной оптической сети является то, что все оптические разветвители и умные прозрачные зеркала управляются дистанционным образом и все работающие оптические волокна находятся под непрерывным мониторингом на определенной длине волны, не помещающей нормальному функционированию построенной оптической телекоммуникационной сети.

### Литература

1. *Bennet C.H., Brassard G.* // Proc. IEEE Intern. Conf. on Comput. Sys. and Sign. Proces., Bangalore (India), 1984. P. 175-179.
2. *Gisin N., Ribordy G., Tittel W. et al.* Quantum cryptography // Rev. Mod. Phys. 2002. Vol. 4, pp. 145-175.
3. *Зеневич А.О.* Квантовые системы передачи ключей шифрования по волоконно-оптическим линиям связи // Материалы международной НТК «Инновационные технологии в телекоммуникации». Баку, 4-6 декабря 2019. С. 13-15.
4. *Рябцев И.И., Бетеров И.И., Третьяков Д.Б. и др.* Экспериментальная квантовая информатика с одиночными атомами и фотонами // Вестник РАН. М., 2013. Т. 83. №7. С. 606.
5. *Shannon C.E.* Communication Theory of Secret Systems // Bell Syst. Tech. Jour. 1949. Vol. 28. P. 658.
6. *Магеррамов В.А.* Принцип оптического разветвителя // Материалы международной НТК «Инновационные технологии в ТК». Баку 4-6 декабря 2019. С. 155-158.
7. *Магеррамов В.А.* Полностью оптические сети на основе Smart зеркал // Научный журнал «Проблемы инфокоммуникации». №1(11), Минск, Беларусь, 2020. С. 19-26.
8. *Магеррамов В.А., Мансуров Т.М.* Об одной технологии коммутации и мультиплексирования информационных потоков. Современные средства связи // Материалы XXVII Международной НТК 27-28 октября 2022. С. 184-186. Минск, Беларусь.
9. *Maharramov V.A.* All optical networks based on translucent mirrors // “Machine-building and Energy: New Concepts and Technologies” International Scientific-practical Conference, December 2-3, 2021, AzTU, Baku, Azerbaijan.
10. *Курочкин В.Л., Рябцев И.И., Неизвестный И.Г.* Экспериментальная установка для квантовой криптографии с одиночными поляризованными фотонами // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 6. С. 54-58.
11. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Мансуров Т.М.* Компоненты волоконно-оптических линий связи. Минск, БГАС, 2020. 336 с.
12. *Мансуров Т.М., Зеневич А.О., Мамедов И.А.* Волоконно-оптический ответвитель / переключатель мощности оптического излучения // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. М.: ИД Медиа Паблишер, 2021. №2. С. 29-36.
13. *Магеррамов В.А., Мансуров Т.М.* Новый подход к построению полностью оптических сетей для квантовой системы передачи ключей шифрования // Материалы XXVI Международной НТК «Современные средства связи». 21-22 октября 2021. Минск, Беларусь. С. 128-131.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПРИ НЕЙРОСЕТЕВОМ КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОГОДЫ

**Максимов Сергей Юрьевич,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, магистрант, Москва, Россия,*  
[sehkop@gmail.com](mailto:sehkop@gmail.com)

**Ларин Александр Иванович,**

*Московский Технический Университет Связи и Информатики, к.т.н., доцент каф. ИСУиА,*  
*Москва, Россия*  
[a.i.larin@mtuci.ru](mailto:a.i.larin@mtuci.ru)

### **Аннотация**

*В данной работе исследуется возможность и перспективность использования нечеткой логики для прогнозирования временных рядов с помощью нейронных сетей. В работе спроектирована модель краткосрочного прогнозирования погоды, с использованием нейро-нечеткой сети.*

**Ключевые слова:** *Прогнозирование погоды, нечеткая логика, машинное обучение, нейронная сеть, прогнозирование временных рядов.*

### **Введение**

В настоящее время, задача прогнозирования погоды, в основном, решается с помощью трех методов: численными методами, статистическими методами и численными методами с добавкой статистической поправки.

Все данные методы используют абсолютные значения, с большой точностью значений, которая может достигать  $1e-6$ . Если для численных методов, которые основаны на формулах, большая точность значений приводит к большей вычислительной точности, то для статистических методов каждый вариант значений, может уменьшать точность.

В данной работе исследуется возможность применения нечеткой логики при нейросетевом прогнозировании временных рядов, на основе прогнозирования погодных условий. Исследуется возможность применения оперирования в машинном обучении не абсолютными значениями показателей временных рядов, а их диапазонами значений.

Авторы данной работы решили построить модель машинного обучения для прогнозирования временных рядов, которая будет оперировать диапазонами значений. В качестве темы для применения модели, выбрана тема прогнозирования погоды.

Задача состоит в предобработке собранных данных, составлении нейронной сети, её тестировании и анализе сравнения с нейронной сетью прогнозирования погоды, которая оперирует абсолютными значениями.

Основными инструментами, используемыми в данной работе, являются описание и анализ.

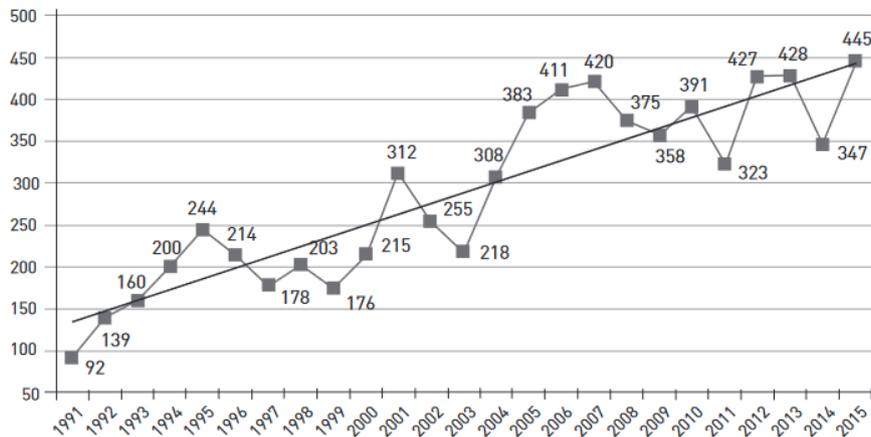
### **Актуальность темы прогнозирования погоды**

Согласно докладу Всемирной метеорологической организации, в период с 1970 по 2019 г., из-за природных бедствий, погибло более 2.06 миллиона человек, экономические убытки превышают 3.64 триллиона долларов США [1].

Согласно [2], ежегодно повышается изменчивость погоды и средняя температура земли. Наибольший ущерб от погодных явлений несут следующие отрасли: агропромышленный комплекс, энергетика, транспорт и строительство [2]. В агропромышленном комплексе, основной урон наносят осадки и экстремальные температуры. Сильный ветер способен разрушать недостроенные постройки, ЛЭП. Обильное количество осадков способно вызывать селовые и водные потоки, лавины, которые

сносят всё на своём пути. На рисунке 1 показана зависимость суммарного годового числа всех опасных гидрометеорологических явлений и неблагоприятных условий погоды за 1991-2015 гг., нанесших социальные и экономические потери.

Из данного рисунка видно, что количество опасных погодных явлений имеет возрастающую линейную зависимость.



**Рис. 1.** Зависимость суммарного годового числа всех опасных гидрометеорологических явлений и неблагоприятных условий погоды за 1991-2015 г., нанесших социальные и экономические потери [2].

Для снижения риска от воздействия опасных природных явлений необходимыми условиями являются увеличение знаний о состоянии природной среды, повышение достоверности прогнозирования природных условий и учет влияния природных явлений на безопасность деятельности. Доклад о климатических рисках на территории РФ [3] также указывает на необходимость развития климатических моделей, прогнозов и перспективных оценок изменения климата и климатических воздействий.

Актуальность данной работы состоит в том, что на момент написания, в открытом доступе не было информации об исследованиях применения нечеткой логики (лингв. переменных) для прогнозирования погодных условий с помощью нейронной сети.

### Набор данных

Для использования нейронных сетей, необходима статистика процесса. В данной работе, для наглядности и простоты анализа, решено использовать данные только одной метеостанции. Таким образом, набор данных будет содержать данные о погоде с одного места в течении долгого времени.

Исходя из актуальности, для потребителей более необходимо знать точный краткосрочный прогноз погоды, чем долговременный. Для краткосрочного прогнозирования погоды, использует почасовые данные.

В результате поиска по открытым источникам данных, было решено выбрать набор данных с сайта базы данных исторической погоды штата Миссури, США [4]. Для текущей работы, были выбраны требуемые параметры погоды, а затем выгружены из почасового архива в метрической системе, с 4-го ноября 2003 по 1-е ноября 2022 г. В таблице 1 представлено описание полученного dataset. Набор данных весит 3.17 Мб, имеет размер: 166513 строк и 6 столбцов

Таблица 1

Описание набора данных.

Название	Описание	Единицы измерения	Тип данных
Pressure	Атмосферное давление	гПа	int
Temp	Температура окружающего воздуха	°С	float
Humidity	Относительная влажность воздуха	%	int
WindSpeed	Скорость ветра	м/с	int
Precip	Количество выпавших осадков за час	мм/час	float
Month	Месяц года	-	int
Hour	Час суток	-	int

### Применение нечеткой логики

Проблема прогнозирования погоды связана с тем, что природные процессы взаимосвязаны по всей планете, а также зависят от внешних факторов, например, солнечной активности и положения луны. Таким образом, современные модели прогнозирования погоды, в качестве входных данных, стараются охватить всё больший объем информации с больших территорий.

Необходимо отметить, что модели используют абсолютные значения показателей, часто с высокой точностью. Однако, конечным потребителям, часто не нужна высокая точность. Для прогнозирования с помощью нейронных сетей, высокая точность показателей может вносить лишний шум, который будет мешать различать истинные изменения.

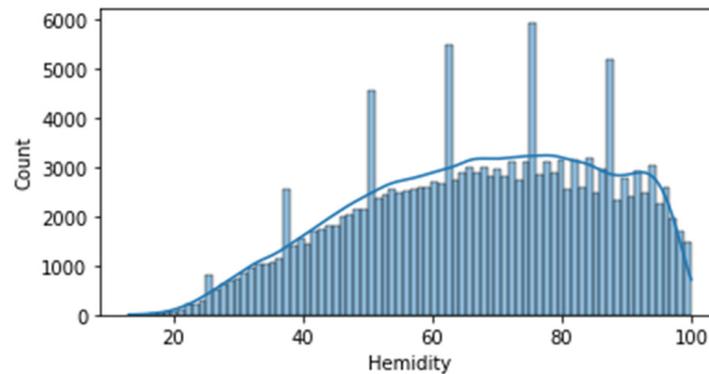
Исходя из этого, авторы данной статьи решили исследовать возможность применения нечетких множеств – лингвистических переменных, в качестве входных и выходных данных нейронной сети.

Дадим объяснения, что понимается под лингвистическими переменными. Обычно в расчетах оперируют абсолютными числами: 1.1, 1.4, 1.7, 1.9 – это четыре числа. В нечеткой логике оперируют множествами чисел, таким образом, если в диапазоне от 1 до 2 одно нечеткое множество, то все эти числа будут принадлежать к одному множеству чисел – это будет одна лингвистическая переменная.

Чаще всего в нечеткой логике, для приведения чисел к лингв. переменным и обратно используют процессы фазификации и дефазификации [6]. В данной работе, используется однозначное приведение чисел к одной из лингвистических переменных. Таким образом, число может принадлежать только к одной лингв. переменной.

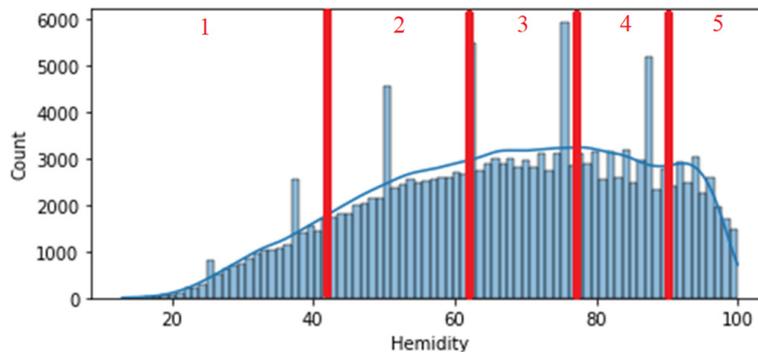
Далее необходимо выбрать размер каждой лингв. переменной. Исследовав набор данных, было установлено, что данные распределены не равномерно, на рисунке 2 показано распределение относительной влажности воздуха.

Количество и размер лингвистических переменных необходимо выбирать исходя из показателей того, что необходимо прогнозировать. К примеру, отн. влажность воздуха можно распределить на 5 лингвистических переменных: очень маленькая влажность, маленькая влажность, нормальная влажность, хорошая влажность, высокая влажность. Результат распределения чисел по лингв. переменным показан на рисунке 3.



**Рис. 2.** Распределение отн. влажности воздуха – количество значений в наборе данных при данном % отн. влажности.

В работе, почти все входные параметры были разбиты на 4 лингв. переменные. Метод выбора размера лингв. переменной аналогичен описанному и представленному на рисунке 3. В изначальном виде остались параметры «месяц» и «час суток».



**Рис. 3.** Распределение отн. влажности воздуха по пяти лингвистическим переменным. Синим обозначено распределение количества значений с соответствующим процентом влажности. Красным обозначены границы лингвистических переменных, красные цифры обозначают номера лингвистических переменных: 1 - очень маленькая влажность, 2 - маленькая влажность, 3 - нормальная влажность, 4 - хорошая влажность, 5 - высокая влажность.

### Архитектура модели

Архитектура модели нейронной сети представлена на рисунке 4. Модель состоит 5 слоёв: полносвязный – LSTM – сверточный – LSTM – полносвязный.

На входе в НС матрица 24x6: шесть входных параметров за 24 часа.

В качестве выходных параметров было решено взять наиболее влияющие на риски из-за погодных условий: температуру, скорость ветра и интенсивность осадков. Таким образом, на выходе нейронной сети матрица 12x3: 3 прогнозируемых параметра на 12 часов.

Входной слой имеет 6 полносвязных нейронов.

Второй слой – слой LSTM – долгой краткосрочной памяти. Слой состоит из 64 нейронов. Каждый нейрон имеет обратную связь, благодаря чему появляется эффект памяти

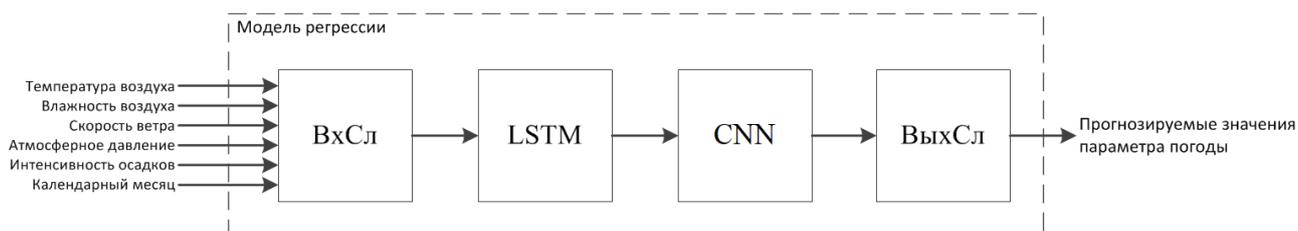


Рис. 4. Структура модели прогнозирования временного ряда.

Третий слой – одномерный CNN – сверточный слой. Данный слой имеет 64 нейрона, размер ядра в каждом равен 6, шаг движения сверки равен 1.

Четвертый слой – второй слой LSTM. Он имеет, также, 64 нейрона.

Выходной слой содержит 3 полносвязных нейрона – по количеству выходных параметров.

Все слои используют функцию активации ReLU. Для уменьшения эффекта переобучения, во всех слоях нейронной сети применена регуляризация  $L2 = 1e-4$ .

Количество нейронов в выходных слоях было выбрано в результате экспериментов. Изначально исследовалась возможность использования всего по 6 нейронов в слоях, однако данного количества не хватило для отображения изменчивости погодных условий. В общем случае, чем больше нейронов – тем лучше, однако на обучение каждого расходуется ограниченные вычислительные мощности и возможен эффект переобучения на обучающих данных. В результате, в количестве нейронов в слоях, был выбран компромисс, когда эффект переобучения не возникал и модель достаточно качественно отображала изменения временного ряда.

### Реализация

1. Первым действием импортируются необходимые для работы библиотеки. В работе использовались: tensorflow, numpy, pandas, seaborn, plotly. Tensorflow использовался для построение архитектуры нейронной сети, numpy для работы с массивами, pandas – для работы с dataframe – набором данных, sklearn – для предобработки данных, seaborn и plotly – для построения графиков.

2. Далее импортируется скачанный набор данных.

3. Для анализа и сравнения эффективности эксперимента – сравнения прогнозирования погоды в абсолютных значениях и в лингв. переменных, набор данных копируется. Первая часть – абсолютные значения. Вторая часть обрабатывается с помощью составленного алгоритма и приводится к лингв. переменным.

4. Затем оба набора данных разбиваются на временные последовательности, на которых будет обучаться модель. Составленный алгоритм делит весь набор данных на последовательности по строкам  $24+12$ : 24 часа входных данных, 12 часов выходных данных. Далее идет сдвиг на один час, таким образом алгоритм проходится по всему набору данных. К примеру, из набора данных в 10000 строк, получается 9965 входных матриц и 9965 выходных. Каждая матрица имеет размер  $24 \times 6$  и  $12 \times 3$  для входных и выходных соответственно.

5. После приготовления обучающих данных, идет построение нейронной сети. Для этого использовался модуль Keras пакета tensorflow. Данный модуль позволяет проектировать нейронную сеть по слоям.

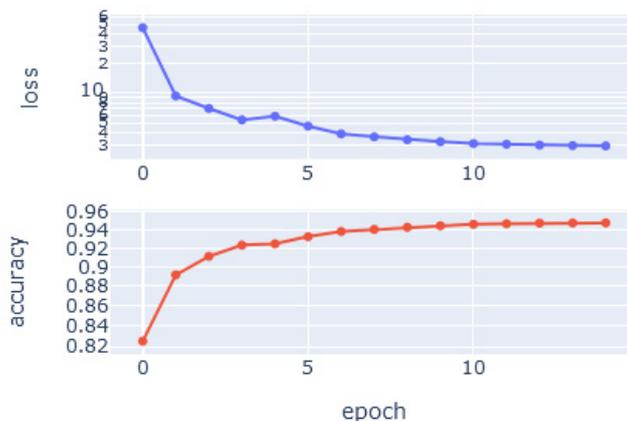
6. Для обучения нейронной сети был выбран алгоритм adam, как современный аналог обычного градиентного спуска. В качестве метрики ошибки, выбрана СКО (среднеквадратичное отклонение), так как модель прогнозирует временной ряд. Количество эпох обучения выбрано 15.

7. Результатом работы модели, при подаче на нее входной матрицы  $24 \times 6$  – 6 параметров за 24 часа, является матрица  $12 \times 3$  – 3 выходных параметра на 12 последующих после входных данных часов.

8. Модель последовательно обучалась на двух наборах данных: сначала на наборе с абсолютными значениями, затем на наборе со значениями, отнесенными к лингвистическим переменным. Для каждого процесса обучения выведены графики обучения и примеры результата предсказания.

### Анализ результатов эксперимента

На рисунке 5 показаны графики ошибки и точности модели прогнозирования погоды по абсолютным значениям. В результате обучения на 15 эпохах, ошибка СКО стала равна 2.91, а точность на обучающей выборке 0.946.



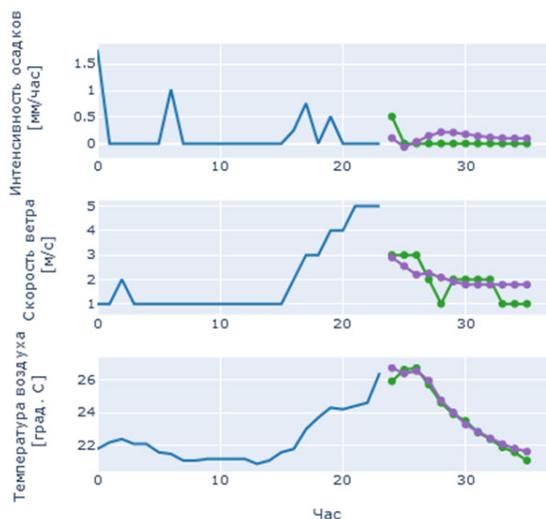
**Рис. 5.** Зависимость метрик процесса обучения нейронной сети, ошибки loss и точности accuracy, от эпохи обучения. Нейронная сеть обучена на абсолютных значениях параметров.

На рисунке 6 представлен результат предсказания такой модели. На графике идет отсчет времени в 36 часов, первые 24 часа показана входная выборка (синий график), с 24 по 36 показаны реальные данные на это время (зеленый график) и прогнозируемые нейронной сетью (фиолетовый график). Нейронная сеть обучалась на 15 эпохах в течении 58 минут.

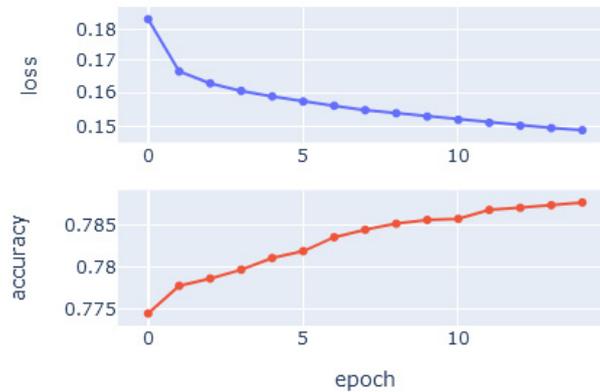
Из графика видно, что нейронная сеть достаточно точно спрогнозировала изменения температуры, скорость ветра аппроксимировала, а в интенсивности осадков незначительно ошиблась.

Далее идет обучение аналогичной нейронной сети на лингв. переменных. На выходе данной нейронной сети, также, значения интенсивности осадков, скорости ветра и температуры воздуха на следующие (от поданных на вход данных) 12 часов, в лингв. переменных. Нейронная сеть обучалась на 15 эпохах в течении 45 минут.

На рисунке 7. представлен график зависимости ошибки СКО и точности нейронной сети в зависимости от эпохи обучения. На рисунке 8 показан пример прогнозирования погодных условий



**Рис. 6.** График прогнозирования погоды. Нейронная сеть обучена на абсолютных значениях параметров. Синий цвет – входные данные, зеленый – реальные значения за прогнозируемый период, фиолетовый – прогнозируемые значения.

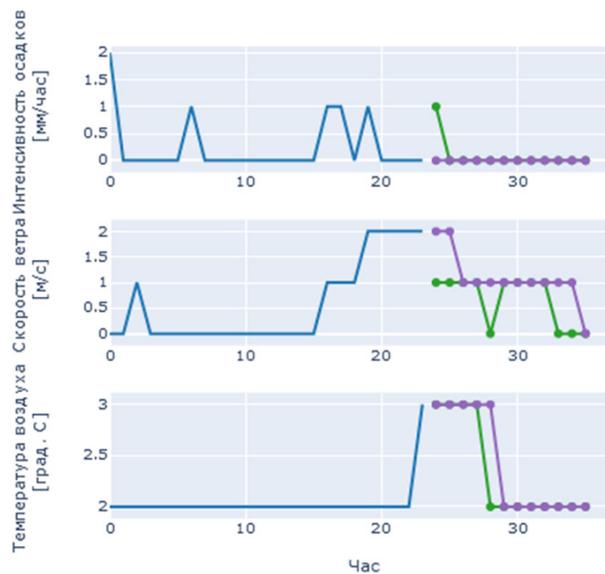


**Рис. 7.** Зависимость метрик процесса обучения нейронной сети, ошибки loss и точности accuracy, от эпохи обучения. Нейронная сеть обучена на лингв. переменных.

В результате обучения сети на 15 эпохах, СКО достиг 0.147, а точность достигла 0.788. По результату прогнозирования сетью погоды, можно сказать, что она прогнозирует общие изменения, однако плохо отображает краткосрочные изменения.

Следует отметить, что из рисунке 7 видно, что потеря СКО и точность сети прожолжают снижаться после 15 эпох обучения. В результате эксперимента, было установлено, что СКО и точность продолжают уменьшаться до 80 эпохи обучения. В этом случае, СКО равен 0.105, а точность увеличилась до 0.827, сеть обучалась около 3х часов и 35 минут.

Наибольшая скорость обучения и наименьший СКО у нейронной сети, обученной на лингв. переменных (15 эпох обучения), наибольшая точность прогноза у нейронной сети, обученной на абсолютных значениях параметров. Увеличение количества эпох обучения для нейронной сети, обучаемой на лингв. переменных, до 80, дало увеличение точности на 0.39 и уменьшение СКО на 0.42. Это значительная разница, однако точность нейронной сети, обученной на абсолютных значениях осталась выше на 0.119.



**Рис. 8.** График прогнозирования погоды. Нейронная сеть обучена на лингв. переменных. Синий цвет – входные данные, зеленый – реальные значения за прогнозируемый период, фиолетовый – прогнозируемые значения.

### Заключение

Применение лингв. переменных в области прогнозирования погоды представляет научный интерес, так как большинству пользователей не нужны абсолютные показатели погоды. Применение нечеткой логики позволяет дать более легко-воспринимаемую информацию: на улице холодно, средний дождь и слабый ветер. Также, приведение значений к лингв. переменным производит нормализацию данных.

В результате проведенного исследования, авторы установили, что применять лингв. переменные для обучения нейронной сети возможно, и данный способ достаточно эффективен. Однако, точность (ассигасы) после окончания обучения, выше у нейронной сети, обученной на абсолютных значениях. На рисунках 6 и 8 показаны графики прогнозирования погоды обеими нейронными сетями. Улучшения точности сети, обученной на лингв. переменных, возможно достичь, используя большее количество лингв. переменных, изменением архитектуры нейронной сети, а также изменением набора данных.

Авторами планируются дальнейшие исследования в области возможности применения лингв. переменных и нечеткой логики в нейронных сетях.

### Литература

1. WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes / World Meteorological Organization. 2021. 90 с.
2. Соколов Ю.И. Риски экстремальных погодных явлений / Проблемы анализа риска. №15. 2018. 6-21 с. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-6-21>.
3. Доклад о климатических рисках на территории РФ / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Климатический центр Росгидромета. СПб, 2017. 106 с.
4. Missouri Historical Agricultural Weather Database. / University of Missouri. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://agebb.missouri.edu/weather/history/>, свободный (дата обращения 20.12.2022)
5. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. Пер. с англ. 4-е изд., электронное / Лаборатория знаний. Адаптивные и интеллектуальные системы // БИНОМ. Москва, 2020. 801 с.