

УДК 621.391

ШТОМПЕЛЬ Н. А., к.т.н., доцент (Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

## Многокритериальная оптимизация кодов Лаби на основе природных вычислений

*Обоснована целесообразность применения кодов Лаби для повышения эффективности передачи информации в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов. Предложен подход к многокритериальной оптимизации данных кодов с учетом особенностей конкретных приложений на основе обобщенных процедур природных вычислений.*

**Ключевые слова:** коды Лаби, многокритериальная оптимизация, природные вычисления, телекоммуникационные сети, коммутация пакетов.

### Постановка проблемы и анализ литературы

В современных телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов помехоустойчивое кодирование применяется на разных уровнях модели взаимодействия открытых систем. На физическом и канальном уровнях для исправления и обнаружения ошибок в пакетах обычно используются классические кодовые конструкции с фиксированной скоростью кодирования (например, блочные коды). С другой стороны, для восстановления пакетов целиком целесообразно применять коды без фиксированной скорости кодирования на прикладном уровне. К данному классу кодов относятся коды Лаби, которые могут применяться отдельно или входить в состав каскадных кодовых конструкций [1]. Ключевой особенностью данных кодов является использование специального закона распределения вероятностей в процессе кодирования. При этом оптимизация данного распределения согласно различным критериям в зависимости от особенностей применения кодов Лаби позволяет повысить их эффективность [2]. Одним из таких критериев является избыточность данных кодов, для уменьшения которой в [3] предложено использовать биоинспирированный подход. На практике часто возникает необходимость использования кодов Лаби, удовлетворяющих одновременно нескольким критериям. Для решения данной оптимизационной задачи в [4] предложено использовать многокритериальный эволюционный алгоритм, основанный на декомпозиции. При этом ограничением данного подхода является учет только двух критериев – избыточности и вычислительной сложности кодирования/декодирования.

Таким образом, актуальной задачей является повышение эффективности передачи информации в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов путем разработки метода многокритериальной оптимизации кодов Лаби с приемлемой вычислительной сложностью.

### Цель статьи

Оптимизация закона распределения вероятностей, используемого при кодировании кодами Лаби, для обеспечения заданной эффективности передачи информации в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов.

### Основная часть

На прикладном уровне модели взаимодействия открытых систем протокольными единицами данных являются сообщения, которые можно рассматривать в качестве информационных символов при кодировании кодами Лаби. Тогда процесс кодирования представляет собой отображение множества информационных символов в соответствующее множество кодовых символов. Для простоты предположим, что информационные символы представляют собой однобитовые сообщения, т.е. ограничимся рассмотрением только двоичных кодов Лаби.

Процесс кодирования кодами Лаби можно представить с помощью графа Таннера, битовые вершины которого соответствуют информационным символам, а проверочные вершины – кодовым символам. Характеристики конкретного кода Лаби определяются степенью каждой вершины графа, формирующими распределения степеней битовых и проверочных вершин. При этом для стандартных кодов Лаби определяющую роль играет распределение степеней проверочных вершин, а распределение битовых вершин подчиняется биномиальному закону для кодов конечной длины, а в асимптотическом случае – закону Пуассона.

Классическое распределение степеней проверочных вершин подчиняется робастному солитонному закону, который основан на положениях теории случайных блужданий:

$$\mu(d) = \frac{p(d) + \tau(d)}{\beta}, \quad (1)$$

где  $p(d)$  – функция идеального солитонного закона, которая равна

$$p(d) = \begin{cases} \frac{1}{k}, & d = 1, \\ \frac{1}{d(d-1)}, & d = 2, \dots, k, \end{cases}$$

где  $k$  – число информационных символов;

$d$  – степень проверочной вершины (число информационных символов, участвующих в формировании кодового символа);

$\tau(d)$  – вспомогательная функция, имеющая вид

$$\tau(d) = \begin{cases} \frac{R}{dk}, & d = 1, 2, \dots, (k/R) - 1, \\ \frac{R}{k} \ln(R/\delta), & d = k/R, \\ 0, & d > k/R, \end{cases}$$

где  $R$  – параметр, учитывающий отклонение от среднего числа информационных символов из-за случайности процесса кодирования, который равен

$$R = c \cdot \ln(k/\delta) \cdot \sqrt{k},$$

где  $c$  – параметр, характеризующий среднее значение степени распределения проверочных вершин;

$\delta$  – параметр, определяющий вероятность ошибки декодирования;

$\beta$  – множитель, используемый для нормирования значений формируемой функции, имеющий вид

$$\beta = \sum_{d=1}^k p(d) + \tau(d).$$

Тогда основные этапы кодирования информационной последовательности длиной  $k$  с использованием классического кода Лаби можно представить следующим образом.

1. Определение степени кодового символа  $d$  с использованием распределения проверочных вершин (1).

2. Выбор  $d$  информационных символов из распределения битовых вершин, которое подчиняется биномиальному закону или закону Пуассона.

3. Формирование кодового символа путем суммирования по модулю 2 выбранных информационных символов.

Теоретически процесс кодирования данными кодами может быть бесконечным, однако на практике он ограничивается после формирования заданного числа кодовых символов.

Потери сообщений (пакетов) в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов формально можно представить с помощью модели канала со стиранием [1]. Для восстановления переданных информационных символов целесообразно использовать метод декодирования на основе распространения доверия, который имеет относительно низкую вычислительную сложность. Основные этапы данного метода декодирования для двоичных кодов Лаби представлены ниже.

1. Накопление  $n$  кодовых символов ( $n \geq k$ ) и получение информации о распределении степеней битовых и проверочных вершин.

2. Поиск кодового символа с единичной степенью ( $d = 1$ ) и восстановление соответствующего информационного символа, при отсутствии такого кодового символа – отказ от декодирования.

3. Обновление значений и уменьшение степеней кодовых символов, связанных с восстановленным информационным символом.

4. Если восстановлены все информационные символы, осуществляется завершение декодирования, в противном случае – переход к этапу 2.

Следует отметить, что эффективность совместного использования распределения (1) и метода декодирования на основе распространения доверия существенным образом снижается для кодов Лаби конечной длины [1]. Кроме того, в [2] показано, что целесообразно оптимизировать распределение степеней проверочных вершин в зависимости от области применения кодов Лаби в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов: надежная передача данных; передача речи (видео) с заданным качеством; использование в составе каскадных кодов и т.д.

Тогда возможными критериями оптимизации кодов Лаби могут выступать:

- избыточность  $\mathcal{E}$  – отношение между числом кодовых и информационных символов;

- частота отказов  $r$  – доля информационных символов, невосстановленных после декодирования;

- вероятность отказа  $p$  – вероятность того, что частота отказов будет выше некоторого порогового значения при заданной избыточности;

- вычислительная сложность кодирования

(декодирования)  $c$  – среднее число арифметических операций, необходимое при кодировании (декодировании) заданного количества информационных (кодовых) символов.

При этом с практической точки зрения желательно использовать единственное распределение степеней проверочных вершин для кодов Лаби разного назначения. Для получения такого «универсального» распределения целесообразно использовать подход на основе многокритериальной оптимизации, тогда соответствующую оптимизационную задачу можно представить следующим образом:

$$f(\varpi^*) = \min_{\varpi \in \varpi'} (f_1(\varpi), f_2(\varpi), f_3(\varpi), f_4(\varpi)), \quad (2)$$

$$f_1(\varpi) = \varepsilon, \quad f_2(\varpi) = r, \quad f_3(\varpi) = p, \quad f_4(\varpi) = c, \quad (3)$$

$$k = const, \quad n = const, \quad (4)$$

$$\varpi' = \left\{ \varpi \left\{ \begin{array}{l} 0 < \omega(d) < 1, \\ \sum_{d=1}^k \omega(d) = 1 \\ 1 \leq d \leq k \end{array} \right. \right\}, \quad (5)$$

где  $\varpi$  – некоторое решение, соответствующее вектору, состоящему из элементов распределения степеней проверочных вершин;

$\varpi'$  – множество допустимых решений, соответствующее группе векторов, состоящих из элементов распределения степеней проверочных вершин;

$\varpi^*$  – глобальный (локальный) минимум, соответствующий «лучшему» вектору, состоящему из элементов распределения степеней проверочных вершин.

Из анализа функций (3) и ограничений (4) и (5) следует, что сформулированная задача минимизации (2) является задачей нелинейного программирования. При этом определение глобального минимума с помощью классических методов оптимизации характеризуется значительной вычислительной сложностью, поэтому предлагается использовать обобщенные процедуры природных вычислений, которые позволяют найти субоптимальное решение с приемлемой вычислительной сложностью.

Основные этапы предлагаемого подхода к многокритериальной оптимизации кодов Лаби представлены ниже.

Этап 1. Выбор параметров кода Лаби и характеристик канала со стиранием.

Этап 2. Многокритериальная оптимизация

распределения степеней проверочных вершин с использованием природных вычислений.

Этап 3. Формирование «лучшего» распределения степеней проверочных вершин для заданных условий.

Особенности реализации данных этапов во многом соответствуют принципам однокритериальной оптимизации кодов Лаби [3], однако в качестве поискового механизма в предложенном подходе используются многокритериальные обобщенные процедуры природных вычислений.

### Выводы

Для повышения эффективности передачи информации в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов целесообразно применять коды Лаби, важным параметром которых является распределение степеней проверочных вершин. Для многокритериальной оптимизации данных кодов с учетом особенностей конкретных приложений предложен подход на основе обобщенных процедур природных вычислений.

### Список использованных источников

1. Асауленко, І. О. Аналіз методів відновлення даних у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів [Текст] / І. О. Асауленко, С. І. Приходько, М. А. Штомпель // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-технічний журнал. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 4 (113). – С. 27 – 38.
2. Zao, J. K. Design of optimal short-length LT codes using evolution strategies / J. K. Zao, M. Hornansky, P. Diao // IEEE Congress on Evolutionary Computation (10 – 15 June, 2012), Brisbane, QLD. – 2012. – P. 1-9.
3. Штомпель, Н. А. Биоинспирированный метод оптимизации кодов на основе преобразования Лаби [Текст] / Н. А. Штомпель // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Покровськ: ДонНТУ, 2016. – № 2 (23). – С. 153-157.
4. Chen, C. M. Optimizing degree distributions in LT codes by using the multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition / C. M. Chen, Y. P. Chen, T. C. Shen and J. K. Zao // IEEE Congress on Evolutionary Computation (18 – 23 July, 2010), Barcelona. – 2010. – P. 1-8.

**Штомпель М. А. Багатокритеріальна оптимізація кодів Лабі на основі природних обчислень.** Обґрунтована доцільність застосування кодів Лабі для підвищення ефективності передачі інформації у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів. Запропоновано підхід до багатокритеріальної

оптимізації даних кодів з урахуванням особливостей конкретних додатків на основі узагальнених процедур природних обчислень.

**Ключові слова:** коди Лабі, багатокритеріальна оптимізація, природні обчислення, телекомунікаційні мережі, комутація пакетів.

---

**Shtompel M. Multi-objective optimization Luby codes based on natural computing.** In modern packet-switched telecommunications networks error correcting coding used at different levels of the Open Systems Interconnection model. At the physical and data link layers to correct and detect errors in packets commonly used classic code constructions with a fixed coding rate (for example, block codes). On the other hand, to restore the whole packets code expedient use codes without fixed encoding rate at the application level. This class of codes are Luby codes that can be used alone or be part of the cascade code constructions. The key feature of these codes is to use the special law of probability distribution in the coding process. Wherein optimization of this distribution according to different objectives depending on the specific application Luby codes can improve their effectiveness. These objectives are redundant, failure rate, probability of failure, computational complexity of coding (decoding). In practice, there is often the need to use Luby codes simultaneously satisfy several objectives. To solve this multi-objective optimization problem an approach based on generalized procedures of natural computing is proposed. The main stages of the proposed approach are presented.

**Keywords:** Luby codes, multi-objective optimization, natural computing, telecommunication networks, packet switching.

*Надійшла 30.01.2017 р.*

***Штомпель Микола Анатолійович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: shtopel.mykola@kart.edu.ua.*

***Shtompel Mykola Anatoliiovych**, Candidate of sciences (technology), Associate professor (docent), Associate professor, Department of transport communication Ukrainian state university of railway transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: shtopel.mykola@kart.edu.ua.*