Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 5 (116). С. 67–74.
Cherepovets State University Bulletin, 2023, no. 5 (116), pp. 67–74.

Научная статья
УДК 519.725
https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-5-116-5
EDN: GNGNXS

Метод регенерационного блочного кодирования

Денис Евгеньевич Стародубцев[1], Вячеслав Алексеевич Горбунов[2]
[1]Череповецкий государственный университет,
Череповец, Россия
[2]Вологодский государственный университет,
Вологда, Россия
[1]destarodubtcev@chsu.ru✉, https://orcid.org/0009-0001-6558-1235
[2]gorbunovva@vogu35.ru

Аннотация. В статье предлагается метод регенерационного интерпретационного блочного кодирования информации, позволяющий осуществлять не только восстановление потерь блоков данных при передаче информации по зашумленному акустическому каналу связи, но и передачу вместе с исходным сообщением метаданных без внесения избыточности в его состав и структуру. В настоящее время задача оперативной регенерации блоков потерянных данных при передаче по каналам связи с шумом представляет особую значимость практически во всех современных инфокоммуникационных системах, поэтому актуальность темы представленного в статье материала имеет первостепенное значение.
Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, регенерация блоков данных, акустический канал связи, акустический корпус, канал связи с шумом, кодирование, избыточность
Для цитирования: *Стародубцев Д. Е., Горбунов В. А.* Метод регенерационного блочного кодирования // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 5 (116). С. 67–74. https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-5-116-5

Method of the regenerative block coding

Denis E. Starodubtsev[1], Vyacheslav A. Gorbunov[2]
[1]Cherepovets State University,
Cherepovets, Russia,
[2]Vologda State University,
Vologda, Russia
[1]destarodubtcev@chsu.ru✉, https://orcid.org/0009-0001-6558-1235
[2]gorbunovva@vogu35.ru

Abstract. The paper describes a method for regenerative interpretive block coding of information, which allows not only regeneration of lost data blocks when transmitting information over a noisy acoustic channel, but also transmission of metadata within the original message without redundancy

© Стародубцев Д. Е., Горбунов В. А., 2023

in its composition and structure. Nowadays, the operational regeneration of lost data blocks during transmission over noise channels is of particular significance in all modern info-communication systems, so the relevance of the topic presented in this article is of high priority.
Keywords: block coding, data block regeneration, acoustic channel, audio corpus, noisy channel, coding, redundancy
For citation: Starodubtsev D. E., Gorbunov V. A. Method of the regenerative block coding. *Cherepovets State University Bulletin*, 2023, no. 5 (116), pp. 67–74 (In Russ.). https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-5-116-5

Введение

В настоящее время наряду с традиционными каналами передачи информации, такими как проводные компьютерные сети, WI-FI и Bluetooth, все чаще используются всевозможные альтернативные им способы обмена данными. Стоит отметить, что каждый из таких нетрадиционных подходов к организации инфокоммуникационного процесса не только находит свое место среди множества уже существующих, но и обладает в каждом конкретном случае рядом неоспоримых преимуществ по сравнению со своими прямыми зарекомендованными временем конкурентами. Одним из таких нетривиальных каналов передачи данных является акустический канал. Обмен информацией посредством звукового сигнала хотя и является одним из самых древних способов информационной коммуникации, но при этом по сей день не теряет своей актуальности на фоне множества иных современных инфокоммуникационных технологий. Акустический канал передачи информации однозначно имеет следующий набор преимуществ[1]:

– возможность обмена данными как по воздуху, так и по проводу;
– отсутствие правовых ограничений, связанных с лицензированием и сертификацией в рамках существующих интерфейсов ввода-вывода информации на различных устройствах от различных производителей.

Как и практически любой существующий канал передачи информации, акустический способ подвержен воздействию большого количества шумов. Естественным следствием подобного воздействия становится потеря целых блоков передаваемых сообщений. Универсального решения для борьбы с потерями блоков передаваемых данных до сих пор не найдено. Именно по этой причине в рамках данной статьи ее авторами будет описан новый перспективный принцип регенерации сообщений, передаваемых по акустическому каналу. Существует значительное количество различных методов детектирования и исправления ошибок в передаваемом по зашумленному каналу связи сообщении, каждый из которых обладает как определенным перечнем преимуществ по сравнению с имеющимися аналогами, так и перечнем недостатков, ограничивающих горизонт практического применения соответствующего метода. Весь этот спектр методов детектирования и исправления ошибок в кодах концептуально классифицируется по двум категориям. Первая методологическая категория включает в свой состав способы детектирования и восстановления ошибок на основании предварительно вносимой в структуру передаваемого сообщения из-

[1] Удалов А. П., Супругин Б. А. Избыточное кодирование при передаче информации двоичными кодами. Москва: Связь, 1964. 270 с.; Элиас П. Безошибочное кодирование // Коды с обнаружением и исправлением ошибок. Москва, 2001. С. 59–71.

быточности[1], а вторая категория базируется на принципе преобразования исходного сообщения в определенный формат данных, являющийся непосредственно транспортировочным корпусом. Таким образом, задача восстановления потерянных при передаче по каналу связи с шумом порций информации превращается в задачу по восстановлению транспортировочного корпуса, который может представлять собой звуковой мелодический фрагмент, неподвижное изображение или любой иной из популярных форматов данных. В рамках данной статьи предлагается описание метода регенерации блоков информации путем анализа структуры акустического корпуса, в который преобразуется исходное передаваемое сообщение. Описываемый далее метод выполняет функциональное интерпретационное преобразование исходного сообщения в звуковой корпус, структура которого формируется на основании правил и законов построения классического с точки зрения сольфеджио музыкального фрагмента. Именно существующая взаимозависимость элементов гармонии и ритма внутри структуры музыкального фрагмента позволяет в результате анализа целостности и последовательности своего содержания выполнить восстановление потерянных блоков данных и, как следствие, регенерировать исходное сообщение.

Основная часть

Большинство существующих методов детектирования и исправления ошибок в блоках передаваемых сообщений основаны на принципе внесения в их структуру необходимой для обнаружения и достаточной для корректировки избыточности, которая проявляется в форме дополнительных порций из определенного числа бит информации. Такие дополнительные вспомогательные порции бит предназначены для исправления возникающих при передаче по каналу связи с шумом ошибок и их самоисправления. Принцип внесения в структуру сообщения необходимой и достаточной избыточности называют также принципом «Красной шапочки». Суть подобной ассоциации заключается в том, что волк каждый раз при встрече с Красной шапочкой забирает у нее определенное количество пирожков, которое раз за разом не достигает стола бабушки. Избыточные порции бит, вносимые в структуру передаваемых сообщений, образно связываются с некоторым дополнительным количеством пирожков, которые регулярно забирает у Красной шапочки волк. В результате такого подхода бабушка всегда гарантированно получает предназначенное ей количество пирожков. Однако очевидно, что можно пойти другим путем. Вместо того, чтобы неразумно тратить вычислительный и временной ресурсы, можно спрятать транспортируемые пирожки, например, под той же красной шапочкой или под вторым дном в корзинке. Такой принцип избежания возможных потерь данных при передаче по каналу связи с шумом имеет право на жизнь и потому представляет научный интерес. Принцип регенерации потерь блоков информации без внесения избыточности в структуру сообщения состоит в интерпретационном функциональном преобразовании самого исходного сообщения в определенный формат данных непосредственно

[1] Агеев В. М. Теория информации и кодирования: дискретизация и кодирование измерительной информации. Москва: МАИ, 1977. 59 с.; Удалов А. П., Супругин Б. А. Избыточное кодирование при передаче информации двоичными кодами. Москва: Связь, 1964. 270 с.; Элиас П. Безошибочное кодирование // Коды с обнаружением и исправлением ошибок. Москва, 2001. С. 59–71.

перед его отправкой. Применение подобного принципа для решения задачи восстановления блоков данных позволит отказаться от внесения сурогатной избыточности и получить новый спектр возможностей для организации максимально эффективного процесса обмена информацией. Стоит отметить, что преобразование исходного сообщения теоретически может осуществляться в любой формат данных. В рамках последующих статей будет описан алгоритм преобразования исходного сообщения в звуковой формат, который позволит осуществлять регенерацию потерянных при передаче данных произвольного объема. Фактически преобразование некоторого бинарного сообщения в звуковой формат переводит задачу детектирования и восстановления потерянных порций бит из плоскости традиционных методов кодирования в плоскость задач восстановления акустического корпуса, посредством которого предполагается транспортировать исходное сообщение.

Сформулированный в рамках данной статьи принцип регенерации блоков информации без внесения в ее структуру избыточности при передаче по акустическому каналу с шумом открывает в различных своих реализациях на практике следующий спектр неоспоримых возможностей (преимуществ):

– регулировать объем передаваемого сообщения, в частном случае осуществлять его минимизацию;

– передачи полезных метаданных в структуре сообщения;

– оперативного подтверждения авторства сообщения непосредственно на основании анализа его структуры;

– «импульсной» регенерации блоков потерянной информации произвольного объема.

Интерпретационное преобразование бинарного потока исходного сообщения в символьный звуковой корпус, представляющий собой упорядоченную последовательность звукосочетаний, осуществляется посредством следующего алгоритма (см. рисунок).

Алгоритм преобразования исходного потока сообщения в акустический корпус:

1. Формирование алфавита кодирующих символов A.

2. Построение на алфавите A звукосочетаний, например, C_1, C_2, C_3. При этом важно отметить, что каждое из сочетаний принадлежит лишь одному гармоническому множеству. Так, например, C_1 принадлежат множеству тоники T, C_2 принадлежат множеству субдоминанты S, а C_3 принадлежат множеству доминанты D. При этом все вышеуказанные гармонические множества не пересекаются.

3. Ввод исходных данных: потока кодируемого сообщения M и ключа кодирования K, предназначенного для описания параметров формируемой далее сети кодирования.

4. Генерация сети кодирования по ключу K, включающему в свой состав матрицу переходных вероятностей сети, вектор начальных состояний и темперальный вектор ритмических связок R_1, R_2, R_3. Цепь Маркова выполняет генерирующую функцию. Состояниями цепи являются устойчивые гармонические положения любого музыкального фрагмента: T – тоника, S – субдоминанта и D – доминанта. При этом в простейшем виде переходы осуществляются последовательно из одного состояния в другое с вероятностью 1, т. е. в генерирующей цепи Маркова отсутствуют петли. Для организации процесса формирования корпуса наряду с матрицей переходных веро-

ятностей требуется также вектор начальных вероятностей и матрица эмиссии (см. табл. 1). Вектор начальных вероятностей требуется для идентификации вероятности нахождения каждом из трех возможных состояний цепи в момент времени начала генерации корпуса. Матрица эмиссии позволяет определить продуцирование определенного звукосочетания при нахождении в некотором состоянии цепи после выполнения очередного итерационного перехода. Необходимо обратить внимание на тот факт, что формирование акустического корпуса действительно является марковским процессом, так как каждое последующее гармоническое состояние в текущий момент времени определяется исключительно настоящим состоянием и совершенно не зависит от уже пройденной в прошлом последовательности. Кроме того, на всех итерациях наблюдается ограниченный горизонт состояний.

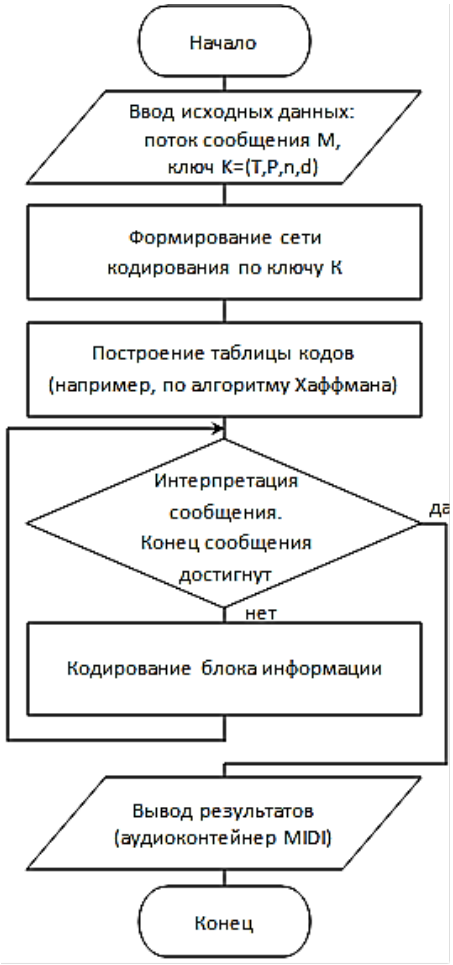

Рисунок. Интерпретационное преобразование бинарного потока исходного сообщения в символьный звуковой корпус

Таблица 1

Матрица эмиссии

Состояния	Сочетания частот		
	C_1	C_2	C_3
T	0,1	0,7	0,2
S	0,3	0,2	0,5
D	0,6	0,3	0,1

5. Построение таблицы соответствия двоичных кодов потока кодируемого сообщения ряду кодирующих звукосочетаний.

6. Интерпретация блоков информации исходного сообщения в акустический корпус. Формирование звукового корпуса происходит путем интерпретационного отображения множества двоичных порций одинаковой размерности из потока исходного сообщения и звукосочетаний, эмитируемых на каждой итерации функционирования генерирующей цепи Маркова. Результатом выполнения преобразования является акустический корпус, в структуру которого фактически внедрено исходное сообщение. После завершения процесса создания корпуса требуется установить связи между смежными элементами полученной ранее упорядоченной последовательности звукосочетаний. Организация соответствующих связей осуществляется посредством присваивания каждому элементу последовательности определенного ритмического рисунка и одновременной записи данных о присваиваемых длительностях в матрицу, называемую окном связности (см. табл. 2).

Таблица 2

Окно связности

Звукосочетание	C_1	C_2	C_3
C_1	0	R_1	0
C_2	0	0	R_2
C_3	R_3	0	0

7. Вывод результата кодирования в файл формата MIDI.

Окно связности предназначено для выполнения операции регенерации потерянных блоков данных и выполняет функцию своего рода магнитофонной ленты, позволяя осуществлять на практике процесс прямого обхода корпуса и процесс обратного обхода в зависимости от конкретной ситуации с некоторой определенной локализацией потерянных блоков данных. Например, по окну связности, описанному ранее (см. табл. 2), можно выполнить прямой обход корпуса, сформированного в следующей таблице (см. табл. 3), с целью восстановления потери звена (C_2; R_2) в структуре корпуса {(C_1; R_1), (C_2; R_2), (C_3; R_3)}.

Таблица 3

Пример акустического корпуса

Параметр корпуса	Значения параметров			
Номер такта	1	2	3	mmm
Звукосочетание	C_1	-	C_3	C_1
Ритмическая связка	R_1	-	R_3	R_i

Выводы

В рамках исследования функциональных параметров предлагаемого метода регенерационного кодирования была проведена его сравнительная характеристика с существующими аналогами помехоустойчивых кодов по следующему ряду критериев:

– необходимость внесения избыточности в информационные коды;
– размер регенерируемого блока информации;
– возможность передачи метаданных в структуре кода.

Результат сравнительной оценки приведен в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительный анализ актуальных методов помехоустойчивого кодирования

Метод	Наличие избыточности, (да/нет)	Размер исправляемого блока информации, (байт)	Возможность внедрения метаданных, (да/нет)
Линейный блочный код	да	16	нет
Сверточный код	да	64	нет
Код Рида-Соломона	да	512	нет
Метод регенерационного кодирования	нет	Произвольное число	да

Таким образом, предлагаемый в рамках данной статьи метод регенерации блочных потерь информации при передаче по акустическому каналу с шумом обладает следующими преимуществами по сравнению с существующими аналогами:

– возможность выполнения регенерации блоков потерянной информации без внесения избыточности в структуру исходного сообщения;
– возможность восстановления блоков потерянной информации произвольного объема;
– возможность передачи в комплекте с исходным сообщением необходимых метаданных в структуре связей транспортировочного корпуса.

Список источников

Агеев В. М. Теория информации и кодирования: дискретизация и кодирование измерительной информации. Москва: МАИ, 1977. 59 с.

Заренин Ю. Г. Корректирующие коды для передачи и обработки информации. Киев: Техника, 1965. 170 с.

Удалов А. П., Супругин Б. А. Избыточное кодирование при передаче информации двоичными кодами. Москва: Связь, 1964. 270 с.

Шастова Г. А. Кодирование и помехоустойчивость передачи телемеханической информации. Москва: Энергия, 1966. 454 с.

Элиас П. Безошибочное кодирование // Коды с обнаружением и исправлением ошибок. Москва, 2001. С. 59–71.

References

Ageev V. M. *Teoriia informatsii i kodirovaniia: diskretizatsiia i kodirovanie izmeritel'noi informatsii* [Theory of information and coding: discretisation and coding of measurement information]. Moscow: MAI, 1977. 59 p.

Elias P. Bezoshibochnoe kodirovanie [Error-free coding]. *Kody s obnaruzheniem i ispravleniem oshibok* [Codes with error detection and correction]. Moscow, 2001, pp. 59–71.

Shastova G. A. *Kodirovanie i pomekhoustoichivost' peredachi telemekhanicheskoi informatsii* [Coding and noise resistance of telemechanical information transmission]. Moscow: Energiia, 1966. 454 p.

Udalov A. P., Suprugin B. A. *Izbytochnoe kodirovanie pri peredache informatsii dvoichnymi kodami* [Redundant coding at information transmission by binary codes]. Moscow: Svyaz, 1964. 270 p.

Zarenin Iu. G. *Korrektiruiushchie kody dlia peredachi i obrabotki informatsii* [Error correcting codes for information transmission and processing]. Kiev: Tekhnika, 1965. 170 p.

Сведения об авторах

Денис Евгеньевич Стародубцев – аспирант, старший преподаватель, https://orcid.org/0009-0001-6558-1235, destarodubtsev@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Denis E. Starodubtsev** – Postgraduate Student, Senior Lecturer, https://orcid.org/0009-0001-6558-1235, destarodubtcev@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Вячеслав Алексеевич Горбунов – доктор физико-математических наук, профессор, gorbunovva@vogu35.ru, Вологодский государственный университет (д. 1, ул. Галкинская, 160000 Вологда, Россия); **Vyacheslav A. Gorbunov** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor: gorbunovva@vogu35.ru, Vologda State University (1, ul. Galkinskaia, 160000 Vologda, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.06.2023; одобрена после рецензирования 14.07.2023; принята к публикации 31.07.2023.

The article was submitted 30.06.2023; Approved after reviewing 14.07.2023; Accepted for publication 31.07.2023.