



Санкт-Петербургская школа
физико-математических и
компьютерных наук

3 июня 2024 г.

Построение линейных избыточных кодов при помощи обучения с подкреплением

Буюнтуев Александр Алексеевич

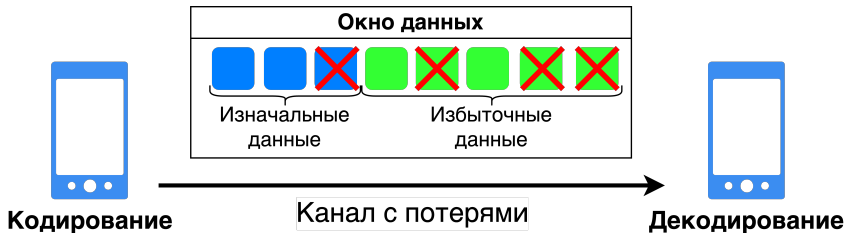
Научный руководитель: Онегин Евгений Евгеньевич,
инженер ключевых проектов, ООО «Техкомпания Хуавей»



Предметная область

Коммуникация в режиме реального времени (RTC) — позволяет пользователям обмениваться информацией с минимальной задержкой.

Forward Error Correction (FEC) — добавление избыточных данных для улучшения надежности передачи.



- В рамках окна нужно передать как можно больше полезной информации.
- Кодирование/декодирование должно быть энергоэффективным.



Используемые методы

Линейные коды — преобразуют сообщение s_n в сообщение c_{n+m} при помощи порождающей матрицы G :

$$c_{n+m} = s_n G_{n \times (n+m)}$$

Метод	Особенность	Граница восстановимости	Кодирование/декодирование
коды Рида-Соломона	Принадлежат к классу MDS-кодов	t	операции в \mathbb{F}_{256}
LDPC-коды	Малая плотность проверочной матрицы	$< t$	операции в \mathbb{F}_2
FlexFEC	Применяется во фреймворке WebRTC	$< t$	операции в \mathbb{F}_2



Принцип подхода RL-FEC

При помощи обучения с подкреплением (RL) решаем задачу дискретной оптимизации:

1. Выбираем модель потерь M .
2. Фиксируем параметры линейного кода, определяющие порождающую матрицу $G \in n, m, \mathbb{F}_2$.
3. Задаем функцию $f(G; M)$ для оценки линейных кодов.
4. Находим порождающую матрицу G^* , такую что:

$$G^* = \arg \max_G f(G; M)$$



Мотивация

Подход RL-FEC позволяет моделировать различные ограничения канала при помощи модели потерь M и оценивать коды относительно различных параметров при помощи функции $f(G; M)$.

RL уже использовали для решения задачи дискретной оптимизации.^{1,2}

Порождающих матриц очень много:

$$\underbrace{\binom{2^n - 1}{m}}_{\text{заполнение столбцов матрицы}} \times \underbrace{m!}_{\text{перестановки столбцов}}$$

С практической точки зрения необходимо найти набор порождающих матриц под заданные параметры и ограничения, для существующих методов кодирования есть только асимптотические оценки.

¹Darvari Victor-Alexandru et. al. Goal-directed graph construction using reinforcement learning

²Fawzi Alhussein et. al. Discovering faster matrix multiplication algorithms with reinforcement learning



Цель и задачи

Цель: Разработать программное обеспечение RL-FEC для построения линейных избыточных кодов над полем \mathbb{F}_2 .

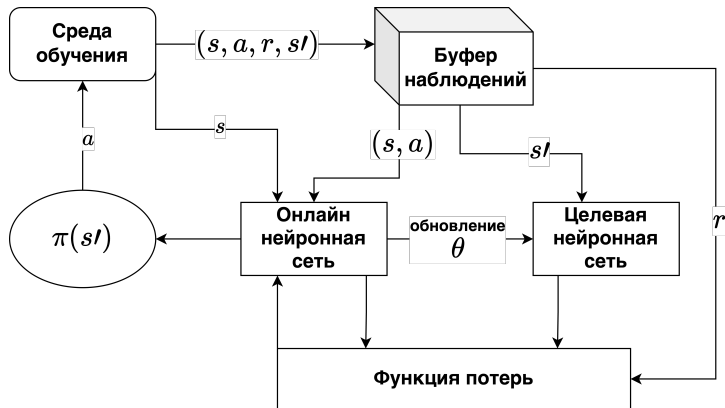
Задачи:

1. Разработать цикл обучения с подкреплением. Для этого необходимо сделать RL-агента и среду для построения и модификации линейных кодов.
2. Выбрать критерий для оценки оптимальности линейных кодов и разработать эффективный алгоритм для его проверки.
3. Провести эксперименты на различных моделях потерь.



RL-агент

В рамках исследования рассматривались различные алгоритмы обучения с подкреплением: DQN, DoubleDQN, SAC, PPO и др.





Среда для построения линейных кодов

Задача агента — сформировать m столбцов порождающей матрицы $G_{n \times (n+m)}$.

Состояние среды S :

- вектор из 0 и 1 длины 2^n
- позиции, на которых стоят 1 — десятичные представления столбцов порождающей матрицы

Начальное состояние S_0 — произвольный вектор, содержащий $< m$ единиц.

$$\underbrace{(0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1)}_S \rightarrow \underbrace{(3, 6, 7)}_{\substack{\text{десятичные} \\ \text{представления} \\ \text{столбцов}}} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{(3, 6, 7)}$

Сессия агента — из состояния S_0 попасть в состояние S , содержащее ровно m единиц.



Критерий для оценки линейных кодов

Метрика *success rate* (SR) — оценка вероятности успешной передачи сообщения через канал с потерями.

Эксперимент по передаче сообщения:

1. Преобразуем исходное сообщение s_n в закодированное c_{n+m} при помощи порождающей матрицы.
2. Генерируем маску потери при помощи модели M , получаем сообщение c'_{n+m} .
3. Пытаемся восстановить из c'_{n+m} исходное сообщение s_n .

$$SR = \frac{K}{N}, \quad K - \text{кол-во успешных экспериментов}$$

Награда R для агента при оптимизации метрики SR :

$$R = -1 \cdot t + SR, \quad t - \text{кол-во повторяющихся действий}$$

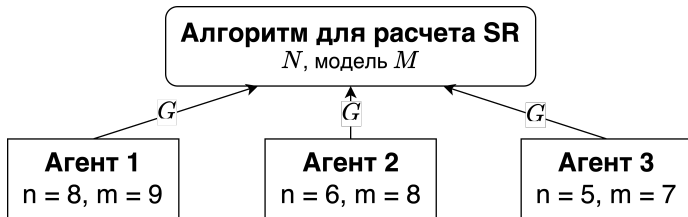


Алгоритм для расчета SR

Алгоритм использует свойство о покрывающих множествах.³

Реализация алгоритма позволяет:

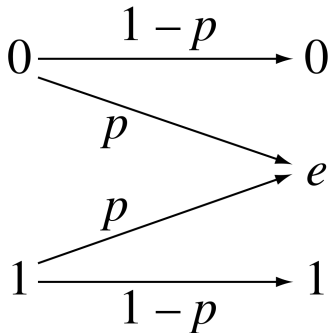
- Обрабатывать несколько запросов одновременно
- Использовать $\forall n, m : n + m \leq 64$
- Проводить $N \approx 10^8$ экспериментов примерно за 1 сек.



³Dumer Ilya et. al. Erasure Correction Performance of Linear Block Codes.

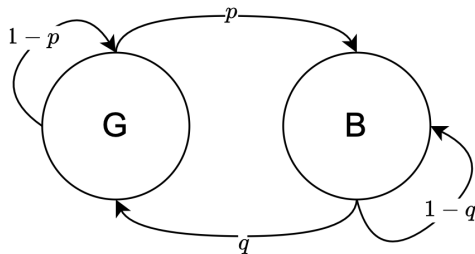


БЕС



Каждый пакет теряется с какой-то вероятностью p

модель Гильберта



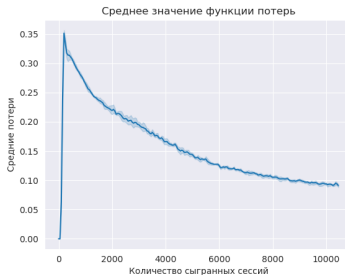
Хорошее — пакет доставлен
Плохое — пакет потерян



Процесс обучения агента

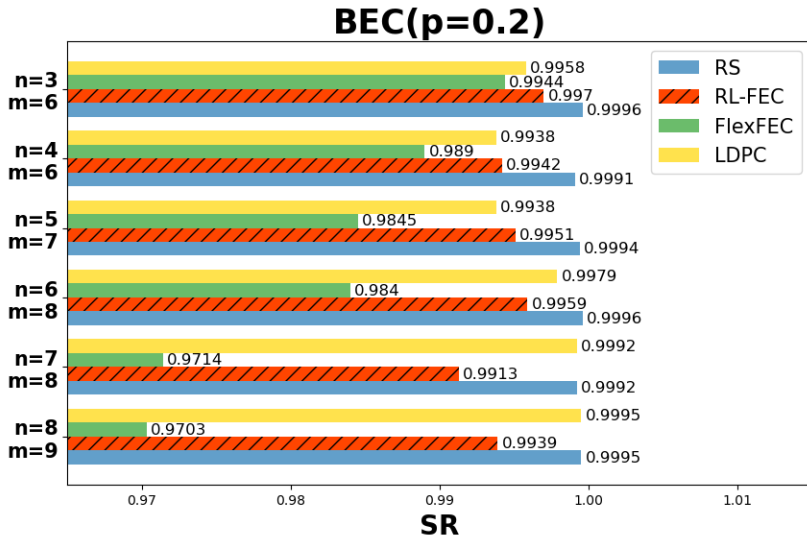
В качестве примера предоставлены графики при обучении агента для следующих параметров: $n = 5$, $m = 14$, $\text{BEC}(p = 0.4)$.

Доверительный интервал ($\alpha = 0.05$)





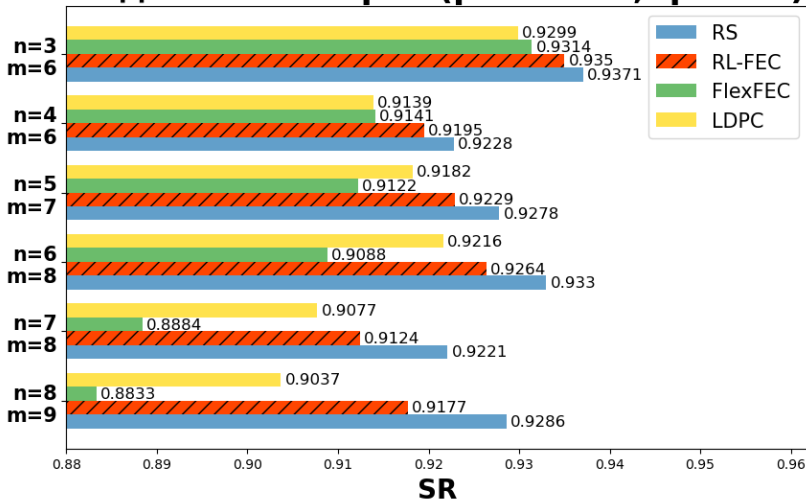
Результаты экспериментов (BEC)





Результаты экспериментов (модель Гильберта)

модель Гильберта ($p=0.0625$, $q=0.25$)





- На BEC при помощи RL-FEC получилось найти линейные коды, сравнимые по метрике SR с другими методами, использующими операции в \mathbb{F}_2 .
- С увеличением n, m агент имеет тенденцию недообучаться на BEC. В дальнейшем планируется исследовать другие состояния среды для построения линейных кодов.⁴
- На модели Гильберта найденные при помощи RL-FEC линейные коды показали превышение относительно других методов, использующих операции в \mathbb{F}_2 .
- Разница с кодами Рида-Соломона достигает менее 1%.

⁴Hanjun Dai et. al. Discriminative Embeddings of Latent Variable Models for Structured Data



В рамках дипломной работы были получены следующие результаты:

1. Разработано программное обеспечение RL-FEC:
 - Разработана среда для построения и модификации линейных кодов
 - Разработан RL-агент для исследования среды
2. Разработан алгоритм для оценки эффективности линейных кодов на основе метрики SR.
3. Проведены эксперименты на BEC и модели Гильберта:
 - В сравнении с подходами, использующими только операции в \mathbb{F}_2 , получено превышение до 3%.
 - Разница с кодами Рида-Соломона достигает менее 1%.