



Санкт-Петербургская школа физико-математических и компьютерных наук

Лаборатория Интернета вещей и киберфизических систем

Санкт-Петербург  
2024

# Исследование и разработка методов множественного доступа и помехоустойчивого кодирования для организации энергоэффективной передачи данных в системах Интернета вещей

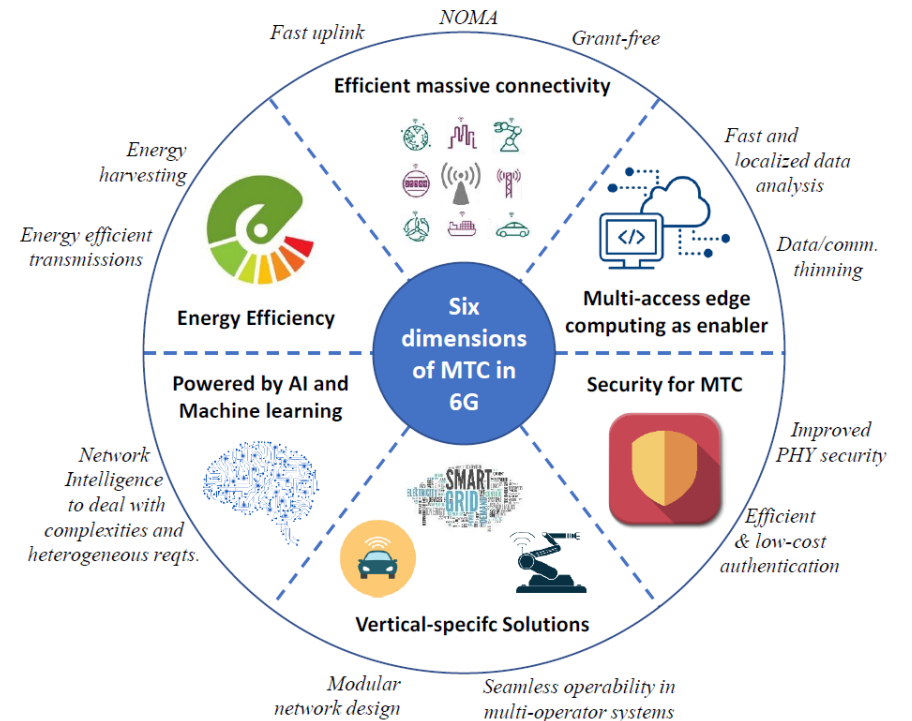
Заведующий лабораторией, д.т.н., профессор  
Тюрликов Андрей Михайлович

## Актуальность исследования

Для передачи сообщений от абонентских устройств к базовой станции в системах Интернета вещей предполагается использование случайного множественного доступа (СМД). Однако, при большом числе абонентских устройств начнёт сказываться нестабильность существующих алгоритмов СМД. Кроме этого, для обеспечения надёжности и защищённости передаваемой информации используются методы помехоустойчивого кодирования и криптографии.

Специфические особенности систем Интернета вещей в сценарии массовой межмашинной связи (ограничение на энергопотребление, короткие сообщения и др.) не позволяют в полной мере использовать результаты существующих исследований в области СМД и помехоустойчивого кодирования. Это делает актуальной разработку новых моделей и алгоритмов, учитывающих специфику таких систем, анализ их стабильности, защищённости от влияния естественных и искусственных помех и вычислительной сложности используемых методов.

**С развитием систем Интернета вещей проблема нестабильности алгоритмов СМД из теоретической проблемы переходит в область проблем, решение которых имеет непосредственное значение для практики, что обуславливает уровень значимости данного проекта.**



Шесть основных групп требований к перспективным системам Интернета вещей (Massive Type-Communication in 6G, и подобные системы передачи данных)



## Цель и задачи исследования

**Целью работы** является разработка способов повышения энергетической эффективности в беспроводных сетях с низким энергопотреблением.

### **Задачи научного исследования.**

1. Провести обзор технологий передачи данных в беспроводных сетях с низким энергопотреблением и выбрать конкретную технологию как объект для дальнейшего исследования.
2. Предложить способ повышения вероятности доставки сообщений с учётом специфических особенностей выбранной технологии.
3. Разработать методику проведения натурных экспериментов для проверки работоспособности предложенных способов повышения вероятности доставки сообщений.
4. Рассмотреть вопросы обеспечения энергетической и экономической эффективности предложенных способов повышения вероятности доставки сообщений.

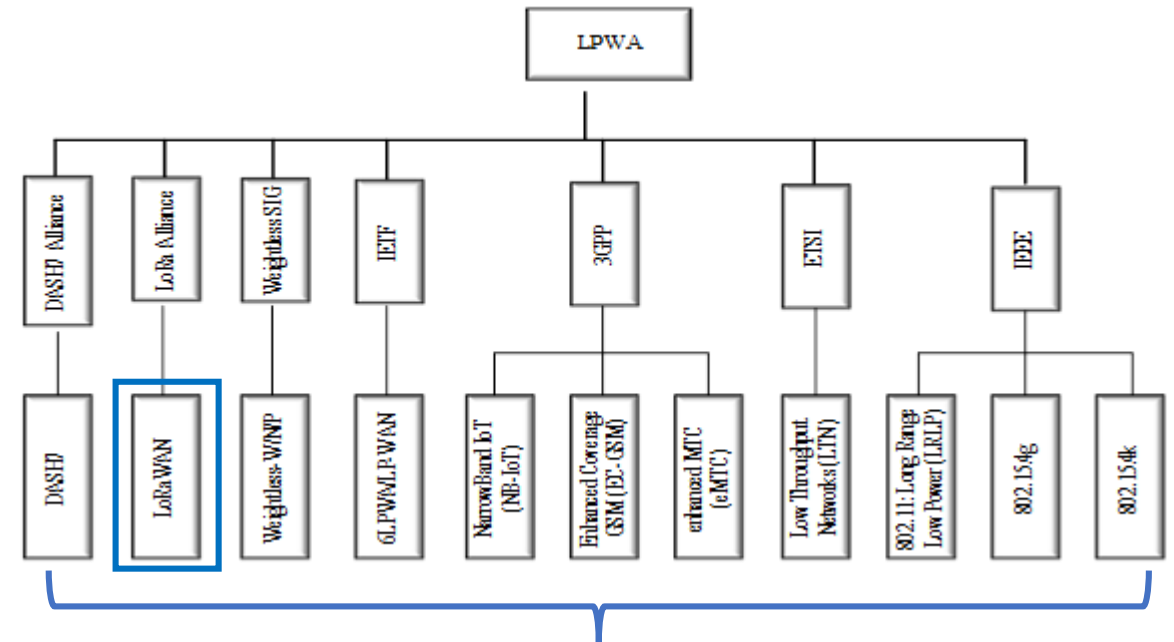
# Обзор технологий передачи данных в беспроводных сетях с низким энергопотреблением

Проведён обзор технологий энергоэффективной передачи данных в системах Интернета вещей (ИВ).

**По результатам обзора выявлены 2 проблемы:**

- 1) с учётом увеличения количества устройств и сложности задач, решаемых в рамках развития технологий ИВ, **существующие технологии не позволят решать задачи передачи данных в таких системах, и необходима разработка принципов построения новой перспективной технологии;**
- 2) **особенности существующих технологий в настоящее время не в полной мере учитываются** при построении современных систем ИВ. **В качестве исследований для решения этой проблемы выбрана технология LoRa**, т.к., с одной стороны, она позволяет строить сеть с низким энергопотреблением, с другой стороны, разработан российский стандарт данной технологии<sup>1</sup>.

**Предлагаемые стандарты и разрабатывающие их организации**



отличительная особенность – большое число абонентских устройств с автономными источниками, которые передают информацию в режиме случайного доступа по общему беспроводному каналу на базовую станцию

<sup>1</sup>ГОСТ Р 71168-2023 «Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU»

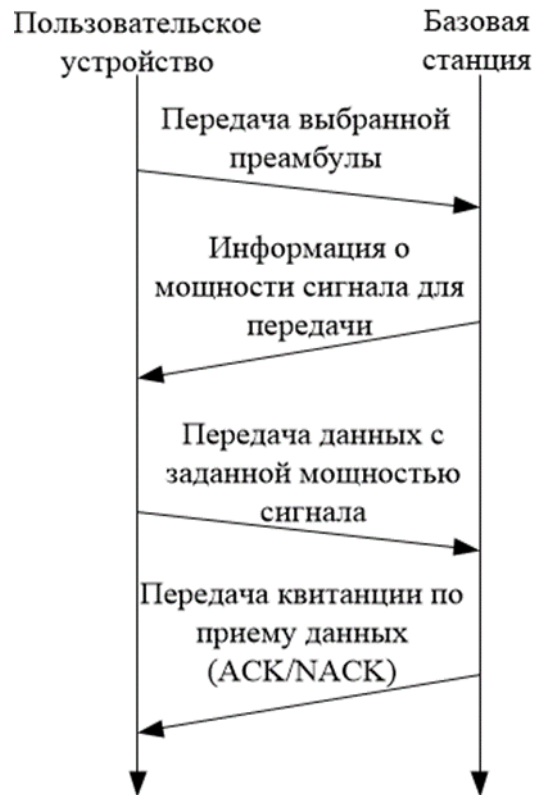


## Способы повышения вероятности доставки сообщений в беспроводных сетях с низким энергопотреблением

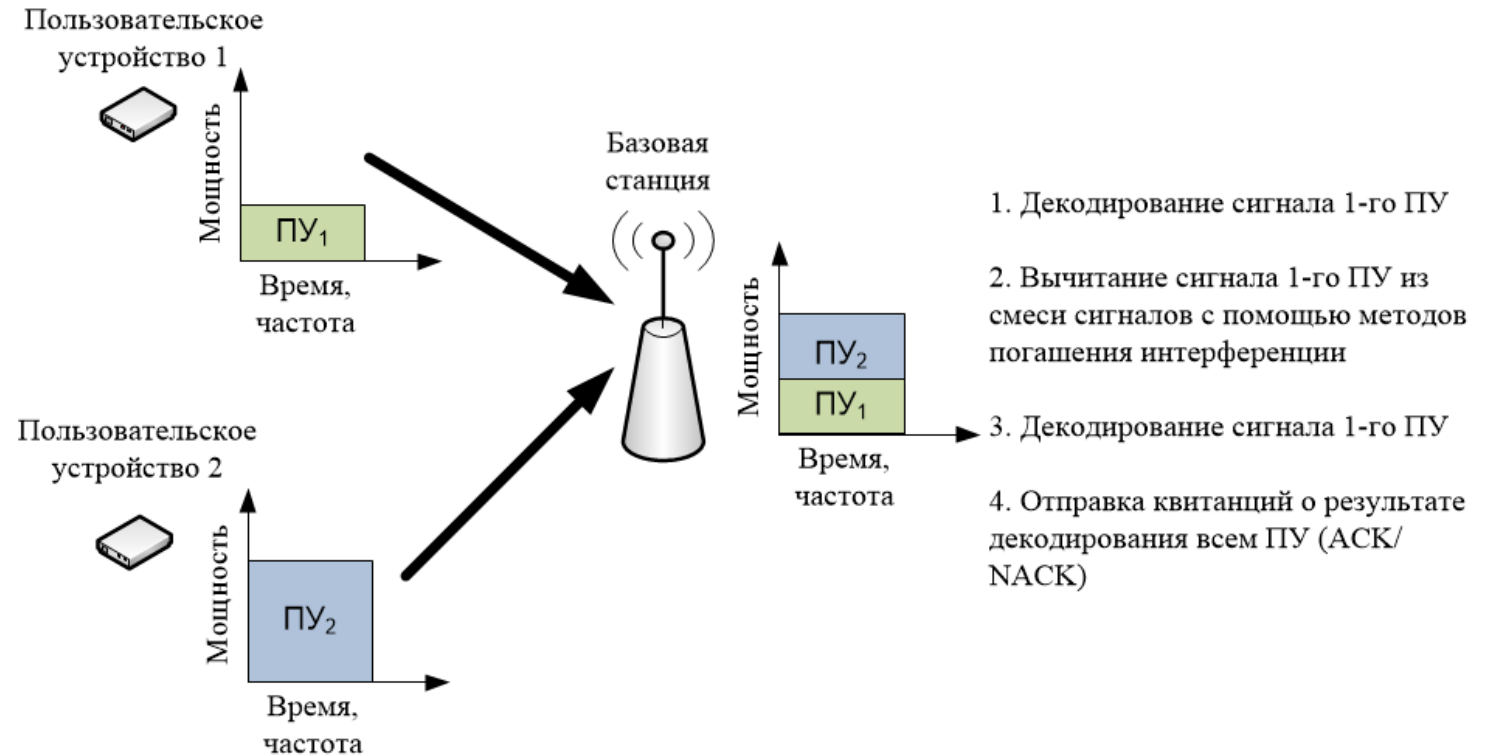
### Рассмотрены 2 подхода к увеличению вероятности доставки сообщений:

- ❑ **первый подход основан на совершенствовании методов и алгоритмов разрешения коллизий при большом числе абонентских устройств.** На данном этапе рассмотрен метод, основанный на совместном использовании преамбул в сочетании с последовательным погашением интерференции при приёме сигнала. **Следует отметить, что в существующих технологиях (в т.ч. современной технологии LoRa) такой подход не может быть реализован, а может быть предложен только для перспективных технологий.** Использование предлагаемого подхода помогает уменьшить энергозатраты за счет уменьшения среднего числа передач, необходимых для доставки сообщений на базовые станции;
- ❑ **второй подход основан на совершенствовании методов помехоустойчивого кодирования с учётом специфики систем ИВ.** Основной упор в исследованиях сделан на разработке методов для каналов с памятью. Проведён анализ свойств известных конструкций LDPC-кодов применительно к моделям каналов с памятью. На основе полученных, а также известных моделей, описывающих каналы с коррелированными ошибками, разработаны подходы к построению новых методов декодирования LDPC-кодов.

## Совместное использование преамбул в сочетании с последовательным погашением интерференции при приёме сигнала

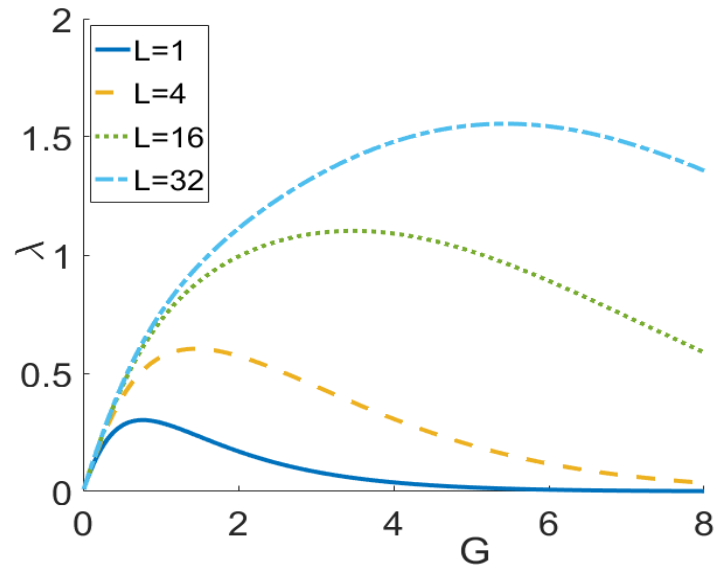


Структурная схема передачи и приема данных



## Совместное использование преамбул в сочетании с последовательным погашением интерференции при приёме сигнала

Значение спектральной эффективности от параметра  $G$  при  $L=\{1,4,16,32\}$



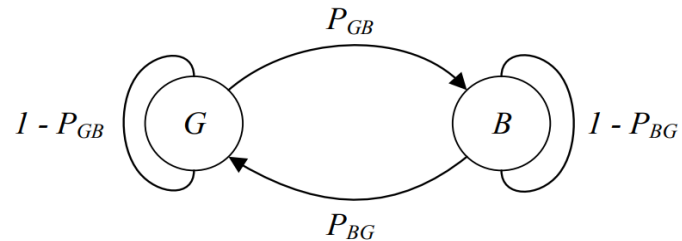
$\lambda(G, L)$  – спектральная эффективность рассматриваемого алгоритма,  
 $G$  – параметр алгоритма, влияющий на вероятность передачи сообщения,  
 $L$  – параметр алгоритма, определяющий число ортогональных преамбул.

При использовании 6 преамбул алгоритм с использованием NOMA дает выигрыш по скорости передачи в **39%** по сравнению с алгоритмом АЛОХА при эквивалентной средней мощности сигнала

# Использование методов помехоустойчивого кодирования для увеличения вероятности доставки сообщений

## Каналы с памятью

Канал с конечным числом состояний (ККЧС)  
(канал Гилберта, канал Гилберта-Эллиотта)



Рэлеевский канал с коррелированными компонентами

$$r_t = \mu_t s_t + \eta_t$$

$$\eta_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

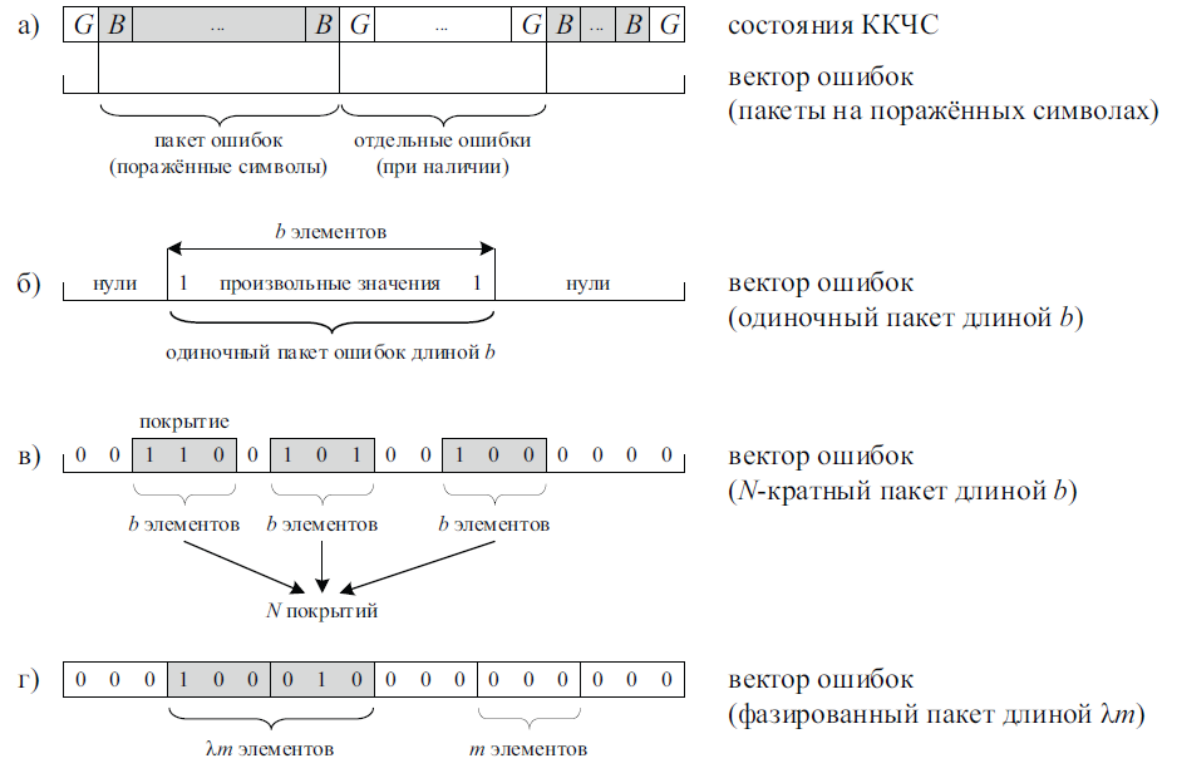
$$\mu_t = \sqrt{x_t^2 + y_t^2}$$

$$x_t = \rho x_{t-1} + \sqrt{1 - \rho^2} \eta_{x,t}$$

$$y_t = \rho y_{t-1} + \sqrt{1 - \rho^2} \eta_{y,t}$$

$$\eta_{x,t}, \eta_{y,t} \sim \mathcal{N}(0, 0.5)$$

## Пакеты ошибок





# Использование методов помехоустойчивого кодирования для увеличения вероятности доставки сообщений

## Декодирование по и.с. для одиночных пакетов

Предложены алгоритмы декодирования:

(A): число и.с.  $\approx n$

(C): число «плотных» и.с.  $\ll n$

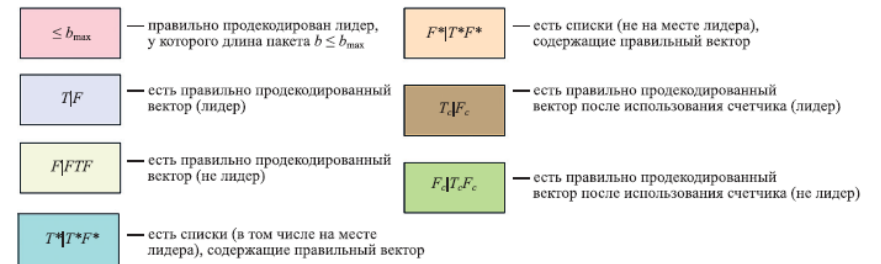
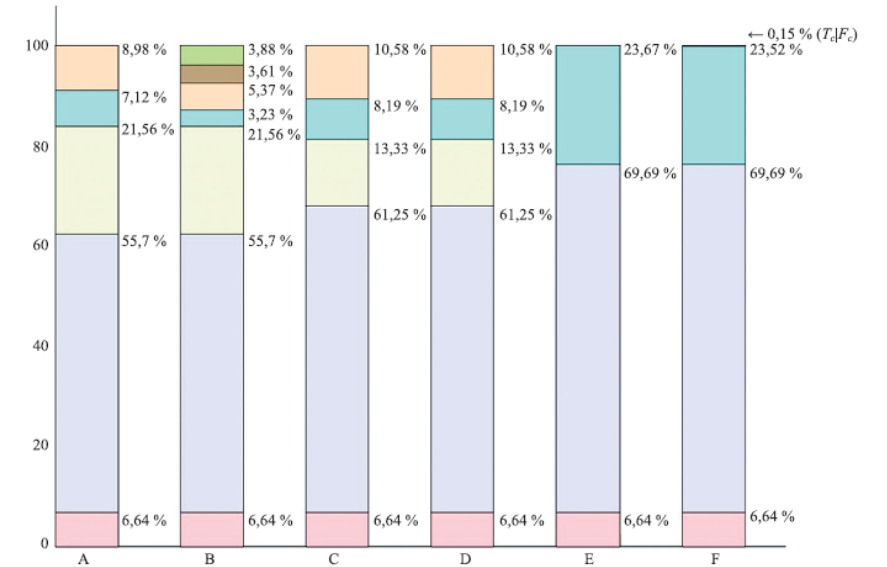
(E): число «плотных» и.с.  $\approx n$

(B, D, F): использование счётчика

Блочно-перестановочный LDPC-код (БП( $\gamma, \rho$ ))

$$H = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1\rho} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2\rho} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\gamma 1} & C_{\gamma 2} & \dots & C_{\gamma\rho} \end{bmatrix},$$

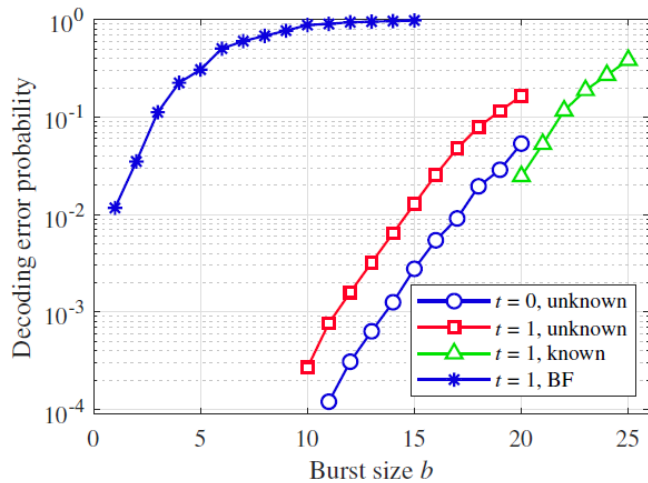
Номер кода	Конструкция	$n$	$k$	$R$	$N_{\min}$	$b_{\max}$	Граница Рейгера
1	БП(2,3)	21	8	0,38	2	6	6
2	БП(2,4)	20	11	0,55	3	4	4
3	Случайный	20	7	0,35	3	5	6
4	Случайный	20	10	0,5	4	3	5
5	Случайный	20	13	0,65	5	2	3



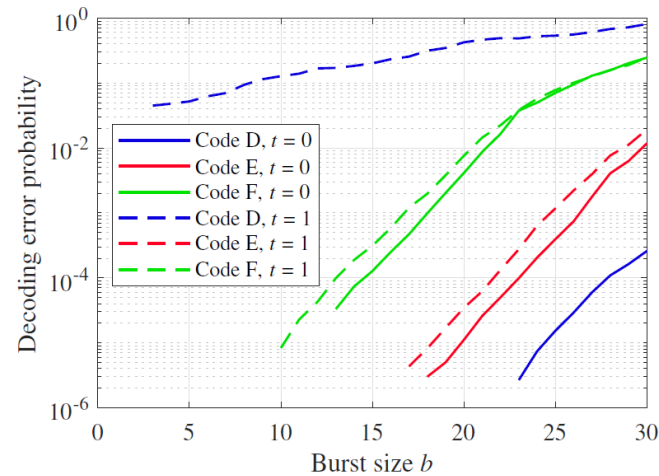
# Использование методов помехоустойчивого кодирования для увеличения вероятности доставки сообщений

## Совместное исправление пакетов и независимых ошибок (LDPC-коды)

Вероятность ошибки декодирования



Влияние наличия одной ошибки



## Предложен списочный декодер для LDPC-кодов

### Даны рекомендации по выбору параметров БП-конструкции

Корректирующая способность кода A (блочно-перестановочная конструкция)

Длина пакета $b$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Количество ошибок $t$	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	4

Корректирующая способность кода B (PEG-конструкция)

Длина пакета $b$	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Количество ошибок $t$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	3

Корректирующая способность кода C (случайный код)

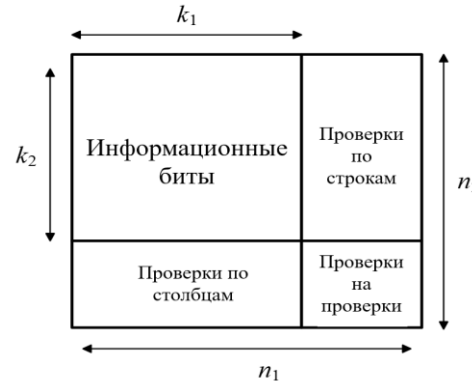
Длина пакета $b$	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Количество ошибок $t$	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	3	4

# Проверка работоспособности способов повышения вероятности доставки сообщений

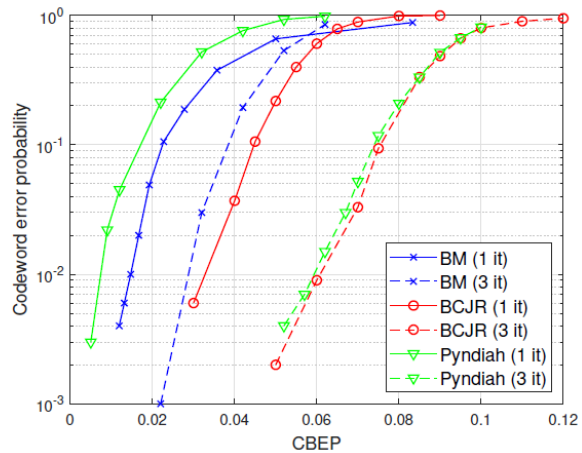
## Итеративные коды

Итеративный код (код-произведение)

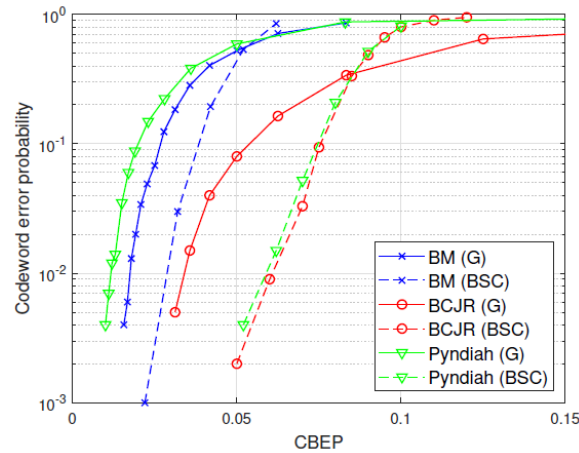
компонентные БЧХ-коды



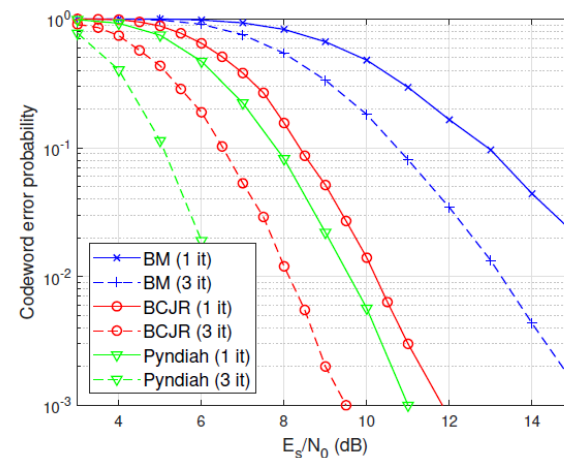
ДСК



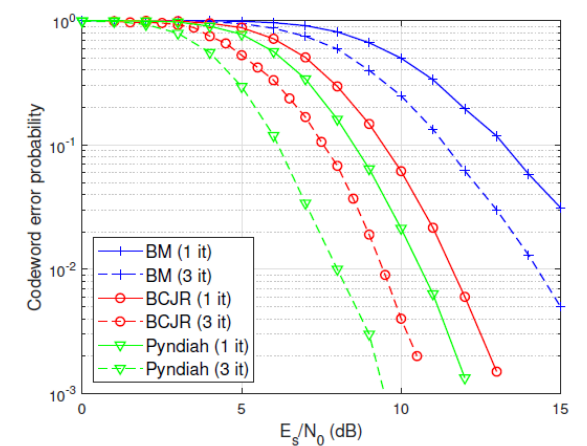
ДСК и КГ (КГЭ)



Рэлеевский канал,  $\rho=0$



Рэлеевский канал,  $\rho=0,9$



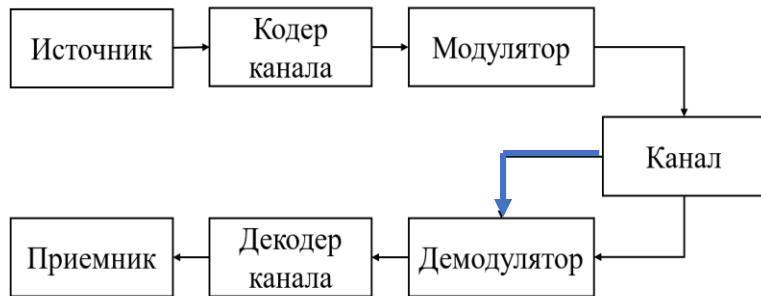
Для существующих кодовых конструкций наличие памяти в канале значительно ухудшает вероятности ошибки.

В теории: должно быть наоборот

# Проверка работоспособности способов повышения вероятности доставки сообщений

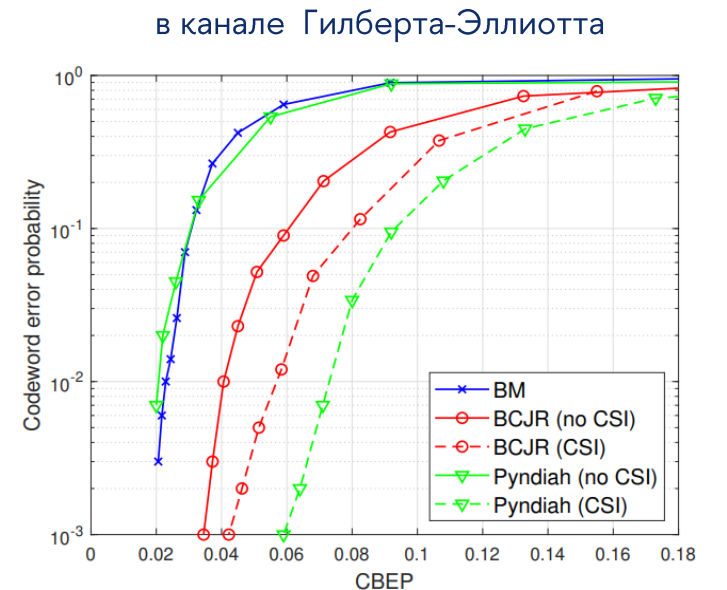
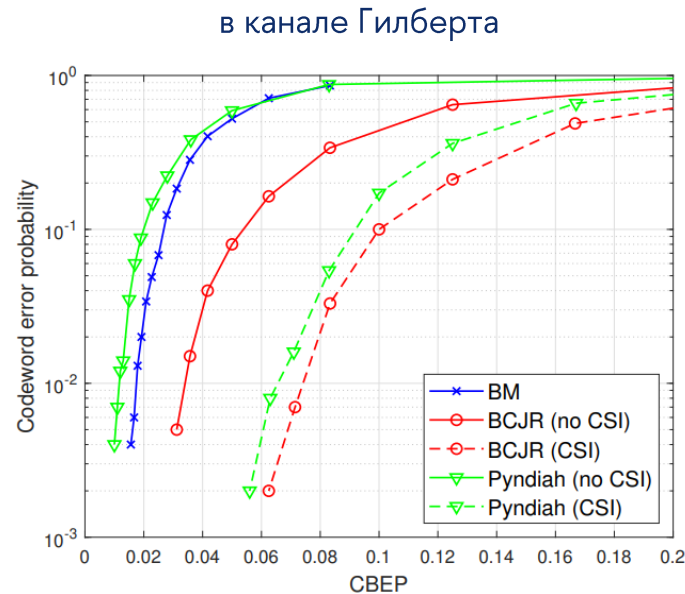
## Учёт влияния информации о состоянии канала (CSI) на вероятность ошибки декодирования

### Схема модели передачи



Добавили информацию о состоянии канала

Сравнение по вероятности ошибки для 3 итераций декодирования со знанием и без знания о состояниях канала



# Быстрое преобразование Фурье над конечным полем и декодирование БЧХ

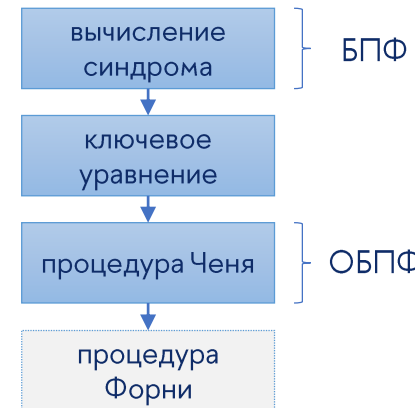
## Для прямого преобразования (БПФ):

- 1) впервые применяется функция следа;
- 2) использование специальных функций следа, хранящихся в таблицах;
- 3) обнаружение закономерностей в структуре матрицы преобразования при условии сопряжённости, что позволяет использовать табличные функции следа;
- 4) адаптация циклотомического алгоритма, позволяющая использовать табличные функции следа.

## Для обратного преобразования (ОБПФ):

- 1) инверсия циклотомического алгоритма, позволяющая избежать операции умножения;
- 2) представление элементов конечного поля относительно нормального базиса.

## Декодирование БЧХ



## Кодирование РС

$$a = \text{ОБПФ}([0 \mid m])$$

**БПФ:** 
$$F_j = \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^{ij} f_i, \quad j = 0, 1, \dots, n-1$$

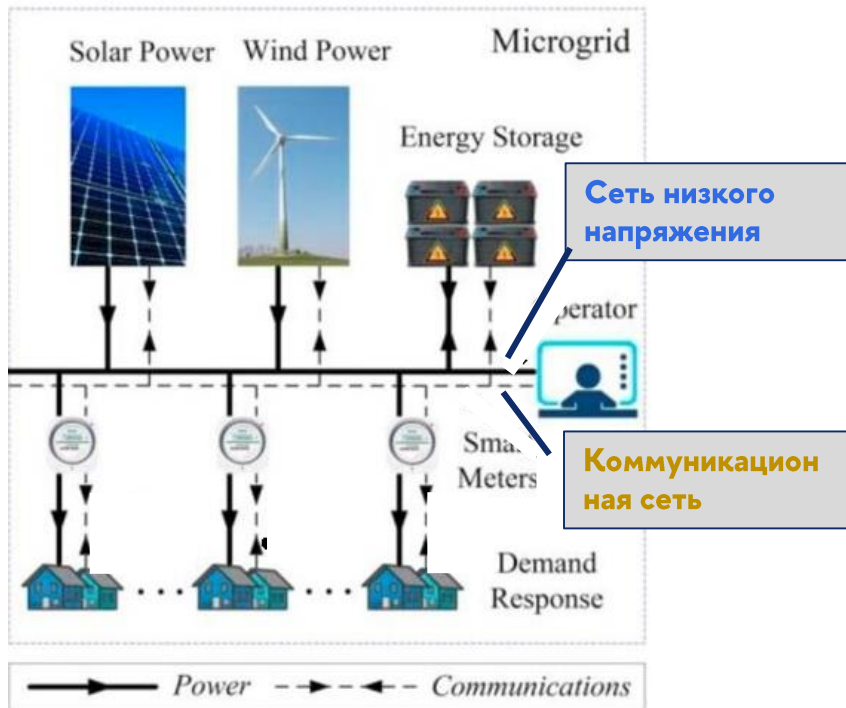
**ОБПФ:** 
$$f_i = \frac{1}{n \bmod p} \sum_{j=0}^{n-1} \alpha^{-ij} F_j, \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

**След:** 
$$\text{trace}_{m_k}(\beta) = \sum_{i=0}^{m_k-1} \beta^{2^i}$$

n	DFT (Alg. 1)		DFT (Alg. 2)		DFT (GB)		DFT (CY)		IDFT (Alg. 3)		IDFT (GB)				IDFT (CY)	
	tab	Badd	tab	Badd	Mul	Add	Mul	Add	Badd	SQR	Badd	Mul	Add	SQR	Mul	Badd
7	3	14	3	14	12	42	6	24	14	4	30	4	4	4	6	24
15	5	60	5	50	38	210	16	74	51	10	172	10	10	10	16	76
31	7	186	7	211	120	930	54	299	205	24	810	24	24	24	54	307
63	13	756	13	558	284	3906	97	759	552	50	3622	50	50	50	97	804
127	19	2286	19	2759	756	16002	216	2576	2745	108	15246	108	108	108	216	3117
255	35	8670	35	5670	1718	64770	586	6736	5840	220	63052	220	220	220	586	6984

## Обеспечение энергетической и экономической эффективности способов повышения вероятности доставки сообщений

**Технологии Long Range Wide-Area Networks (LoRaWAN)** могут быть использованы для мониторинга результатов измерений на объектах, расположенных на большой территории, и позволяют создавать недорогие системы передачи и сбора данных. Одной из ключевых особенностей технологии LoRa является возможность использования компромисса между длительностью передачи сообщений и надёжностью их доставки за счет использования такого параметра, как SF.



В работе рассмотрены два взаимосвязанных объекта –

**сеть низкого напряжения с распределёнными энергетическими ресурсами** и

+

**коммуникационная сеть, построенная по технологии LoRaWAN**, для передачи данных мониторинга напряжения в узлах электрической сети.

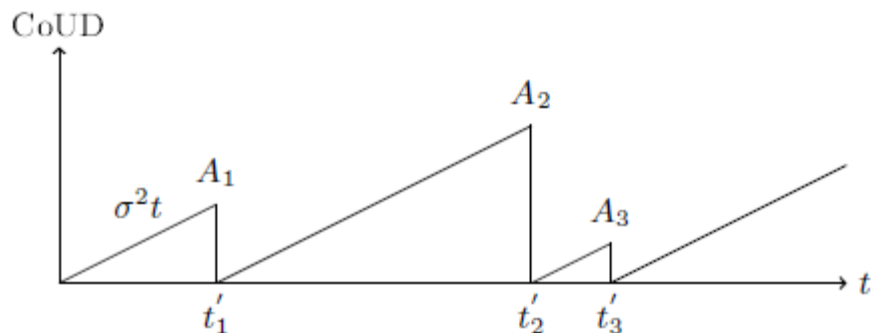
**Предложена модель, отражающая основные специфические особенности этих объектов** – случайный характер изменения напряжения в электрической сети и возможные потери данных из-за конфликтов коммуникационной сети.

## Обеспечение энергетической и экономической эффективности способов повышения вероятности доставки сообщений

Для предложенной модели сформулирована **оптимизационная задача минимизации среднего максимального возраста информации** за счет выбора параметров коммуникационной сети с учетом свойств случайного процесса изменения напряжения в электрической сети.

Для случая, когда изменение напряжения описывается **Винеровским процессом**, предложен **способ решения** этой задачи и проиллюстрирован **на примере**.

Предложенный в работе **подход к выбору параметров коммуникационной сети с учетом свойств случайного процесса изменения параметров в объекте мониторинга** может быть использован для различных систем мониторинга, в которых в качестве коммуникационной сети используется сеть, построенная на технологии LoRaWAN, или любая другая сеть со случайным множественным доступом в канал.



$$\text{CoUD}(t) = \sigma^2(t - t'_i) \quad \text{задержка обновления}$$

$$\text{PAol} = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\sum_{m=1}^M A_m}{M} \stackrel{(iid)}{=} \mathbf{M}[A_1] \quad \text{средний пиковый возраст информации}$$

$$\text{MPAol} = \max\{ \text{PAol}_1, \text{PAol}_2, \dots, \text{PAol}_N \} \rightarrow \min$$



## Основные результаты 2023 года

- ❑ **Определены требования к технологии передачи данных**, которая может быть использована в исследуемых системах, обладающих следующей отличительной особенностью – большое число абонентских устройств с автономными источниками, которые передают информацию в режиме случайного доступа по общему беспроводному каналу на базовую станцию. Рассматривается как некоторая абстрактная технология, которая может быть реализована в будущих сетях, так и конкретные решения, которые могут быть построены на технологии LoRa.
- ❑ **Рассмотрены 2 подхода к увеличению вероятности доставки сообщений**
  - первый подход основан на совместном использовании преамбул в сочетании с последовательным погашением интерференции при приеме сигнала
  - второй подход основан на использовании методов помехоустойчивого кодирования для увеличения вероятности доставки сообщений.
- ❑ **Получены экспериментальные оценки вероятности ошибки при передаче в каналах с памятью**
- ❑ **Продемонстрировано использование современной технологии LoRa в системе мониторинга низковольтной электрической сети.**
- ❑ **Разработаны алгоритмы быстрого преобразования Фурье над конечным полем**, применимые в задачах кодирования/декодирования двоичных кодов БЧХ





## Связь задач исследования 2024 года с результатами исследования 2023 года

- ❑ Как было определено в исследованиях 2023 года, **параллельно будут исследоваться две технологии: как перспективная технология для будущих сетей, так и конкретные решения, основанные на технологии LoRa.**
- ❑ **Будут продолжены исследования** предложенных в 2023 году **способов увеличения вероятности доставки сообщений.** В части подхода, основанного на совместном использовании преамбул в сочетании с последовательным погашением интерференции при приеме сигнала, **будет проведено дополнительное исследование влияния данного подхода на задержку.** В рамках второго подхода, основанного на использовании методов помехоустойчивого кодирования для увеличения вероятности доставки сообщений, **будут продолжены исследования влияния памяти канала на вероятность доставки сообщений, разработка методов кодирования и декодирования** для систем Интернета вещей.
- ❑ **Будут рассмотрены подходы, позволяющие вместо натуральных экспериментов использовать методы имитационного моделирования** и предложены способы уменьшения временных затрат на проведение такого моделирования.
- ❑ **Будут продолжены исследования по возможности использования современных технологий LoRa в системах мониторинга низковольтной электрической сети.** При этом, кроме вероятности доставки сообщений и пикового возраста информации, **будут рассмотрены другие показатели эффективности функционирования,** учитывающие как специфику данных, передаваемых в низковольтной электрической сети, так и особенности применения технологии LoRa для передачи этих данных.

