

# Оценка BER для систем группового преобразования сигналов

В.В. Иванов  
Уфимский университет науки и технологий  
Уфа, Россия  
ivanov.vv@ugatu.su

И.О. Абдреев  
Уфимский университет науки и технологий  
Уфа, Россия  
abdreev.ivan@yandex.ru

Е.А. Лопухова  
Уфимский университет науки и технологий  
Уфа, Россия  
lopukhova.ea@ugatu.su

И.В. Степанов  
Уфимский университет науки и технологий  
Уфа, Россия  
stepanov.iv@ugatu.su

Е.П. Грахова  
Уфимский университет науки и технологий  
Уфа, Россия  
grakhova.ep@ugatu.su

И.В. Кузнецов  
Уфимский университет науки и технологий  
Уфа, Россия  
igor.kuznetsov-kiw@mail.ru

**Аннотация**—Групповое преобразование сигналов показало высокую эффективность в задачах уменьшения динамического диапазона передаваемых высоко коррелированных сигналов. К таким сигналам относятся, например, сигналы, получаемыми с устройств дистанционного зондирования земли. В настоящей работе проведена оценка частоты битовых ошибок в зависимости от отношения сигнал-шум и уровня сжатия исходных сигналов. Исследование проведено с использованием макета на основе микроконтроллера ESP32. Для получения высоко коррелированных сигналов использовались подключенные к контроллеру аналоговые датчики освещенности (фоторезисторы). Результаты расчетов частоты битовых ошибок показывают, что сжатие динамического диапазона передаваемых сигналов в 2 раза незначительно влияет на частоту ошибок, однако дальнейшее увеличение уровня сжатия приводит к резкому ее росту.

**Ключевые слова**— групповое преобразование, кодирование, энергоэффективность, помехоустойчивость, дистанционное зондирование земли

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В энергодефицитных системах, таких как, спутниковые системы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), предназначенных для получения информации о поверхности земли, океана и слоев атмосферы, снижение энергопотребления необходимо для обеспечения длительного времени автономной работы ввиду особенностей их технической эксплуатации (сложность или невозможность замены батарей, невозможность подведения линии электропитания и т.д.). Отметим, что показания, получаемые с приборов зондирования, часто являются высоко коррелированными сигналами [1]. Следовательно, использование группового преобразования сигналов [1], суть которого заключается в удалении избыточности между однотипными соседними каналами, будет эффективно для снижения динамического диапазона передаваемых сигналов и, как следствие, энергопотребления всей системы в целом. Кроме того, предлагаемый вид преобразования сигналов позволяет повысить уровень информационной безопасности системы связи [2].

Как было показано в работе [3], использование группового преобразования в высоко коррелированных сенсорных системах позволило снизить ENOB (англ.

«Effective number of bits», «Эффективное число бит») и, как следствие, величину кодового слова передаваемых сообщений на 1 бит без снижения SNR (англ. «Signal-to-noise ratio»), «Отношение сигнал/шум») квантования при условии отсутствия шума в канале. Однако, вопрос о практическом определении зависимости между снижением амплитуды передаваемых сигналов и параметром BER (англ. «Bit error gate», «частота битовых ошибок») не был рассмотрен в достаточной мере. Кроме того, в обозначенных исследованиях не учитывалось влияние SNR на характеристики системы. На основании вышесказанного можно сформулировать задачу исследования: получить экспериментальную зависимость между снижением амплитуды передаваемых сигналов и BER, а также оценить степень влияния шума в канале на характеристики системы.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для экспериментальной проверки схемы, предложенной в работе [2] был собран макет координированного группового кодера, позволяющий провести оценку эффективности системы с реальными

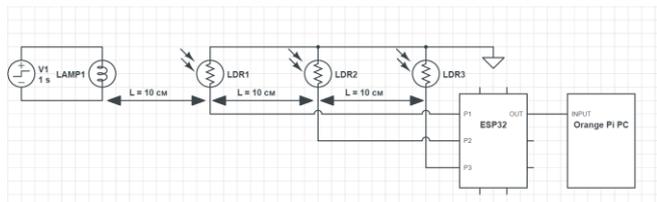


Рис. 1. Принципиальная схема макета координированного группового кодера

сигналами, поступающими от датчиков. Схема макета представлена на рис 1.

Для реализации макета сенсорной системы в качестве источников коррелированных сигналов использовались три фоторезистора. Датчики были размещены в одну линию и удалены от источника света на расстояние 10, 20 и 30 см. Источник света автоматически включался и отключался с частотой 1 Гц, тем самым на фоторезисторах создавался динамически изменяющийся сигнал, который принимал микроконтроллер ESP32. Далее сигнал нормировался и передавался через USB-интерфейс на одноплатный компьютер Orange Pi PC. На нем, с использованием программы на языке Python, рассчитывались коэффициенты корреляции и производилось групповое преобразование сигналов.

На основе полученных результатов был проведен расчет параметра BER при различных SNR. Уровни SNR для расчетов были взяты из группы стандартов IEEE 802.11. Алгоритм расчета параметра BER основан на сравнении показаний датчиков, поступающих на плату Orange Pi PC, и показаний, полученных после обработки программным кодом. Далее записанные значения переводились в двоичный код и проверялись побитно на наличие неверно принятых битов.

В первом эксперименте были рассмотрены зависимости параметра BER от SNR для сигнала без сжатия по амплитуде и сжатого в 2 раза канального сигнала. В цифровых системах связи это обеспечивает или уменьшение кодового слова на 1 бит, или увеличения SNR на 6,02 дБ [3]. Результаты эксперимента представлены на рис.2.

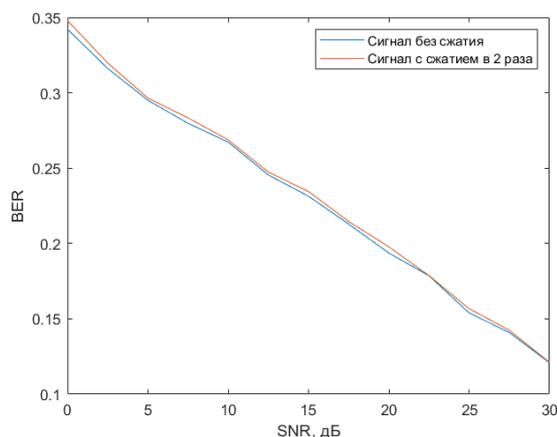


Рис. 2. Зависимость параметра BER от отношения сигнал-шум

Проанализировав полученный график, можно сделать вывод, что при выбранном коэффициенте сжатия динамического диапазона BER при использовании энергоэффективного кодера близок к значению BER при отсутствии сжатия сигналов (разница объясняется погрешностью вычислений). Ввиду того, что задача исследования состояла в оценке влияния канала на групповое преобразование сигналов, анализировались данные без дополнительных блоков обработки, полученные значения параметра BER отражают общие принципы зависимости, но не привязаны к конкретной системе.

Далее была рассмотрена зависимость BER от коэффициента сжатия канального сигнала. Для этого сценария SNR было взято за 30 дБ, а канальный сигнал сжимался от 2 раз до момента, когда сигнал невозможно восстановить (т.е. до значения BER, соответствующее значению SNR 0 дБ). Коэффициент сжатия сигнала рассчитывался по формуле:

$$K = \frac{V_{original\ max}}{V_{channel\ max}}, \quad (1)$$

где  $V_{original\ max}$  – максимальный уровень исходного сигнала,  $V_{channel\ max}$  – максимальный уровень канального сигнала.

Результаты эксперимента представлен на рис.3.

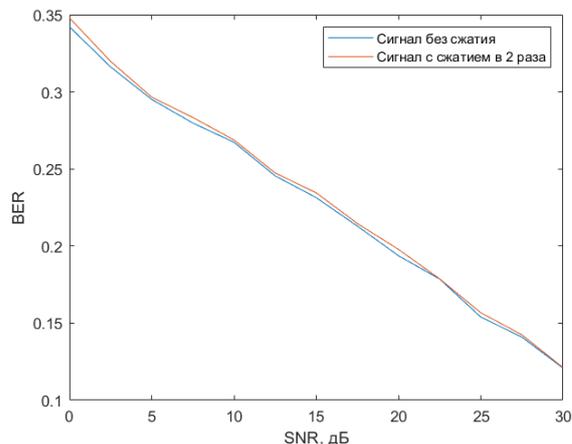


Рис. 3. Зависимость параметра BER от коэффициента сжатия сигнала

Анализ графика, представленного на рис.3, позволяет сделать вывод, что при увеличении коэффициента сжатия канального сигнала, BER резко возрастает. Однако, предобработка исходных сигналов, использование помехоустойчивого кодирования могут увеличить эффективность представленной схемы обработки сигналов.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенного эксперимента были получены зависимости параметра BER от SNR и снижения амплитуды передаваемого сигнала для группового преобразования высокоррелированных сигналов. Результаты эксперимента показали снижение значения параметра BER от 0,34 до 0,12 при увеличении SNR от 0 до 30 дБ при коэффициенте сжатия в 2 раза.

Увеличение коэффициента сжатия выходного сигнала от 2 до 13 раз увеличило значение параметра BER от 0,12 до 0,35 при SNR 30 дБ.

Учитывая высокую корреляцию между автомобильными датчиками [3], описанный вид преобразования сигналов может эффективно применяться в системах IoT, в частности, в системах V2x.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10407)

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Voronkov, G.S. The method for synthesis of the coordinated group DPCM codec for unmanned aerial vehicles communication systems / G.S. Voronkov, E. A. Smirnova, I. V. Kuznetsov //2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2019. – P. 1-4.
- [2] Voronkov, G. S. Decreasing the dynamic range of OFDM signals based on extrapolation for information security increasing / G. S. Voronkov, A. V. Voronkova, R. V. Kutluyarov, I. V. Kuznetsov //2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2018. – P. 271-274.
- [3] Ivanov, V.V. Efficiency Evaluation of Group Signals Transformation for Wireless Communication in V2X Systems / V. V. Ivanov, E. A. Lopukhova, G. S. Voronkov, I. V. Kuznetsov, E. P. Grakhova // 2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2022. – P. 167-170.