

DOI: 10.17725/rensit.2022.14.463

Сравнение декодеров группового сигнала с неортогональным множественным доступом, сформированного из сигнально-кодовых конструкций LTE

Крюков Я.В, Покаместов Д.А., Бровкин А.А., Рогожников Е.В.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, <https://tusur.ru/>
Томск 634050, Российская Федерация

E-mail: kryukov.tusur@gmail.com, dmaltomsk@mail.ru, soldierbrovkin@gmail.com, udzhon@mail.ru

Поступила 12.08.2022, рецензирована 19.08.2022, принята 26.08.2022

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

Аннотация: Представлен сравнительный анализ производительности декодеров SL-SIC (Symbol Level – Serial Interference Cancellation) и CWL-SIC (Codeword Level-SIC) групповых сигналов PD-NOMA (Power Doman – Non-Orthogonal Multiple Access) в системе с двумя пользователями. Для формирования группового сигнала используются реальные сигнально-кодовые конструкции (SCC) из стандарта связи 3GPP LTE (Long Term Evolution of 3rd Generation Partnership Project). Получена достижимая на практике производительность CWL-SIC для всех возможных конструкций группового сигнала, учитывая различные парные комбинации SCC. С помощью математического моделирования получены весовые мощностные коэффициенты, обеспечивающие максимальную усредненную производительность группового сигнала для двух пользовательских каналов. Показано преимущество CWL-SIC и целесообразность его использования в реальных системах, особенно в условиях низкого отношения сигнал-шум.

Ключевые слова: мощностной домен, неортогональный множественный доступ, вероятность битовых ошибок, последовательное подавление помех на уровне символов модуляции и на уровне кодового слова, весовые мощностный коэффициенты

УДК 621.396.4

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда в рамках конкурса 2022 года "Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых" Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными. Проект №22-79-10148.

Для цитирования: Крюков Я.В, Покаместов Д.А., Бровкин А.А., Рогожников Е.В. Сравнение декодеров группового сигнала с неортогональным множественным доступом, сформированного из сигнально-кодовых конструкций LTE. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2022, 14(4):463-472. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.463.

Performance Comparison of Decoders of Non-Orthogonal Multiple Access Signals Considering Modulation and Coding Schemes from LTE Networks

Yakov V. Kryukov, Dmitry A. Pokamestov, Andrey A. Brovkin, Evgeny V. Rogozhnikov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, <https://tusur.ru/>

Tomsk 634050, Russian Federation

E-mail: kryukov.tusur@gmail.com, dmaltomsk@mail.ru, soldierbrovkin@gmail.com, udzhon@mail.ru

Received August 12, 2022, peer-reviewed August 19, 2022, accepted August 26, 2022

Abstract: A comparative analysis of the performance of SL-SIC (Symbol Level - Serial Interference Cancellation) and CWL-SIC (Codeword Level-SIC) decoders of PD-NOMA (Power Domain - Non-Orthogonal Multiple Access) baseband signals in a system with two users is presented. Real signal code constructs (SCC) from the 3GPP LTE (Long Term Evolution of 3rd Generation Partnership Project) communication standard are used. The performance of CWL-SIC achievable in practice in real systems for all possible designs of a group PD-NOMA signal consisting of different pair combinations of noise-immune SCCs has been obtained. With the help of mathematical modeling, weighting power coefficients are obtained that provide the maximum average performance of the group signal for two user channels. The high efficiency of the CWL-SIC and the expediency of its use in real systems, especially in conditions of low signal-to-noise ratio, are shown.

Keywords: access power domain, interference cancellation at the level of modulation symbols and at the level of code word, signal-to-noise ratio, bit error rate, quadrature amplitude modulation, modulation and coding schemes

UDC 621.396.4

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation within the framework of 2022 competition "Conducting Research by Research Groups Led by Young Scientists" of the Presidential Program of Research Projects Implemented by Leading Scientists, including Young Scientists. Project No. 22-79-10148.

For citation: Yakov V. Kryukov, Dmitry A. Pokamestov, Andrey A. Brovkin, Evgeny V. Rogozhnikov. Performance comparison of decoders of non-orthogonal multiple access signals considering modulation and coding schemes from LTE networks. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(4):463-472e. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.463.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (464)
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (465)
3. СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ (466)
 - 3.1. РАСЧЕТ BER ДЛЯ SL-SIC И CWL-SIC (467)
 - 3.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ SCC (468)
 - 3.3. ФОРМИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ГРУППОВОГО СИГНАЛА PD-NOMA (468)
 - 3.4. РАСЧЕТ ВЕСОВЫХ МОЩНОСТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ (468)
 - 3.5. РАСЧЕТ ВЫИГРЫША В ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ (470)
4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ (470)
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (471)

ЛИТЕРАТУРА (472)

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод организации многоканальной передачи данных многими пользователями является одним из ключевых способов увеличения

эффективности многопользовательских систем связи. В современных многоканальных системах применяются методы ортогонального множественного доступа ОМА (Orthogonal Multiple Access), которые основаны на подходе максимально возможного исключения межканальной интерференции. При разработке протоколов физического уровня для сетей пятого поколения (5G) был предложен новый подход организации многоканальной связи, допускающий контролируемую межканальную интерференцию для повышения спектральной эффективности. Такие методы множественного доступа назвали неортогональными NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access).

Группа NOMA объединяет несколько подходов, предложенных разными коллективами. Одним из наиболее эффективных является подход неортогонального мультиплексирования каналов в мощностном домене PD-NOMA (Power Domain – NOMA) [1]. Преимущество

PD-NOMA заключается в возможности совместного применения с ОМА, например, с ортогональным частотным разделением каналов OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) и (или) с пространственным разделением каналов SDMA (Space Division Multiple Access). Объединение указанных технологий позволяет мультиплексирование пользователей одновременно в четырех доменах: частотном, временном, мощностном и пространственном.

Формирование группового сигнала PD-NOMA основано на принципе суперпозиционного кодирования [2]. Сигналы разных абонентов складываются друг с другом, используя при этом различные друг от друга мощностные весовые коэффициенты. Совместный расчет весовых коэффициентов осуществляется на основании априорной информации о состоянии каналов передачи. Абоненту с наименьшим отношением сигнал-шум (ОСШ) назначается наибольший весовой мощностной коэффициент, чтобы он смог демодулировать собственный сигнал наиболее достоверно. С другой стороны, абоненту с наибольшим ОСШ назначается наименьший мощностной коэффициент, которого так же должно быть достаточно для достоверной демодуляции. Таким образом, пользователей можно условно разделить на "слабых" (с низким ОСШ) и "сильных" (с высоким ОСШ). При этом сигнал "слабого" пользователя имеет наибольшую мощность и, наоборот.

Обработка PD-NOMA осуществляется методом последовательного подавления помех SIC (Serial Interference Cancellation) [3], который заключается в последовательном декодировании сигналов пользователей друг за другом. В первую очередь декодируется наиболее мощный сигнал "слабого" пользователя. Затем он регенерируется (восстанавливается до изначального состояния) и вычитается из принятого группового сигнала. После этого становится возможным декодирование второго по уровню мощности сигнала и так далее, пока не будет декодирован наименее мощный сигнал "сильного" пользователя.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема SIC-декодера заключается в возможности допущения ошибки на этапе устранения интерференционных сигналов, что приводит к дополнительным ошибкам при декодировании. Существует 2 подхода к реализации SIC-декодера: регенерация интерференционной помехи на уровне символов модуляции SL-SIC (Symbol level – SIC) и на уровне кодового слова CWL-SIC (Codeword level – SIC). Преимуществом CWL-SIC является то, что он позволяет использовать исправляющую способность помехоустойчивого декодера для уменьшения вероятности ошибок при устранении интерференционного сигнала. Недостаток заключается в увеличении вычислительной сложности обработки сигнала из-за необходимости выполнять дополнительные операции декодирования/кодирования. С другой стороны, SL-SIC обладает меньшей точностью устранения интерференционной помехи и меньшей вычислительной сложностью. Поэтому, актуальным вопросом является поиск компромисса между CWL-SIC и SL-SIC. Структурная схема приемников SL-SIC и CWL-SIC представлена на Рис. 1.

Выигрыш в производительности CWL-SIC относительно SL-SIC можно получить графически, используя зависимости вероятности битовой ошибки BER (Bit Error Rate) от ОСШ. В качестве примера на Рис. 2 приведены эти зависимости для канала "сильного" пользователя. Групповой сигнал PD-NOMA сформирован с помощью суперпозиции 4-QAM и 64-QAM с весовыми мощностными коэффициентами 0.85 и 0.15, соответственно. На Рис. 2 отмечен

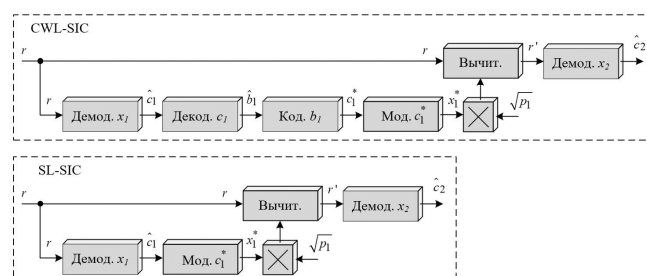


Рис. 1. Структурная схема CWL-SIC и SL-SIC декодеров.

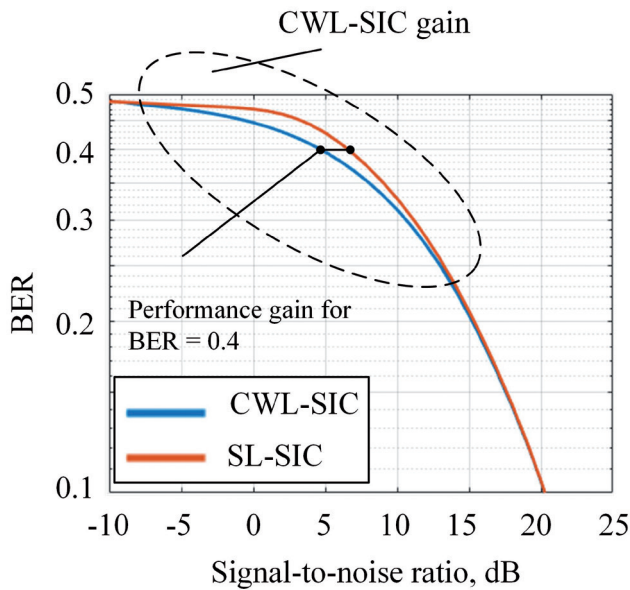


Рис. 2. Выигрыш в помехоустойчивости CWL-SIC относительно SL-SIC.

диапазон, в котором CWL-SIC обеспечивает такое же значение BER, как и SL-SIC, но при меньшем значении ОСШ. Разность в ОСШ при одинаковом уровне BER мы называем выигрышем в производительности CWL-SIC относительно SL-SIC.

Таким образом, CWL-SIC позволяет уменьшить вероятность ошибочного декодирования сигнала в ограниченном диапазоне ОСШ, увеличивая производительность системы. Границы диапазона и величина выигрыша напрямую зависят от конструкции PD-NOMA сигнала. В настоящее время не предложен ограниченный набор конструкций, которые могли бы быть применимы в реальных системах PD-NOMA. Поэтому актуальной задачей является разработка и исследование различных наборов конструкций PD-NOMA сигналов, а сравнение производительности CWL-SIC и SL-SIC для этих наборов является важным направлением для исследований.

В открытом доступе есть работы, которые посвящены исследованию CWL-SIC и сравнению его с SL-SIC. В [4] показано, что производительность CWL-SIC близка к производительности SIC с идеальной компенсацией, однако, авторы не рассматривают сравнение CWL-SIC с SL-SIC. Кроме того, акцент в этой работе смещен

на оценку влияния весовых мощностных коэффициентом для достижения требуемого уровня качества передачи данных.

В [5] авторы приводят сравнение CWL-SIC и SL-SIC в виде зависимостей BER от SNR для типичной конфигурации PD-NOMA сигнала. В работе не рассматриваются реальные сигнально-кодовые конструкции (СКК), поэтому полученную производительность нельзя получить на практике в существующих телекоммуникационных системах.

Общий недостаток известных работ заключается в использовании типичных сценариев PD-NOMA, в которых рассматривается 1-2 конструкции группового сигнала. В них демонстрируется общая эффективность и перспектива CWL-SIC, но не рассматриваются реальные конструкции, состоящие из реальных СКК (например, из стандарта 4G LTE или 5G NR). В связи с этим, вопрос оценки эффективности CWL-SIC в системе с реальными СКК остается открытым.

Целью настоящей работы является определение максимального достижимого на практике выигрыша в производительности CWL-SIC относительно SL-SIC для всех возможных конструкций сигналов PD-NOMA, образованных путем суперпозиции СКК из стандарта LTE.

3. СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается нисходящий групповой канал PD-NOMA, в котором передаются данные "слабого" (UE1) и "сильного" (UE2) пользователей. Формирование группового сигнала s описывается с помощью выражения

$$s = \sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2 \quad (1)$$

где $\mathbf{p} = \{p_1, p_2\}$ – весовые мощностные коэффициенты, а $\mathbf{x} = \{x_1, x_2\}$ – информационные QAM (Quadrature Amplitude Modulation) символы пользователей UE1, UE2 с порядками модуляции $\mathbf{Q} = \{Q_1, Q_2\}$. Используется базовый сценарий PD-NOMA, согласно которому UE1 получает наибольший мощностной коэффициент, соблюдая $p_1 > p_2$. Сумма мощностных коэффициентов $p_1 + p_2 = 1$.

В модели используется канал передачи с комплексным аддитивным белым Гауссовым шумом (АБГШ). Сигнал на входе SIC-декодера UE2 описывается с помощью выражения

$$r = s + n, \quad (2)$$

где $n \sim CN(0, N)$ – реализация комплексного АБГШ с нулевым математическим ожиданием и мощностью N . Обозначим отношение сигнал-шум в канале переменной \mathcal{W} .

Декодирование сигнала UE1 в CWL-SIC и SL-SIC реализуется одинаково, поэтому далее рассматривается декодирование сигнала только на стороне UE2, которое реализуется в два последовательных этапа. В первую очередь осуществляется оценка символов \hat{x}_1 "слабого" пользователя на фоне шума и интерференционной помехи от "сильного" пользователя $\sqrt{p_2}x_2 + n$, используя критерий минимального Евклидова расстояния

$$\hat{x}_1 = \arg \min_{x_1 \in \mathcal{A}_1} |r - \sqrt{p_1}x_1|^2, \quad (3)$$

где \mathcal{A}_1 – алфавит всех возможных состояний на созвездии Q_1 -QAM.

Устранение интерференционной помехи осуществляется путем формирования с сигнала компенсации x_1^* из \hat{x}_1 и вычитания его взвешенной составляющей $\sqrt{p_1}x_1^*$ из r .

Рассмотрим формирование x_1^* в SL-SIC и CWL-SIC:

В SL-SIC символ x_1^* формируется напрямую из \hat{x}_1 , поэтому $x_1^* = \hat{x}_1$. Допущенные при выполнении (3) ошибки не устраняются.

В CWL-SIC формирование x_1^* осуществляется в несколько последовательных этапов (Рис. 1):

- QAM демодуляция \hat{x}_1 согласно карте созвездия Q_1 -QAM, образуя на выходе демодулятора кодовое слово \hat{c}_1 .
- Помехоустойчивое декодирование \hat{c}_1 , образуя на выходе сообщение \hat{b}_1 , в котором по возможности устраняются битовые ошибки.
- Помехоустойчивое кодирование \hat{b}_1 , образуя на выходе регенерированное кодовое слово c_1^* .

- QAM модуляция c_1^* согласно карте созвездия Q_1 -QAM, образуя на выходе модулятора сигнал компенсации x_1^* .

Устранение интерференционной помехи описывается с помощью выражения

$$r' = r - \sqrt{p_1}x_1^*, \quad (4)$$

где r' – сигнал после компенсации, содержащий только сигнал UE2. Далее осуществляется демодуляция r' и оценка собственных полезных символов \hat{x}_2 , воспринимая в качестве помехи только шум n

$$\hat{x}_2 = \arg \min_{x_2 \in \mathcal{A}_2} |r' - \sqrt{p_2}x_2|^2, \quad (5)$$

где \mathcal{A}_2 – алфавит всех возможных состояний на созвездии Q_2 -QAM.

Для сравнения SL-SIC и CWL-SIC требуется получить производительность для различных конструкций группового PD-NOMA сигнала. Далее описан подход расчета BER и приведены используемые конструкции группового сигнала.

3.1. РАСЧЕТ BER ДЛЯ SL-SIC И CWL-SIC

Обозначим $\rho = \{\rho_1, \rho_2\}$ вероятность битовых ошибок при Q_1, Q_2 -QAM демодуляции \hat{x}_1, \hat{x}_2 в приемнике UE2. В системах связи передача данных ведется с требуемым уровнем качества, которое определяется допустимой вероятностью ошибки при приеме. Обозначим переменными ρ_1^z, ρ_2^z максимально допустимую (пороговую) вероятность битовых ошибок в \hat{c}_1, \hat{c}_2 на выходе демодулятора (входе декодера). В реальных системах значения ρ^z рассчитываются таким образом, чтобы декодер смог исправить битовые ошибки с высокой вероятностью. Поэтому, для упрощения в работе используется допущение, согласно которому в CWL-SIC осуществляется исправление всех ошибок в сигнале компенсации в том случае, если вероятность ошибки на входе декодера не превышает пороговую, т.е. $\rho_1 \leq \rho_1^z$. Необходимость упрощения вызвана невозможностью вывода общего аналитического выражения для расчета ρ_2 , которое учитывало бы пропуск битовых ошибок на этапе декодирования/кодирования в сигнале компенсации UE1.

Таблица 1

Таблица СКК из 3GPP LTE

i	Q	R_c	Z	ρ^z
1	4	78	-9.478	0.3685517
2	4	120	-6.658	0.3208912
3	4	193	-4.098	0.2663857
4	4	308	-1.798	0.2081311
5	4	449	0.399	0.1476374
6	4	602	2.424	0.0931680
7	16	378	4.489	0.1779069
8	16	490	6.367	0.1354970
9	16	616	8.456	0.0903190
10	64	466	10.266	0.1479521
11	64	567	12.218	0.1113804
12	64	666	14.122	0.0787522
13	64	772	15.849	0.0516968
14	64	873	17.786	0.0265724
15	64	948	19.809	0.0096117

В SL-SIC расчет ρ_2 осуществляется с помощью (20) из [6], которая учитывает влияние достоверности демодуляции канала "слабого" пользователя на достоверность демодуляции канала "сильного" пользователя. Опишем расчет ρ_2 в CWL-SIC и рассмотрим две ситуации, которые возникают при демодуляции сигнала UE1 в приемнике UE2.

1. При демодуляции \hat{x}_1 вероятность битовой ошибки $\rho_1 \leq \rho_1^z$. Согласно принятому допущению происходит исправление всех битовых ошибок в сигнале UE1, позволяющее формирование точного сигнала компенсации x_1^* и его идеальное устранение из r (4). Тогда, сигнал после компенсации r' представляет из себя обычный Q_2 -QAM сигнал с мощностью p_2 . В этом случае ρ_2 рассчитывается с помощью формулы (10) из [7], учитывая $E_s = p_2$.
2. При демодуляции \hat{x}_1 вероятность битовой ошибки $\rho_1 > \rho_1^z$. Декодер не исправляет битовые ошибки в сигнале UE1, что приводит к некорректному формированию x_1^* и его неточному устранению из r , а сигнал после устранения r' демодулируется с ошибками. В этом случае использование CWL-SIC нецелесообразно, потому что исправляющая способность декодера не позволяет увеличить точность формирования x_1^* . Декодирование группового сигнала осуществляется по SL-SIC, а для расчета ρ_2 используется формула (20) из [6].

3.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ SCC

Групповые сигналы PD-NOMA состоят из SCC, используемых в стандарте 3GPP Long Term Evolution (LTE) и основанные на QAM и Turbo кодах. Всего определено 15 СКК, а в Таблице 1 приведены их характеристики, где Q – порядок модуляции; $R_c/1024$ – скорость кодирования; Z – пороговый уровень ОСШ, при котором обеспечивается 10% BLER; ρ^z – вероятность битовой ошибки на входе декодера, при которой достигается 10% BLER на выходе декодера, т.е. обеспечивается

заданный уровень качества передачи информации.

Величина Z определяется алгоритмом декодирования, а более эффективные и сложные алгоритмы позволяют её снизить. В работе используются значения Z для СКК LTE, полученные в [8].

3.3. ФОРМИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ГРУППОВОГО СИГНАЛА PD-NOMA

Под конструкцией группового PD-NOMA сигнала подразумевается пара СКК с индексами i_1, i_2 (из Табл. 1) и пара весовых мощностных коэффициентов p_1, p_2 , которые используются для передачи данных UE1 и UE2. Конструкции состояются из парных комбинаций СКК (Табл. 1) по принципу "каждый с каждым". Номер комбинации обозначен символом j , а общее количество комбинаций $J = 120$. На Рис. 3 представлены номера составленных конструкций и присвоенные им парные комбинации СКК из Табл. 1. Например, десятая ($j = 10$) конструкция составлена из двух СКК с индексами $i_1 = 1$ (для передачи UE1) и $i_2 = 10$ (для передачи UE2).

3.4. РАСЧЕТ ВЕСОВЫХ МОЩНОСТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Использование QAM накладывает ограничение на соотношение между p_1 и p_2 , нарушение

		Номер СКК «сильного» пользователя														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Номер СКК «слабого» пользователя	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	2		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
	3			30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
	4				43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	5					55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
	6						66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
	7							76	77	78	79	80	81	82	83	84
	8								85	86	87	88	89	90	91	92
	9									93	94	95	96	97	98	99
	10										100	101	102	103	104	105
	11											106	107	108	109	110
	12												111	112	113	114
	13													115	116	117
	14														118	119
	15															120

Номера PD-NOMA конфигурации

Рис. 3. Конфигурации группового сигнала PD-NOMA.

которого неизбежно приводит к некорректной суперпозиции сигналов и росту ошибок при приеме. Обозначим это соотношение через $\gamma = p_1/p_2$. Мощностные коэффициенты должны быть подобраны таким образом, чтобы символы созвездия UE2 находились внутри зоны детектирования символов на созвездии UE1. Границы зон детектирования отмечены на Рис. 4 пунктирными линиями на примере созвездия группового сигнала, составленного из двух 16-QAM.

Ограничение на p записывается следующим образом

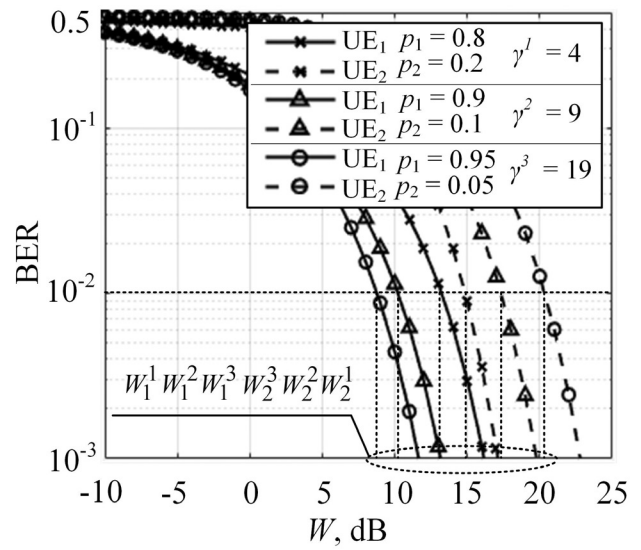


Рис. 5. Помехоустойчивость каналов при разном распределении p_1, p_2 .

$$\begin{cases} \frac{(\sqrt{Q_2}-1)(Q_1-1)}{Q_1(\sqrt{Q_2}-1)+2} < p_1 \leq 1 \\ 0 \leq p_2 < 1 - \frac{(\sqrt{Q_2}-1)(Q_1-1)}{Q_1(\sqrt{Q_2}-1)+2} \end{cases} \quad (6)$$

Увеличение p_1 приводит к уменьшению p_2 , что является причиной увеличения производительности сигнала UE1 и уменьшения производительности сигнала UE2, и, наоборот. Это показано на Рис. 5, на котором приведены примеры зависимостей p от W при трех разных распределениях p в групповом PD-NOMA сигнале.

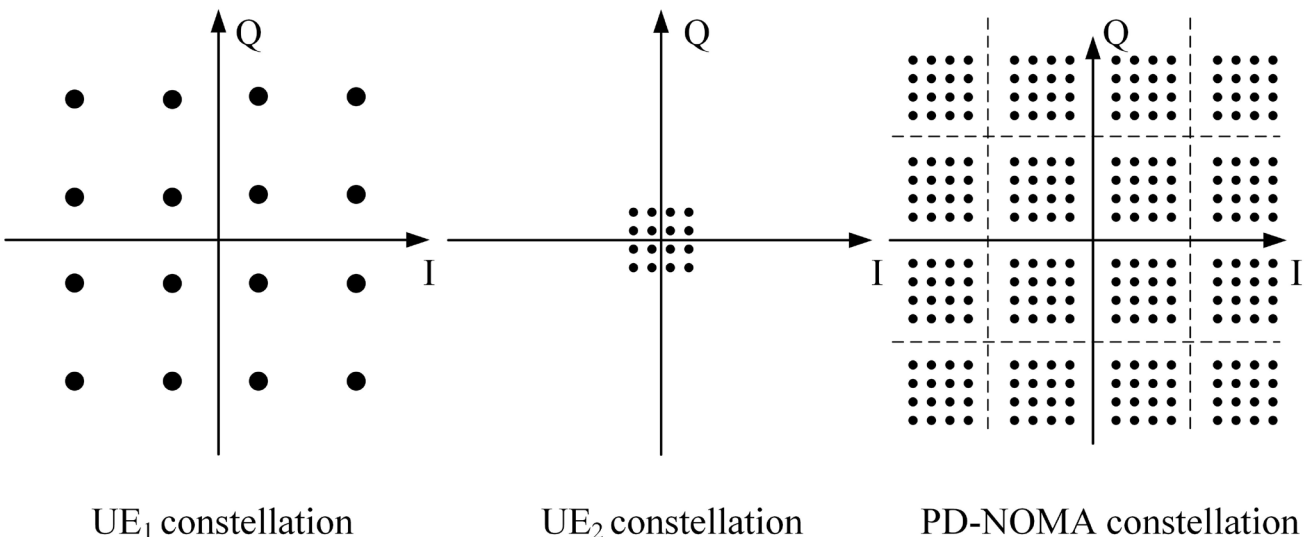


Рис. 4. Пример созвездия группового сигнала PD-NOMA.

В общем случае существует неограниченное количество значений γ , которые удовлетворяют ограничению (6). Одной из поставленных задач является определение единственного γ для каждой конструкции, которая обеспечивает максимальную производительность. Эта задача решается помощью перебора.

Учитывая (6), для конструкции j составляется выборка $\mathbf{v}_j = \{\gamma_j^1, \gamma_j^2, \dots, \gamma_j^K\}$ всех возможных соотношений с заданным дискретным шагом Δ изменения величины γ , которые участвуют в переборе. Размер выборки обозначен K , а индексом k обозначается конкретный элемент выборки.

Для оценки производительности вводится метрика усредненной производительности W_m^k , которая показывает среднее значение SNR в пользовательских каналах, при котором достигается пороговая вероятность битовой ошибки ρ^z при их демодуляции. Для k -го соотношения коэффициентов мощности значение W_m^k рассчитывается с помощью формулы

$$W_m^k = 10 \log_{10} \left(\frac{10^{\frac{W_1^k}{10}} + 10^{\frac{W_2^k}{10}}}{2} \right), \quad (7)$$

где W_1^k и W_2^k – величина ОСШ (в линейном масштабе) в каналах UE1 и UE2, при которых достигается ρ_1^z, ρ_2^z . Значения W_1^k и W_2^k можно определить графически, используя зависимость $\rho(W)$.

Рассмотрим пример расчета W_m^k для достижения $\rho_1^z, \rho_2^z = 10^{-2}$ и выбора γ для конкретной конструкции PD-NOMA сигнала. На Рис. 5 приведены зависимости BER от ОСШ для трех соотношений $\gamma^1 = 4, \gamma^2 = 9, \gamma^3 = 19$. Для соотношения γ^1 требуется, чтобы значения ОСШ составляли $W_1^1 = 8.75$ дБ для UE1 и $W_2^1 = 20.3$ дБ для UE2. Точно так же, для соотношений γ^2, γ^3 требуется, чтобы $W_1^2 = 10.2$ дБ, $W_2^2 = 17.3$ дБ и $W_1^3 = 13.25$ дБ, $W_2^3 = 14.8$ дБ. Рассчитанные W_m^k по формуле (7) для $\gamma^1, \gamma^2, \gamma^3$ составляют: $W_m^1 = 17.58$ дБ, $W_m^2 = 15.06$ дБ и $W_m^3 = 14.09$ дБ. Сравнивая эти значения, можно сделать вывод о том, что γ^3 обладает максимальной энергетической

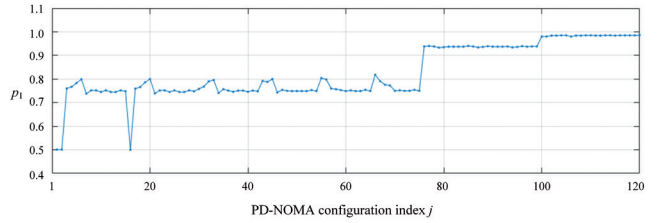


Рис. 6. Полученные коэффициенты p_1 для всех конструкций.

эффективностью, потому что заданный $\rho_1^z, \rho_2^z = 10^{-2}$ достигается при минимальном усредненном ОСШ, равным $W_m^3 = 14.09$ дБ. Соответственно, распределение коэффициентов мощности будет $p_1 = 0.95, p_2 = 0.05$.

Пользуясь вышеописанным подходом, с помощью математического моделирования методом перебора определены коэффициенты мощности для всех конструкций (Рис. 3) группового PD-NOMA сигнала, обеспечивающие максимальную усредненную производительность W_m для каждой из них. На Рис. 6 представлены значения p_1 для каждой конструкции, а p_2 может быть рассчитано с помощью $p_2 = 1 - p_1$.

3.5 РАСЧЕТ ВЫИГРЫША В ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Для всех конструкций группового PD-NOMA сигнала с полученными соответствующими коэффициентами (Рис. 6) рассчитывается зависимость $\rho_2(W)$ на выходе SL-SIC и CWL-SIC в диапазоне $W \in [-10, 45]$ с шагом $\Delta W = 0.1$ дБ. После этого графическим методом осуществляется поиск значений SNR W^{SL} и W^{CWL} , при которых обеспечивается заданный для каждой СКК уровень вероятности битовой ошибки $\rho_2(W^{SL}) = \rho_2^z$ и $\rho_2(W^{CWL}) = \rho_2^z$. Выигрыш в производительности CWL-SIC относительно SL-SIC рассчитывается по формуле

$$G = W^{SL} - W^{CWL}. \quad (8)$$

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью математической модели получены и приведены на Рис. 7 значения G для всех конструкций группового PD-NOMA сигнала. Результат моделирования

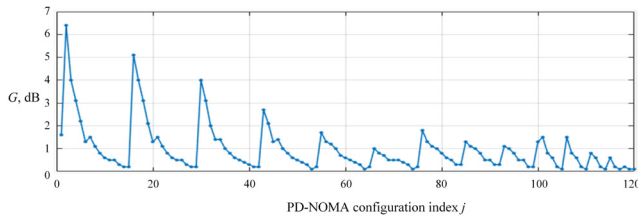


Рис. 7. Выигрыш в производительности CWL-SIC относительно SL-SIC для всех конфигураций.

показал, что максимальный выигрыш в производительности CWL-SIC достигается в PD-NOMA сигналах, состоящих из наиболее помехоустойчивых СКК. Это связано с тем, что рабочий диапазон отношения сигнал-шум помехоустойчивых СКК совпадает с эффективным диапазоном CWL-SIC, поэтому выигрыш в производительности наибольший именно для конфигураций PD-NOMA сигнала из помехоустойчивых СКК.

Анализируя полученный результат можно сделать вывод о том, что CWL-SIC обеспечивает существенный выигрыш в производительности канала "сильного" пользователя, который лежит в диапазоне 1.5-6.4 дБ для помехоустойчивых СКК (индексы 1-6). При использовании менее помехоустойчивых, но более высокоскоростных СКК (индексы 7-15) выигрыш в производительности лежит в диапазоне 0-1.5 дБ. Это доказывает высокую эффективность CWL-SIC и целесообразность его использования в реальных системах, особенно в условиях низкого отношения сигнал-шум.

Далее приведен наглядный пример, демонстрирующий выигрыш в производительности G для второй ($j = 2$) конструкции, которая является результатом суперпозиции СКК с индексами $i_1 = 1, i_2 = 2$ (табл. 1) при $p_1 = 0.510, p_2 = 0.490$ (Рис. 6). На Рис. 8 приведена зависимость $\rho_2(W)$ и отмечен пороговый уровень $\rho_2^z = 0.3208912$ (табл. 1). Графическим методом найдены значения ОСШ, при которых достигается $\rho_2 = \rho_2^z: W^{SL} = 2.8, W^{CWL} = -3.6$. Соответственно, выигрыш в производительности для второй конструкции может быть рассчитан по (8) и составляет $G = 6.4$ дБ.

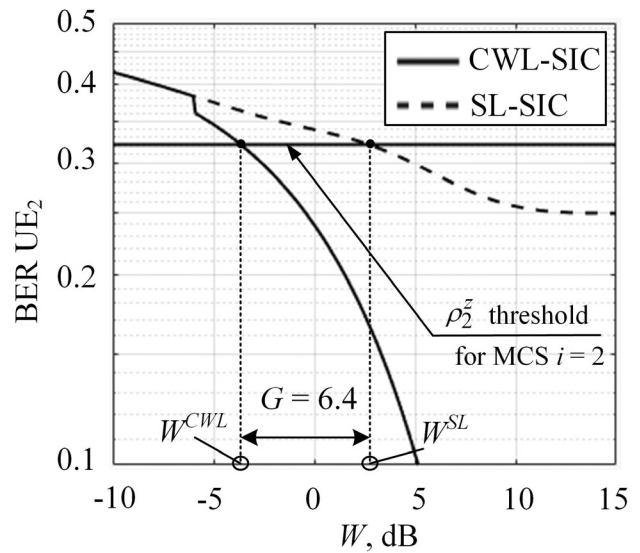


Рис. 8. Оценка выигрыша в производительности для второй конструкции группового PD-NOMA сигнала.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приводится сравнительный анализ производительности двух подходов SIC декодирования групповых сигналов PD-NOMA в системе с двумя пользователями. Ключевая особенность работы заключается в том, что в рассматриваемой системе PD-NOMA с двумя пользователями используются реальные сигнально-кодовые конструкции из стандарта связи 3GPP LTE.

Из парных комбинации СКК по методу "каждый с каждым" сформирован набор из 120 конструкций группового PD-NOMA сигнала, которые могут быть применимы для передачи данных в системах PD-NOMA. Для каждой конструкции методом перебора найдены весовые мощностные коэффициенты, обеспечивающие максимальную усредненную производительность для двух пользовательских каналов.

Показано, что максимальный выигрыш в производительности CWL-SIC относительно SL-SIC достигается в групповых сигналах PD-NOMA, составленных из помехоустойчивых СКК. CWL-SIC обеспечивает существенный выигрыш в производительности канала "сильного" пользователя, который лежит в диапазоне 1.5-6.4 дБ для помехоустойчивых СКК (индексы 1-6). При использовании менее помехоустойчивых, но более

высокоскоростных СКК (индексы 7-15) выигрыш в производительности лежит в диапазоне 0-1.5 дБ. Это доказывает высокую эффективность CWL-SIC и целесообразность его использования в реальных системах, особенно в условиях низкого отношения сигнал-шум.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benjebbour A, Saito K, Li A, Kishiyama Y, Nakamura T. Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials. *Proc. International conference on wireless networks and mobile communications (WINCOM)*, 2015:1-6. DOI: 10.1109/WINCOM.2015.7381343.
2. Vanka S, Srinivasa S, Gong Z, Viki P, Stamatou K, Haenggi M. Superposition coding strategies: Design and experimental evaluation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(7):2628-2639.
3. Higuchi K, Benjebbour A. Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access. *IEICE Transactions on Communications*, 2015, 98(3):403-414.
4. Saito K, Benjebbour A, Harada A, Kishiyama Y, Nakamura T. Link-level performance of downlink NOMA with SIC receiver considering error vector magnitude. *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2015:1-5.
5. Yan C, Harada A, Benjebbour A, Lan Y, Li A, Jiang H. Receiver design for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA). *IEEE 81st vehicular technology conference (VTC Spring)*, 2015:1-6.
6. Assaf T, Al-Dweik A, El Moursi M, Zeineldin H, Al-Jarraj M. Exact bit error-rate analysis of two-user NOMA using QAM with arbitrary modulation orders. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(12):2705-2709.
7. Kryukov Y, Pokamestov D, Novichkov S. Symbol Error-Rate Analytical Expressions for a Two-User PD-NOMA System with Square QAM. *Symmetry*, 2021, 13(11):2153.
8. Fan J, Yin Q, Li G, Peng B, Zhu X. MCS selection for throughput improvement in downlink LTE

systems. *Proceedings of 20th international conference on computer communications and networks (ICCCN)*, 2011:1-5.

Крюков Яков Владимирович

к.т.н., доцент

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Томск 634050, Россия

kryukov.tusur@gmail.com

Покаместов Дмитрий Алексеевич

к.т.н., доцент

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Томск 634050, Россия

dmaltomsk@mail.ru

Бровкин Андрей Александрович

аспирант

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Томск 634050, Россия

soldierbrovkin@gmail.com

Рогожников Евгений Васильевич

к.т.н., доцент

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Томск 634050, Россия

udzhon@mail.ru.