

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЕТИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ 5G С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА

Н. Ибрагим, А. А. Парамонов

*Одной из основных задач при построении сетей мобильной связи пятого поколения 5G является достижение высокой эффективности использования частотного спектра при сохранении приемлемого уровня внутрисистемных помех, что является ключевым условием для удовлетворения растущих потребностей в высоких скоростях передачи данных и надежности передачи информации. Перспективным для достижения этих целей представляется метод неортогонального множественного доступа, позволяющий нескольким пользователям использовать одновременно одни и те же временные и частотные ресурсы, причем ортогональность сигналов при этом не требуется. В данной статье оценивается эффект применения метода неортогонального множественного доступа в передаче вниз по каналу связи, то есть от базовой станции к мобильному пользователю. Оценивается уровень внутрисистемных помех и отношение сигнал/помеха у пользователя, а также достижимая спектральная эффективность передачи. Результаты, полученные в ходе моделирования, демонстрируют эффективность применения метода неортогонального множественного доступа.*

***Ключевые слова:** сеть мобильной связи пятого поколения, неортогональный множественный доступ, метод неортогонального множественного доступа, отношение сигнал/помеха, спектральная эффективность.*

### Введение

В сотовой системе связи мощность помех для пользователя определяется многими факторами, в том числе количеством пользователей, присутствующих в определенной соте и в ближайших сотах. По мере увеличения количества этих пользователей мощность помех имеет тенденцию к увеличению. Это связано с тем, что большее количество пользователей используют одни и те же ресурсы в соте, что приводит к более высоким уровням помех из-за увеличения числа одновременно передаваемых пользователям сигналов базовых станций. При этом каждый такой сигнал создает помехи для других пользователей в той же соте и в соседних сотах. С увеличением количества пользователей вероятность возникновения взаимных помех возрастает, что влияет на отношение сигнал/помеха (ОСП) и общую пропускную способность системы. Традиционный способ преодоления этой проблемы – использование ортогональных сигналов всеми пользователями, однако при этом фиксированный частотный ресурс ограничивает количество пользователей.

Технология неортогонального множественного доступа (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) позволяет увеличить число пользователей, то есть повысить спектральную эффективность системы связи [1]. Правда, при этом увеличивается уровень внутрисистемных помех, однако при правильной стратегии управления мощностью базовой станции можно эффективно управлять мощностью помех в системах с различным количеством пользователей на соту. Таким образом, управление помехами становится решающим фактором оптимизации пропускной способности системы и качества обслуживания.

### Модель системы

В системе сотовой связи с несколькими сотами каждая сота включает нескольких пользователей. Пользователи в пределах соты группируются на основе их близости к базовой станции и в зависимости от принадлежности к той или иной группе для них назначаются уровни мощности. NOMA для оптимизации производительности системы выполняет распределение мощности на основе состояния канала передачи и расстояния до пользователя. Мощность сигнала, получаемого пользователем, зависит от расстояния между пользователем и базовой станцией. Чем дальше пользователь находится от базовой станции, тем сильнее будет предназначенный ему сигнал этой станции [2]. В результате получается, что сигнал, приходящий к близко расположенному к базовой станции пользователю, будет слабым, а помехи – сильными. Снизить уровень этих помех позволяет технология последовательного подавления помех (sequential interference cancellation – SIC). Она основана на том, что условия приема полезного сигнала вблизи от базовой станции оказываются плохими, в то время как помеха, представляющая собой сигнал, предназначенный другому пользователю, может быть принята с высоким качеством. Это позволяет выделить самый мощный помеховый сигнал и вычесть его из принимаемой суммы сигнала и помех, очистив тем самым сигнал от этой помехи. Повторяя эту процедуру последовательно несколько раз, можно очистить сигнал от нескольких наиболее мощных помех.

При распределении мощности передатчика базовой станции будем считать, что каждая сота ограничена окружностью радиусом  $R$  и эта сота разделяется на три зоны вокруг базовой станции.

Первая зона – это круг радиусом  $0,4R$ . Пользователям этой зоны выделяется мощность  $\alpha_1 P_t$ , где  $P_t$  – полная мощность передатчика. Вторая зона – кольцо с внутренним и внешним радиусами  $0,4R$  и  $0,7R$  соответственно. Пользователям второй зоны выделяется мощность  $\alpha_2 P_t$ . Третья зона – кольцо с внутренним и внешним радиусами  $0,7R$  и  $R$  соответственно. Пользователям этой зоны выделяется мощность  $\alpha_3 P_t$ . Естественно, что  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ .

Если антенны базовой станции и пользователей изотропные, а длина излучаемой волны –  $\lambda$ , распределение мощности передатчика по зонам выглядит следующим образом:

$$P_d = \begin{cases} \frac{\alpha_1 P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2}, & \text{если } d \leq 0,4R; \\ \frac{\alpha_2 P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2}, & \text{если } 0,4R < d \leq 0,7R; \\ \frac{\alpha_3 P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2}, & \text{если } d > 0,7R. \end{cases} \quad (1)$$

В дальнейшем при расчетах принято, что  $\alpha_1 = 0,194$ ,  $\alpha_2 = 0,323$  и  $\alpha_3 = 0,483$ .

Эта схема распределения мощности направлена на оптимизацию выделения ресурсов в NOMA путем учета расстояний до пользователей внутри ячейки. Чем ближе к базовой станции расположен пользователь, тем меньше мощность, выделяемая для него этой станцией. В то же время для пользователей, располагающихся ближе к границам сот, выделяется большая мощность для преодоления потерь сигнала и поддержания качества связи.

Выражение (1) показывает распределение мощности передатчика по зонам, но не позволяет определить, какая мощность придется конкретному пользователю, так как это зависит и от количества пользователей, и от их распределения по зонам. Поэтому в приемник некоторого  $i$ -го пользователя, располагающегося в  $j$ -й зоне, поступает мощность сигнала, равная

$$P_{di} = \frac{P_d}{n_j},$$

где  $n_j$  – количество активных пользователей в  $j$ -й зоне.

### Результаты моделирования

Цель моделирования сотовой системы, использующей технологию NOMA, заключается в определении ее основных характеристик – уровня помех и отношения сигнал/помеха у пользователя, а также пропускной способности системы, и сравнении этих показателей с показателями аналогичной системы, не использующей указанную техно-

логию. Местоположение пользователей генерируется случайным образом внутри соты.

На сигнал влияют внутрисистемные помехи, представляющие собой сигналы базовых станций, предназначенные другим пользователям в той же соте и в соседних сотах. Мощность каждой из этих помех рассчитывается следующим образом:

$$I = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi r)^2},$$

где  $P_t$  – мощность источника помехи;  $r$  – расстояние между пользователем и источником помехи. При расчетах принималось, что пользователи располагались случайным образом в пределах соты радиусом  $R = 200$  м, а длина волны  $\lambda = 0,125$  м.

Отношение сигнал/помеха  $q$  для некоторого  $i$ -го пользователя представляет собой отношение мощности принимаемого сигнала к сумме мощностей помех:

$$q_i = \frac{P_{d_i}}{\Sigma I}.$$

При моделировании исследовался метод SIC для уменьшения помех от соседних пользователей.

В статье представлены результаты моделирования для двух конфигураций сотовой системы: три соприкасающиеся соты с двумя пользователями в каждой (всего 6 пользователей) и семь сот (рис. 1) с двумя пользователями в каждой (всего 14 пользователей).

В процессе моделирования определялись суммарные уровни помех  $\Sigma I$  и ОСП для каждого пользователя, а также спектральная эффективность для каждого пользователя при использовании технологии NOMA или без этой технологии. Под спектральной эффективностью понималась скорость передачи данных, которая может быть достигнута на единицу полосы пропускания. Эта скорость для каждого пользователя определяется формулой Шеннона:

$$C_i = \log_2(1 + q_i).$$

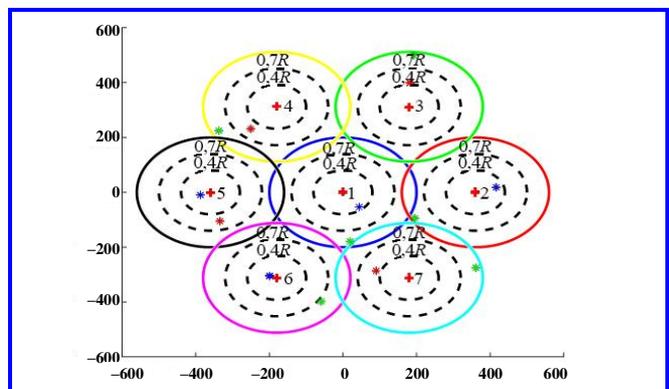


Рис. 1. Конфигурация сотовой системы

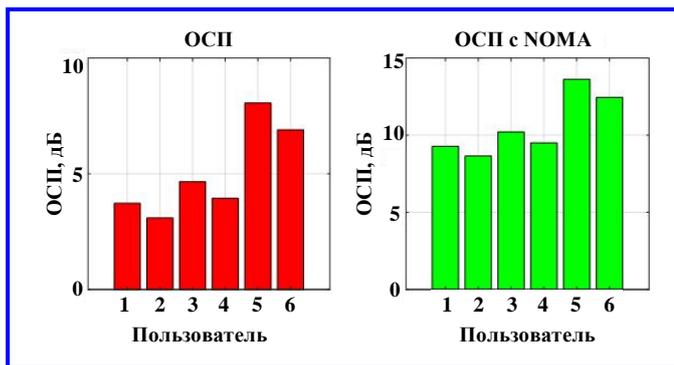


Рис. 2. Значения отношения сигнал/помеха для каждого пользователя без NOMA и с NOMA для первой конфигурации сети

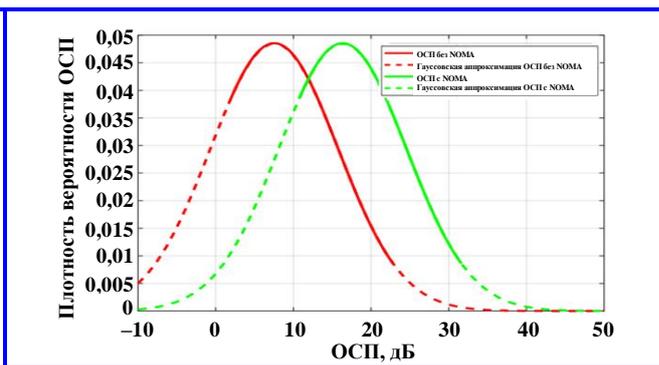


Рис. 3. Плотность вероятности отношения сигнал/помеха для первой конфигурации сети

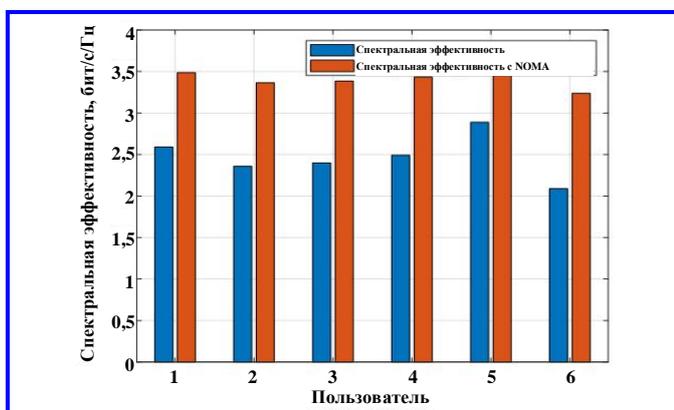


Рис. 4. Спектральная эффективность для первой конфигурации сети

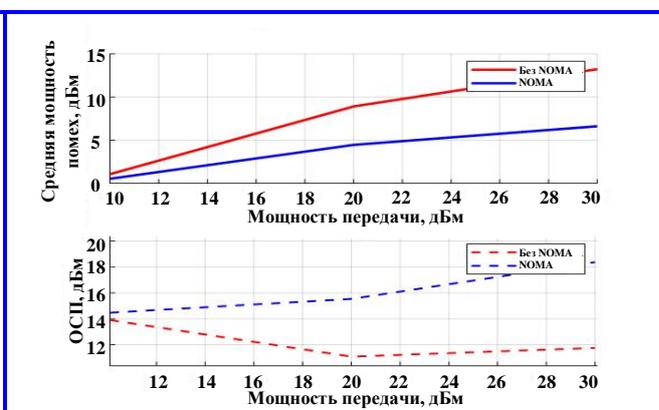


Рис. 5. Зависимость уровня помех и отношения сигнал/помеха от мощности передачи для первой конфигурации сети

На рис. 2 – 5 приведены результаты компьютерного моделирования для первой конфигурации. Рис. 2 – 4 построены при мощностях базовых станций 30 дБм (то есть 1 Вт), а рис. 5 – при изменении этих мощностей.

На рис. 2 показаны отношения сигнал/помеха для каждого из шести пользователей системы при некотором случайно выбранном их расположении. Как видим, для каждого пользователя применение технологии NOMA позволило повысить отношение сигнал/помеха примерно на 5 дБ.

Рис. 2 построен для вполне конкретного расположения пользователей в пределах сот. При другом их расположении значения ОСП изменятся, поэтому более показательным является статистическое представление ОСП в виде плотности вероятности, полученной при варьировании расположения пользователей в пределах сот. Эти результаты показаны на рис. 3: сплошными линиями показаны результаты моделирования, а пунктирными – экстраполяция этих зависимостей в предположении, что распределения отношений сигнал/помеха гауссовские. Среднее значение ОСП при использовании NOMA увеличилось примерно на 10 дБ, а дисперсия отношения сигнал/помеха не изменилась.

На рис. 4 показана спектральная эффективность для каждого из шести пользователей системы, располагавшихся описанным выше способом. Оказывается, что и этот показатель заметно возрастает при использовании технологии NOMA.

Результаты исследования зависимости мощности помех и ОСП от мощности передачи для первой конфигурации сети показаны на рис. 5, из которого видно, что с ростом мощности передачи растет уровень помех, но возрастает и ОСП. Интересно, что с ростом мощности передачи эффект от применения технологии NOMA возрастает.

Результаты моделирования сотовой системы с семью сотами (см. рис. 1), в каждой из которых присутствуют по два пользователя, приведены на рис. 6 и 7. При моделировании мощности передатчиков базовых станций принимались равными 30 дБм. Можно заметить, что поведение зависимостей на рис. 6 и 7 качественно повторяет поведение зависимостей, приведенных на рис. 2 и 3, хотя средние значения ОСП уменьшились. Это легко объяснимо тем, что во второй конфигурации увеличилось количество сот и, следовательно, возрос уровень внутрисистемных помех.

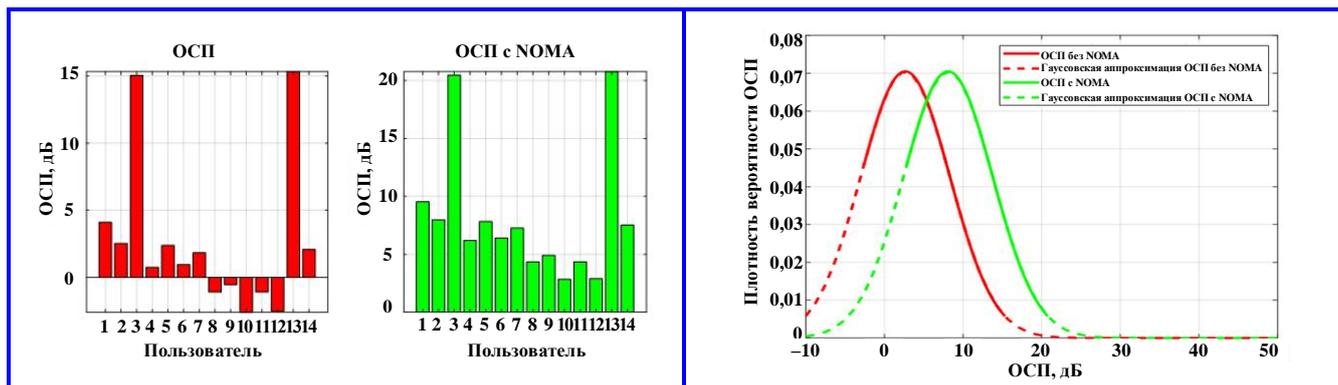


Рис. 6. Значения отношения сигнал/помеха для каждого пользователя без NOMA и с NOMA для второй конфигурации сети

Рис. 7. Плотность вероятности отношения сигнал/помеха для второй конфигурации сети

### Заключение

Технология NOMA, включающая распределение мощности передатчика базовой станции между абонентами в соответствии с расстоянием до абонента и процедуру последовательного подавления помех SIC, позволяет увеличить для пользователя среднее отношение сигнал/помеха и уменьшить вероятность того, что это отношение опустится ниже допустимого уровня.

Применение технологии NOMA позволяет повысить пропускную способность канала для пользователя.

Поступила в редакцию 10.04.2024

Недаа Ибрагим, аспирантка, т. +7 (925) 297-33-67, e-mail: nedaaeabraheem92@gmail.com.  
Алексей Анатольевич Парамонов, доктор технических наук, профессор,  
т. +7 (916) 605-65-85, e-mail: paramonov@mirea.ru.  
(ПТУ МИРЭА).

### Литература

1. A Systematic Review on NOMA Variants for 5G and beyond / I. Budhiraja, N. Kumar, S. Tyagi [et al.]. – DOI : 10.1109/ ACCESS.2021.308160 // IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2021. – Vol. 9. – P. 85573–644. – URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Systematic-Review-on-NOMA-Variants-for-5G-and-Budhiraja-Kumar/641a68bf8b818d03304a9e5f04ef93bb54b5f381>.
2. Furqan, H. M. Physical Layer Security for NOMA: Requirements, Merits, Challenges, and Recommendations / H. M. Furqan, J. M. Hamamreh, H. Arslan. – DOI : 10.48550/arXiv.1905.05064 // IEEE communication magazine. – 2019. – URL : <https://arxiv.org/abs/1905.05064v1>.

## IMPROVING QUALITY METRICS OF THE FIFTH GENERATION 5G NETWORK USING NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS TECHNOLOGY

N. Ibrahim, A. A. Paramonov

*The article evaluates the effectiveness of applying Non-Orthogonal Multiple Access in downlink transmission in 5G networks. NOMA enables multiple users to share the same time and frequency resources without requiring signal orthogonality. The evaluation focuses on the level of intra-system interference, signal-to-interference ratio at the user, and achievable spectral efficiency. The results demonstrate the effectiveness of Non-Orthogonal Multiple Access in improving quality metrics and meeting the demands for high data transmission rates and reliable information delivery in 5G networks.*

**Key words:** 5G, Non-Orthogonal Multiple Access, Non-Orthogonal Multiple Access, Signal-to-Interference Ratio, Spectral Efficiency.

### References

1. A Systematic Review on NOMA Variants for 5G and beyond / I. Budhiraja, N. Kumar, S. Tyagi [et al.]. – DOI : 10.1109/ ACCESS.2021.308160 // IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2021. – Vol. 9. – P. 85573–644. – URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Systematic-Review-on-NOMA-Variants-for-5G-and-Budhiraja-Kumar/641a68bf8b818d03304a9e5f04ef93bb54b5f381>.

2. Furqan, H. M. Physical Layer Security for NOMA: Requirements, Merits, Challenges, and Recommendations / H. M. Furqan, J. M. Hamamreh, H. Arslan. – DOI : 10.48550/arXiv.1905.05064 // IEEE communication magazine. – 2019. – URL : <https://arxiv.org/abs/1905.05064v1>.

*Nedaa Ibrahim*, graduate student, t. +7 (925) 297-33-67, e-mail: [nedaaobraheem92@gmail.com](mailto:nedaaobraheem92@gmail.com).  
*Alexey Anatolyevich Paramonov*, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
t. +7(916) 605-65-85, e-mail: [paramonov@mirea.ru](mailto:paramonov@mirea.ru).  
(RTU MIREA).