

УДК 621.396.41

Я.В. Крюков, Д.А. Покаместов, Е.В. Рогожников, Ю.С. Громова

## Моделирование канала связи CO-NOMA

Системы мобильной связи пятого поколения 5G в 2019 г. находятся на заключительной стадии разработки и стандартизации. Одной из наиболее важных проблем для разработчиков является повышение спектральной эффективности, которая решается в том числе с помощью применения новых методов множественного доступа. На начальном этапе разработки 5G исследовательскими группами предложено применение методов неортогонального множественного доступа, а одним из наиболее перспективных из них является метод неортогонального множественного доступа с разделением каналов по мощности (NOMA). В работе рассматривается модификация данного метода – применение дополнительной ретрансляции сигналов между абонентами (CO-NOMA). Показано, что уплотнение каналов методом CO-NOMA способствует увеличению спектральной эффективности системы в определенных условиях канала передачи. Произведено математическое моделирование множественного канала связи двух абонентов для двух сценариев распределения ресурса связи между ними. Приведено сравнение помехоустойчивости и информационной эффективности систем OFDMA, NOMA и CO-NOMA в простом канале передачи с аддитивным белым гауссовым шумом и затуханием сигнала в свободном пространстве.

**Ключевые слова:** OFDMA, NOMA, CO-NOMA, 5G, множественный доступ, ретрансляция.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-2-12-16

В 2012 г. группой разработчиков был предложен метод неортогонального множественного доступа с разделением каналов по мощности. В настоящее время эта технология постоянно совершенствуется, а в 2016 г. было предложено использовать дополнительную ретрансляцию сигналов для увеличения спектральной эффективности системы связи.

Применение ретрансляции сигналов между приемно-передающими устройствами предложено довольно давно и в настоящее время применяется в некоторых системах связи (например, Ad-hoc). Способ организации канала связи по цепочке эффективно используется в радиорелейных линиях, а также сенсорных, специальных, самоорганизующихся сетях или сетях без единого узлового центра (базовой станции) и т.д. В настоящее время ретрансляционный способ организации сети активно используется для организации связи внутри самоорганизующейся группы (роя) беспилотных летательных аппаратов (или дронов).

Однако применение ретрансляции сигналов в системах связи беспроводного широкополосного доступа (например, LTE), которые работают по технологии OFDMA и основаны на централизованном управлении доступом абонентов к связи, не является эффективным из-за дополнительных затрат ресурса связи на дополнительный канал. Это приводит к уменьшению спектральной эффективности и усложнению процедуры контроля и управления пользовательскими каналами. В связи с этим в современных сотовых системах связи ретрансляция сигналов не используется.

В настоящее время ведущими инженерами-исследователями в области беспроводной связи ведется разработка алгоритмов и технологий для стандарта связи следующего, пятого, поколения. Стремление увеличить спектральную и энергетическую эффективность, а также гибкость будущих систем беспроводной связи привело к возникновению идеи

применения ретрансляции сигналов на базе метода множественного доступа с разделением каналов по мощности NOMA, который был предложен в [1–8], наряду с методом множественного доступа с помощью разреженных кодов [9, 10]. Ретрансляция сигналов на базе группы методов NOMA впервые опубликована в работах [11] в 2015–2016 гг. В зарубежных источниках данная технология называется Cooperative-NOMA (CO-NOMA).

Технология CO-NOMA предложена совсем недавно и представляет интерес для моделирования и экспериментального исследования. В работе описаны общие принципы организации канала связи CO-NOMA, а также производится оценка его эффективности по сравнению с каналами связи OFDMA и NOMA.

### Распределение ресурса связи в OFDMA

В нынешних системах связи беспроводного широкополосного доступа для организации многоканальной связи используется метод множественного доступа OFDMA, который имеет множество преимуществ, однако является недостаточно гибким с точки зрения распределения энергетического ресурса связи между абонентами. В спецификации LTE предусмотрена регулировка мощности каждого служебного и пользовательского физического канала. Однако часто возникает ситуация, когда для удовлетворения качества связи абонента не требуется использование всей доступной мощности, и в таком случае мощность его канала будет снижена. Недостаток OFDMA заключается в том, что неиспользованный ресурс мощности невозможно применить для увеличения качества связи другого абонента (рис. 1). На рис. 1 количество выделенного под каждый канал ресурса связи представлено в виде объемной фигуры с гранями  $P$  (мощность),  $T$  (время) и  $F$  (полоса частот). Объем фигуры показывает общее количество ресурса связи, затрачиваемое на организацию связи.

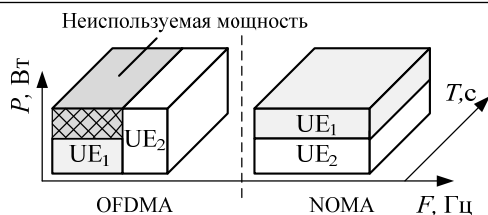


Рис. 1. Пример распределения ресурса связи между двумя абонентами

Для свободного мощностного ресурса может использоваться группа методов NOMA, согласно которым частотно-временной и энергетический ресурс распределяются одновременно между абонентами для максимального удовлетворения качества связи каждого из них, исходя из информации о состоянии их каналов передачи. Применение метода NOMA предоставляет возможность задействовать всю доступную мощность передачи, перераспределяя ее между абонентами.

**Метод CO-NOMA**

Метод CO-NOMA заключается в дополнительной ретрансляции сигнала от одного абонента к другому при условии, что канал связи между абонентами является благоприятным. Процедура ретрансляции при этом может осуществляться в дополнительный частотно-временной ресурс, например временной слот. Применение ретрансляции на базе NOMA наиболее эффективно (в отличие от OFDMA) потому, что групповой сигнал NOMA уже содержит в себе сигналы всех абонентов, поэтому не требуется выделение дополнительного ресурса для передачи ретранслируемого.

Распределение ресурса связи в CO-NOMA представлено на рис. 2. В течение первого временного слота сигнал, сформированный по технологии NOMA, передается от узловой станции к абонентам UE<sub>1</sub> и UE<sub>2</sub>. В течение второго временного слота сигнал ретранслируется от UE<sub>1</sub> к UE<sub>2</sub>.

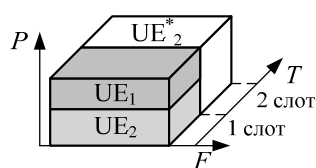


Рис. 2. Пример распределения ресурса связи между двумя абонентами в CO-NOMA

На стороне абонента UE<sub>2</sub> (см. рис. 2) происходит гибкая демодуляция двух принятых сигналов – сигнала от узловой станции, принятого в первый временной слот, и ретранслированного сигнала от другого абонента, принятого во второй временной слот. Таким образом, отношение сигнал/шум на входе демодулятора сообщения UE<sub>2</sub> повышается и достигается улучшение качества связи.

Технология CO-NOMA может эффективно использоваться в системах связи широкополосного беспроводного доступа в следующих случаях: 1) абоненту с низким значением ОСШ требуется обеспечить дополнительное качество связи, при

этом имеется свободный частотно-временной и энергетический ресурс; 2) на трассе между узловой станцией и одним из абонентов присутствуют компоненты, вносящие существенное ослабление и помехи в сигнал (например, толстая стена), а трасса между абонентами имеет благоприятные условия для распространения сигнала (рис. 3).

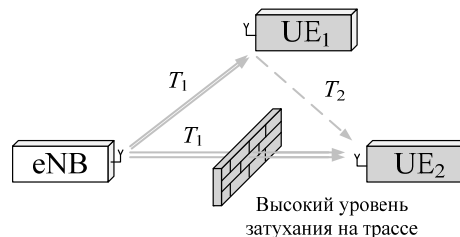


Рис. 3. Ретрансляция сигнала в CO-NOMA

Организацию нисходящего канала связи CO-NOMA для двух абонентов можно представить в виде следующего алгоритма:

1. На стороне узловой станции происходит формирование общего транспортного сигнала для двух абонентов, после чего сигнал излучается в радиозэфир во временной слот  $T_1$  (см. рис. 3).
2. На стороне первого абонента UE<sub>1</sub> осуществляется демодуляция и компенсация сигнала второго абонента UE<sub>2</sub> с последующей демодуляцией собственного сигнала (алгоритм SIC демодуляции). При этом регенерированный сигнал второго абонента хранится в памяти до момента ретрансляции.
3. В течение второго временного слота  $T_2$  происходит передача сигнала второго абонента от первого абонента к второму абоненту (см. рис. 3 – пунктирная линия). При этом процедура ретрансляции должна быть точно синхронизирована с системным временем и полностью завершена за время второго временного слота.
4. После приема ретранслирующего сигнала на стороне второго абонента происходит гибкая демодуляция двух принятых сигналов. На этапе демодуляции могут применяться различные алгоритмы принятия решений при условии, что происходит когерентная обработка и установлена точная синхронизация.

**Моделирование канала связи CO-NOMA**

Целью моделирования является сравнение характеристик помехоустойчивости каналов передачи OFDMA, NOMA и CO-NOMA при одинаковых скоростях передачи и условиях распространения сигнала. Структурная схема организации канала связи CO-NOMA представлена на рис. 4.

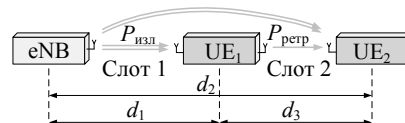


Рис. 4. Структурная схема канала связи CO-NOMA

В CO-NOMA для передачи информации отводится два одинаковых временных слота длительностью 0,5 с каждый. Первый слот – передача дан-

ных от eNB к UE<sub>1,2</sub>; второй слот – ретрансляция сигнала от UE<sub>1</sub> к UE<sub>2</sub>. В OFDMA и NOMA весь информационный пакет передается за один слот длительностью 1 с.

Абоненты UE<sub>1</sub> и UE<sub>2</sub> располагаются друг за другом в одинаковом направлении на расстоянии  $d_1$  и  $d_2$  от узловой станции eNB, при этом абонент UE<sub>1</sub> находится ближе к eNB, т.е.  $d_1 < d_2$ . На сигнал воздействует нормальная помеха, спектральная плотность мощности которой  $N_0 = -100$  дБВт/Гц и ослабление (для несущей частоты 6 ГГц), которое в первом приближении зависит только от расстояния между приемником и передатчиком.

Мощность излучения транспортного сигнала  $P_{\text{изл}}$  на стороне узловой станции изменяется в диапазоне от 0 до 100 дБм. В сотовых системах связи мощность излучения абонентской станции меньше, чем узловой станции, поэтому прием мощность ретрансляционного сигнала  $P_{\text{ретр}}$  на порядок меньше, чем  $P_{\text{изл}}$ . Длительности первого и второго слотов равны. Отношение сигнал/шум измеряется для сигнала мощностью  $P_{\text{изл}}$  на стороне каждого абонента. Общее количество переданных бит за время  $T$  в полосе частот  $F$  одинаковое для OFDMA, NOMA и CO-NOMA.

В общем случае возможно бесконечное количество различных конфигураций каналов связи, поэтому, чтобы оценить эффективность CO-NOMA, были выбраны такие конфигурации (сценарии), при которых использование CO-NOMA оказывается выгоднее, чем OFDMA и NOMA, с точки зрения максимальной спектральной эффективности.

Зависимости BER (SNR), полученные в результате моделирования, представлены на рис. 5.

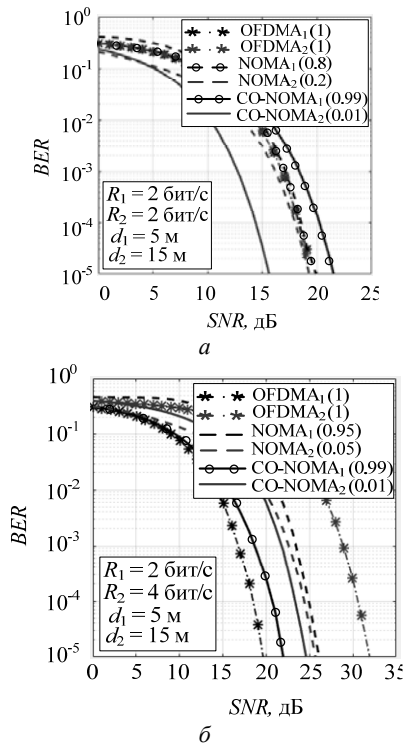


Рис. 5. Зависимость BER (SNR) для двух каналов OFDMA, NOMA, CO-NOMA: а – сценарий 1; б – сценарий 2

В скобках указаны парциальные мощности каждого канала, а в левом нижнем углу приведены расстояния и скорости передачи каждого абонента. Значения помехоустойчивости измерены при опорном значении вероятности битовой ошибки  $10^{-5}$ . Под помехоустойчивостью понимается значение отношения сигнал/шум (SNR), при котором достигается заданная скорость передачи с заданной вероятностью битовой ошибки.

Из зависимостей, представленных на рис. 5, б, видно, что помехоустойчивость первого канала CO-NOMA меньше на 2 дБ, чем в канале OFDMA, но больше на 3 дБ, чем в канале NOMA. Помехоустойчивость второго канала CO-NOMA на 1 и 7,5 дБ больше, чем в канале NOMA и OFDMA. Соответственно, как и в первом случае, система CO-NOMA имеет выигрыш энергетической эффективности.

#### Расчет и сравнение информационной эффективности систем

Обобщенной характеристикой эффективности систем связи является коэффициент использования канала по пропускной способности – информационная эффективность [12–15]:

$$\eta_k = \frac{\gamma_k}{\log(\gamma_k/\beta_k + 1)}.$$

Для оценки эффективности систем связи можно применять коэффициент использования канала по мощности (энергетическая эффективность)

$$\beta_k = \frac{R_k}{SNR_k}.$$

и коэффициент использования канала по полосе частот (спектральная эффективность)

$$\gamma_k = \frac{R_k}{F_k}.$$

Тогда информационную эффективность системы  $Q$  можно представить в виде суммы информационных эффективностей каждого канала. В таблице приведены рассчитанные значения  $Q$  для каждого метода мультиплексирования каналов. Информационная эффективность CO-NOMA в 1,52 раза больше, чем в NOMA, и в 1,53 раза больше, чем в OFDMA.

#### Информационная эффективность системы

Метод	OFDMA	NOMA	CO-NOMA
$Q$	$4,49e^{-2}$	$4,52e^{-2}$	$6,90e^{-2}$

#### Выводы

В работе рассмотрено применение и произведено моделирование ретрансляции сигналов на основе метода множественного доступа с разделением каналов по мощности NOMA. Результат моделирования показал, что метод CO-NOMA может быть эффективно применен в реальных условиях (в описанных ранее случаях) наравне с методами OFDMA и NOMA.

По результатам моделирования рассчитана информационная эффективность многоканальных систем связи, основанных по технологиям OFDMA, NOMA и CO-NOMA. Результат расчета показал, что

система CO-NOMA имеет наибольшую информационную эффективность при выбранных сценариях моделирования.

Получено, что системы CO-NOMA могут обладать большей информационной эффективностью, чем системы NOMA. Рассчитанное значение информационной эффективности на основании результатов моделирования системы CO-NOMA в 1,52 раза больше, чем в NOMA.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований молодых российских ученых. Грант МК-1126.2019.9.

### Литература

- Marcus M.J. 5G and «IMT for 2020 and beyond» [Spectrum Policy and Regulatory Issues] // *IEEE Wireless Communications*. – 2015. – Vol. 22, No. 4. – P. 2–3.
- Soldani D. Horizon 2020 and beyond: on the 5G operating system for a true digital society / D. Soldani, A. Manzalini // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. – 2015. – Vol. 10, No. 1. – P. 32–42.
- Benjebbour A. Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials // *Wireless Networks and Mobile Communications, 2015 International Conference on, IEEE*. – 2015. – P. 1–6.
- Kimy B. Non-orthogonal multiple access in a down-link multiuser beamforming system // *MILCOM 2013–2013 IEEE Military Communications Conference, IEEE*. – 2013. – P. 1278–1283.
- Dai L. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends // *IEEE Communications Magazine*. – 2015. – Vol. 53, No. 9. – P. 74–81.
- Ding Z. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems / Z. Ding, M. Peng, H. Poor // *IEEE Communications Letters*. – 2015. – Vol. 19, No. 8. – P. 1462–1465.
- Крюков Я.В. Алгоритм расчета мощности каналов при неортогональном множественном доступе NOMA / Я.В. Крюков, А.Я. Демидов, Д.А. Покаместов // *Доклады ТУСУР*. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 91–94.
- Крюков Я.В. Метод множественного доступа с разделением каналов по мощности на ортогональных несущих // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. – 2018. – Т. 12, № 1. – С. 17–22.
- Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков, Е.В. Рогожников, Р.Р. Абенов // *Электросвязь*. – 2016. – № 10. – С. 73–78.
- Покаместов Д.А. Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков // *Доклады ТУСУР*. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 65–69.
- Ding Z. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems // *IEEE Communications Letters*. – 2015. – Vol. 19, No. 8. – P. 1462–1465.
- Радиотехнические системы передачи информации / В.А. Борисов, В.В. Калмыков, Я.М. Ковальчук. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
- Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
- Теория электрической связи: учеб. для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.
- Панфилов И.П. Теория электрической связи / И.П. Панфилов, В.Е. Дырда. – М.: Радио и связь, 1991. – 344 с.

### Крюков Яков Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7-913-104-44-06  
Эл. почта: kryukov.tusur@gmail.com

### Покаместов Дмитрий Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУРа Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7-952-809-43-75  
Эл. почта: dmaltomsk@mail.ru

### Рогожников Евгений Васильевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУРа Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7-923-441-40-95  
Эл. почта: udzhon@mail.ru

### Громова Юлия Сергеевна

Инженер департамента сверхвысокочастотной электроники (ДСВЧЭ) АО НПФ «Микран» Вершинина ул., д. 47, г. Томск, Россия, 634045  
Тел.: +7-923-426-15-17  
Эл. почта: Dzhulia.gromova@yandex.ru

Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A., Rogozhnikov E.V., Gromova Yu. S.

### Simulation of CO-NOMA communication channel

The fifth generation mobile communication systems are in the final stages of development and standardization in 2019. One of the most important problems for developers – increasing of spectral efficiency, which is decided through the use of new methods of multiple access. At the initial stage of development of 5G, research groups proposed the use of non-orthogonal multiple access methods, and one of the most important of them is the non-orthogonal multiple access method with power channel multiplexing (NOMA). In the paper a modification of NOMA – using of an additional signal relay (CO-NOMA) is considered. It is shown that channel compression of the CO-NOMA methods contributes to an increase in the spectral efficiency of the system under certain conditions of the transmission channel. A mathematical simulation of the multiple communication channel of two users for two scenarios of the distribution of communication resources is carried out. A comparison of noise immunity and information efficiency of OFDMA, NOMA and CO-NOMA systems is given.  
**Keywords:** OFDMA, NOMA, CO-NOMA, 5G, multiple access, signal retranslation.  
**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-2-12-16

### References

- Marcus M.J. 5G and «IMT for 2020 and beyond». *IEEE Wireless Communications*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 2–3.

2. Soldani D., Manzalini A. Horizon 2020 and beyond: on the 5G operating system for a true digital. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 32–42.
3. Benjebbour A. Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials. *Wireless Networks and Mobile Communications*, 2015 International Conference on, IEEE, 2015, pp. 1–6.
4. Kimy B. Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system. *MILCOM 2013*, 2013 IEEE Military Communications Conference, IEEE, 2013, pp. 1278–1283.
5. Dai L. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Communications Magazine*, 2015, vol. 53, no. 9, pp. 74–81.
6. Ding Z., Peng M., Poor H. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Communications Letters*, 2015, vol. 19, no. 8, pp. 1462–1465.
7. Kryukov Ya.V., Demidov A.Ya., Pokamestov D.A. Algorithm of power calculation of channel with non-orthogonal multiple access NOMA. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 4, pp 91–94 (in Russ.)
8. Kryukov Ya.V. Method of multiple access with channel separation by power on orthogonal carries. *T-Comm: Telecommunication and Transport*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 17–22 (in Russ.)
9. Pokamestov D.A., Demidov A.Ya., Kryukov Ya.V., Rogozhnikov E.V., Abenov R.R. Generation and processing of multiple access signals with sparse code. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2016, no.10, pp. 73–78 (in Russ.)
10. Pokamestov D.A., Demidov A.Ya., Kryukov Ya.V., The influence of forming matrices on the noise immunity of communication channels with multiple access on the basis of sparse codes. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 65–69 (in Russ.)
11. Ding Z. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Communications Letters*, 2015, vol. 19, no. 8, pp. 1462–1465.
12. Borisov V.A., Kalmikov V.V., Kovalchuk Ya.M. Radiotekhnicheskie sistemi peredachi informatsii [Radio information transmission systems]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990. 304 p.
13. Zuko A.G., Klovsii D.D., Nazarov M.V., Fink L.M. Teoria peredachi signalov [Theory of transmission signals]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1986. 304 p.
14. Zuko A.G., Klovsii D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. Teoria elektrichiskoi svyazi. Uchebnik dlya vuzov [Theory of electrical communication. Textbook for high schools]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1999. 432 p.
15. Panfilov I.P., Dirda V.E. Teoria elektrichiskoi svyazi [Theory of electrical communication]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1991. 344 p.

---

**Yakov V. Kryukov**

Candidate of Engineering, Assistant Professor,  
Department of Telecommunications and Basic Principles  
of Radio Engineering, Tomsk State University  
of Control Systems and Radioelectronics  
47, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7-913-104-44-06  
Email: kryukov.tusur@gmail.com

**Dmidriy A. Pokamestov**

Candidate of Engineering, Assistant Professor,  
Department of Telecommunications and Basic Principles  
of Radio Engineering, Tomsk State University  
of Control Systems and Radioelectronics  
47, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7-952-809-43-75  
Email: dmaltomsk@mail.ru

**Evgeniy V. Rogozhnikov**

Candidate of Engineering, Assistant Professor,  
Department of Telecommunications and Basic Principles  
of Radio Engineering, Tomsk State University  
of Control Systems and Radioelectronics  
47, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7-923-441-40-95  
Email: udzhon@mail.ru

**Yulia S. Gromova**

Engineer, Department of Microwave Electronics, Micran  
47, Vershinina st., Tomsk, Russia, 634045  
Phone: +7-923-426-15-17  
Email: Dzhulia.gromova@yandex.ru