

## МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛА PUCCH НУЛЕВОГО ФОРМАТА В СИСТЕМЕ СВЯЗИ 5G NR

*Асаф М., аспирант кафедры радиофизики Томского государственного университета,  
e-mail: md.moh1600@gmail.com;*

*Пономарев О.Г., к. ф.-м. н., доцент кафедры радиофизики Томского государственного университета,  
e-mail: ponomarev@phys.tsu.ru*

### THE PUCCH FORMAT 0 DETECTION ALGORITHM MODIFICATION IN THE FIFTH-GENERATION NEW RADIO

*Assaf M., Ponomarev O.G.*

*In this article the authors introduce an overview of the 5G NR physical uplink control channel (PUCCH) format 0 by describing its structure in both transmitter and receiver, the appropriate scenario for this format and its performance under several situations. In format 0, gNode does not have information about transmitting ACK/NACK bits unlike the other formats, so the performance is very sensitive to the threshold that determines the existence of control signal or not, and the threshold should be chosen very carefully to avoid false decoding and to maintain DTX to ACK probability at below 1%. New method of choosing this threshold is proposed in this article. Through link-level simulations, the obtained results show good agreement with the minimum requirements recommended by the 3<sup>rd</sup> generation partnership project (3GPP) standards.*

**Key words:** 5G-NR, PUCCH, UCI, phase rotation, threshold.

**Ключевые слова:** 5G-NR, PUCCH, UCI, фазовый сдвиг, уровень порога.

#### Введение

С 2016 года консорциумом 3GPP (от англ. 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) активно ведутся работы по созданию стандартов мобильной радиосвязи пятого поколения 5G NR (от англ. 5 Generation New Radio) [1, 2]. Разработка новых стандартов направлена на существенное, по сравнению с предыдущим поколением мобильной радиосвязи LTE, расширение функциональности, охватывающее такие новые сценарии использования сотовой связи, как eMBB (от англ. enhanced Mobile BroadBand), URLLC (от англ. Ultra-Reliable Low-Latency Communications), mMTC (от англ. massive Machine-Type Communications) [3]. Все это приводит к необходимости в реализации высокой адаптивности (гибкости) алгоритмов формирования и обработки сигналов, предназначенных для передачи как непосредственно данных абонентов, так и управляющей информации.

Как и в LTE управляющая информация в 5G NR передается как в нисходящем, так и в восходящем каналах связи. В восходящем канале управляющие сообщения UCI (от англ. Uplink Control Information) могут передаваться как по выделенному каналу PUCCH (от англ. Physical Uplink Control Channel), так и замешиваться с данными абонента и передаваться по PUSCH (от англ. Physical Uplink Shared Channel) [4]. Алгоритмы генерации сигналов PUCCH характеризуются высокой гибкостью. В стандартах 3GPP предусмотрено 5 возможных форматов (с номерами от 0 до 4), которые могут быть использованы для передачи UCI сообщений. Выбор того или иного формата определяется качеством связи

*Приведено краткое описание алгоритмов формирования и детектирования сигналов PUCCH нулевого формата, условий использования этого формата для передачи управляющей информации. Особое внимание в работе уделяется процедуре выбора порогового значения, используемого для обнаружения сигнала нулевого формата в принятом радиокадре. Проведенный анализ результатов численного эксперимента по обнаружению и детектированию сигналов PUCCH формата 0 позволил предложить новый алгоритм выбора порогового значения, исключая зависимость значения порога от отношения сигнал/шум. Сопоставление результатов численного моделирования с требованиями стандарта 3GPP на вероятность неверного обнаружения сигнала полностью подтвердило эффективность предлагаемого алгоритма.*

и длиной передаваемого сообщения. В [5] приведено описание принципов формирования сигналов PUCCH различных форматов. В [6, 7] основное внимание уделено описанию процедуры детектирования сигналов PUCCH формата 0. Особое внимание, уделяемое процедурам обработки нулевого формата PUCCH, вызвано тем, что сигналы, передающие сообщения этого формата являются наиболее короткими, а информация, содержащаяся в управляющем сообщении, требует передачи наиболее часто.

В настоящей работе приведено краткое описание алгоритмов формирования и детектирования сигналов PUCCH нулевого формата, условий использования этого формата для передачи управляющей информации. Особое внимание в работе уделяется процедуре выбора порогового значения, используемого для обнаружения сигнала нулевого формата в принятом радиокадре. Проведенный анализ результатов численного эксперимента по обнаружению и детектированию сигналов PUCCH формата 0 позволил предложить новый алго-

ритм выбора порогового значения, исключая зависимость значения порога от отношения сигнал/шум.

**Алгоритмы формирования и детектирования сигнала PUCCH нулевого формата**

В восходящем канале системы связи 5G NR управляющие сообщения UCI могут передаваться в одном из пяти различных форматов, нумеруемых с 0 до 4. Можно выделить две группы форматов: группа коротких PUCCH сигналов, занимающих не более двух OFDM-символов, и группа длинных сигналов, длина которых может варьироваться от 2 до 14 OFDM-символов. Основные характеристики сигналов PUCCH различных форматов приведены в табл. 1.

Возможность использования пяти различных форматов для передачи управляющей информации обеспечивает высокую гибкость системы передачи PUCCH. Как видно из табл. 1, форматы 0 и 1 используются для передачи коротких сообщений, состоящих из одного или двух бит. Для передачи большего объема информации используются форматы 2-4. По типу форматы можно разделить на две группы: короткие, использующие 1-2 OFDM-символа, и длинные, использующие от 4 до 14 символов. Использование короткого или длинного варианта сигнала PUCCH обуславливается условиями распространения радиоволн в восходящем радиоканале. Сигналы коротких форматов используются при высоком качестве связи и обеспечивают передачу сообщений с минимальной избыточностью. В случае, когда радиосигнал в канале связи подвержен глубоким замираниям, вызванными движением корреспондента в условиях многолучевости, предпочтительнее оказываются длинные форматы сигналов. Использование при передаче длинных форматов позволяет сопроводить их необходимым количеством DMRS (от англ. Demodulation

Reference Signal), что, в свою очередь, обеспечивает возможность надежной коррекции искажений, вносимых в сигнал в радиоканале.

Сигналы нулевого формата используются для передачи квиттирующих битов сообщений HARQ-ACK (от англ. Hybrid Automated Repeat Request Acknowledgement) и/или бита SR (Scheduling Request), обозначающего запрос абонента на выделение ресурсов для передачи данных. Короткий тип сигнала, минимальное количество используемых им ресурс-блоков, отсутствие модуляции и, как следствие, отсутствие сопровождающего DMRS делают этот формат наиболее экономным с точки зрения использования частотно-временных ресурсов радиоканала и наиболее удобным для реализации сценария URLLC.

Основные этапы генерации и приема PUCCH нулевого формата отображены на упрощенной блок-схеме рис. 1.

Генерация сигнала основана на фазовом сдвиге одной и той же базовой комплекснозначной последовательности. Величина фазового сдвига определяется содержанием передаваемого сообщения. Значения базовой последовательности заданы в стандарте таблично [8]. В соответствии с [8] последовательность комплексных отсчетов сигнала PUCCH нулевого формата определяется следующим выражением:

$$X_m(n) = e^{i\alpha n} \bar{r}(n), \tag{1}$$

где  $n = 0, 1, \dots, N_{SC}^{RB} - 1$ ,  $\bar{r}(n)$  – базовая комплекснозначная последовательность, задаваемая в стандарте таблично,  $N_{SC}^{RB}$  – количество поднесущих в ресурс-блоке. Величина фазового сдвига  $\alpha$  определяется выражением:

$$\alpha = \frac{2\pi \text{mod}(m + m_{int} + n_{cs}, N_{CS}^{RB})}{N_{CS}^{RB}}, \tag{2}$$

Табл. 1. Характеристики сигналов PUCCH различных форматов

Номер формата	Короткий/длинный	Количество OFDM символов	Длина сообщения (бит)	Количество ресурс-блоков	Тип модуляции
0	короткий	1-2	1 или 2	1	без модуляции
1	длинный	4-14	1 или 2	1	BPSK/QPSK
2	короткий	1-2	больше 2	1-16	QPSK
3	длинный	4-14	больше 2	1-16	$\pi/2$ -BPSK/QPSK
4	длинный	4-14	больше 2	1	$\pi/2$ -BPSK/QPSK

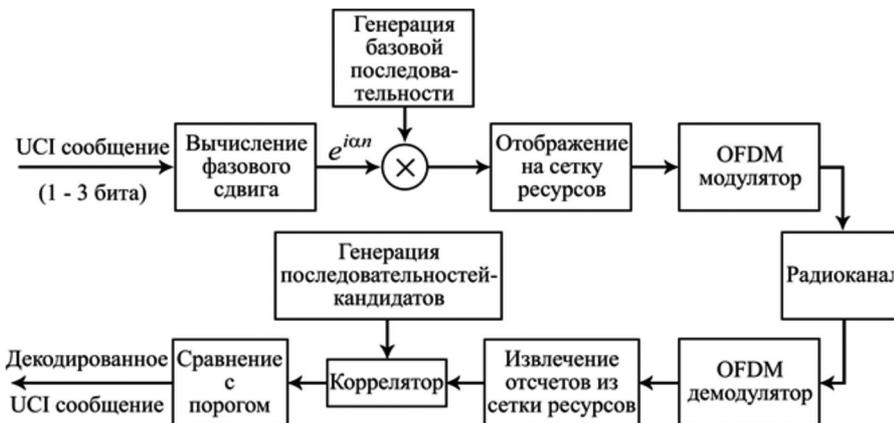


Рис. 1. Упрощенная блок-схема алгоритмов генерации и детектирования сигнала PUCCH нулевого формата

Табл. 2. Значения  $m$  для различных сообщений UCI

Тип сообщения	Биты сообщения UCI							
	(0,0,0)	(0,0,1)	(0,1,0)	(0,1,1)	(1,0,0)	(1,0,1)	(1,1,0)	(1,1,1)
SR,1-бит HARQ	0	6	3	9				
SR,2-бит HARQ	0	3	6	9	1	4	7	10

где значения  $m$  определены в табл. 2 для всех управляющих сообщений,  $m_{\text{int}}$  – начальное смещение фазы,  $n_{cs}$  – дополнительное смещение, определяемое номером OFDM символа в слоте.

Значения фазового сдвига, как видно из выражения (2) определяются не только значениями и количеством бит сообщения UCI. Величина сдвига также зависит от начального значения  $m_{\text{int}}$  и номера OFDM-символа в слоте радиокadra. Эти зависимости обеспечивают возможность передачи UCI-сообщений разных абонентов в одном радиокadre.

После генерации комплексных значений сигнала PUCCH эти значения размещаются по ресурс-элементам частотно-временной сетки радиокadra. На заключительном этапе формирования сигнала отсчеты сетки подвергаются обратному дискретному преобразованию Фурье в OFDM-модуляторе, которое переводит отсчеты, разнесенные по частоте, в последовательность отсчетов отстоящих друг от друга по времени.

Обработка сигнала на приемной стороне осуществляется в обратном порядке [6]. Прежде всего, принятый сигнал подвергается прямому дискретному преобразованию Фурье в OFDM-демодуляторе, что позволяет восстановить частотно-временную сетку ресурсов. Комплексные значения сигнала PUCCH извлекаются из заданных мест сетки, в результате чего формируется последовательность комплексных отсчетов. Полученная последовательность сворачивается со всеми возможными последовательностями-кандидатами в соответствии с выражением:

$$C_m = \frac{1}{N_r} \sum_{r=0}^{N_r-1} \left| \frac{1}{N_{SC}^{RB}} \sum_{k=0}^{N_{SC}^{RB}-1} R_r(k) X_m^*(k) \right|, \quad (3)$$

где  $N_r$  – количество приемных антенн,  $R_r(k)$  – принятая PUCCH последовательность, а символ \* означает комплексное сопряжение.

Превышение значением  $C_m^{\max} = \max(C_m)$  априорно выбранного порогового значения индицирует наличие в принятой последовательности отсчетов сигнала PUCCH нулевого формата. В этом случае номер максимального значения  $C_m$  полностью определяет содержание UCI-сообщения. Вариант, когда значение  $C_m^{\max}$  оказывается ниже порогового значения, идентифицируется как случай отсутствия сигнала PUCCH нулевого формата.

Следует подчеркнуть, что при детектировании сигнала PUCCH нулевого формата на приемной стороне не известно, был ли передан этот сигнал абонентом. Кроме того, отсутствие сопровождающих этот сигнал каких-либо референсных сигналов (DMRS) не позволяет приемнику оценить ни уровень шума, ни степень искажений, вносимых в сигнал радиоканалом. Неверный выбор порогового значения в таких условиях может

приводить к одному из двух вариантов. Первый из них – вариант «ложной тревоги», когда PUCCH нулевого формата в принятом сигнале отсутствует, но значение порога слишком низкое и величина  $C_m^{\max}$  превышает значение порога. Второй вариант – вариант «пропуска цели», когда величина порога слишком высока и величина  $C_m^{\max}$  оказывается ниже порогового значения даже при наличии в принятом сигнале последовательности PUCCH отсчетов. В [9] задаются жесткие ограничения на вероятности обоих вариантов. Так, вероятность «ложной тревоги» должна быть всегда ниже 1% (эта вероятность в стандарте [9] определена как «DTX to ACK probability»). Вероятность «пропуска цели» также задается в стандарте на низком уровне (эту вероятность в стандарте называют «ACK missed detection probability»). Она не должна превышать 1% при отношении сигнал/шум равном 9,3 дБ. Жесткость требований, накладываемых на вероятности неверного обнаружения PUCCH нулевого формата в принятом сигнале, вполне понятна. И случай «ложной тревоги», и случай «пропуска цели» приводит к неверному детектированию квитирующих прием блока данных битов UCI-сообщения и интерпретируется базовой станцией или как ложный запрос на повторную передачу блока данных абоненту, или наоборот, как ложное подтверждение успешного приема данных. Таким образом, обоснованный выбор значения порога при приеме PUCCH нулевого формата является критически важным для эффективного функционирования системы связи в целом.

#### Детектирование сигнала PUCCH нулевого формата

Для разработки алгоритма выбора порогового значения для детектирования сигнала PUCCH нулевого формата было проведено несколько численных экспериментов. В этих экспериментах многократно производилась генерация и детектирование радиокadra сигнала в восходящем канале связи 5G NR. После генерации сигнал пропускался через модель радиоканала при различных уровнях аддитивных шумов. Параметры генерируемого сигнала приведены в табл. 3.

В первом эксперименте исследовалась зависимость величины максимального значения сигнала на выходе коррелятора от отношения сигнал/шум для случая, когда сообщение UCI не передается. Для моделирования многолучевости в данной работе использовалась хорошо известная TDL (от англ. Tapped-delay line) модель [9] многолучевого канала распространения радиоволн, представляющая радиоканал в виде линии задержки с отводами. Результаты эксперимента представлены на рис. 2. Значения параметров TDL-модели радиоканала указаны числами в легенде на графике. Первое число означает максимальное доплеровское смещение частоты радиосигнала в канале связи в Герцах. Второе – ширину спектра задержек сигнала в нс. На графике представлена зависимость среднего по 10000 реализациям

сигнала значения величины  $C_m^{\max}$  от отношения сигнал/шум.

Из рис. 2 видно, что значение  $C_m^{\max}$  не зависит от параметров модели многолучевого радиоканала. Для всех трех наборов параметров средние значения  $C_m^{\max}$  одинаковы. С другой стороны, среднее значение  $C_m^{\max}$  сильно зависит от отношения сигнал/шум. Это вполне объяснимо, т.к. при отсутствии последовательности отсчетов PUSCH в принимаемом сигнале амплитуда выбросов сигнала на выходе коррелятора полностью определяется дисперсией шума в канале связи.

Во втором численном эксперименте, результаты которого представлены на рис. 3, PUSCH нулевого формата также отсутствовал в моделируемом сигнале. Ис-

следовалась зависимость вероятности «ложной тревоги» (DTX to ACK probability) от отношения сигнал/шум в радиоканале TDL 300-100 при фиксированном значении порога. Для каждой точки на графике вероятность «ложной тревоги» рассчитывалась как процент реализаций сигнала, для которых величина  $C_m^{\max}$  превысила уровень порога. Количество реализаций составляло 100000. Значения порога приведены в легенде на графике.

Из рис. 3 видно, что требуемая стандартом 3GPP величина вероятности «ложной тревоги» в 1% достигается при разных уровнях порога для различных значений отношения сигнал/шум. Это делает невозможным использование фиксированного значения порога для произвольных условий связи. С другой стороны, отсут-

Табл. 3. Параметры генерируемого в численных экспериментах сигнала

Название параметра	Значение	Примечание
Channel bandwidth	5 MHz	Ширина полосы частот радиоканала
SCS	15 KHz	Разнесение поднесущих
FFT window	512	Длина дискретного преобразования Фурье
UCI size	1 Bit	Длина передаваемого сообщения UCI
Number of PRBs	1	Количество ресурс-блоков для передачи
No. of Tx antennas	1	Количество передающих антенн
No. of Rx antennas	2	Количество приемных антенн
Initial cyclic shift	0	Величина начального сдвига $m_{\text{int}}$

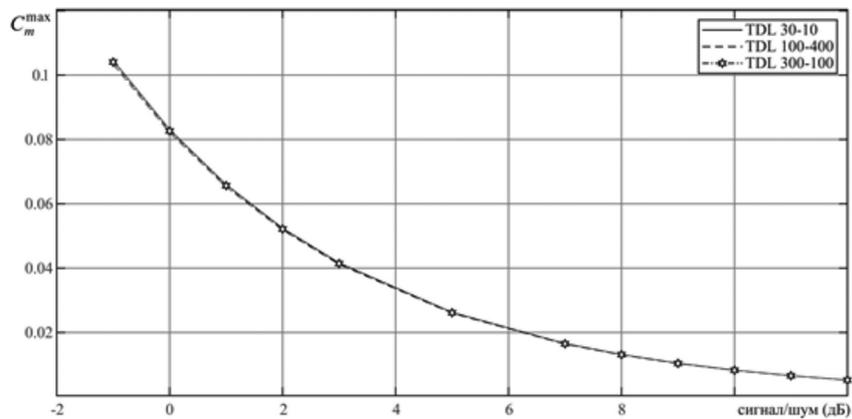


Рис. 2. Зависимость среднего значения  $C_m^{\max}$  от отношения сигнал/шум

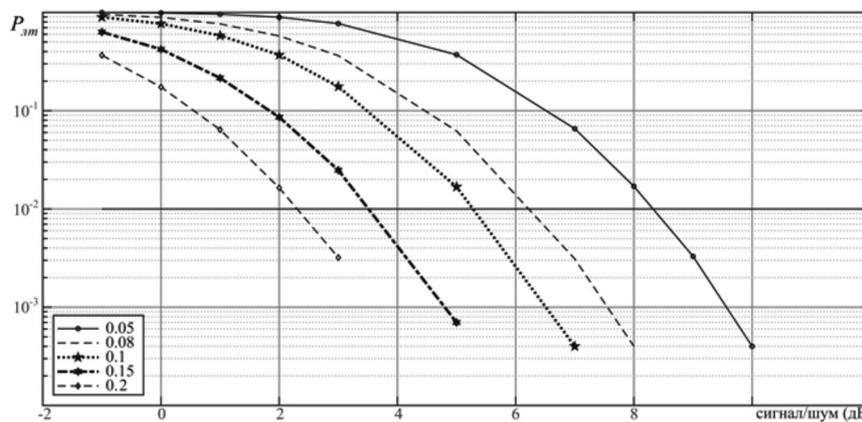


Рис. 3. Зависимость вероятности «ложной тревоги» от отношения сигнал/шум при различных уровнях порога

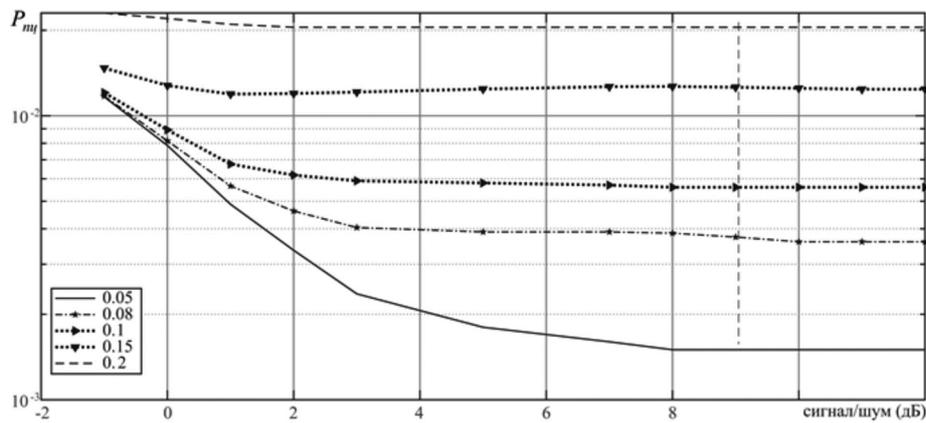


Рис. 4. Зависимость вероятности «пропуска цели» от отношения сигнал/шум при различных уровнях порога

ствии референсных сигналов (DMRS), сопровождающих PUSCH нулевого формата, не позволяют оценивать уровень шумов в принятом сигнале и производить на этой основе коррекцию порогового значения.

В третьем эксперименте исследовалась зависимость вероятности «пропуска цели» (ACK missed detection probability) от отношения сигнал/шум при различных уровнях порога. В этом эксперименте PUSCH нулевого формата в генерируемом сигнале присутствовал. Для каждой точки на графике вероятность «пропуска цели» рассчитывалась как процент реализаций сигнала, для которых величина  $C_m^{\max}$  не превысила уровень порога. Количество реализаций составляло 100000. Значения порога приведены в легенде на графике.

Результаты этого эксперимента показывают, что требуемое стандартом 3GPP значение вероятности «пропуска цели» в 1 % при отношении сигнал/шум равном 9,3 дБ достигается при достаточно низком пороговом значении меньшем 0,15.

Анализ результатов проведенных численных экспериментов позволил разработать оригинальную процедуру выбора порогового значения для детектирования PUSCH нулевого формата. Предлагаемая процедура базируется на следующих простых соображениях. В том случае, когда сигнал PUSCH отсутствует в принятом радиокadre, значения амплитуды сигнала  $C_m$  на выходе коррелятора определяются разбросом значений базовой последовательности  $\bar{r}(n)$  в выражении (1), дисперсией шума, присутствующего в принятом сигнале, разбросом значений модуляционных символов, передаваемых в радиокadre вместо отсчетов последовательности PUSCH нулевого формата. С высокой вероятностью все значения  $C_m$  имеют один порядок величины

так, что величина отношения  $\Gamma_m = \frac{C_m^{\max}}{C_m}$  слабо отлича-

ется от 1 для всех значений  $m$  при произвольном отношении сигнал/шум. В том же случае, когда сигнал PUSCH присутствует в принятом радиокadre, величина  $C_m^{\max}$  определяется всей энергией сигнала PUSCH нулевого формата. В этом случае величина  $\Gamma_m$  достигает больших значений. Таким образом, если задавать пороговое значение при приеме PUSCH не для величины  $C_m^{\max}$ , а для величины  $\Gamma_m$ , то вероятность «ложной

тревоги» практически не будет зависеть от отношения сигнал/шум, а для удовлетворения требованиям стандарта 3GPP к вероятности «пропуска цели» необходимо просто подобрать приемлемое значение порога.

Предлагаемый алгоритм детектирования сигнала PUSCH нулевого формата в принятом радиокadre выглядит следующим образом.

Задается значение порога  $M$ .

Производится расчет значений  $C_m$  в соответствии с выражением (3).

Определяется  $C_m^{\max} = \max(C_m)$ .

Для каждого  $m$  определяется отношение

$$\Gamma_m = \frac{C_m^{\max}}{C_m}$$

Если  $\Gamma_m < M$  для всех  $m$ , то сигнал PUSCH отсутствует в принятом радиокadre. В противном случае номер  $m$ , соответствующий значению  $C_m^{\max}$  определяет содержание принятого UCI-сообщения в соответствии с табл. 2.

Для апробации предлагаемого алгоритма было проведено два численных эксперимента. В первом из них сигнал PUSCH нулевого формата не передавался. Вероятность «ложной тревоги» в каждой точке на графике рассчитывалась по 100000 реализациям принятого сигнала для различных значений порога  $M = 2, 3, 4, 5, 6$  и различных отношений сигнал/шум. Результаты эксперимента представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что требуемое значение вероятности «ложной тревоги» достигается при  $M = 4$  и не зависит от отношения сигнал/шум.

Во втором эксперименте сигнал PUSCH присутствовал в принимаемых радиокadre. Результаты эксперимента представлены на рис. 6. Для каждой точки на графике вероятность «пропуска цели» рассчитывалась по 100000 реализациям для различных значений порога  $M$ .

Из рис. 6 видно, что требуемое значение вероятности «пропуска цели» в 1 % при отношении сигнал/шум равном 9,3 дБ достигается при всех значениях порога  $M \geq 2$ .

Таким образом, проведенные численные эксперименты полностью подтвердили работоспособность предлагаемой модификации процедуры детектирования сигнала PUSCH нулевого формата. Значение порога

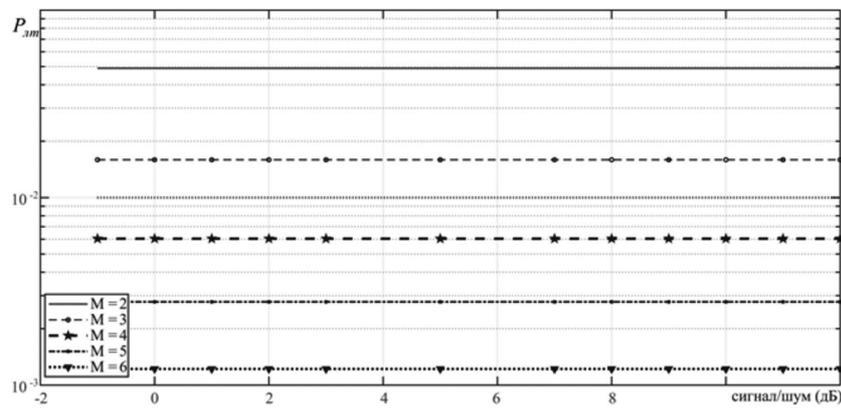


Рис. 5. Вероятность «ложной тревоги» в зависимости от отношения сигнал/шум для различных значений порога  $M$

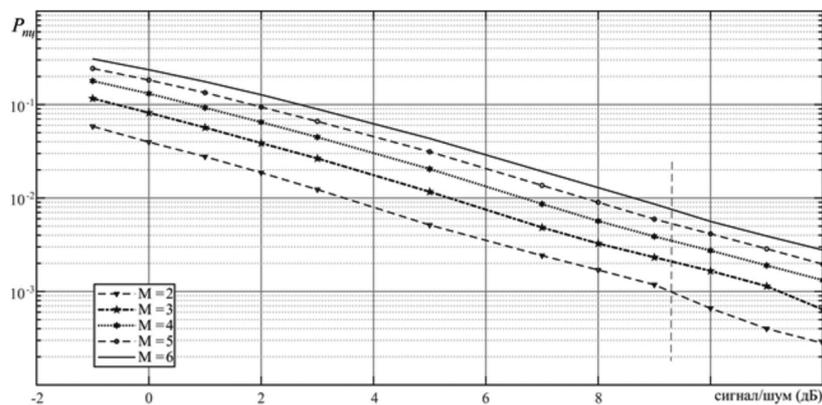


Рис. 6. Вероятность «пропуска цели» в зависимости от отношения сигнал/шум для различных значений порога  $M$

$M = 4$  удовлетворяет всем требованиям, накладываемым в стандарте [7] на значения вероятностей «ложной тревоги» и «пропуска цели» при обнаружении сигнала PUCCH.

### Заключение

В работе рассматриваются алгоритмы генерации и приема одного из типов управляющих сообщений в восходящем канале мобильной связи 5G NR. Рассматриваемый, т.н., нулевой формат управляющих сообщений является наиболее экономным, с точки зрения использования частотно-временных ресурсов радиосистемы. С другой стороны, сообщения этого формата не сопровождаются какими-либо опорными сигналами, позволяющими приемной системе оценить и исправить искажения, полученные сигналом при его прохождении по каналу связи. Как показали проведенные численные эксперименты, невозможность на приемной стороне оценки степени искажений и, прежде всего, отношения сигнал/шум приводит к сложностям при решении задачи обнаружения управляющего сообщения в принятом сигнале.

Анализ результатов проведенных численных экспериментов позволил предложить оригинальную модификацию процедуры детектирования управляющего сообщения нулевого формата. Численные эксперименты полностью подтвердили работоспособность предложенного метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по Соглашению с Минобрнауки России

от «26» ноября 2019 г. № 075-11-2019-031 (проект «Разработка программно-аппаратного комплекса для формирования тестовых сигналов стандарта 5G NR»).

### Литература

1. Osseiran A., Monserrat J.F., Marsch P., 5G Mobile and Wireless Communications Technology, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2016. 438 p.
2. Assaf M., Ponomarev O.G. «Sample Clock Offset Compensation in the Fifth-Generation New Radio Downlink». Journal of Physics: Conference Series, vol. 1889, no. 2, 2021. P. 022091.
3. Chen S., Zhao J., The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile communication. IEEE communications magazine, vol. 52, no. 5, May 2014, pp. 36-43.
4. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR: The next generation wireless access technology. Academic Press, 2018. 466 p.
5. Kundu L., Xiong G., Cho J., Physical uplink control channel design for 5g new radio, in 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), Jul. 2018, pp. 233-238
6. Kim, Young-Hoon, et al. Performance Comparison of DTX Detection Schemes for 5G NR PUCCH. 2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2020.
7. Du Y., He W., Long H., An improved semi-blind detection algorithm for nr pucch, in 2019 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Computer and Communications (ICCC), Dec. 2019, pp. 66-71.
8. ETSI TS 138 211 V15.2.0 (2018-07). Technical specification. 5G; NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 15.2.0 Release 15).
9. ETSI TS 38.104. 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP, TS 38.104 version 16.4.0 Release 16).