Оценка пропускной способности системы радиодоступа при реализации гибридного автоматического запроса повторной передачи

Evaluation of wireless access system capacity when clearing hybrid automatic repeat request

Ключевые слова: беспроводная сеть – wireless network; автоматический запрос – automatic request; пропускная способность – capacity.

Представлен краткий обзор применяемых в современных технологиях беспроводных сетей типов гибридного автоматического запроса повторной передачи. Предложена методика оценки пропускной способности при реализации гибридного автоматического запроса повторной передачи.

The article gives a summary of the types of hybrid automatic repeat request procedures used in modern wireless network technologies. It also develops a method to evaluate wireless access system capacity when clearing hybrid automatic repeat request.

КОРКИН / KORKIN A.
Алексей Георгиевич
адъюнкт кафедры средств и комплексов радиосвязи Военной академии связи им. С.М. Буденного, Санкт-Петербург

ВВЕДЕНИЕ

В технологиях высокоскоростной передачи данных современных беспроводных сетей для увеличения пропускной способности широко используются системы с гибридным автоматическим запросом повторной передачи (ГАЗПП, *HARQ – Hybrid ARQ*). Данный метод комбинирует в себе автоматическую повторную передачу при искажении пакета данных и исправление ошибок за счет помехоустойчивого кодирования. В схемах ГАЗПП предусмотрено два способа мягкого комбинирования. Первый способ комбинирования называется *Chase combining* (*CC*), так как был описан автором работы [3]. В отечественной литературе данный способ называют отслеживаемым или управляемым комбинированием, что соответствует дословному переводу слова *chase*. Суть данной схемы заключается в отправке при повторной передаче идентичной копии исходного пакета. Декодер приемника выполняет операцию комбинирования ошибочно декодированного пакета и его копий, переданных при повторных передачах. Второй способ комбинирования предусматривает использование схем с возрастающей избыточностью (*IR – Incremental redundancy*). В схемах ГАЗПП с возрастающей избыточностью за счет процедуры выкалывания при помехоустойчивом кодировании для повторных передач формируются различные версии исходного пакета, называемые в стандарте IEEE 802.16e подпакетами.

По сравнению с обычным автоматическим запросом повторения применение ГАЗПП приводит к снижению количества повторных передач. Однако каждая повторная передача значительно увеличивает затраты ресурса пропускной способности из-за избыточности применяемого помехоустойчивого кода и необходимой при повторных передачах служебной информации. Для анализа эффективности реализации ГАЗПП в системах радиодоступа и возможности выбора параметров ГАЗПП, обеспечивающих повышение пропускной способности, необходима разработка методики оценки эффективности систем с ГАЗПП, учитывающая особенности реализации данных систем.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ РАДИОДОСТУПА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ГАЗПП

В данной работе на основе анализа работ [4–9], посвященных оценке различных схем ГАЗПП, предлагается методика оценки пропускной способности системы радиодоступа при реализации ГАЗПП. Оценку системы с ГАЗПП будем производить на основе показателя коэффициента эффективности пропускной способности и затрат битов при передаче данных с заданной

достоверностью. В общем случае коэффициент эффективности пропускной способности E определим выражением [4]:

$$E = \frac{k}{Z_{\Sigma}} \cdot P_{óä}, \quad (1)$$

где k – число информационных бит в пакете данных длиной N_{ep}, $Z_{\Sum}$ – суммарные затраты в битах при передаче пакета данных длиной N_{ep}, $P_{óä}$ – вероятность успешной доставки пакета. Суммарные затраты в битах $Z_{\Sum}$ при передаче пакета длиной N_{ep} определяются числом повторных передач данного пакета в прямом канале и передачи сигналов подтверждения или не подтверждения длиной n_{ACK} в обратном канале.

Для систем с ГАЗПП повторная передача будет осуществляться при обнаружении неисправленных ошибок после помехоустойчивого декодирования. Таким образом, при вычислении затрат необходимо учитывать особенности применяемых схем ГАЗПП, такие как длины подпакетов при повторных передачах, а именно – размеры блоков избыточности, и влияние комбинирования подпакетов в приемнике на вероятность успешной доставки. В ряде работ в результате имитационного моделирования конкретных схем ГАЗПП были разработаны аналитические модели реализации данных схем для конкретных технологий передачи, таких как HSPA, LTE, WiMAX [5–7]. В данных работах влияние операции комбинирования при повторных передачах на вероятность успешной доставки и, соответственно, вероятность ошибки на пакет выражается через соответствующее увеличение отношения «сигнал – помеха»:

$$\gamma(N_{п.п}) = \gamma_0 + \Delta\gamma,$$

где $\gamma(N_{ï.ï})$ – значения отношения «сигнал – помеха» при $N_{ï.ï}$ попытках передач после комбинирования, γ_0 – отношения «сигнал – помеха» при исходной передаче, $\Delta\gamma$ – выигрыш комбинирования, т.е. приращение значения в отношении «сигнал – помеха» после комбинирования.

Для учета помехоустойчивого кодирования с переменными скоростями за счет использования шаблонов перфорации и, соответственно, формирования различных версий подпакетов исходного пакета введем коэффициент α_L, равный отношению размера подпакета (блока избыточности), формируемого для повторной передачи, к размеру подпакета при исходной передаче:

$$\alpha_{Lj} = \frac{N_{epj}}{N_{ep0}},$$

N_{ep0} – размер пакета при исходной передаче N_{epj} – размер пакета при j-й повторной передаче, $j = \overline{1, N_{ï.ï}}$.

Для схемы ГАЗПП с возрастающей избыточностью при формировании различных версий подпакетов исходного пакета затраты бит в прямом и обратном каналах определим, соответственно:

$$Z_{ïð} = N_{ep0} + \sum_{j=1}^{N_{ï.ï}} \alpha_{Lj} N_{ep0}, \; Z_{îê} = n_{ACK} \cdot N_{ï.ï}.$$

Вследствие сложности используемых методов канального кодирования для определения вероятности успешной доставки пакета воспользуемся подходом, представленным в [5–9]. Вероятность успешной доставки пакета при использовании ГАЗПП с комбинированием определим как:

$$P_{óä} = 1 - P_{e\sum HARQ}, \quad (2)$$

где $P_{e\sum HARQ}$ – результирующая вероятность ошибки на пакет при повторных передачах с комбинированием.

Остаточная вероятность ошибки на пакет P_{ej} при j-й повторной передаче будет определяться в зависимости от комбинированного значения отношения «сигнал – помеха»:

$$P_{ej} = P_e(\gamma_0 + \Delta\gamma_j),$$

где γ_0 – отношение «сигнал – помеха» при исходной передаче, $\Delta\gamma_j$ – выигрыш комбинирования, т.е. приращение значения в отношении «сигнал – помеха» после комбинирования повторных передач с исходной. В соответствии с существующими моделями [5–7] определим отношение возрастания значения отношения «сигнал – помеха» при повторной передаче к исходной передаче $\Delta\gamma_j / \gamma_0$ пропорционально α_{Lj} как [7]:

$$\Delta\gamma_j = j \cdot g \cdot \alpha_{Lj} \cdot \gamma_0, \quad (3)$$

где $g \geq 1$ – выигрыш кодирования, который зависит от модуляции, схемы кодирования и размера пакета [5–7]. В соответствии с данным выражением схему отслеживаемого комбинирования можно выразить как частный случай схемы с возрастающей избыточностью при $\alpha_{Lj} = 1$.

Вероятность ошибки на пакет P_e зависит от используемой схемы модуляции и кодирования $\hat{N}I\ \hat{E}_i$, определяющей i-ю градацию скорости передачи данных, и значения отношения «сигнал – помеха» –

Параметры схем ГАЗПП

Количество повторных передач	3 (общее количество передач 4)
Допустимая вероятность ошибки на пакет	**1%**
Длина информационного блока для кодирования (с заголовком)	32, 80, 128, 176, 272, 368, 464, 944, 1904, 2864, 3824, **4784**, 9584, 14384, 19184, 23984
Длина пакета после добавления битов кода циклической избыточности (n_{CRC} = 16)	48, 96, 144, 192, 288, 384, 480, 960, 1920, 2880, 3840, **4800**, 9600, 14400, 19200, 24000
Отношение размеров подпакета к исходному пакету α_L	**1** для CC
	0,1, **0,2**, ..., 1 для IR
Выигрыш кодирования g, дБ	1 (худший случай **1**)

$P_e = F\left(CMK_i, \gamma\right)$. В рассматриваемой системе при повторной передаче схема модуляции и кодирования остается неизменной, меняется только избыточность за счет процедуры выкалывания битов из исходного кодированного блока. Таким образом, при j-й повторной передаче остаточную вероятность ошибки на пакет определим как:

$$P_e(\gamma_j) = P_e(\gamma_0 + \Delta\gamma_j) = P_e(CMK_i, (1 + jg\alpha_{Lj}) \cdot \gamma_0). \quad (4)$$

В документах [8, 9] для моделирования физического уровня при использовании ГАЗПП определено, что событие ошибочного приема пакета при повторной передаче не зависит от события ошибочного приема при предыдущей передаче. Для представленного выражения (3) результирующую вероятность ошибки на пакет после повторных передач для определенной схемы модуляции и кодирования $\tilde{N}\grave{I}\ \hat{E}_i$ определим как произведение вероятности ошибки при исходной передаче на вероятность ошибки при повторных передачах с учетом выигрыша комбинирования [7, 9]:

$$P_{e\sum HARQ} = \prod_{j=0}^{N_{\ddot{i}.\ddot{i}}} P_e\left(CMK_i, \left(1 + jg\alpha_{Lj}\right) \cdot \gamma_0\right). \quad (5)$$

Оценку пропускной способности на основе коэффициента эффективности пропускной способности системы радиодоступа при использовании ГАЗПП и адаптивных схем модуляции и кодирования осуществим в следующей последовательности. В качестве исходных данных примем характеристики уровней системы с ГАЗПП, а именно – модель канала и ее параметры, размеры пакета при исходной передаче и при повторных передачах $\alpha_{Lj} N_{ep0}$, требования по достоверности передачи $P_{e\text{çàä}}$, количество градаций скоростей M, определяемых набором адаптивных схем модуляции и кодирования $\tilde{N}\grave{I}\ \hat{E}_i,\ i = \overline{1, M}$.

Далее вычисляем:

1. Вероятность ошибки на пакет P_e. Порядок определения вероятности ошибки на пакет зависит от выбранной модели канала и является функцией от значения отношения «сигнал – помеха» для определенной схемы модуляции и кодирования $P_e = F\left(CMK_i, \gamma\right)$ [8–10].

2. В случае невыполнения условия $P_e \le P_{e\text{çàä}}$ при исходной передаче пакета в системе с ГАЗПП осуществляются повторные передачи. По выражениям (4) и (5) определяем остаточную вероятность ошибки на пакет и результирующую вероятность ошибки на пакет для такого количества повторных передач $N_{\ddot{i}.\ddot{i}}$, при которых будет выполняться условие по заданной достоверности передачи $P_{e\sum HARQ} \le P_{e\text{çàä}}$.

3. При выполнении условия по заданной достоверности передачи по выражению (2) определяем вероятность успешной доставки пакета физического уровня для соединения с ГАЗПП.

4. Определяем суммарные затраты бит на успешную передачу пакета:

$$Z_{\sum} = Z_{\ddot{i}\,\eth} + Z_{\hat{i}\,\hat{e}}.$$

5. Для данной CMK_i, соответствующей определенной градации скорости передачи по выражению (1), определяем коэффициент эффективности пропускной способности при использовании схемы ГАЗПП.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На основе представленной методики был проведен расчет вероятностно-временных характеристик

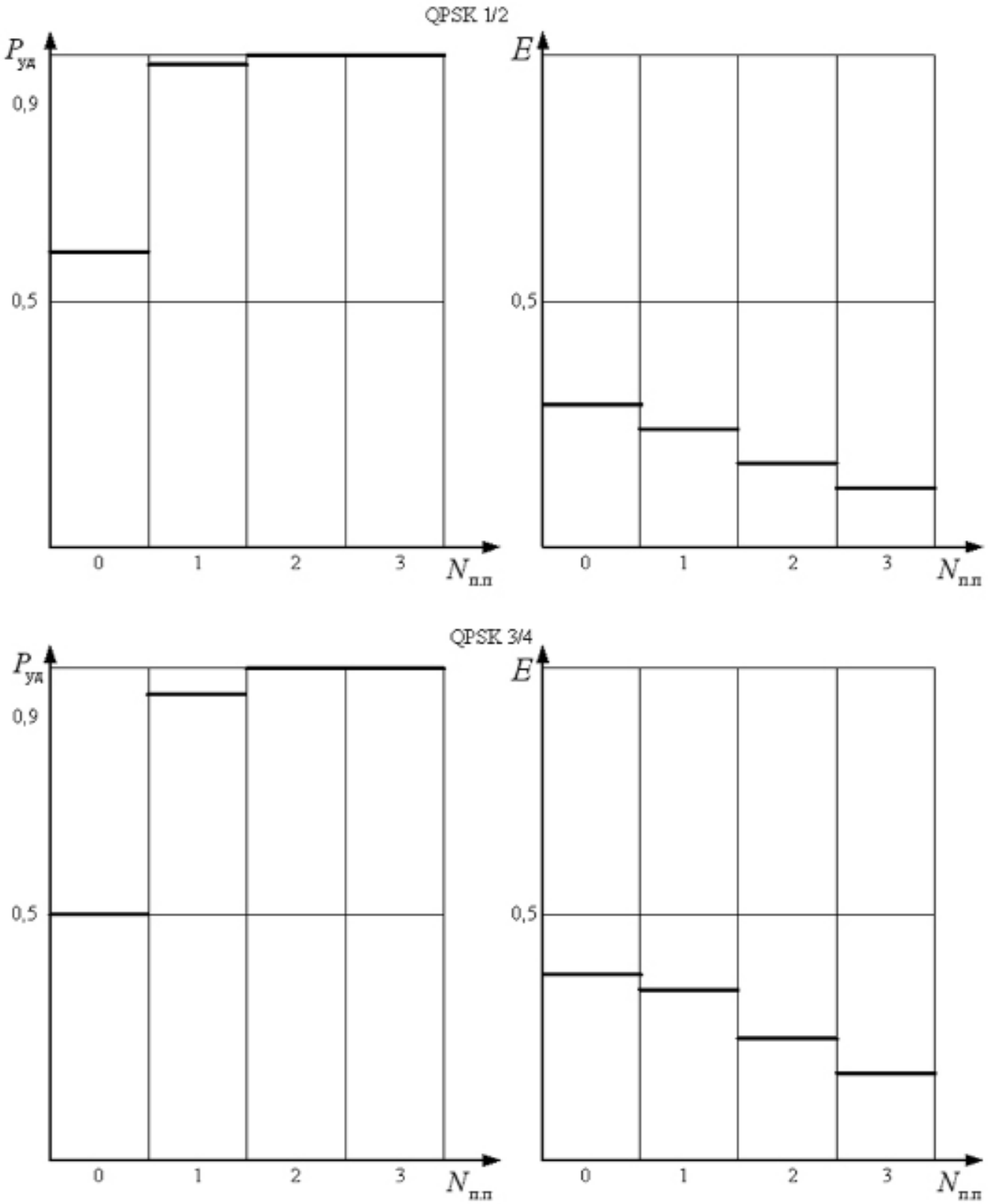
QPSK 1/2
$P_{уд}$
0,9
0,5
0
1
2
3
$N_{п.п}$
E
0,5
0
1
2
3
$N_{п.п}$
QPSK 3/4
$P_{уд}$
0,9
0,5
0
1
2
3
$N_{п.п}$
E
0,5
0
1
2
3
$N_{п.п}$

Рис. 1

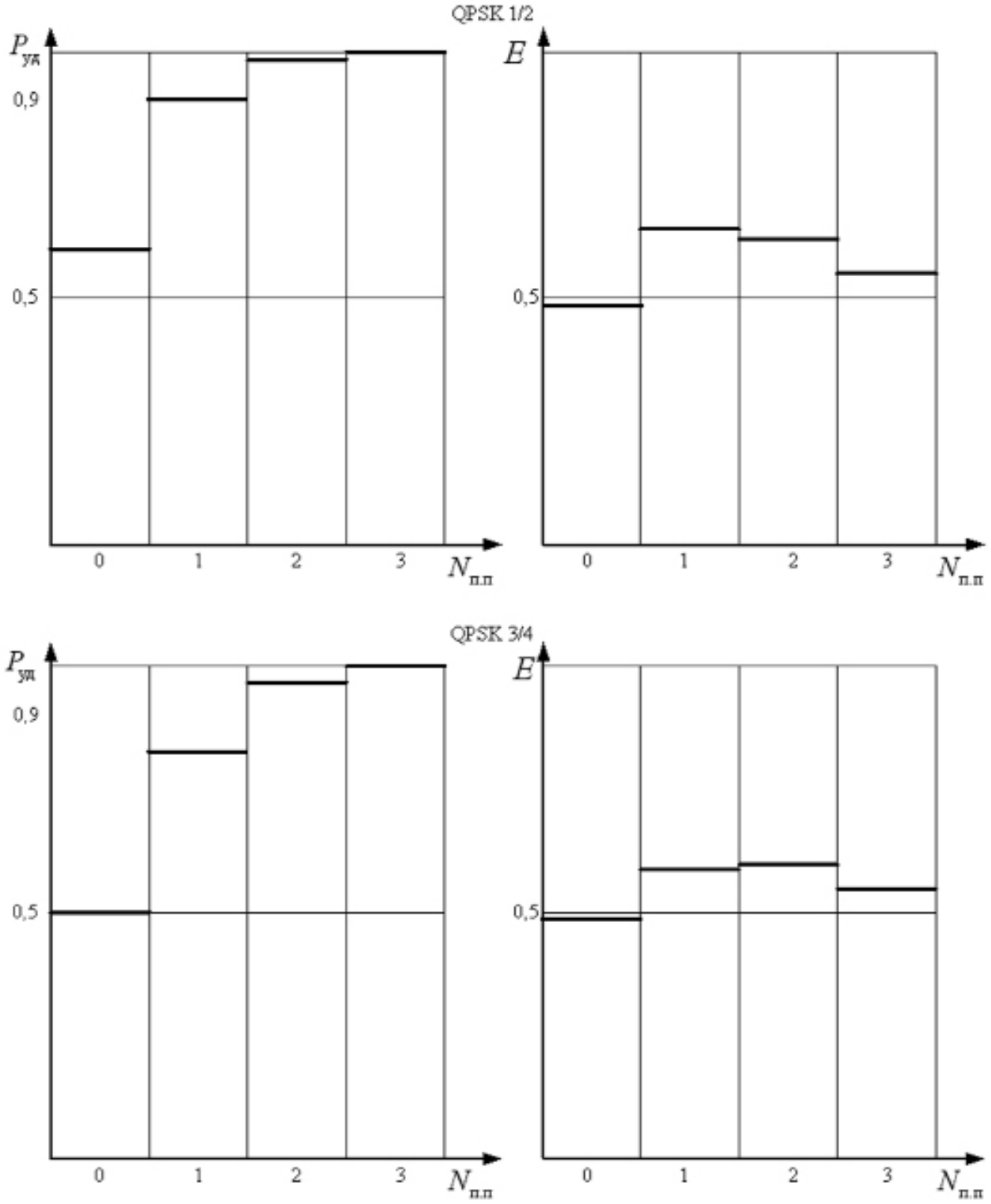
QPSK 1/2
$P_{ул}$
0,9
0,5
0
1
2
3
$N_{п.п}$
E
0,5
0
1
2
3
$N_{п.п}$
QPSK 3/4
$P_{ул}$
0,9
0,5
0
1
2
3
$N_{п.п}$
E
0,5
0
1
2
3
$N_{п.п}$

Рис. 2

типовой системы радиодоступа стандарта IEEE 802.16e при использовании адаптивных схем модуляции и кодирования для регулирования скорости передачи. При регулировании скорости передачи в соответствии с представленным в [11] алгоритмом регулирования выбор схемы модуляции и кодирования осуществляется на основе оценки индикатора качества канала, а именно – значения отношения «сигнал – помеха». Поэтому в качестве значений отношения «сигнал – помеха» исходной передачи γ_0 взяты заданные в стандарте IEEE 802.16e значения отношения «сигнал – помеха» для каждой схемы модуляции и кодирования [12]. Параметры схем ГАЗПП в соответствии со стандартом IEEE 802.16e, используемые в расчетах, представлены в таблице [12]. Рассматривается случай, когда передаваемые пакеты состоят из одного помехоустойчивого блока.

ПАРАМЕТРЫ СХЕМ ГАЗП

Были проведены расчеты для всех схем модуляции и кодирования для ГАЗПП с отслеживаемым комбинированием и возрастающей избыточностью с α_L = 0,2 при длине информационного блока для кодирования 4784 бит. В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены зависимости вероятности успешной доставки $P_{óä}$ и коэффициента эффективности пропускной способности E_i от числа повторных передач для схем с отслеживаемым комбинированием (рис. 1) и возрастающей избыточностью (рис. 2) при использовании QPSK-модуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В случае использования ГАЗПП при передаче пакетов данных в системе радиодоступа заданная достоверность передачи обеспечивается ограниченным количеством повторных передач (2–4). Малое количество требуемых повторных передач позволяет выполнять требования по допустимой задержке передачи пакетов различных приложений, что особенно актуально для приложений реального времени.

Количество повторных передач зависит от используемой схемы ГАЗПП, а именно – от размеров блоков избыточности при повторных передачах. При использовании схемы ГАЗПП с отслеживаемым комбинированием заданная достоверность передачи достигается меньшим количеством повторных передач, но за счет увеличения затрат бит при передаче, что приводит к снижению эффективности использования пропускной способности. Схемы ГАЗПП с возрастающей избыточностью значительно превосходят схемы с отслеживаемым комбинированием в эффективности использования пропускной способности, при этом количество повторных передач, требуемых для достижения заданной достоверности, увеличивается незначительно. Таким образом, регулирование размеров блоков избыточности при повторных передачах приводит к значительному повышению эффективной пропускной способности системы радиодоступа.

Представленная методика позволяет оценить эффективность различных схем ГАЗПП, используемых в современных технологиях высокоскоростной передачи данных, таких как WiMAX. При этом схема ГАЗПП с отслеживаемым комбинированием рассматривается как частный случай схемы ГАЗПП с возрастающей избыточностью.

Литература

1. *Liinaharja M.* Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology // Studies on the performance of some ARQ schemes. – Helsinki University of Technology, 2006.
2. *Jingfeng Z.L.* Research and simulation analysis of HARQ schemes in TD-SCDMA // CYIT CO., LTD Chongqing 400065. – P. 8.
3. *Chase D.* A Class of algorithms for decoding block codes with channel measurement information // IEEE Trans. Inform. Theory. – Vol. IT-18. – Jan. 1972. – P. 170–182.
4. *Мелентьев О. Г.* Теоретические аспекты передачи данных по каналам с группирующимися ошибками. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
5. *Frederiksen F., Kolding T.* Performance and modeling of WCDMA / HSDPA transmission / H-ARQ schemes // Proc. IEEE VTC Fall. – Vancouver, Canada. – Sept. 2002. – P. 472–476.
6. *Ikuno J., Wrulich M., Rupp M.* Performance and modeling of LTE H-ARQ // Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering Vienna University of Technology, Austria.
7. *Jeong-woo Cho, Yong Chang, Yuchul Kim, JaeHong Chon.* Analytic optimization of hybrid ARQ performance in wireless packet data systems // Telecommunication R&D Center, Samsung Electronics, Republic of Korea.
8. WiMAX System Evoluation Methodology. – WiMAX Forum, 2008.
9. IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document. – WiMAX Forum, 2009.
10. *Zhang Y.* Chen Hsiao Hwa. Mobile WiMAX: toward broadband wireless metropolitan area networks. – Auerbach Publications, 2008.
11. *Коркин А.Г.* Алгоритм регулирования скорости передачи данных в сети мобильного широкополосного радиодоступа // Материалы 64-й Научно-технической конференции, посвященной Дню радио. – Санкт-Петербург, 2009.
12. Std IEEE 802.16e-2005 // IEEE Standard for local and metropolitan area networks. – Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems. – 28 February 2006.