УДК 681.3.07

Ю.П. НЮНЬКИНА, А.В. СКАТКОВ

Севастопольский национальный технический университет, Украина

ИГРОВАЯ МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАФИКА В СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ, КЛАССИЧЕСКИЙ И КВАНТОВЫЙ ПОДХОДЫ

Рассматривается задача поиска оптимального алгоритма маршрутизации для сети передачи данных с тремя узлами при полиномиальной функции стоимости эксплуатации канала. Формулируется теоретико-игровая модель конфликтного поведения участников процесса передачи данных. Отдельно рассматривается случаи, когда весть трафик от источника к назначению должен быть отправлен по одному, заранее предопределенному маршруту, и случай, при котором поток трафика от источника к назначению может быть разделен и направлен по разным маршрутам сети с целью минимизации стоимости использования каналов. Матричная игра формулируется также для пространства квантовых стратегий, приводятся целевые функции для каждого из игроков.

качество обслуживания, игровая модель, маршрутизация

Введение

При построении и эксплуатации сетей передачи данных, используемых для предоставления различных сервисов, возникает задача обеспечения качества обслуживания (Quality of Services, QoS). Задача становится тем более актуальной, когда сервисы работают в режиме реального времени и являются разнородными, т.е. с точки зрения обеспечения качества обслуживания требования различных сервисов противоречивы. Пример подобного противоречия – одновременная передача http трафика и голосовых (Voice over IP, VoIP) пакетов. Если первый тип трафика допускает незначительные задержки и не допускает потери пакетов, то для второго типа трафика потеря небольшого количества пакетов не является критичной, в то время как задержки при передаче пакетов сказываются на качестве звукового сигнала и становятся весьма заметными для конечного потребителя услуг.

В данной работе рассматривается проблема маршрутизации разнородного трафика в сети, содержащей три узла – один узел, порождающий трафик, и два узла назначения. Каналы между узлами могут рассматриваться в широком смысле – не только как физический сегмент сети, но и, возможно, как виртуальный канал.

Классификация существующих методов исследований. Существует ряд подходов к моделированию сетей передачи данных и исследованию алгоритмов маршрутизации в сетях сложной структуры в условиях многокритериальности качества обслуживания. В данной работе для анализа конфликтной ситуации используется теоретико-игровой подход. Обзор игровых моделей и задач, решаемых при моделировании телекоммуникационных сетей, приведен в [1].

В данной работе использован результат [2], где показано существование и единственность равновесного по Нэшу состояния для игры с полиномиальной функцией стоимости использования каналов. Решение проблемы оптимальной маршрутизации при конфликтном поведении участников процесса для некоторых специальных случаев рассмотрено в [3 – 5].

Использование квантового подхода для анализа биматричных игр приведено в [6 – 7], где рассмотрены принципы оптимальности и преимущества квантового подхода для игр, в которых равновесное по Нэшу состояние может не существовать. Квантовый подход к моделированию оптимальности стоимостного критерия представлен в [8].

Постановка проблемы. Рассмотрим систему передачи данных, состоящую из трех узлов. Ставится задача одновременной передачи трафика из узла 1 в узел 2 и из узла 1 в узел 3. Таблица маршрутизации построена таким образом, что возможны варианты передач трафика по направлениям 1->2, 1->3->2, 1->3, 1->3->2. Графовая модель системы может быть представлена следующим образом (рис. 1), где дуги графа соответствуют каналам связи, а вершины – узлам сети передачи данных:

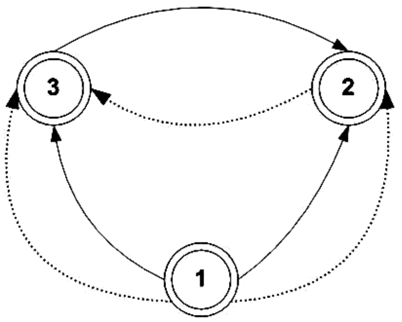

Рис. 1. Графовая модель системы передачи данных

Рассмотрим конфликтную бескоалиционную модель системы с участием двух игроков, каждый из которых передает трафик от узла источника к узлу назначения. Первый игрок, соответственно, передает трафик из узла 1 в узел 2, второй – из узла 1 в узел 3. Поведение игроков эгоистично, каждый стремится минимизировать затраты на передачу трафика по сети. Рассмотрим задачу, в которой функция стоимости определяется следующим образом, обоснованным в [2]. Пусть граф Γ системы задан парой $\Gamma = (X, L)$, где X – множество вершин, L множество дуг, $l_{ij} \in L$ – дуга, направленная из вершины $x_i \in X$ в вершину $x_j \in X$, $i, j = 1..3$, при этом на множестве L определена функция $f(l_{ij}) = a_{ij} \sum_k \lambda_{ij}^k + b_{ij}$, где a_{ij} и b_{ij} – весовые коэффициенты, поставленные в соответствие дуге l_{ij}, а λ_{ij}^k – интенсивность потока данных, передаваемых игроком k ($k = 1, 2$) по дуге l_{ij}.

Затраты игрока k на передачу трафика от начального узла к конечному представляются как

$$F^k = \sum_{i,j=1}^{3} \lambda_{ij}^k f(l_{ij}) .$$

Возникают следующие вопросы:

1. При каких условиях игрокам становится выгоднее разделять канал 2-3, чем предавать трафик напрямую по каналам 1->2 и 1->3?

2. Какое множество решений является множеством Парето и при каких значениях параметров?

Решение проблемы

Начнем с решения следующей задачи: предположим, что каждый из игроков может выбрать маршрут, по которому будет передан трафик, и направить по нему весь свой трафик, без возможности использовать балансировку нагрузки и разделять передачу трафика по направлениям. В таком случае сформулируем биматричную игру с платежной матрицей G (рис. 2):

	τ_1	τ_2
δ_1	$(F_{11}^1,\ F_{11}^2)$	(F_{12}^1, F_{12}^2)
δ_2	$(F_{21}^1,\ F_{21}^2)$	$(F_{22}^1,\ F_{22}^2)$

Рис.2. Платежная матрица игры

Здесь стратегия δ_1 первого игрока состоит в том, чтобы направить весь трафик по маршруту 1->2, а стратегия δ_2 – в том, чтобы направить трафик по маршруту 1->3->2. Для второго игрока стратегии, соответственно, представляют собой передачу трафика по маршрутам 1->3 (τ_1) и 1->2->3 (τ_2).

Определим функции затрат (или функции штрафов) для каждого игрока при выборе определенной стратегии передачи трафика:

$$F_{11}^1 = Q^1(a_{12}Q^1 + b_{12})\,;$$
$$F_{11}^2 = Q^2(a_{13}Q^2 + b_{13})\,;$$
$$F_{21}^1 = Q^1(a_{13}(Q^1 + Q^2) + b_{13} + a_{32}Q^1 + b_{32})\,;$$
$$F_{21}^2 = Q^2(a_{13}(Q^1 + Q^2) + b_{13})\,;$$
$$F_{12}^1 = Q^1(a_{12}(Q^1 + Q^2) + b_{12})\,;$$
$$F_{12}^2 = Q^2(a_{12}(Q^1 + Q^2) + b_{12} + a_{23}Q^2 + b_{23})\,;$$
$$F_{22}^1 = Q^1(a_{13}Q^1 + b_{13} + a_{32}Q^1 + b_{32})\,;$$
$$F_{22}^2 = Q^2(a_{12}Q^2 + b_{12} + a_{23}Q^2 + b_{23})\,.$$

Для сформулированной биматричной игры возможны три случая взаимного отношения выигрышей игроков.

Случай 1: Хотя бы один из игроков имеет доминирующую стратегию. В этом случае игра имеет единственную равновесное по Нэшу ситуацию.

Случай 2. Значения выигрышей игроков связаны либо соотношениями $F_{21}^1 < F_{11}^1$, $F_{12}^1 < F_{22}^1$, $F_{11}^2 < F_{12}^2$, $F_{22}^2 < F_{21}^2$, либо соотношениями $F_{11}^1 < F_{21}^1$, $F_{22}^1 < F_{12}^1$, $F_{12}^2 < F_{11}^2$, $F_{21}^2 < F_{22}^2$. Тогда игра не имеет ситуации равновесия по Нэшу.

Случай 3. Если $F_{21}^1 < F_{11}^1$, $F_{12}^1 < F_{22}^1$, $F_{12}^2 < F_{11}^2$, $F_{21}^2 < F_{22}^2$ или $F_{11}^1 < F_{21}^1$, $F_{22}^1 < F_{12}^1$, $F_{11}^2 < F_{12}^2$, $F_{22}^2 < F_{21}^2$, то игра имеет две равновесных по Нэшу ситуации.

Перейдем к рассмотрению ситуации, когда каждый из игроков имеет возможность разделять нагрузку на каналы и отправлять часть трафика по одному из маршрутов, а оставшуюся часть – по другому. В таком случае целевые функции для каждого из игроков могут быть определены следующим образом:

$$F^1(\lambda) = \lambda_{12}^1(a_{12}(\lambda_{12}^1 + \lambda_{12}^2) + b_{12}) + \lambda_{13}^1(a_{13} \times$$
$$\times(\lambda_{13}^1 + \lambda_{13}^2) + b_{13}) + \lambda_{32}^1(a_{32}\lambda_{32}^1 + b_{32})\,;$$
$$F^2(\lambda) = \lambda_{12}^2(a_{12}(\lambda_{12}^1 + \lambda_{12}^2) + b_{12}) + \lambda_{13}^2(a_{13} \times$$
$$\times(\lambda_{13}^1 + \lambda_{13}^2) + b_{13}) + \lambda_{23}^2(a_{23}\lambda_{23}^2 + b_{23})\,;$$

$$\lambda = \left(\lambda_{12}^1, \lambda_{13}^1, \lambda_{32}^1, \lambda_{12}^2, \lambda_{13}^2, \lambda_{23}^2\right).$$

С учетом требования непрерывности потоков обозначим $\lambda_{12}^1 = \alpha Q^1$, $\lambda_{32}^1 = (1-\alpha)Q^1$, $\lambda_{13}^1 = (1-\alpha)Q^1$, $\lambda_{12}^2 = (1-\beta)Q^2$, $\lambda_{13}^2 = \beta Q^2$, $\lambda_{23}^2 = (1-\beta)Q^2$. Коэффициенты α и β могут интерпретироваться как доля трафика, отправленного первым игроком по маршруту 1->2 и вторым игроком по маршруту 1->3, соответственно. Физический смысл коэффициенты имеют для $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$.

Тогда функции штрафов для игроков принимают вид

$$F^1(\alpha,\beta) = A^1\alpha^2 + B^1(\beta)\alpha + C^1(\beta)\,;$$
$$F^2(\alpha,\beta) = A^2\beta^2 + B^2(\alpha)\beta + C^2(\alpha)\,,$$

где

$$A^1 = (a_{12} + a_{13} + a_{32})\left(Q^1\right)^2;$$
$$B^1(\beta) = -Q^1(2Q^1(a_{13} + a_{32}) + \beta Q^2(a_{12} + a_{13}) -$$
$$-Q^2 a_{12} - b_{12} + b_{13} + b_{32})\,;$$
$$C^1(\beta) = Q^1(Q^1(a_{13} + a_{32}) + \beta Q^2 a_{13} + b_{13} + b_{32}\,;$$
$$A^2 = (a_{12} + a_{13} + a_{23})\left(Q^2\right)^2;$$
$$B^2(\alpha) = -Q^2(2Q^2(a_{12} + a_{23}) + \alpha Q^1(a_{12} + a_{13}) -$$
$$-Q^1 a_{13} + b_{12} - b_{13} + b_{23})\,;$$
$$C^2(\alpha) = Q^2(Q^2(a_{12} + a_{23}) + \alpha Q^1 a_{12} + b_{12} + b_{23})\,.$$

Задача поиска оптимальной стратегии для каждого игрока может быть сформулирована как

$$F^1(\alpha,\beta) \to \min\,,$$
$$F^2(\alpha,\beta) \to \min\,.$$

Решением задачи является пара чисел $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$, такие что

$$\alpha = B^1(B^2(\alpha)/(2A^2))/(2A^1)\,,$$
$$\beta = B^2(B^1(\beta)/(2B^2))/(2A^2)\,,$$
$$0 < \hat{\alpha} < 1\,, 0 < \beta < 1\,,$$

откуда $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ выражаются единственным образом.

Численный пример

Для примера рассмотрим систему, выбрав a_{ij} и b_{ij} случайным образом в диапазоне (0, 10], ($i, j = 1..3$), а Q^k – случайным образом в диапазоне (0,100], ($k = 1, 2$).

Для ($a_{12} = 7$, $a_{13} = 9$, $a_{23} = 7, a_{32} = 10, b_{12} = 4$, $b_{13} = 2$, $b_{23} = 5$, $b_{32} = 7$, $Q^1 = 74$, $Q^2 = 43$) построим графики зависимости функций штрафа одного из игроков при оптимальном поведении другого (рис. 3, 4).

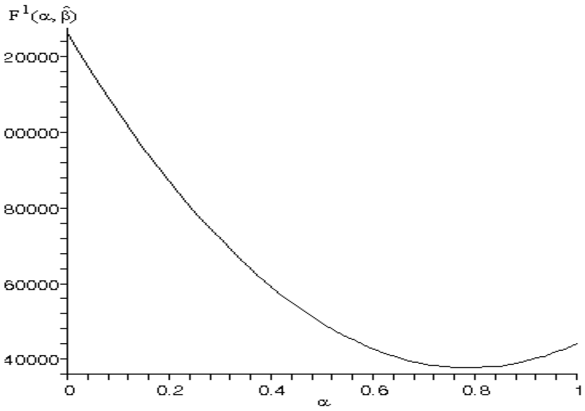

Рис. 3. Зависимость функции штрафа первого игрока от α при выборе вторым игроком стратегии $\hat{\beta}$

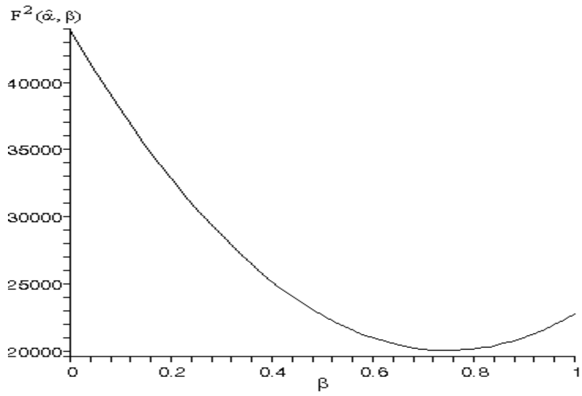

Рис. 4. Зависимость функции штрафа второго игрока от β при выборе первым игроком стратегии $\hat{\alpha}$

На рис. 3, 4 видно, что равновесное положение устойчиво, так как если один из игроков выбирает свою оптимальную стратегию, то для второго игрока становится невыгодным отклоняться от своей оптимальной стратегии (для рассматриваемого примера $\hat{\alpha}$ = 0,79, $\hat{\beta}$ = 0,73).

Однако будучи устойчивым, равновесное состояние ($\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$) не является Парето оптимальным. Для рассматриваемого примера можно убедиться подстановкой, что $F^1(\hat{\alpha}+0{,}1, \hat{\beta}+0{,}1) < F^1(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ и $F^2(\hat{\alpha}+0{,}1, \hat{\beta}+0{,}1) < F^2(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$.

На рис. 5 – 7 представлены линии уровня функций штрафов первого и второго игроков, а также графики оптимального поведения, минимизирующего убытки, при любом переменном поведении другого игрока. Характер оптимальности демонстрирует противоречивость целей игроков и определяет конфликтное поведение.

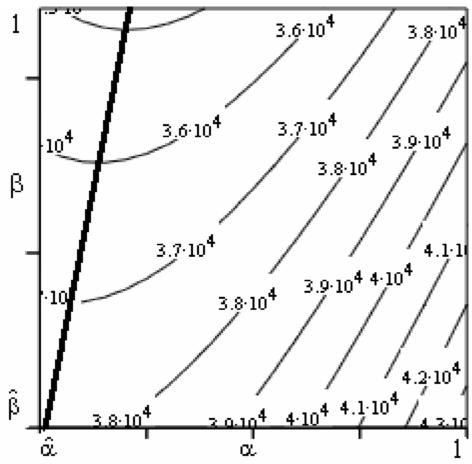

Рис. 5. Линии уровня функции штрафа первого игрока и линия оптимального поведения первого игрока при меняющемся поведении второго (изменении β)

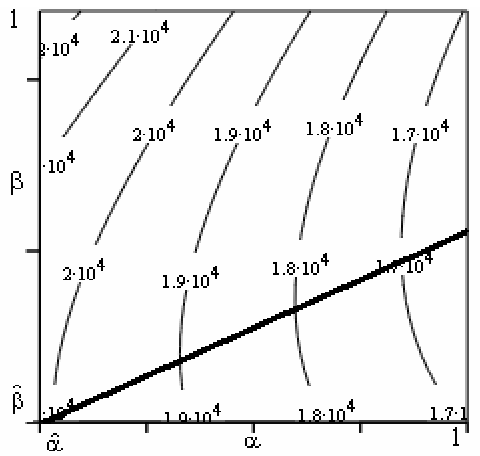

Рис. 6. Линии уровня функции штрафа второго игрока и линия оптимального поведения второго игрока при меняющемся поведении первого

(переменном α)

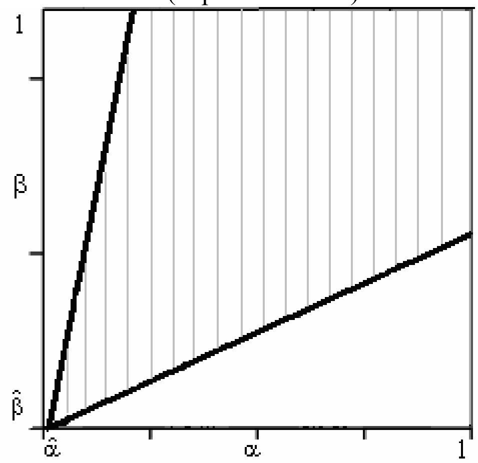

Рис. 7. Область, включающая Парето-оптимальное множество стратегий

Квантовый подход. Формулировка задачи игрового моделирования системы передачи данных

Некоторые аспекты применения аппарата квантовой информатики к оптимизации систем передачи данных рассмотрены в [9 – 10].

Сформулируем двухкубитную квантовую игру двух игроков, I и II, в которой два кубита выполняют функцию оракула для соответствующего игрока. Платежная матрица игры представлена на рис. 2.

Поставим в соответствие каждой из возможных классических стратегий игроков базис Гильбертова пространства. Для первого игрока базис представляется парой $|\Gamma_1\rangle$ и $|\Gamma_2\rangle$, для второго – $|\mathrm{T}_1\rangle$ и $|\mathrm{T}_2\rangle$.

Таким образом, вектор в Гильбертовом пространстве, базисом которого служит тензорное произведение базовых векторов кубитов-оракулов, будет определять состояние игры в целом. Обозначение $|.\rangle$ представляет собой бра-вектор Дирака. Тогда базисом состояния игры будет множество векторов $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$, где первая и вторая компоненты вектора ссылаются, соответственно, на состояния кубитов первого и второго игроков, с учетом того, что условно стратегии $|\Gamma_1\rangle$ и $|\mathrm{T}_1\rangle$ приняты за $|0\rangle$, а $|\Gamma_2\rangle$ и $|\mathrm{T}_2\rangle$ – за $|1\rangle$ соответствующих Гильбертовых пространств. На результирующем Гильбертовом пространстве $H = H_I \otimes H_{II}$, $H_I = H_{II} = C^2$ определено пространство состояний игры $S(H)$. Стратегии s_I и s_{II} игроков I и II являются квантовыми операторами, действующими на H_I и H_{II} соответственно.

Представим начальное состояние игры как

$$|\varphi_i\rangle = \hat{J}|00\rangle,$$

где $\hat{J}$ – некоторый унитарный оператор, заранее известный всем игрокам.

Стратегии s_I и s_{II} игроков соответствуют унитарными операторами U_I и U_{II} Гильбертова пространства, тогда преобразование состояний происходит следующим образом: $\varphi_{j+1} = (s_I \otimes s_{II})\varphi_j$ или $\varphi_{j+1} = (U_I \otimes U_{II})\varphi_j (U_I \otimes U_{II})^\circ$, где X° – эрмитово транспонирование матрицы X. Финальное состояние игры

$$|\varphi_f\rangle = \hat{J}^\circ (U_I \otimes U_{II})\hat{J}|00\rangle.$$

Для платежной матрицы, представленной на рис. 2, выразим функции штрафов каждого из игроков за использование каналов передачи данных:

$$\begin{cases} P_I = F_{11}^1 P_{00} + F_{12}^1 P_{01} + F_{21}^1 P_{10} + F_{22}^1 P_{11}; \\ P_{II} = F_{11}^2 P_{00} + F_{12}^2 P_{01} + F_{21}^2 P_{10} + F_{22}^2 P_{11}, \end{cases}$$

где $P_{kl} = \left|\langle kl|\varphi_i\rangle\right|^2$, $\{k,l\} = \{0,1\}$ – вероятность того, что финальное состояние $|\varphi_f\rangle$ будет измеряно в базисе $|kl\rangle$.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Рассмотренная игровая модель позволяет участникам игры на основании априорных знаний об используемых каналах и о предполагаемом объеме передаваемого трафика строить стратегии оптимальной в смысле стоимости каналов маршрутизации. Если предполагать, что игроки действуют автономно, без предварительной договоренности, то для каждого игрока задача выбора решается в условиях неопределенности, где фактором неопределенности служит объем передаваемого трафика и выбор маршрута другого игрока. В таких условия может быть показано, что при переходе от одношаговой игры к многошаговой (т.е. совершив итерационный процесс поиска оптимального решения на основе уточняющихся данных о поведении противника) достигается состояние равновесия, устойчивость или неустойчивость которого определяется коэффициентами функций стоимости каналов.

Показано, что в рассматриваемой игре существует и является устойчивым равновесие по-Нэшу, однако точка, равновесная по-Нэшу может не входить в Парето-оптимальное множество стратегий игроков.

В работе сформулирована постановка задачи моделирования в пространстве квантовых стратегий игроков, приведены функции выигрышей участников для двухкубитной игры с оракулом.

Целью последующих работ ставится имитационное моделирование сети передачи данных для случая полиномиальной стоимости использования каналов (может быть использован, например, пакет ns2 [11]) и построение адаптивной модели, позволяющей за конечное число пересчетов и изменения алгоритма маршрутизации достичь равновесного состояния в системе.

Для сформулированной задачи квантового моделирования актуальным является сравнение оптимального поведения игроков для классической и квантовой игровой постановки проблемы.

Литература

1. Altman E., Boulogne T., El Azouzi R., Jimenez T., Wynter L. A survey on networking games // Computers and Operations Research, 2004.

2. Altman E., Basar T., Jimenez T. Shimkin N. Competitive routing in networks with polynomial cost // IEEE Trans. on Automatic Control. – Jan. 2002. – Vol 47. – P. 92-96.

3. Beans N.G., Kelly F.P., Taylor P.G. Braess's paradox in a loss network // Journal Appl. Prob. – 1997. – No. 34. – P. 155-159.

4. Jin Y., Kesidis G. Nash equilibria of a generic networking game with applications to circuit-switched networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM. – San Francisco, California, USA, 2003.

5. Roughgarden T. Tardos E. How bad is sel_sh routing? // Journal of the ACM. – 2002. – No. 49. – P. 236-259.

6. Meyer D. A. Quantum Strategies. – Apr 1998. – V1.3. – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http:// www.arXiv:quant-ph/9804010.

7. Alvaro Francisco Huertas Rosero. Classification of quantum symmetric nonzero-sum 2x2 games in the Eisert scheme. – 2004. – V2.17 – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http:// www.arXiv:quant-ph/0402117.

8. Nyunkina Y. Quantum game model for internet services pricing // ECCO XVIII "Combinatorics for modern manufacturing, logistics and supply chains": Abstacts of the XVIII European Conference (26-28 May, Minsk, Belarus). – Minsk: United Institute of Informatics of the National Academy of Sciences of Belarus, 2005. – P. 46.

9. Нюнькина Ю.П., Скатков А.В. Оптимизация ресурсов многофазных систем с использованием квантовых алгоритмов // Автоматика-2005. – 12-я межд. конф. по автоматич. управлению. – 30 мая – 3 июня 2005. – Х.: НТУ «ХПИ», 2005.

10. Нюнькина Ю.П. Игровая модель передачи данных для квантового вычислителя // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье (MicroCAD-2005-Харьков). XIII международная НПК. 19-20 мая 2005. – Х. НТУ «ХПИ», 2005. – С. 224.

11. The Network Simulator - ns-2. – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.isi.edu/nsnam/ns.

Поступила в редакцию 18.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.