12. **Dorigo M., Stutzle T.** Ant Colony Optimization. Massachusetts Institute of Technology, 2004. ISBN 0—262—04219—3.
13. **Teodorović D., Dell' Orco M.** Bee Colony Optimization-A cooperative learning approach to complex transportation problems / In Abstracts — of 10th EWGT Meeting and 16th Mini EURO Conference, Poznan.— 2005.
14. **Yang X. S.** Firefly algorithms for multimodal optimization. Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Sciences 5792.— 2009.— P. 169—178.
15. **Humphries N. E., Queiroz N. D., Jennifer R. M. et al.** Environmental context explains Lévy and Brownian movement patterns of marine predators. Nature 465 (7301): 1066—1069, 2010.
16. **Edwards, A. M.; Phillips, R. A.; Watkins, N. W. et al** Revisiting Lévy flight search patterns of wandering albatrosses, bumblebees and deer 449.— 2007.— P. 1044—1048.
17. **Matthäus F., Jagodič M., Dobnikar J.** E. coli Superdiffusion and Chemotaxis — Search Strategy, Precision, and Motility // Biophysical Journal.— 2009.— Vol. 97.— P. 946—957.
18. **Ducetelle F.** Adaptive routing in ad hoc wireless multi-hop networks / Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Lugano, Switzerland.— May, 2007.
19. **Saleem M.** A bee-inspired power aware routing protocol for wireless ad hoc sensor networks / Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Computer Engineering. Taxila, Pakistan.— 2010.

Получено 12.02.14

УДК 621.395

ИНТЕРНЕТ НАНОВЕЩЕЙ И НАНОСЕТИ

Е. А. Кучерявый, профессор Технологического университета Тампере (Финляндия), к.т.н., PhD; yk@cs.tut.fi
С. Баласубраманиям, старший исследователь Технологического университета Тампере (Финляндия), PhD; sasi.bala@tut.fi

Концепция Интернета Вещей [1] находит свое применение не только в виде всепроникающих сенсорных сетей [2], сетей автомобильного транспорта [3], но и на уровне наномира. Интернет нановещей [4], еще вчера казавшийся более мечтой, чем реальной перспективой, сегодня вышел из концептуальной стадии развития и стал предметом исследовательской деятельности во многих лабораториях мира. Нановещи объединяются в наносети, среди которых выделяются электромагнитные и молекулярные [2]. В статье приводятся результаты исследований в области бактериальных молекулярных наносетей.

Ключевые слова: *Интернет нановещей, электромагнитные и молекулярные наносети.*

Введение. Прогнозы развития в области Интернета Вещей показывают, что предельное число Интернета Вещей может составить 50 триллионов [5]. При этом «вещи» подразделяются на физические и виртуальные (вещи информационного мира) [6], а в плане приложений рассматриваются персональные и автономные вещи, вещи специального назначения, летающие вещи и т.д. Однако эти прогнозы не учитывают еще одну категорию вещей — тех, которые могут быть элементами сетей связи в наномире. Эти вещи получили название *нановещей*, а их сетевые структуры — *наносетей* [4].

Определим наносеть в терминах телекоммуникаций следующим образом. *Наносеть* является самоорганизующейся сетью, в которой в качестве узлов сети используются наномашины, а информация и сигнализация могут быть переданы, в том числе и путем перемещения вещества [2].

Наномашина — это устройство, состоящее из компонентов наноуровня, способное выполнять такие специфические задачи на наноуровне, как телекоммуникации, вычисление, хранение данных, измерения (сенсоры) и/или воздействия (актуаторы) [7].

В настоящее время в классификации наносетей выделяются наносети, в которых информация передается с помощью электромагнитных волн, и наносети, в которых информация передается путем перемещения вещества (молекулярные наносети). *Электромагнитные наносети* предполагается строить с использованием графеновых антенн, работающих в диапазоне 0,1—1 ТГц [8]. *Молекулярные наносети,* в свою очередь, классифицируются на наносети, в которых информация передается на расстояния: нано- и микрометры, микро- и миллиметры, метры и более [2].

В первом случае для передачи информации исследуются возможности, например, положительных ионов кальция. Вторая группа молекулярных наносетей характеризуется использованием для передачи информации, например, жгутиковых бактерий. Для третьей же группы предусматривается проведение исследований по передаче информации с помощью феромонов, пыльцы и спор растений, трансдукции (сенсорного преобразования) света.

Кроме того, в последнее время пристальное внимание уделяется созданию наносетей на основе нейронов [15], несущих в себе свойства электромагнитных и молекулярных наносетей. В статье детально рассмотрены результаты работ в области бактериальных наносетей.

Бактериальные наносети. В биологических системах можно выделить следующие виды связей:

- внутри одного и того же организма;
- между различными организмами одного и того же вида;
- между различными организмами разных видов.

Информация при этом может содержать сведения об изменении окружающей среды, появлении хищников, доступности пищи и т.д.

Наносети, естественно, могут существовать на наноуровне для любых биологических систем. При этом наносоединения могут устанавливаться как проводным, так и беспроводным способом. Примером проводной связи для бактерий является передача генов или генетического материала между различными штаммами бактерий. Пример

беспроводной связи — формирование так называемого «кворума понимания» для определения размера своего сообщества бактерий.

Рассмотрим возможные варианты передачи информации между молекулами [9]. На рис. 1 приведен пример простейшей структуры наносети, в качестве среды передачи которой используются бактерии.

Рис. 1. **Пример бактериальной наносети**

Информация между бактериями может передаватся путем конъюгации. При этом передача информации происходит путем передачи копии плазмиды от одной бактерии к другой (рис. 2). Отметим, что плазмиды являются структурами ДНК, способными реплицироваться автономно.

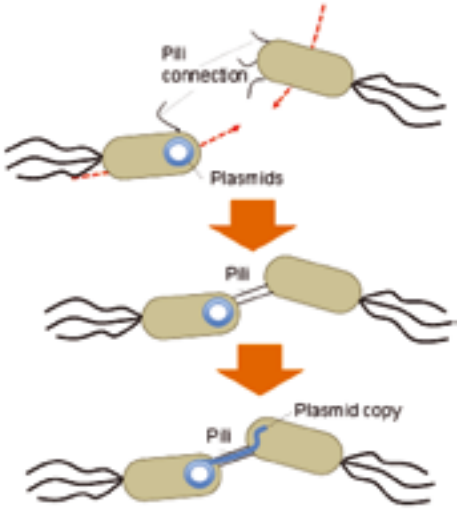

Рис. 2. **Передача информации между бактериями**

Плазмиды способны к длительному автономному существованию. Известно также, что объем информации, который может быть передан с помощью плазмид, очень велик.

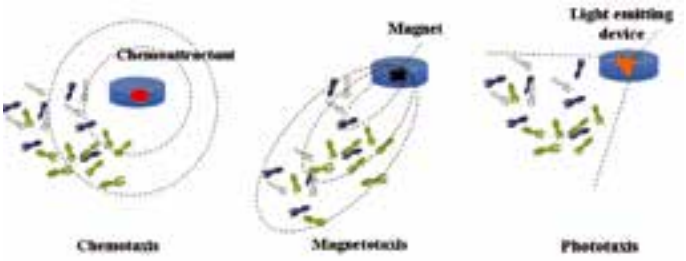

Рис. 3. **Управляющие воздействия на бактерии**

В традиционных сетевых понятиях в наносети бактерии могут рассматриваться как мобильные узлы. При этом для управления этими узлами используются следующие возможности (рис. 3): химические, магнитные и световые.

В Технологическом университете Тампере построены фрагменты тестовой бактериальной наносети с использованием в качестве метода передачи информации конъюгации и с управлением бактериями путем химических воздействий [10].

На рис. 4 изображена структура бактериальной наномашины и сеть из трех наномашин [12]. Наномашина включает: химический аттрактант (вещество, привлекающее бактерии), питательное вещество для бактерий, канал кормления и популяцию бактерий, а также наносенсоры, нанобатарею и нанопроцессор. Тестовая сеть состоит из трех наномашин, а передача информации от узла *A* к *C* осуществляется путем конъюгации в узле *B*.

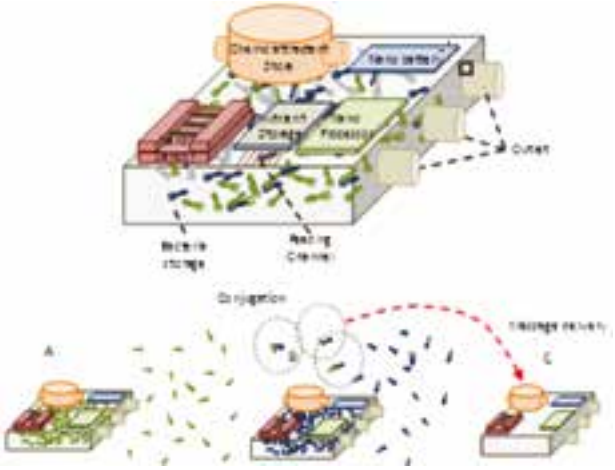

Рис. 4. **Структура тестовой бактериальной наносети**

Для оценки длительности передачи информации с помощью конъюгации были проведены исследования совместно с институтом Хартмана Университета Хельсинки (Финляндия). Бактерии вида E.coli использовались в качестве доноров, а бактерии вида Yersina pseudotuberculosis — реципиентов [11]. В таблице приведена информация о длительности частичной и полной конъюгации бактерий в данном эксперименте.

Длительность, минуты	20	40	60	100
Доля бактерий, прошедших конъюгацию	0,42	0,54	0,66	1,0

Полученные данные доказывают, что бактериальные сети могут использоваться как сети, толерантные к задержкам. Они известны в литературе как DTN (Delay Tolerant Networks). Примерами таких сетей служат современные целевые (Ad Hoc) сети, всепроникающие сенсорные сети [13], а также и более экзотические межпланетарные [14] сети. В качестве приложений бактериальных наносетей уже в среднесрочной перспективе может рассматриваться не только медицина, но и контроль продуктов, мониторинг химической и радиационной обстановки.

Выводы. 1. Развитие концепции Интернета Вещей и нанотехнологий приводит к появлению Интернета нановещей

и наносетей. Наносети подразделяются на электромагнитные и молекулярные.

2. Бактериальные наносети основываются на передаче информации посредством конъюгации. При этом может быть передан очень большой объем информации за счет передачи другой бактерии копии плазмиды.

3. Созданы фрагменты тестовой бактериальной наносети и доказано, что бактериальные сети могут использоваться как сети, толерантные к задержкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кучерявый А.Е.** Интернет Вещей // Электросвязь.— 2013.— № 1.
2. **Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А.** Самоорганизующиеся сети.— С. Петербург: Изд-во «Любавич», 2011.
3. **Vinel A., Campolo C., Petit J., Koucheryavy Y.** Trustworthy broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE vehicular networks: Delay analysis // IEEE Communications Letters.— 2011.— 15 (9).
4. **Akyildiz I.F., Jornet J.M.** The Internet of Nano-Things // IEEE Wireless Communications.— December 2010.— V.17, № 6.
5. **Waldner J.-B.** Nanocomputers and Swarm Intelligence / ISTE, Wiley&Sons, London.— 2008.
6. Recommendation Y.2060. Overview of Internet of Things. ITU-T, Geneva.— February 2012.
7. **Akyildiz I.F., Jornet J.M.** The Internet of Nano-Things // IEEE Wireless Communications.— December 2010.— V. 17, № 6.
8. **Jornet J.M., Akyildiz I.F.** Graphene-based Nano-Antennas for Electromagnetic Nanocommunications / Proceedings, 4th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP).— April, 2010.
9. **Cobo-Rus L.C., Akyildiz I.F.** Bacteria-based Communication on Nanonetworks // Nano Communication Networks.— December 2010.— V. 1, № 4.
10. **Balasubramaniam S., Lio P.** Multi-hop Congjugation based Bacteria Nanonetworks // IEEE Transactions on NanoBioScience.— 2013.— V. 12, № 1.
11. **Petrov V., Balasubramaniam S., Skurnik Y.M., Koucheryavy Y.** Exploting Bacterial Properties for Multi-hop Nanonetworks // IEEE Transactions on NanoBioScience.— 2014.
12. **Petrov V., Balasubramaniam S., Koucheryavy Y., Skurnik M.** Forward and reserved Coding for Bacteria Nanonetworks / First IEEE BlackSeaCom, 2013.
13. **Saffer Z., Andreev S., Koucheryavy Y.** Performance Evaluation of Up-link Delay-Tolerant Packet Service / In IEEE 802.16-based Networks. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.— 2011.
14. **Akyildiz I.F. et al.** InterPlanetary Internet: State of the Art and Research Challenges. Computer Networks. Elsevier.— 2003.— № 43.
15. **Koucheryavy Y., Kara O., Balasubramaniam S. et. al.** An Experimental Investigation into Utilizing Neurons for Wireless Nano Communication // IEEE Transactions on NanoBioScience.— 2014 (в печати).

Получено 12.02.14

ИНФОРМАЦИЯ

SATELLITE RUSSIA & CIS 2014 — НОВАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ ОПЕРАТОРОВ

Satellite Russia & CIS 2014 (организатор — ComNews Conferences) проводится впервые, и впервые же в роли генерального партнера столь масштабного форума выступила компания «Газпром космические системы». В первый день конференции обсуждались такие вопросы, как использование спутниковых телекоммуникаций в национальных интересах, надежность и повышение качества спутников связи, планы спутниковых операторов и усиление конкуренции на рынке спутникового ресурса, новые технологии и услуги, регуляторные аспекты, финансирование спутниковых проектов и страхование космических активов.

Пленарную сессию Satellite Russia & CIS 2014 открыли заместитель руководителя Департамента инфраструктурных проектов Минкомсвязи РФ **М. Кайгородов**, заместитель руководителя Федерального агентства связи **И. Чурсин** и генеральный директор «Газпром космические системы» (ГКС) **Д. Севастьянов**. М. Кайгородов сообщил о создании рабочей группы по развитию спутниковой связи и вещания в национальных интересах, в планы которой входит, в том числе, устранение противоречий в законодательном поле.

Д. Севастьянов, М. Кайгородов и И. Чурсин (слева направо)

И. Чурсин подчеркнул важность спутниковой связи для труднодоступных районов. Д. Севастьянов представил программу использования орбитальной группировки (ОГ) спутников «Ямал» в государственных интересах. В частности, в 2014—2017 гг. оператор намерен инвестировать 36,6 млрд руб. внебюджетных средств в создание и вывод на орбиту спутников «Ямал-501» и «Ямал-601». А к 2020 г., по планам, российская ОГ спутников связи будет насчитывать 16 аппаратов, из них пять — ГКС (сегодня 13 и 4 соответственно).

В рамках форума состоялись дискуссии, посвященные решению проблем надежности и ресурса спутников, возможностям преодоления сложностей при организации совместного производства, планам спутниковых операторов по предоставлению ресурса на рынке России и СНГ, финансированию и страхованию космических проектов.

На второй день формат конференции предусматривал работу на территории телекоммуникационного центра «Газпром космические системы» в подмосковном Щелкове. Это ключевой элемент наземного сегмента системы спутниковой связи «Ямал». После заседания, в центре обсуждения которого были барьеры и новые возможности для развития услуг фиксированной спутниковой связи в России, участники конференции посетили центр управления спутниками «Ямал», центральные станции спутниковой связи, центр управления спутниковой телекоммуникационной сетью «Газпрома», а также осмотрели антенное поле, где работает более десятка крупногабаритных спутниковых антенн.

Более подробные материалы по конференции Satellite Russia & CIS 2014 читайте в следующем номере журнала «Электросвязь».