

СЕНСОРНЫЕ СЕТИ В ГЕТЕРОГЕННОЙ ЗОНЕ СИСТЕМЫ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

А. Футахи, аспирант кафедры «Сети связи и передача данных» СПбГУТ; aahf_84@mail.ru

А. И. Парамонов, доцент кафедры «Сети связи и передача данных» СПбГУТ, к.т.н.; alex-in-spb@yandex.ru

А. В. Прокопьев, доцент кафедры «Сети связи и передача данных» СПбГУТ, к.т.н.; andrey.prokopiev@gmail.com

А. Е. Кучерявый, заведующий кафедрой «Сети связи и передача данных», д.т.н.; akouch@mail.ru

Широкое распространение беспроводных сенсорных сетей, сетей автомобильного транспорта, предстоящее внедрение летающих сенсорных сетей превращают территорию обслуживания системы длительной эволюции в гетерогенную. В статье предложен и исследован новый класс задач — использование мобильных узлов иных сетей в качестве временных головных узлов беспроводной сенсорной сети.

Ключевые слова: сенсорные сети, система длительной эволюции, гетерогенная зона, головной узел кластера, временный мобильный головной узел кластера.

Введение. Предстоящее широкое внедрение концепции Интернета Вещей [1–3] вкупе с развитием систем длительной эволюции LTE (Long Term Evolution) [4] ставит ряд новых задач по интеграции ресурсов самоорганизующихся сетей [5, 6] и LTE по обслуживанию трафика.

На территории гетерогенной зоны LTE [7] одновременно может существовать множество узлов различных сетей: всепроникающих сенсорных (ВСС) [8, 9], автомобильных [10], медицинских [11] и т.д. Кроме того, в этой же зоне функционирует множество сотовых терминалов, находящихся в конкретный момент времени на различном удалении от базовой станции. Последнее в рамках решения задачи об улучшении качества обслуживания пользователей, находящихся ближе к границе зоны обслуживания, привело к созданию так называемых кооперативных сетей [12, 13]. В них качество обслуживания пользователей, находящихся у границы зоны обслуживания или в других неблагоприятных условиях, может быть улучшено за счет переприема информации другими пользователями или специально вводимыми в сеть ретрансляторами [14].

В статье предлагается решение иной задачи: увеличение остаточной энергии и длительности жизненного цикла сенсорной сети за счет придания временного статуса головного узла кластера терминалам сети LTE, узлам автомобильной сети VANET, квадракоптерам летающей сенсорной сети [15], пересекающим сенсорное поле. Это может быть действительно эффективно, поскольку запас энергии терминалов LTE, узлов автомобильной сети, квадракоптеров и т.п. существенно больше, чем у сенсорных узлов. С учетом ограничений на энергетические возможности сенсорных сетей задача решается на сетевом уровне. Для сенсорного узла это означает, что инвариантность его поведения зависит от того является ли в конкретный момент головным узлом кластера сенсорный узел из его поля, или это элемент иной сети, временно проходящий сенсорное поле.

Поставить такую задачу стало возможным, прежде всего, благодаря широкому распространению ВСС, а также наличию в современных терминалах сотовой сети, сети VANET, медицинской сети, летающих сенсорных сетей ин-

терфейса протокола ZigBee [5, 9]. В данной области исследований известна задача сбора данных с сенсорных полей с помощью специализированных шлюзов, последовательно пересекающих ряд определенных заранее сенсорных полей [16].

Формируются ВСС, как правило, на основе кластерной архитектуры [17, 18]. При этом возможно построение сети в трехмерном пространстве [19, 20]. Сенсорные узлы могут быть стационарными и мобильными [21, 22], в последнем случае говорят о мобильной сенсорной сети. Поскольку предлагаемое исследование является первым в области временного предоставления прав головного узла, проходящего через сенсорное поле, узлам других сетей, то в качестве модели выберем типовую модель сенсорной сети со стационарными узлами и кластеризацией на основе базового алгоритма LEACH [17].

Модель сети. Пуассоновское сенсорное поле полностью расположено в гетерогенной зоне LTE. Шлюз находится в центре сенсорного поля на расстоянии 500 м от базовой станции LTE. 100 сенсорных узлов распределены изначально случайным образом на плоскости размером 200×200 м. Сенсорные узлы стационарны. Радиус действия сенсорного узла — 20 м, запас энергии в каждом узле — 2 Дж, расход энергии на прием — 50 нДж/бит, на передачу — 50 нДж/бит и дополнительно 100 пДж/кв.м. Все сенсорные узлы однородны, т.е. имеют одинаковый радиус действия и начальные энергетические характеристики. Сенсорное поле кластеризовано. В соответствии с практикой использования алгоритма LEACH доля головных узлов предопределена в количестве 5% от общего числа сенсорных узлов.

Через сенсорное поле 1 раз в 100 раундов проходит мобильный узел иной сети со скоростью 2 м/с (типовая скорость для мобильных сенсорных сетей), который становится головным узлом для пересекаемых им кластеров. Точка входа этого узла в сенсорное поле случайна. Также случайным является номер первого раунда для временного мобильного головного узла (ВМГУ). После входа мобильный головной узел пересекает сенсорное поле параллельно сторонам квадрата и становится временным головным в первом же целом раунде после его появления в сенсорном поле.

Мобильный головной узел считается выбывшим из сенсорного поля в момент времени, когда наступает очередной раунд, и до пересечения границы сенсорного поля этому узлу остается времени меньше, чем длительность раунда. При этом он уже не может быть избран временным головным. При наличии ВМГУ в сенсорном поле число выбираемых головных узлов из членов кластера уменьшается на единицу. Данные, собранные за время пребывания в роли головного узла, мобильный временный головной узел передает на шлюз или базовую станцию.

Расчет характеристик сети. При использовании алгоритма кластеризации LEACH структура сети выбирается (изменяется) периодически. Период, в течение которого структура неизменна, называется раундом. В начале раунда выбирается некоторое количество головных узлов, которые и определяют кластеры сети. Число и расположение головных узлов случайно, определяется только среднее значение (доля) головных узлов. Таким образом, для узла сети вероятность оказаться в зоне действия головного узла меньше единицы, следовательно, меньше единицы и вероятность того, что сообщение будет отправлено. ВМГУ временно являются дополнительными головными узлами сети, поэтому следует ожидать увеличения вероятности доставки сообщения в течение раунда.

Узлы сети расходуют энергию источников питания на прием и передачу данных, при этом наибольшую долю энергии затрачивают головные узлы кластеров, так как они обслуживают передачу сообщений от нескольких узлов — членов кластеров. При наличии ВМГУ сети, эти узлы «принимая на себя» энергетические затраты, связанные с передачей некоторой доли сообщений, поэтому следует ожидать снижения расходов энергии узлами сенсорной сети, и, следовательно, увеличения ее продолжительности жизни.

Вероятность доступности головного узла для произвольного узла сети. Рассмотрим один раунд работы сенсорной сети. Вероятность того, что узел сенсорной сети находится в зоне действия хотя бы одного головного узла, определяется как

$$p_C = 1 - p_0^{(H)}, \quad (1)$$

где $p_0^{(H)}$ — вероятность того, что в зоне действия сенсорного узла нет ни одного головного узла. Эта вероятность может быть определена согласно закону распределения Пуассона (свойства пуассоновского поля):

$$p_0^{(H)} = \frac{(\pi r^2 \rho_H)^k}{k!} e^{-\pi r^2 \rho_H} \Big|_{k=0} = e^{-\pi r^2 \rho_H}. \quad (2)$$

Тогда

$$p_C = 1 - e^{-\pi r^2 \rho_H}. \quad (3)$$

Здесь $\rho_H = \rho \eta$ — плотность головных узлов; $\rho = \frac{n}{S}$ — плотность узлов сети (узлов/кв.м); n — общее число узлов сети; S — площадь зоны обслуживания (кв.м).

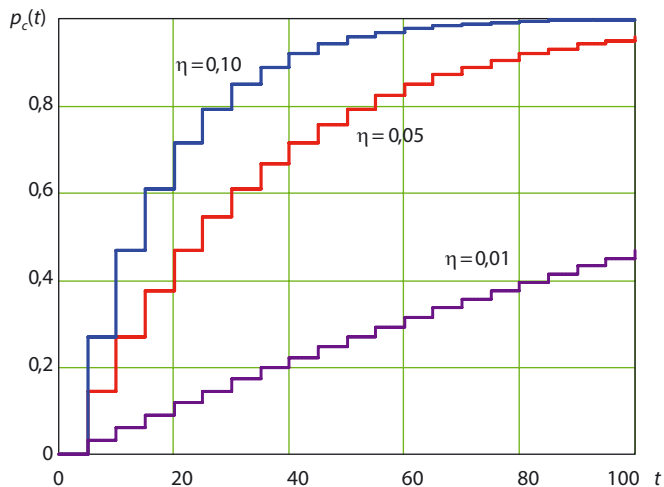


Рис.1. Зависимость вероятности связности узла от числа раундов для различной доли головных узлов

В общем случае вероятность того, что за d раундов сенсорный узел получит возможность отправки сообщения (доступен головной узел), определится как

$$p_C(d) = 1 - (e^{-\pi r^2 \rho_H})^d = 1 - e^{-\pi r^2 \rho_H d}. \quad (4)$$

Зависимость (4) от времени (при длительности раунда равной 5 с, как правило, используемой в работах по выбору головных узлов) для различной доли головных узлов приведена на рис. 1.

Вероятность доступности ВМГУ для произвольного узла сенсорной сети. При вхождении в зону обслуживания сенсорной сети мобильного узла иной сети в первом же целом раунде кластеризации он становится головным узлом. При этом узлы сенсорной сети в зоне его обслуживания становятся узлами кластера и могут передавать сообщения через этот головной узел. При перемещении ВМГУ в течение раунда на расстояние L часть узлов может оказаться вне зоны его обслуживания. Узлы кластера, которым доступен ВМГУ, будут находиться в области пересечения двух окружностей, представляющих зоны действия головного узла в точке в начале раунда и на расстоянии L от данной точки.

Таким образом, в начале раунда ВМГУ с вероятностью равной единице доступен всем сенсорным узлам кластера, а с течением времени t вероятность доступности ВМГУ уменьшается. Вероятность доступности ВМГУ можно определить как отношение площадей пересечения окружностей и зоны обслуживания (в течение длительности раунда):

$$p_a(t) = \frac{\tilde{S}(L(t))}{\pi r^2} = \begin{cases} \frac{\tilde{S}(vt)}{\pi r^2}, & t < T_0; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 2 приведена модель, иллюстрирующая перемещение ВМГУ.

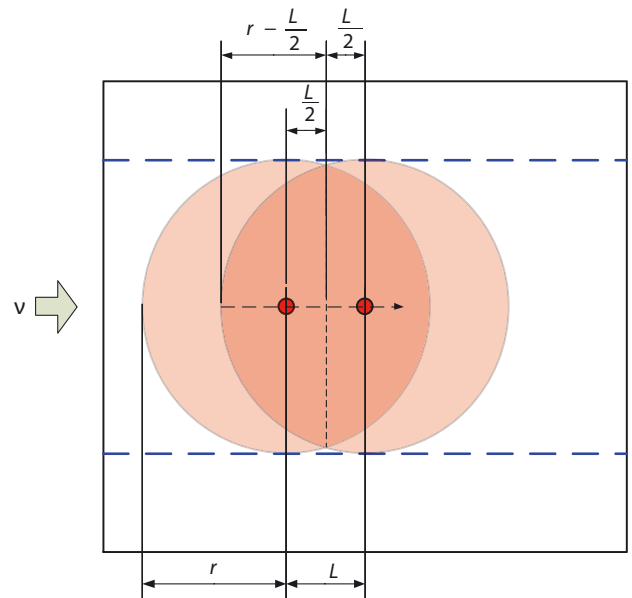


Рис. 2. Перемещение ВМГУ

Из приведенного рисунка площадь пересечения зон обслуживания можно определить по формуле

$$\tilde{S}(L) = 2 \left[r^2 \arccos\left(\frac{L}{2r}\right) - \left(\frac{L}{2}\right) \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right]. \quad (6)$$

На рис. 3 приведена зависимость вероятности доступности ВМГУ от времени при различной скорости его движения с момента начала раунда (без учета длительности раунда). Тогда зависимость вероятности доступности ВМГУ для узлов его кластера от времени будет определяться как

$$p_A(t) = \begin{cases} \frac{\tilde{S}(vt)}{\pi r^2}, & vt < r; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

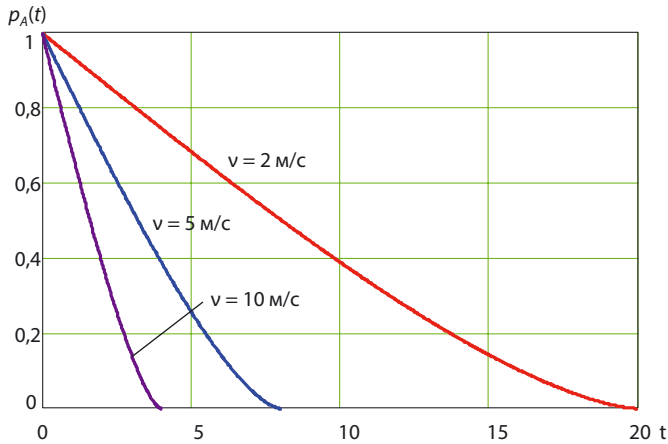


Рис. 3. Изменение вероятности доступности ВМГУ от времени для разных скоростей его перемещения

С учетом того, что раунды происходят периодически и их длительность постоянна и равна T_0 , вероятность доступности ВМГУ будет представлять собой периодическую функцию с периодом равным длительности раунда:

$$p_a(t) = \begin{cases} \frac{\tilde{S}(vt)}{\pi r^2}, & (T_0 z < t < T_0(z+1)) \wedge (vt < r), \quad z \in \mathbb{N}; \\ 0, & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (7)$$

где $\tilde{S}(vt)$ — определяется в соответствии с (4); T_0 — длительность раунда (с); v — скорость перемещения головного узла (м/с); r — радиус зоны действия головного узла.

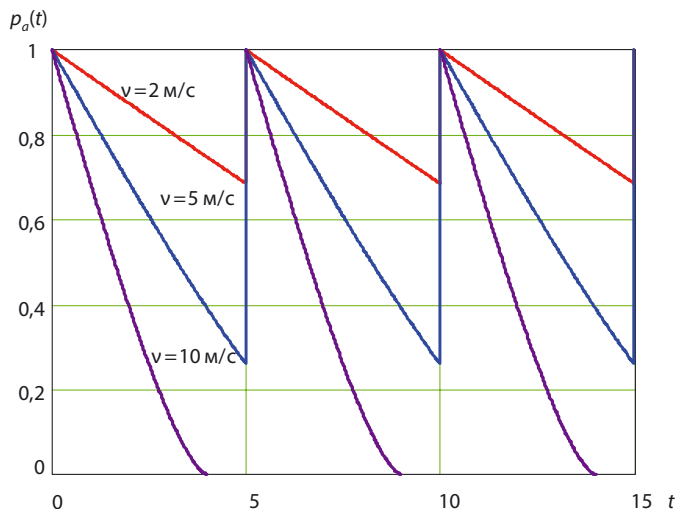


Рис. 4. Изменение вероятности доступности ВМГУ от времени для разных скоростей в течение нескольких раундов

Для произвольного узла сети вероятность того, что в зоне его действия расположен хотя бы один мобильный узел иной сети, будет определяться аналогично (3), т.е.

$$p_C^{(T)} = 1 - e^{-\pi r^2 \rho_T}, \quad (8)$$

где ρ_T — плотность мобильных узлов иных сетей в зоне обслуживания.

В случае доступности мобильного узла иной сети он безусловно выбирается головным, поэтому с учетом (7) зависимость вероятности его доступности от времени определится как

$$\tilde{p}_a(t) = p_C^{(T)} p_a(t). \quad (9)$$

Данная зависимость при $\rho_T = \rho_H = \rho$ приведена на рис. 5.

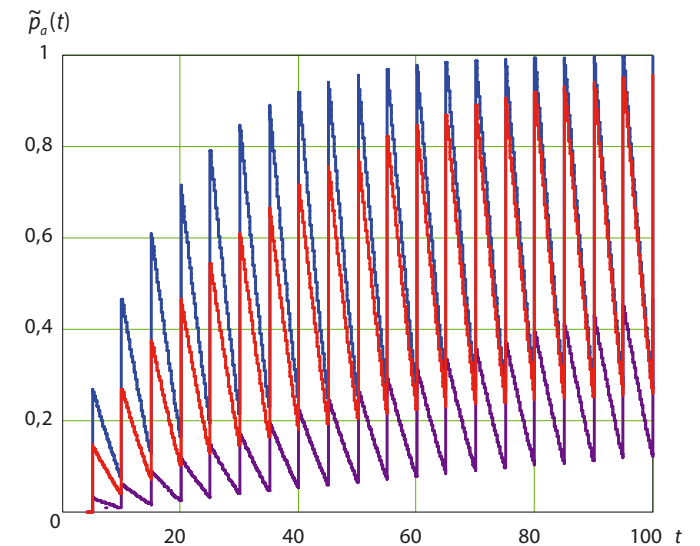


Рис. 5. Изменение вероятности доступности ВМГУ от времени для разных плотностей в течение 20 раундов

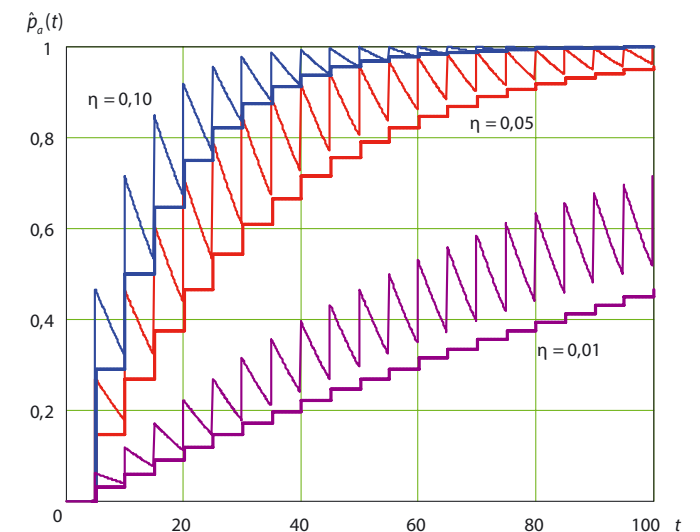


Рис. 6. Изменение вероятности доступности любого из головных узлов для разных плотностей в течение 20 раундов при наличии и отсутствии ВМГУ

Оценим вероятность доступности любого из головных узлов, включая ВМГУ. Вероятность доступности любого из головных узлов определяется как

$$\hat{p}_a = p_C^{(T)}(t) + p_C(t)(1 - p_C^{(T)}(t)). \quad (10)$$

Из рис. 6 видно, что при использовании мобильных узлов иных сетей в качестве ВМГУ сенсорной сети вероятность доступности головного узла существенно увеличивается, а следовательно и длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети.

Выводы. 1. В разработанной новой модели сенсорной сети использованы временные мобильные головные узлы, в качестве которых могут выступать терминалы LTE, узлы VANET, квадрокоптеры летающих сенсорных сетей.

2. Определены вероятности доступности головного узла кластера и временного мобильного головного узла. Доказано, что при использовании временных мобильных головных узлов существенно увеличивается доступность головного узла, а следовательно и длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта N15-07-09431a «Разработка принципов построения и методов самоорганизации для летающих сенсорных сетей».

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый А. Е. Интернет Вещей // Электросвязь. — 2013. — № 1.
2. Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пост-NGN. — СПб: БХВ, 2013.
3. Росляков А. В., Ваяшин С. В., Гребешков А. Ю., Самсонов М. Ю. Интернет Вещей. — Самара: ПГУТИ, 2014.
4. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Юрчук А. Б.. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. — М.: Эко-Трендз, 2010.
5. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. — СПб.: Любавич, 2011.
6. Кучерявый А. Е. Самоорганизующиеся сети и новые услуги // Электросвязь. — 2009. — № 1.
7. Футахи А., Кучерявый А. Е., Кучерявый Е. А. LTE и беспроводные сенсорные сети // Мобильные телекоммуникации. — Ноябрь 2012.
8. Кучерявый А. Е., Кучерявый Е. А. От e-России к u-России: тенденции развития электросвязи // Электросвязь. — 2005. — № 5.
9. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Кучерявый Е. А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. — М.: ФГУП ЦНИИС, 2008.
10. Koucheryavy Y., Jakubiak J. Research Challenges in Vehicular Ad hoc Networks / Proceedings, IEEE CCNC 2008, Las Vegas, USA. — 10–12 January, 2008.
11. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Аль-Наггар Я. М. Сети связи с малыми задержками // Электросвязь. — 2013. — № 12.
12. Футахи А., Кучерявый А. Е., Кучерявый А. Е. LTE и беспроводные сенсорные сети // Мобильные телекоммуникации. — 2012. — № 9–10.
13. Пяттаев А. В. Разработка методов кооперации и оценка качества кооперативной передачи в сетях сотовой подвижной связи / Авт. диссертации на соискание ученой степени к.т.н. — СПбГУТ, 2013.
14. Hoymann C., Chen W., Montojo H. et al. Relaying Operation in 3GPP LTE: Challenges and Solutions // IEEE Communications Magazine. — February 2012. — Vol. 50, № 2.
15. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В. и др. Летающие сенсорные сети // Электросвязь. — 2014. — № 9.
16. Kaffle V. P., Fukushima Y., Harai H. Dynamic Mobile Sensor Network Platform for ID-based Communication / Proceedings. ITU-T Kaleidoscope-2014, St.Petersburg, SUT. — 3–5 June 2014.
17. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks / Proceedings 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Wailea Maui, Hawaii, USA. — Jan. 2000.
18. Koucheryavy A., Salim A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2009. Phoenix Park, Korea. — 2009.
19. Абакумов П. А. Алгоритм выбора головного узла кластера сенсорной сети в трехмерном пространстве // Электросвязь. — 2014. — № 4.
20. Abakumov P., Koucheryavy A. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2014. Phoenix Park, Korea. — 2014.
21. Younis O., Krunz M., Ramasubramanian S. Node clustering in wireless sensor networks: Recent developments and deployment challenges // IEEE Network. — 2006. — Vol. 20, № 3.
22. Koucheryavy A., Salim A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2010. Phoenix Park, Korea. — 2010.

Получено 14.01.15

ИНФОРМАЦИЯ

«ЭКСПРЕСС-АМ7» ВЫВЕДЕН НА ОРБИТУ

Новый спутник связи и вещания «Экспресс-АМ7» построен по заказу ФГУП «Космическая связь». Спутник предназначен для предоставления услуг телерадиовещания, широкополосного доступа и мультимедиа, передачи данных, телефонии, подвижной связи.

19 марта 2015 года с космодрома «Байконур» ракета-носитель «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М» вывела на геопереходную орбиту новый российский телекоммуникационный космический аппарат «Экспресс-АМ7». В 10 ч 18 мин состоялось его отделение от разгонного блока. Затем «Экспресс-АМ7» был принят

на управление специалистами производителя аппарата — компании Airbus D&S (Франция) для последующего перевода на геостационарную орбиту.

Новый спутник «Экспресс-АМ7» будет размещен на геостационарной орбите в позиции 40 град.в.д. Космический аппарат обеспечит современными услугами связи и вещания пользователей, проживающих на территории России, Европы, Африки и Южной Азии. «Экспресс-АМ7» изготовлен за счет внебюджетных средств по заказу ФГУП «Космическая связь» в рамках Федеральной космической программы России на 2006–2015 гг. Финансирование создания спутника осу-



ществлялось с использованием кредитной линии, открытой Внешэкономбанком.

Масса спутника составляет 5720 кг, масса полезной нагрузки — 1438,5 кг. Срок активного существования космического аппарата — 15 лет.