

УДК 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.101

ТЕОРИЯ ЭПИДЕМИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО ТРАФИКА В СЕТЯХ VANET

Е. А. Кучерявый^а, PhD, профессор

С. В. Ярцев^б, старший преподаватель

^аНациональный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ

Введение: механизм оповещения о нештатных ситуациях в сетях VANET предусматривает передачу информационных сообщений в широковещательном режиме от узла к узлу. В целях ограничения потока дублирующих сообщений, возникающего при таком способе передачи, необходимо применять специализированные алгоритмы, позволяющие организовать в общей массе узлов сети режим избирательности к ретрансляции. **Цель:** оценка возможности применения теории эпидемий как инструмента для построения аналитической модели процесса распространения широковещательных сообщений. **Результаты:** в процессе анализа переходных процессов состояний узлов, связанных с распространением информационных сообщений по сети, была произведена грация состояний узлов сети в соответствии с классификацией, предлагаемой теорией эпидемий. На базе суждений о физических основах и особенностях процесса ретрансляции сообщений в сетях VANET получены аналитические выражения, описывающие изменение относительной численности каждой из выделенных групп узлов. Дальнейшие исследования с применением среды имитационного моделирования NS-2 позволили получить статистические данные об относительной численности каждой из групп узлов во временном разрезе для модельного участка автомобильной сети. Сравнительный анализ полученных аналитических и модельных результатов с применением критерия согласия Пирсона показал, что полученные аналитические выражения применимы для описания переходных процессов состояния узлов для случая в сетях VANET. Как следствие, это доказывает, что теория эпидемий может быть использована в качестве инструмента для сравнительного анализа разрабатываемых алгоритмов ретрансляции информационных сообщений.

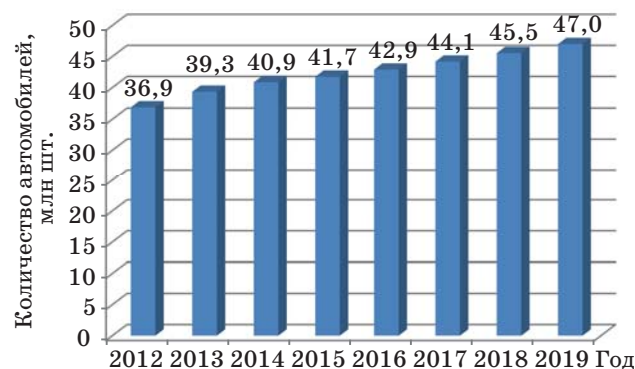
Ключевые слова — автомобильные ad hoc сети (VANETs), широковещательный трафик, теория эпидемий, интеллектуальные транспортные системы, WAVE.

Введение

Рост городов, вызванный урбанизацией населения, ведет не только к увеличению площадей и высотности застроек, но и к сопутствующему расширению дорожной сети. В совокупности с повышением ценовой доступности автомобилей данная тенденция непременно приводит к обострению проблем, связанных с увеличением интенсивности транспортных потоков. Так, в последнее десятилетие не только за рубежом, но и в России наблюдается бурный рост автомобильного парка (рис. 1) [1, 2]. Это в свою очередь приводит к снижению уровня безопасности дорожного движения и, как следствие, к росту дорожно-транспортных происшествий, все чаще заканчивающихся массовыми столкновениями по причине невозможности своевременного информирования водителей об опасности.

Исследование и разработка инфокоммуникационной структуры, которая позволила бы обеспечить участников дорожного движения не только информацией, связанной с безопасностью, но и дополнительными видами информационных услуг, осуществляются в рамках концепции интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [3, 4]. Решение задачи комплексного предоставления

информационных услуг достигается конвергенцией таких современных технологий беспроводной связи, как WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment) [5, 6], DSRC (Dedicated Short-Range Communication) [7, 8], LTE (Long Term Evolution), а также Bluetooth и ZigBee. Одним из важнейших компонентов ИТС является автомобильная самоорганизующаяся сеть VANET (Vehicular Ad Hoc Network) [9, 10], узлы которой размещаются на транспортных средствах. Первостепенной целью данных сетей является оповещение участников



■ Рис. 1. Прогноз формирования парка легковых автомобилей в России до 2019 г.

дорожного движения о возникновении нештатных ситуаций путем широковещательной рассылки специальных информационных сообщений [11, 12].

Задача передачи сообщений безопасности через сеть VANET с учетом требований к высокой вероятности успешной доставки сообщений всем близлежащим узлам связана с необходимостью учета огромного количества влияющих факторов. В их числе не только характеристики физического канала передачи, такие как замирание, затухание и т. д., но и проблемы, связанные с перегрузкой канала, вызванные несовершенством алгоритмов, управляющих эффективностью использования сетевых ресурсов.

Поскольку для доступа к среде передачи все узлы используют технологию CSMA/CA, организуя разделением ресурсов общей среды передачи, то плотность узлов в зоне трансляции сообщений безопасности является ключевым фактором, оказывающим влияние на загрузку канала и, как следствие, на вероятность успешной передачи сообщений. Данную особенность необходимо учитывать при исследовании характеристик алгоритмов ретрансляции сообщения.

Теория эпидемий

Одним из подходов к исследованию процесса передачи сообщений через ad hoc сеть является теория эпидемий [13, 14]. Изначально данная теория была нацелена на изучение характеристик распространения инфекционного заболевания в группе лиц, восприимчивых к заражению. Впоследствии, проводя аналогии с составом и реакцией ad hoc сетей на передаваемое сообщение, данную теорию стали применять для анализа их поведения. Согласно данной теории, вирус распространяется от инфицированного узла к восприимчивым при непосредственном контакте между узлами. После этого восприимчивые узлы становятся инфицированными и могут осуществлять дальнейшее распространение вируса. По прошествии определенного промежутка времени инфицированные узлы могут восстановиться, получив иммунитет к дальнейшему заражению (данное поведение свойственно для модели SIR (Susceptible-Infective-Recovered) [15]), либо стать вновь восприимчивыми к инфекции (что характерно для модели SIS (Susceptible-Infective-Susceptible) [16–19]).

В случае сетей VANET мы имеем дело с широковещательным способом распространения критичных к времени доставки и вероятности потери сообщений от приложений, связанных с безопасностью. Принимая во внимание тот факт, что каждому из узлов достаточно одного экземпляра принятого сообщения, для анализа больше подходит модель SIR теории эпидемий.

Для сопоставления с моделью SIR определим в составе сетей VANET три состояния узлов:

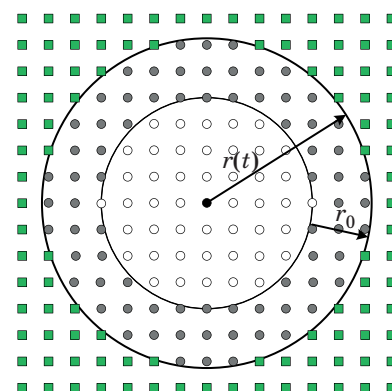
1) инфицированные — узлы, содержащие требование на отправку сообщения безопасности. В нашем случае это узлы, которые являются инициаторами отсылки критичного сообщения либо принявшие сообщение и потенциально готовые произвести его ретрансляцию при условии, что у принятого пакета время жизни (Time To Live) $TTL < TTL_{max}$;

2) восприимчивые — те, которые находятся в зоне уверенного приема радиосигнала и не имеют иммунитета к приему сообщения безопасности, т. е. узлы, не находящиеся в состоянии «восстановившийся»;

3) восстановившиеся — узлы, по тем или иным причинам получившие иммунитет к дальнейшей ретрансляции принимаемых сообщений.

Рассмотрим процесс распространения критичного сообщения через сеть VANET на примере единичной рассылки. В данном случае инициатор отсылки критичного сообщения является инфицированным узлом, который заражает все узлы, находящиеся в радиусе распространения радиосигнала. Поскольку узлы оборудуются все направленными антеннами, то зона заражения первичной трансляцией будет представлять собой окружность с радиусом r_0 . Величина r_0 будет зависеть от установленного уровня мощности передатчика. При допущении, что распространение сообщения происходит на плоскости с равномерно распределенными узлами, становится очевидно, что с каждой новой ретрансляцией зона заражения будет расширяться пропорционально радиусу r_0 (рис. 2). Все узлы, находящиеся внутри зоны с радиусом $(r(t) - r_0)$, считаются восстановившимися и получившими иммунитет к заражению от инфицированных соседей.

В ходе исследования динамики распространения широковещательных сообщений в сетях VANET необходимо учитывать, что радиус рас-



■ Рис. 2. Модель распространения критичного сообщения в сети VANET

пространения радиосигнала может достигать 200 м. Как следствие, при достаточно высокой плотности транспортных средств каждая ретрансляция сообщения приводит к скачкообразному нарастанию числа инфицированных узлов, потенциально готовых к ретрансляции. Данный факт свидетельствует о необходимости применения специализированных алгоритмов, позволяющих сократить объем ретранслирующих узлов из числа инфицированных.

Базовая аналитическая модель

Запишем уравнение баланса масс для переходного процесса состояний узлов. Для этого обозначим относительную долю восприимчивых, инфицированных и восстановившихся узлов как \tilde{S} , \tilde{I} и \tilde{R} соответственно. Причем, поскольку переходной процесс протекает внутри закрытой популяции, очевидно, что

$$\tilde{S} + \tilde{I} + \tilde{R} = 1. \quad (1)$$

Тогда базовая система дифференциальных уравнений, описывающая баланс масс для модели SIR, известная из теории эпидемий [20, 21], выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{S}}{dt} = -\beta\tilde{I}\tilde{S}; \\ \frac{d\tilde{I}}{dt} = \beta\tilde{I}\tilde{S} - \gamma\tilde{I}; \\ \frac{d\tilde{R}}{dt} = \gamma\tilde{I}, \end{cases} \quad (2)$$

где β — вероятностный коэффициент, характеризующий объем инфицирования восприимчивых узлов при контакте с инфицированным; γ — вероятностный коэффициент, характеризующий объем восстановления узлов после инфицирования.

Рассмотрим возможность применения данной системы уравнений к случаю передачи сообщений безопасности через сеть VANET. Для этого введем количественную оценку в существующую систему (2). Учитывая введенные ранее ограничения на число ретрансляций в три шага и тот факт, что скорость распространения сигнала многократно выше скорости перемещения автомобилей, можно считать, что за время распространения сообщения по сети относительное положение транспортных средств практически не меняется. Данное допущение позволяет считать общую численность транспортных средств, требующих информирования, неизменной и равной

$$N = S(t) + I(t) + R(t). \quad (3)$$

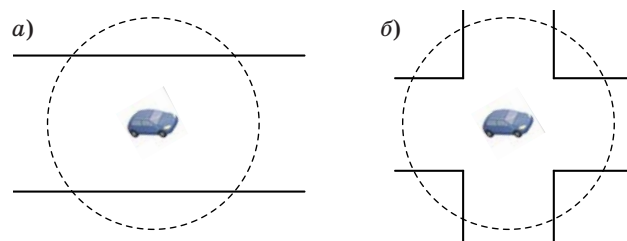
В результате трансляции сообщения инфицируется только часть из общей численности узлов N .

В разрезе времени t эта часть может быть определена как $S(t)/N$. Далее для оценки абсолютного значения численности восприимчивых узлов необходимо ввести несколько допущений. Так, будем считать, что узлы сети распределены равномерно с некоторой плотностью ρ . Тогда с учетом использования ненаправленных антенн число узлов, с которыми может контактировать инфицированный узел при передаче сообщения, может быть найдено как $\rho\pi r_0^2$. В реальных условиях расположение узлов сети ограничено пределами границ проезжей части. Данные ограничения можно представить в виде усеченной окружности (рис. 3, а, б), что должно быть отражено при анализе посредством ввода специального коэффициента формы α , зависящего от геометрической формы дорожного полотна.

Таким образом, базовую систему дифференциальных уравнений (2) для случая передачи критичных сообщений по сети VANET можно записать как

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta\gamma I(t) \frac{\alpha\rho\pi r_0^2}{N} S(t); \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta I(t) \frac{\alpha\rho\pi r_0^2}{N} S(t) - \gamma I(t); \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t). \end{cases} \quad (4)$$

Как было отмечено ранее, с целью ограничить непроизводительное занятие ресурсов канала дублирующими сообщениями, возникающее в случае широковещательной рассылки в многоступенчатом режиме, необходимо использовать специализированные ограничивающие алгоритмы. Также необходимо учитывать, что основной задачей рассылки сообщений безопасности в сетях VANET является обеспечение надежного информационного покрытия всех соседних узлов, находящихся на достаточной для принятия необходимых мер безопасности дистанции. Такого эффекта можно достигнуть только за счет минимизации числа ретранслирующих узлов при сохранении объемов инфицирования. Очевидно, что применение специализированных алгоритмов должно



■ **Рис. 3.** Примеры зон покрытия для различных форм проезжей части: а — прямолинейный участок дороги; б — перекресток

обеспечивать переход большей части узлов из состояния I в состояние R без ретрансляции сообщения. Именно для этих целей был разработан алгоритм распространения сигнала на основе значения соотношения сигнал/шум [22], результат работы которого предполагается описать при помощи теории эпидемий.

Основным отличием работы сети в случае применения упомянутого алгоритма является ограничение численности ретранслирующих узлов из общего числа инфицированных. Таким образом, $I(t)$ можно представить в виде суммы узлов, с высокой вероятностью выполняющих ретрансляцию, и узлов, с высокой вероятностью переходящих в восстановившееся состояние без ретрансляции: $I^a(t) + I^p(t)$. Соответственно, радиус r_0 можно разделить на два отрезка r_0^a и r_0^p , причем $r_0^a \ll r_0^p$ (рис. 4).

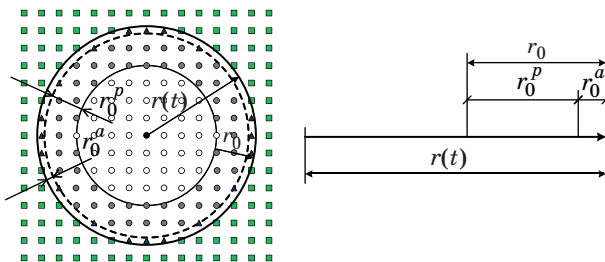
С учетом вышеизложенных уточнений систему дифференциальных уравнений (4) следует привести к виду

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta I(t) \frac{\alpha \rho \pi r_0^2}{N} S(t); \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta \left(I^a(t) (r_0^a)^2 + I^p(t) (r_0^p)^2 \right) \frac{\alpha \rho \pi}{N} S(t) - \gamma I(t); \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t). \end{cases} \quad (5)$$

Принимая во внимание, что каждая передача сообщения является независимым событием, в рамках которого на первичном этапе существует только один инфицированный узел, можно записать начальные значения численности каждого из типов узлов как

$$\begin{cases} S(t) = N - 1, \\ I(t) = 1, \\ R(t) = 0 \end{cases} \quad \text{при } t = 0. \quad (6)$$

Для оценки численности каждого из типов узлов при $t > 0$ следует обратиться к рис. 4. Из рисунка видно, что с учетом особенностей работы алгоритма движущей силой внешнего фронта



■ Рис. 4. Модель распространения критичного сообщения в сети VANET с использованием предложенного алгоритма

заражения является величина активных инфицированных узлов $I^a(t)$. Таким образом, в первую очередь следует определить зависимость между объемами восприимчивых узлов и активных инфицированных:

$$\begin{cases} S(t) = N - \alpha \rho \pi r(t)^2; \\ I^a(t) = \alpha \rho \pi r(t)^2 - \alpha \rho \pi (r(t) - r_0^a)^2 - \gamma I^a(t). \end{cases} \quad (7)$$

Из уравнений (6) с учетом того, что $r_0^a \ll r(t)$, получаем

$$I^a(t) = \frac{2\alpha \rho \pi r_0^a r(t)}{1 + \gamma}. \quad (8)$$

Выразив $r(t)$ через $S(t)$ и подставив в (7), получим

$$I^a(t) = \frac{2r_0^a \sqrt{\alpha \rho \pi}}{1 + \gamma} \sqrt{N - S(t)}. \quad (9)$$

Далее подставим выражение (9) в дифференциальное уравнение для $S(t)$ из системы уравнений (5). Для полученного уравнения можно найти решение общего вида

$$S(t) = N - N \left(\frac{2}{1 + e^{-At + C}} - 1 \right)^2, \quad (10)$$

где $A = \frac{2\beta \left(r_0^a \sqrt{\alpha \rho \pi} \right)^3}{\sqrt{N(1 + \gamma)}}.$

С учетом начальных значений (6) находим частное решение

$$S(t) = N - N \left(\frac{2}{1 + B e^{-At}} - 1 \right)^2, \quad (11)$$

где $B = \frac{\sqrt{N} - 1}{\sqrt{N} + 1}.$

Снова обратимся к системе дифференциальных уравнений (5). Из нее видно, что переход из состояния S в состояние R происходит последовательно через состояние I . Таким образом, прямая зависимость между этими двумя состояниями на первый взгляд не наблюдается. Однако если обратиться к рис. 4, становится очевидно, что численность восстановившихся узлов на момент времени t зависит от численности восприимчивых узлов на момент предыдущей ретрансляции. Данное наблюдение можно записать как $R(t) = (N - S(t - \tau))$, где τ — интервал времени, затрачиваемый на одну ретрансляцию. Отсюда мы можем записать систему уравнений, описывающую переходные процессы между состояниями I и R , как

$$\begin{cases} R(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0; \\ N - S(t - \tau) & \text{при } t > 0; \end{cases} \\ I(t) = S(t) - R(t). \end{cases} \quad (12)$$

Воспользовавшись полученным ранее выражением (11) для $S(t)$, мы можем определить $R(t)$ для $t > 0$ как

$$R(t) = N - S(t - \tau) = N \left(\frac{2}{1 + Be^{-A(t-\tau)}} - 1 \right)^2. \quad (13)$$

Далее, на основе (12) и (13), получаем уравнение для $I(t)$:

$$I(t) = N - N \left(\frac{2}{1 + Be^{-At}} - 1 \right)^2 - N \left(\frac{2}{1 + Be^{-A(t-\tau)}} - 1 \right)^2. \quad (14)$$

Таким образом, на основе суждений из теории эпидемий мы получили аналитические выражения, дающие возможность оценить скорость протекания процесса распространения информационных сообщений в пределах требуемой дистанции информирования.

Анализ результатов моделирования

Проверка аналитических суждений, изложенных в предыдущем разделе, выполнялась при помощи среды имитационного моделирования NS-2 (Network Simulator версия 2) релиз 2.35 [23]. Начиная с релиза 2.28, в данной среде появились модули, позволяющие моделировать сети стандарта IEEE 802.11p.

Для проведения моделирования разработанного сценария применялись следующие параметры:

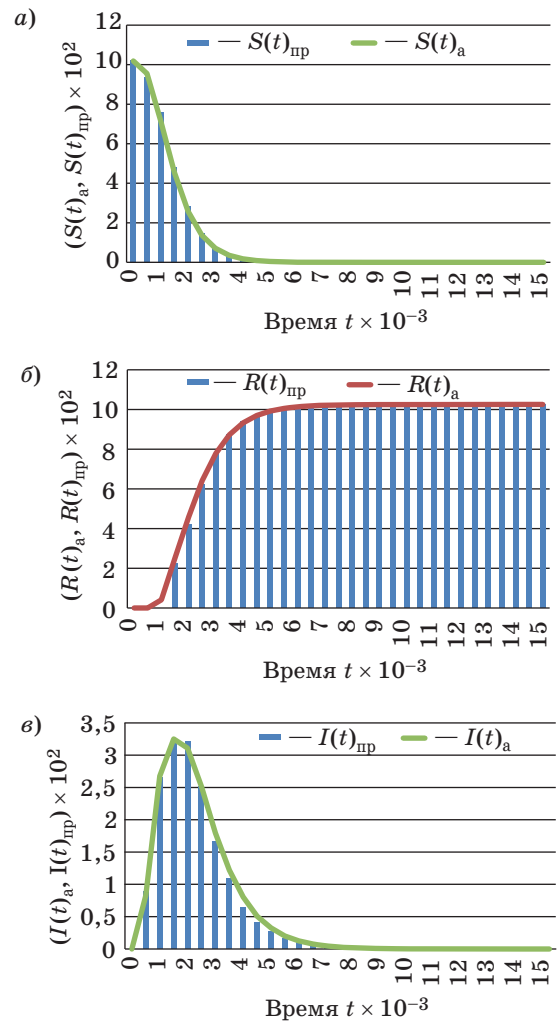
- полоса пропускания — 6 Мбит/с;
- модель радиоканала — Nakagami-m ($m = 7$);
- мощность передатчика — 7,24 дБм;
- тип антенны — ненаправленная;
- тип трафика — с постоянной битовой скоростью (CBR);
- размер пакета — 500 байт.

В качестве топологии для сценария моделирования был выбран прямолинейный участок дороги протяженностью 1600 м, с тремя полосами в каждом направлении. Дистанция между узлами одного направления была установлена 5 м.

Обработка результатов моделирования рассылки 10 000 сообщений производилась скриптами, написанными на языке программирования Perl. В разработанных скриптах модельное время разбивалось на интервалы по 0,5 мс, и на каждом интервале подсчитывалась численность узлов в каждом из трех состояний. Поскольку в рамках исследования оценка загрузки канала не производилась, то размер пакетов в расчетах не учитывался. При этом ключевым показателем, подлежащим оценке, было выбрано количество узлов, задействованных в процессе ретран-

сляции пакетов. Данный показатель является одним из наиболее важных, поскольку оказывает непосредственное влияние и на загрузку канала, и на задержки при распространении пакетов по сети.

На основе результатов обработки статистики были построены диаграммы переходных процессов для всех трех состояний узлов. Так, на рис. 5, а приведена столбчатая диаграмма, отображающая распределенную по времени среднюю численность восприимчивых узлов, полученную эмпирически на основе анализа результатов моделирования. Непрерывная огибающая является аналитическим результатом (11). На рис. 5, б и в приведены результаты моделирования для восстановившихся и инфицированных узлов совместно с полученными ранее аналитическими результатами (13) и (14). Поскольку в сценарии моделирования использовался прямолинейный участок дороги общей шириной 30 м, то при



■ **Рис. 5.** Диаграмма изменения средней численности восприимчивых (а), восстановившихся (б) и инфицированных (в) узлов

выбранных параметрах моделирования площадь дорожного полотна составляет приблизительно 0,053 от общей площади покрытия радиосигналом. Именно это значение и было выбрано для получения аналитических результатов.

Проверка на согласие полученных аналитических результатов с результатами моделирования по критерию Пирсона для уровня значимости 0,05 подтвердила гипотезу о принадлежности эмпирических результатов аналитическим. Аналогичный подход к анализу процесса распространения широкополосных сообщений на основе теории эпидемий может быть применен также в случае использования других алгоритмов ретрансляции сообщений. Впоследствии полученные аналитические выражения могут

быть использованы как удобный инструмент оценки эффективности разрабатываемых алгоритмов.

Заключение

В данной статье рассмотрен подход к исследованию процесса распространения широкополосного трафика в сетях VANET на основе применения теории эпидемий. Основанное на моделировании исследование показало справедливость примененных аналитических суждений. На базе полученных формул могут быть произведены дальнейшие исследования в целях оценки таких важнейших характеристик, как задержка доставки критических сообщений и загрузка канала [24].

Литература

1. Аналитическое агентство «Автостат». <https://www.autostat.ru/articles/21090/> (дата обращения: 25.05.2016).
2. Wallace R. Technology Trends and Drivers in the Global Automotive Industry // German Machinery Business Conf., Berlin, Germany, Oct. 6, 2015. P. 53–59.
3. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 302 665. Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. — European Telecommunications Standards Institute, 2010. — 44 p.
4. ETSI Guide ETSI EG 202 798. Intelligent Transport Systems (ITS); Testing; Framework for Conformance and Interoperability Testing. — European Telecommunications Standards Institute, 2011. — 48 p.
5. IEEE Std 1609.0-2013. IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Architecture. — 78 p. doi:10.1109/IEEESTD.2014.6755433
6. Miao M., Zheng Q., Zheng K., Zeng Z. Implementation and Demonstration of WAVE Networking Services for Intelligent Transportation Systems // Internet of Vehicles — Technologies and Services: First Intern. Conf., IOV 2014, Beijing, China, Sept. 1–3, 2014. P. 130–139.
7. DSRC Implementation Guide. A Guide to Users of SAE J2735 Message Sets over DSRC. SAE International, 2010. — 210 p.
8. Wilkie D. Review of the Status of the Dedicated Short-Range Communications Technology and Applications: [Draft] Report to Congress, April 28, 2015. <http://www.trb.org/Main/Blurbs/172448.aspx>. (дата обращения: 25.05.2016).
9. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. — СПб.: Любавич, 2011. — 312 с.
10. Jakubiak J., Koucheryavy Y. State of the Art and Research Challenges for VANETs // Proc. of IEEE CCNC 2008, Las Vegas, USA, Jan. 10–12, 2008. P. 912–916.
11. Dressler F., Hartenstein H., Altintas O., Tonguz O. K. Inter-Vehicle Communication — Quo Vadis // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. N 6. P. 170–177.
12. Samara G., Alhmiedat T. Intelligent Emergency Message Broadcasting in VANET Using PSO // WCSIT. 2014. Vol. 4. N 7. P. 90–100.
13. Mishra B. K., Keshri N. Mathematical Model on the Transmission of Worms in Wireless Sensor Network // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. N 6. P. 4103–4111.
14. Newman M. E. J., Ferrario C. R. Interacting Epidemics and Coinfection on Contact Networks // PLOS One. 2013. Vol. 8. e71321. doi:10.1371/journal.pone.0071321
15. De P., Liu Y., Das S. K. Modeling Node Compromise Spread in Wireless Sensor Networks Using Epidemic Theory in World of Wireless // Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2006: Intern. Symp., Buffalo-Niagara Falls, NY, 2006. P. 243–250.
16. Khelil A., Becker C., Tian J., Rothermel K. An Epidemic Model for Information Diffusion in MANETs // 5th ACM Intern. Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM, USA, Atlanta, Georgia, Sept. 28, 2002. P. 54–60.
17. Mark B. L. Analysis of Virus Spread in Wireless Sensor Networks: An Epidemic Model // Design of Reliable Communication Networks, DRCN 2009: 7th Intern. Workshop on, Washington, DC, 2009. P. 86–91.
18. Newman M. E. J. The Spread of Epidemic Disease on Networks // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66. Iss. 1. doi:10.1103/PhysRevE.66.016128
19. Zhang X., Neglia G., Kurose J., Towsley D. Performance Modeling of Epidemic Routing // Computer Networks. 2007. Vol. 51. Iss. 10. P. 2867–2891.
20. Hethcote H. W. Mathematics of Infectious Diseases // SIAM Review. 2000. Vol. 42(4). P. 599–653.
21. Keeling M. J., Rohani P. Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals. — Princeton University Press, 2007. — 408 p.

22. Ярцев С. В. Механизмы управления широкополосным трафиком в сетях VANET // Электросвязь. 2015. № 3. С. 27–31.
23. Chen Q., et al. Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in NS-2 (802.11Ext) / Q. Chen, F. Schmidt-Eisenlohr, D. Jiang, M. Torrent-Moreno,

L. Delgrossi, H. Hartenstein // MSWiM. 2008. P. 159–168.

24. Groenevelt R., Nain P., Koole G. The Message Delay in Mobile Ad Hoc Networks // Performance Evaluation. 2005. Vol. 62. P. 210–228.

UDC 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.101

Epidemic Theory as a Tool for Analysis of Broadcasting Process in VANET

Koucheryavy Y. A.^a, PhD, Professor, ykoucheryavy@hse.ru

Yartsev S. V.^b, Senior Lecturer, s.yartsev@gmail.com

^aNational Research University «Higher School of Economics», 33, Kirpichnaya St., 101000, Moscow, Russian Federation

^bThe Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 22-1, Bolshhevikov Pr., 193232, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Emergency alert mechanism in VANET assumes that information messages are broadcast in ad hoc mode. In order to limit the flow of duplicate messages inevitable in this transmission method, specialized algorithms are provided which allow you to organize a selective retransmission mode among the total number of nodes. **Purpose:** We assess the possibility to apply epidemic theory as a tool of constructing an analytical model which would describe how the broadcast messages are spread. **Results:** We have analyzed the transient processes in the nodes associated with the spread of information messages through the network, and graduated the states of the nodes in accordance with the classification proposed by epidemic theory. Relying on some ideas about physical fundamentals and VANET message retransmission features, we obtained analytical expressions describing the change in the relative abundance for each of the selected groups of nodes. Further studies in NS-2 simulation environment allowed us to obtain statistics about the temporal proportion of each group of nodes for a model section of a road network. Comparative analysis of the analytical and modeling results using Pearson criterion showed that the obtained analytical expressions can be used to describe the transient processes in VANET nodes. Consequently, it proves that epidemic theory can be used as a tool for comparative analysis of algorithms developed for information message retransmission.

Keywords — Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs), Broadcasting, Epidemic Theory, Intelligent Transport Systems, WAVE.

References

1. *Analiticheskoe agentstvo "Autostat"* [Analytical Agency "Autostat"]. Available at: <https://www.autostat.ru/articles/21090/> (accessed 25 May 2016).
2. Wallace R. Technology Trends and Drivers in the Global Automotive Industry. *German Machinery Business Conf.*, Berlin, Germany, October 6, 2015, pp. 53–59.
3. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 302 665. Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. European Telecommunications Standards Institute, 2010. 44 p.
4. ETSI Guide ETSI EG 202 798. Intelligent Transport Systems (ITS); Testing; Framework for Conformance and Interoperability Testing. European Telecommunications Standards Institute, 2011. 48 p.
5. IEEE Std 1609.0-2013. IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Architecture. 78 p. doi:10.1109/IEEESTD.2014.6755433
6. Miao M., Zheng Q., Zheng K., Zeng Z. Implementation and Demonstration of WAVE Networking Services for Intelligent Transportation Systems. *Internet of Vehicles — Technologies and Services*, First Intern. Conf., IOV 2014, Beijing, China, Sept. 1–3, 2014, pp. 130–139.
7. *DSRC Implementation Guide. A guide to users of SAE J2735 Message Sets over DSRC*. SAE International, 2010. 210 p.
8. Wilkie D. Review of the Status of the Dedicated Short-Range Communications Technology and Applications. [Draft] *Report to Congress*, April 28, 2015. Available at: <http://www.trb.org/Main/Blurbs/172448.aspx>. (accessed 25 May 2016).
9. Koucheryavy A., Prokopiev A., Koucheryavy Y. *Samoorganizuiushchiesia seti* [Self-Organizing Networks]. Saint-Petersburg, Liubavich Publ., 2011. 312 p. (In Russian).
10. Jakubiak J., Koucheryavy Y. State of the Art and Research Challenges for VANETs. *Proc. of IEEE CCNC 2008*, Las Vegas, USA, January 10–12, 2008, pp. 912–916.
11. Dressler F., Hartenstein H., Altintas O., Tonguz O. K. Inter-Vehicle Communication — Quo Vadis. *IEEE Communications Magazine*, June 2014, vol. 52, no. 6, pp. 170–177.
12. Samara G., Alhmiedat T. Intelligent Emergency Message Broadcasting in VANET Using PSO. *WCST*, 2014, vol. 4, no. 7, pp. 90–100.
13. Mishra B. K., Keshri N. Mathematical Model on the Transmission of Worms in Wireless Sensor Network. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, vol. 37, no. 6, pp. 4103–4111.
14. Newman M. E. J., Ferrario C. R. Interacting Epidemics and Coinfection on Contact Networks. *PLOS One*, 2013, vol. 8, e71321. doi:10.1371/journal.pone.0071321
15. De P., Liu Y., Das S. K. Modeling Node Compromise Spread in Wireless Sensor Networks Using Epidemic Theory in World of Wireless. *Mobile and Multimedia Networks, WoW-MoM 2006*, Intern. Symp., Buffalo-Niagara Falls, NY, 2006, pp. 243–250.
16. Khelil A., Becker C., Tian J., Rothermel K. An Epidemic Model for Information Diffusion in MANETs. *5th ACM Intern. Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM*, USA, Atlanta, Georgia, September 28, 2002, pp. 54–60.
17. Mark B. L. Analysis of Virus Spread in Wireless Sensor Networks: An Epidemic Model. *Design of Reliable Communication Networks, DRCN 2009*, 7th Intern. Workshop on, Washington, DC, 2009, pp. 86–91.
18. Newman M. E. J. The Spread of Epidemic Disease on Networks. *Phys. Rev. E*, 2002, vol. 66, iss. 1. doi:10.1103/PhysRevE.66.016128
19. Zhang X., Neglia G., Kurose J., Towsley D. Performance Modeling of Epidemic Routing. *Computer Networks*, 2007, vol. 51, iss. 10, pp. 2867–2891.
20. Hethcote H. W. Mathematics of Infectious Diseases. *SIAM Review*, 2000, vol. 42(4), pp. 599–653.
21. Keeling M. J., Rohani P. *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*. Princeton University Press, 2007. 408 p.
22. Yartsev S. Managed Broadcasting Mechanisms in Vehicular Ad Hoc Networks VANET. *Elektrosviaz'*, 2015, no. 3, pp. 27–31 (In Russian).
23. Chen Q., Schmidt-Eisenlohr F., Jiang D., Torrent-Moreno M., Delgrossi L., Hartenstein H. Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in NS-2 (802.11Ext). *MSWiM*, 2008, pp. 159–168.
24. Groenevelt R., Nain P., Koole G. The Message Delay in Mobile Ad Hoc Networks. *Performance Evaluation*, 2005, vol. 62, pp. 210–228.