

УДК 004.7

## РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОКОЛА ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧ В АВТОМОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

**А. В. Винель,**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Обосновывается важность режима широковещательной рассылки периодических сообщений-маячков в автомобильных сетях передачи данных для обеспечения безопасности дорожного движения. Предлагается метод расчета вероятности успешного приема маячков в сети стандарта IEEE 802.11p. Расчет проводится в рамках допущений о произвольной интенсивности поступления маячков, а также отсутствия «скрытых» терминалов.

**Ключевые слова** — самоорганизующиеся автомобильные сети, активная дорожная безопасность, широко-вещательные передачи, сообщения-маячки, IEEE 802.11p.

### Введение

В настоящее время в Европейском Союзе, США и Японии активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на разработку и внедрение так называемых *интеллектуальных транспортных систем*, предназначенных для повышения безопасности и эффективности дорожного движения. Базовой технологией для передачи информации между автомобилями, устройствами дорожной инфраструктуры, центрами управления, пешеходами и т. д. является находящийся в разработке международный стандарт беспроводной связи IEEE 802.11p, который представляет собой версию стандарта IEEE 802.11, **специальным образом** адаптированную к работе в условиях самоорганизующихся автомобильных сетей [1–4].

Для эффективного функционирования приложений активной дорожной безопасности протокол беспроводной связи между автомобилями IEEE 802.11p должен поддерживать два основных режима работы. Первый режим состоит в периодической *широковещательной одношаговой рассылке* каждым транспортным средством (ТС) сообщений-маячков (далее просто маячков), содержащих информацию, в частности, о его координатах и скорости. Это необходимо для того, чтобы все участники движения постоянно имели актуальную информацию о происходящем в непосредственной близости с ними. Второй режим

состоит в *экстренной многошаговой рассылке* информации о критичном событии (например, срабатывании подушек безопасности при столкновении) тем ТС, которые находятся в опасной зоне (например, приближаются к месту аварии). При реализации второго режима первый используется как его составная часть, т. е. экстренная рассылка осуществляется серией *специальным образом организованных широковещательных передач*. Согласно требованиям приложений безопасности, маячки и экстренные сообщения должны быть доставлены автомобилям, находящимся на некотором расстоянии от передатчика, с вероятностями не ниже заданных и со средними задержками не выше заданных.

Таким образом, при разработке интеллектуальных транспортных систем крайне важно гарантировать требуемые вероятностно-временные характеристики при широковещательной одношаговой передаче [5]. Задача оценки этих характеристик для автомобильных сетей решалась, в основном, посредством имитационного моделирования [6], которое требует значительных вычислительных и временных ресурсов.

Аналитический метод для исследования широковещательных передач в IEEE 802.11 был предложен Ляховым и Пупыревым [7]. Исходя из допущения о пуассоновском входном потоке и используя аппарат цепей Маркова, они разработали метод для оценки среднего времени оповещения в широковещательном режиме IEEE 802.11. Од-

нако применительно к самоорганизующимся автомобильным сетям интерес представляют следующие показатели производительности: средняя задержка передачи маячка  $D$  и вероятность успешного приема маячка  $P$ . Для приложений безопасности используемый телекоммуникационный протокол должен обеспечивать соблюдение следующих условий:  $P > 0,99$  и  $D < 500$  мс [6].

Широковещание на базе IEEE 802.11 применительно к автомобильным сетям исследовалось Ма, Чен и Рефай сначала для условий насыщения [8, 9], а затем для произвольной интенсивности поступления маячков [10, 11]. В последнем случае абонент сети описывался ими в виде системы массового обслуживания M/G/1, а первый и второй моменты времени обслуживания маячка рассчитывались с помощью аппарата производящих функций. Модели для исследования широковещания в IEEE 802.11p, базирующиеся на цепях Маркова, были разработаны нами [12, 13]. Общий вывод, который можно сделать из работ [8–13], состоит в том, что для типовых конфигураций сетей 802.11p требования по средней задержке передачи маячка  $D$  удовлетворяются, а вероятность успешного приема  $P$  значительно ниже требуемого порога. Таким образом, анализ эффективности рассылки маячков в 802.11p до сих пор остается важным направлением исследований в области интеллектуальных транспортных систем. В данной работе приводится простой метод расчета вероятности успешного приема маячка в IEEE 802.11p при условии отсутствия «скрытых» терминалов и заданной интенсивности входного потока.

### Широковещание в IEEE 802.11p

IEEE 802.11p работает в частотном диапазоне 5,85 – 5,925 ГГц и, согласно решению Федеральной комиссии связи США, определяет наличие одного канала 10 МГц, который используется только для приложений безопасности. Правила доступа к этому каналу определяются протоколом управления доступом к среде стандарта IEEE 802.11p.

Расширенная распределенная функция координации (Enhanced Distributed Coordination Function – EDCF) IEEE 802.11 (ранее IEEE 802.11e) представляет собой протокол случайного множественного доступа с прослушиванием канала (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance — CSMA/CA), который использует вариант алгоритма двоичной экспоненциальной отсрочки (Binary Exponential Backoff — BEB) для разрешения конфликтов. В стандарте не предусмотрено никаких подтверждающих механизмов для широковещательных передач. Повторные передачи сообщений маячков не производятся.

Абонент начинает передачу маячка только при выполнении следующих условий:

1) канал определяется как свободный в течение временного интервала AIFS (Arbitrary Inter-Frame Space) с момента последней передачи, «видимой» абонентом. EIFS (Extended InterFrame Space) используется вместо AIFS в том случае, если произошла ошибка при попытке декодировать передаваемое сообщение;

2) истекло время отсрочки (BackoffTime).

Таким образом, в случае поступления маячка абонент либо немедленно передает его в канал, если он свободен, либо переходит в состояние отсрочки. Следуя терминологии из работы [7], будем называть немедленную передачу *асинхронной*, а передачу, выполняемую после алгоритма отсрочки, *синхронной*. При переходе в состояние отсрочки счетчик отсрочки устанавливается в начальное значение (время отсрочки), которое измеряется в слотах длительности  $\sigma$  (SlotTime), а число этих слотов случайным образом равномерно выбирается из интервала  $[0; W - 1]$ . Увеличение значения  $W$ , которое называется конкурентным окном, не производится (в отличие от случая одноадресной передачи). Могут устанавливаться различные значения параметров протокола AIFS и  $W$  для разного типа трафика в целях обеспечения дифференциации качества обслуживания согласно приоритетам.

### Модель системы

Пусть имеется  $n$  абонентов в сети, каждый из которых «слышит» передачи всех остальных. Маячки поступают в буферы канального уровня абонентов с одинаковым периодом. Потоки маячков в различные буферы считаются статистически независимыми. Каждый буфер абонента может содержать не более одного маячка. Будем называть абонента, у которого есть маячок для передачи, *активным* в некоторый момент времени, в противном случае будем называть его *неактивным*. Обозначим  $p$  вероятность генерации маячка абонентом за время  $\sigma$ .

Допущение о том, что буфер подуровня управления доступом к среде вмещает не более одного маячка, вводится в силу самой природы маячков, которые включают в себя информацию о местоположении ТС (полученную, например, с бортовой системы глобального позиционирования), его скорости и т. д. Логично предполагать, что в том случае, если новый маячок поступает в буфер, а старый еще не был передан, то новый заменяет старый для обновления информации. Исходя из скоростей движения и времени реакции водителей целесообразно рассматривать интенсивность поступления маячков в диапазоне от 2 до

20 маячков с [6]. Таким образом, для  $\sigma = 16$  мкс интерес представляет интервал  $3,2 \times 10^{-5} < p < 3,2 \times 10^{-4}$ .

Будем считать, что маячки, передаваемые по каналу связи между абонентами, могут подвергаться ошибкам. Вероятность искажения маячка обозначим  $e = 1 - (1 - \text{BER})^L$ , где  $L$  — длина маячка в битах (исключая заголовок), а BER (Bit Error Rate) — обеспечиваемый при передаче коэффициент ошибок на бит. Заголовок всегда успешно принимается, а ошибки в битах независимы.

Рассмотрим временную ось, разбитую на слоты различной длительности в зависимости от ситуации в канале: 0 — пустой канал, 1 — успешная передача маячка и  $c$  — конфликт (либо искажение шумом). Введем следующую двумерную цепь Маркова для моделирования поведения системы:

$$\{i(t), j(t)\}, \quad (1)$$

где  $i(t)$  — число активных абонентов в сети в слоте  $t$ , а  $j(t)$  — ситуация в слоте  $t$ : 0, 1,  $c > 0$ , где  $c$  — кратность конфликта,  $-1$  — искажение маячка шумом.

Цепь Маркова (1) имеет  $1 + \sum_{k=1}^n (k+2)$  состоя-

ний. Можно рассчитать следующие длительности временных интервалов между моментами перехода из состояния в состояние:

$T_s = T_h + L / R + \text{AIFS} + \delta$  — длительность успешной передачи, где  $T_h$  — длительность передачи заголовка физического уровня и преамбулы;  $R$  — скорость передачи;  $\delta$  — задержка распространения сигнала;

$T_c = T_h + L / R + \text{EIFS} + \delta$  — длительность конфликтного слота;

$\sigma$  — длительность пустого слота.

Выпишем переходные вероятности цепи Маркова (1). Для этого введем несколько обозначений. Вероятность того, что  $k$  новых маячков поступают в систему за  $m$  слотов длительности  $\sigma$ , при условии наличия  $l$  активных абонентов, определяется следующим образом:

$$\Psi_m(k, l) = \binom{n-l}{k} z_m^k (1-z_m)^{n-l-k},$$

где  $z_m$  — вероятность того, что по крайней мере один маячок генерируется абонентом за  $m$   $\sigma$ -слотов:  $z_m = 1 - (1-p)^m$ .

В рамках нашей модели  $m$  может принимать три различных значения: 1 (SlotTime);  $S = T_s / \sigma$  (число  $\sigma$ -слотов, уходящих на успешную передачу);  $C = T_c / \sigma$  (число  $\sigma$ -слотов, затрачиваемых на конфликт).

Дополнительно введем следующее допущение [14]: вероятность передачи активным абонентом в случайно выбранном слоте ( $\pi$ ) одинакова для всех абонентов и не изменяется с течением време-

ни. Несложно показать [7, 15], что для широкополосного режима

$$\pi = \frac{2}{W+1},$$

поэтому вероятность того, что  $k$  из  $l$  активных абонентов передают в слоте синхронно, определяется следующим образом:

$$\xi(k, l) = \binom{l}{k} \pi^k (1-\pi)^{l-k} = \binom{l}{k} \left( \frac{2}{W+1} \right)^k \left( \frac{W-1}{W+1} \right)^{l-k}.$$

Теперь можно выписать ненулевые вероятности  $x\{i_2, j_2 | i_1, j_1\}$  перехода из состояния  $(i_1, j_1)$  в состояние  $(i_2, j_2)$  цепи (1).

В «пустом состоянии» (когда нет активных абонентов в сети) возможны следующие события и их вероятности:

а) за время пустого слота не поступает новых маячков:  $x\{0, 0 | 0, 0\} = \psi_1(0, 0)$ ;

б) маячок поступает за время пустого слота и немедленно (асинхронно) успешно передается в следующем слоте:  $x\{1, 1 | 0, 0\} = \psi_1(0, 0)(1-e)$ ;

в) маячок поступает за время пустого слота и искажается шумом в ходе асинхронной передачи:  $x\{1, -1 | 0, 0\} = \psi_1(0, 0)e$ ;

г) происходит конфликт кратности  $k$  в результате асинхронных передач:  $x\{k, k | 0, 0\} = \psi_1(k, 0)$ .

Из состояний с  $k$  активными абонентами и пустым каналом возможны следующие переходы:

а) конфликт в результате одновременных синхронных или асинхронных передач (либо и тех и тех):  $x\{k+l_1, l_1+l_2 | k, 0\} = \psi_1(l_1, k)\xi(l_2, k)$ ;

б) успешная асинхронная передача:  $x\{k+1, 1 | k, 0\} = \psi_1(1, k)\xi(0, k)(1-e)$ ;

в) неуспешная асинхронная передача из-за шума в канале:  $x\{k+1, -1 | k, 0\} = \psi_1(1, k)\xi(0, k)e$ ;

г) успешная синхронная передача:  $x\{k, 1 | k, 0\} = \psi_1(0, k)\xi(1, k)(1-e)$ ;

д) неуспешная синхронная передача:  $x\{k, -1 | k, 0\} = \psi_1(0, k)\xi(1, k)e$ ;

е) пустой слот (нет передачи):  $x\{k, 0 | k, 0\} = \psi_1(0, k)\xi(0, k)$ .

Из состояний с  $k$  активными абонентами и занятым успешной передачей каналом возможны следующие переходы:

а) оканчивается успешная передача,  $l$  новых маячков поступают за время успешной передачи, ни один из  $l+k-1$  маячков не передается сразу после успешной передачи:  $x\{l+k-1, 0 | k, 1\} = \psi_S(l, k)\xi(0, l+k-1)$ ;

б) оканчивается успешная передача,  $l$  новых маячков поступают за время успешной передачи, только один маячок сразу успешно передается:  $x\{l+k-1, 1 | k, 1\} = \psi_S(l, k)\xi(1, l+k-1)(1-e)$ ;

в) аналогичен предыдущему переходу, но маячок искажается шумом:  $x\{l+k-1, -1 | k, 1\} = \psi_S(l, k)\xi(1, l+k-1)e$ ;

г) аналогичен предыдущему переходу, но происходит конфликт кратности  $l_0$ :  $x\{l+k-1, l_0 | k, 1\} = \psi_S(l, k)\xi(l_0, l+k-1)$ .

Аналогичные переходы возможны в том случае, если передаваемый по каналу маячок искажается шумом:

- а)  $x\{l+k-1, 0 | k, -1\} = \psi_C(l, k)\xi(0, l+k-1)$ ;
- б)  $x\{l+k-1, 1 | k, -1\} = \psi_C(l, k)\xi(1, l+k-1)(1-e)$ ;
- в)  $x\{l+k-1, -1 | k, -1\} = \psi_C(l, k)\xi(1, l+k-1)e$ ;
- г)  $x\{l+k-1, l_0 | k, -1\} = \psi_C(l, k)\xi(l_0, l+k-1)$ .

Наконец, из состояний с  $k$  активными станциями и занятым конфликтом кратности  $k_0$  каналом возможны следующие переходы:

а) оканчивается конфликт,  $l$  новых маячков поступают за время конфликта, ни один из  $k+l-k_0$  маячков не передается сразу после конфликтной передачи:  $x\{l+k-k_0, 0 | k, k_0\} = \psi_C(l, k)\xi(0, l+k-k_0)$ ;

б) аналогичен предыдущему, но сразу после конфликта успешно передается один маячок:  $x\{l+k-k_0, 1 | k, k_0\} = \psi_C(l, k)\xi(1, l+k-k_0)(1-e)$ ;

в) аналогичен предыдущему, но сразу после конфликта неуспешно передается один маячок:  $x\{l+k-k_0, -1 | k, k_0\} = \psi_C(l, k)\xi(1, l+k-k_0)e$ ;

г) аналогичен предыдущему, но сразу после конфликта происходит конфликт кратности  $l_0$ :  $x\{l+k-k_0, l_0 | k, k_0\} = \psi_C(l, k)\xi(l_0, l+k-k_0)$ .

Обратим внимание на то, что асинхронные передачи учитываются в данных переходах не как немедленные, а как передачи в следующем  $\sigma$ -слоте после поступления маячка. Это практически не оказывает влияния на точность результата в силу того, что  $\sigma$  — небольшая величина и временем ожидания до начала следующего слота можно пренебречь.

Если численно рассчитать стационарное распределение  $\Omega(i, j)$  рассмотренной цепи Маркова (1), то вероятность успешного приема маячка в сети может быть рассчитана следующим образом:

$$P = \frac{\sum_{k=1}^n \Omega(k, 1)}{1 - \sum_{k=0}^n \Omega(k, 0)} \quad (2)$$

### Численные результаты

Рассмотрим автомобильную сеть на базе IEEE 802.11p со следующими параметрами:  $\sigma = 16$  мкс, AIFS = 64 мкс,  $W = 15$ , EIFS = 248 мкс,  $L = 4000$  бит,  $T_h = 40$  мкс,  $BER = 10^{-6}$ , скорость передачи  $R = 3$  Мбит/с,  $\delta = 4$  мкс. Обозначим радиус передачи абонента  $r$ , а плотность абонентов на дороге  $\rho$ , тогда число абонентов в рассматриваемой полносвязной сети  $n = 2\rho r$ .

Численные результаты, полученные с помощью разработанной модели для вероятности успешного приема (2), представлены на рис. 1 и 2.

Заметим, что для интенсивности входного потока абонента 20 маячков/с, что является типичным значением для приложений дорожной безопасности, в тех случаях, когда плотность движения высока (например,  $\rho = 55$  ТС/км),  $P$  достаточно мало. Однако можно ожидать, что высокая плотность движения приводит к уменьшению его скорости, а значит целесообразно уменьшать величину входного потока маячков, так как обновление информации не будет требоваться так часто. Таким образом, адаптивное изменение интенсивности генерации маячков является важным направлением дальнейших исследований.

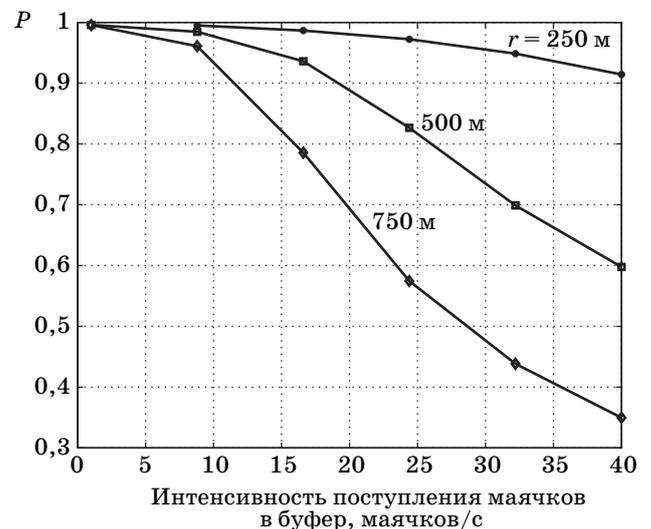


Рис. 1. Влияние радиуса передачи на вероятность успешного приема маячка при плотности движения  $\rho = 33$  ТС/км

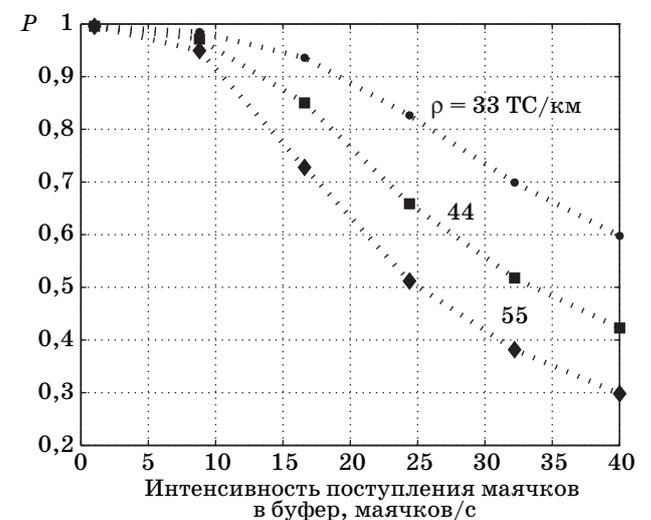


Рис. 2. Влияние плотности ТС на вероятность успешного приема маячка при радиусе передачи  $r = 500$  м

## Заключение

В работе предложен метод оценки вероятности успешного приема маячка в автомобильных сетях стандарта **IEEE 802.11p** для произвольной интенсивности входного потока. Направлением дальнейших исследований является учет в разработанной аналитической модели **наличия скрытых терми-**

налов, что является характерной особенностью самоорганизующихся автомобильных сетей. Кроме того, интерес представляет алгоритм адаптивного управления скоростью генерации маячков в зависимости от плотности дорожного движения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга.

## Литература

1. **IEEE 802.11**, 2007 IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements. Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2007.pdf> (дата обращения: 20.08.2009).
2. **Festag A., Hess S.** ETSI technical committee ITS: news from European standardization for intelligent transport systems (ITS) // IEEE Communications Magazine: Global communications newsletter. June 2009. Vol. 47. N 6. P. 1–4.
3. **Kosch T. et al.** Communication architecture for cooperative systems in Europe // IEEE Communications Magazine. May 2009. Vol. 47. N 5. P. 116–125.
4. **Uzcategui R., Acosta-Marum G.** Wave: a tutorial // IEEE Communications Magazine. May 2009. Vol. 47. N 5. P. 126–133.
5. **Schoch E., Kargl F., Weber M., Leinmuller T.** Communication patterns in VANETs // IEEE Communications Magazine. Nov. 2008. Vol. 46. N 11. P. 119–125.
6. **Torrent-Moreno M., Mittag J., Santi P., Hartenstein H.** Vehicle-to-Vehicle Communication: Fair Transmit Power Control for Safety-Critical Information // IEEE Transactions on Vehicular Technology. Sept. 2009. Vol. 58. N 7. P. 3684–3703.
7. **Ляхов А. И., Пупырев А. И.** Оценка производительности широкополосных технологий в сетях с протоколом IEEE 802.11 // Distributed Computer and Communication Networks (DCCN-2005): Proc. of Int. Workshop. Sofia, Bulgaria, April 23–29, 2005. P. 84–94.
8. **Ma X., Chen X.** Saturation Performance of IEEE 802.11 Broadcast Networks // IEEE Communication Letters. Aug. 2007. Vol. 11. N 8. P. 686–688.
9. **Chen X., Refai H. H., Ma X.** Saturation Performance of IEEE 802.11 Broadcast Scheme in Ad Hoc Wireless LANs // Proc. of the 66<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC). Baltimore, MD, USA, Oct. 2007.
10. **Ma X., Chen X., Refai H. H.** Unsaturated Performance of IEEE 802.11 Broadcast Service in Vehicle-to-Vehicle Networks // Proc. of the 66<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC). Baltimore, MD, USA, Oct. 2007.
11. **Ma X., Chen X., Refai H. H.** Delay and Broadcast Reception Rates of Highway Safety Applications in Vehicular Ad Hoc Networks // Proc. of 26<sup>th</sup> Annual IEEE Conf. on Computer Communications (IEEE INFOCOM): Mobile Networks for Vehicular Environments Workshop. Anchorage, Alaska, USA, May 2007.
12. **Vinel A., Staehle D., Turlikov A.** Study of beaconing for car-to-car communication in vehicular ad-hoc networks // Proc. of the IEEE International Conf. on Communications (IEEE ICC-2009): Vehicular Networks and Applications Workshop. Dresden, Germany, June 2009.
13. **Vinel A., Koucheryavy Y., Andreev S., Staehle D.** Estimation of a successful beacon reception probability in vehicular ad-hoc networks // Proc. of the 5<sup>th</sup> International Wireless Communications and Mobile Computing Conf. Vehicular Communication Technology (IWCMC-2009): Vehicular Communication Technology Workshop. Leipzig, Germany, June 2009.
14. **Bianchi G.** Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Mar. 2000. Vol. 18. N 3. P. 535–547.
15. **Баранов А. В., Ляхов А. И.** Оценка производительности беспроводных локальных сетей с протоколом IEEE 802.11 при произвольной нагрузке // Автоматика и телемеханика. 2005. № 7. С. 87–101.