

О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ, ОСНАЩЕННЫХ RFID-МЕТКАМИ

А.А. Ларионов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: larioandr@gmail.com

Ключевые слова: UHF RFID, идентификация автомобилей, марковские модели.

Аннотация: В докладе рассматривается использование механизма разделения меток по сессиям, определенного в стандарте EPC Class 1 Generation 2 UHF RFID, для увеличения вероятности идентификации движущихся объектов, оснащенных радиочастотными метками. Предложена марковская модель, позволяющая оценить вероятность идентификации в зависимости от закона движения метки, вероятности битовой ошибки (BER), а также частоты сброса считывателем питания и последовательности значений флагов сессий. Показано, что сброс питания и смена флага сессии существенно влияют на вероятность успешной идентификации движущейся метки. Результаты, полученные с помощью аналитической модели, подтверждаются данными, полученными на имитационной модели.

1. Введение

Технология UHF RFID стандарта EPC Class 1 Generation 2 часто используется для идентификации движущихся объектов, например автомобилей на платных дорогах или товаров на конвейерных лентах. Эффективность системы идентификации в таких приложениях зависит как от особенностей окружения, так и от параметров движения объектов, на которых размещены метки. Так как при движении каждый объект находится в области чтения лишь малый отрезок времени, считыватель должен успешно прочитать метку за небольшое число попыток. При этом вероятность прочитать метку в каждой попытке относительно невелика из-за низкого соотношения сигнал-шум и, соответственно, высокого значения BER (Bit Error Rate) [1]. Если в области чтения одновременно находится несколько меток, также возможно возникновение коллизий.

RFID-метки стандарта EPC Class 1 Generation 2 являются пассивными устройствами, получающими энергию от поля, создаваемого считывателем, и передают свои ответы, модулируя отраженный синусоидальный сигнал, сгенерированный считывателем. При анализе производительности такой системы обычно предполагается, что ошибкам подвержены только ответы меток, а команды принимаются успешно.

Исторически, технология UHF RFID находила первоочередное применение для получения данных о большом количестве меток, например на складе. Для работы в таком окружении стандарт EPC Class 1 Generation 2 определяет специальный антиколлизийный протокол, основанный на слотированной ALOHA. Чтение меток производится в *раундах инвентаризации*, в начале которых считыватель передает команду Query, содержащую число *слотов*. Каждая метка выбирает случайный номер слота, в котором передает случайное число, которое считыватель пересылает метке обратно в подтверждении (Ack). При совпадении отправленного и полученного случайного числа метка пересылает свой идентификатор EPCID. Помимо этого идентификатора, метка хранит данные в других банках памяти (User, TID). Для получения этих данных считыватель запрашивает новое случайное число и, получив его, передает команду чтения (Read), в ответ на которую метка пересылает данные. Подробнее про технологию RFID можно прочитать, например, в книге К. Финкенцеллера [2].

Помимо антиколлизийного протокола стандарт определяет механизм *сессий*, позволяющий считывателю разделять все множество окружающих меток на подмножества и опрашивать их поочередно. Каждая метка хранит четыре флага сессий, а считыватель при начале опроса сообщает метке номер сессии и ожидаемое значение флага. Метка участвует в опросе только в том случае, если значение флага в ее памяти совпадает с переданным считывателем значением. Флаги сессий инвертируются после передачи меткой ее идентификатора EPCID и перехода к опросу следующей метки, а также сбрасываются в значение *A* при длительной потере питания (в стандарте возможные значения флагов определяются как *A* и *B*).

Если считыватель все время опрашивает метки со значением флага *A*, то ошибившаяся в передаче EPCID метка более не участвует в опросе до потери питания, так как ее флаг будет инвертирован в значение *B* после ошибки. Из этого следует, что смена опрашиваемого флага считывателем, а также сбросы питания нужны для увеличения количества попыток передачи данных меткой. Поскольку возникновения коллизий и успешность передачи данных меткой недетерминированы, то и значение флага сессии метки в начале каждого опроса можно считать случайным. Для оценки числа попыток чтения метки и вероятности ее успешной идентификации в зависимости от закона движения, периодов сброса питания и последовательности значений флагов, передаваемых считывателем, в настоящем докладе предложена аналитическая модель, построенная на аппарате марковских цепей.

Применению марковских моделей для анализа производительности систем RFID посвящен ряд работ (см., например, [3, 4]), однако в них не учитываются значения флагов сессий и не изучается влияние их выбора на вероятность идентификации. Более подробный обзор литературы можно прочитать в работе [5].

2. Аналитическая модель

Будем считать, что законы движения меток известны и полностью детерминированы. Тогда число меток в области чтения можно определить как функцию $f_N(t)$. Для простоты примем допущение, что каждая метка находится в области чтения время T_Δ . Поведение считывателя в каждом раунде инвентаризации характеризуется значением опрашиваемого флага $X_r \in \{A, B\}$ и признаком сброса питания после раунда $e_r = \{0, 1\}$. Последовательность спецификаций раундов вида $x_r = X_r^{(e_r)}$ будем называть *сценарием* работы считывателя $\alpha_0 = \{x_r\}_{r=1}^{R_0}$. Задача состоит в том, чтобы

по заданному сценарию α_0 , функции числа меток $f_N(t)$, времени T_Δ , а также значению BER β определить вероятность идентификации метки P_R (то есть вероятность того, что метка была успешно прочитана хотя бы один раз).

Если известна длительность каждого раунда T_1, T_2, \dots , то известно и число меток, находящихся в области чтения в каждом раунде $N_1, N_2, \dots, N_r = f_N(\sum_{i=1}^{r-1} T_i)$. Пусть теперь $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_r \leq N_r$ – число *активных* меток, флаги сессий которых совпадают со значением флага, запрашиваемым считывателем. Так как инверсия флага осуществляется меткой только в случае передачи ей EPCID, то $\{\eta_r\}$ – случайный процесс, вероятности перехода $\mathbb{P}\{\eta_{r+1} = n \mid \eta_r = m\}$ которого зависят от текущего числа активных меток m (определяет вероятность коллизии), значения BER (β), а также от осуществляемых считывателем внешних воздействий (проведение раунда, сброс питания, инверсия флага) и от изменения общего числа меток в области чтения, см. рис. 1. Отметим, что смена опрашиваемого флага, сброс питания, а также появление новой метки ведут к детерминированным изменениям. Изменения под другим воздействием случайны: при инвентаризации заранее неизвестно, сколько меток смогут передать ответ, а при выходе метки из области чтения неизвестно, покидает ли систему активная метка.

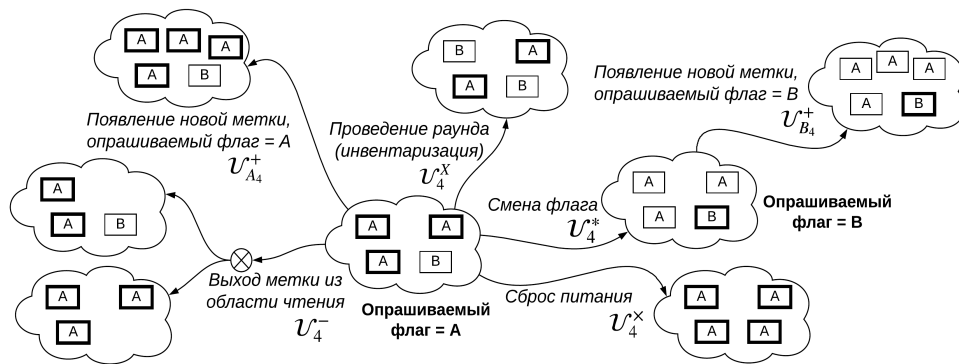


Рис. 1. Пример изменения состояния системы при внешних воздействиях

Аналитическая модель состоит из двух дискретных случайных процессов: *фоновый процесс*, используемого для получения оценки длительностей раундов, и *основной процесс*, используемого для расчета вероятности идентификации P_R . Каждый шаг этих процессов соответствует раунду инвентаризации и, если таковые имеются, прочим внешним воздействиям (считается, что изменение числа меток также происходит на границе между раундами).

Фоновый процесс описывает изменение числа активных меток η_r . После расчета его стационарного распределения производится повторная оценка длительностей раундов. Если полученная оценка отличается от исходной более, чем на ϵ , то фоновый процесс строится вновь, используя новую оценку. Расчет повторяется итерационно.

После получения оценки длительностей раундов строится основной процесс. Он описывается парой $\gamma_r = (\eta_r, \delta_{s,r})$, где $\delta_{s,r}$ – случайная величина, равная числу успешных чтений выделенной (*наблюдаемой*) метки, вошедшей в область чтения в раунде $s = \overline{1, R}$. Вероятность идентификации можно рассчитать как $P_R = \sum_{r=1}^R \frac{T_r}{\sum_{i=1}^R T_i} \mathbb{P}\{\delta_{r,q_r} > 0\}$, где q_r – число раундов, в которых метка успеет принять участие: $q_r = \sup\{s \mid \sum_{i=r}^s T_i \leq T_\Delta\}$.

Считыватель работает циклично и после выполнения последнего раунда, описанного сценарием α_0 , начинает выполнение первого раунда. Так как интервалы между изменениями числа меток могут быть существенно больше длительностей раундов, строится *расширенный сценарий* $\alpha = \alpha_0 \dots \alpha_0 = \{x_r\}_{r=1}^R$, являющийся k -раз повторенным сценарием α_0 , $R = kR_0$. Чтобы учесть всю необходимую информацию для расчета вероятностей переходов случайных процессов, по расширенному сценарию строится *размеченный сценарий* $\tilde{\alpha} = \{\tilde{x}_r\}_{r=1}^R$, спецификации раундов $\tilde{x}_r = X_{N_r}^{(e_r)}$ в котором несут информацию также о текущей оценке количества меток N_r . Будем считать, что после раунда \tilde{x}_R наступает раунд $\tilde{x}_{R+1} \equiv \tilde{x}_1$. Тогда переход от r -го раунда $\tilde{x}_r = X_{N_r}^{e_r}$ к $(r+1)$ -му раунду $\tilde{x}_{r+1} = Y_{N_{r+1}}^{e_{r+1}}$ определяется *переходным воздействием* \mathcal{D}_r . Каждое переходное воздействие можно описать как композицию *элементарных воздействий* (см. рис. 1): проведения раунда инвентаризации $\mathcal{U}_{N_r}^X$ (входит в каждое переходное воздействие \mathcal{D}_r), изменения числа меток $\mathcal{U}_{A_{N_r}}^+$, $\mathcal{U}_{B_{N_r}}^+$, $\mathcal{U}_{N_r}^-$ (если $N_{r+1} \neq N_r$), сброса питания $\mathcal{U}_{N_r}^X$ (если $e_r = 1$) и смены флага $\mathcal{U}_{N_r}^*$ (если $X \neq Y$).

Каждому элементарному воздействию для фонового и основного процесса можно поставить в соответствие матрицы переходных вероятностей. Тогда переходному воздействию будет соответствовать стохастическая матрица, полученная умножением матриц элементарных воздействий. Подробно построение матриц переходных вероятностей, алгоритм расчета стационарных вероятностей фонового процесса, а также расчет P_R приведен в работе [5].

Следует отметить, что фоновый и основной процессы, вообще говоря, не являются марковскими – вероятности переходов меняются от шага к шагу процесса. Их можно марковизовать, добавив одно измерение – номер шага. Однако в этом случае размер переходных матриц становится зависимым от длины расширенного сценария, что приводит к матрицам размерности порядка $O(N_m^2 R^2)$, число ненулевых элементов имеет в которых имеет порядок $O(N_m^2 R)$ (здесь $N_m = \max\{N_i\}$). Для практического применения проще использовать подход, предложенный в настоящем докладе. Кроме того, марковским является процесс $\eta_r, \eta_{r+R}, \eta_{r+2R}, \dots$ – число активных меток в моменты, разделенные R раундами. Он используется при расчете стационарных вероятностей фонового процесса.

3. Численные результаты

В численном эксперименте полагалось, что метки поступают через равные промежутки времени и движутся с постоянной скоростью v (около 20 км/ч). Такая конфигурация соответствует, например, проезду автомобилей через пункты бесконтактной оплаты. Рассматривались несколько сценариев работы считывателя, в которых он либо не менял флаги и не сбрасывал питание, либо периодически делал то или другое. Во всех сценариях рассматривалась идентификация метки только по EPCID, а также по EPCID и TID. Результаты показаны на рис. 2. Сравнение проводилось с имитационной моделью, симулирующей чтение меток при постоянном BER.

Приведенные результаты показывают, что аналитическая модель достаточно точно оценивает вероятность идентификации движущейся метки, а периодические смены флагов и сбросы питания позволяют существенно увеличить число попыток идентификации.

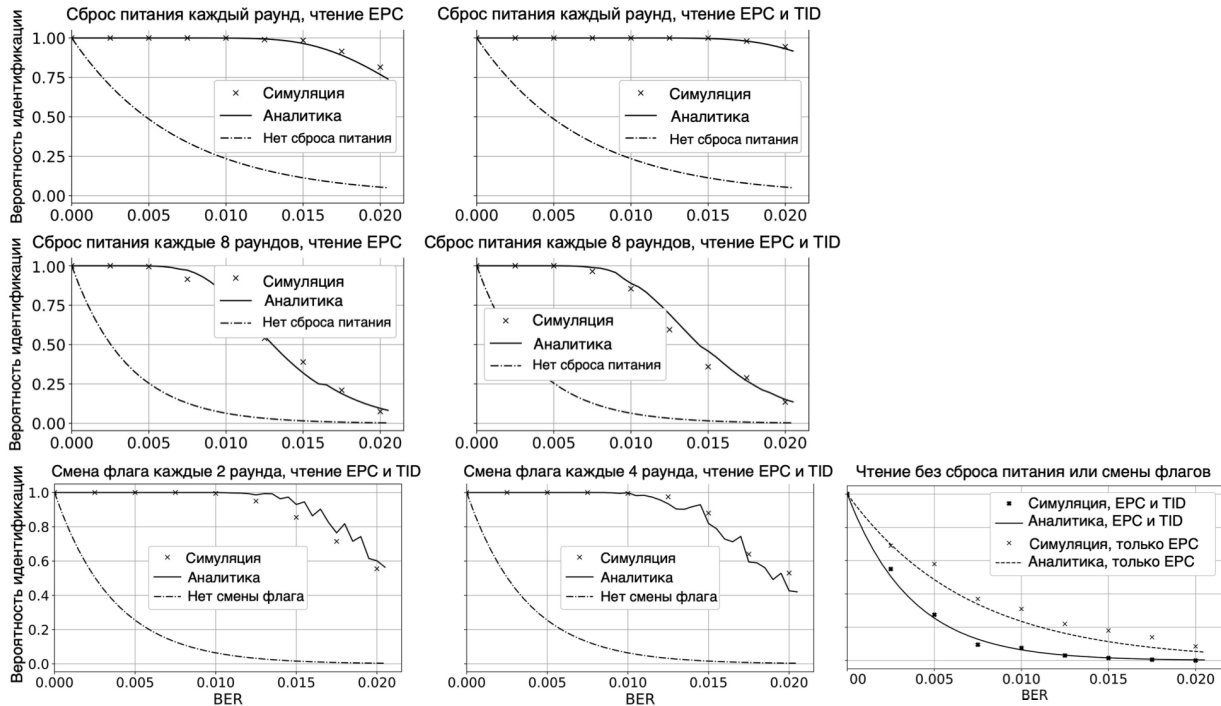


Рис. 2. Вероятность идентификации метки в различных сценариях

4. Заключение

В докладе была рассмотрена аналитическая модель, позволяющая оценить вероятность идентификации подвижной RFID-метки, учитывающая смены флагов сессий и сбросы питания. Точность предложенной модели подтверждается результатами численного эксперимента, показавшего, что периодические смены флагов и сброс питания позволяют существенно увеличить вероятность успешного чтения метки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант №18-57-00002.

Список литературы

1. Larionov A.A., Ivanov R.E., Vishnevsky V.M. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. 2017. Vol. 1, No. 1. P. 3-12.
2. Финкенцеллер К. RFID-технологии. М.: ДМК Пресс, 2016. 490 с.
3. Vahedi E., Ward R.K., Blake I.F. Analytical modeling of RFID Generation-2 protocol using absorbing Markov chain theorem // Proceedings of the 2012 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). Anaheim, CA, USA, 2012. IEEE, 2012. P. 385-390.
4. Vales-Alonso J., Bueno-Delgado M.V., Egea-Lopez E., Alcaraz-Espin J.J., Garcia-Haro J. Markovian Model for Computation of Tag Loss Ratio in Dynamic RFID Systems // Proceedings of the 2009 5th European Workshop on RFID Systems and Technologies (RFID SysTech). Bremen, Germany, 2009. VDE, 2009. P. 1-8.
5. Larionov A.A., Ivanov R.E., Vishnevsky V.M. A stochastic model for the analysis of session and power switching effects on the performance of UHF RFID system with mobile tags // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on RFID (RFID). Orlando, USA, 2018. IEEE, 2018. P. 1-8.