

Расчет параметров логического канала для вторичного абонента в группе из двух первичных каналов

П. В. Крашенинников, О. Г. Мелентьев, И. Е. Шевнина

В работе предложена методика расчета параметров результирующего дискретного канала для вторичных абонентов (SU) в системах когнитивного радио, образованного посредством алгоритма минимизации смен каналов, описываемых простой марковской цепью. Методика заключается в агрегировании графа, описывающего процесс работы алгоритма динамического занятия спектра SU. Получены математические выражения для определения переходных вероятностей графа, свернутого до двух состояний.

Ключевые слова: когнитивное радио, оппортунистический доступ, первичный абонент, вторичный абонент, логический канал, марковская цепь, агрегирование состояний.

1. Введение

Отрасль информационных технологий является одной из наиболее динамично развивающихся как в мире, так и в России, что приводит к быстрому увеличению потребностей в частотных ресурсах. В то же время использование уже задействованных частот не превышает 15 % [1, 2]. Одним из подходов к решению подобных проблем является использование когнитивного радио [3, 4]. Системы когнитивного радио обычно предполагают наличие группы каналов, временные слоты которых синхронизированы и имеют одинаковую длительность t . Слоты каналов предоставляются для передачи данных первичных (PU) и вторичных пользователей (SU). В начале каждого слота SU определяет доступность первичных каналов и при наличии свободных ресурсов может передавать информацию [5]. В данной работе предполагается, что время определения доступности слота мало и влияния на систему не имеет [6]. PU имеют высший приоритет и получают при необходимости все слоты одного канала. Статистический характер занятости слотов PU и, следовательно, доступности слотов для SU в каждом канале часто имеет группирующий характер и может быть описан марковской цепью с двумя состояниями [7–9].

Для обслуживания требований SU из имеющегося ресурса первичных каналов можно организовать логический канал, динамически выделяя свободные слоты исходных каналов.

В работах [7, 10, 11] предложены алгоритмы построения логического канала, использующие прогнозирование качества передачи в группе каналов, дана их классификация, получены количественные оценки эффективности их применения с помощью имитационного моделирования. Сложность оперативного принятия решения о целесообразности применения подобных алгоритмов в тех или иных условиях обусловлена отсутствием математических моделей, связывающих параметры выделенного логического канала с параметрами исходных каналов.

В работе [12] предлагается приближенная математическая модель алгоритма с минимизацией смен каналов для случая двух каналов. В данной работе мы предлагаем точную аналитическую модель, которая позволяет оперативно принимать решение о достаточности ресурсов и качестве логического канала для обслуживания требований SU для случая двух каналов.

2. Постановка задачи

Пусть имеются два исходных канала. Характер недоступности слотов в каждом канале задается марковской цепью с двумя состояниями и известной матрицей переходных вероятностей:

$$P^1 = \begin{vmatrix} P_{gg}^1 & P_{gb}^1 \\ P_{bg}^1 & P_{bb}^1 \end{vmatrix}, P^2 = \begin{vmatrix} P_{gg}^2 & P_{gb}^2 \\ P_{bg}^2 & P_{bb}^2 \end{vmatrix}.$$

В использованных обозначениях верхний индекс соответствует порядковому номеру канала. Буквенное обозначение g (G) соответствует состоянию доступности канала для SU (по аналогии с [7] назовем его хорошим состоянием); b (B) – состояние активности PU (плохое состояние). В таком случае P_{bg}^1 – вероятность того, что в первом канале после занятого слота следующий слот будет свободным.

Выбирая слоты исходных каналов, алгоритм строит логический канал для SU. Логика принятия решения алгоритма А1-МСК такова: если доступность последнего слота, выделенного логическому каналу, не отличается от доступности слота в другом первичном канале – не меняем текущий канал. Смена текущего канала происходит только при недоступности последнего слота, выделенного логическому каналу, если слот второго канала в это время был доступен.

Целью анализа является определение переходных вероятностей для логического канала, полученного посредством алгоритма А1-МСК, то есть:

$$P^{SU} = \begin{vmatrix} P_{gg}^{SU} & P_{gb}^{SU} \\ P_{bg}^{SU} & P_{bb}^{SU} \end{vmatrix}.$$

3. Описание работы алгоритма

Принцип работы алгоритма сводится к построению подробной цепи, включающей в себя все переходы из условных состояний. Под условным понимается состояние, которое учитывает состояние как текущего, так и второго канала. Например, обозначение $G1|G2$ означает, что в текущий момент SU использует первый канал, находящийся в хорошем состоянии (G1), при этом второй канал также находится в хорошем состоянии (G2). Состояние можно трактовать как G1 при условии G2. Всего таких состояний восемь. Далее цепь претерпевает первый этап свертки, после которого остается четыре состояния – это состояния доступности исходных каналов без учета состояний другого канала. Последним этапом цепь сворачивается до двух состояний, описывающих доступность (G) и недоступность (B) сформированного логического канала.

Первая цепь с условными переходами интересна тем, что переходные вероятности ее состояний можно получить аналитически, используя лишь характеристики исходных каналов.

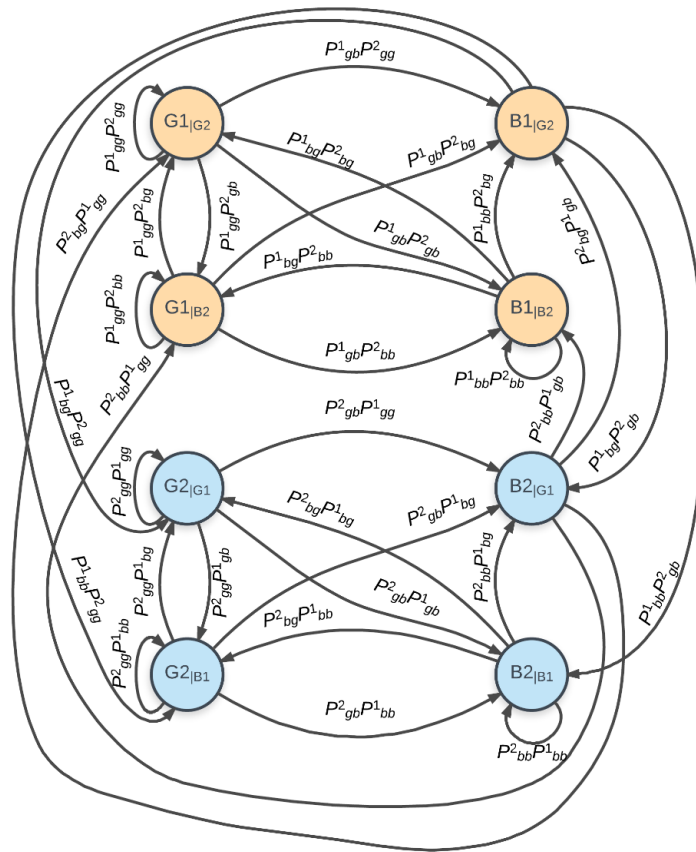


Рис. 1. Марковская цепь с условными состояниями, описывающая работу алгоритма с минимизацией смен каналов при наличии двух каналов

Сама цепь и соответствующие переходные вероятности показаны на рис. 1. В силу независимости исходных каналов переходные вероятности цепи на рис. 1 получаются через произведение переходных вероятностей, описывающих исходные каналы. Например, чтобы получить вероятность того, что, находясь в состоянии $G1|G2$, на следующем шаге система останется в прежнем состоянии, требуется перемножить вероятности сохранения хороших состояний исходных каналов, то есть $P_{gg}^1 P_{gg}^2$. В табл. 1 приведены формулы расчета переходных вероятностей для каждого из условных состояний.

Таблица 1. Переходные вероятности для рис. 1

		A	B	C	D	E	F	G	H
	Сост.	$G1 G2$	$G1 B2$	$B1 G2$	$B1 B2$	$G2 G1$	$G2 B1$	$B2 G1$	$B2 B1$
A	$G1 G2$	$P_{gg}^1 P_{gg}^2$	$P_{gg}^1 P_{gb}^2$	$P_{gb}^1 P_{gg}^2$	$P_{gb}^1 P_{gb}^2$	0	0	0	0
B	$G1 B2$	$P_{gg}^1 P_{bg}^2$	$P_{gg}^1 P_{bb}^2$	$P_{gb}^1 P_{bg}^2$	$P_{gb}^1 P_{bb}^2$	0	0	0	0
C	$B1 G2$	0	0	0	0	$P_{bg}^1 P_{gg}^2$	$P_{bb}^1 P_{gg}^2$	$P_{bg}^1 P_{gb}^2$	$P_{bb}^1 P_{gb}^2$
D	$B1 B2$	$P_{bg}^1 P_{bg}^2$	$P_{bg}^1 P_{bb}^2$	$P_{bb}^1 P_{bg}^2$	$P_{bb}^1 P_{bb}^2$	0	0	0	0
E	$G2 G1$	0	0	0	0	$P_{gg}^1 P_{gg}^2$	$P_{gb}^1 P_{gg}^2$	$P_{gg}^1 P_{gb}^2$	$P_{gb}^1 P_{gb}^2$
F	$G2 B1$	0	0	0	0	$P_{bg}^1 P_{gg}^2$	$P_{bb}^1 P_{gg}^2$	$P_{bg}^1 P_{gb}^2$	$P_{bb}^1 P_{gb}^2$
G	$B2 G1$	$P_{gg}^1 P_{bg}^2$	$P_{gg}^1 P_{bb}^2$	$P_{gb}^1 P_{bg}^2$	$P_{gb}^1 P_{bb}^2$	0	0	0	0
H	$B2 B1$	0	0	0	0	$P_{bg}^1 P_{bg}^2$	$P_{bb}^1 P_{bg}^2$	$P_{bg}^1 P_{bb}^2$	$P_{bb}^1 P_{bb}^2$

Ноль в табл. 1 означает отсутствие перехода между состояниями и, соответственно, нулевую вероятность подобного события. Первая строка и первый столбец в табл. 1 вводят буквенные обозначения для условных состояний, которые будут использованы в дальнейших выкладках.

Следующий этап включает в себя объединение условных состояний для каждого из каналов. Для этого требуется знание стационарных вероятностей состояний. Стационарные вероятности можно получить как предельные значения при возведении матрицы переходных вероятностей (табл. 1) в бесконечность, обозначим их как $P_i, i \in \{A, B, C, D, E, F, G, H\}$.

Уравнения системы формируются для каждого состояния с использованием матрицы переходных вероятностей: $P_i = \sum P_{ji}P_j$.

Зная переходные и стационарные вероятности, матрица переходных вероятностей агрегированной цепи (рис. 2) рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_{G1G1} &= \frac{P_A(P_{AA} + P_{AB}) + P_B(P_{BA} + P_{BB})}{P_A + P_B}; & P_{G1B1} &= \frac{P_A(P_{AC} + P_{AD}) + P_B(P_{BC} + P_{BD})}{P_A + P_B}; \\
 P_{B1G1} &= \frac{P_D(P_{DA} + P_{DB})}{P_C + P_D}; & P_{B1B1} &= \frac{P_D(P_{DC} + P_{DD})}{P_C + P_D}; \\
 P_{B1G2} &= \frac{P_C(P_{CE} + P_{CF})}{P_C + P_D}; & P_{B1B2} &= \frac{P_D(P_{CG} + P_{CH})}{P_C + P_D}; \\
 P_{G2G2} &= \frac{P_E(P_{EE} + P_{EF}) + P_F(P_{FE} + P_{FF})}{P_E + P_F}; & P_{G2B2} &= \frac{P_E(P_{EG} + P_{EH}) + P_F(P_{FG} + P_{FH})}{P_E + P_F}; \\
 P_{B2G1} &= \frac{P_G(P_{GA} + P_{GB})}{P_G + P_H}; & P_{B2B1} &= \frac{P_G(P_{GC} + P_{GD})}{P_G + P_H}; \\
 P_{B2G2} &= \frac{P_H(P_{HE} + P_{HF})}{P_G + P_H}; & P_{B2B2} &= \frac{P_H(P_{HG} + P_{HH})}{P_G + P_H}.
 \end{aligned}$$

Остальные вероятности равны нулю.

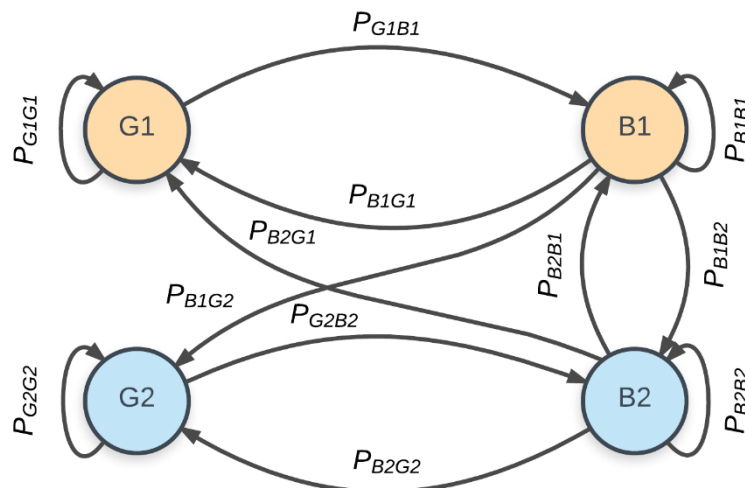


Рис. 2. Марковская цепь после первой агрегации

Стационарные вероятности вычисляются аналогично предыдущему случаю и обозначаются как $P_i, i \in \{G1, B1, G2, B2\}$.

Наконец, зная переходные и стационарные вероятности второй цепи, сворачиваем вместе хорошие и плохие состояния и получаем результирующую марковскую цепь с двумя состояниями (рис. 3).

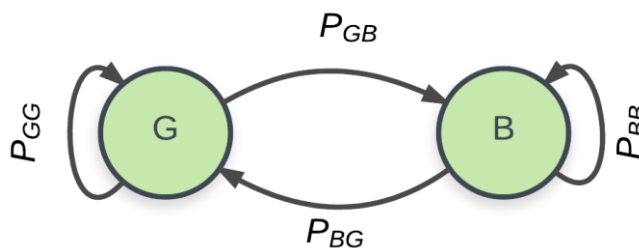


Рис. 3. Результирующая марковская цепь

Результаты свертки второй цепи:

$$P_{GG} = \frac{P_{G1}P_{G1G1} + P_{G2}P_{G2G2}}{P_{G1} + P_{G2}};$$

$$P_{GB} = \frac{P_{G1}P_{G1B1} + P_{G2}P_{G2B2}}{P_{G1} + P_{G2}};$$

$$P_{BG} = \frac{P_{B1}(P_{B1G1} + P_{B1G2}) + P_{B2}(P_{B2G1} + P_{B2G2})}{P_{B1} + P_{B2}};$$

$$P_{BB} = \frac{P_{B1}(P_{B1B1} + P_{B1B2}) + P_{B2}(P_{B2B1} + P_{B2B2})}{P_{B1} + P_{B2}}.$$

Результаты последних четырех выражений являются искомыми переходными вероятностями, характеризующими получившийся логический канал.

4. Имитационное моделирование

Для проверки корректности полученных выражений было проведено имитационное моделирование, использующее результаты оценок параметров занятости каналов PU для реальных систем связи, представленных в работах [12–14].

Таблица 2. Характеристики каналов, используемых в имитационном моделировании

№	Переходные вероятности исходных каналов			Коэффициент доступности			СКО симуляции и аналитического решения
	P _{gg}	P _{bb}	Ссылка на источник	Исходный канал	Аналитическое решение	Результат симуляции (при n=10000)	
1.	0.99	0.99999	[12]	0.000999	0.444939	0.454545	0.004803
	0.95	0.96	[12]	0.272727			
2.	0.2	0.7	[14]	0.444444	0.686922	0.693222	0.00315
	0.98	0.97	[14]	0.6			
3.	0.8	0.3	[13]	0.777778	0.839654	0.84036	0.000353
	0.88	0.46	[13]	0.818182			

В табл. 2 приведены коэффициенты доступности исходных каналов, коэффициенты доступности результирующих логических каналов, полученные путем имитационного моделирования и аналитически, а также среднеквадратические отклонения. Анализ представленных результатов, полученных аналитически и методом имитационного моделирования, показы-

вает высокую степень совпадения, что позволяет судить о состоятельности предложенной методики расчета. Как видно из табл. 2, доступность логического канала, построенного посредством алгоритма А1-МСК, выше доступности любого исходного канала, используемого при его построении. Данный результат подтверждает целесообразность применения алгоритма А1-МСК при выделении ресурсов для вторичного абонента.

5. Заключение

В работе предложен новый математический подход к определению переходных вероятностей логического канала SU, построенного посредством алгоритма А1-МСК, в системах когнитивного радио. Матрица переходных вероятностей результирующего логического канала SU позволяет получить количественные оценки многих вторичных параметров, например, скорости передачи [9], коэффициента доступности (или коэффициента потерь пакетов), среднего времени задержки [15] и т.д. Эти параметры дают возможность оперативно принимать решение о достаточности ресурсов и качестве логического канала для обслуживания требований SU.

Литература

1. Ghosh G., Das P., and Chatterjee S. Cognitive radio and dynamic spectrum access // A study International Journal of Next Generation Networks. 2014. V. 6, № 1. P. 43–60.
2. McHenry M. A. NSF spectrum occupancy measurements project summary // Shared Spectrum Company Report, Aug. 2005.
3. Huang S., Liu X., and Ding Z. Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks // 2008 IEEE INFOCOM, Phoenix, AZ, USA.
4. Senhua Huang, Xin Liu, and Zhi Ding. On optimal control for opportunistic spectrum access of cognitive radio networks // 2010 IEEE INFOCOM, San Diego, CA, USA.
5. Ferrari L., Qing Zhao, Scaglione A. Utility maximizing sequential sensing over a finite horizon // IEEE Transactions on Signal Processing. 2017. V. 65.
6. Bowen Li; Panlong Yang, Jinlong Wang, Qihui Wu, Shaojie Tang, Xiang-Yang Li, Yunhao Liu. Almost optimal dynamically-ordered channel sensing and accessing for cognitive networks // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2014. V. 13.
7. Zhao Q., Krishnamachari B., Liu K. On myopic sensing for multi-channel opportunistic access: structure, optimality, and performance // IEEE Wireless Communications. 2008. V. 7, № 12. P. 5431–5440.
8. Hueda M. R., Rodriguez C. E. On the relationship between the block error and channel-state Markov models in transmissions over slow-fading channels // IEEE Transactions on Communications. 2004.
9. Shibing Zhang, Huijian Wang, and Xiaoge Zhang. Estimation of channel state transition probabilities based on Markov chains in cognitive radio // Journal of Communications. 2014. V. 9, № 6.
10. Thakur P., Kumar A., Pandit S., Singh G., Satashia S. N. Performance analysis of cognitive radio networks using channel-prediction-probabilities and improved frame structure // Digital Communications and Networks. 2017.
11. Мелентьев О. Г., Шевнина И. Е. Сравнение алгоритмов выбора логического канала с учетом приоритетов // Электросвязь. 2010. № 2. С. 50–52.
12. Мелентьев О. Г., Клейко Д. В. Оценка параметров логических каналов для вторичных абонентов // Научный вестник НГТУ. 2012. № 4. С. 56–62.
13. László Csurgai-Horváth, János Bitó. Primary and secondary user activity models for cognitive wireless network // Telecommunications (ConTEL), 2011.
14. Barnes S. D., Maharaj B. T. Performance of a hidden Markov channel occupancy model for cognitive radio // IEEE AFRICON, 2011.

15. *Jinbei Zhangy, Yixuan Liy, Zhuotao Liuy, Fan Wuz, Feng Yangy, Xinbing Wang.* On multicast capacity and delay in cognitive radio mobile ad-hoc networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2015. V. 14.

*Статья поступила в редакцию 23.04.2018;
переработанный вариант – 26.06.2018.*

Крашенинников Павел Владимирович

кафедра передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ,
e-mail: krasheninnikov.pavel@gmail.com.

Мелентьев Олег Геннадьевич

д.т.н., профессор, профессор кафедры передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: melog.aes@gmail.com.

Шевнина Ирина Евгеньевна

к.т.н., доцент кафедры передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ, e-mail: pdsm@yandex.ru.

Parameters calculation of logical channel for a secondary user in a group of two primary channels

P. Krasheninnikov, O. Melentyev, I. Shevnina

This paper considers the scenario when the resulting logical channel for a secondary user in a cognitive radio system is formed by the algorithm minimizing the number of physical channel changes. The stochastic activity of primary users in a physical channel is characterized by a simple Markov chain. We present the analytical method for forming an accurate stochastic model (a simple Markov chain) of the resulting logical channel. The method is based on the aggregations of the graph states describing the channel change process in the algorithm. The result of the method describes the stochastic availability of the resources for a secondary user in the formed logical channel.

Keywords: signal-to-noise ratio estimation, SNR, moments of random variable distribution.