

Throughput Analysis of Multi-Hop ARQ Based on Three-State Markov Model over Memory Channels

Boyi He¹, Jian He²

¹School of Science, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²School of Mathematics and Statistics, Jishou University, Jishou Hunan

Email: 986647706@qq.com, 1498398619@qq.com

Received: Jul. 1st, 2018; accepted: Jul. 16th, 2018; published: Jul. 23rd, 2018

Abstract

Multi-hop relaying is an effective technique to combat the negative impacts of wireless communication caused by channel fading, so it is widely used in wireless networks. Firstly, we introduced Rayleigh fading channel and described the "memory" by using the two state Gilbert Elliott channel models, then obtained the state transition probability of the channel in stationary state. Secondly, we have established the three-state Markov chain model of the multi-hop ARQ (Automatic Repeat Request) system, and obtained the analytical solution for the throughput of multi-hop ARQ systems under the condition of the relay node without the packet loss. Finally, we considered the packet loss of relay nodes and set the critical relay for the packet loss to be $\left\lceil \frac{N}{2} \right\rceil$ -th, and obtained the analytical solution for the throughput of multi-hop ARQ systems under the packet loss of relay nodes through the three-state Markov chain model of the multi-hop ARQ system. In fact, it can be concluded that the relay node without the packet loss has better throughput than the packet loss.

Keywords

Multi-Hop Relaying, Rayleigh Fading Channels, ARQ, Markov Chain, Throughput

记忆信道中基于三状态Markov链模型的多跳ARQ协议吞吐量的分析

何博祎¹, 何 健²

¹西京学院理学院, 陕西 西安

²吉首大学数学与统计学院, 湖南 吉首

Email: 986647706@qq.com, 1498398619@qq.com

收稿日期: 2018年7月1日; 录用日期: 2018年7月16日; 发布日期: 2018年7月23日

摘要

多跳中继技术可以有效地减少由于信道衰落所造成的无线通信的负面问题,因而在无线网络中被广泛应用。首先,本文介绍了瑞丽衰落信道,并且采用两状态的Gilbert Elliott信道模型对其“记忆性”进行了描述,从而得到信道在平稳状态下的状态转移概率。其次,通过建立多跳ARQ (Automatic Repeat Request)系统的三状态Markov链模型,得到了多跳ARQ系统中继节点不丢包的状况下通信系统吞吐量的解析式。最后,我们考虑了中继节点丢包的状况并设定丢包的临界中继为第 $\left\lceil \frac{N}{2} \right\rceil$ 个,通过多跳ARQ系统的三状态Markov链模型,得到了多跳ARQ系统中继节点丢包的状况下通信系统吞吐量的解析式。事实上,通过比较可以得出中继不丢包较中继丢包具有更优的吞吐量性能。

关键词

多跳中继技术, 瑞丽衰落信道, ARQ, Markov链, 吞吐量

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无线通信系统的飞速发展对数据传输的可靠性提出了更高的要求,因而各种高效可靠传输技术成为了无线通信研究的热点,其中协同传输技术备受关注。作为一种有效的差错控制技术,协同自动重传请求(C-ARQ)协议以其可靠的数据传输而被广泛地应用和研究[1] [2]。

无线信道往往面临着信号衰落,我们一般会建立有限状态的Markov链的分析模型来刻画衰落信道,从而研究无线通信的数据传输情况和通信系统的性能。文献[3]提出了一种基于两状态的马尔科夫链的Gilbert Elliott信道模型,将信道定义为两种状态,即“好”(Good)状态和“坏”(Bad)状态,这种模型也成为后续研究的一种基本方法。文献[4]提出了带有单中继的ARQ系统的三状态Markov模型,分别以完全相关的瑞丽衰落信道和完全不相关的瑞丽衰落为背景讨论了ARQ系统的吞吐量性能,得出影响吞吐量的三个因素:信道是否相关、中继节点位置、链路的衰落余量。文献[5]提出了一种节点协同的停等式ARQ方案(NCSW),通过Gilbert Elliott信道理论将M个中继节点等效成一个超级中继节点,进而分析了系统的吞吐量和时延性能。文献[6] [7] [8] [9]将Gilbert Elliott信道模型和有限Markov链模型运用到了多跳ARQ系统,其中文献[8]中Maymouna Ben Said等人提出了带有译码和发送(DF)中继的多跳ARQ系统的三状态Markov模型,并根据中继是否丢包对两跳ARQ系统的吞吐量性能进行了分析,不足之处是对于大于两跳的多跳ARQ系统,并没有给出完整的吞吐量分析。

本文基于以上研究的成果,对大于两跳的多跳ARQ系统的中继节点是否丢包进行了分析,进一步研究了系统的吞吐量性能。首先,我们将[8]中多跳ARQ系统中继节点不丢包的状况下得到的吞吐量进行了修正;然后通过建立多跳ARQ系统的三状态Markov链模型,得到了多跳ARQ系统中继节点不

丢包的状况下通信系统吞吐量的解析式; 最后, 我们考虑了中继节点丢包的状况并设定了丢包的临界中继, 通过多跳 ARQ 系统的三状态 Markov 链模型求得吞吐量的解析式。本文的主要结果为判断中继节点是否应该丢包提供了可靠地理论保障。

2. 记忆信道模型

本文假设所有的信道均为瑞丽衰落信道, 对于衰落信道最常见的研究方法是建立有限状态的 Markov 链的分析模型。在实际的网络中, 特别对于衰落信道来说通信通常是有“记忆”的, 信道传输数据成功与失败之间往往存在短暂的相关性, 所以这里我们采用两状态的 Gilbert Elliott 信道模型来建模突发信道, 从而很好地描述这种“记忆”性和相关性。

如图 1, 为 Gilbert Elliott 信道模型, 我们设定物理信道有两个状态: G (Good)状态和 B (Bad)状态。如果数据包被成功接收, 信道处于 G 状态; 否则, 信道处于 B 状态。我们用 $X(k)$ 表示信道在 k 时隙的状态, 则有:

$$X(k) = \begin{cases} G & \text{if } \gamma(k) > \gamma_{thr} \\ B & \text{if } \gamma(k) \leq \gamma_{thr} \end{cases} \quad (1)$$

这里, $\gamma(k)$ 表示所给定信道在 k 时隙的信噪比(SNR), γ_{thr} 是信噪比的一个门限值。

若信道在当前时隙处于 G 状态, 在下一个时隙信道仍保持 G 状态的概率我们表示为 $1-q$, 则信道在下一个时隙由 G 状态转为 B 状态的概率为 q ; 同样的, 若信道在当前时隙处于 B 状态, 在下一个时隙信道保持 B 状态的概率我们用 $1-r$ 表示, 则信道由 B 状态转向 G 状态的概率为 r 。即有:

$$\begin{cases} P[X(k+1) = G | X(k) = G] = 1-q \\ P[X(k+1) = B | X(k) = G] = q \\ P[X(k+1) = B | X(k) = B] = 1-r \\ P[X(k+1) = G | X(k) = B] = r \end{cases}$$

于是, 两状态的 Markov 过程的概率转移矩阵如下:

$$\begin{pmatrix} 1-q & q \\ r & 1-r \end{pmatrix}$$

根据平稳状态方程, 求得信道平稳时信道处于 B 状态的概率:

$$P^{out} = \frac{q}{q+r} \quad (2)$$

根据文献[5], 在瑞丽衰落信道中有:

$$P^{out} = 1 - e^{-b} \quad (3)$$

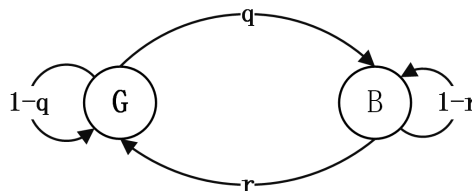


Figure 1. Gilbert Elliott channel
图 1. Gilbert Elliott 信道

这里 $b = \frac{1}{F}$, F 是信道的衰落余量, 由(2)和(3)可以得到 q 和 r 的关系:

$$q = \frac{1 - e^{-b}}{e^{-b}} r \quad (4)$$

其中概率 r 见文献[8]:

$$r = \frac{Q(\theta, \rho\theta) - Q(\rho\theta, \theta)}{e^b - 1}$$

$$\theta = \sqrt{\frac{2b}{1 - \rho^2}}$$

$$\rho = J_0(2\pi \cdot f_D T_f)$$

这里, $Q(\cdot, \cdot)$ 是马坎 Q 函数, $J_0(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数, f_D 是多普勒频率。由信道的衰落余量 F 和多普勒频率 f_D , 我们就可以计算出转移概率 r 和 q 的值, 从而很好地描述这种两状态的 Markov 链模型。而节点 X 和 Y 之间的信道的衰落余量我们用 $F_{X,Y}$ 表示:

$$F_{X,Y} = \frac{\bar{\gamma}_{X,Y}}{\gamma_{thr}} \quad (5)$$

$$\bar{\gamma}_{X,Y} = \frac{E_s}{N_0} \left(\frac{d_{X,Y}}{d_0} \right)^{-\lambda}$$

其中, $\bar{\gamma}_{X,Y}$ 是节点 X 和 Y 之间链路的信噪比的期望, 同样的 $d_{X,Y}$ 、 N_0 是节点 X 和 Y 之间链路的长度和噪声的方差, E_s 是指节点发送每个符号消耗的能量, d_0 (常数) 为距离的衡量尺度, λ 是路径损耗因子, 取值一般在 2~4 之间。

3. 多跳 ARQ 系统的三状态 Markov 链模型及系统吞吐量的分析

在这部分, 首先定义我们研究的多跳无线系统具有 N 个中继节点: R_1, R_2, \dots, R_N , 如图 2 示, 并假设每个中继节点只能侦听相邻的两个中继节点, 每个中继节点只能和相邻的节点进行数据包的传送。

下面我们将从以下两种情况计算系统的吞吐量:

- ① 中继节点将数据包发送之后, 仍保留有数据包的副本, 即中继节点不丢包的情况;
- ② 中继节点将数据包发送之后, 不再保留数据包, 即中继节点丢包的情况。

对于每一种情况, 我们都建立了三状态的 Markov 链模型, 通过建立的模型导出了系统的吞吐量。

3.1. 中继节点不丢包的三状态 C-ARQ 协议

协议的工作原理如下:

- ① 节点 S 同时向目的节点 D 和第一个中继节点 R_1 发送新的数据包。
- ② 如果中继正确接收了数据包, 它会告知源节点。

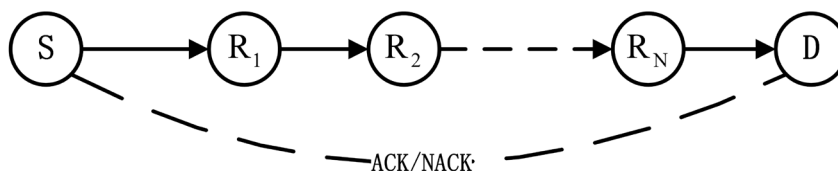


Figure 2. Multi-hop ARQ
图 2. 多跳 ARQ 系统

③ 如果目的节点 D 正确接收了数据包, 它会向源节点 S 和中继节点同时发送 ACK 应答, 然后, 源节点 S 又会进行一个新的数据包的传送。

④ 如果目的节点 D 和中继节点 R_1 都没有正确接收数据包, 源节点 S 将会重传这个数据包。

⑤ 如果目的节点 D 没有正确接收数据包, 但中继 R_1 正确接收了, 目的节点 D 将发送 NACK 应答给源节点 S, 中继 R_1 将承担发送任务, 他会向中继 R_2 发送此数据。

⑥ 如果 R_i 没有正确接收来自 R_{i-1} 的数据包, 中继 R_i 将会向 R_{i-1} 发送 NACK 应答, 同时 R_{i-1} 向 R_i 重新发送此数据包。

⑦ 如果中继 R_i 正确接收了数据包, 它将承担起传送任务, 然后将此数据包发送给中继 R_{i+1} 。

⑧ 重传过程往往会重复出现, 直到传送的数据包被目的节点 D 正确接收。

根据协议的运转, 并结合 Gilbert Elliott 的两状态信道模型, 定义出系统在 k 时隙的三个状态, 如下:

状态①: 一个新的数据包由源节点 S 发送, nT 。

状态②: 源节点 S 重传数据包, Rs 。

状态③: 中继节点 $R_i \{i \in 1, 2, \dots, N\}$ 重传数据包, Rr 。

由上述分析, 可以建立中继不丢包时多跳 ARQ 的三状态 Markov 链模型, 如图 3。

相应的概率转移矩阵为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 - P_{SD}^{out} & P_{SD}^{out} P_{SR_1}^{out} & P_{SD}^{out} (1 - P_{SR_1}^{out}) \\ 1 - P_{SD}^{out} & P_{SD}^{out} P_{SR_1}^{out} & P_{SD}^{out} (1 - P_{SR_1}^{out}) \\ \prod_{i=1}^N (1 - P_{R_i}^{out}) & 0 & \sum_{k=1}^N \prod_{i=1}^k (1 - P_{R_{i-1}}^{out}) P_{R_i}^{out} \end{bmatrix} \quad (6)$$

设系统处于平稳状态时的分布为: $\pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3)$, 根据平稳状态方程:

$$\begin{cases} \pi M_1 = \pi \\ \sum_{i=1}^3 \pi_i = 1 \end{cases}$$

解得系统的吞吐量:

$$T_1 = \pi_1 = \frac{(1 - P_{SD}^{out} P_{SR_1}^{out}) \prod_{i=1}^N (1 - P_{R_i}^{out})}{P_{SD}^{out} (1 - P_{SR_1}^{out}) + \sum_{i=1}^N \prod_{i=1}^k (1 - P_{R_{i-1}}^{out}) P_{R_i}^{out}} \quad (7)$$

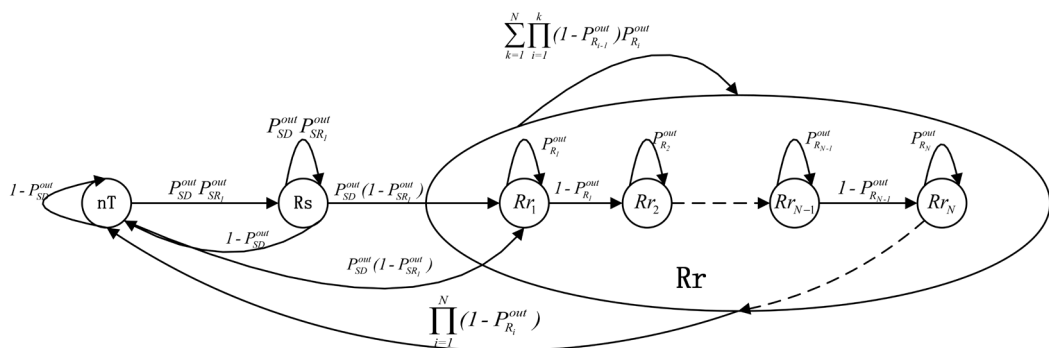


Figure 3. Three-state Markov model for C-ARQ with no packet drop at the relay

图 3. 中继节点不丢包时 C-ARQ 系统的三状态 Markov 链模型

3.2. 中继节点丢包的三状态 C-ARQ 协议

我们这里讨论的丢包, 不是全体中继都丢包, 而是把所有的中继按照它们的位置分为两部分, 而划分的临界中继是第 $\lfloor \frac{N}{2} \rfloor$ 个。也就是说前 $\lfloor \frac{N}{2} \rfloor$ 个中继是丢包的中继, 从第 $\lfloor \frac{N}{2} \rfloor + 1$ 个到第 N 个是不丢包的中继。

协议的工作原理如下:

- ① 节点 S 同时向目的节点 D 和第一个中继节点 R_1 发送新的数据包。
- ② 如果中继正确接收了数据包, 它会告知源节点。
- ③ 如果目的节点 D 正确接收了数据包, 它会向源节点 S 和中继节点同时发送 ACK 应答, 然后, 源节点 S 又会进行一个新的数据包的传送。
- ④ 如果目的节点 D 和中继节点 R_i 都没有正确接收数据包, 源节点 S 将会重传这个数据包。
- ⑤ 如果目的节点 D 没有正确接收数据包, 但中继 R_i 正确接收了, 目的节点 D 将发送 NACK 应答给源节点 S, 中继 R_i 将承担发送任务, 他会向中继 R_2 发送此数据。
- ⑥ 如果 R_i 没有正确接收来自 R_{i-1} 的数据包, 当 $i > \lfloor \frac{N}{2} \rfloor + 1$ 时, 中继 R_i 会向 R_{i-1} 发送 NACK 应答, 同时 R_{i-1} 向 R_i 重新发送此数据包; 否则, 源节点 S 将会重传这个数据包。
- ⑦ 如果中继 R_i 正确接收了数据包, 它将承担起传送任务, 然后将此数据包发送给中继 R_{i+1} 。
- ⑧ 重传过程往往会重复出现, 直到传送的数据包被目的节点 D 正确接收。

系统在 k 时隙的三个状态同 A。前 $\lfloor \frac{N}{2} \rfloor$ 个中继丢包时多跳 ARQ 的三状态 Markov 链模型如图 4。

同样, 得到其相应的概率转移矩阵:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 - P_{SD}^{out} & P_{SD}^{out} P_{SR_1}^{out} & P_{SD}^{out} (1 - P_{SR_1}^{out}) \\ 1 - P_{SD}^{out} & P_{SD}^{out} P_{SR_1}^{out} & P_{SD}^{out} (1 - P_{SR_1}^{out}) \\ \prod_{i=1}^N (1 - P_{R_i}^{out}) \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \prod_{i=1}^k (1 - P_{R_{i-1}}^{out}) P_{R_i}^{out} & \sum_{k=\lfloor \frac{N}{2} \rfloor + 1}^N \prod_{i=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} (1 - P_{R_i}^{out}) \prod_{l=\lfloor \frac{N}{2} \rfloor + 1}^k (1 - P_{R_l}^{out}) P_{R_l}^{out} & \end{bmatrix} \quad (8)$$

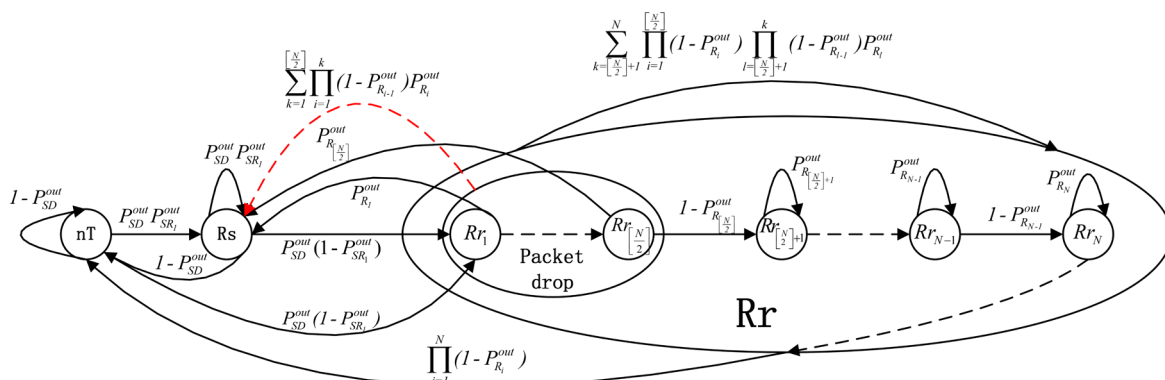


Figure 4. Three-state Markov model for ARQ system with packet drop at first $\lfloor \frac{N}{2} \rfloor$ relay

图 4. 前 $\lfloor \frac{N}{2} \rfloor$ 个中继丢包时 C-ARQ 系统的三状态马尔科夫模型

设系统处于平稳状态时的分布为: $\bar{\pi} = (\bar{\pi}_1, \bar{\pi}_2, \bar{\pi}_3)$, 根据平稳状态方程:

$$\begin{cases} \bar{\pi} M_2 = \bar{\pi} \\ \sum_{i=1}^3 \bar{\pi}_i = 1 \end{cases}$$

解得系统的吞吐量:

$$T_2 = \bar{\pi}_1 = \frac{(1 - P_{SD}^{out} P_{SR_1}^{out}) \prod_{i=1}^N (1 - P_{R_i}^{out}) + (1 - P_{SD}^{out}) \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \prod_{i=1}^k (1 - P_{R_{i-1}}^{out}) P_{R_i}^{out}}{\prod_{i=1}^N (1 - P_{R_i}^{out}) + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \prod_{i=1}^k (1 - P_{R_{i-1}}^{out}) P_{R_i}^{out} + P_{SD}^{out} (1 - P_{SR_1}^{out})} \quad (9)$$

参考文献

- [1] Zhao, B. and Valenti, M. (2005) Practical Relay Networks: A generalization of Hybrid-ARQ. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **23**, 7-18. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.837352>
- [2] Li, S.P., Zhou, Y.Q. and Zhou, Y. (2014) Delay and Energy Efficiency Analysis of Multicast Cooperative ARQ over Wireless Networks. *Acta Informatica*, **51**, 51-60. <https://doi.org/10.1007/s00236-013-0192-4>
- [3] Zorzi, M., Rao, R. and Milstein, L. (1997) ARQ Error Control for Fading Mobile Radio Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **46**, 445-455. <https://doi.org/10.1109/25.580783>
- [4] Marchenko, N. and Bettstetter, C. (2010) Incremental Cooperative Relaying in Time-Correlated Rayleigh Fading Channels. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2010.5683619>
- [5] Dianati, M., Ling, X., Naik, K. and Shen, X. (2006) A Node-Cooperative ARQ Scheme for Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **55**, 1032-1044. <https://doi.org/10.1109/TVT.2005.863426>
- [6] Pimentel, C., Falk, T.H. and Lisboa, L. (2004) Finite-State Markov Modeling of Correlated Rician-Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **53**, 1491-1501. <https://doi.org/10.1109/TVT.2004.832413>
- [7] Choi, J. (2016) On HARQ-IR for Downlink NOMA Systems. *IEEE Transactions on Communications*, **64**, 3576-3584. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2585651>
- [8] Ben Said, M. and Boujemaa, H. (2014) Three-State Markov Model for Multi-Hop ARQ with DF Relaying. *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 930-935. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2014.6906480>
- [9] Zorzi, M. and Rao, R.R. (2003) Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and Sensor Networks: Multihop Performance. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **2**, 337-348. <https://doi.org/10.1109/TMC.2003.1255648>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: csa@hanspub.org