

Nakagami- m 信道下认知中继网络的 中断概率上界闭式解模型

刘阳, 冯志勇, 尉志清, 张平

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 100876, 北京)

摘要: 为更准确地反映和评估无线信道衰落指数对认知中继网络中断性能的影响,提出了认知用户在 Nakagami- m 信道模型下的中断概率上界闭式解模型. 首先在 Nakagami- m 信道模型下,对认知中继网络频谱重叠共享和最佳中继选择准则的联合约束限制进行分析,再利用分部积分推导出认知用户接收机信噪比的概率密度函数和累积分布函数,进而对概率密度函数进行条件积分,根据蕴含法则即事件概率不等式得出其中断概率上界闭式解模型. 仿真结果表明:相比传统的瑞利信道模型, Nakagami- m 信道模型下的中断概率闭式解能够反映信道衰落指数大于 1 时的系统中断性能,从而更准确地反映了实际信道衰落情况对认知中继网络的影响;此外,由于该闭式解模型考虑了主用户干扰限制条件,限制了认知用户的实际发射功率,因而降低了系统的中断概率.

关键词: 认知中继网络;中断概率;Nakagami- m 衰落信道

中图分类号: TN914.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)10-0095-06

A Closed-Form of Upper Bound for Outage Probability in Cognitive Relay Networks Based on Nakagami- m Fading Channels

LIU Yang, FENG Zhiyong, WEI Zhiqing, ZHANG Ping

(Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Communication, Beijing 100876, China)

Abstract: A closed-form of the upper bound for the outage probability is derived in Nakagami- m channel model to effectively estimate the impact on outage probability of cognitive relay networks from the wireless channel fading exponent. Firstly, joint constraints of the spectrum underlay sharing and the best relay selection criteria are analyzed. Then, the probability density function and cumulative distribution function of the signal to noise ratio at the secondary receiver node are obtained using the subsection integral. The conditional integral of the probability density function is performed, and the closed-form of the upper bound for the outage probability is derived according to the implication rules. Simulation results and comparisons with the traditional Rayleigh channel model show that the outage probability performance with fading exponent greater than one can be effectively estimated by the Nakagami- m channel model. Furthermore, the outage probability is reduced because the power of cognitive users is limited under the constraint of the interference temperature of primary users.

Keywords: cognitive relay networks; outage probability; Nakagami- m fading channel

收稿日期: 2012-01-10. 作者简介: 刘阳(1982—),男,博士生;张平(通信作者),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(61121001);国家“973 计划”资助项目(2009CB320400);国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03003-001-01);科技部中芬合作资助项目(2010DFB10410).

网络出版时间: 2012-07-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120711.1535.001.html>

近年来,认知中继网络通过在认知无线网络^[1-4]中引入中继协作技术^[5]来提高网络性能^[6-10].其思想主要是是通过认知用户之间的中继协作来降低其发射功率,以避免对主用户造成干扰,并提高认知网络的系统性能.文献[6]针对译码转发协作和最佳中继选择策略的场景,研究了认知用户传输速率的中断概率性能;文献[7-8]研究了在重叠式频谱共享方式和瑞利衰落信道模型下,考虑主用户的干扰温度门限,推导了认知中继系统的中断概率上界,并且文献[8]进一步给出了系统中断性能和主用户干扰因素的量化关系,详细讨论了中继节点数目和主用户干扰温度因素分别对中断概率的影响;文献[9-10]在文献[7-8]的基础上,考虑了认知用户接收端信噪比的相关性,得到了认知用户中断概率的下界.

上述研究分析了认知中继网络基于重叠式频谱共享下的中断概率性能,但仅考虑了瑞利衰落信道模型,而瑞利信道模型严格来说是 Nakagami- m 信道模型在信道衰落指数 $m=1$ 时的特殊情况^[11],因此上述研究忽略了实际信道中 m 对系统中断性能的影响. Nakagami- m 信道模型能够更加真实地反映无线信道的衰落特性,因而已经在无线通信技术研究中被广泛采用.然而,在该信道模型下,认知中继网络的中断性能以及无线信道衰落指数特性对其的影响还没有被研究,因此本文基于 Nakagami- m 信道模型,推导了认知用户接收机信噪比的概率密度函数(probability density function, PDF)和累积分布函数(cumulative distribution function, CDF),并进一步结合最佳中继选择和译码转发中继协议,分析了在重叠式频谱共享干扰温度限制下认知中继网络中断概率上界的闭式解;最后详细讨论了 Nakagami- m 信道模型中不同衰落指数所代表的无线信道质量以及中继节点数目、主用户干扰温度等因素分别对系统中断概率性能的影响.

1 认知中继网络系统模型

本文考虑的认知中继网络包含一对主用户发信机 PT 和接收机 PR 以固定的功率 P_p 进行通信. 认知用户源节点 S 可以在其他 M 个认知用户发信机 $\Theta=\{1,2,\dots,M\}$ (其对应的认知接收机节点为 $\Phi=\{1,2,\dots,M\}$) 中选择中继节点协作传输信息给认知用户目的节点 D . 认知中继网络系统结构如图 1 所示. 上述认知节点均以重叠式频谱共享方式工作在主用户的授权频谱上,因而其发射功率必须低于主用户接收机的干扰温度门限.

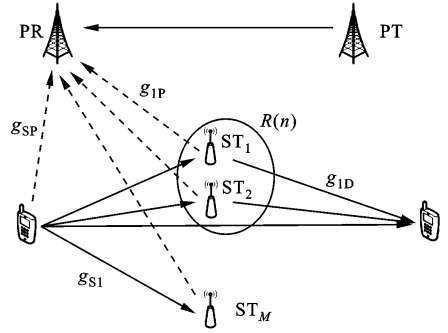


图 1 认知中继网络系统模型

系统中继采用时分复用两帧阶段译码转发方式,即源节点广播阶段和中继转发阶段:①在广播阶段,认知源节点 S 将需要发送的信息进行广播, M 个认知发信机和认知目的节点 D 对其进行监听,能够正确解调 S 广播信息的认知发信机节点,并构成中继协作域 $R(n)$, $0 \leq n \leq M$ ($n=0$ 时,无中继节点,只存在 S 到 D 的直传链路);②在中继转发阶段,从 $R(n)$ 中选择最佳中继将解调的信息重新编码后发送给认知目的节点 D , D 将 2 个阶段的信息进行最大化合并. 链路信道增益功率为 g_{ij} .

2 Nakagami- m 衰落信道模型下认知目的节点的信噪比分析

如图 1 中所示,认知中继网络模型中有两类信道:一类是传输有用信息的数据信道;另一类是主用户接收机收到来自认知用户干扰的干扰信道. 本文假设这两类信道均服从 Nakagami- m 信道模型. 基于该信道模型和重叠式频谱共享干扰温度限制,本节分析了认知目的节点信噪比 r 的 PDF 和 CDF.

首先假设认知用户源节点 $s_i \in \Theta$, 认知用户目的节点 $d_j \in \Phi$. 在重叠式频谱共享干扰温度限制下, s_i 的发射功率 P_i 可表示为^[8]

$$P_i = \begin{cases} P, & g_{iP} \leq Q/P \\ Q/g_{iP}, & g_{iP} > Q/P \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 为发射功率峰值; Q 为主用户干扰温度门限. 假设信道加性高斯白噪声功率 $\sigma^2=1$, d_j 的信噪比 r_{ij} 可表示为

$$r_{ij} = \frac{P_i g_{ij}}{\sigma^2} = \begin{cases} P g_{ij}, & g_{iP} \leq Q/P \\ Q g_{ij} / g_{iP}, & g_{iP} > Q/P \end{cases} \quad (2)$$

不失一般性,本文假设 Nakagami- m 信道平均增益为 1^[10], 考虑 Nakagami- m 信道下从节点 i 到节点 j 的信道功率增益 g_{ij} 服从 Gamma 分布,其概率密度函数和累计分布函数可以分别表示为

$$f_{g_{ij}}(x) = \frac{m_{ij}^m x^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-mx}, \quad x \geq 0 \quad (3)$$

$$F_{g_{ij}}(x) = \frac{\Gamma(m, mx)}{\Gamma(m)}, \quad x \geq 0 \quad (4)$$

式中: $\Gamma(a, x)$ 为不完全 Gamma 函数.

根据上面的分析, g_{ij} 和 g_{ip} 分别是具有参数 m_{ij} 和 m_{ip} 的随机变量. 经推导可得认知目的节点 d_j 的信噪比 r_{ij} 的 PDF 如下(推导过程见附录 A)

$$f_{r_{ij}}(x) = (1/P)[\Gamma(m_{ip}, m_{ip}(Q/P))/\Gamma(m_{ip})] \cdot \\ \left[(m_{ij}^{m_{ij}} x^{m_{ij}-1} e^{-m_{ij}x})/\Gamma(m_{ip}) \right] + \\ (m_{ij}^{m_{ij}} m_{ip}^{m_{ip}} x^{m_{ij}-1})/[Q^{m_{ij}} \Gamma(m_{ij}) \Gamma(m_{ip})] \cdot \\ [\Gamma(m_{ij} + m_{ip}, Q(m_{ij}x + m_{ip})/P)/ \\ (m_{ij}x + m_{ip})^{m_{ij}+m_{ip}}] \quad (5)$$

进一步可推导出信噪比 r_{ij} 的 CDF 如下(推导过程见附录 B)

$$F_{r_{ij}}(x) = (1/P)(\Gamma(m_{ip}, m_{ip}(Q/P))/ \\ \Gamma(m_{ip}))(\Gamma(m_{ij}, m_{ij}x)/\Gamma(m_{ij})) + \\ (m_{ij}^{m_{ij}} m_{ip}^{m_{ip}} \Gamma(m_{ij} + m_{ip}))/ (Q^{m_{ij}} \Gamma(m_{ij}) \Gamma(m_{ip})) \cdot \\ \sum_{n=0}^{m_{ij}-1} \left\{ \left((-m_{ip})^{m_{ij}-1-n} \binom{m_{ij}-1}{n} \right) / \right. \\ \left. m_{ij}^{m_{ij}} \right\} ((m_{ij}x + m_{ip})^{n+1-m_{ij}-m_{ip}} - \\ m_{ip}^{n+1-m_{ij}-m_{ip}}) / (n+1-m_{ij}-m_{ip}) \} - \\ (m_{ij}^{m_{ij}} m_{ip}^{m_{ip}} \Gamma(m_{ij} + m_{ip}))/ (Q^{m_{ij}} \Gamma(m_{ij}) \Gamma(m_{ip})) \cdot \\ \sum_{l=0}^{m_{ij}+m_{ip}-1} \sum_{n=0}^{m_{ij}-1} \left((Q/P)^l \left((-m_{ip})^{m_{ij}-1-n} \binom{m_{ij}-1}{n} \right) / \right. \\ \left. m_{ij}^{m_{ij}} l! \right) (\Gamma(\alpha, \beta_1) - \Gamma(\alpha, \beta_2)) \quad (6)$$

式中: $\alpha = n+1-m_{ij}-m_{ip}+1$; $\beta_1 = m_{ip}$; $\beta_2 = m_{ij}x + m_{ip}$.

3 中断概率上界闭式解

在中继转发阶段, 系统需要根据最佳中继选择准则, 从中继协作域 $R(n)$ 中选择中继节点进行协作. 本文参考了文献[8]关于选择到认知目的节点信道功率增益最大的节点作为最佳中继的准则.

首先, 节点 i 属于 $R(n)$ 的概率为

$$P_r\{i \in R(n)\} =$$

$$P_r\{r_{is} \geq 2^{2R_{th}} - 1\} = 1 - F_{r_{is}}(2^{2R_{th}} - 1) \quad (7)$$

式中: r_{is} 是认知源节点 S 广播到节点 i 的信噪比; R_{th} 是认知用户传输速率门限. 假设 S 和 i 的链路信噪比 r_{is} 为独立的随机变量, 进而可以得到 $R(n)$ 的概率为

$$P_r\{R(n)\} =$$

$$\prod_{i \in R(n)} (1 - F_{r_{is}}(2^{2R_{th}} - 1)) \prod_{i \notin R(n)} F_{r_{is}}(2^{2R_{th}} - 1) \quad (8)$$

最后, 本文采用的最佳中继选择准则为

$$c = \arg \max_{i \in R(n)} \{g_{id}\} \quad (9)$$

式中: c 为被选作最佳中继的认知发信机节点; g_{id} 为节点 i 到认知目的节点 D 的信道功率增益.

当 $R(n)$ 不为空集(即 $n \geq 1$)时, 系统存在中继链路, 最佳中继节点为认知发信机节点 c , $c \in \Theta\{1, 2, \dots, M|S\}$, 则从 S 到中继节点 c , 最后到达认知目的节点 D 的互信息量 I 为

$$I = (1/2) \text{lb}(1 + r_{sd} + r_{sc}D) \quad (10)$$

式中: r_{sd} 和 r_{cd} 分别为 S 到 D 的链路, 以及认知中继节点 c 到 D 的链路信噪比. 根据式(9), 可得 r_{cd} 的 CDF 为

$$F_{cd}(x) = \prod_{i \in R(n)} F_{id}(x) \quad (11)$$

在本文的系统中, 中断事件被定义为认知目的节点 D 所接收的互信息量 I 低于系统所要求的传输速率门限 R_{th} , 即中断概率为 $P_r\{I < R_{th}\}$. 进一步考虑中继协作域 $R(n)$ 为空集和不为空集的两种情况, 可得认知中继系统的中断概率为

$$P_{r,\text{out}} = P_r\{I < R_{th} | R(n) = \emptyset\} P_r\{R(n) = \emptyset\} + \\ \sum_{R(n) \neq \emptyset} P_r\{I < R_{th} | R(n)\} P_r\{R(n)\} = P_{r,\text{ol}} + P_{r,\text{oz}} \quad (12)$$

式中: $P_{r,\text{ol}}$ 表示 $R(n)$ 为空集时的中断概率; $P_{r,\text{oz}}$ 表示 $R(n)$ 不为空集时的中断概率. 其中

$$P_r\{I < R_{th} | R(n) = \emptyset\} = P_r\{r_{sd} < 2^{2R_{th}} - 1\} = \\ F_{sd}(2^{2R_{th}} - 1) \quad (13)$$

$$P_r\{I < R_{th} | R(n)\} = P_r\{r_{sd} + r_{cd} < 2^{2R_{th}} - 1\} \leq \\ P_r\{r_{sd} < 2^{2R_{th}} - 1\} P_r\{r_{cd} < 2^{2R_{th}} - 1\} =$$

$$F_{sd}(2^{2R_{th}} - 1) F_{cd}(2^{2R_{th}} - 1) \quad (14)$$

将式(13)、(14)代入式(8)和式(11), 可以得到中断概率 $P_{r,\text{out}}$ 的上界闭式解为

$$P_{r,\text{out}} = F_{sd}(2^{2R_{th}} - 1) \prod_{i=1}^M F_{si}(2^{2R_{th}} - 1) + \\ \sum_{R(n) \neq \emptyset} \left\{ \left(\prod_{i \in R(n)} (1 - F_{si}(2^{2R_{th}} - 1)) \prod_{i \notin R(n)} F_{si}(2^{2R_{th}} - 1) \right) \cdot \right. \\ \left. \left(F_{sd}(2^{2R_{th}} - 1) \prod_{i \in R(n)} F_{id}(2^{2R_{th}} - 1) \right) \right\} \quad (15)$$

4 仿真与讨论

根据上述分析, 可以推断在 Nakagami- m 信道模型下, 主要影响重叠式频谱共享认知中继系统中

断概率的因素包括:①主用户的干扰温度门限 Q ,以及认知用户的发射功率 P ;②干扰信道和数据信道的信道质量,即 Nakagami- m 信道模型中的衰落指数 m ;③可做中继的认知节点数 M . 为了验证本文得出的中断概率上界闭式解的正确性,本文基于 MATLAB 工具对上述系统进行了蒙特卡洛仿真,并分析了上述因素对系统中断概率性能的影响,此外将本文中断概率上界模型与文献[6]和[8]中已有相关研究进行了对比.

本文仿真参数主要为:信道均为 Nakagami- m 信道模型,其中干扰信道的衰落指数为 m_{SP} 和 m_{rP} ;数据信道的衰落指数为 m_{Sr} 和 m_{rD} . 认知源节点发射功率为 P ;可做中继的认知节点数为 M . 设定认知系统传输速率门限为 $R_{th}=1$ bit/s.

在 Q 分别为 15、20、25 dB, $m_{SP}=m_{rP}=m_{Sr}=m_{rD}=1, M=3$ 的条件下,对中断概率与认知发射功率 P 的关系进行仿真,结果如图 2 所示. 图 2 结果表明:本文推导中断概率上界闭式解和实际仿真结果得到的中断概率一致,从而验证了理论推导的正确性;文献[6]推导的中断概率不考虑主用户干扰温度,这会引起认知用户的功率无节制增大,虽然从理论上讲可以很大程度降低其中断概率,但实际上会造成对主用户的干扰,因此其结果并不适合认知网络的性能分析;本文和文献[8]的推导均考虑了主用户干扰温度限制,理论上系统中断概率随着认知源节点发射功率 P 增大而减小,但由于干扰温度门限 Q 的存在,系统的实际发射功率增大至一定程度($P > Q$)时就不能再增大,否则会给主用户造成干扰,使得系统的实际中断概率不会再减小,即发生“溢出”现象,并且主用户干扰温度门限越大,允许认知系统发射的实际功率峰值越大,从而系统的中断概率越低. 此外,文献[8]的中断概率上界推导基于瑞利信道模型,上界约束条件较为松散,因此可以看出本文的中断概率上界比文献[8]的推导结果更加接近真实值.

在 $Q=10$ dB、 $M=3$ 的条件下对 Nakagami- m 信道衰落指数与系统中断概率的关系进行仿真,结果如图 3 所示, m_{Sr} 和 m_{rD} 越大,系统中断概率越低;并且在较好的数据信道质量条件下, m_{SP} 和 m_{rP} 增大,系统中断性能也会有明显提升. 此外,由于文献[8]的中断概率上界推导是基于瑞利信道模型,对于不同的信道衰落指数,其上界推导结果均无法做出反应,从而也无法在不同的信道质量情况下对系统性能做出真实的判断.

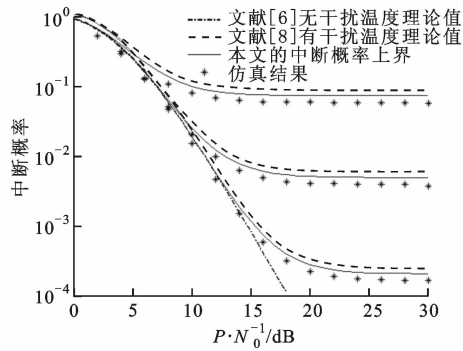


图 2 主用户干扰温度对认知系统中断概率的影响

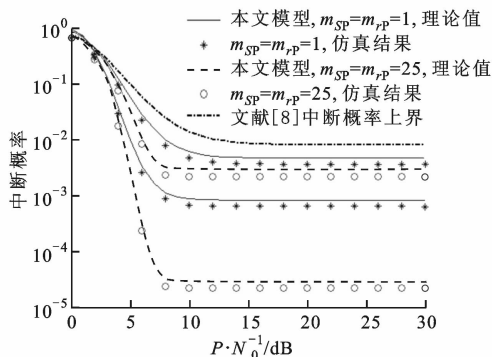


图 3 Nakagami- m 信道衰落指数对认知中断概率的影响

在 $m_{SP}=m_{Sr}=m_{SP}=m_{rP}=1$ 的条件下仿真了可做中继的认知节点数 M 与系统中断概率的关系,结果如图 4 所示,增加 M 可以降低系统中断概率;同时当 Q 较大时,增加 M 所引起的系统中断性能提升越大.

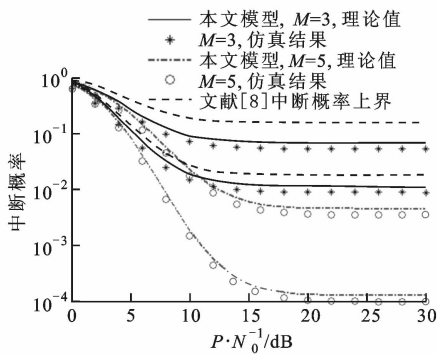


图 4 可做中继的认知节点数目对认知中断概率的影响

5 总结

本文研究了重叠式频谱共享和译码转发中继方式下,结合最佳中继选择的认知中继网络中断概率性能. 相比已有的研究,本文考虑了更加实际的 Nakagami- m 信道模型,分析研究了信道衰落指数对系统中断概率性能的影响,推导出系统在该信道模

型下认知目的节点信噪比的 PDF 和 CDF, 得出了系统的中断概率上界闭式解, 并且通过仿真验证了该闭式解能够精确地计算认知中继网络的中断概率上界. 研究表明: 主用户干扰温度会限制认知用户的实际发射功率, 并且造成中断概率“溢出”的现象; 数据信道的质量越好, 可作为中继的认知节点数越多, 系统的中断概率性能就越好; 在数据信道条件较好时, 干扰信道质量的提高也会提升系统中断概率性能; 调整主用户干扰温度限制, 以及在认知源节点和中继节点采用更加灵活的功率优化机制, 能够有效地提升认知中继系统的性能.

参考文献:

- [1] JOSEPH M III. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications [J]. Journal of Mobile Networks and Applications, 2001, 6(5):435-441.
- [2] ZHAO Qing, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3):79-89.
- [3] 魏急波, 王杉, 赵海涛. 认知无线网络: 关键技术与研究现状[J]. 通信学报, 2011, 32(11):147-158.
- WEI Jibo, WANG Shan, ZHAO Haitao. Cognitive wireless networks: key techniques and state of the art [J]. Journal on Communications, 2011, 32(11):147-158.
- [4] 张正浩, 裴昌幸, 陈南, 等. 宽带认知无线网络分布式协作压缩频谱感知算法[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(4):67-71.
- ZHANG Zhenghao, PEI Changxing, CHEN Nan, et al. A sensing algorithm based on distributed cooperative compressed spectrum for wideband cognitive radio networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(4):67-71.
- [5] HONG Yaowin, HUANG Wanjen, CHIU Fuhsuan, et al. Cooperative communications in resource-constrained wireless networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3):47-57.
- [6] SURaweera H A, SMITH P J, SUROBHI N A. Exact outage probability of cooperative diversity with opportunistic spectrum access [C] // Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:79-84.
- [7] 唐菁敏, 罗涛, 乐光新. 基于中继选择的认知系统性能[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(3):44-47.
- TANG Jingmin, LUO Tao, YUE Guangxin. Performance of cognitive system based on relay selection [J].

Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(3):44-47.

- [8] GUO Yanyan, KANG Guixia, SUN Qiaoyun, et al. Outage performance of cognitive-radio relay system based on the spectrum-sharing environment [C] // Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010:1-5.
- [9] 袁福, 郑林华, 袁继兵. 认知无线网络中协同中继的中断性能分析[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11):2715-2718.
- YUAN Fu, ZHENG Linhua, YUAN Jibing. Outage performance analysis of cooperative relay in cognitive radio networks [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(11):2715-2718.
- [10] LUO Liping, ZHANG Ping, ZHANG Guangchi, et al. Outage performance for cognitive relay networks with underlay spectrum sharing [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(7):710-712.
- [11] PROAKIS J G. Digital communications [M]. 4th ed. 北京: 电子工业出版社, 2006:2-7.

附录 A

这里给出第2节中式(5), 即 Nakagami- m 信道模型下, 认知中继系统目的节点信噪比 r 的 PDF 的推导过程.

根据第2节中式(1)~式(4)的分析, g_{ij} 和 g_{ip} 分别是具有参数 m_{ij} 和 m_{ip} 的随机变量. 令 $Y = Qg_{ij}$, $Z = g_{ip}$, 可得

$$\begin{aligned}
 f_{r_{ij}}(x) &= d \left(\int_0^{Qx/P} f_Y(y) dy \int_0^{Q/P} f_Z(z) dz \right) / dx + \\
 &\quad \int_{Qx/P}^{\infty} z f_Y(xz) f_Z(z) dz = \\
 &\quad (\Gamma(m_{ip}), m_{ip}(Q/P)) / \Gamma(m_{ip})) ((m_{ij}^{m_{ij}} x^{m_{ij}-1}) / \\
 &\quad \Gamma(m_{ip})) e^I - m_{ij}x/P + \\
 &\quad ((m_{ij}^{m_{ij}} m_{ip}^{m_{ip}} x^{m_{ij}-1}) / (Q^{m_{ij}} \Gamma(m_{ij}) \Gamma(m_{ip}))) \cdot \\
 &\quad \int_{Qx/P}^{\infty} z^{m_{ij}+m_{ip}-1} \exp(-(m_{ij}x + m_{ip})z) dz = \\
 &\quad (\Gamma(m_{ip}), m_{ip}(Q/P)) / \Gamma(m_{ip})) ((m_{ij}^{m_{ij}} x^{m_{ij}-1}) / \\
 &\quad \Gamma(m_{ip})) e^{-m_{ij}x/P} + \\
 &\quad (m_{ij}^{m_{ij}} m_{ip}^{m_{ip}} x^{m_{ij}-1}) / (Q^{m_{ij}} \Gamma(m_{ij}) \Gamma(m_{ip})) \cdot \\
 &\quad (\Gamma(m_{ij} + m_{ip}, Q(m_{ij}x + m_{ip})/P) / \\
 &\quad (m_{ij}x + m_{ip})^{m_{ij}+m_{ip}}) \quad (A1)
 \end{aligned}$$

推导完毕.

附录 B

这里给出第2节中式(6), 即 Nakagami- m 信道

模型下,认知中继系统目的节点信噪比 r 的 CDF 的推导过程.

在式(3)所表示的信噪比 r 的 PDF 基础上,根据不完全 Gamma 函数的表达式,可以得到 r_{ij} (ij 表示从节点 i 到节点 j 的链路)的 CDF 为

$$F_{r_{ij}}(x) = \int_0^x f_{r_{ij}}(y) dy = k_1 + k_2 I_1 - k_2 \sum_{l=0}^{m_{ij}+m_{iP}-1} (1/(l!)) (Q/P)^l I_2 \quad (B1)$$

式中: k_1, k_2, I_1, I_2 分别表示如下

$$k_1 = \left(\Gamma(m_{iP}, m_{iP} \frac{Q}{P}) / \Gamma(m_{iP}) \right) \cdot (\Gamma(m_{ij}, m_{ij} x) / \Gamma(m_{ij})) / P \quad (B2)$$

$$k_2 = \frac{m_{ij}^{m_{ij}} m_{iP}^{m_{iP}} \Gamma(m_{ij} + m_{iP})}{Q^{m_{ij}} \Gamma(m_{ij}) \Gamma(m_{iP})} \quad (B3)$$

$$I_1 = \int_0^x \frac{y^{m_{ij}-1}}{(m_{ij}y + m_{iP})^{m_{ij}+m_{iP}}} dy \quad (B4)$$

$$I_2 = \int_0^x y^{m_{ij}-1} (m_{ij}y + m_{iP})^{l-m_{ij}-m_{iP}} e^{-m_{ij}y-m_{iP}} dy \quad (B5)$$

令 $t = m_{ij}y + m_{iP}$, 并进行二项式展开, 可以得到

$$I_1 = \frac{1}{m_{ij}^{m_{ij}}} \int_{m_{iP}}^{m_{ij}x+m_{iP}} \frac{(t-m_{iP})^{m_{ij}-1}}{t^{m_{ij}+m_{iP}}} dt = \sum_{n=0}^{m_{ij}-1} \frac{(-m_{iP})^{m_{ij}-1-n} \begin{bmatrix} m_{ij}-1 \\ n \end{bmatrix}}{m_{ij}^{m_{ij}}} I_3 \quad (B6)$$

式中: $I_3 = \int_{m_{iP}}^{m_{ij}x+m_{iP}} t^{n-m_{ij}-m_{iP}} dt$. 类似地, I_2 可化简为

$$I_2 = \sum_{n=0}^{m_{ij}-1} \frac{(-m_{iP})^{m_{ij}-1-n} \begin{bmatrix} m_{ij}-1 \\ n \end{bmatrix}}{m_{ij}^{m_{ij}}} I_4 \quad (B7)$$

式中: $I_4 = \int_{m_{iP}}^{m_{ij}x+m_{iP}} t^{n+l-m_{ij}-m_{iP}} e^{-t} dt$. 由此得到 r_{ij} 的 CDF 为式(6), 推导完毕.

(编辑 刘杨)