

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.12.012

# 同信道干扰下的中继网络性能分析\*

管张均<sup>1,\*\*</sup>, 周希朗<sup>2</sup>

(1. 上海无线电设备研究所, 上海 200090; 2. 上海交通大学 电子工程系, 上海 200240)

**摘要:**分析了两跳中继网络在同信道干扰下的中断概率。在中继网络中,源节点广播信号至所有的中继节点,此时同信道干扰在中继节点或者目的节点处被引入。中继节点采用解码转发策略转发源节点的信号,而目的节点采用最大比合并技术接收来自中继节点的信号。最终推导了各种干扰情形下系统中断概率的闭合表达式。仿真结果表明,解析曲线和蒙特卡洛仿真曲线非常吻合,而同信道干扰在某些场合会对系统性能造成较大影响。分析结果对中继网络的系统设计和参数设置都有一定的参考意义。

**关键词:**中继网络;解码转发;放大转发;同信道干扰;中断概率

**中图分类号:**TN925      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2013)12-1605-05

## Performance Analysis of Relay Networks in the Presence of Co-channel Interference

GUAN Zhang-jun<sup>1</sup>, ZHOU Xi-lang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China;

2. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Outage probability of two-hop relay networks in the presence of co-channel interference is investigated. The source broadcasts signals to all the relays, and co-channel interference is introduced either at the relays or at the destination. Relays adopt decode-and-forward (DF) scheme to retransmit the signal, and the destination employs Maximum Ratio Combining (MRC) technique to combine the signals from the relays. Closed-form expressions of outage probability are derived under different interference situations. Simulation results show that the analytical curves agree with the simulated ones very well, and the co-channel interference may have great effect on the system performance in some situation. The results will be helpful to the system design and parameter configuration of relay networks.

**Key words:** relay networks; decode-and-forward; amplify-and-forward; co-channel interference; outage probability

## 1 引言

无线通信的快速发展引领了对高数据速率业务需求的持续增长。尽管多输入多输出技术(MIMO)可以提供更多的信道容量,但其使用却受到移动终端空间尺寸的限制。近年来,中继网络已成为未来无线通信系统中非常令人期待的候选技术之

一。<sup>[1-2]</sup> 中继节点之间可以形成分布式的 MIMO 阵列来帮助源节点传输信号,从而达到增强信号质量、提高系统容量和扩大基站覆盖范围的目的。

近年来,不同协作策略下中继网络的性能分析,例如信干比(SIR)和系统容量,已成为研究的热点<sup>[1]</sup>。文献[2]关注了中继网络中用户之间的公平

\* 收稿日期:2013-07-31;修回日期:2013-11-06      Received date:2013-07-31;Revised date:2013-11-06

\*\* 通讯作者:guan\_zhangjun@126.com      Corresponding author:guan\_zhangjun@126.com

性问题。文献[3]和[4]分析了几种典型中继网络的中断概率:前者推导了时分多址(TDMA)模式下中断概率的闭合表达式,而后者给出了系统采用分布式波束形成(DBF)技术时中断概率的表达式。

中继网络采用的协作策略主要有两种:解码转发(Decode-and-forward, DF)<sup>[5-6]</sup>和放大转发(Amplify-and-forward, AF)<sup>[7-8]</sup>。DF模式的设计初衷是在中继节点对接收到的信号进行解调和解码,再通过编码和调制重组源节点发送的信号,从而削弱高斯白噪声的影响,避免AF模式中中继节点对噪声功率的放大。但是,如果中继节点对接收到的信号做出了错误判决,将会导致错误传播。为了避免这种错误的传播,DF模式又衍生出了一种基于CRC(Cyclical Redundancy Check)校验的协同模式。在这种模式中,中继节点将对接收到的数据进行CRC校验,如果校验结果不正确就不再协同前传该帧数据,反之则转发该帧数据给目的节点,这种模式以一定的频谱效率损失避免了错误传播。所谓AF模式,指中继节点不对接收到的信号进行解调和解码,而是直接将其进行模拟处理(信号放大)后转发给目的节点。虽然这种方式将导致中继节点把接收到的噪声和信号一起放大了,但是由于分集带来的增益,同样可以使整个系统性能得到提升。最近,中继网络中的同信道干扰问题引起了广泛的研究兴趣<sup>[9-10]</sup>。

本文考察了同信道干扰下采用解码转发策略的中继网络的性能。在系统中,源节点广播信号至所有的中继节点,同信道干扰在中继节点或目的节点处被引入。中继节点采用解码转发策略转发源节点的信号,当中继节点无法正确解码时,基于提高中继节点利用率的考虑,该中继节点可采用放大转发策略转发干扰信号。本文推导了各种干扰情形下系统中断概率的闭合表达式。仿真结果验证了理论推导的正确性,而同信道干扰在某些场合会对系统性能造成较大影响。

2 中继网络模型

一般的中继网络系统框图如图1所示。该两跳网络由一个源节点、一个目的节点和N个中继节点构成,每个节点均配置单根天线单元。假设一共有L个干扰信号,并且源节点与目的节点之间无直达信道。 $h_{sr_n}$ 和 $h_{r_nd}$ 是源节点到中继节点n和中继节点

n到目的节点的瑞利衰落信道系数。

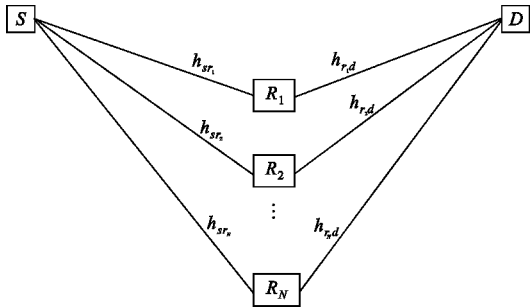


图1 中继网络系统框图  
Fig. 1 Block diagram of relay network system

3 中继节点处引入干扰时的性能分析

在中继网络中,信号的传输在两个时隙内完成。在第一个时隙内,源节点广播信号至所有的中继节点。中继节点n接收到的信号为

$$y_{sr_n} = \sqrt{P_s} h_{sr_n} x + \sum_{l=1}^L \sqrt{P_l} h_{lr_n} x_l + z_{sr_n} \tag{1}$$

式中,x是发射信号,x<sub>l</sub>是第l个干扰信号;P<sub>s</sub>是发射信号功率,P<sub>l</sub>是第l个干扰信号的功率;h<sub>sr<sub>n</sub></sub>和h<sub>lr<sub>n</sub></sub>是瑞利衰落信道系数,方差分别为σ<sup>2</sup><sub>sr<sub>n</sub></sub>和σ<sup>2</sup><sub>lr<sub>n</sub></sub>;z<sub>sr<sub>n</sub></sub>是功率谱密度为N<sub>0</sub>的复高斯白噪声。

此时,源节点和中继节点n之间的瞬时互信息可以写为

$$I_n = \frac{1}{2} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_s |h_{sr_n}|^2}{\sum_{l=1}^L P_l |h_{lr_n}|^2 + N_0} \right) \tag{2}$$

在解码转发协作策略中,如果瞬时互信息I<sub>n</sub>达到了某个中断速率阈值R,则可以认为中继节点n解码成功,可将信息转发至目的节点。因此,整个中继网络的瞬时互信息为

$$I_1 = \frac{1}{2} \text{lb} \left( 1 + \rho \sum_{n \in C_D} |h_{r_nd}|^2 \right) \tag{3}$$

式中,h<sub>r\_nd</sub>是方差为σ<sup>2</sup><sub>r\_nd</sub>的瑞利衰落信道系数,ρ=P<sub>n</sub>/N<sub>0</sub>是中继节点n处的发射信噪比(SNR),C<sub>D</sub>是有效解码中继节点的集合。根据文献[4],中继网络的中断概率由下式给出:

$$P_{\text{out1}} = \Pr(I_1 < R) = \sum_{k=0}^N \binom{N}{k} \Pr(I_1 | C_D = k < R) \Pr(|C_D| = k) = \sum_{k=0}^N \binom{N}{k} \Pr(I_1 | C_D = k < R) (1 - D_{n1})^k D_{n1}^{N-k} \tag{4}$$

式中,  $\Pr(|C_d|=K)$  代表集合  $C_d$  中有效中继节点数为  $K$  的概率;  $D_{n1}$  为中继节点  $n$  不属于集合  $C_d$  的概率, 其表达式为

$$D_{n1} = \Pr(I_n < R) = \Pr\left(\frac{P_s |h_{sr_n}|^2}{\sum_{l=1}^L P_l |h_{lr_n}|^2 + N_0} < 2^{2R} - 1\right) = \int_0^\infty \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \left(\sum_{l=1}^L P_{xl} + N_0\right)^{(2^{2R}-1)/P_s} e^{-t} e^{-x_1} \dots e^{-x_L} dt dx_1 \dots dx_L = 1 - \frac{e^{-(2^{2R}-1)t/\rho}}{((2^{2R}-1)t+1)^L} \quad (5)$$

式中,  $P_1 = P_2 = \dots = P_L = P, t = P/P_s$ 。而式(4)中  $\Pr(I_1(|C_d|=K) < R)$  可以写为

$$\Pr(I_1(|C_d|=K) < R) = \Pr\left(\sum_{n \in C_d} |h_{r_{nd}}|^2 < \frac{2^{2R}-1}{\rho}\right) \quad (6)$$

在第二个时隙中,  $K$  个有效中继节点和目的节点构成了一个虚拟的  $1 \times K$  MISO 系统, 因此  $\sum_{n \in C_d} |h_{r_{nd}}|^2$  的分布特性等同于  $K \times K$  的 Wishart 矩阵最大特征值的分布特性, 式(6)可由其累积分布函数(CDF)求得, 即

$$F_\lambda(x) = \frac{\det(S(x))}{\prod_{i=1}^{\min(N_R, N_T)} (N_R - i)! (N_T - i)!} \quad (7)$$

式中,  $N_R$  和  $N_T$  分别为收发两端的天线单元数,  $(S(x))_{i,j} = \Gamma(|N_R - N_T| + i + j - 1, x)$ ,  $\Gamma(a, x)$  为不完全伽马函数。

在某些场合下, 当中继节点不能正确解码源节点的信号时, 基于提高中继节点利用率的考虑, 该中继节点可采用放大转发策略转发干扰信号。假设此时只有一个干扰信号( $L=1$ ), 则整个中继网络的互信息应改写为

$$I_2 = \frac{1}{2} \text{lb}\left(1 + \frac{\sum_{n \in C_d} |h_{r_{nd}}|^2}{\sum_{n \notin C_d} (|h_{r_{nd}}|^2 + (|h_{r_{nd}}|^2/|h_{lr_n}|^2 + 1)/\rho)}\right) \quad (8)$$

为了简化分析, 假设此时中继节点数为 2 ( $N=2$ ), 则系统的中断概率为

$$P_{\text{out2}} = \Pr(I_2 < R) = D_{n1}^2 + 2(1-D_{n1})D_{n1}\Pr(I_2(|C_d|=1) < R) + (1-D_{n1})^2\Pr(I_2(|C_d|=2) < R) \quad (9)$$

其中:

$$\Pr(I_2(|C_d|=1) < R) =$$

$$\Pr\left(\frac{|h_{r_{1d}}|^2}{|h_{r_{2d}}|^2 + (|h_{r_{2d}}|^2/|h_{lr_2}|^2 + 1)/\rho} < 2^{2R} - 1\right) = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{(x+(x/y+1)/\rho)(2^{2R}-1)} e^{-t} e^{-x} e^{-y} dt dx dy = 1 - \frac{e^{-(2^{2R}-1)/\rho}}{2^{2R}} \int_0^\infty \frac{y}{y + (2^{2R}-1)/(2^{2R}\rho)} e^{-y} dy \quad (10)$$

式中,  $\Pr(I_2(|C_d|=2) < R)$  可以通过式(7)来计算。

### 4 目的节点处引入干扰时的性能分析

当干扰在目的节点处被引入时, 系统的互信息可以写为

$$I_3 = \frac{1}{2} \text{lb}\left(1 + \frac{\sum_{n \in C_d} |h_{r_{nd}}|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{ld}|^2 + 1/\rho}\right) \quad (11)$$

而系统的中断概率为

$$P_{\text{out3}} = \Pr(I_3 < R) = \sum_{K=0}^N \binom{N}{K} \Pr(I_3(|C_d|=K) < R) \Pr(|C_d|=K) = \sum_{K=0}^N \binom{N}{K} \Pr(I_3(|C_d|=K) < R) (1-D_{n2})^K D_{n2}^{N-K} \quad (12)$$

其中:

$$D_{n2} = \Pr(I_{n2} < R) = \Pr\left(\frac{P_s |h_{sr_n}|^2}{N_0} < 2^{2R} - 1\right) = \int_0^{(2^{2R}-1)N_0/P_s} e^{-t} dt = 1 - e^{-(2^{2R}-1)N_0/P_s} \quad (13)$$

$$\Pr(I_3(|C_d|=K) < R) =$$

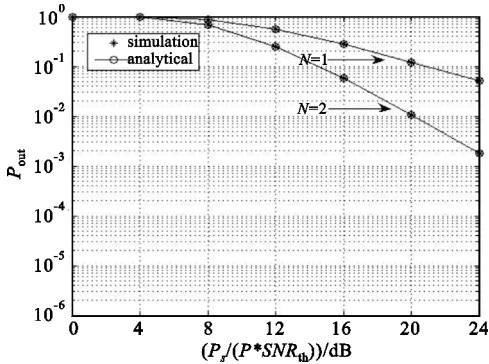
$$\Pr\left(\frac{\sum_{n \in C_d} |h_{r_{nd}}|^2}{\sum_{l=1}^L |h_{ld}|^2 + 1/\rho} < 2^{2R} - 1\right) = 1 - \sum_{k=0}^{K-1} \frac{(2^{2R}-1)^k (1/\rho)^{\frac{L+k+1}{2}} e^{\frac{1-2^{2R}-1}{\rho}}}{k! 2^{L+k+1}} W_{\frac{k+1-L}{2}, -\frac{L+k}{2}}(2^{2R}/\rho) \quad (14)$$

式中,  $W_{u,v}(\cdot)$  是 Whittaker 超几何函数,  $K \geq 1$ 。

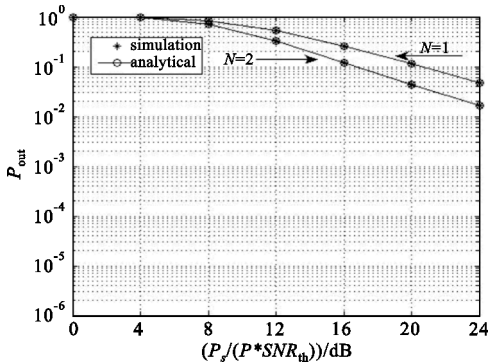
### 5 仿真结果与分析

在本文的仿真中, 系统中断速率的阈值  $R$  为  $1 \text{ bit/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$ , 两跳之间均为瑞利衰落信道, 蒙特卡洛仿真次数为  $10^6$  次, 这样能较好地仿真真实场景。图 2 给出了 3 种同信道干扰下不同中继节点数 DF 协作策略的系统中断概率随信噪比的变化曲线。为了验证理论推导结果的正确性, 图中还给出了

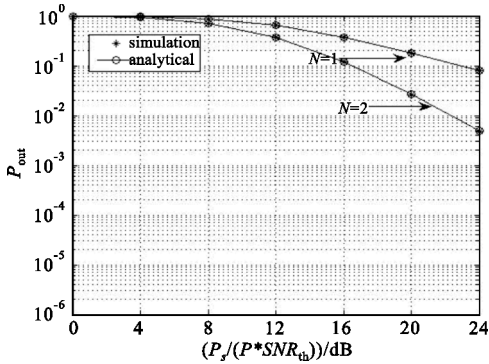
Monte-Carlo 仿真曲线。从图 2 可以看出,仿真曲线和通过式(4)、(9)和(12)得到的解析曲线拟合得很好,从而验证了理论推导的正确性。随着中继节点数的增加,系统中断概率也会因为协作分集增益而减小。但是不可否认,由于干扰信号的影响,系统性能相比没有干扰时严重恶化。



(a) 中继节点处有两个干扰信号,不转发干扰信号



(b) 中继节点处有一个干扰信号,转发干扰信号



(c) 目的节点处有两个干扰信号

图 2 同信道干扰下系统中断概率与信噪比的关系  
Fig. 2 Outage probability with CCI vs. SNR

图 3 给出了中继节点处没有干扰、中继节点不需要转发干扰信号和中继节点需要转发干扰信号时 DF 协作策略的系统中断概率随信噪比的变化曲线。这里干扰信号数为 1,共有两个中继节点。毫无疑问

问,没有干扰时系统的中断概率是最低的。当中继节点需要转发干扰信号时,中继节点和目的节点同时引入了干扰,因此其中断概率最高。值得注意的是,当中继节点不转发干扰信号时,中继节点引入的干扰对系统性能并没有太大影响。在满足目的节点 QoS 的前提下,当中继节点不能正确解调和解码接收到的源节点信号时,可以让其采取 AF 协作策略来转发干扰信号以提高中继节点的利用率。

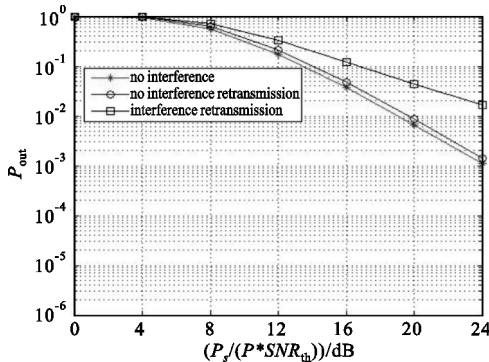


图 3 不同干扰情形下系统中断概率与信噪比的关系  
Fig. 3 Outage probability with different interference situations vs. SNR

图 4 给出了不同干扰位置时 DF 协作策略的系统中断概率随信噪比的变化曲线。这里一共有两个干扰信号和两个中继节点,并且中继节点不需要转发干扰信号。由于源节点的发射功率要高于干扰信号功率,而中继节点的发射功率和干扰功率相等,因此目的节点处的干扰对系统性能的影响要大于中继节点处的干扰。

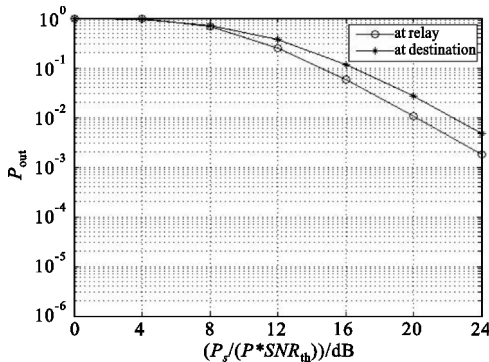


图 4 不同干扰位置时系统中断概率与信噪比的关系  
Fig. 4 Outage probability with different interference locations vs. SNR

## 6 总 结

本文推导了各种同信道干扰下中继网络的中断



概率闭合表达式。仿真结果表明,解析曲线和蒙特卡洛仿真曲线非常吻合,而同信道干扰在某些场合会对系统性能造成较大影响。本文的分析结果对中继网络的系统设计和参数设置都有一定的参考意义。下一步的主要研究工作是在每跳的信道间都进行自适应子载波分配,实现协作分集和多用户分集的级联。

## 参考文献:

- [1] Park J, Song E, Sung W. Capacity Analysis for Distributed Antenna Systems Using Cooperative Transmission Schemes in Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 586-592.
- [2] Saad W, Han Z, Debbah M, et al. A Distributed Coalition Formation Framework for Fair User Cooperation in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9): 4580-4593.
- [3] Zhao Y, Adve R, Lim T J. Outage Probability at Arbitrary SNR with Cooperative Diversity[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(8): 700-702.
- [4] Kim J, Kim D. Cooperative Systems with Distributed Beamforming and Its Outage Probability[C]//Proceedings of 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference. Dublin; IEEE, 2007: 1638-1641.
- [5] Fan Y, Adinoyi A, Thompson J S, et al. A Simple Distributed Antenna Processing Scheme for Cooperative Diversity[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(3): 626-629.
- [6] Bhatnagar M R. Performance Analysis of a Path Selection Scheme in Multi-Hop Decode-and-Forward Protocol[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 1980-1983.
- [7] Zhang Zhang, Lv Tiejun, Yang Shaoshi. Round-Robin Relaying With Diversity in Amplify-and-Forward Multisource

Cooperative Communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1251-1266.

- [8] Fu Youhua, Yang Luxi, Zhu Wei-Ping. A Nearly Optimal Amplify-and-Forward Relaying Scheme for Two-Hop MIMO Multi-Relay Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(3): 229-231.
- [9] Zhong Caijun, Jin Shi, Wong Kai-Kit. Outage Probability of Dual-Hop Relay Channels in the Presence of Interference[C]//Proceedings of 2009 IEEE 68th Vehicular Technology Conference. Barcelona; IEEE, 2009: 1-5.
- [10] Lee Dongwoo, Lee J H. Outage Probability for Dual-Hop Relaying Systems With Multiple Interferers Over Rayleigh Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 333-338.

## 作者简介:



管张均(1981—),男,江苏南通人,2013年于上海交通大学获电磁场与微波技术专业博士学位,现为上海无线电设备研究所工程师,主要研究领域为无线通信技术和雷达信号处理;

GUAN Zhang-jun was born in Nantong, Jiangsu Province, in 1981. He received the Ph. D. degree in Electromagnetic Field and Microwave Technology from Shanghai Jiaotong University in 2013. He is now an engineer. His research interests include wireless communication techniques and radar signal processing.

Email: guan\_zhangjun@126.com

周希朗(1952—),男,江苏徐州人,教授、博士生导师,主要研究领域为微波、毫米波集成电路。

ZHOU Xi-lang was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1952. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include microwave and millimeter wave integrated circuits.

Email: xlzhou@sjtu.edu.cn