

# 多源多目的模型中网络编码的时延性能分析

吕振兴 徐友云 许 魁

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

**摘要:** 研究表明基于无线信道的广播特性,网络编码技术能够显著降低多播通信中的传输时延。多源多播模型中,在任一源节点已知其他源节点信息的条件下,现有传输方案能够确保系统时延最小化。本文在其他源节点信息未知时,对现有多源多目的单中继模型应用网络编码后的时延性能进行分析,并将该模型推广到多中继模型,提出了基于网络编码和机会中继选择策略的 MR-OPP-NC 方案,并在译码转发机制下,利用中断概率量化了应用网络编码前后的时延性能,仿真表明本文所提 MR-OPP-NC 方案与未使用网络编码的机会中继方案相比较,能获得显著的时延增益。

**关键词:** 网络编码; 时延性能; 机会中继; 中断概率

**中图分类号:** TN919 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)05-0672-06

## Delay Performance Analyses of Network Coding for Multisource-Multidestination Scenarios

LÜ Zhen-xing XU You-yun XU Kui

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Research work has shown that taking advantage of the broadcasting nature of wireless channel network coding across multicast communication can significantly reduce system delay. In multi-Source multicast scenario, with the condition that each source has priori knowledge of other sources, existing transmission schemes can insure systematic delay minimum. In this paper, we analyze the delay performance of network coding for multisource-multidestination single-relay scenario without the above mentioned condition. Moreover, we extend the scenario to the multi-relay scenario, simultaneously proposing the MR-OPP-NC scheme based on network coding and opportunistic relaying selected strategy. We apply outage probability to the quantification of the delay performance of Network Coding with decode-and-forward (DF) strategy. Simulation results confirm that in contrast to opportunistic relaying scheme without network coding MR-OPP-NC scheme proposed can get significant delay performance gains.

**Key words:** network coding; delay performance; opportunistic relaying; outage probability

### 1 引言

随着无线多媒体业务的大量应用,无线链路对传输容量的需求不断增加。网络编码<sup>[1]</sup>这一成功用于实现有线通信网络最大流传输的新兴技术,在无线通信领域也越发受到广泛关注<sup>[2,3]</sup>。研究表明,无线通信中的网络编码技术不仅可以改善误码性能,增强网络的容错性和鲁棒性,还能够减少数据包重传次数<sup>[4,5]</sup>,显著提升网络吞吐量。基于无线信道的不可靠性和广播特性,网络编码在无线通信领域得到了更加灵活有效的应用,文献[6]设计了实用的网络层编码协议 COPE,其在重负载时吞吐量性能较传统路由有 40% 的提高;文献[7]设计了更加灵活的物理层网络编码协议 ZigZag, 14

个节点的仿真表明其相比传统的 802.11 协议平均吞吐率提高 25%,平均丢包率从 15.8%减小至 0.2%。

多源多目的(Multisource-Multidestination, MSMD)模型是无线通信中常见的一种干扰受限模型,因每一源点有不同的目的端集合,所以采用传统方法进行性能分析比较困难。文献[8,9]对 MSMD 模型的网络容量进行了研究,并用熵函数给出了可行率区域的上下界;文献[10]首次尝试将网络编码应用到 MSMD 模型,其主要思想是促使源节点联合发送,以获得最大的稳定传输速率。文献[1]提出了一种 MSMD 广播模型,即每一源点需要组播数据至所有宿点。文献[11]借助于单源组播问题,研究并提出了 MSMD 广播模型中采用线性网络编码技术实现数据传输并达到最大吞吐率

收稿日期: 2011 年 1 月 18 日; 修回日期: 无

基金项目: 国家重大专项(2010ZX03003-003-01); 国家 863 项目(2009AA01Z249); 国家自然科学基金(60972050)资助课题

的编码构造方法,文献[12]首次在放大转发机制下将网络编码应用到双路多中继 MSMD 广播模型,主要思想是使源端信号在中继处自然叠加,中继节点依据信道质量轮流转发,以获得较好的时延性能。

本文在译码转发机制下研究了双路 MSMD 广播模型应用网络编码后的系统时延性能。单中继网络中,中继节点持续地将所有源数据随机网络编码后广播发送,直至所有目的节点正确译码。多中继网络则涉及到中继选择的问题,文中所提 MR-OPP-NC( Multi-relay opportunistic network coding )方案借鉴了机会中继<sup>[13]</sup>选择策略的思想。研究表明机会中继能达到使用空时编码所获得的分集复用增益,但实现方法却简单易行。MR-OPP-NC 方案中多个源端依次广播数据,但任一源端需持续发送,以确保至少一个中继节点能够正确接收。中继处将各自译码数据进行随机网络编码,并选择信道质量较好的节点进行转发,目的端只要接收足够多的编码包就可以据此译码出各源端数据。不同于文献[4,5]进行网络编码延时增益分析时,简单地将信道设为“开”或“关”,本文将基于中断概率量化信道状态对系统时延的影响。

## 2 系统模型

源端集合 S 通过中继节点 R 向目的端集合 D 广播发送固定长度的数据包,其与目的端之间无直通信道。中继节点可与源端、目的端进行通信,并能通过侦听源端的 RTS 分组和目的端的 CTS 分组,从中获取信道状态信息。时分复用系统中,因系统的传输延时取决于数据的传输次数,所以本文主要研究了 MSMD 广播模型中平均每一源端数据包传输至目的端集合 D 所需要的传输次数。信道为准静态瑞利衰落信道,每次广播均为等功率发送。

节点 A 发送数据至节点 B,接收信号  $y_B$  可以表示为:  $y_B = h_{AB}x_A + n_B$ ,其中  $x_A$  为节点 A 的发送信号,信道增益  $h_{AB}$  服从复高斯分布,即  $h_{AB} \sim CN(0, \Omega_{AB})$ ,节点 B 处叠加的高斯白噪声  $n_B \sim CN(0, N_0)$ 。定义  $\gamma_{AB} \triangleq |h_{AB}|^2$  为瞬时信道强度平方,其服从参数为  $1/\Omega_{AB}$  的指数分布,即  $\gamma_{AB} \sim \Upsilon(1/\Omega_{AB})$ , $\mathbb{R}$  为端到端的频谱效率,单位 bps/Hz。定义 SNR 为节点 A 的发送功率  $P_A$  与节点 B 处叠加的白噪声  $n_B$  平均能量的比值,则节点 B 处的接收信噪比

$$snr_B = \frac{P_B}{N_0} = \frac{P_A |h_{AB}|^2}{N_0} = SNR \cdot \gamma_{AB} \quad (1)$$

中断概率是容量的另一种表达方式,链路容量不能满足所要求的用户速率时,就会产生中断事件。当要求频谱效率为  $\mathbb{R}$  时,节点 B 处的中断概率表达式为:

$$Pr_{out} = P\{\mathbb{R} > C(snr_B) = \log_2(1 + snr_B)\} = P\{snr_B < 2^{\mathbb{R}} - 1\}$$

$$= P\left\{\gamma_{AB} < \frac{2^{\mathbb{R}} - 1}{SNR}\right\} = \int_0^{\frac{2^{\mathbb{R}} - 1}{SNR}} P(\gamma_{AB}) d\gamma_{AB} \quad (2)$$

考虑到  $\gamma_{AB}$  服从参数为  $1/\Omega_{AB}$  的指数分布,则中断概率可表示为:

$$Pr_{out} = \int_0^{\frac{2^{\mathbb{R}} - 1}{SNR}} \frac{1}{\Omega_{AB}} e^{-\frac{\gamma_{AB}}{\Omega_{AB}}} d\gamma_{AB} = 1 - e^{-\frac{\kappa^*}{\Omega_{AB}}} \quad (3)$$

其中  $\kappa^* = \frac{2^{\mathbb{R}} - 1}{SNR}$ 。

下面我们将单中继和多中继两种模型来分析网络编码对系统延时的影响。假设各节点处叠加具有相同能量的高斯白噪声  $n_B$ ,则系统中发送信噪比 SNR 相同。本文基于译码转发机制进行中断概率的分析,当链路未发生中断事件时,即可认为对端能够正确译码。为便于分析,设源端和中继节点间、中继节点和目的端间的信道增益分别服从相同的复高斯分布,即 S 与 R 之间的所有  $\Omega_{SR}$  相等,R 与 D 之间的所有  $\Omega_{RD}$  相等。

## 3 MSMD 单中继模型

M 个源端分别通过中继节点 R 向 J 个目的端广播发送数据,模型如图 1 所示。传统的时序传输方法是单个源端  $S_m$  先将一个数据包可靠发送给中继节点 R,由中继节点进行持续发送,直至目的端全部正确接收该数据包,其他源端依次轮流进行广播发送。应用网络编码后的转发模式是所有源端依次可靠发送一个数据包至中继节点 R,中继节点将 M 个数据包多次随机网络编码后持续广播发送,当任一目的端正确接收到 M 个数据包时,即认为其能够正确译码出各个源数据包。

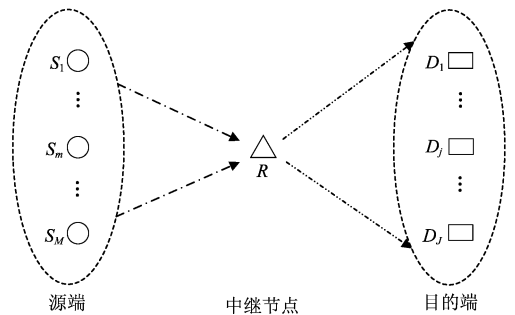


图 1 MSMD 单中继广播模型

Fig. 1 MSMD single-relay broadcast model

### 3.1 传统模式 (Single-relay traditional mode, SR-TM)

单个源端到中继节点的中断概率可表示为

$$P_{out1}^{S_mR} = 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{SR}}} \quad (4)$$

其中  $\kappa = \frac{2^{2\mathbb{R}} - 1}{SNR}$ ,这里为保证整个系统的频谱效率为  $\mathbb{R}$ ,则每一跳的频谱效率应为  $2\mathbb{R}$ 。为使其可靠传输,其平均传输次数  $\bar{N}_m^{SR}$  可表示为

$$\bar{N}_{im}^{SR} = \sum_{n=1}^{\infty} n \left( P_{out1}^{S_m R} \right)^{n-1} \left( 1 - P_{out1}^{S_m R} \right) \quad (5)$$

中继节点到每个目的端的中断概率均为

$$P_{out1}^{RD_j} = 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{RD}}} \quad (6)$$

则为了让所有目的端接收到此数据包,则持续转发次数

$$\bar{N}_{im}^{RD} = 1 + \sum_{t=1}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{j=1}^J \left[ \sum_{\tau=1}^t \left( P_{out1}^{RD_j} \right)^{\tau-1} \left( 1 - P_{out1}^{RD_j} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

上式将在3.2节网络编码模式中给出证明。

M个源端各完成一个数据包的广播,所需要的平均

传输次数为  $\bar{N}_{im}^{SD} = \bar{N}_{im}^{SR} + \bar{N}_{im}^{RD}$ 。

### 3.2 网络编码模式(Single-relay network coding mode, SR-NC)

源端依次可靠发送数据包至中继节点,则所需要的发送次数同3.1节传统译码转发模式,即

$$\bar{N}_{nc}^{SR} = \sum_{n=1}^{\infty} n \left( P_{out2}^{S_m R} \right)^{n-1} \left( 1 - P_{out2}^{S_m R} \right) \quad (8)$$

其中  $P_{out2}^{S_m R} = 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{SR}}}$ 。中继节点将所有正确接收的M个

数据包进行随机网络编码<sup>[14]</sup>,发送数据为  $P[t] = \sum_{m=1}^M a_m$

$[t]P_m$ , 其中  $P_m$  表示第m个源端所发送的数据包,系数向量  $a[t]$  在一个足够大的有限域  $F_q$  上随机选择,目的节点只要接收到M个数据包就能够以较高的概率进行正确译码。随机网络编码的额外开销为编码系数向量  $a[t]$ , 其长度M远远小于数据包长度,可忽略不计。

中继节点至单个目的端的中断概率为

$$P_{out2}^{RD_j} = 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{RD}}} \quad (9)$$

则要使所有目的端都能够正确译码,则中继节点持续发送次数  $N_{nc}^{RD}$  为<sup>[4]</sup>

$$N_{nc}^{RD} = M + \sum_{i=M}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^J \left[ \sum_{\tau=M}^i \binom{\tau-1}{M-1} \left( P_{out2}^{RD_j} \right)^{\tau-M} \left( 1 - P_{out2}^{RD_j} \right)^M \right] \right\} \quad (10)$$

证明:中继节点发送  $t$  ( $t > M$ ) 个数据包时,某一节点能够正确解码即收到  $\tau$  ( $\tau \geq M$ ) 个数据包的概率  $P_1$  为

$$P_1 = \sum_{\tau=M}^t \binom{\tau-1}{M-1} \left( P_{out2}^{RD_j} \right)^{\tau-M} \left( 1 - P_{out2}^{RD_j} \right)^M \quad (11)$$

J个目的节点都能够解码的概率  $P_2$  为

$$P_2 = \prod_{i=1}^J \left[ \sum_{\tau=M}^i \binom{\tau-1}{M-1} \left( P_{out2}^{RD_j} \right)^{\tau-M} \left( 1 - P_{out2}^{RD_j} \right)^M \right] \quad (12)$$

有任意一个目的节点不能解码即需要重传一次,同时考虑到中继节点至少发送M个数据包后,目的节点才有可能全部正确译码,故有总发送次数

$$N_{nc}^{RD} = M + \sum_{i=M}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^J \left[ \sum_{\tau=M}^i \binom{\tau-1}{M-1} \left( P_{out2}^{RD_j} \right)^{\tau-M} \left( 1 - P_{out2}^{RD_j} \right)^M \right] \right\} \quad (13)$$

令  $M=1$ ,即可得到(7)式。

M个源端通过SR-NC模式各完成一个数据包的广播,所需要的平均传输次数为  $\bar{N}_{nc}^{SD} = \bar{N}_{nc}^{SR} + N_{nc}^{RD}/M$ 。

## 4 MSMD多中继模型

M个源端分别通过I个中继节点向J个目的端广播发送数据,模型如图2所示。传统机会中继的广播模式是单个源端  $S_m$  发送一个数据包至中继节点组R,从正确译码的中继节点组中选择具有最大瞬时信道强度  $\gamma_{R,D}$  的中继节点进行广播发送,直到全部目的端正确接收到该数据包,然后依次进行其他源端数据的广播发送。MR-OPP-NC方案中所有源端依次发送一个数据包至中继节点组R,每个源端发送的数据需保证至少被一个中继节点可靠接收,然后持续选择质量较好的中继节点将其所收到的数据包随机网络编码后广播发送,直至所有目的端能够正确译码出各原始数据包。

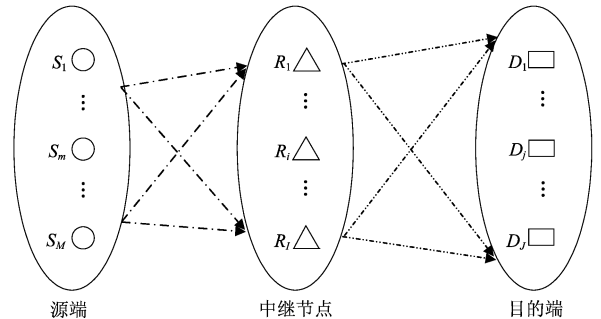


图2 MSMD多中继广播模型

Fig. 2 MSMD multi-relay broadcast model

### 4.1 机会中继模式(Multi-relay opportunistic relaying mode, MR-OPP)

单个源端发送一次数据包,I个中继节点均收不到的概率为

$$\Pr(out) = \prod_{i=1}^I \Pr\left\{ \gamma_{S_m R_i} < \kappa \right\} = \left( 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{SR}}} \right)^I \quad (14)$$

此时该源端应持续发送,确保至少能够被一个中继节点接收。设源端第k次发送才使中继节点组能够正确接收到,则

$$\bar{N}_{opp}^{SR} = \sum_{k=1}^{\infty} k \Pr(N_{opp}^{SR} = k) = \sum_{k=1}^{\infty} k \Pr(out)^{k-1} [1 - \Pr(out)] \quad (15)$$

定义事件  $\Gamma_k$  表示在源端数据在第k次发送中首次被中继节点正确接收;事件  $U_\zeta$  表示能够正确接收的集合U内含有  $\zeta$  个中继节点。能够正确译码的中继集合

$U$  定义为

$$U \triangleq \left\{ R_i \mid \log_2 \left( 1 + \text{SNR} \cdot \gamma_{SR_i} \right) \geq 2\mathbb{R}, i \in [1, I] \right\} \quad (16)$$

则源数据包在第  $k$  次发送时首次被接收,且有  $\zeta$  个中继节点正确译码的联合概率  $\text{Pr}(U_\zeta, \Gamma_k)$  为

$$\begin{aligned} \text{Pr}(U_\zeta, \Gamma_k) &= \prod_{i \in \zeta} \text{Pr} \{ \gamma_{SR_i} \geq \kappa \} \prod_{i \notin \zeta} \text{Pr} \{ \gamma_{SR_i} < \kappa \} \text{Pr}(out)^{\zeta-1} \\ &= \prod_{i \in \zeta} e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{SR}}} \prod_{i \notin \zeta} \left( 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{SR}}} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{SR}}} \right)^{\zeta-(k-1)} \\ &= e^{-\frac{\kappa \zeta}{\Omega_{SR}}} \left( 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{SR}}} \right)^{\zeta-k-\zeta} \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $\kappa = \frac{2^{2\mathbb{R}} - 1}{\text{SNR}}$ 。从上式中可以看出:不同的发送次数  $k$  影响到中继节点正确译码的个数  $\zeta$  的分布,通过下文(20)(21)式可知,正确译码的个数  $\zeta$  又影响中继节点到目的端的发送次数  $\bar{N}_{im2}^{RD}$ ,故根据全概率公式总的传输次数可写为

$$\begin{aligned} \bar{N}_{opp}^{SD} &= \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ k + \{ \bar{N}_{opp}^{RD} \mid \Gamma_k \} \right\} \text{Pr}(\Gamma_k) \\ &= \bar{N}_{opp}^{SR} + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \bar{N}_{opp}^{RD} \mid \Gamma_k \right\} \text{Pr}(\Gamma_k) \\ &= \bar{N}_{opp}^{SR} + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \sum_{\zeta=1}^I \sum_{\zeta} \left\{ \bar{N}_{opp}^{RD} \mid U_\zeta, \Gamma_k \right\} \text{Pr}(U_\zeta \mid \Gamma_k) \right\} \text{Pr}(\Gamma_k) \\ &= \bar{N}_{opp}^{SR} + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{\zeta=1}^I \sum_{\zeta} \left\{ \bar{N}_{opp}^{RD} \mid U_\zeta, \Gamma_k \right\} \text{Pr}(U_\zeta, \Gamma_k) \end{aligned} \quad (18)$$

其中第二项中第三个求和表示在第  $k$  次发送中,中继节点中具有  $\zeta$  个元素的  $\binom{I}{\zeta}$  个不同的正确解码子集。

源数据发送的第  $k$  时刻,中继节点有  $\zeta$  个元素正确接收。解码子集进行转发时进行机会中继,从  $U_\zeta$  中选取选择最好的中继节点  $b^*$ ,即  $b^* = \arg \max_{R_i \in U_\zeta} W_i$ ,其中  $W_i = \min \{ \gamma_{R_i, D_1}, \dots, \gamma_{R_i, D_j}, \dots, \gamma_{R_i, D_J} \}$ 。考虑到  $\gamma_{R_i, D_j}$  服从参数为  $\frac{1}{\Omega_{R_i, D_j}}$  的指数分布,则  $W_i$  服从  $\sum_{j=1}^J \frac{1}{\Omega_{R_i, D_j}} = \frac{J}{\Omega_{R_i, D_j}}$  的指数

分布,即  $W_i \sim \Upsilon \left( \frac{J}{\Omega_{R_i, D_j}} \right)$ ,则由  $b^*$  到目的端集合  $D$  进行机会中继的中断概率  $P_{out3}^{RD}$  为

$$\begin{aligned} P_{out3}^{RD} &= P \left\{ W_{b^*} < \frac{2^{2\mathbb{R}} - 1}{\text{SNR}} \right\} = P \left\{ \max_{R_i \in U_\zeta} W_i < \frac{2^{2\mathbb{R}} - 1}{\text{SNR}} \right\} \\ &= \prod_{i=1}^{\zeta} P \left\{ W_i < \frac{2^{2\mathbb{R}} - 1}{\text{SNR}} \right\} = \left( 1 - e^{-\frac{\kappa J}{\Omega_{RD}}} \right)^{\zeta} \end{aligned} \quad (19)$$

考虑到  $P_{out3}^{RD} = 1 - \left( 1 - P_{out3}^{RD_j} \right)^J$ ,则中继节点  $b^*$  到单个目的

端的中断概率为

$$P_{out3}^{RD_j} = 1 - \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{\kappa J}{\Omega_{RD}}} \right)^{\zeta} \right]^{\frac{1}{J}} \quad (20)$$

故若要  $J$  个目的端全部接收到某一数据包,需要中继处的发送次数为

$$\left\{ \bar{N}_{opp}^{RD} \mid U_\zeta, \Gamma_k \right\} = 1 + \sum_{\tau=1}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{j=1}^J \left[ \sum_{\tau=1}^{\tau} \left( P_{out3}^{RD_j} \right)^{\tau-1} \left( 1 - P_{out3}^{RD_j} \right) \right] \right\} \quad (21)$$

将(15)(17)(21)式带入(18)式,即可得 MR-OPP

模式下的平均传输次数  $\bar{N}_{opp}^{SD}$ 。

## 4.2 机会式网络编码模式(MR-OPP-NC)

源端依次持续发送,某一源端数据至少要被一个中继节点收到,同4.1节机会中继模式所示,所需要的平均传输次数为

$$\bar{N}_{opp-nc}^{SR} = \sum_{k=1}^{\infty} k \text{Pr}(N_{opp-nc}^{S,mR} = k) = \sum_{k=1}^{\infty} k \text{Pr}(out)^{\zeta-1} [1 - \text{Pr}(out)] \quad (22)$$

其中  $\text{Pr}(out) = \left( 1 - e^{-\frac{\kappa}{\Omega_{SR}}} \right)^J$ 。

中继节点只对正确译码的数据包进行编码转发。与 MR-OPP 模式对某一数据包仅在能够正确译码的中继节点组中进行机会选择不同,MR-OPP-NC 模式因任一源端到达任一中继节点的中断概率相同,进行网络编码后,所有中继节点携带有相同的信息量,故我们可在全部中继节点中选择最好的中继节点  $b^*$  进行广播发送。某一时刻选取节点的转发数据中可能不包含某一源端数据,但目的端通过其与其他时刻被选中节点的转发数据进行联合解码,仍能以较高概率解出全部源数据,故可认为目的端收到任意  $M$  个数据包就能够进行解码。

此时中继  $R$  到目的端集合  $D$  的中断概率为

$$\begin{aligned} P_{out4}^{RD} &= P \left\{ W_{b^*} < \frac{2^{2\mathbb{R}} - 1}{\text{SNR}} \right\} = P \left\{ \max_{R_i \in R} W_i < \frac{2^{2\mathbb{R}} - 1}{\text{SNR}} \right\} \\ &= \prod_{i=1}^I P \left\{ W_i < \frac{2^{2\mathbb{R}} - 1}{\text{SNR}} \right\} = \left( 1 - e^{-\frac{\kappa J}{\Omega_{RD}}} \right)^I \end{aligned} \quad (23)$$

则中继节点到任一目的节点间的中断概率为

$$P_{out4}^{RD_j} = 1 - \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{\kappa J}{\Omega_{RD}}} \right)^I \right]^{\frac{1}{J}} \quad (24)$$

要确保每个目的端收到  $M$  个编码包,所需传送次数为

$$N_{opp\_nc}^{RD} = M + \sum_{\tau=M}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^J \left[ \sum_{\tau=M}^i \binom{\tau-1}{M-1} \left( P_{out4}^{RD} \right)^{\tau-M} \left( 1 - P_{out4}^{RD} \right)^M \right] \right\} \quad (25)$$

MR-OPP-NC 模式下源端数据广播至目的端集合

所需的平均传输次数为  $\bar{N}_{opp\_nc}^{SD} = \bar{N}_{opp\_nc}^{SR} + N_{opp\_nc}^{RD} / M$ 。

### 5 仿真验证

仿真环境为瑞利慢衰落、加性高斯白噪声信道，源节点数为 6，中继节点数为 8，目的节点数为 12。系统频谱效率  $R = 1\text{bps/Hz}$ ， $\Omega_{SR} = \Omega_{RD} = 1$ 。同时针对部分理论分析曲线，通过 Monte Carlo 仿真进行验证。

图 3 表示的是  $R \rightarrow D$  过程中，单中继节点和使用 {2, 4, 6, 8} 个中继节点进行机会中继时，中继节点到单一目的端的中断概率。从中可以看出，随着参与机会中继的中继节点数目的增加， $R \rightarrow D$  过程中中继节点到单一目的端中断概率会逐步减小。MR-OPP-NC 方案通过使用网络编码，可以使用全部 8 个中继节点进行机会中继，相比使用部分节点进行机会中继的 MR-OPP 模式，中断概率进一步下降，重传次数也随之减小。

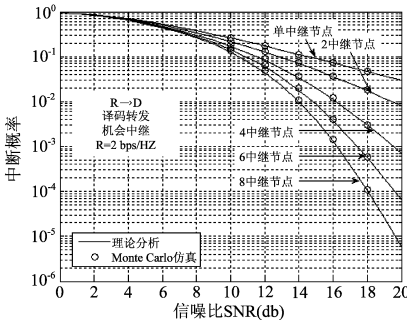


图 3 机会中继时中继节点数目对中断概率的影响  
Fig. 3. Outage probability as a function of the number of relays for opportunistic relaying

图 4 反映了 MSMD 模型不同转发模式下，每个源端平均广播一个数据包所需要的传输次数。从图中可以看出单中继或多中继模型下，使用网络编码后所需的传输次数均小于传统模式所需的传输次数。这是因为网络编码模式下，中继节点发送的编码包能够服务于全部目的端，进而达到节省传输资源的目的。为进一步说明使用网络编码模式所获得的延迟增益，现定义  $G \triangleq \frac{E[N_{NC}]}{E[N_{TM}]}$  为使用网络编码模式相对于传统模式所获得的延迟增益的一种度量方式<sup>[5]</sup>，其更直观的反映了相对于传统模式下的一次传输，网络编码模式下所需的平均传输次数。

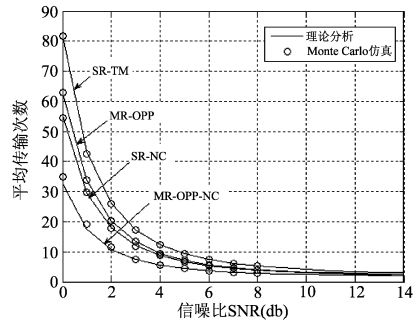


图 4 不同转发模式所需的平均传输次数  
Fig. 4 Average number of required transmissions vs SNR at different relaying mode

图 5 表示源节点为 6，目的节点为 12 时，单中继或多中继模型下，应用网络编码前后所需传输次数的比值  $G$  随信噪比 SNR 的变化情况。图中可以看出随信噪比 SNR 的增加，相对于传统模式中的一次发送，网络编码模式所需的传输次数逐渐增加，故 SR-NC 模式和 MR-OPP-NC 模式所获得的延时增益随信噪比增加而逐渐下降。

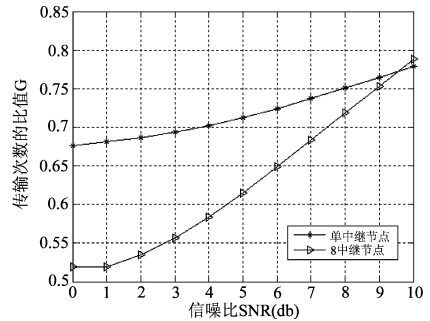


图 5 所需传输次数的比值 G 随 SNR 的变化情况  
Fig. 5 Ratio of required transmission number G vs SNR

图 6 表示源节点为 6，信噪比 SNR=6db 时，单中继或多中继模型下，随着目的端数目的增加，应用网络编码前后所需传输次数比值  $G$  的变化情况。此仿真是模拟移动通信中的下行广播情景，从中可以看出随着终端用户数目的增加，相对传统模式中的一次发送，网络编码模式所需要的传输次数逐渐减小，即采用网络编码所获得的延时增益逐渐增大。

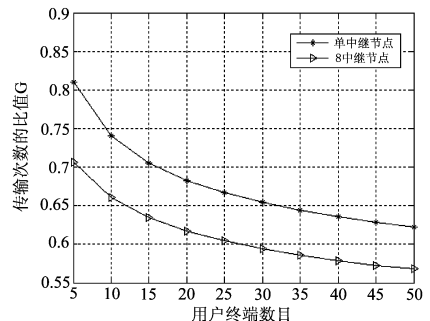


图 6 所需传输次数的比值 G 随目的端数目的变化情况  
Fig. 6 Ratio of required transmission number G vs the number of destinations

## 6 结论

本文主要分析了译码转发机制下 MSMD 模型中网络编码对系统延时的影响。文章首先基于中断概率对单中继节点模型中网络编码的延时性能进行量化分析,然后将该模型推广到多中继模型,提出了基于机会中继的网络编码方案 MR-OPP-NC,并对其延时性能进行量化分析,最后在不同环境下对所提方案的延时性能分别进行理论仿真和 Monte Carlo 仿真,结果表明在 MSMD 多中继模型中 MR-OPP-NC 方案较机会中继方案,能够通过减少数据包的重传次数来获得显著的时延增益。

### 参考文献

- [ 1 ] R. Ahlswede, N. Cai, S-Y. R. Li, and R. W. Yeung. Network Information Flow[ J ]. IEEE Trans. on Information Theory, 2000, 46( 4 ):1204-1216.
- [ 2 ] Y. Chen, S. Kishore, and J. Li. Wireless diversity through network coding[ C ]. Wireless Communications and Networking Conference ( WCNC ), Mar. 2006, vol. 3:1681-1686.
- [ 3 ] Lei Xiao, Thomas E. Fuja, J. Kliewer, and Daniel J. Costello. A Network Coding Approach to Cooperative Diversity[ J ]. IEEE Trans. on Information Theory, October 2007, 53( 10 ): 3714-3722.
- [ 4 ] A. Eryilmaz, A. Ozdaglar, and M. Medard. On Delay performance Gains From network coding[ C ]. 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, March 2006, 864-870.
- [ 5 ] E. Ahmed, A. Eryilmaz, Muriel Medard, and Asuman E. Ozdaglar. On the Scaling Law of Network Coding Gains in Wireless Networks[ C ]. IEEE Military Communications Conference, Oct. 2007.
- [ 6 ] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard and J. Crowcroft. XORs in the Air: Practical Wireless Network Coding[ C ]. IEEE/ACM Transactions on Networking, June 2008, vol. 16, no. 3.
- [ 7 ] Shyamnath Gollakota, Dina Katabi. ZigZag Decoding: Combating Hidden Terminals in Wireless Networks[ C ]. SIGCOMM'08, August 2008.
- [ 8 ] Xijin Yan, Jun Yang, and Zhen Zhang. An outer bound for multisource multisink network coding with minimum cost consideration[ J ]. IEEE Trans. on Information Theory, 2006, 52( 6 ): 2373-2385.
- [ 9 ] Yan X. Yeung R W, Zhang Z. The capacity region for multisource multisink network coding[ C ]. IEEE International

Symposium on Information Theory( ISIT ), June 2007, pp: 116-120.

- [ 10 ] R. Cogill, B. Shrader, and A. Ephremides. Stability analysis of random linear coding across multicast sessions [ C ]. IEEE International Symposium on Information Theory ( ISIT-08 ), Jul. 2008, pp: 31-35.
- [ 11 ] 蒲保兴, 王伟平, 杨路明. 多源多宿组播网络线性网络编码的优化构造[ J ], 系统工程与电子技术, 2010, 32( 2 ):380-385.  
Pu Bao-xin, Wang Wei-pin, Yang Lu-min. Optimal construction of linear network coding for multi-source multi-sink multicast networks [ J ]. Systems Engineering and Electronics, Feb. 2010, 32( 2 ):380-385. ( in Chinese )
- [ 12 ] D. Zhiguo, Ma Zheng and K. K. Leung. Impact of Network Coding on System Delay for Multisource-Multidestination Scenarios. IEEE Trans. on Vehicular Technology, Feb. 2010, 59( 2 ):831-841.
- [ 13 ] Aggelos Bletsas, Ashish Khisti, David P. Reed, and Andrew Lippman. A Simple Cooperative Diversity Method Based on Network Path Selection[ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, March 2006, 24( 3 ): 659-672.
- [ 14 ] T. Ho, R. Koetter, M. Medard, D. R. Karger, and M. Effros. The benefits of coding over routing in a randomized setting[ C ]. IEEE International Symposium on Information Theory, 2003.

### 作者简介

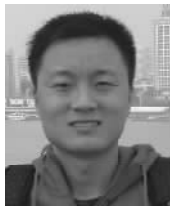


吕振兴(1986-),男,生于河南沈丘,解放军理工大学硕士研究生,要研究方向有信道编码、网络编码。

E-mail:lv\_zhenxing@yahoo.cn



徐友云(1966-),男,生于浙江金华,解放军理工大学教授,博士生导师,主要研究方向有移动通信、认知无线电、网络编码等。E-mail:yyxu@vip.sina.com



许魁(1982-),男,生于安徽蚌埠,解放军理工大学讲师,博士,主要研究方向有无线传输技术、网络编码等。

E-mail:sunning\_breezr@126.com