

基于复数域网络编码的下行传输方案设计

王 静¹, 刘向阳², 李 帅¹, 侯旭阳¹, 王新梅³

(1. 长安大学信息工程学院 西安 710064; 2. 西安通信学院信息服务系 西安 710106;
3. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

【摘要】为进一步提高无线中继网络的信息传输速率,提出了一种基于复数域网络编码的有效下行传输方案。不同于传统的信息传输方案,该方案采用时间维复数域网络编码,中继节点对接收到的多个时隙的信源符号进行复数域网络编码并将编码符号同时发送给用户节点;用户节点接收到所有中继节点的编码符号,采用联合最大似然多用户检测恢复信源符号。性能分析和仿真结果表明,该方案的符号错误概率明显低于传统中继传输方案,且能获得更高的信息传输速率和网络吞吐量。

关键词 复数域网络编码; 下行传输; 网络吞吐量; 符号错误概率; 无线中继网络

中图分类号 TN911.2

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.01.005

Design of Downlink Transmission Scheme Based on Complex Field Network Coding

WANG Jing¹, LIU Xiang-yang², LI Shuai¹, HOU Xu-yang¹, and WANG Xin-mei³

(1. School of Information Engineering, Chang'an University Xi'an 710064;

2. Department of Information Service, Xi'an Communication College Xi'an 710106;

3. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University Xi'an 710071)

Abstract To further improve information transmission rate of wireless relay networks, an efficient downlink transmission scheme based on complex field network coding is proposed in this paper. Specifically, different from traditional information transmission scheme, the proposed downlink transmission scheme employs complex field network coding of time dimension, and each relay encodes the source symbols of multiple time slots received by complex field network coding, and transmits the encoded symbols to destinations simultaneously. Based on the data received from multiple relays, joint maximum likelihood multiuser detection is adopted at destinations to achieve the source symbols. Performance analysis and simulation results show that the symbol error probability (SEP) of the downlink transmission scheme is much less than the conventional relay transmission scheme. Moreover, the scheme can obtain higher information transmission rate and network throughput.

Key words complex field network coding; downlink transmission; network throughput; symbol error probability; wireless relay network

为了满足无线网络在吞吐量、传输速率和分集增益等方面的需求,3GPP启动的LTE-Advanced研究项目将协同多点传输(CoMP)和中继技术作为其基本支撑技术^[1-2]。基于中继技术的协作通信通过减少发射机和接收机间的传输距离,从而抵抗多径衰落,获得更高的数据传输速率、增加无线信道容量并扩展网络覆盖范围^[3],进一步改善无线网络的通信质量。鉴于无线中继技术可为移动通信网络带来上述诸多好处,目前已经成为IMT-Advanced标准的候选技术^[4]。

文献[5]提出了网络编码理论,允许网络中间节点进行编码操作,充分利用已有网络资源进行更加有效的数据传输,进一步证明了基于网络编码的多播传输速率可以达到网络流量的理论上限值。鉴于无线网络具有广播特性,网络节点发送的信息可以被其传输范围内的所有节点接收,目前有很多文献研究无线网络中的网络编码技术。文献[6]基于网络编码技术和物理层广播特性,将无线网络全向传输特性和网络编码技术相结合,提出一种无线网络的分布式传输方案,可以提高无线网络信息交换的

收稿日期:2013-01-09;修回日期:2014-11-13

基金项目:国家自然科学基金(61040005, 61001126, 61271262);中国博士后科学基金(20110491638, 2012T50789);陕西省自然科学基金(2014JQ8300);国家级大学生创新创业训练计划(201310710034)

作者简介:王静(1982-),女,博士,副教授,主要从事网络编码理论方面的研究。

吞吐量。在大规模网络中,传统中继方式降低了频谱的有效性,文献[7]提出了自适应网络编码合作传输协议,将瞬时网络图映射为信道编码图。物理层网络编码是一种新的基于电磁波的网络编码方法,利用同时到达电磁波的叠加特性进行伽罗华域网络编码^[8],不同于数字比特流上的straightforward网络编码算法,中继节点将接收到的已调电磁波在不解调的情况下,直接进行编码(加和)操作,提高网络吞吐量,减少信息传输时间。文献[9]已将物理层网络编码应用到蜂窝网络上下行传输的联合设计中。为进一步提高网络吞吐量,文献[10-11]提出了复数域网络编码,与伽罗华域网络编码相比,复数域网络编码不仅能获得更好的网络吞吐量性能,还可获得完全分集增益,且不受信噪比以及所采用调制方式的限制。

考虑移动终端处于无线蜂窝小区的边界附近,由于无线信道衰落以及基站发送功率的限制,边界附近的终端用户无法可靠地接收基站信息,为此本文考虑在蜂窝小区内设置中继站点,并给出一种基于复数域网络编码的下行传输方案。对本文方案的符号错误概率(symbol error probability, SEP)性能进行仿真发现,随着中继节点数目的增加其SEP相应地减少,当无线网络具有4个中继节点时,该方案可获得较好的SEP性能。对本文方案进行理论分析表明,比传统中继传输方案能获得更高的网络吞吐量,消耗更少的传输时隙。

1 复数域网络编码方案

采用复数域网络编码的信息传输模型^[10-11],具有 n 个用户节点和 m 个中继节点的协作网络如图1所示,在前 m 个时隙, n 个用户节点 d_1, d_2, \dots, d_n 连续地向中继节点 r_1, r_2, \dots, r_m 和基站 s 传输信息,假定 d_i 到中继节点 r_j 的信道衰落系数 $h_{d_i r_j}$ 以及 d_i 到基站 s 的信道衰落系数 $h_{d_i s}$ 在信息传输过程中保持不变,满足 $h_{d_i r_j} \sim \text{CN}(0, \sigma_{d_i r_j}^2)$, $h_{d_i s} \sim \text{CN}(0, \sigma_{d_i s}^2)$ 。定义 $\mathbf{H}_{dr_j} = \text{diag}(h_{d_1 r_j}, h_{d_2 r_j}, \dots, h_{d_n r_j})$, $\mathbf{H}_{ds} = \text{diag}(h_{d_1 s}, h_{d_2 s}, \dots, h_{d_n s})$, 前 m 个时隙, 中继节点 r_j 和基站节点 s 接收到的符号为:

$$y_{dr_j}(t) = \boldsymbol{\theta}_d^T \mathbf{H}_{dr_j} \mathbf{x}(t) + n_{dr_j}(t) = \sum_{i=1}^n \theta_i h_{d_i r_j} x_i(t) + n_{dr_j}(t) \quad (1)$$

$$y_{ds}(t) = \boldsymbol{\theta}_d^T \mathbf{H}_{ds} \mathbf{x}(t) + n_{ds}(t) = \sum_{i=1}^n \theta_i h_{d_i s} x_i(t) + n_{ds}(t) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ ($1 \leq t \leq m$) 表示用户节点 d_1, d_2, \dots, d_n 在时隙 t 发送给中继 r_1, r_2, \dots, r_m 和基站 s 的信息符号; $\boldsymbol{\theta}_d^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ 表示分配给用户节点 d_1, d_2, \dots, d_n 的复数域编码系数向量^[12-13], 当 $n = 2^k$ 时, $\theta_i = e^{j\pi(4p-1)(i-1)/(2n)}$, 当 $n = 3 \times 2^k$ 时, 对任意 $p = 1, 2, \dots, n$, $\theta_i = e^{j\pi(6p-1)(i-1)/(3n)}$ 。 $n_{dr_j}(t)$ 和 $n_{ds}(t)$ 分别表示在时隙 t 中继节点 r_j 和基站节点 s 接收到的信道噪声, 均服从复高斯分布, 即 $n_{dr_j}(t) \sim \text{CN}(0, N_0)$, $n_{ds}(t) \sim \text{CN}(0, N_0)$ 。

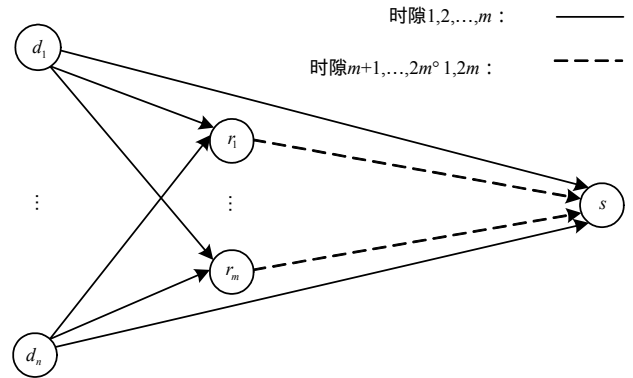


图1 基于复数域网络编码的协作传输模型

在时隙 t ($1 \leq t \leq m$), 中继节点 r_j 进行最大似然检测得到:

$$\hat{\mathbf{x}}_j(t) = \arg \min_{\mathbf{x}(t)} \left\| y_{dr_j}(t) - \boldsymbol{\theta}_d^T \mathbf{H}_{dr_j} \mathbf{x}(t) \right\|^2 = \arg \min_{\mathbf{x}(t)} \left\| y_{dr_j}(t) - \sum_{i=1}^n \theta_i h_{d_i r_j} x_i(t) \right\|^2 \quad (3)$$

经过 m 个时隙, 中继 r_j ($1 \leq j \leq m$) 共检测到 mn 个用户节点符号 $\hat{\mathbf{x}}_j = [\hat{\mathbf{x}}_j^T(1), \hat{\mathbf{x}}_j^T(2), \dots, \hat{\mathbf{x}}_j^T(m)]^T$ 。在时隙 $m+j$, 中继节点 r_j 采用复数域编码系数 $\boldsymbol{\theta}$ 对检测到的用户节点符号 $\hat{\mathbf{x}}_j$ 进行编码操作 $\boldsymbol{\theta}^T \hat{\mathbf{x}}_j$, 并向基站节点发送该编码符号:

$$y_{r_j s} = \sqrt{\alpha_j} h_{r_j s} \boldsymbol{\theta}^T \hat{\mathbf{x}}_j + n_{r_j s} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中, 复数域编码系数 $\boldsymbol{\theta}$ 是 $mn \times 1$ 维向量; 中继节点 r_j 到基站节点 s 的信道衰落系数 $h_{r_j s}$ 满足 $h_{r_j s} \sim \text{CN}(0, \sigma_{r_j s}^2)$; α_j 为功率放大系数, 控制中继节点 r_j 的发送功率; $n_{r_j s}$ 是均值为0, 方差为 N_0 的复高斯噪声。

$2m$ 个时隙后, 基站节点 s 根据接收到的符号 $y_{ds}(t)$ ($t=1, 2, \dots, m$) 和 $y_{r_j s}$ ($j=1, 2, \dots, m$), 采用最大似然检测得到:

$$\hat{\mathbf{x}}_s = \arg \min_{\mathbf{x}^*} \left\{ \sum_{t=1}^m \left\| y_{ds}(t) - \boldsymbol{\theta}_d^T \mathbf{H}_{ds} \mathbf{x}(t) \right\|^2 + \sum_{j=1}^m \left\| y_{r_j s} - \sqrt{\alpha_j} h_{r_j s} \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{x}^* \right\|^2 \right\} =$$

$$\arg \min_{\mathbf{x}'} \left\{ \sum_{t=1}^m \left\| y_{ds}(t) - \sum_{i=1}^n \theta_i h_{d_i s} x_i(t) \right\|^2 + \sum_{j=1}^m \left\| y_{r_j s} - \sqrt{\alpha_j} h_{r_j s} \theta^T \mathbf{x}' \right\|^2 \right\} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{x}' = [\mathbf{x}^T(1), \mathbf{x}^T(2), \dots, \mathbf{x}^T(m)]^T$ 。并行中继 $(n, m, 1)$ 网络采用复数域网络编码和最大似然多用户检测, 可以获得 1/2 符号/信源/时隙(sym/S/TS)的网络吞吐量。

2 基于复数域网络编码的下行传输方案

2.1 (1, 3, 2)无线中继网络

图2所示的蜂窝小区具有3个中继 r_1, r_2, r_3 , 小区基站 s 拟向用户节点 d_1 和 d_2 发送信息, 但由于用户节点 d_1, d_2 处于蜂窝小区边缘, 无线信道衰落以及小区之间干扰的影响导致基站 s 到用户节点 d_1, d_2 的无线链路不可靠, 用户节点无法可靠地接收到基站信息。

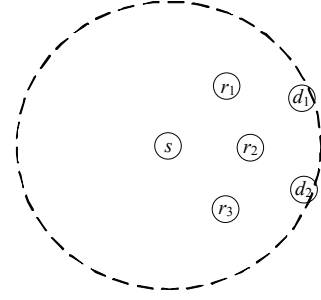


图2 (1, 3, 2)无线中继网络示意图

考虑采用中继节点 r_1, r_2, r_3 协助基站 s 向用户节点 d_1 和 d_2 发送信息, 基于复数域网络编码下行传输方案的时隙分配图如图3所示。时隙1, 基站 s 向中继节点 r_1, r_2, r_3 发送信源符号 x_1 , 此时中继节点 r_1, r_2, r_3 分别接收到:

$$y_{sr_1} = h_{sr_1} x_1 + n_{sr_1} \quad (6)$$

$$y_{sr_2} = h_{sr_2} x_1 + n_{sr_2} \quad (7)$$

$$y_{sr_3} = h_{sr_3} x_1 + n_{sr_3} \quad (8)$$

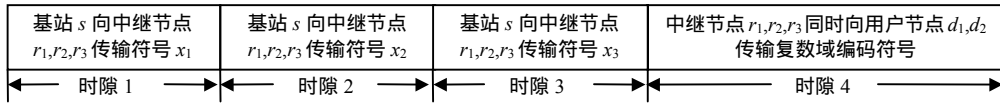


图3 (1, 3, 2)无线中继网络下行信息传输的时隙分配图

式中, $h_{sr_1}, h_{sr_2}, h_{sr_3}$ 分别表示基站 s 到中继节点 r_1, r_2, r_3 的信道衰落系数, 在信息传输过程中保持不变, 满足 $h_{sr_j} \sim \text{CN}(0, \sigma_{sr_j}^2) (j=1, 2, 3)$; $n_{sr_1}, n_{sr_2}, n_{sr_3}$ 表示信道噪声, 均服从高斯分布。中继节点 r_j 对接收到的符号 $y_{sr_1}, y_{sr_2}, y_{sr_3}$ 进行最大似然检测, 分别得到信源符号:

$$\hat{x}_{1_j} = \arg \min_x \left\| y_{sr_j} - h_{sr_j} x \right\|^2 \quad j=1, 2, 3 \quad (9)$$

时隙2和时隙3的信息传输过程同时隙1, 经过3个时隙, 中继节点 r_j 共检测到3个信源符号 $\hat{x}_{1_j}, \hat{x}_{2_j}, \hat{x}_{3_j}$, 进行复数域网络编码得到编码符号为:

$$c_j = \theta_{1_j} \hat{x}_{1_j} + \theta_{2_j} \hat{x}_{2_j} + \theta_{3_j} \hat{x}_{3_j} = \theta_j^T \hat{\mathbf{x}}_j \quad j=1, 2, 3 \quad (10)$$

式中, 编码系数向量 $\theta_j^T = [\theta_{1_j} \ \theta_{2_j} \ \theta_{3_j}]$ 属于复数域, 其选取规则同复数域网络编码^[12-13], 且网络中所有用户节点可以得到该系数向量 θ_j^T , $\hat{\mathbf{x}}_j = [\hat{x}_{1_j} \ \hat{x}_{2_j} \ \hat{x}_{3_j}]^T$ 为中继节点 r_j 检测到的信源符号向量。

在时隙4, 中继节点 r_1, r_2, r_3 将复数域编码符号 c_1, c_2, c_3 同时发送给用户节点 d_1 和 d_2 。此时, 用户节点 $d_j (j=1, 2)$ 接收到的符号为:

$$\begin{aligned} y_{rd_j} &= \sqrt{\alpha_1} \theta_{1_j} h_{r_1 d_j} c_1 + \sqrt{\alpha_2} \theta_{2_j} h_{r_2 d_j} c_2 + \\ &\quad \sqrt{\alpha_3} \theta_{3_j} h_{r_3 d_j} c_3 + n_{rd_j} = \\ &= \sqrt{\alpha_1} \theta_{1_j} h_{r_1 d_j} \theta_{1_j}^T \hat{\mathbf{x}}_1 + \sqrt{\alpha_2} \theta_{2_j} h_{r_2 d_j} \theta_{2_j}^T \hat{\mathbf{x}}_2 + \\ &\quad \sqrt{\alpha_3} \theta_{3_j} h_{r_3 d_j} \theta_{3_j}^T \hat{\mathbf{x}}_3 + n_{rd_j} = \\ &= \sum_{i=1}^3 \sqrt{\alpha_i} \theta_{i_j} h_{r_i d_j} \theta_{i_j}^T \hat{\mathbf{x}}_i + n_{rd_j} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $h_{r_i d_j} \sim \text{CN}(0, \sigma_{r_i d_j}^2)$; $n_{rd_j} \sim \text{CN}(0, N_0)$; $\theta_i (i=1, 2, 3)$ 是分配给中继节点 r_i 的复数域编码系数, 且 α_i 控制中继节点 r_i 的发送功率。通过链路 $r_i \rightarrow d_j$ 的信道训练, 用户节点 d_j 获得参数 $h_{r_i d_j} \sqrt{\alpha_i}$, 采用最大似然多用户检测得到:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{d_j} &= \arg \min_x \left\| y_{rd_j} - (\sqrt{\alpha_1} \theta_{1_j} h_{r_1 d_j} c_1 + \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\alpha_2} \theta_{2_j} h_{r_2 d_j} c_2 + \sqrt{\alpha_3} \theta_{3_j} h_{r_3 d_j} c_3) \right\|^2 = \\ &= \arg \min_x \left\| y_{rd_j} - (\sqrt{\alpha_1} \theta_{1_j} h_{r_1 d_j} \theta_{1_j}^T \mathbf{x} + \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\alpha_2} \theta_{2_j} h_{r_2 d_j} \theta_{2_j}^T \mathbf{x} + \sqrt{\alpha_3} \theta_{3_j} h_{r_3 d_j} \theta_{3_j}^T \mathbf{x}) \right\|^2 = \\ &= \arg \min_x \left\| y_{rd_j} - \sum_{i=1}^3 \sqrt{\alpha_i} \theta_{i_j} h_{r_i d_j} \theta_{i_j}^T \mathbf{x} \right\|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

对上述(1, 3, 2)无线中继网络中基于复数域网络编码的下行信息传输过程进行分析, 基站 s 共通过 4 个时隙向用户节点 d_1 和 d_2 发送了 3 个符号 x_1, x_2, x_3 , 符号速率为 3/4 符号/时隙。

2.2 (1, m, n)无线中继网络

将基于复数域网络编码下行传输方案从(1,3,2)无线中继网络推广到具有 m 个中继节点 r_1, r_2, \dots, r_m 和 n 个用户节点 d_1, d_2, \dots, d_n 的无线中继网络, 其时隙分配如图4所示。前 m 个时隙, 基站 s 向中继节点 r_1, r_2, \dots, r_m 连续发送符号 x_1, x_2, \dots, x_m , 中继节点 $r_j (j=1, 2, \dots, m)$ 对接收到的符号进行检测。具体地, 在时隙 $i (i=1, 2, \dots, m)$, 基站 s 向中继节点 r_j 发送信源符号 x_i , 此时中继节点 r_j 收到的符号为:

$$y_{sr_j} = h_{sr_j} x_i + n_{sr_j} \quad (13)$$

式中, h_{sr_j} 在信息传输过程中保持不变, 满足 $h_{sr_j} \sim CN(0, \sigma_{sr_j}^2)$; n_{sr_j} 服从高斯分布, 即 $n_{sr_j} \sim CN(0, N_0)$ 。中继节点 r_j 进行最大似然检测, 恢复出的信源符号为:

$$\hat{x}_{ij} = \arg \min_x \|y_{sr_j} - h_{sr_j} x\|^2 \quad (14)$$

m 个时隙后, 中继节点 r_j 检测到 m 个信源符号 $\hat{x}_{1j}, \hat{x}_{2j}, \dots, \hat{x}_{mj}$, 采用复数域系数向量 $\theta_j^T = [\theta_{1j} \ \theta_{2j} \ \dots \ \theta_{mj}]$ 对符号 $\hat{x}_j = [\hat{x}_{1j} \ \hat{x}_{2j} \ \dots \ \hat{x}_{mj}]^T$ 进行复数域网络编码, 得到编码符号为:

$$c_j = \theta_{1j} \hat{x}_{1j} + \theta_{2j} \hat{x}_{2j} + \dots + \theta_{mj} \hat{x}_{mj} = \theta_j^T \hat{x}_j \quad (15)$$

在时隙 $m+1$, m 个中继节点 r_1, r_2, \dots, r_m 同时向

n 个用户节点 d_1, d_2, \dots, d_n 发送复数域编码符号 c_1, c_2, \dots, c_m 。用户节点 $d_j (j=1, 2, \dots, n)$ 接收到的符号为:

$$\begin{aligned} y_{rd_j} &= \sqrt{\alpha_1} \theta_1 h_{r_1 d_j} c_1 + \sqrt{\alpha_2} \theta_2 h_{r_2 d_j} c_2 + \dots + \\ &\quad \sqrt{\alpha_m} \theta_m h_{r_m d_j} c_m + n_{rd_j} = \\ &= \sqrt{\alpha_1} \theta_1 h_{r_1 d_j} \theta_1^T \hat{x}_1 + \sqrt{\alpha_2} \theta_2 h_{r_2 d_j} \theta_2^T \hat{x}_2 + \dots + \\ &\quad \sqrt{\alpha_m} \theta_m h_{r_m d_j} \theta_m^T \hat{x}_m + n_{rd_j} = \\ &= \sum_{i=1}^m \sqrt{\alpha_i} \theta_i h_{r_i d_j} \theta_i^T \hat{x}_i + n_{rd_j} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $h_{r_i d_j} \sim CN(0, \sigma_{r_i d_j}^2)$, $n_{rd_j} \sim CN(0, N_0)$, $\theta_i (i=1, 2, \dots, m)$ 是分配给中继节点 r_i 的复数域编码系数, 且 α_i 控制中继节点 r_i 的发送功率。用户节点 d_j 采用最大似然多用户检测得到:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{d_j} &= \arg \min_x \|y_{rd_j} - (\sqrt{\alpha_1} \theta_1 h_{r_1 d_j} c_1 + \sqrt{\alpha_2} \theta_2 h_{r_2 d_j} c_2 + \dots + \\ &\quad \sqrt{\alpha_m} \theta_m h_{r_m d_j} c_m)\|^2 = \arg \min_x \|y_{rd_j} - (\sqrt{\alpha_1} \theta_1 h_{r_1 d_j} \theta_1^T \mathbf{x} + \\ &\quad \sqrt{\alpha_2} \theta_2 h_{r_2 d_j} \theta_2^T \mathbf{x} + \dots + \sqrt{\alpha_m} \theta_m h_{r_m d_j} \theta_m^T \mathbf{x})\|^2 = \\ &= \arg \min_x \left\| y_{rd_j} - \sum_{i=1}^m \sqrt{\alpha_i} \theta_i h_{r_i d_j} \theta_i^T \mathbf{x} \right\|^2 \end{aligned} \quad (17)$$

(1, m, n)无线中继网络采用基于复数域网络编码的下行传输方案, 基站 s 通过 $m+1$ 个时隙向用户节点 $d_j (j=1, 2, \dots, n)$ 发送 m 个符号, 符号速率为 $m/m+1$ 符号/时隙。

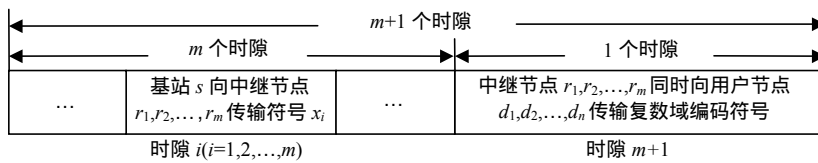


图4 (1, m, n)无线中继网络下行信息传输的时隙分配图

3 性能分析

3.1 网络吞吐量

无线中继网络中用户节点在基站 s 的传输范围以外, 图5给出了传统中继转发下行信息传输方案的时隙分配图。在时隙1, 基站 s 向 m 个中继节点 r_1, r_2, \dots, r_m 发送符号 x ; 时隙2, 中继节点 $r_i (i=1, 2, \dots, m)$ 将检测到的信源符号 \hat{x}_i 转发给所有用户节点 d_1, d_2, \dots, d_n 。用户节点 $d_j (j=1, 2, \dots, n)$ 接收到的符号为:

$$\begin{aligned} y_{rd_j} &= \sqrt{\alpha_1} h_{r_1 d_j} \hat{x}_1 + \sqrt{\alpha_2} h_{r_2 d_j} \hat{x}_2 + \dots + \\ &\quad \sqrt{\alpha_m} h_{r_m d_j} \hat{x}_m + n_{rd_j} = \sum_{i=1}^m \sqrt{\alpha_i} h_{r_i d_j} \hat{x}_i + n_{rd_j} \end{aligned} \quad (18)$$

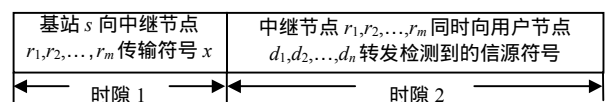


图5 传统中继转发下行传输方案的时隙分配图

采用最大似然检测, 用户节点 d_j 检测到的信源符号为:

$$\hat{x}_{d_j} = \arg \min_{x \in A} \left\| y_{rd_j} - \left(\sqrt{\alpha_1} h_{r_1 d_j} x + \sqrt{\alpha_2} h_{r_2 d_j} x + \dots + \sqrt{\alpha_m} h_{r_m d_j} x \right) \right\|^2 = \arg \min_{x \in A} \left\| y_{rd_j} - \sum_{i=1}^m \sqrt{\alpha_i} h_{r_i d_j} x \right\|^2 \quad (19)$$

基于传统中继转发的下行信息传输方案中, 基站 s 通过两个时隙向用户节点发送一个信源符号, 符号速率为 $1/2$ 符号/时隙。基于复数域网络编码的下行信息传输方案中, 基站 s 在前 m 个时隙连续地向中继节点 r_1, r_2, \dots, r_m 发送 m 个信源符号 x_1, x_2, \dots, x_m , 在时隙 $m+1$, 中继节点 r_1, r_2, \dots, r_m 同时向所有用户节点转发 m 个编码符号 c_1, c_2, \dots, c_m 。采用最大似然多用户检测, 用户节点将检测到 m 个信源符号。由于基站 s 通过 $m+1$ 个连续时隙向用户节点发送 m 个信源符号, 信源符号速率为 $m/m+1$ 符号/时隙。

通过对上述方案的网络吞吐量性能进行分析, 当无线中继网络存在单一中继节点时, 基于复数域网络编码的下行信息传输方案获得与传统中继转发方案相同的网络吞吐量 $1/2$ 符号/时隙; 当中继节点数 $m \geq 2$ 时, 基于复数域网络编码的下行信息传输方案的网络吞吐量为 $m/m+1$ 符号/时隙, 大于传统中继转发方案。

3.2 符号错误概率

采用C++语言进行仿真实验, 对不同SNR下基于复数域网络编码下行传输方案的SEP进行比较。仿真过程中采用性能最好的BPSK调制。

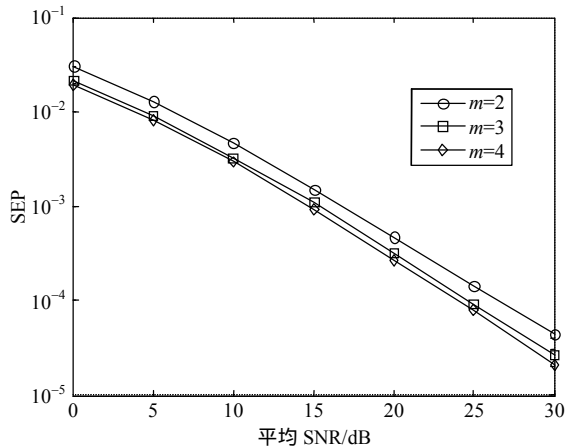


图6 基于复数域网络编码下行传输方案的SEP

基于复数域网络编码下行传输方案的SEP仿真结果如图6所示。从SEP曲线可以看出, 无线中继网络具有 m 个中继节点时, 随着SNR增加SEP降低。进一步, 随着无线网络中继节点数目 m 增加, 编码增益相应地增加, 但其增加量不断地减小。从图7可以看出, 具有 $m = 4, 5, 6$ 个中继节点的无线网络, 采用复数域网络编码下行传输方案将得到近似相等

的SEP, 其编码增益也近似相等。综合图6和图7得到, 随着无线网络中继节点数 m 增加, SEP减少; 但当中继节点数增加到 $m = 4$ 时, SEP不再减少, 相应的编码增益不再增加, 此时无线中继网络采用基于复数域网络编码的下行传输方案已获得较好的传输性能。可见, 蜂窝小区中放置中继节点帮助基站传输信息, 并非数量越多性能越好, 设置较多的中继节点将增加传输功率消耗以及用户节点的数据处理复杂度, 且将引入较多的传输时延。

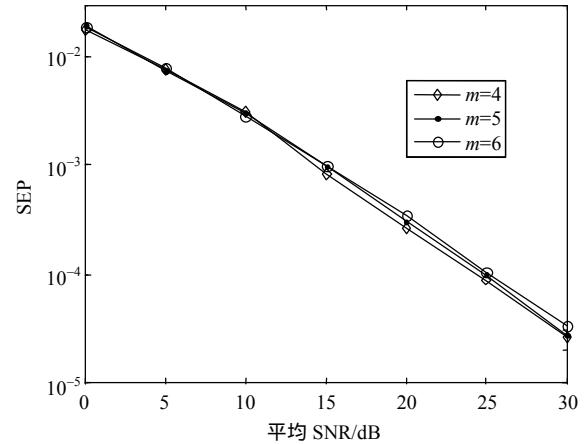


图7 具有 $m = 4, 5, 6$ 个中继节点的无线网络采用复数域网络编码下行传输方案的SEP

当中继节点数 m 增加时, 用户节点将检测来自中继节点的多个复数域编码符号 $c_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 根据式(15), 通过复数域编码符号, 可以获得信源符号的多个副本, 提高了用户节点检测的可靠性, 基于复数域网络编码下行传输方案的SEP相应地减小, 该结果与图6中的SEP性能曲线一致。

在仿真过程中, 中继节点上得到的复数域编码符号 c_i 可以看做是由 m 个BPSK星座构成的和星座中的星座点。在时隙 $m+1$, m 个中继节点 r_1, r_2, \dots, r_m 同时向用户节点发送复数域编码符号 c_1, c_2, \dots, c_m 。从星座映射的角度看, 基于复数域网络编码的下行传输方案在中继节点将 $m \times m$ 个BPSK星座映射到用户节点 D 上的一个更大的和星座。根据文献[14], SEP由两个星座点之间的最小欧式距离 d_{\min} 决定, 且随着最小欧式距离 d_{\min} 的减小而增大。考虑中继节点发送信号能量归一化, 当中继节点数 m 增加时, 中继节点发送符号的最小欧式距离 d_{\min} 减少, SEP相应地增加。综合用户节点检测的可靠性和中继节点发送符号的最小欧式距离两方面的影响, 随着无线网络中继节点数 m 增加, 编码增益增加, SEP相应地减少。但当中继节点数增加到 $m = 4$ 时, 相应地编码增益不再增加, 此时将获得较好的传输性能。

无线中继网络采用传统中继传输方案的SEP仿真结果如图8所示。当中继节点数 m 增加时, SEP相应地增加, 编码增益减少。从式(18)可以得到

$$y_{rd_j} = \sum_{i=1}^m \sqrt{\alpha_i} h_{rd_j} \hat{x}_i + n_{rd_j}, \text{ 用户节点 } d_j (j=1, 2, \dots, n)$$

从 m 条独立路径接收到信源符号 x 的 m 个副本无法分开, 因此用户节点无法检测到多个独立的信源符号 x 的副本, 无法获得 m 阶分集增益。随着中继节点数 m 的增加, 中继节点上参与复数域网络编码的信源符号数目也随之增加, 同时增加了中继节点上复数域网络编码的复杂度和用户节点上的检测复杂度。同时, 用户节点的检测可靠性降低, SEP相应地增加。对图6和图8进行对比分析, 无线中继网络采用基于复数域网络编码的下行传输方案其SEP较低, 编码增益远远高于传统中继传输方案。

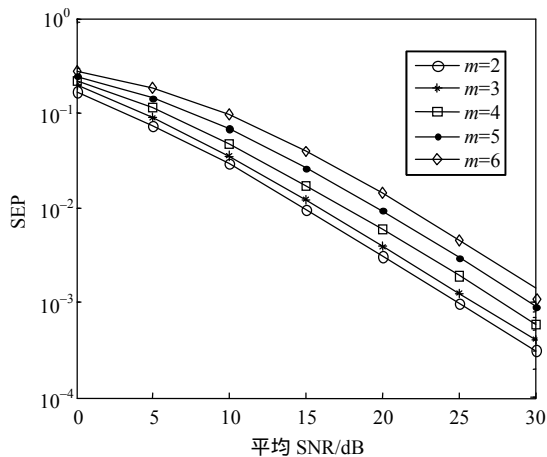


图8 传统中继传输方案的SEP

4 结束语

由于无线信道衰落以及基站发送功率的限制, 蜂窝小区边界处的移动终端无法可靠地接收基站信息, 考虑在蜂窝小区内设置中继站点, 提出一种基于复数域网络编码的下行传输方案。该方案的SEP明显低于传统中继转发方案, 且该方案将获得更高的信息传输速率和网络吞吐量。需要指出, 由于提出的下行传输方案里中继节点需进行复数域网络编码, 而且用户节点需对复数域编码符号进行最大似然检测, 相对于传统中继转发方案, 中继节点和用户节点执行的复杂度略高, 消耗的时间也比传统方案略多。

本文研究得到了西安市科技计划项目(CXY1340(4))的支持, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] SAWAHASHI M, KISHIYAMA Y, MORIMOTO A, et al. Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3): 26-34.
- [2] TEYEB O, FREDERIKSEN F, PHAN V V, et al. User multiplexing in relay enhanced LTE-advanced networks[C]// 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring). Taipei, China: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [3] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(10): 2415-2425.
- [4] YANG Y, HU H, XU J, et al. Relay technologies for WiMAX and LTE-Advanced mobile systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(10): 100-105.
- [5] AHLSTEWED R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [6] WU Y, CHOU P A, KUNG S Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast[C]//Proceedings of the 2005 Conference on Information Sciences and Systems. Baltimore: IEEE Press, 2005.
- [7] BAO X, LI J. Adaptive network coded cooperation (ANCC) for wireless relay networks: matching code-on-graph with network-on-graph[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(2): 574-583.
- [8] ZHANG S, LIEW S C, LAM P. On the synchronization of physical-layer network coding[C]//Proceedings of the 2006 IEEE Information Theory Workshop. Chengdu: IEEE Press, 2006: 404-408.
- [9] ZHIGUO D, KRIKIDIS I, THOMPSON J, et al. Physical layer network coding and precoding for the two-way relay channel in cellular systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(2): 696-712.
- [10] WANG T, GIANNAKIS G B. Complex field network coding for multiuser cooperative communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(3): 561-571.
- [11] WANG T, GIANNAKIS G B. High-throughput cooperative communications with complex field network coding[C]// The 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems. Baltimore, USA: IEEE Press, 2007: 253-258.
- [12] XIN Y, WANG Z, GIANNAKIS G B. Space-time diversity systems based on unitary constellation-rotating precoders [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '01). Salt Lake City, UT: IEEE Press, 2001: 2429-2432.
- [13] VISHWANATH R, BHATNAGAR M R. Optimum linear constellation precoding for space time wireless systems[J]. Wireless Personal Communications, 2007, 40(4): 511-521.
- [14] BERNARD S. Digital communications: fundamentals and applications[M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2001.