

# 基于分层多跳物理层网络编码的超密集网络吞吐量增强方法

冀保峰<sup>1,2,3</sup> 王一丹<sup>1</sup> 邢冰冰<sup>1</sup> 李玉琦<sup>1</sup> 高宏峰<sup>1</sup> 韩琰琰<sup>2</sup>

(河南科技大学信息工程学院 河南 洛阳 471023)<sup>1</sup>

(中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室 北京 100029)<sup>2</sup>

(电子科技大学航空航天学院 成都 611731)<sup>3</sup>

**摘要** 超密集网络通过小小区的密集部署提升了空间的复用增益,成为解决未来 5G 数据流量 1000 倍及用户体验速率 10~100 倍提升的有效方案。然而,小小区密集部署带来的干扰问题以及小基站的较小覆盖范围导致的信号衰落,会减小网络容量并降低用户体验。为了同时考虑未来 5G 超密集组网“覆盖”和“容量”的问题,提出了基于分层多跳物理层网络编码的吞吐量增强方法。该方法利用超密集网络多节点的异构分层特征,结合多跳物理层网络编码的高频谱效率特性,在无需源节点和终端节点直达链路的情况下,有效提升了超密集网络的吞吐量,节省了源到终端节点的时间开销,且降低了系统的干扰。最后,通过仿真验证了所提方案的有效性和正确性,相比传统方案有效提升了系统性能。

**关键词** 超密集网络,多跳传输,分层网络,物理层网络编码,吞吐量,误码率

中图分类号 TN925 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.07.008

## Enhancement Method of Throughput in Ultra-dense Network Based on Hierarchical Multi-hop Physical Layer Network Coding

Ji Bao-feng<sup>1,2,3</sup> WANG Yi-dan<sup>1</sup> XING Bing-bing<sup>1</sup> LI Yu-qi<sup>1</sup> GAO Hong-feng<sup>1</sup> HAN Cong-cheng<sup>2</sup>

(College of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)<sup>2</sup>

(School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)<sup>3</sup>

**Abstract** The ultra-dense network enhances the reuse of space through the dense deployment of small cells, which is an effective solution to solve the data flow by 1000 times and the user experience rate of 10~100 times in the future 5G. However, the interference problem caused by small-area intensive deployment and the multi-hop transmission caused by the small coverage of small base stations will reduce the network capacity and user experience. Therefore, in order to consider the problem of “overlay” and “capacity” of ultra-dense networks in 5G, a throughput enhancement method based on hierarchical multi-hop physical layer network coding was proposed. By using the heterogeneous hierarchical feature of multi-node and combining with the high spectral efficiency characteristics of multi-hop physical layer network coding, the throughput in ultra-dense network can be enhanced effectively, the time slot from source node to the terminal node can be saved and the interference of system can be reduced without the need for the direct link from source node to terminal node in the case. Finally, this paper verified the validity and correctness of the proposed scheme and the system performance was improved effectively compared with the traditional scheme.

**Keywords** Ultra-dense network, Multi-hop transmission, Hierarchical network, Physical layer network coding, Throughput, Bit error rate

到稿日期:2018-06-20 返修日期:2018-10-19 本文受国家十三五预研基金(6140311030207),国家自然科学基金(61801170, 61501405, 61801435, U1404615, 61671144, 41605122, 61701172, U1504619),教育部产学合作项目(201602011005, 201702135098),中国博士后基金(2018M633351),河南省科技厅自然科学基金(162300410096),河南省高校创新人才项目(17HASTIT025),河南省国际联合项目(172102410072),西藏民族大学西藏文化传承发展协同创新中心 2018 年招标第 21 号课题,2018 年西藏自治区自然科学基金资助。

冀保峰(1985—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信、协同传输,E-mail:fengbaoji@126.com(通信作者);王一丹(1992—),女,硕士,主要研究方向为短距离无线通信;邢冰冰(1993—),女,硕士生,主要研究方向为无线通信、协同传输;李玉琦(1993—),男,硕士生,主要研究方向为无线通信;高宏峰(1966—),女,博士,教授,主要研究方向为编码理论;韩琰琰(1983—),女,博士,研究员,主要研究方向为通信及波导探测。

## 1 引言

随着智能终端的普及和移动通信技术的快速发展,无线通信的数据业务量呈爆炸式增长,对网络吞吐量的要求也不断提高<sup>[1]</sup>。5G作为下一代移动通信系统,在网络容量、峰值速率、频谱效率、端到端时延、网络综合能效等方面提出了更高的性能指标要求<sup>[2]</sup>。其中,无线网络的密集化是一种可行的解决方案<sup>[3-4]</sup>,而超密集网络(Ultra-Dense Network,UDN)技术成为满足5G高吞吐量要求的有效方法,可为网络容量提升、室内覆盖增强以及补盲补热场景提供有效的解决途径<sup>[5]</sup>。UDN是指低功率小基站(Small Cell)组成的多层异构网络(Heterogeneous Network, HetNet),采用增加低功率小基站部署密度的方法实现小小区的超密集部署,最大程度地提升全网容量<sup>[6]</sup>。然而,在超密集网络中,各个小基站距离很近,且使用相同的频谱资源,各个小区之间会造成很大的干扰,因此对小区内干扰(Inter-Cell Interference, ICI)进行有效管理是UDN面临的重要挑战<sup>[7]</sup>。

网络编码在无线网络环境中的理论和实际应用中均取得了非常重要的成果<sup>[8-10]</sup>,但大多数研究并未考虑对无线频谱资源的进一步有效利用,即未考虑如何降低传输的资源开销,以及如何提高系统吞吐量及频谱效率等问题。尽管网络编码的兼容能力以及提取信息的能力使得有效利用无线网络中的干扰成为可能,但一直未发现有效的解决办法。为了减小相邻节点间信号的相互干扰并提升网络吞吐量,Zhang等<sup>[11]</sup>于2006年首次提出了物理层网络编码(Physical Layer Network Coding, PNC)的概念。PNC可与协作中继技术相结合,对于同时接收到的相互叠加的电磁波,中继节点将其映射为相应数据比特的异或,而并不将其视为干扰,这样可有效提高系统的吞吐量。文献<sup>[12]</sup>提出PNC的基本思想是利用电磁波彼此叠加时信号的混合,而接收机处多个发射机的同时传输会导致接收信号的加权和呈网络编码形式,可将接收信号变换并映射到其他形式的网络编码,从而在降低干扰的同时显著提高系统的吞吐量。

传统PNC带来的网络容量优势已经获得学者们的广泛研究。文献<sup>[13]</sup>分析推导了考虑干扰和保留区域影响的PNC实现的端到端速率,结果表明:在较大无线网络的背景下考虑双向中继时,PNC对单向中继所带来的收益可能会消失。文献<sup>[14]</sup>提出无线多源信息的PNC,针对多源中继系统的典型模拟网络编码和数字编码的特征和性能,研究了协同网络编码的性能极限。但在以上研究中,PNC仅用于简单的网络拓扑,尤其是双向中继信道(Two-way Relay Channel, TRC)和多向中继信道,并未考虑多跳中继的情况。由于超密集网络中小小区的覆盖面积较小,通常需要多跳传输来实现源到目的端的通信,因此需要考虑PNC在多跳网络中的使用。文献<sup>[15]</sup>研究无线多跳网络中PNC的实现方案,针对放大转发和去噪转发方式的PNC,提出自适应传输速率的方案。文献<sup>[16]</sup>深入研究PNC及其在无线双向多中继协作通信系统中的性能,提出联合中继选择和注水功率分配策略。文献<sup>[17]</sup>研究了频率非选择性瑞利衰落信道中的PNC系统的容量问题,通过理论分析得出当所有中继链路特性均属于同一情况时的中断概率闭合解析式。在文献<sup>[18]</sup>中,Burr从

代数角度分析了不同编码方法对PNC的影响,虽然考虑了多个中继时PNC的使用,但并未说明所提方法相比于其他中继处理方法对多中继多跳网络性能的影响。

因此,面对当前日益增加的数据业务量需求,尤其是大规模站点同时传输的场景,本文提出了基于分层多跳PNC的超密集网络吞吐量增强方法,以有效提升网络的吞吐量并降低网络的干扰。最后,通过与中继直接译码转发方案的性能比较,验证所提中继处理方案的优势。

## 2 系统模型

图1给出一个随机部署的UDN示例,已知区域中包含集合为 $m = \{1, \dots, M\}$ 的多个小基站(Small Base Station, SBS)和集合为 $k = \{1, \dots, K\}$ 的多个移动用户(Mobile Station, MS),其中 $M \geq K$ 。每个SBS仅服务一个用户,每个用户以最佳信道质量接入(访问)SBS,即 $l(k) = \arg \min_{j \in m} \{g_{j,k}\}$ ,其中, $l(k)$ 是服务于第 $k$ 个MS的SBS指标, $g_{j,k}$ 是第 $j$ 个SBS到第 $k$ 个MS的信道增益。通信链路考虑路径损耗、阴影和小尺度衰落影响。

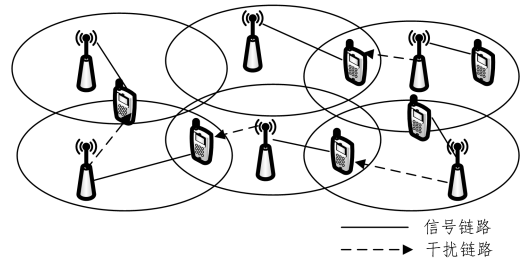


图1 UDN的示例( $M=K=6$ )

Fig. 1 Example of UDN ( $M=K=6$ )

本文假设有 $N$ 个正交资源块(Resource Block, RB)(例如正交子载波和时隙)分配给 $K$ 个小区。令变量 $\rho_{k,n} \in \{0, 1\}$ 表示为小区 $k$ 分配的正交RB,则:

$$\rho_{k,n} = \begin{cases} 1, & \text{用户 } k \text{ 使用 } n \text{ 个 RB} \\ 0, & \text{用户 } k \text{ 不使用 } n \text{ 个 RB} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $k=1, \dots, K; n=1, \dots, N$ 。

小区 $k$ 分配到的全部RB的集合表示为 $Q_k \triangleq \{n | \rho_{k,n} = 1\}, k=1, \dots, K$ ,第 $k$ 个MS的平均数据速率为 $R_k = \frac{1}{N} \sum_{n \in Q_k} \log(1 + \gamma_k^n)$ ,其中 $\gamma_k^n$ 是第 $k$ 个MS在第 $n$ 个RB上的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR),可表示:

$$\gamma_k^n = \frac{P_{l(k)}^n g_{l(k),k}}{\sum_{j \neq l(k)} P_j^n g_{j,k} + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $P_{l(k)}^n$ 表示第 $j$ 个BS在第 $n$ 个RB上的发送功率。如果 $\forall n \in Q_j$ ,则 $P_{l(k)}^n = P$ ,否则 $P_{l(k)}^n = 0$ 。 $P$ 为最大发送功率, $\sigma^2$ 为噪声功率。

## 3 分层多跳PNC编译码方法

### 3.1 分层多跳PNC编码

分层网络模型如图2所示。该系统包括 $K$ 个信源( $S_1$ 至 $S_K$ ),需经过 $P$ 层的中继到达目的端。其中,第 $p$ 层包含 $L(p)$ 个中继,即 $R_1^{(p)}$ 到 $R_{L(p)}^{(p)}$ 。假定中继 $R_l^{(p)}$ 和 $R_m^{(p)}$ ( $m \in C_l^{(p)}$ )相连,而 $C_l^{(p)}$ 表示 $R_l^{(p)}$ 的连接集合,其物理意义表示中继可接

收信道的节点集合。第一层中继节点与信源相连接,基于半双工限制,则每层中继节点不能同时收发,中继只接收来自前层中继的瞬时信号。

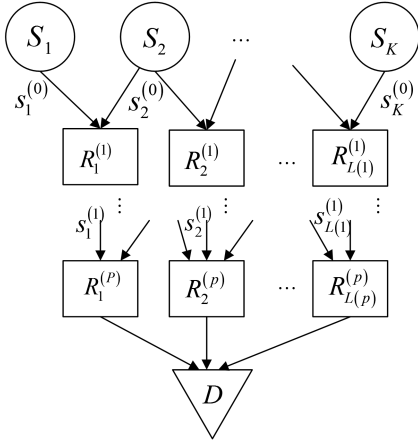


图2 分层网络模型

Fig.2 Hierarchical network mode

$R_i^{(p)}$  发射符号表示为  $s_i^{(p)}$ , 信源  $S_i$  发射符号为  $s_i^{(0)}$  或  $s_i$ 。节点的接收信号为  $y_i^{(p)}$ , 发射信号为  $x_i^{(p)}$ 。本文中的符号、接收信号和发射信号的矢量分别表示为  $\mathbf{s}^{(p)}$ ,  $\mathbf{y}^{(p)}$  和  $\mathbf{x}^{(p)}$ 。在矩阵  $\mathbf{H}^{(p)}$  中,第  $p$  层接收的信号与第  $p-1$  层发送的信号相关。中继  $R_i^{(p)}$  进行译码转发,其从上一层中继接收的信号可写为:  $f_i^{(p)}(\{s_m^{(p-1)}; m \in C_i^{(p)}\})$ 。该函数为线性函数,可表示为:

$$f_i^{(p)}(s_{m_1}^{(p-1)}, s_{m_2}^{(p-1)}, \dots, s_{m_{|C_i^{(p)}}}^{(p-1)}) = a_{im_1}^{(p-1)} \odot s_{m_1}^{(p-1)} \oplus a_{im_2}^{(p-1)} \odot s_{m_2}^{(p-1)} \oplus \dots \oplus a_{im_{|C_i^{(p)}}}^{(p-1)} \odot s_{m_{|C_i^{(p)}}}^{(p-1)} \quad (3)$$

其中,  $m_1, m_2, \dots, m_{|C_i^{(p)}} \in C_i^{(p)}$ ,  $a_{im_1}^{(p-1)}, a_{im_2}^{(p-1)}, \dots, a_{im_{|C_i^{(p)}}}^{(p-1)}$  是函数的系数。符号和系数来自一个域或环,其中  $\odot$  和  $\oplus$  分别表示运算乘法和加法。第  $p$  层的符号矢量表示为  $\mathbf{s}^{(p)} = \mathbf{F}^{(p)} \mathbf{s}^{(p-1)}$ , 其中矩阵  $\mathbf{F}$  中的非零元素表示各个中继的连接情况。

### 3.2 分层多跳 PNC 译码

在目的端恢复所求信源数据是必要的。考虑一个特定的目的节点,能恢复信源的子集表示为  $A$ , 剩余不能恢复信源的子集为  $\bar{A}$ 。需要考虑网络编码函数  $\mathbf{F}$  的代数要求来确保精确译码的能力:  $A$  中信源符号的任意组合会导致目的地接收除  $\bar{A}$  之外符号的不同组合。要求:

$$\mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{s}^A \\ \mathbf{s}^{\bar{A}} \end{bmatrix} \neq \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{s}^{A'} \\ \mathbf{s}^{\bar{A}'} \end{bmatrix}, \forall \mathbf{s}^A \neq \mathbf{s}^{A'}, \mathbf{s}^{\bar{A}}, \mathbf{s}^{\bar{A}'}, \text{or};$$

$$\mathbf{B}^A \mathbf{s}^A - \mathbf{B}^A \mathbf{s}^{A'} \neq \mathbf{B}^{\bar{A}} \mathbf{s}^{\bar{A}'} - \mathbf{B}^{\bar{A}} \mathbf{s}^{\bar{A}}, \forall \mathbf{s}^A \neq \mathbf{s}^{A'}, \mathbf{s}^{\bar{A}}, \mathbf{s}^{\bar{A}'} \quad (4)$$

本文已经指出由于两个运算未定义,  $\mathbf{F}$  的代数框架虽然不要求是一个域,但至少与环一样。如果假设这个环或域是分布式的,则可写上式写为:

$$\begin{cases} \mathbf{B}^A (\mathbf{s}^A - \mathbf{s}^{A'}) \neq \mathbf{B}^{\bar{A}} (\mathbf{s}^{\bar{A}'} - \mathbf{s}^{\bar{A}}) \\ \mathbf{B}^A \mathbf{s}^A \neq \mathbf{B}^{\bar{A}} \mathbf{s}^{\bar{A}'}, \forall \mathbf{s}^A \neq \mathbf{0}, \mathbf{s}^{\bar{A}'} \end{cases} \quad (5)$$

此外,上式中等式左边可以为零(因此可能与等式右边相等)。如果  $\mathbf{B}^A$  中至少有一个列  $\mathbf{b}$ , 且  $\mathbf{s}^A$  和  $\mathbf{s}^{A'}$  所对应的元素为  $s$  和  $s'$ , 则  $\mathbf{b}\mathbf{s} = \mathbf{b}\mathbf{s}'$ ,  $s \neq s'$ 。这反过来要求  $\mathbf{b}$  的非零元素  $b$  必须使  $\mathbf{b}\mathbf{s} = \mathbf{b}\mathbf{s}'$ ,  $s \neq s'$ 。当  $b$  是与任意  $s$  或  $s'$  相关的零因子时,该情况成立;如果  $b$  有一个独特的逆,则该情况不成立。

因此,确保精确译码需满足以下条件:

- 1)  $\mathbf{B}^A$  中的列都不为 0;
- 2)  $\mathbf{B}^A$  的非零元素是可逆的;
- 3)  $\mathbf{B}^A$  的每一列与  $\mathbf{B}^{\bar{A}}$  的列是线性无关的。

注意,该条件适用于合成矩阵  $\mathbf{B}$  的元素,而不是各个中继的函数系数。

## 4 分层多跳 PNC 的 UDN 吞吐量增强方法的实现

### 4.1 基于传统物理层网络编码的 TRC

图 3(a) 为 TRC 网络模型,也叫蝴蝶网络。两个终端通过一个中继交换信息,只考虑第一个终端的信息  $S_1$  和它在第二个终端接收的信号  $D_1$ ,  $D_1$  的连接装置为中继  $R_1^{(1)}$ 。  $S_2$  的网络结构与  $S_1$  类似。

只有一个中继的简单分层网络的目的端连接装置的符号矢量  $\mathbf{s}^D$  可表示为:

$$\mathbf{s}^D = \begin{bmatrix} s_1^{(1)} \\ s_2^{(0)} \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{s} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1^{(0)} \\ s_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

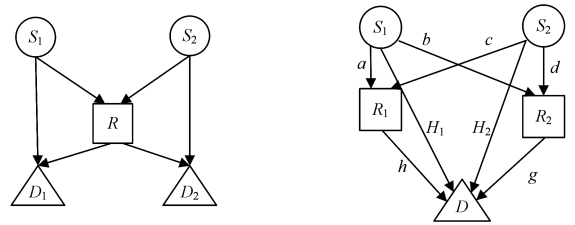
$$s_{D1} = s_1 \oplus s_R = s_1 \oplus (s_1 \oplus s_2) = s_2 \quad (7)$$

$$s_{D2} = s_2 \oplus s_R = s_2 \oplus (s_1 \oplus s_2) = s_1 \quad (8)$$

当有两个中继时,采用传统 PNC 的信道模型如图 3(b) 所示。目的端连接装置的  $\mathbf{s}^D$  也可写为:

$$s_{D1} = s_1 \oplus s_{R1} = s_1 \oplus (s_1 \oplus s_2) = s_2 \quad (9)$$

$$s_{D2} = s_2 \oplus s_{R2} = s_2 \oplus (s_1 \oplus s_2) = s_1 \quad (10)$$



(a) 简单 TRC 网络模型

(b) 两中继 TRC 模型

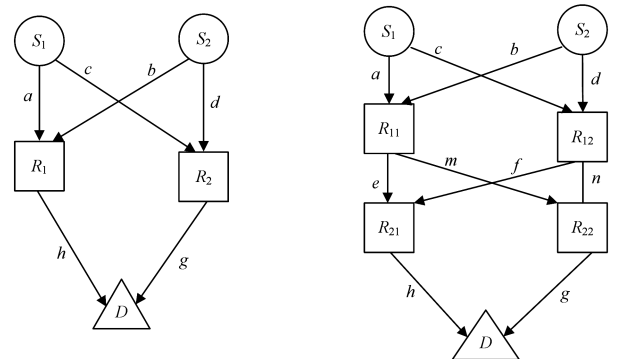
图3 简单 TRC 网络模型与两中继 TRC 模型

Fig.3 Simple TRC network model and two relay TRC mode

### 4.2 分层无线网络

由于多层网络结构中信道衰落较大,直达径的参数通常无法获得,因此需要考虑通过分层网络结构获得输入的信源信号。

单层拓扑结构如图 4(a) 所示,该结构为分层无线网络,通常称为 2:2:1 网络:两个信源,单层的两个中继和一个目的端。在这种情况下,假设目的端与两个信源都相关。



(a) 单层分层网络

(b) 两层分层网络

图4 分层无线网络的拓扑

Fig.4 Hierarchical wireless network topology

目的端的连接装置是两个中继的输出,可表示为:

$$\mathbf{s}^D = \mathbf{s}^{(1)} = \mathbf{A}^{(1)} \mathbf{s}^{(0)} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1^{(0)} \\ s_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{y}^D = \mathbf{A} \mathbf{s} = \begin{bmatrix} ah & bh \\ cg & dg \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

令  $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{(1)}$ 。由于  $D$  与  $s_1^{(0)}$  和  $s_2^{(0)}$  都相关,因此  $\mathbf{B}^A = \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}$  的两列必须是非零的,且它的非零系数可逆。这个拓扑比双向中继信道更加灵活,因为有 4 个系数而不是 2 个,所以它更适应于信道衰落。

将单层分层网络扩展为两层中继网络,则形成  $2:2:2:1$  网络,如图 4(b)所示。目的端的连接装置是 4 个中继的输出,可表示为:

$$\mathbf{B}^{(1)} = \mathbf{A}^{(2)} \mathbf{A}^{(1)} = \begin{bmatrix} e & f \\ m & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} ae+cf & be+df \\ am+cn & bm+dn \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{y}^D = \mathbf{B} \mathbf{s} = \begin{bmatrix} (ae+cf)h & (be+df)h \\ (am+cn)g & (bm+dn)g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(13)要求  $\mathbf{A}^{(1)}$  和  $\mathbf{A}^{(2)}$  都为满秩,但需系数是可逆的或非零,是指系数的乘积和而不是系数本身。该分层网络方法可推广到多层分层网络。

## 5 仿真分析

本文基于第 3 节的网络模型来分析分层多跳 PNC 的优势。假设链路上的信道服从独立同分布的(i. i. d)Rayleigh 分布,采用 BPSK 方法对发射信号和接收信号进行调制解调。中继的处理采用系统模型中单天线多中继系统的方法。考虑信道在分别服从  $(0, \sqrt{2}/2)$ ,  $(0, 1)$  和  $(0, \sqrt{2})$  复高斯分布的情况下,两种分层多跳 PNC 方法与中继直接译码转发方法的吞吐量和误码率比较,采用 MATLAB 工具进行仿真。

图 5 和图 6 为用户发射功率相同条件下,两种分层多跳 PNC 方法与中继直接译码转发方法的系统吞吐量比较。用户发射功率设为 1 W,由图可知,吞吐量随信噪比的增加而增加。Rayleigh 信道的方差值越小,吞吐量越大。与中继直接译码转发方法相比,单层分层网络方法和两层分层网络方法能显著提高系统的吞吐量。

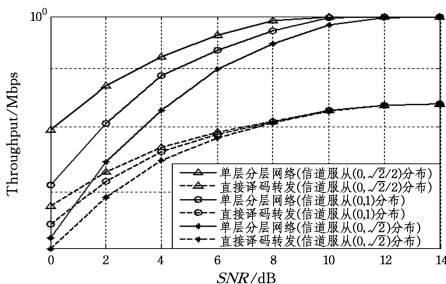


图 5 直接译码转发方法与单层分层网络方法的吞吐量比较  
Fig. 5 Throughput comparison between direct decoding and forwarding method and single layer hierarchical network method

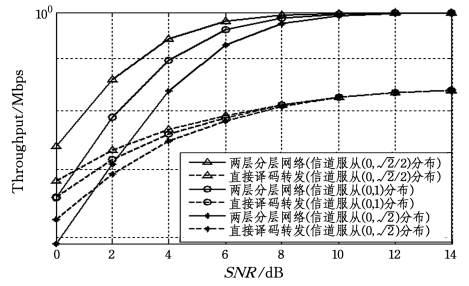


图 6 直接译码转发方法与两层分层网络方法的吞吐量比较  
Fig. 6 Throughput comparison between direct decoding and forwarding method and two layer hierarchical network method

图 7 和图 8 为用户发射功率相同条件下,两种分层多跳 PNC 方法与中继直接译码转发方法的系统误码率的比较。用户发射功率设为 1 W,由图可知,误码率随信噪比的增加而降低。Rayleigh 信道的方差值越小,误码率越低。采用中继直接译码转发方法,网络的误码率下降得较缓慢,使用单层分层网络和两层分层网络方法时误码率下降的速度较快,而且误码率明显更低。

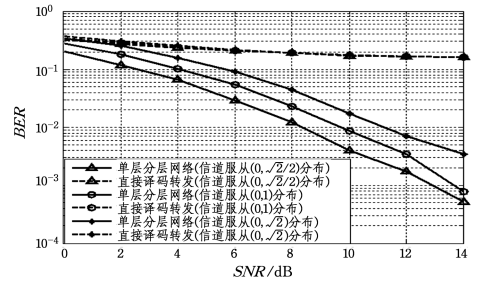


图 7 直接译码转发方法与单层分层网络方法的误码率比较  
Fig. 7 Bit error rate comparison between direct decoding and forwarding method and single layer hierarchical network method

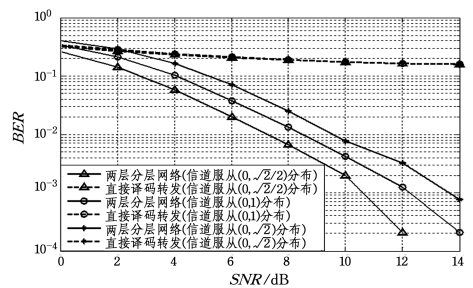


图 8 直接译码转发方法与两层分层网络方法的误码率比较  
Fig. 8 Bit error rate comparison between direct decoding and forwarding method and two layer hierarchical network method

由仿真图 5—图 8 可知,与中继直接译码转发方法相比,所提分层多跳 PNC 方法的性能明显提高。这是由于所提方法能更好地恢复发射信号,且在信号传输的过程中通过这种物理层网络编码的处理方法,一定程度上降低了系统转发产生的误码率,因此使系统的吞吐量得到明显提高。

由于本文仿真中将每个节点的功率都设置为 1,因此,直接译码转发方法每次进行信号发送时的功率与发送端一样,在低信噪比的情况下具有一定的放大转发效果。因此,如图 6 和图 8 所示,低信噪比时直接译码转发方法比

两层分层网络的性能更好。

**结束语** 本文研究了一种特殊的物理层网络编码方法,即分层多跳 PNC 方法,并将该其应用于 UDN 中。该方法采用在接收端直接从传输系数进行计算的方法对信源端输入信号进行恢复,与中继直接译码转发方法相比,大大减少了用户间的干扰,并降低了网络误码率,使系统吞吐量得到显著提高。与传统物理层网络编码方法相比,所提方法减少了从发射端到接收端的直直径链路,也满足了降低链路开销的要求。

然而本文仅从理论上将所提方法与直接译码方法做了对比分析,使用的网络架构比较理想化,未考虑分层网络的物理位置分配,未来可结合泊松几何对该方法进行更加深入且实际的探讨。

## 参 考 文 献

- [1] Cisco. Cisco visual network index: Global mobile data traffic forecast update 2014-2019 [EB/OL]. [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html).
- [2] ANDREWS J G, BUZZI S, WAN C, et al. What Will 5G Be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [3] HWANG I, SONG B, SOLIMAN S S. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks [J]. Communications Magazine IEEE, 2013, 51(6): 20-27.
- [4] BHUSHAN N, LI J, MALLADI D, et al. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G [J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52(2): 82-89.
- [5] WANG Y, ZHAI Z Y, ZHANG P. Key Technologies and Research Status of Ultra High Density Network [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(5): 1-17. (in Chinese)  
王莹, 缪宇宇, 张平. 超高密度网络关键技术及研究现状 [J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(5): 1-17.
- [6] JUNG NICKEL V, MANOLAKIS K, ZIRWAS W, et al. The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 44-51.
- [7] BAI L, LIU T T, YANG C Y. Interference Coordination Method and Performance Analysis in Ultra-dense Networks [J]. Signal Processing, 2015, 31(10): 1263-1271. (in Chinese)  
白璐, 刘婷婷, 杨晨阳. 超密集网络中干扰协调方法及性能分析 [J]. 信号处理, 2015, 31(10): 1263-1271.
- [8] GESBERT D, HANLY S, HUANG H, et al. Multi-Cell MIMO Cooperative Networks: A New Look at Interference [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9): 1380-1408.
- [9] NAM Y H, LIU L, WANG Y, et al. Cooperative communication technologies for LTE-advanced [C] // IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. IEEE, 2010: 5610-5613.
- [10] YOON S, SOMEKH O, SIMEONE O, et al. A Comparison of Opportunistic Transmission Schemes with Reduced Channel Information Feedback in OFDMA Downlink [C] // IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. IEEE, 2008: 1-5.
- [11] ZHANG S, LIEW S C, LAM P P. Hot topic: physical-layer network coding [C] // International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM 2006. Los Angeles, Ca, Usa: DBLP, 2006: 358-365.
- [12] LIEW S C, ZHANG S, LU L. Physical-layer network coding: Tutorial, survey, and beyond [J]. Physical Communication, 2013, 6(Complete): 4-42.
- [13] FUKUI H, YOMO H, POPOVSKI P. Physical Layer Network Coding [J]. arXiv:0704.2475, 2013.
- [14] CHEN W, WEI S. Research Progress of Physical Layer Network Coding in Wireless Cooperative Networks [J]. Data Acquisition and Processing, 2016, 31(3): 415-428. (in Chinese)  
陈文, 韦莎. 无线协作网络的物理层网络编码研究进展 [J]. 数据采集与处理, 2016, 31(3): 415-428.
- [15] WANG S Q. Design and implementation of physical layer network coding scheme in wireless multi-hop network [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese)  
王世强. 无线多跳网络中物理层网络编码方案的设计与实现 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [16] CHEN P P. Research on performance of physical layer network coding in multi-relay cooperative communication system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)  
陈盼盼. 物理层网络编码在多中继协作通信系统中的性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [17] GAO R F, JI X D, BAO Z H, et al. Multi-relay denoising and retransmission physical layer network coding adaptive diversity strategy [J]. Transactions of Communications, 2017, 38(2): 81-93. (in Chinese)  
高锐锋, 吉晓东, 包志华, 等. 多中继去噪重传物理层网络编码自适应分集策略 [J]. 通信学报, 2017, 38(2): 81-93.
- [18] BURR A, FANG D. Linear physical layer network coding for multihop wireless networks [C] // Signal Processing Conference. IEEE, 2010: 1153-1157.