

文章编号: 1001 - 893X(2012)04 - 0492 - 05

# 多跳分集系统中一种新的基于无比率编码的跨层方案\*

杨 静, 朱春华, 王 珂

(河南工业大学 信息科学与工程学院, 郑州 450001)

**摘 要:**研究了多跳分集系统中由于链路的不可靠传输直接应用实用网络编码存在差错的扩散和传播问题。提出了一种新的基于无比率编码的跨层方案,该方案利用无比率编码的纠错能力及实用网络编码码字随机特性,控制了输入链路的差错扩散和传播。结果表明,在满足每条链路误包率一定的情况下,该方案获得了较好的差错性能。进一步分析了为了使每条链路达到给定的误包率,无比率编码在不同信噪比下的冗余。

**关键词:**多跳分集系统;无比率编码;跨层方案;容错性能

**中图分类号:**TN914 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.04.014

## Cross - layer Design Based on Rateless Codes in Multihop Diversity Systems

YANG Jing, ZHU Chun - hua, WANG Ke

(College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The influence of error propagation caused by practical network coding in multihop diversity systems is studied when the links are unreliable. The cross - layer design based on rateless codes is proposed, which utilizes the error correction of rateless codes and random characteristic of practical network coding to control the error propagation. Simulation results show that the proposed scheme has lower packet error rate, compared with a single channel. To achieve the predefined packet error rate of a single channel, the redundancy of the rateless codes is also analysed under different signal - to - noise - ratio conditions.

**Key words:** multihop diversity system; rateless code; cross - layer design; error - tolerance

### 1 引 言

在移动通信系统中,利用无线信道的广播特性,各用户节点可以接收此节点之前的所有用户节点的发送信息,即为多跳分集通信系统。相比于各用户节点仅接收前一个节点发送信息的多跳通信系统,获得了较高的分集增益<sup>[1-2]</sup>。在链路完全可靠的条件下,网络编码通过在相关节点进行编码操作可以实现最大流最小割定理确定的网络数据流量<sup>[3]</sup>。然

而,在多跳分集通信系统中,各用户节点间的链路不完全可靠<sup>[4]</sup>。直接应用网络编码时,转发用户节点的一个输入差错会由于编码造成多个输出支路的数据出现差错。并且,此差错还会继续沿着网络向下游扩散,使系统性能恶化。

为了降低网络编码对传输链路可靠性的要求,学者们提出了基于网络编码的差错控制技术。该技术通过适当地选择信源空间,可以纠正多条通信链路上的传输差错。但是,当网络中节点数目较多时,

\* 收稿日期:2011 - 11 - 11;修回日期:2012 - 02 - 17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60972017)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 60972017)

该纠错码的构造基于较大的有限域,具有较高的编译码复杂度。另外,数据在网络中传输采用网络编码时,若处于上游的链路发生差错,通过编码在下游链路中,将造成多个传输差错。随着网络规模的增大,网络编码引起的差错链路的数目将随之增多,基于网络编码的纠错编码将不再适用。

在多跳分集通信系统中,还可以在物理层利用纠错能力较强的信道编码提高链路传输的可靠性。无比率编码是一种新型的信道编码方法,其码率是不固定的,在发送端未知信道状态信息的情况下,可以逼近信道容量<sup>[5]</sup>。然而,由于实际系统中时延、能量等约束,传统的固定码率信道编码和无比率编码也不能保证每条传输链路的可靠性。

针对此问题,本文在多跳分集系统中,联合无比率编码和实用网络编码,提出了一种基于无比率编码的跨层方案,达到控制输入链路差错扩散、提高系统容错性能的目的。

## 2 基于无比率编码的跨层方案

### 2.1 多跳分集系统

多跳分集通信系统模型如图 1 所示,包括一个信源节点、两个目的节点(目的节点 1 和目的节点 2)和  $N-2$  个中继协作节点。该系统采用正交时分多址接入的方式,即每一时隙只允许一个节点发送信号,以避免信号传输过程中节点之间的相互干扰。

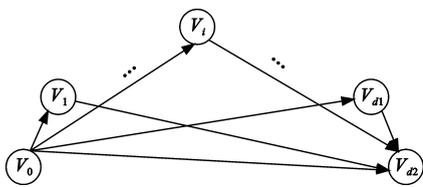


图 1 多跳分集通信系统模型

Fig. 1 The multihop diversity system model

下面从网络图的角度对多跳分集通信系统模型进行阐述说明。假定  $G=(V,E)$  表示多跳分集通信系统的网络图,其中  $V$  为节点, $E$  为通信链路。图 1 中, $V_0$  表示信源节点, $V_i$  表示第  $i$  个中继协作节点, $1 \leq i \leq N-2$ , $V_{d1}$  和  $V_{d2}$  分别表示目的节点 1 和目的节点 2,那么, $V=V_0 \cup V_1 \cup V_2 \cdots \cup V_{N-2} \cup V_{d1} \cup V_{d2}$ 。

以第  $i(1 \leq i \leq N-2)$  跳传输为例,接下来具体阐述多跳分集通信系统模型。第  $i$  跳传输时,负责信息接收的节点是中继协作节点  $V_i$ 。由于无线信道的广播特性,接收节点  $V_i$  可以接收此节点之前的

所有节点的发送信息。因此,在第  $i$  跳传输中,发送节点是从  $V'=V_0 \cup V_1 \cup V_2 \cdots \cup V_{i-1}$  节点中任意选取的  $l_i(1 \leq l_i \leq i)$  个节点。同理,第  $N-1$  跳传输时,接收节点为目的节点  $V_{d1}$ ,对应的发送节点是从  $\hat{V}=V_0 \cup V_1 \cup V_2 \cdots \cup V_{N-2}$  节点中任意选取的  $l_{d1}(1 \leq l_{d1} \leq N-1)$  个节点。第  $N$  跳传输时,接收节点则为  $V_{d2}$ ,发送节点是从  $\hat{V}=V_0 \cup V_1 \cup V_2 \cdots \cup V_{N-2} \cup V_{d1}$  节点中任意选取的  $l_{d2}(1 \leq l_{d2} \leq N)$  个节点。因此,在多跳分集通信系统中,由于每跳信息传输时,发送节点选择的灵活性,其系统的网络结构是动态变化的。并且,由于无线链路中干扰和噪声的影响,各节点与节点间的链路还是不完全可靠的。

### 2.2 跨层方案

在多跳分集通信系统中,当各节点与节点之间的链路完全可靠时,实用网络编码可以达到最大流最小割定理确定的最大理论传输容量。然而,将实用网络编码直接应用于链路存在差错的网络时将会带来差错的扩散。针对此问题,本文联合无比率编码和实用网络编码,提出了一种基于无比率编码的跨层方案。该方案首先利用无比率编码较强的纠错能力,当链路中干扰或噪声超出无比率编码的纠错能力时,译码器可以通过校验矩阵检测到错误的数据包并将其丢弃(本文假设不可检测译码错误概率较小,可以忽略);然后,利用实用网络编码的码字随机性,根据无比率编码译码器保留的正确的数据包来更新实用网络编码的全局编码核,从而达到提高系统容错性能的目的。

假定信源节点  $V_0$  要传输  $K$  个数据包  $x_1, x_2, \dots, x_K$  到目的节点  $V_{d1}$  和目的节点  $V_{d2}$ 。每条通信链路在单位时间内可以有效传输一个数据包,网络的最大流最小割容量为  $h$ 。并将同时进行实用网络编码的  $h$  个数据包  $x_1, x_2, \dots, x_h$  定义为一代的信息数据包。

在多跳分集通信系统中,根据节点传输信息的顺序,可以将节点分为信源节点、中间节点和目的节点三部分。其中,中间节点包括节点  $V_1 \sim V_{N-2}$  和节点  $V_{d1}$ ,目的节点包括节点  $V_{d1}$  和节点  $V_{d2}$ 。在多跳分集通信系统模型中,如图 1 所示,目的节点  $V_{d1}$  既负责协助传输信息到目的节点  $V_{d2}$ ,作为目的节点  $V_{d2}$  的中间节点,又要作为其中一个目的节点。因此,节点  $V_{d1}$  共同属于中间节点和目的节点。

在本文所提出的基于无比率编码的跨层方案中,

信源节点  $V_0$  将待传输的  $K$  个信源数据包进行分组, 依据网络容量, 每组包含  $h$  个数据包。若  $K$  和  $h$  不满足倍数关系, 则在相应的位置填零, 可以表示为

$$[(x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,h}), (x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,h}), \dots, (x_{\lceil \frac{K}{h} \rceil, 1}, x_{\lceil \frac{K}{h} \rceil, 2}, \dots, x_{\lceil \frac{K}{h} \rceil, h})] \quad (1)$$

那么, 第  $t(1 \leq t \leq \lceil K/h \rceil)$  次实用网络编码时, 待传输到通信链路  $e_0 \in E$  上的编码数据包为

$$y_0(e_0) = \sum_{j=1}^h g_{0,j}(e_0)x_{t,j} \quad (2)$$

式中,  $G_0(e_0) = [g_{0,1}(e_0), \dots, g_{0,h}(e_0)]$  为输出链路  $e_0$  上的  $h$  维全局编码核, 如下式所示:

$$G_0(e_0) = \sum_{e'_0} m_{0,e'_0}(e'_0)G_0(e'_0) \quad (3)$$

式中,  $e'_0$  为假设信源节点  $V_0$  的输入链路;  $m_{0,e'_0}(e'_0)$  为输出链路  $e_0$  上的局部编码核;  $G_0(e'_0)$  为输入链路  $e'_0$  上的全局编码核, 初始化为单位向量。信源节点的编码流程图如图 2 所示。将实用网络编码后的数据包  $y_0(e_0)$  进行无比率编码和调制后输出。



图 2 信源节点的编码流程图

Fig.2 The encoding flowchart at the source node

中间节点的编码流程图如图 3 所示。以任意一个中间节点, 如节点  $v$  为例, 对本文提出的基于无比率编码的跨层方案进行说明。首先, 中间节点  $v$  对接收数据包, 进行  $M$  进制解调。在多跳通信系统中, 由于不同输入链路的传播和队列延迟不同, 只有在缓冲池中收满同一代的信息后, 中间节点  $v$  才进行无比率译码。假设中间节点  $v$  无比率译码后, 保留的正确的数据包为  $y_{v,1}, y_{v,2}, \dots, y_{v,e_m}$  ( $0 \leq |e_m| \leq |e'_v|$ )。其中,  $|e_m|$  和  $|e'_v|$  分别为输入链路数和总的输入链路数。

由于数据包  $y_{v,1}, y_{v,2}, \dots, y_{v,e_m}$  可以由向量  $[x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,h}]$  线性表示, 因此, 中间节点  $v$  实用网络编码后, 待输出到链路  $e_v$  上的编码数据包为

$$y_v(e_v) = \sum_{j=1}^h g_{v,j}(e_v)x_{t,j} \quad (4)$$

式中,  $G_v(e_v) = [g_{v,1}(e_v), \dots, g_{v,h}(e_v)]$  为输出链路

$e_v$  上的  $h$  维全局编码核, 由下式推导出:

$$G_v(e_v) = \sum_{e_m} m_{v,e'_v}(e_m)G_v(e_m) \quad (5)$$

式中,  $e_m$  为保留的正确的输入数据包的链路;  $m_{v,e'_v}(e_m)$  为输出链路  $e_v$  上的局部编码核;  $G_v(e_m)$  为链路  $e_m$  上的全局编码核。其编译码流程如图 3 所示。中间节点  $v$  将实用网络编码后的数据包  $y_v(e_v)$  无比率编码及  $M$  进制调制后发送到链路  $e_v$  中。

目的节点  $V_{d1}$  和  $V_{d2}$  的流程图如图 4 所示。下面以任意一个目的节点, 如节点  $d$  为例, 阐述译码流程。首先, 目的节点  $d$  对接收数据包进行  $M$  进制解调。在实际的通信系统中, 不同的输入链路具有不同的传输和队列延迟, 因此, 目的节点  $d$  只有在收满同一代的信息后, 才进行无比率译码。根据译码结果, 目的节点  $d$  保留其正确的数据包  $y_{d,1}, y_{d,2}, \dots, y_{d,l}$  ( $0 \leq l \leq |e'_d|$ )。其中,  $|e'_d|$  为输入链路数。

依据实用网络编码原理, 数据包  $y_{d,1}, y_{d,2}, \dots, y_{d,l}$  可以由矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} y_{d,1} \\ \vdots \\ y_{d,l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1(e_{d,1}) & \dots & g_h(e_{d,1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_1(e_{d,l}) & \dots & g_h(e_{d,l}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{t,1} \\ \vdots \\ x_{t,h} \end{bmatrix} = G_d \begin{bmatrix} x_{t,1} \\ \vdots \\ x_{t,h} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $e_{d,1}, e_{d,2}, \dots, e_{d,l}$  为保留的正确数据包的输入链路;  $g_i(e_{d,j})$  ( $1 \leq i \leq h, 1 \leq j \leq l$ ) 为输入链路  $e_{d,j}$  上的全局编码核。此时, 如果矩阵  $G_d$  的秩为  $h$ , 目的节点就能恢复出信源数据包, 实现成功译码。以此类推, 当目的节点  $V_{d1}$  和  $V_{d2}$  正确获得信源数据包  $x_1, x_2, \dots, x_K$  时, 则实现了成功传输。

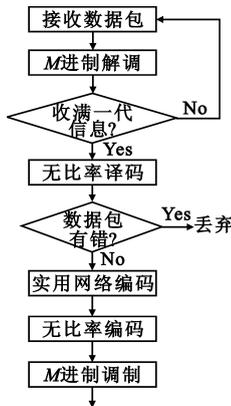


图 3 中间节点的编译码流程图

Fig.3 The encoding and decoding flowchart at the intermediate nodes

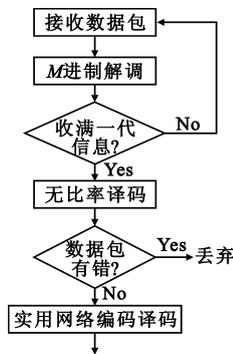


图 4 目的节点的译码流程图

Fig.4 The decoding flowchart at the destination nodes

### 3 仿真结果与分析

本文采用 Monte - Carlo 仿真研究基于无比率编码的跨层方案在多跳分集通信系统中的差错性能,仿真中,以数据包为单位进行传输。在该方案中,物理层选用无比率编码作为其信道编码方法,即使差错无法被纠正,译码器也可以通过校验矩阵检测出错误的数据包并将其丢弃。对于实用网络编码而言,等效为删除信道。因此,本文首先在多跳分集通信系统中研究当每条链路的误包率一定时,该方案的差错性能。然后,进一步分析为了使每条链路达到给定的误包率,无比率编码在不同信噪比下,所需用传输的冗余信息。

在多跳分集通信系统中,由于无线信道的广播特性,用户节点可以接收此节点之前的所有节点的发送信息。然后,当系统的规模较大、跳数较多时,由于无线信道的传输范围有限,用户节点仅能接收此节点之前的部分节点的发送信息。因此,仿真中,假定任意一个节点的输入输出通信链路数最大为 4。信源节点要传输 100 个数据包到目的节点。实用网络编码的局部编码核和全局编码核均基于有限域 GF(2<sup>8</sup>)。

本文选用的多跳分集通信系统的确定性网络模型如图 5 所示<sup>[6]</sup>,图中,共有 10 个用户节点,其中节点 1 为信源节点 V<sub>0</sub>,节点 2 到节点 8 为协作用户节点,节点 9 和节点 10 分别为目的节点 V<sub>d1</sub>和目的节点 V<sub>d2</sub>。

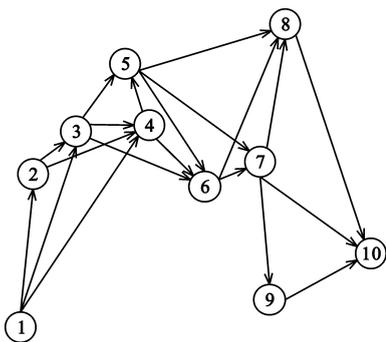


图 5 确定性网络模型  
Fig.5 The deterministic network model

当系统中每条链路的误包率分别为 0.2、0.05 和 0.03 时,目的节点 V<sub>d1</sub>和目的节点 V<sub>d2</sub>的误包率分别如表 1 中 PER1 和 PER2 所示。

表 1 基于无比率编码的跨层方案在确定性网络模型下的误包率

Table 1 The packet error rate of cross - layer design based on rateless codes in deterministic network model

每条通信链路的误包率	PER1	PER2
0.20	4 × 10 <sup>-5</sup>	5 × 10 <sup>-6</sup>
0.05	7 × 10 <sup>-6</sup>	1 × 10 <sup>-6</sup>
0.03	9 × 10 <sup>-7</sup>	3 × 10 <sup>-7</sup>

由表 1 可知,当每条链路的误包率一定时,基于无比率编码的跨层方案取得了较好的误包率性能。这是因为,基于无比率编码的跨层方案首先利用无比率编码的纠错能力,保证了一部分传输数据的正确性。在此基础上,译码器通过校验矩阵的检测将正确的数据包保留。然后,利用实用网络编码码字随机性,根据信道译码器的结果更新全局编码核,从而控制了输入链路差错的扩散,达到提高系统容错性能的目的。例如,当每条链路的误包率为 0.2 时,在基于无比率编码的跨层方案中,目的节点 V<sub>d1</sub>和目的节点 V<sub>d2</sub>分别取得了 4 × 10<sup>-5</sup>和 5 × 10<sup>-6</sup>的误包率。

表 1 中,相比于每条链路的误包率,目的节点获得了较好的容错性能,但这是以每条链路要达到给定的误包率为基础的。为满足此要求,下面将进一步分析在加性高斯白噪声信道(AWGN)下,无比率编码在不同信噪比(E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub>)下所需要传输的冗余信息。

仿真中,假设每个实用网络编码数据包含有 2 000 bit 信息,通信链路具有独立性。在多跳分集通信系统中,每跳传输时,发送节点将该数据包经过无比率编码和 BPSK 调制后,发送到 AWGN 信道中。其中,无比率编码选用 eIRA 码。假定信源信息 x = [x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, ..., x<sub>k</sub>],那么第 j 个编码符号 y<sub>j</sub>(1 ≤ j ≤ n)为

$$y_j = \begin{cases} x_1, & j = 1 \\ y_{j-1} + x_j, & 1 < j \leq k \\ y_{j-1} + c_{j,1}x_{j,1} + c_{j,2}x_{j,2} + \dots + c_{j,d}x_{j,d}, & j > k \end{cases} \quad (7)$$

式中,d 是从 1 到 k 人员选取的随机整数;c<sub>j,1</sub>, c<sub>j,2</sub>, ..., c<sub>j,d</sub>是从有限域中任意选取的非零数;x<sub>j,1</sub>, x<sub>j,2</sub>, ..., x<sub>j,d</sub>是从 k 个信源信息中任意抽取的信息。仿真中,参数 d = 4;译码算法为 BP 算法,并且译码迭代次数设定为 100。

无比率编码的码率具有无率性,可以根据实际链路状态自适应地调整。本文任意选取 3 种码率即 0.57、0.67 和 0.74 来分析为使每条链路达到给定的

误包率, 无比率编码所需用传输的冗余信息, 如图 6 所示。

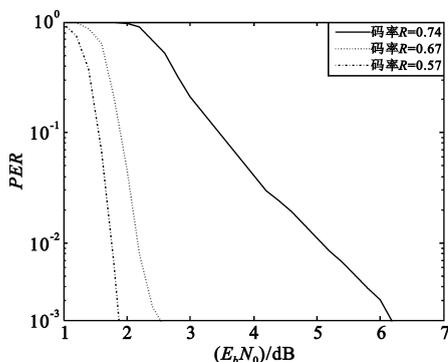


图 6 3 种码率下无比率编码在 AWGN 信道下的误包率性能  
Fig. 6 The packet error rate performance for three different rate of rateless codes in AWGN

由图 6 可知, 为使每条链路达到一定的误包率, 无比率编码在不同的信噪比 ( $E_b/N_0$ ) 下, 将要传输不同的编码冗余。例如, 为使每条链路达到 0.03 的误包率, 信噪比为 2 dB 时, 无比率编码的最大码率为 0.67。此时, 若需用传输 2 000 bit 的数据包, 采用依据式 (7) 且参数  $d = 4$  的 eIRA 码, 最少需用 1 000 bit 冗余。由上述分析可知, 为使每条链路达到所需要的误包率, 无比率编码在不同信噪比下需用传输不同的冗余信息。在此条件下, 基于无比率编码的跨层方案将获得较好的容错性能。

## 4 小 结

本文针对实用网络编码在链路不完全可靠的多跳分集系统传输时存在差错的扩散和传播的问题, 提出了一种基于无比率编码的跨层方案。研究结果表明, 当每条链路的误包率一定时, 该方案取得了较好的容错性能。为了使每条链路达到给定的误包率, 本文进一步分析了无比率编码在不同信噪比下, 所需要传输的冗余信息。

## 参考文献:

[1] Boyer J, Falconer D D, Yanikomeroğlu H. Multihop diversity

in wireless relaying channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(10):1820-1830.

- [2] Sadek A K, Su W, Liu K J R. Multinode cooperative communications in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(1): 341-355.
- [3] Ahlswede R, Cai N, Li S R. Network Information Flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [4] Chou P A, Wu Y, Jain K. Practical network coding[C]//Proceedings of the 41st Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing. Monticello, IL, USA: [s. n.], 2003.
- [5] Castura J, Mao Y. Rateless coding for wireless relay channels [C]//Proceedings of 2005 IEEE International Symposium on Information Theory. Adelaide, SA: IEEE, 2005: 810-814.
- [6] Ho T, Leong B, Medard M, et al. On the utility of network coding in dynamic environments[C]//Proceedings of International Workshop on Wireless Ad-Hoc Networks. Oulu, Finland: IEEE, 2004: 196-200.

## 作者简介:

杨 静(1983—), 女, 河南商丘人, 2011 年于北京理工大学获博士学位, 现为讲师, 主要研究方向为无比率编码、协作通信;

YANG Jing was born in Shangqiu, Henan Province, in 1983. He received the Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2011. She is now a lecturer. Her research interests include rateless codes and cooperative communications.

Email: wonderful\_25@sina.com

朱春华(1976—), 女, 河南郑州人, 2004 年于郑州大学获硕士学位, 现为副教授, 主要研究方向为基于 OFDM 的认知无线电系统;

ZHU Chun-hua was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1976. She received the M. S. degree from Zhengzhou University in 2004. She is now an associate professor. Her research concerns cognitive radios based on OFDM.

Email: zhuchunhua@haut.edu.cn

王 珂(1981—), 男, 河南郑州人, 2011 年于中国科学院获博士学位, 现为讲师, 主要研究方向为信号处理。

WANG Ke was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1981. He received the Ph. D. degree from Chinese Academy of Science in 2011. He is now a lecturer. His research direction is signal processing.

Email: email\_of\_paper@yahoo.com.cn