

文章编号:1001-9081(2016)01-0061-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.01.0061

改进的基于网络编码中继转发方案

国强, 秦月*

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

(*通信作者电子邮箱 qinyue@hrbeu.edu.cn)

摘要:针对双向中继网络中传统中继转发协议放大信号的同时放大了噪声、可能转发错误的解码信号、中继判决结果不可靠等问题,提出两种基于互信息转发(MIF)的网络编码中继转发方案。首先,中继节点转发来自两个源端信息的硬判决结果;同时还转发其可靠度;然后,接收端将来自中继节点转发的信号及其可靠度和源端信号合并,并对合并结果进行检测和判决。详细推导了所提出两种方案接收端信噪比(SNR)的表达式,并在加性高斯白噪声(AWGN)信道两种仿真条件下进行数值仿真;同时分别在AWGN信道和瑞利信道中对各种方案误码率进行蒙特卡罗仿真。结果表明在两种信道条件下所提出方案在误码率(BER)性能上较估计转发(EF)方案相比分别有约1 dB和1~2 dB的增益。仿真实验结果说明基于MIF的网络编码方案在双向中继网络中继转发中对系统的误码性能有显著提升效果。

关键词:双向中继系统;中继转发协议;网络编码;互信息转发;误码率

中图分类号: TN925; TP393.04 **文献标志码:**A

Improved relay forwarding scheme based on network coding

GUO Qiang, QIN Yue*

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: To solve the problems of traditional relaying forward protocol: amplifying both the signals and the noise, possibly forwarding incorrect decoded signals and low reliability of decision on relay node in the two-way relay system, two Mutual Information Forwarding (MIF) schemes based on network coding were suggested. Firstly, the relay node forwards the hard decisions from two source nodes, and the reliability of these hard decisions. Then the receiving terminal detects and makes a decision on the combined result, which are based on the forwarding signal from relay node and its reliability, also the signal from another source node. The expressions for the received Signal-to-Noise Ratio (SNR) were derived, and numerical simulations were done in Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel. At the same time, Monte Carlo simulation was conducted in AWGN channel and Rayleigh channel. Results show that both two proposed schemes under two kinds of channels have 1 dB and 1~2 dB gain than the Estimate-and-Forward (EF) scheme in Bit Error Ratio (BER) performance. The simulation results show that, the network coding scheme based on MIF significantly improves BER performance in relay forward of two-way relay network.

Key words: two-way relay system; relaying forward protocol; network coding; Mutual Information Forwarding (MIF); Bit Error Rate (BER)

0 引言

协作通信技术能够提升边缘小区的频谱效率,为系统提供更可靠的服务质量,通过用户共享形成虚拟的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)信道从而获得空间分分集增益^[1],但在传统的单向中继系统中,传递每组信号要使用两个时隙。而双向中继系统可以同时传输两个方向的信息,有效地降低了频谱利用率的损失^[2~3]。

在无线中继系统中两种经典的中继转发协议,即放大转发(Amplify-and-Forward, AF)和解码转发(Decode-and-Forward, DF)得到了广泛的应用^[4~5],但是这两种协议都存在各自的不足,AF协议在转发接收到的信号的同时放大了噪

声信号,DF协议可能转发错误的解码信号到目的端^[6],因此一种基于软信息转发(Soft Information Forwarding, SIF)的中继转发方案被提出来并且获得了较好的误码性能。在单向中继场景中,Gomadam^[7]提出了一种估计转发的软信息转发协议,验证了该方案能够最大化目的端的接收信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),取得了比AF和DF更好的误码率性能。之后一种新的基于互信息转发的方案被提出来^[8~9],该方案与估计转发(Estimate-and-Forward, EF)相比在误码率性能上有了进一步的提高。近几年来双向中继系统在无线系统中得到了广泛的研究^[10~12],该场景中两个源端节点通过一个共享的中继节点传递信息。邓卫华等^[13]在双向中继场景中提出一种基于软信息网络编码的估计转发方案(EF),证明了该方

收稿日期:2015-07-20;修回日期:2015-08-24。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371172, 61240007);黑龙江省科技攻关项目(GC13A307);黑龙江省博士后科研启动金资助(LBH-Q12122)。

作者简介:国强(1972-),男,山东临沂人,教授,博士,主要研究方向:现代通信、雷达对抗; 秦月(1990-),女,吉林白山人,硕士研究生,主要研究方向:协作通信、网络编码。

案比 AF、DF 在最大可达速率和误码率方面均有改善,但并没有考虑在瑞利信道下系统误码率性能。基于互信息转发 (Mutual Information Forwarding, MIF) 与 EF 相比的优势,本文将 MIF 应用到双向中继网络,提出两种基于互信息转发的网络编码方案,并与文献[13]所提出的方案进行对比,验证了所提出的方案对系统误码率的提升均有显著效果。

1 系统模型

考虑一个双向中继场景,源端节点 A 和 B 要在中继节点 R 的帮助下完成双向通信。如图 1 所示,该场景中两个源端节点含有直传路径,且所有节点都工作在半双工模式下。假设任意两个节点间的信道信息是独立同分布的,且在接收端可知。本文采用三时隙传输方式,即第 1 个时隙源端 A 广播信号到源端 B 和中继节点 R,第 2 个时隙源端 B 广播信号到源端 A 和中继节点 R,第 3 个时隙中继节点 R 将处理之后的信号广播到源端 A 和 B。

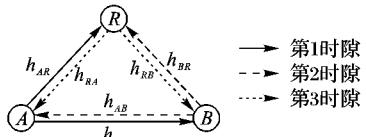


图 1 含有直传路径的三时隙双向中继网络

第 1 个和第 2 个时隙中,中继节点和每个源端的接收信号可以表示为:

$$\begin{cases} y_{Ai} = \sqrt{E_A} h_{Ai} x_A + n_{Ai}, & i \in \{B, R\} \\ y_{Bi} = \sqrt{E_B} h_{Bi} x_B + n_{Bi}, & i \in \{A, R\} \end{cases} \quad (1)$$

其中: x_A, x_B 分别表示源端 A 和 B 的发送信号,且满足 $\mathbb{E}\{x_A^* x_A\} = \mathbb{E}\{x_B^* x_B\} = 1$; E_A, E_B 是源端 A 和 B 的发送功率; h_{ij} ($i \in \{A, B\}, j \in \{A, B, R\}$) 为节点 i 与节点 j 之间的信道参数; n_{ij} ($i \in \{A, B\}, j \in \{A, B, R\}$) 为加性高斯白噪声,均值为 0、方差为 σ_s^2 。

假设源节点等概率传送 0,1 比特信息,且都采用二进制相移键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 调制,即 $x_i \in \{\pm 1\}$ ($i \in \{A, B\}$)。第 3 个时隙源端收到来自中继节点的信号可表示为:

$$y_R = \sqrt{E_R} h_{Ri} f(r_{AR}, r_{BR}) + n_{Ri}, \quad i \in \{A, B\} \quad (2)$$

其中, E_R 是中继节点的发送功率; h_{Ri} ($i \in \{A, B\}$) 为中继节点与源端之间的信道参数; n_{Ri} ($i \in \{A, B\}$) 为加性高斯白噪声,均值为 0、方差为 σ_R^2 , $f(\cdot)$ 表示归一化中继函数,由中继节点使用的协议决定。

2 现有网络编码方案概述

2.1 基于 AF 的网络编码方案

双向中继场景中当中继节点采用 AF 协议时,中继节点 R 只是将来自两个源端的信号 y_{AR}, y_{BR} 进行叠加,经过功率归一化后再将叠加后的信号转发到两个源端^[14-15]。基于 AF 的网络编码方案的中继函数可表示为:

$$f_{AF}(y_{AR}, y_{BR}) = \frac{(y_{AR} + y_{BR})}{\sqrt{\mathbb{E}[|E_A| |h_{AR}|^2 + |E_B| |h_{BR}|^2] + 2\sigma_R^2}} \quad (3)$$

其中, $\mathbb{E}(\cdot)$ 表示取期望值。因为接收端完全已知信道信息,所以源端 A 和 B 在收到中继节点 R 的信号后可将自身的信号减

掉以避免干扰^[14],然后再和来自另一源端的信号进行合并。由分析可知,该方案在放大信号的同时也将噪声放大,误码性能较差。

2.2 基于 DF 的网络编码方案

当中继节点 R 采用 DF 协议时,R 首先对 y_{AR}, y_{BR} 进行检测和解调,恢复出源端信号 x_A, x_B ^[16]。R 使用对数似然比 (Log-Likelihood Ratio, LLR) 来判决 x_i ($i \in \{A, B\}$):

$$\begin{aligned} llr_i &= \ln \frac{p(x_i = 1 | y_{iR})}{p(x_i = -1 | y_{iR})} = \\ &\ln \frac{\frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_R^2}} \exp(-\|y_{iR} - \sqrt{E_i} h_{iR}\|^2 / \sigma_R^2)}{\frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_R^2}} \exp(-\|y_{iR} + \sqrt{E_i} h_{iR}\|^2 / \sigma_R^2)} = \frac{1}{\sigma_R^2} (\|y_{iR} + \\ &\sqrt{E_i} h_{iR}\|^2 - \|y_{iR} - \sqrt{E_i} h_{iR}\|^2); \quad i \in \{A, B\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $llr_i, i \in \{A, B\}$ 分别表示来自源端节点 A 和源端节点 B 的对数似然比(LLR),下文公式相同。中继节点 R 根据 LLR 值进行判决,得到 $\hat{x}_A = \text{sign}(llr_A), \hat{x}_B = \text{sign}(llr_B)$ 。基于 DF 的网络编码信号即为两个判决值的异或结果^[13]。中继函数可表示为:

$$f_{DF}(y_{AR}, y_{BR}) = \hat{x}_A \hat{x}_B = \text{sign}(llr_A) \text{sign}(llr_B) \quad (5)$$

因为在中继端采取了硬判决的方式,所以信息会有所损失,当信道存在严重衰落时判决结果的可靠性将下降。

2.3 基于 EF 的网络编码方案

估计转发方式下中继节点转发的信号是源端信号的不相干最小均方误差 (Minimum Mean-Square Error, MMSE) 估计值^[11]。不相干 MMSE 估计值可表示为: $\hat{x}(r) = \mathbb{E}[x | r]$ 。

对于发送节点采用 BPSK 调制的系统,不相干 MMSE 估计值可表示为: $\hat{x}(r) = \mathbb{E}[x | r] = \tanh(llr/2)$ 。

当中继节点采用 EF 转发协议时,R 转发 y_{AR} 和 y_{BR} 两个信号的不相干 MMSE 估计值^[17]。 x_A 和 x_B 异或信号的不相干 MMSE 估计值可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[x_A x_B | y_{AR} y_{BR}] &= \mathbb{E}[x_A | y_{AR}] \mathbb{E}[x_B | y_{BR}] = \\ &\tanh(llr_A/2) \tanh(llr_B/2) \end{aligned} \quad (6)$$

则基于 EF 的网络编码方案的中继函数可表示为:

$$f_{EF}(y_{AR}, y_{BR}) = \frac{\tanh(llr_A/2) \tanh(llr_B/2)}{\sqrt{\mathbb{E}[|\tanh(llr_A/2) \tanh(llr_B/2)|^2]}} \quad (7)$$

由式(7)EF 方案的中继函数的表达式可以看出该方案在一定程度上减少了信道衰落严重对中继硬判决结果的影响,但中继函数仍直接与对数似然比函数相关。

3 基于互信息转发的网络编码方案分析

信道中总是存在着干扰和噪声,信源端发出信号的 X, 经过信道后信宿收到的信号 Y 总是受干扰和噪声的影响。信源输出符号 X 所包含的平均信息量称为信息熵,记作 $H(X)$ 。而被信宿真正所接收获得的平均信息量则是互信息 $I(X; Y)$ 。由于互信息 $I(X; Y) = H(X) - H(X | Y)$, 其中 $H(X)$ 是信号 X 的熵,即为信号的不确定度, $H(X | Y)$ 是已知 Y 时 X 的不确定度^[17]。本文使用互信息来衡量中继节点 R 对两个源端信号的判决。

源端信号 x_i ($i \in \{A, B\}$) 和相应的中继节点接收信号 y_{iR} 之间的互信息可表示为:

$$\begin{aligned} I(x_i; y_{iR}) &= H(x_i) - H(x_i | y_{iR}) = \\ &= \sum_{x_i=\pm 1} p(x_i) \ln p(x_i) + \sum_{x_i=\pm 1} p(x_i | y_{iR}) \ln p(x_i | y_{iR}) = \\ &= 1 + \sum_{x_i=\pm 1} p(x_i | y_{iR}) \ln p(x_i | y_{iR}) \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(4)中对数似然比 LLR 的定义可得:

$$\begin{cases} p(x_i = 0 | y_{iR}) = \exp(lur_i) / [1 + \exp(lur_i)] \\ p(x_i = 1 | y_{iR}) = 1 / [1 + \exp(lur_i)] \end{cases} \quad (9)$$

把式(9)代入式(8)中可得:

$$\begin{aligned} I(x_i; y_{iR}) &= 1 + \frac{\exp(lur_i)}{1 + \exp(lur_i)} \ln \frac{\exp(lur_i)}{1 + \exp(lur_i)} + \\ &\quad \frac{1}{1 + \exp(lur_i)} \ln \frac{1}{1 + \exp(lur_i)} \end{aligned} \quad (10)$$

由于式(10)中, $I(x_i; y_{iR})$ 只与中继节点 R 处的 LLR 值的绝对值 $\lambda_i = |lur_i|$ 有关^[9], 所以式(10)可以表示为:

$$\begin{aligned} \Psi(\lambda_i) &= I(x_i; y_{iR}) = 1 + \frac{1}{1 + \exp(\lambda_i)} \ln \frac{1}{1 + \exp(\lambda_i)} + \\ &\quad \frac{1}{1 + \exp(-\lambda_i)} \ln \frac{1}{1 + \exp(-\lambda_i)} \end{aligned} \quad (11)$$

观察式(11)可以看出, 当 $\lambda_i \rightarrow \infty$ 时互信息 $\Psi(\lambda_i) \approx 1$, 说明中继节点对 x_i 的估计十分可靠。当 $\lambda_i \rightarrow 0$ 时互信息 $\Psi(\lambda_i) \approx 0$, 说明中继节点对 x_i 的估计是完全不可靠的。由于互信息可用于表征中继节点对源端信息的判决 \hat{x}_A, \hat{x}_B 的确定度, 因此若中继节点不仅转发 \hat{x}_A, \hat{x}_B 的混合信号还转发源端信号 x_i 和相应的中继节点接收信号 y_{iR} 之间的互信息, 则目的节点可在合并直传信号与转发信号时, 考虑转发信号的可靠性, 降低误码率。接下来本文将提出两种基于互信息转发的网络编码方案。

3.1 基于互信息转发的异或网络编码方案

当中继节点采用基于互信息转发的异或网络编码方案时, 中继函数可以表示为如下形式^[17]:

$$f_{\text{MIFI}}(y_{AR}, y_{BR}) = \frac{\hat{x}_A \hat{x}_B \Psi(\lambda_A) \Psi(\lambda_B)}{\sqrt{\varepsilon[|\hat{x}_A \hat{x}_B \Psi(\lambda_A) \Psi(\lambda_B)|^2]}} \quad (12)$$

由式(12)可以看出若中继节点判决结果都是可靠的, 即 $\Psi(\lambda_1) \approx 1, \Psi(\lambda_2) \approx 1$ 。此时中继节点 R 使用最大的功率转发网络编码信号, 则源端对该转发信号的判决结果越可靠。若中继节点判决结果中至少有一个不可靠, 即 $\Psi(\lambda_1) \Psi(\lambda_2) \approx 0$, 则中继节点 R 用来转发该网络编码信号的功率趋于零, 该不可靠网络编码信号 $\hat{x}_A \hat{x}_B$ 对相应源端解调检测产生的响应将会降低。

在该方案中(以分析源端 A 为例, 源端 B 的情况类似; 下述方案也只分析源端 A), 源端 A 的接收信号可表示为:

$$y_{RA} = \sqrt{E_R} h_{RA} f_{\text{MIFI}}(y_{AR}, y_{BR}) + n_{RA} \quad (13)$$

源端 A 接收到 y_{RA} 后乘以自身信号 x_A 再和来自源端 B 的信号 y_{BA} 进行最大信噪比合并判决得到 x_B 。

定义 $\tilde{x}_i \triangleq \hat{x}_i \Psi(\lambda_i) = \varphi_i(x_i + e_i)$, $i \in \{A, B\}$, 其中 e_i 为互信息噪声, 均值为 0、方差为 $\sigma_{e_i}^2$; φ_i 为使 e_i 和 x_i 不相关的标量系数, 即 $\varepsilon[x_i e_i] = 0$ 。 φ_i 可由式(14)求得:

$$\varphi_i = \varepsilon[x_i \tilde{x}_i] / \varepsilon[\tilde{x}_i^2]; i \in \{A, B\} \quad (14)$$

定义 $\beta_1 \triangleq \sqrt{E_R / \varepsilon[(\tilde{x}_A \tilde{x}_B)^2]}$, 则可得到式(15):

$$\begin{aligned} x_A r_{RA} &= h_{RA} \beta_1 \varphi_1 \varphi_2 x_B + n_{RA} x_A + \\ &\quad h_{RA} \beta_1 \varphi_1 \varphi_2 (e_B + x_A x_B e_A + x_A e_A e_B) \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)中的噪声部分可记作 $n_1 = n_{RA} x_A + h_{RA} \beta_1 \varphi_1 \varphi_2 (e_B + x_A x_B e_A + x_A e_A e_B)$ 。由于 $\varepsilon[x_A e_A] = 0$, 因此 n_1 可看作均值为 0、方差为 σ_1^2 的高斯噪声, σ_1^2 的表达式如下:

$$\sigma_1^2 = h_{RA}^2 \beta_1^2 \varphi_1^2 \varphi_2^2 (\sigma_{e_B}^2 + \sigma_{e_A}^2 + \sigma_{e_A}^2 \sigma_{e_B}^2) + \sigma_s^2 \quad (16)$$

式(16)中, 互信息噪声方差 $\sigma_{e_i}^2$ 可参考文献[8]求得: $\delta_{e_i}^2 \approx 2 \exp(-\rho_{iR})$, 其中 $\rho_{iR} = |h_{iR}|^2 E_s / \sigma_s^2$ 为源端到中继节点的信噪比, 因此式(15)的信噪比表达式可记作:

$$\gamma_1 = \frac{|h_{RA}|^2 \beta_1^2 \varphi_1^2 \varphi_2^2}{|h_{RA}|^2 \beta_1^2 \varphi_1^2 \varphi_2^2 (\sigma_{e_B}^2 + \sigma_{e_A}^2 + \sigma_{e_A}^2 \sigma_{e_B}^2) + \sigma_s^2} \quad (17)$$

3.2 基于互信息转发的叠加网络编码方案

观察式(12)可以看出, 基于互信息转发的异或网络编码方案在中继判决结果 \hat{x}_A, \hat{x}_B 都是可靠的时候, 才可以有较好的性能。为了弥补这一不足, 本节进一步提出基于互信息转发的叠加网络编码方案, 中继函数如下:

$$f_{\text{MIF2}} = \frac{\Psi(\lambda_A) \hat{x}_A + \Psi(\lambda_B) \hat{x}_B}{\sqrt{\varepsilon[|\Psi(\lambda_A) \hat{x}_A + \Psi(\lambda_B) \hat{x}_B|^2]}} \quad (18)$$

由式(18)可知, 如果中继节点对源端信号的判决结果都是可靠的, $\Psi(\lambda_1) \approx 1, \Psi(\lambda_2) \approx 1$ 。中继节点将以等大功率转发 \hat{x}_A 和 \hat{x}_B 。若中继节点判决结果中至少有一个是不可靠的, 假设 \hat{x}_A 不可靠, 中继节点以较大的功率转发 \hat{x}_B , 趋于零的功率转发 \hat{x}_A 。

在该方案中, 源端 A 的接收信号可表示为:

$$y_{RA} = \sqrt{E_R} h_{RA} f_{\text{MIF2}}(y_{AR}, y_{BR}) + n_{RA} \quad (19)$$

定义 $\beta_2 \triangleq \sqrt{E_R / \varepsilon[(\hat{x}_A + \hat{x}_B)^2]}$ 在源端 A 为了去除接收信号中的 x_A , 可将接收信号减去 $h_{RA} \beta_2 \varphi_A x_A$, 可以得到:

$$\begin{aligned} y_{RA} - h_{RA} \beta_2 \varphi_A x_A &= h_{RA} \beta_2 \varphi_B x_B + n_{RA} + \\ &\quad h_{RA} \beta_2 (\varphi_A e_{sA} + \varphi_B e_{sB}) \end{aligned} \quad (20)$$

与 3.1 节分析类似, 可得式(20)的信噪比表达式如下:

$$\gamma_2 = \frac{|h_{RA}|^2 \beta_2^2 \varphi_B^2}{|h_{RA}|^2 \beta_2^2 \varphi_A^2 \delta_{eA}^2 + |h_{RA}|^2 \beta_2^2 \varphi_B^2 \delta_{eB}^2 + \delta_R^2} \quad (21)$$

4 仿真结果分析

在仿真实验中, 本文假设所有节点的发射功率相等均为 1, 即 $E_A = E_B = E_R = 1$, 且 $\sigma_s^2 = \sigma_R^2$ 。下面在特定的信道条件下(AWGN 信道、瑞利信道)下, 对双向中继网络中各种网络编码方案的误码率进行仿真。以下所有仿真中, MIF1 代表基于互信息转发的异或网络编码方案, MIF2 代表基于互信息转发的叠加网络编码方案, AF 和 DF 代表基于放大转发网络编码方案和基于解码转发网络编码方案, EF 为基于估计转发的网络编码方案^[13]。

首先考虑在 AWGN 信道下的情况。分析如下两种情形。

- 1) 仿真条件 1: $h_{AR} = h_{BR} = h_{RA} = h_{RB} = h_{AB} = h_{BA} = 1$ 。
- 2) 仿真条件 2: $h_{AR} = 10, h_{BR} = 0.1, h_{RA} = 0.8, h_{RB} = 1.4, h_{AB} = h_{BA} = 0.8$ 。

根据上文中得到的基于互信息转发的异或网络编码和基于互信息转发的叠加网络编码方案中接收端信噪比的表达式(17)和(21), 在加性高斯白噪声信道条件下对其进行仿真, 得到接收端(本文以源端节点 A 为例分析)信噪比曲线, 如图 2(a)和图 2(b)所示。可以看出在仿真条件 1 下, 在低信噪比范围内两种网络编码方案的接收端信噪比接近, 随着系统信噪比增大 MIF1 方案接收端信噪比始终大于 MIF2 方案。

在仿真条件2下,由于源端节点B到中继节点的信道质量较差,因此MIF1方案中中继节点的判决结果可靠性差。所以MIF2方案接收端信噪比始终大于MIF1方案,这也与第3章的分析一致。

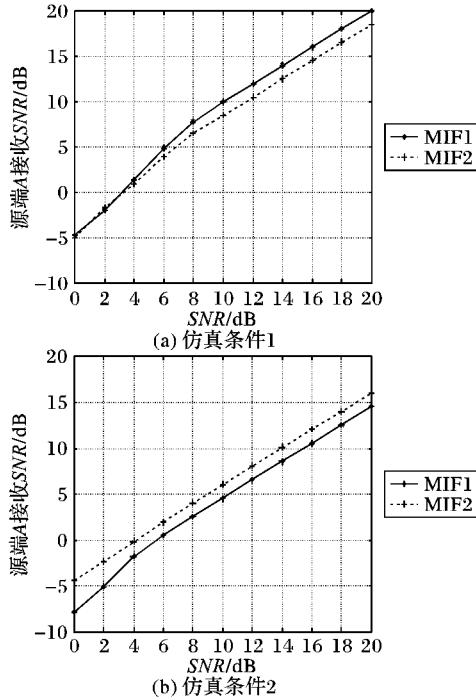


图2 不同仿真条件下的接收端信噪比

图3给出了加性高斯白噪声信道仿真条件1下的各种网络编码方案系统误码率仿真曲线。从图3中可以看出MIF1方案下系统的误码率性能最好;MIF2方案与EF性能接近,均差于MIF1方案;DF方案在信噪比较低区域误码率较高,随着信噪比增加误码率迅速下降,且一直优于AF方案。在仿真条件1下,各信道参数的值均为1信道质量较好,因此中继节点对来自两个源端信号的判决 \hat{x}_A, \hat{x}_B 有较高的可靠性,且DF方案和MIF1方案经过解码转发去除了噪声影响,又因为MIF2方案要将发送功率分配给两个信号所以性能比MIF1方案差,因此MIF1方案误码率性能最好。MIF1方案和MIF2方案相比,在信噪比较低的区域误码率性能较接近,随着信噪比的增加MIF1与MIF2相比一直约有0.7 dB的增益,图2(a)同样说明了这一情况,在低信噪比范围内两种网络编码方案的接收端信噪比接近,随着系统信噪比增大MIF1方案接收端信噪比始终大于MIF2方案。

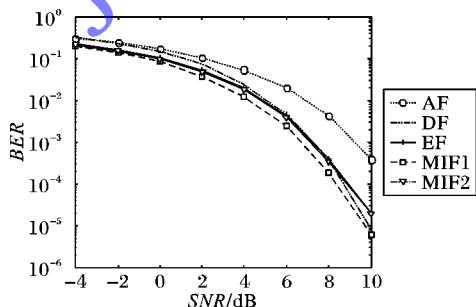


图3 AWGN信道仿真条件1下各方案误码率曲线对比

图4给出了加性高斯白噪声信道仿真条件2下的各种网络编码方案系统误码率仿真曲线。从图4中可以看出所有方

案的误码性能较仿真条件1都有所下降,由于源端B到中继节点信道衰落严重,DF方案下降最为明显。MIF2方案误码率下降最少,且在所有方案中性能最优,与EF方案相比约有1 dB的增益。说明当有一路信道存在较严重衰落时,基于互信息转发的叠加网络编码方案能够减少中继节点不可靠的判决结果对系统性能的影响。

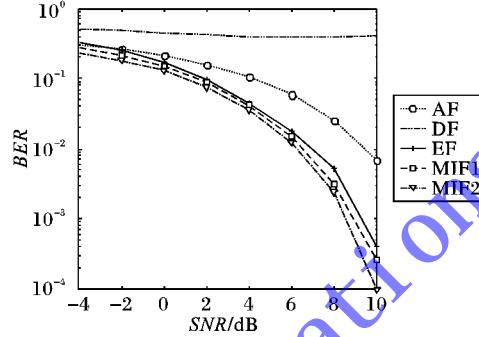


图4 AWGN信道仿真条件2下各方案误码率曲线对比

图5给出了瑞利信道下的各种网络编码方案系统误码率仿真曲线。假设所有信道参数方差均为1,从图5中可以看出:在瑞利信道下MIF2方案的误码性能最优,MIF1方案的误码性能略次之。本文中所提出的两种网络编码方案均优于文献[13]中的EF方案,在信噪比较低的情况下约有2 dB的增益。随着信噪比的增加MIF1方案的误码率逐渐和MIF2相接近,但与AF、EF方案相比仍有1 dB的增益。

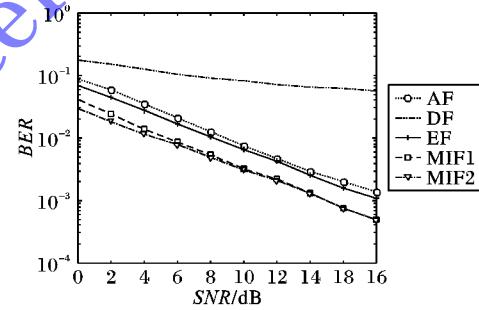


图5 瑞利信道下各方案误码率曲线对比

5 结语

本文针对双向中继网络中传统中继转发协议的不足,提出两种基于互信息转发的网络编码方案,中继节点不仅转发来自两个源端信息的硬判决结果;同时还转发该判决结果的可靠度。本文详细推导了所提出的两种基于互信息转发的网络编码方案接收端信噪比的表达式,并在(AWGN)信道的两种仿真条件下得到其数值仿真曲线进行分析;同时对各种方案下系统的误码率进行仿真并与文献[13]中的EF方案进行对比,验证了所提出的两种方案在误码率性能上对于原有的网络编码方案均有改善,与EF方案相比约有1 dB的增益。另外还在瑞利信道下对系统误码率进行仿真,较传统AF、DF方案误码率性能提升非常明显,与EF相比约有1~2 dB的增益,进一步验证了本文所提出的基于互信息转发的网络编码方案对系统误码率性能的改善。

参考文献:

- [1] LI J, HU Z, WANG Y. DF/AF cooperative relay in LTE-A [C]// VTC 2010-Spring: 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1-5.

- [2] RANKOV B, WITTNEBEN A. Achievable rate regions for the two-way relay channel [C] // Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1668 – 1672.
- [3] FAN L, LEI X, FAN P, et al. Outage probability analysis and power allocation for two-way relay networks with user selection and outdated channel state information [J]. IEEE communications letters, 2012, 16(5): 638 – 641.
- [4] 吴宇平, 赵旦峰, 佟宁宁. 信道-网络编码的联合迭代译码设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1521 – 1526. (WU Y P, ZHAO D F, TONG N N. Joint iterative decoding design of channel of channel-network coding [J]. Systems engineering and electronics, 2013, 35(7): 1521 – 1526.)
- [5] 孙文胜, 陈安辉. 无线协作通信中的网络编码-增量中继机制 [J]. 计算机应用, 2011, 31(12): 3191 – 31944. (SUN W S, CHEN A H. Network coding-incremental relay mechanism in wireless cooperative communication system [J]. Journal of computer applications, 2011, 31(12): 3191 – 31944.)
- [6] LANEMAN J N, TSE D N C, WOMNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE transactions on information theory, 2004, 50(12): 3062 – 3080.
- [7] GOMADAM K S. Optimal relay functionality for SNR maximization in memoryless relay networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2007, 25(2): 390 – 401.
- [8] KARIM M A, YANG T, YUAN J, et al. A novel soft forwarding technique for memoryless relay channels based on symbol-wise mutual information [J]. IEEE communications letters, 2010, 14(10): 927 – 929.
- [9] KARIM M A, YUAN J H, CHEN Z, et al. Analysis of mutual information based soft forwarding relays in AWGN channels [C] // GLOBECOM 2011: Proceedings of the 2011 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1 – 5.
- [10] MENG W X, FANG R, LI C, et al. Soft network coding design in two-way relay channel [C] // GLOBECOM 2012: Proceedings of the 2012 IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 4441 – 4446.
- [11] PANG L, ZHANG Y, LI J, et al. Power allocation and relay selec-
- tion for two-way relaying systems by exploiting physical-layer network coding [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2014, 63(6): 2723 – 2730.
- [12] HAN Y, TING S H, HO C K, et al. Performance bounds for two-way amplify-and-forward relaying [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2009, 8(1): 432 – 439.
- [13] 邓卫华, 王闻今, 金石, 等. 一种利用软信息网络编码在双向中继网络进行估计转发的方法 [J]. 电子学报, 2012, 40(2): 308 – 312. (DENG W H, WANG W J, JIN S, et al. An estimate-and-forward scheme for two-way relay networks with soft network coding [J]. Acta electronica sinica, 2012, 40(2): 308 – 312.)
- [14] 郑侃, 彭岳星. 协作通信及其在 LTE-Advanced 中的应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 55 – 61. (ZHENG K, PENG Y X. Cooperative communication and its application in LTE-Advanced systems [M]. Beijing: Post & Telecommunication Press, 2010: 55 – 61.)
- [15] YI Z Y, JU M C, KIM I M. Outage probability and optimum power allocation for analog network coding [J]. IEEE transactions on wireless communication, 2011, 10(2): 407 – 412.
- [16] ZENG X N, GHRAYEB A, HASNA M. Joint optimal threshold-based relaying and ML detection in network-coded two-way relay channels [J]. IEEE transactions on communications, 2012, 60(9): 2657 – 2667.
- [17] 方涵. 协同无线中继网络编码的链路性能研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2012: 45 – 48. (FANG H. Research for link performance of cooperative wireless relay system with network coding [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012: 45 – 48.)

Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61371172, 61240007), the Science and Technology Research Project of Heilongjiang Province (GC13A307) and the Heilong Jiang Postdoctoral Funds for Scientific Research Initiation (LBH-Q12122).

GUO Qiang, born in 1972, Ph. D., professor. His research interests include modern communication technology, radar countermeasures.

QIN Yue, born in 1990, M. S. candidate. Her research interests include cooperative communication, network coding.

(上接第 43 页)

- [14] VLACHOS M, KOLLIOS G, GUNOPULOS D. Elastic translation invariant matching of trajectories [J]. Machine learning, 2005, 58(2/3): 301 – 334.
- [15] KRUMM J. A Markov model for driver turn prediction [C] // SAE 2008 World Congress. Detroit, MI: [s. n.], 2008: No. 2008-01-0195.
- [16] CHENG C, JAIN R, VAN DEN BERG E. Location prediction algorithms for mobile wireless systems [C] // Wireless Internet Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003: 245 – 263.
- [17] XUE A, ZHANG R, ZHENG Y, et al. Destination prediction by sub-trajectory synthesis and privacy protection against such prediction [C] // ICDE 2013: Proceedings of the 2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 254 – 265.
- [18] SONG L, KOTZ D, JAIN R, et al. Evaluating location predictors with extensive Wi-Fi mobility data [C] // INFOCOM 2004: Pro-

ceedings of the Twenty-Third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 1414 – 1424.

Background

This work is partially supported by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (2012AA011004), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2013XK10), the Coal Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U1261201).

SONG Lujie, born in 1990, M. S. candidate. His research interests include data mining, trajectory prediction.

MENG Fanrong, born in 1962, Ph. D., professor. Her research interests include database technology, data mining.

YUAN Guan, born in 1982, Ph. D., associate professor. His research interests include data mining, knowledge engineering.