

双向中继信道中物理层网络编码的检测

颜伟¹, 蔡跃明¹, 潘成康²

(1. 解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 中国移动研究院, 北京 100053)

摘要: 对双向中继信道中物理层网络编码的检测进行了研究, 最大似然检测性能好但是实现复杂度高。因此, 在信源节点未知信道状态信息情况下, 提出了 2 种检测方案: 基于似然比函数的似然比检测和基于最大后验概率准则的最大后验概率检测。同时, 针对信源节点已知信道状态信息的特殊情形, 进行了同样的推导。分析和仿真结果表明, 相比于分别检测出 2 个信源信息的最大似然检测, 似然比检测的 BER 性能更优, 但似然比检测需要知道额外的噪声方差信息, 最大后验概率检测与最大似然检测等价, 而且最大后验概率检测在实现复杂度上相对较低。

关键词: 物理层网络编码; 最大似然; 似然比; 最大后验概率; 检测

中图分类号: TN911.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)02-0082-05

Detection for physical-layer network coding in two-way relay channels

YAN Wei¹, CAI Yue-ming¹, PAN Cheng-kang²

(1. Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: The detection for physical-layer network coding (PNC) in two-way relay channels was investigated. Maximum-likelihood (ML) detection not only had great performance but also had high computational complexity. Therefore, without channel state information (CSI) at source nodes, two detection schemes were proposed. The first scheme was likelihood ratio (LR) detection based on LR function, and the other was maximum a posteriori probability (MAP) detection based on MAP rule. Meanwhile, It carried out similar analysis if CSI was available at source nodes. Compared to ML detection which separately detects two source messages, numerical and simulation results show that LR detection outperforms it in terms of BER metric with the requirement for additional noise variance information. And MAP detection is equivalent to ML detection, and it has lower computational complexity.

Key words: physical-layer network coding; maximum-likelihood; likelihood ratio; maximum a posteriori probability; detection

1 引言

将中继引入无线网络可取得提高频谱效率、增大覆盖面积和节省无线资源等诸多优势。双

向中继信道是一种典型的传输信道, 其简单模型为 2 个信源节点通过中继节点交换信息。传统上, 在时分双工 (TDD, time division duplex) 系统中完成一次数据交换需要 4 个阶段。为了增强通信系统的

收稿日期: 2010-11-24; 修回日期: 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60972051, 61001107); 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03006-002-04); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2010101)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60972051, 61001107); The Important National Science & Technology Specific Project (2010ZX03006-002-04); The Jiangsu Province Natural Science Foundation of China (BK2010101)

有效性, 网络编码被引入以提高频谱效率^[1]。利用数字网络编码 (DNC, digital network coding) 可以只需要 3 个阶段完成一次信息交换。如果采用模拟网络编码 (ANC, analog network coding)^[2]或物理层网络编码^[3], 那么仅在 2 个阶段内就可以完成一次信息交换。数字网络编码采用译码转发, 需要对信息进行完全译码, 而模拟网络编码采用放大转发, 信源节点利用自干扰消除获得各自信息。文献[4]对两阶段、三阶段网络编码和四阶段信息交换的性能分析和比较进行了归纳总结。

将 2 个信源节点的信息分别表示为 x_A 和 x_B 。数字网络编码首先分别从前 2 个阶段的接收信号中检测出估计的 2 个信源信息 \hat{x}_A 和 \hat{x}_B , 并对其完全译码, 再对 2 个信源节点的比特信息进行异或运算, 然后在第 3 个阶段广播异或后比特信息对应的调制符号。模拟网络编码在第 1 个阶段中同时接收来自 2 个信源节点的信息, 在第 2 个阶段直接放大转发第 1 个阶段的混合接收信号, 但是放大信号的同时放大了噪声。因为中继信息 x_R 仅表示估计的 2 个信源信息 \hat{x}_A 和 \hat{x}_B 的逻辑关系, 所以在中继节点处不需要对 2 个信源信息进行完全译码。根据这个原理, 物理层网络编码采用检测转发, 直接将接收到的混合信号映射成可表示 2 个信源信息逻辑关系的中继信息。

在双向单中继信道中, 物理层网络编码的检测研究也已相继展开。文献[5]提出了去噪转发方案, 并探讨了去噪转发的和速率。基于去噪转发方案, 文献[6]设计调制星座来映射到物理层网络编码函数, 并将结论推广到中继多天线情形, 仿真结果表明对比数字网络编码可以极大地提高端到端吞吐量。文献[7]针对信源非对称情形, 将接收的混合信号映射到不同码本来提高系统性能。文献[8]将物理层网络编码函数分类为基于绝对值和基于非绝对值 2 种策略, 在平均功率限制下最小化平均错误概率, 对解调转发和估计转发的检测进行了讨论, 并通过函数分析在高信噪比下优化网络编码函数使得满足最小化平均错误概率。对于物理层网络编码的检测, 最大似然检测可以获得非常好的性能, 但是实现复杂度高。本文分信源节点未知和已知信道状态信息 2 种情况, 根据似然比函数, 推导了双向单中继信道模型中物理层网络编码的似然比检测, 同时根据最大后验概率准则, 推导了物理层网络编码的最大后验概率检测。分析和仿真结果表明, 似

然比检测的 BER 性能优于 ML 检测, 但是需要知道额外的噪声方差信息, 最大后验概率检测等价于 ML 检测, 而且最大后验概率检测在实现复杂度上相对较低。

2 系统模型

本文考虑 TDD 系统下窄带块衰落双向单中继信道, 如图 1 所示, 在本文中研究两阶段物理层网络编码方案。2 个信源节点 A 和 B 都借助中继节点 R 分别传输各自的信息给对方, 其中信源节点 A 、 B 和中继节点 R 均配置单天线并工作在半双工模式。假设 2 个信源节点之间的直传链路不存在, 并且中继节点可以获得完美的上行信道状态信息。所有节点采用 BPSK 调制, 并且 2 个信源节点等概率发送符号 $\{+1, -1\}$, 分析结果可以简单扩展到 QPSK 调制。

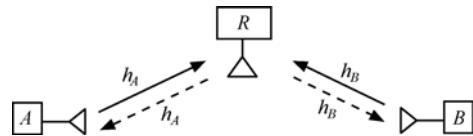


图 1 TDD 系统下双向单中继信道示意

在第 1 个阶段, 即多接入阶段, 2 个信源节点 A 和 B 同时传输信息给中继节点 R 。中继节点 R 处的接收信号可以分别表示为

$$y = h_A \sqrt{P_A} x_A + h_B \sqrt{P_B} x_B + n \quad (1)$$

其中, x_k 是信源 k 的传输符号, $k \in \{A, B\}$; h_k 是信源 k 到中继节点 R 的信道系数; n 是中继节点 R 处的噪声, $n \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$; P_k 是信源 k 的发送功率。

在信源节点未知信道状态信息时, 假设信源 A 和 B 的传输功率都为 P , 那么式(1)可以重写为

$$y = h_A x_A + h_B x_B + n' \quad (2)$$

其中, n' 为复高斯噪声, 方差为 $\sigma'^2 = \sigma^2 P^{-1}$ 。如果信源节点可以获知信道状态信息, 通过功率和相位调整, 在 $h_A = h_B$ 的情况下, 可以得到

$$y = x_A + x_B + n'' \quad (3)$$

其中, n'' 为实高斯噪声, 方差为 $\rho^2 = \sigma'^2 / (2|h_k|^2 P)$ 。

在第 2 个阶段, 即广播阶段, 中继节点 R 对接收的混合信号进行检测, 并将信号映射成中继信号 $x_R = x_A \oplus x_B$, 其中 \oplus 表示 2 个信源的比特信息异或对应的符号逻辑关系, 将这个过程称之为去噪。然后, 中继节点 R 广播中继信号 x_R 给信源节点 A 和 B 。

在信源节点未知信道状态信息时，中继节点可以利用 ML 检测算法检测符号对 (x_A, x_B) ：

$$(\hat{x}_A, \hat{x}_B) = \arg \min_{(x_A, x_B)} |y - h_A x_A - h_B x_B|^2 \quad (4)$$

从而可以得到 $\hat{x}_R = \hat{x}_A \oplus \hat{x}_B$ 。在信源节点可以获知信道状态信息时，ML 检测算法与下面的硬判决等价

$$\hat{x}_R = \begin{cases} 1, & |y| \leq 1 \\ -1, & |y| < 1 \end{cases} \quad (5)$$

但是，对符号 x_A 和 x_B 分别完全译码的 ML 检测算法在双向中继信道中不是最优的，因为中继节点不需要对符号 x_A 和 x_B 分别完全译码，仅需要检测出 $x_A \oplus x_B$ 。

3 检测方案

本节分为 2 个部分。第 1 部分，在信源节点未知信道状态信息情况下，描述了似然比和最大后验概率 2 种检测方案。针对信源节点已知信道状态信息的特殊情形，作为特例分析，在第 2 部分给出了上述 2 种检测方案的结论。

3.1 信源未知信道状态信息

3.1.1 似然比检测

为了方便，令 $x = |y - h_A x_A - h_B x_B|^2$ ，变量 x 服从 χ^2 分布，概率密度函数为 $f(x) = \sigma^{-2} e^{-x/\sigma^2}$ 。基于贝叶斯理论， x_R 的似然比函数可以计算为

$$\begin{aligned} L(x_R | y) &= \frac{\Pr(y | x_R = 1)}{\Pr(y | x_R = -1)} \\ &= \frac{f(y | x_A = 1, x_B = 1) + f(y | x_A = -1, x_B = -1)}{f(y | x_A = -1, x_B = 1) + f(y | x_A = 1, x_B = -1)} \\ &= \frac{e^{-|y-h_A-h_B|^2/\sigma^2} + e^{-|y+h_A+h_B|^2/\sigma^2}}{e^{-|y+h_A-h_B|^2/\sigma^2} + e^{-|y-h_A+h_B|^2/\sigma^2}} \\ &= \frac{e^{-|h_A+h_B|^2/\sigma^2} (e^{-2(a+b)\sigma^2} + e^{2(a+b)\sigma^2})}{e^{-|h_A-h_B|^2/\sigma^2} (e^{-2(a-b)\sigma^2} + e^{2(a-b)\sigma^2})} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $a = \Re(h_A y^*)$ 和 $b = \Re(h_B y^*)$ ， $\Re(\cdot)$ 表示取实部和 $(\cdot)^*$ 表示取共轭。似然比函数 $L(x_R | y)$ 是 x_R 取 +1 和 -1 的先验概率之比。因此， x_R 的似然比检测表示为

$$\hat{x}_R = \begin{cases} 1, & L(x_R | y) \geq 1 \\ -1, & L(x_R | y) < 1 \end{cases} \quad (7)$$

3.1.2 最大后验概率检测

文中中继节点选择检测符号对 (x_A, x_B) ，使得联合后验概率最大化，即最大化 $\Pr((x_A, x_B) | y)$ 。通过转换可以等价于：选择符号对 (x_A, x_B) 使得最大化函数 f 。

$$\begin{aligned} f(y | (x_A, x_B)) &= \sigma^{-2} \exp(-\sigma^{-2} |y - h_A x_A - h_B x_B|^2) \\ &= \sigma^{-2} \exp(-\sigma^{-2} |y|^2) \exp(-\sigma^{-2} (|h_A|^2 |x_A|^2 + |h_B|^2 |x_B|^2)) \\ &\quad \exp(2\sigma^{-2} (ax_A + bx_B - cx_A x_B)) \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $c = \Re(h_A h_B^*)$ 。去掉与 (x_A, x_B) 无关的部分，最大化问题可以转换为

$$\arg \max_{(x_A, x_B)} (ax_A + bx_B - cx_A x_B) \quad (9)$$

对式(9)进行讨论，讨论结果如下。

1) 对于 $a > 0$ 、 $b > 0$ 和 $c < 0$ ，可以得到 $(x_A, x_B) = (+1, +1)$ 。

2) 对于 $a > 0$ 、 $b > 0$ 和 $c > 0$ ，结果如下：

$$\begin{cases} (x_A, x_B) = (+1, +1), & \min(a, b) > c \\ (x_A, x_B) = (+1, -1), & \min(a, c) > b \\ (x_A, x_B) = (-1, +1), & \min(b, c) > a \end{cases} \quad (10)$$

3) 对于 $a < 0$ 、 $b < 0$ 和 $c < 0$ ，可以得到 $(x_A, x_B) = (-1, -1)$ 。

4) 对于 $a < 0$ 、 $b < 0$ 和 $c > 0$ ，结果如下：

$$\begin{cases} (x_A, x_B) = (-1, -1), & \min(-a, -b) > c \\ (x_A, x_B) = (-1, +1), & \min(-a, c) > -b \\ (x_A, x_B) = (+1, -1), & \min(-b, c) > -a \end{cases} \quad (11)$$

5) 对于 $a < 0$ 、 $b > 0$ 和 $c > 0$ ，可以得到 $(x_A, x_B) = (-1, +1)$ 。

6) 对于 $a < 0$ 、 $b > 0$ 和 $c < 0$ ，结果如下：

$$\begin{cases} (x_A, x_B) = (-1, +1), & \min(-a, b) > -c \\ (x_A, x_B) = (-1, -1), & \min(-a, -c) > b \\ (x_A, x_B) = (+1, +1), & \min(b, -c) > -a \end{cases} \quad (12)$$

7) 对于 $a > 0$ 、 $b < 0$ 和 $c > 0$ ，可以得到 $(x_A, x_B) = (+1, -1)$ 。

8) 对于 $a > 0$ 、 $b < 0$ 和 $c < 0$ ，结果如下：

$$\begin{cases} (x_A, x_B) = (+1, -1), & \min(-a, b) > -c \\ (x_A, x_B) = (+1, +1), & \min(-a, -c) > b \\ (x_A, x_B) = (-1, -1), & \min(b, -c) > -a \end{cases} \quad (13)$$

根据上述讨论，对 x_A 和 x_B 分别进行检测，可以得到

$$\hat{x}_A = \text{sign}\left(a + \frac{1}{2}|b-c| - \frac{1}{2}|b+c|\right) \quad (14)$$

$$\hat{x}_B = \text{sign}\left(b + \frac{1}{2}|a-c| - \frac{1}{2}|a+c|\right) \quad (15)$$

在物理层网络编码中，中继节点不需要对符号 x_A 和 x_B 分别完全译码，仅需要检测出 $x_A \oplus x_B$ 。由此可以得到

$$\hat{x}_R = \text{sign}\left(a + \frac{1}{2}|b-c| - \frac{1}{2}|b+c|\right) \cdot \text{sign}\left(b + \frac{1}{2}|a-c| - \frac{1}{2}|a+c|\right) \quad (16)$$

通过进一步分析，还可以得到另外一种表达式：

$$\hat{x}_R = \begin{cases} \text{sign}(a) \cdot \text{sign}(b), & \min(|a|, |b|) \geq |c| \\ -\text{sign}(c), & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

3.2 信源已知信道状态信息

在 $h_A = h_B$ 的特殊情况下分析似然比检测，式(3)中由于有 $x_A + x_B$ 的关系，故似然比函数可以计算为

$$\begin{aligned} L(x_R | y) &= \frac{\Pr(y | x_R = 1)}{\Pr(y | x_R = -1)} \\ &= \frac{f(y | x_A = 1, x_B = 1) + f(y | x_A = -1, x_B = -1)}{f(y | x_A + x_B = 0)} \\ &= \frac{1}{2} e^{-2\rho^2} (e^{-2y\rho^2} + e^{2y\rho^2}) \end{aligned} \quad (18)$$

令 $L(x_R | y') = 1$ ，可得

$$|y'| = 1 + \frac{\rho^2}{2} \ln\left(1 + \sqrt{1 - e^{-4\rho^2}}\right) \quad (19)$$

因此，似然比检测可以表示为

$$\hat{x}_R = \begin{cases} 1, & |y| \geq |y'| \\ -1, & |y| < |y'| \end{cases} \quad (20)$$

通过上述分析，式(19)的判决门限与文献[8]中在 $h_A = h_B = 1$ 情况下最小化平均错误概率推导的最优门限值形式相同。对于最大后验概率检测，利用 3.1.2 节相同的方法，可以得到结论（式(5)），即 ML 检测与最大后验概率检测等价。

4 仿真分析

本节利用 Monte Carlo 仿真分别分析信源节点已知和未知信道状态信息下的双向单中继系统的

性能。在信源节点已知信道状态信息时，信道系数 $h_A \sim \text{CN}(0,1)$ 和 $h_B \sim \text{CN}(0,1)$ ，噪声 $\delta^2 = N_0$ 。为了简便，在信源节点已知信道状态信息时，信道系数取为 $h_A = h_B = 1$ ，噪声 $\rho^2 = N_0$ 。

取 BER 作为性能分析指标，BER 定义为 $\Pr(\hat{x}_A \oplus \hat{x}_B \neq x_A \oplus x_B)$ 。为了验证 ML 检测和式(16)、式(17)所示的 2 种最大后验概率检测等价，图 2 给出了上述 3 种不同检测方案的 BER 性能曲线，通过仿真曲线可以得出 ML 检测与推导的 2 种最大后验概率检测等价的结论。但是对比 ML 检测，最大后验概率检测利用硬判决具有相对较低的复杂度。图 3 给出了信源节点已知信道状态信息时 ML 检测和 LR 检测的 BER 随信噪比的曲线，仿真表明 LR 检测的 BER 性能稍微优于 ML 检测，随着信噪比的增加，LR 检测的性能与 ML 检测性能接近，图 4 给出了信源节点未知信道状态信息时 ML 检测和 LR 检测的 BER 随信噪比的曲线，仿真也表明 LR 检测的 BER 性能略优于 ML 检测，随着信噪比的增加，LR 检测的性能与 ML 检测性能接近。图 3 和图 4 可以进一步说明在物理层网络编码中，

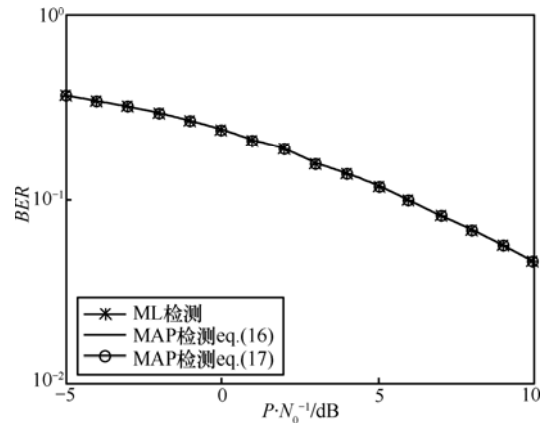


图 2 ML 检测与 2 种最大后验概率检测的 BER 性能曲线

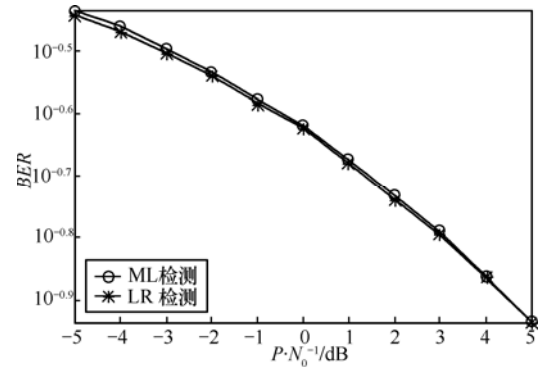


图 3 信源节点已知信道状态信息时 ML 检测与 LR 检测的 BER 性能曲线

中继节点不需要对符号 x_A 和 x_B 分别完全译码, 仅需要检测出符号 x_A 和 x_B 的逻辑关系, 从而获得更好的性能。

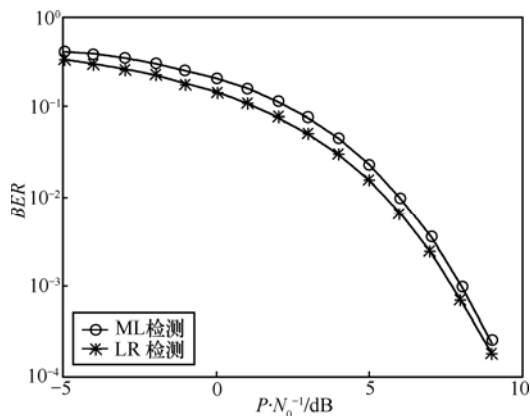


图 4 信源节点未知信道状态信息时 ML 检测与 LR 检测的 BER 性能曲线

5 结束语

针对双向单中继信道, ML 检测可以获得很好的性能, 但是实现复杂度高。因此, 在信源节点未知和已知信道状态信息 2 种情况下, 本文分别根据似然比函数和最大后验概率准则推导了物理层网络编码的似然比检测和最大后验概率检测。分析和仿真表明, 似然比检测性能略优于 ML 检测, 最大后验概率检测等价于似然比检测。对于双向中继信道中物理层网络编码的检测, 从理论上寻找比 ML 检测性能更优或复杂度更低的检测算法, 仍需要进一步的深入研究。

参考文献:

[1] KATTI S, RAHUL H, HU W, *et al.* XORs in the air: practical wireless network coding[A]. Proc of ACM SIGCOMM2006[C]. Pisa, Italy, 2006. 243-254.

[2] KATTI S, GOLLAKOTA S, KATABI D. Embracing wireless interference: analog network coding[A]. Proc of ACM SIGCOMM2007[C]. Kyoto, Japan, 2007. 397-408.

[3] ZHANG S, LIEW S C, LAM P P. Hot topic: physical-layer network coding[A]. Proc of ACM Mobicom[C]. Los Angeles, CA, 2006. 358-365.

[4] LOUIE R H Y, LI Y, VUCETIC B. Practical physical layer network coding for two-way relay channels: performance analysis and comparison[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2010, 9(2): 764-777.

[5] POPOVSKI P, YOMO H. Physical network coding in two-way wireless relay channels[A]. Proc of IEEE ICC2007[C]. Glasgow, Scotland, 2007. 707-712.

[6] KOIKE-AKINO T, POPOVSKI P, TAROKH V. Optimized constellations for two-way wireless relaying with physical network coding[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(5): 733-787.

[7] PAN C, ZHENG J. Mapping codebook-based physical network coding for asymmetric two-way relay channels[A]. Proc of IEEE ICC2010[C]. CapeTown, South Africa, 2010. 1-5.

[8] CUI T, HO T, KLIEWER J. Memoryless relay strategies for two-way relay channels[J]. IEEE Trans on Communications, 2009, 57(10): 3132-3143.

作者简介:



颜伟 (1987-), 男, 湖北仙桃人, 解放军理工大学硕士生, 主要研究方向为协同通信、网络编码等。



蔡跃明 (1961-), 男, 福建永春人, 解放军理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、协同通信和移动通信等。



潘成康 (1978-), 男, 江苏宿迁人, 中国移动通信研究院博士后, 主要研究方向为 LTE-A 空中技术和绿色通信技术。