

# 联合网络编码和叠加编码的协作发射策略

王海荣<sup>1,2</sup>, 黄永明<sup>1,2</sup>, 杨绿溪<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 教育部水声信号处理重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 提出一种联合网络编码和叠加编码的协作发射策略。对传统的解码转发中继采用网络编码可以提高频谱效率, 这是因为放宽了不同数据流之间的正交约束并且可通过预编码/波束形成技术减轻由此带来的干扰。与基于信道状态信息获得近似最优性能但计算繁重的波束形成策略相比, 提出利用叠加编码思想确定网络预编码处理向量, 该方法无需发射端预知 CSI 因而大大减小了计算复杂度。理论分析和仿真结果同时表明, 所提策略可获得与基于 CSI 近似最优的线性网络预编码和脏纸网络预编码策略极为相近的性能。

**关键词:** 网络编码; 叠加编码; 协作发射; 预编码

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)08-0001-09

## Cooperative transmission design combining network coding and superposition coding

WANG Hai-rong<sup>1,2</sup>, HUANG Yong-ming<sup>1,2</sup>, YANG Lv-xi<sup>1,2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Signal Processing of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** A joint network coding (NC) and superposition coding scheme was proposed to realize a cooperative transmission. The use of NC was able to improve spectral efficiency over classical decode and forward relaying strategy by relaxing the orthogonality constraint between different data streams and mitigating the resultant interference through precoding. In contrast to using the CSI based beamforming scheme which could achieve near optimal performance but involves huge computational complexity, designing the beamforming vector using the form of superposition coding was proposed, such that CSI at the transmitters were not required and the involved computation was greatly reduced. The theoretical analysis and simulation results reveal that the proposed scheme shows performances close to the near-optimal CSIT based scheme.

**Key words:** network coding; superposition coding; cooperative transmission; precoding

### 1 引言

协作发射是一种利用无线信道的广播特性实现网络节点之间相互辅助发射的一种技术。如果把辅

助发射的节点(下面称为中继节点)视为信源节点的虚拟天线, 那么即使单天线配置的源节点亦可实现虚拟多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)传输, 即可获得协作发射增益<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期: 2011-01-20; 修回日期: 2011-05-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2007CB310603); 国家自然科学基金资助项目(60902012, 61071113); 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03003-001, 2011ZX03003-003); 教育部博士点基金资助项目(20090092120013, 20100092110010)

**Foundation Items:** The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB310603); The National Natural Science Foundation of China (60902012, 61071113); The National Science and Technology Major Project of China (2011ZX03003-001, 2011ZX03003-003); The Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20090092120013, 20100092110010)

具体而言，协作的引入有利于提高发射功率效率和编码速率。从功率方面看，直观上中继节点由于要为自己和信源节点同时发送数据，因此需要更高的发射功率，但实际上由于额外的分集增益，中继节点和信源节点的基本发射功率需求都能有所降低；从速率方面看也有类似的结果，文献[3]已证明额外分集增益的存在可以提升信道编码速率。目前，针对不同场景的协作发射研究工作都在进行中，典型的场景包括无线蜂窝网<sup>[4]</sup>，ad hoc 网/传感器网络<sup>[5]</sup>等。从中继节点使用的转发策略来看，在已见报导的协作策略中，最简单和著名的是放大转发（AF, amplify and forward）和解码转发（DF, decode and forward）策略<sup>[2]</sup>。其中，DF 还可分为重复编码（RDF, DF with repetition coding）和并行信道编码（PDF, DF with parallel channel coding）。实际系统中，中继节点通常都是半双工的，即不能同时接收和发射，因此通常会把发射时隙分为 2 个子时隙：一个用于直接发射，另一个用于中继发射。但是，研究已表明这些策略在实现信道容量方面都是次优的。

网络编码（NC, network coding）的概念最初是由 Ahlswede 等<sup>[6]</sup>提出的，用于应用层的信息分组合并，其目的在于提高有线网络的容量，需要注意的是它没有考虑干扰和噪声。这个概念如今已经被推广到了无线网络领域，利用无线通信的广播特性可以获得发射增益<sup>[7]</sup>。例如，网络编码在双向中继系统中的应用已被证明是有效的，文献[8,9]中提出的双向中继中的 AF 策略可以将原本需要 4 个时隙的分组交换时间减少为 2 个时隙。

目前已有的协作发射策略一般都针对经典的 3 节点模型：信源、中继和信宿，而本文则考虑如图 1 所示的 4 节点网络，其中， $S_1, S_2$  是信源，协作地向信宿  $D_1, D_2$  发射数据。该模型与文献[2]类似，主要区别在于时隙分配的不同。本文采用了文献[10]

中的时隙分配方式，两者的差异参见图 2。文献[10]提出了一种如图 2(b)所示的采用了网络预编码的两时隙协作发射策略，即在每个时隙中，一个信源同时发射并中继。其中，预编码可以采用线性网络编码（liner NC）和脏纸网络编码（dirty paper coding NC），但文献[10]并未给出具体实用的编码方法。注意到文献[11]给出了一种基于叠加调制的协作发射策略，但其基于 2 个信源，一个信宿的 3 节点模型，且 2 个信源均向该信宿发送有用信息，并互相协作。叠加编码某种程度上是脏纸编码（DPC, dirty paper coding）的一个实例，本文把这种思想推广到更复杂的如图 1 所示的 4 节点模型，提出的一种联合了网络编码和叠加编码（JNS, joint network coding and superposition coding）的协作发射策略。该策略利用叠加调制，多用户检测以及网络编码中的自干扰消除，能在不增加复杂度的前提下，获得明显优于经典 DF 协作发射策略的性能；与文献[10]中的网络预编码策略相比，本文所提的 JNS 策略在发射端无需知道信道信息。仿真结果表明，采用给定的预编码函数，JNS 策略即可获得非常接近 Liner NC 和 DPC NC 策略的速率和误码率性能。

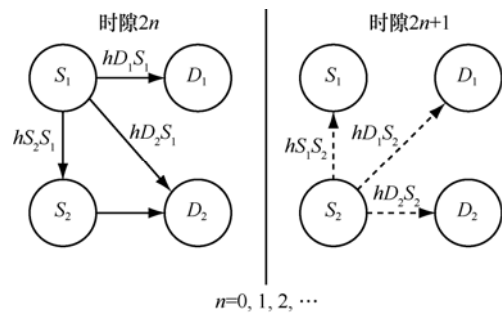


图 1 信源/中继与信宿节点间的信道模型

本文的组织结构如下：第 2 节介绍了系统模型；第 3 节提出了联合网络编码和叠加编码的协作发射

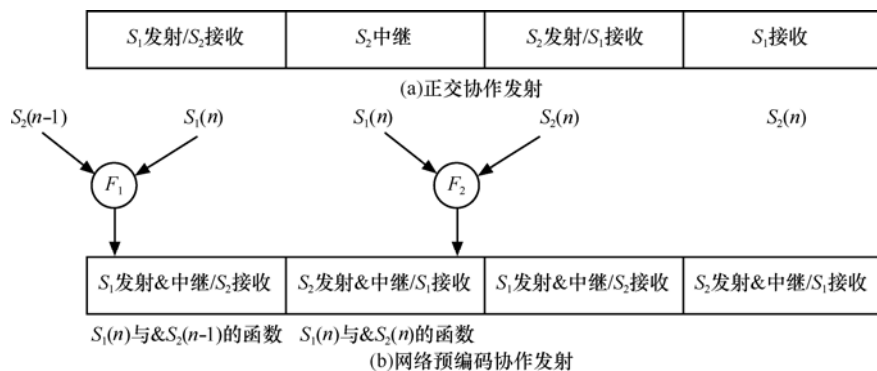


图 2 时分信道中的时隙分配

策略；第 4 节对所提策略进行了性能分析；第 5 节是数值仿真以及与其他协作策略的性能比较结果；第 6 节是结束语。

本文所使用的符号定义如下：矩阵及矢量均用黑体大写字母表示， $(A)^T$ 、 $(A)^*$ 、 $(A)^H$  分别表示矩阵  $A$  的转置、共轭和共轭转置， $\text{tr}(A)$ 、 $\det(A)$ 、 $\|A\|_F = \sqrt{\text{tr}(AA^H)}$  则表示矩阵的迹，行列式和 Frobenius 范数， $I_N$  表示  $N$  阶单位阵。

## 2 系统模型

如图 1 所示的系统模型为一个 4 节点网络，每个节点配置单根天线。其中，2 个信源表示为  $S_1$ ， $S_2$ ，通过协作交替地向信宿  $D_1$ ， $D_2$  发射码元符号  $s_1(n), s_2(n)$ ， $n \in \{1, \dots, N\}$  表示信息码元的序号， $N$  为  $S_1$  和  $S_2$  均有码元符号发射的个数。考虑如下方式的协作发射策略：在偶数时隙  $2n$ ， $S_1$  发送信号  $x_1(2n)$ ，其余节点接收信号，而在奇数时隙  $2n+1$ ， $S_2$  发送信号  $x_2(2n+1)$ ，其余节点接收信号。为了实现协作发射， $x_1(2n)$  和  $x_2(2n+1)$  通常应当为 2 个信源码元符号的一个函数，例如，采用网络编码。为了实用，在这里仅考虑最简单的函数是线性组合的情况。具体而言， $x_1(2n)$  和  $x_2(2n+1)$  可分别表示为

$$\begin{aligned} x_1(2n) &= F_1 [s_1(n), \hat{s}_2(n-1)]^T \\ &= f_{11}s_1(n) + f_{12}\hat{s}_2(n-1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_2(2n+1) &= F_2 [\hat{s}_1(n), s_2(n)]^T \\ &= f_{21}\hat{s}_1(n) + f_{22}s_2(n) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $F_i = [f_{i1}, f_{i2}]$ ， $i \in \{1, 2\}$  表示在  $S_i$  处的波束形成向量， $\hat{s}_2(n-1)$  和  $\hat{s}_1(n)$  分别为在信源  $S_1$  处对  $s_2(n-1)$  的估计和在信源  $S_2$  处对  $s_1(n)$  的估计。由于每个信源在每 2 个时隙上仅发射一次信号，所以每个信源可以在不发射时估计另一个信源的发射符号。考虑每个信源的功率约束，假设  $E[x_i(k)^2] = \varepsilon_s$ ， $i \in \{1, 2\}$ ，其中，偶时隙时， $k = 2n$ ，奇时隙时， $k = 2n+1$ 。

当一个信源发射，网络中其他所有的节点接收信号并检测。特别地，在偶时隙  $k = 2n$ ， $S_1$  发射时，其他节点接收的信号可表示为

$$y_{S_2}(2n) = h_{S_2S_1}x_1(2n) + z_{S_2}(2n) \quad (3)$$

$$y_{D_j}(2n) = h_{D_jS_1}x_1(2n) + z_{D_j}(2n), j \in \{1, 2\} \quad (4)$$

类似地，在奇时隙  $k = 2n+1$ ， $S_2$  发射时，其他节点接收的信号可表示为

$$y_{S_1}(2n+1) = h_{S_1S_2}x_2(2n+1) + z_{S_1}(2n+1) \quad (5)$$

$$y_{D_j}(2n+1) = h_{D_jS_2}x_2(2n+1) + z_{D_j}(2n+1), j \in \{1, 2\} \quad (6)$$

在式(3)~式(6)中， $y_{S_i}(k)$  和  $y_{D_j}(k)$  分别表示信源  $S_i$  和信宿  $D_j$  在时隙  $k$  的接收信号， $h_{uv}$  表示发射机  $u \in \{S_1, S_2\}$  与接收机  $v \in \{S_1, S_2, D_1, D_2\}$  间的信道，建模为独立的零均值方差为  $\sigma_{uv}^2$  的循环对称复高斯随机变量， $z_v(k)$  表示时隙  $k$  时节点  $v$  处的方差为  $\sigma^2$  的复高斯白噪声。

需要指出的是，偶时隙  $S_1$  在发送自身信号  $s_1(n)$  的同时还协助  $S_2$  发送信号  $\hat{s}_2(n-1)$ ，其中， $\hat{s}_2(n-1)$  可以从上一个时隙（奇时隙）的接收信号中估计获得；而在奇时隙  $S_2$  也需同时发送信号  $s_2(n)$  和  $\hat{s}_1(n)$ ，其中， $\hat{s}_1(n)$  可以从上一个时隙（偶时隙）的接收信号中估计获得。所以，上述的系统模型属于网络编码协作发射的范畴。从最优设计的角度考虑， $S_1$  和  $S_2$  的实际发送信号  $x_1(2n)$  和  $x_2(2n+1)$  是码元向量  $[s_1(n), \hat{s}_2(n-1)]^T$  和  $[\hat{s}_1(n), s_2(n)]^T$  的非线性函数，它同时也是所有信道状态信息  $\{h_{uv}\}$  的函数，因此需要在信源端精确已知全局信道状态信息，这在实际系统中很难实现。鉴于此，本文主要考虑低实现开销的次优方案，即把网络编码函数限定为线性函数，数学表示为

$$F_1(s_1(n), \hat{s}_2(n-1)) = f_1^T s_1 \quad (7)$$

$$F_2(\hat{s}_1(n), s_2(n)) = f_2^T s_2 \quad (8)$$

其中， $s_1 @ [s_1(n), \hat{s}_2(n-1)]$ ， $s_2 @ [\hat{s}_1(n), s_2(n)]$ ， $f_i = [f_{i1}, f_{i2}]^T$ ， $i \in \{1, 2\}$  表示码元向量的预处理向量或波束成形矢量。

## 3 协作发射设计

上述协作发射模型中，2 个信源相互协作发送的同时也引入了相互干扰，比如在偶时隙， $\hat{s}_2(n-1)$  作为中继信息，是期望发送给  $D_2$  的，但它对  $D_1$  而言则是干扰；在奇时隙也有同样的问题。因此需要对预处理向量  $f_1$  和  $f_2$  进行优化以解决该问题。假设信源端已知所有信道信息，则干扰在发射端是已知的，通过类似脏纸编码的预处

理方法可预消除干扰，以充分发挥协作发射在提高频谱效率方面的优势。文献[10]给出了线性网络预编码和脏纸网络预编码 2 种预处理策略，但这 2 种策略存在如下的问题：①它们虽能有效解决干扰问题但都要求发射端已知信道幅值。对于 TDD 系统，利用信道的互易性发射端可获得信道信息，但是对于 FDD 系统，则需要额外的反馈信道来获取信道信息；②预处理向量  $f_1$  和  $f_2$  的优化是非凸的，其求解一般只能采用穷举法，需要很高的计算复杂度。

为此，本文提出了一种联合利用网络编码和叠加编码的次优协作发射方法 JNS。基本思想如下：利用叠加编码思想可确定  $f_1$  和  $f_2$ ，该过程无需发射端已知信道状态信息。信宿端所提的高效解码算法可有效解决协作发射相互干扰问题。该 JNS 方案可获得接近脏纸网络预编码策略的性能，因此在开销和系统性能之间能取得合理的折中。下面分别介绍其发射端预处理方法和信宿端解码算法。

### 3.1 JNS 预处理函数

显然，恰当设计的波束成形矢量  $F_1$  和  $F_2$  有助于获得网络编码的增益。通常，每个信源处的波束成形矢量应当基于 CSI 设计，并且，为了每个信源能够正确地检测另一个信源的符号并在下一时隙中继转发，这就需要在 2 个信源间共享波束成形矢量  $F_1$  和  $F_2$ ，因此会带来额外的信令开销。为了解决这一问题并且受文献[11]中叠加调制方法优点的启发，可简单地取定  $F_1$  和  $F_2$  为功率分配向量的形式： $F_1 = [\sqrt{1-\gamma^2}, \gamma]$ ， $F_2 = [\gamma, \sqrt{1-\gamma^2}]$ ，其中， $0 < \gamma^2 \ll 1$ 。很明显，这个形式的波束成形矢量是与 CSI 的变化无关，可将其固定，于是在信源端就不再需要任何 CSI。在实际应用中，参数  $\gamma^2$  可通过仿

$$LLR(b_k | y) = \log \left( \frac{\sum_{\{s_1, s_2\} \in S_\gamma, b_k=1} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left(y - \gamma h_{s_1} - \sqrt{1-\gamma^2} h_{s_2}\right)^2\right) P(s_1) P(s_2)}{\sum_{\{s_1, s_2\} \in S_\gamma, b_k=0} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left(y - \gamma h_{s_1} - \sqrt{1-\gamma^2} h_{s_2}\right)^2\right) P(s_1) P(s_2)} \right) \quad (11)$$

通常假设发送 0 和 1 比特的先验概率是相等的，那么式 (11) 中的项  $P(s_1)P(s_2)$  可相互抵消掉。

在下一时隙，即  $k = 2n + 2$  时，信宿  $D_1$  的接收信号为

$$y_{D_1}(2n+2) = h_{D_1 s_1} \left( \sqrt{1-\gamma^2} s_1(n+1) + \gamma \hat{s}_2(n) \right) + z_{D_1}(2n+2) \quad (12)$$

真确定。

### 3.2 JNS 解码算法

下面来关注信宿端的解码算法。如系统模型所示，每个信宿的接收信号将会受到非期望信号的干扰。对此，提出一个基于交替干扰消除的解码策略。由于系统模型是对称的，简单起见，先关注信宿  $D_1$  处的解码。信宿  $D_1$  在时隙  $k = 2n$  和  $k = 2n + 1$  的接收信号可以分别写为

$$y_{D_1}(2n) = h_{D_1 s_1} \left( \sqrt{1-\gamma^2} s_1(n) + \gamma \hat{s}_2(n-1) \right) + z_{D_1}(2n) \quad (9)$$

$$y_{D_1}(2n+1) = h_{D_1 s_2} \left( \gamma \hat{s}_1(n) + \sqrt{1-\gamma^2} s_2(n) \right) + z_{D_1}(2n+1) \quad (10)$$

由于  $y_{D_1}(2n)$  和  $y_{D_1}(2n+1)$  都包含期望符号  $s_1(n)$ ，于是等到时隙  $k = 2n + 1$  时，信宿  $D_1$  可采用如图 3 所示的接收机从  $y_{D_1}(2n)$  和  $y_{D_1}(2n+1)$  中解码出  $s_1(n)$ 。因为假设是高斯噪声，所以图 3 中的软最大后验概率 (MAP, maximum a posteriori) 解调器可根据式(11)计算信息比特  $b_k$  的一个后验对数似然比 (LLR, log-likelihood ratio)。

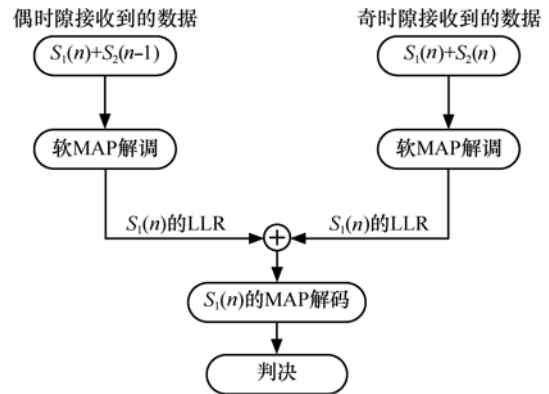


图 3 信宿  $D_1$  处对  $S_1(n)$  的接收判决流程

显然，在此时隙， $D_1$  能采用同样的接收机从  $y_{D_1}(2n+1)$  和  $y_{D_1}(2n+2)$  中解码出干扰信号  $s_2(n)$ 。但应当注意到，由于此时  $s_1(n)$  已经被解码，在接收信号  $y_{D_1}(2n+1)$  中  $s_1(n)$  的影响能被完全消除，因此能获得一个无干扰的接收信号  $\tilde{y}_{D_1}(2n+1)$ 。很容易理解从  $\tilde{y}_{D_1}(2n+1)$  和  $y_{D_1}(2n+2)$  中解出  $s_2(n)$  的 LLR

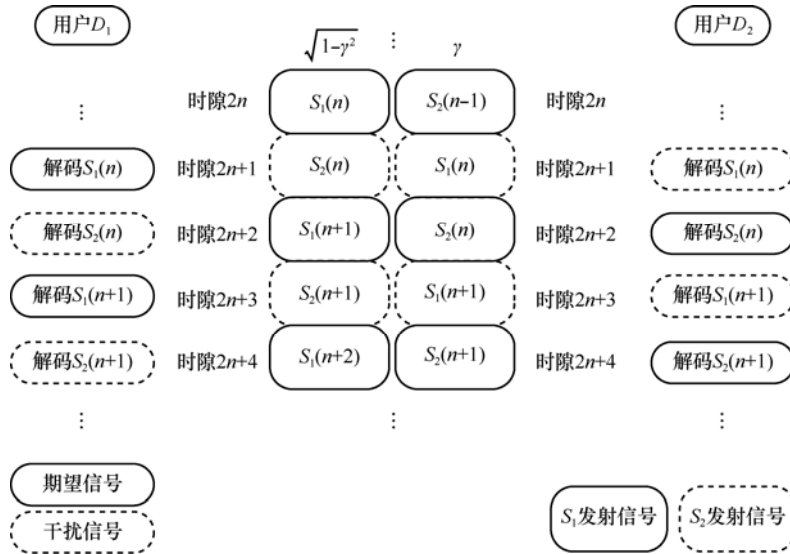


图 4 信宿  $D_1$ 、 $D_2$  的解码流程

质量比从  $y_{D_1}(2n+1)$  和  $y_{D_1}(2n+2)$  中解出的要好。类似地，一旦  $s_2(n)$  被正确解码，它在接收信号  $y_{D_1}(2n+2)$  中的影响也能被完全消除。那么，在  $k=2n+3$  时，一个交替干扰消除能被利用来提高  $s_1(n+1)$  的 LLR 的质量。这样的交替干扰消除能不断地重复直至所有的符号都被解码，这同样也适用于  $D_2$ 。信宿  $D_1$  和  $D_2$  的具体解码流程可参见图 4。

### 4 性能分析

本节主要分析各协作策略在慢衰落信道中的性能，包括单用户吞吐量、网络吞吐量以及中断行为。

#### 4.1 正交无干扰的 RDF 和 PDF

对于如图 2(a) 中的正交协作信道，在信宿  $D_1$  处采用 RDF 的输入  $s_1$  和输出  $y_{D_1}$  间的互信息已由文献 [2] 给出。

$$I_{\text{RDF}}(s_1; y_{D_1}) = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left( 1 + \rho |h_{s_2, s_1}|^2 \right), \log \left( 1 + \rho |h_{D_1, s_1}|^2 + \rho |h_{D_1, s_2}|^2 \right) \right\} \quad (13)$$

其中，输入 SNR 为  $\rho = \varepsilon_s / \sigma^2 = 2P / (W\sigma^2)$ ， $P$  为发射功率， $W$  为发射带宽，因子 1/2 是由于 2 个信道发射相同的信息。在信宿  $D_2$  处的输入  $s_2$  和输出  $y_{D_2}$  间的互信息  $I_{\text{RDF}}(s_2; y_{D_2})$  与此类似。由于每个信宿仅在发射的信号中有发射给它的信息时才被激活，即仅利用了系统一半的自由度，所以信宿  $D_1$  处的吞吐

量为  $\frac{1}{2} I_{\text{RDF}}(s_1; y_{D_1})$ ，因此采用 RDF 的整个系统的网络吞吐量为

$$C_{\text{RDF}} = \frac{1}{2} I_{\text{RDF}}(s_1; y_{D_1}) + \frac{1}{2} I_{\text{RDF}}(s_2; y_{D_2}) \quad (14)$$

中断概率如文献 [2] 定义：

$$P_{\text{RDF}}^{\text{out}}(\rho, R) = \Pr [I_{\text{RDF}} < R] \quad (15)$$

其中， $R = \frac{r}{W/2}$  bit/s/Hz，频谱效率  $R$  是单位为比特每秒的速率  $r$  与每个终端所利用的自由度个数间的比值。

类似地，采用 PDF 的信宿  $D_1$  处的互信息为 [12]

$$I_{\text{PDF}}(s_1; y_{D_1}) = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left( 1 + \rho |h_{s_2, s_1}|^2 \right), \log \left( 1 + \rho |h_{D_1, s_1}|^2 \right) + \log \left( 1 + \rho |h_{D_1, s_2}|^2 \right) \right\} \quad (16)$$

信宿  $D_2$  处的互信息同样也是类似的。整个系统的网络吞吐量为

$$C_{\text{PDF}} = \frac{1}{2} I_{\text{PDF}}(s_1; y_{D_1}) + \frac{1}{2} I_{\text{PDF}}(s_2; y_{D_2}) \quad (17)$$

信源信宿对间的中断概率为

$$P_{\text{PDF}}^{\text{out}}(\rho, R) = \Pr [I_{\text{PDF}} < R] \quad (18)$$

#### 4.2 线性网络预编码和脏纸网络预编码

文献 [10] 中给出了线性网络预编码和脏纸网络预编码 2 种策略的互信息和中断概率。它们的协作方式如图 2(b) 所示。

线性网络预编码策略在信宿  $D_1$  处采用 RDF 的输入  $s_1$  和输出  $y_{D_1}$  间的互信息为

$$I_{\text{LNC}}(s_1; y_{D_1}) = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left( 1 + \rho |h_{S_2 S_1} f_{11}|^2 \right), \right. \\ \left. \log \left( 1 + \frac{\rho |h_{D_1 S_1} f_{11}|^2}{1 + \rho |h_{D_1 S_1} f_{12}|^2} + \frac{\rho |h_{D_1 S_2} f_{21}|^2}{1 + \rho |h_{D_1 S_2} f_{22}|^2} \right) \right\} \quad (19)$$

在式(19)的  $\min$  函数中, 第 1 项表示中继  $S_2$  在消除已知的干扰(因为干扰就是  $S_2$  先前发射的符号  $s_2$ ) 后能可靠解码信源信息  $s_1$  的最大可达速率, 而第 2 项是信宿  $D_1$  能可靠解码信源  $S_1$  和中继  $S_2$  发送信息的最大可达速率。

信宿  $D_2$  处的互信息也是类似的。由于采用了网络编码, 对每个用户而言, 所有的自由度都被利用了。因此, 信宿  $D_1$  处的吞吐量是  $I_{\text{LNC}}(s_1; y_{D_1})$ , 整个系统的网络吞吐量为

$$C_{\text{LNC}} = \max_{\substack{\{f_{ij}\}_{i,j \in \{1,2\}} \\ |f_{11}|^2 + |f_{12}|^2 \leq 1 \\ |f_{21}|^2 + |f_{22}|^2 \leq 1}} I_{\text{LNC}}(s_1; y_{D_1}) + I_{\text{LNC}}(s_2; y_{D_2}) \quad (20)$$

而信源信宿对间的中断概率则为

$$P_{\text{LNC}}^{\text{out}}(\rho, R) = \Pr[I_{\text{LNC}} < R'] \quad (21)$$

其中,  $R'$  定义类似  $R$ ,  $R' = R/2$ 。

在脏纸网络预编码策略中, 信宿处输入信号和输出信号间的互信息取决于由 2 个信源决定的信宿的 2 个排序  $\Pi_1$  和  $\Pi_2$ 。由于知道所有的信道幅值, 每个信源可以独立地计算 DPC 排序来最大化网络吞吐量。采用 PDF 的脏纸网络预编码策略的整个系统的网络吞吐量为<sup>[10]</sup>

$$C_{\text{DPC}} = \max_{\substack{\Pi_1, \Pi_2, \{f_{ij}\}_{i,j \in \{1,2\}} \\ |f_{11}|^2 + |f_{12}|^2 \leq 1 \\ |f_{21}|^2 + |f_{22}|^2 \leq 1}} I_{\text{DPC}}(s_1; y_{D_1}) + I_{\text{DPC}}(s_2; y_{D_2}) \quad (22)$$

其中,

$$I_{\text{DPC}}(s_1; y_{D_1}) = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left( 1 + \rho |h_{S_2 S_1} f_{11}|^2 \right), \right. \\ \left. \log(1 + \text{SINR}_{11}) + \log(1 + \text{SINR}_{21}) \right\} \quad (23)$$

$$I_{\text{DPC}}(s_2; y_{D_2}) = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left( 1 + \rho |h_{S_1 S_2} f_{22}|^2 \right), \right. \\ \left. \log(1 + \text{SINR}_{22}) + \log(1 + \text{SINR}_{12}) \right\} \quad (24)$$

其中,  $\text{SINR}_{ij}$  是在信宿处  $D_j$  接收到信源  $S_i$  发射信号的信干噪比:

$$\text{SINR}_{ij} = \begin{cases} \rho |h_{D_j S_i} f_{ij}|^2, & S_i \text{ 对 } D_j \text{ 作 DPC} \\ \frac{\rho |h_{D_j S_i} f_{ij}|^2}{1 + \rho |h_{D_j S_i} f_{i\bar{j}}|^2}, & S_i \text{ 对 } D_{\bar{j}} \text{ 作 DPC} \end{cases} \quad (25)$$

其中,  $j \in \{1, 2\}$ ,  $\bar{j}$  是集合  $\{1, 2\}$  的补数, 即如果  $j=1$ , 那么  $\bar{j}=2$ , 反之亦然。

中断概率定义为

$$P_{\text{DPC}}^{\text{out}}(\rho, R) = \Pr[I_{\text{DPC}} < R'] \quad (26)$$

需要指出的是最优化问题(20)和(22)都是非凸的, 因此无法利用经典的凸优化方法来获得功率分配策略的闭式表达式。

### 4.3 JNS RDF 和 JNS PDF

联合网络编码和叠加编码的协作发射策略 JNS, 其协作方式也如图 2(b)所示。在 JNS 策略中, 信源无需知道信道信息, 也无需求解最优的  $f_{ij}$ , 因为  $f_{ij}$  ( $f_{11} = \sqrt{1-\gamma^2}$ ,  $f_{12} = \gamma$ ;  $f_{21} = \gamma$ ,  $f_{22} = \sqrt{1-\gamma^2}$ ) 都已被给定, 此外每个信宿也利用了所有的自由度。为了分析的方便, 假设 JNS 策略中的接收机每次都能正确解码干扰并消除(这在高 SNR 条件下是接近现实的)。那么在信宿  $D_1$  处采用 RDF 的输入  $s_1$  和输出  $y_{D_1}$  间的互信息为

$$I_{\text{JNS-RDF}}(s_1; y_{D_1}) = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left( 1 + \rho |h_{S_2 S_1} f_{11}|^2 \right), \right. \\ \left. \log \left( 1 + \rho |h_{D_1 S_1} f_{11}|^2 + \frac{\rho |h_{D_1 S_2} f_{21}|^2}{1 + \rho |h_{D_1 S_2} f_{22}|^2} \right) \right\} \quad (27)$$

而在信宿  $D_1$  处采用 PDF 的输入  $s_1$  和输出  $y_{D_1}$  间的互信息为

$$I_{\text{JNS-PDF}}(s_1; y_{D_1}) = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left( 1 + \rho |h_{S_2 S_1} f_{11}|^2 \right), \right. \\ \left. \log \left( 1 + \rho |h_{D_1 S_1} f_{11}|^2 \right) + \log \left( 1 + \frac{\rho |h_{D_1 S_2} f_{21}|^2}{1 + \rho |h_{D_1 S_2} f_{22}|^2} \right) \right\} \quad (28)$$

整个系统的网络吞吐量为

$$C_{\text{JNS}} = I_{\text{JNS}}(s_1; y_{D_1}) + I_{\text{JNS}}(s_2; y_{D_2}) \quad (29)$$

中断概率为

$$P_{\text{JNS}}^{\text{out}}(\rho, R) = \Pr[I_{\text{JNS}} < R'] \quad (30)$$

对比式(23)与式(28)可以看到, JNS 策略是脏纸网络预编码策略某种程度上的一种实现。在下一节的数值仿真中将验证这一结论。

### 5 仿真结果

在本节中, 将给出不同协作策略间性能对比的数值仿真结果。图 5 和图 6 给出了各协作策略的单用户吞吐量和网络吞吐量。图 7 和图 8 则给出了各协作策略的频谱效率的累积分布函数和中断概率。图 9 给出了各协作策略在 BPSK 调制下的误比特率性能。为了便于比较, 仿真时设定发射带宽  $W=1$ , 噪声方差  $\sigma^2=1$ 。仿真信道为瑞利衰落信道且  $\sigma_{vu}^2=1$ , 线性网络预编码和脏纸网络预编码的最优功率分配以及脏纸网络预编码的排序  $I_i$  通过穷举获得, 穷举初始值为 0.002, 步长为 0.007。仿真误比特率性能时, 因为没有信道质量的反馈, 所以认为总是采用协作发射的; 实现 DF 时, 这里假设中继总是采用重复编码。所提 JNS 策略中参数  $\gamma^2$  的取值参考文献[11]的方法, 取典型值  $\gamma^2=0.1$  和  $\gamma^2=0.15$  这 2 种情况。

#### 5.1 平均吞吐量

图 5 比较了采用 RDF 的经典正交无干扰, 线性网络预编码, 以及本文所提出的 JNS( $\gamma^2=0.1$ ) 策略间的单用户吞吐量和网络吞吐量。可以看到线性网络预编码和 JNS 策略在单用户吞吐量上明显优于经典正交无干扰策略, 这是由于前两者更好地利用了频谱和功率资源的缘故。同时也可以看到, JNS( $\gamma^2=0.1$ ) 策略与线性网络预编码策略的性能相当接近。同样, 从采用 PDF 的图 6 中可以看到类似的情况。网络编码方法是提升单用户吞吐量的关键, 而 JNS 结合了网络编码和叠加编码, 与网络预编码策略相比, 在大大减小计算复杂度的情况下, 仅损失了极小的性能, 因此更具实用价值。

图 5 和图 6 还比较了各协作策略的网络吞吐量。与单用户吞吐量的比较有类似的结果。线性网络预编码与经典 RDF 和 PDF 相比, 性能已经大大提高。而采用了更高级编码方法的脏纸网络预编码, 由于在发射端预消除了信宿处的干扰, 因此可获得更优的性能。而由图 6 可以看到 JNS( $\gamma^2=0.1$ ) 策略获得了与脏纸网络预编码极为相近的性能。某种程度上, JNS 策略可以被视作是脏纸网络预编码的一个实例。

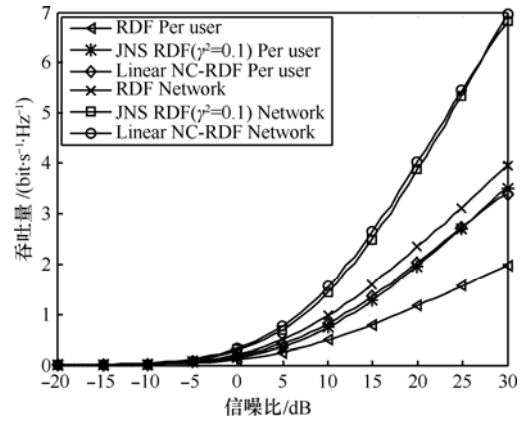


图 5 采用 RDF 各策略的吞吐量比较

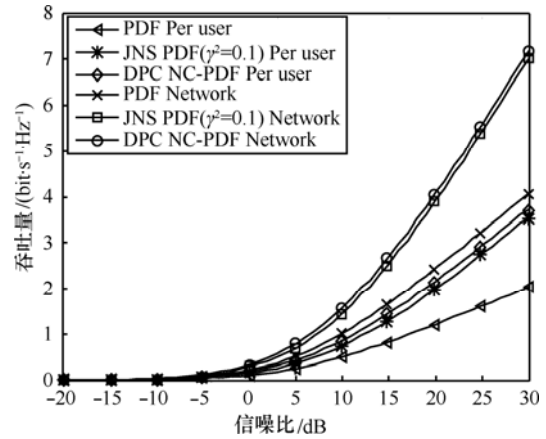


图 6 采用 PDF 各策略的吞吐量比较

#### 5.2 中断行为

图 7 描绘了单用户吞吐量的累积分布函数。分析不同策略在某目标速率下的中断行为时, 可以等价地比较在给定速率值下的单用户吞吐量的累积分布函数。可以看到, 采用了网络编码的协作策略明显优于经典协作策略, 而同时还结合了叠加编码的 JNS 策略则与线性网络预编码和脏纸网络预编码性能也比较接近。图 8 描绘了中断概

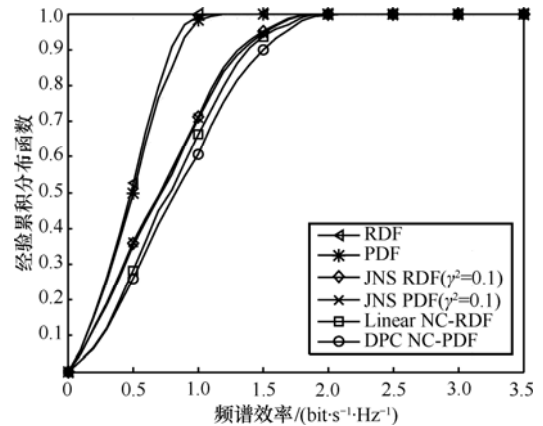


图 7 频谱效率的累积分布函数 (SNR=10dB)

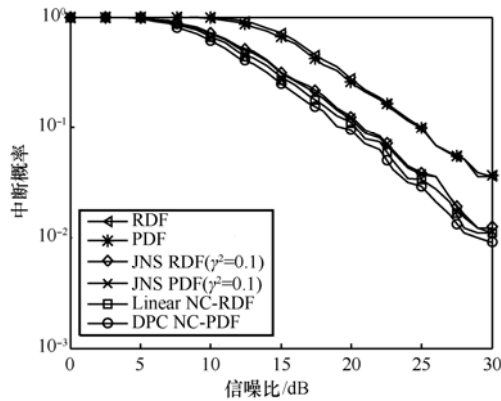


图 8 各策略的中断概率比较

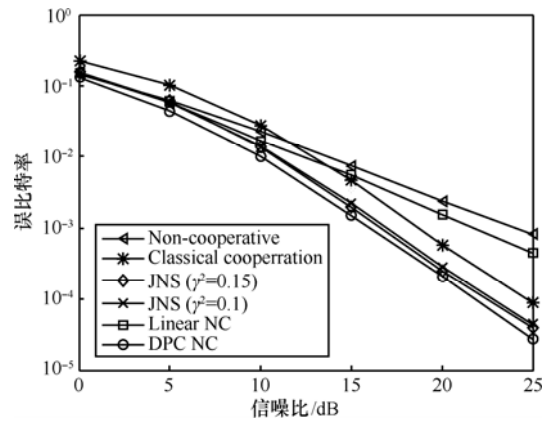


图 9 各策略的误比特率比较

率 (15), (18), (21), (26) 和 (30) (分  $\gamma^2 = 0.1$  RDF 和  $\gamma^2 = 0.1$  PDF 2 种), 即各种协作策略在不同 SNR 下的中断概率, 其中所选定的目标速率是  $r = 1 \text{ bit/s}$ 。验证了与经典协作策略相比, 采用了网络编码的协作策略在达到同一个目标速率时, 能极大地节约功率。同时也能观察到, 结合了叠加编码的 JNS 策略与 2 个接近最优的网络预编码策略的性能十分接近。

### 5.3 误比特率

本文所提出的 JNS 策略是一个相当具有实用价值的协作策略, 因此还比较了各个协作策略的误比特率。各策略的误比特率如图 9 所示, 很明显除了线性网络预编码外, 经典协作、JNS 以及脏纸网络预编码策略均获得了分集增益, 而且可以看到, JNS 策略大大优于经典协作策略, 且很接近最优的脏纸网络预编码策略。值得注意的是, 在脏纸网络预编码策略仿真中取得的对应各功率值最优时的  $f_{ij}$  统计平均值 (同一功率值下 1 000 次的信道实现) 与本文在 JNS 策略中所取的  $\gamma^2 = 0.1$  和  $\gamma^2 = 0.15$  所对应的数值相当接近, 这也进一步验证了 JNS 策略可以被看作是脏纸网络预编码策略统计意义上的一个实例。另外, 线性网络预编码的误比特率如此之出乎意料, 分析在线性网络预编码策略仿真中取得的对应各功率值最优时的  $f_{ij}$  统计平均值可以发现,  $f_{ij}$  的取值分化很严重。例如, 在绝大多数情况下  $f_{11}$  趋向 1,  $f_{12}$  趋向 0, 而  $f_{21}$  和  $f_{22}$  也有类似情况。当  $f_{12}$  和  $f_{21}$  趋向 0 时, 则意味着线性网络预编码趋向于不协作, 因此它没有获得明显的分集。由此可见, 虽然线性网络预编码在理论上的吞吐量性能很好, 但在实际应用中显然不是一个很好的协作策略。

## 6 结束语

本文提出了一种联合网络编码和叠加编码的发射协作策略 JNS。利用网络编码, 放宽了信道正交的约束, 从而提高了协作系统的频谱效率。采用非正交策略后引入了信源信息和中继信息间的干扰, 但这可以通过在发射端采用预编码技术来减轻。而目前采用网络预编码的策略需要发射端知道信道幅值, 并且由于问题的非凸性, 仅能采用穷举法来获得最优的预编码函数, 这在实际应用中是不现实的。利用叠加编码, JNS 策略中的发射端无需知道信道信息, 采用给定的预编码函数, 就能达到非常接近线性脏纸网络预编码的吞吐量及中断性能。在更实际的应用中, JNS 策略的误比特率性能也非常接近最优的脏纸网络预编码策略, 可以被看作是后者统计意义上的一个实例。未来的工作可以包括扩展到多天线终端的场景, 特别是如何设计波束来提高性能, 最后, 还可以考虑有多对信源信宿的大规模网络场景下对于 JNS 策略的推广应用。

### 参考文献:

- [1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity—part I: system description[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11):1927-1938.
- [2] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12):3062-3080.
- [3] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10):74-80.
- [4] SADEK A K, HAN Z, RAY LIU K J. A distributed relay-assignment algorithm for cooperative communications in wireless networks[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. 2006.1592-1597.

- [5] LUO J, BLUM R S, GREENSTEIN L J, *et al.* New approaches for cooperative use of multiple antennas in ad hoc wireless networks[A]. IEEE Vehicular Technology Conference[C]. 2004, 4:2769-2773.
- [6] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y R, *et al.* Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4):1204-1216.
- [7] WU Y, CHOU P A, KUNG S Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast[A]. 39th Annual Conference on Information Sciences and Systems[C]. 2005.
- [8] POPOVSKI P, YOMO H. Bi-directional amplification of throughput in a wireless multi-hop network[A]. IEEE Vehicular Technology Conference[C]. 2006. 588-593.
- [9] POPOVSKI P, YOMO H. Physical network coding in two-way wireless relay channel[A]. IEEE International Conference on Communications [C]. 2007. 707-712
- [10] FAWAZ N, GESBERT D, DEBBAH M. When network coding and dirty paper coding meet in a cooperative ad hoc network[J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2008, 7(5):1862-1868.
- [11] LARSSON E G, VOJCIC B R. Cooperative transmit diversity based on superposition modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(9):778-780.
- [12] LANEMAN J N. Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications[M]. Springer, Cooperative Diversity: Models, Algorithms, and Architectures, 2006.

#### 作者简介：



王海荣（1977-），男，江苏无锡人，东南大学博士生，主要研究方向为多用户MIMO通信信号处理、协作通信和网络编码。



黄永明（1977-），男，江苏吴江人，博士，东南大学副教授，主要研究方向为MIMO通信信号处理、多用户通信信号处理和协作通信。



杨绿溪（1964-），男，安徽桐城人，东南大学教授、博士生导师，主要研究方向为移动通信空时信号处理、协作通信和网络编码。