

协同通信中的分布式线性疏散码

张勇 胡映波 徐友云 蔡跃明
(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要: 该文提出一种分布式线性疏散码解决无线网络中协同节点不能确定时的空时编码问题。参与协同的节点采用独立的疏散矢量进行编码, 推导协同节点减少时分布式线性疏散码的互信息损失, 并以此建立一种分布式疏散码的编码准则。仿真结果验证了这种分布式线性疏散码的误比特性能及编码准则的可行性。

关键词: 分布式编码; 协同; 线性疏散码

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1390-04

Distributed Linear Dispersion Codes in Cooperative Communication

Zhang Yong Hu Ying-bo Xu You-yun Cai Yue-ming
(Institute of Communication Engineering, PLAUST, Nanjing 210007, China)

Abstract: Distributed linear dispersion codes are proposed for the space time coding in wireless network where cooperative nodes can not be decided priori. The nodes in cooperation are coded with different dispersion vectors. The mutual information loss when the number of cooperative nodes decreased is conducted and a coding criterion of distributed dispersion codes is developed accordingly. The simulation results show that the distributed dispersion codes with the coding criterion achieve good performance.

Keywords: Distributed codes; Cooperation; Linear dispersion codes

1 引言

在无线网络中, 各节点之间可以通过协同获得很大的性能提高^[1], 节点之间共享天线形成虚拟的天线阵列从而提供空间分集。由于协同分集与 MIMO 系统的相似性, 人们引入了分布式空时编码以提高多节点网络系统的频谱效率和分集增益^[2]。

本文考虑包含多个单天线协同节点的无线网络, 在同一时间参与协同的节点数不能先验确定。如在译码转发 (decode-and-forward) 时, 协同节点采用循环冗余校验判定接收的发送端数据是否译码准确, 如果不能准确译码则不再转发到接收节点, 在这种情况下, 分布式空时编码必须考虑协同节点不确定时的性能。文献[2]采用分布式正交空时编码解决这一问题, 每个节点的编码对应于正交阵的一列, 当某个节点不参与协同时, 其余节点的编码仍保持正交性, 这种方法在节点数较多时要保持正交性, 只能获得很低的码率。文献[3]提出一种分布式空时分组码, 网络中的每个节点先采用相同的空时编码, 再分配一个独立的信号矢量与之相乘, 每个节点的输出是空时编码后的数据与该信号矢量的乘积, 这种方法可用于任意节点的网络, 并可将 MIMO 中采用的差分空时码, 非相关空时码用于多节点网络。文献[4]推广了文献[3]的结果, 每个节点的信号矢量随机产生, 因此无需给

节点分配特定的编码方式。

本文根据线性疏散码^[5]的特点, 提出一种分布式的线性疏散码解决网络中协同节点数不确定时的空时编码问题, 每个协同节点采用独立的疏散矢量将要传输的符号在时间上疏散, 在多个节点之间产生空间疏散。这种分布式线性疏散编码给每个节点分配独立的疏散矢量, 因此适用于任意节点的系统, 并能保持编码速率恒定。它可将文献[2]的正交空时分组码和文献[3, 4]的相关空时分组码的线性加权法视为特例, 并可采用球形译码^[6]等算法减小检测复杂度。

符号定义: $(\mathbf{A})^T, (\mathbf{A})^H, \det(\mathbf{A}), \text{Tr}(\mathbf{A})$ 分别表示矩阵 \mathbf{A} 的转置、Hermitian 转置、行列式和迹。 $E\{\cdot\}, \mathbf{I}_{(N)}, \otimes, \|\cdot\|$ 分别表示均值、单位阵、Kronecker 积和模值。

2 网络模型及分布式线性疏散码

考虑一个发送节点, M 个单天线协同中继节点和一个接收节点的无线网络, 信道在 T 个符号间隔内保持恒定, 接收节点有 N 个天线。中继节点中仅有 L 个节点能正确译码并转发, 称为活动节点, $1 \leq L \leq M$, 但 L 的大小不能先验确定, 将所有活动节点的集合标示为 $\Lambda = \{1, 2, \dots, L\}$ 。每个中继节点为半双工模式, 即它不能同时接收和发送。

对于任意一个活动节点 $i \in \Lambda$, 假定从发送端接收后经译码后的数据为符号 s_1, s_2, \dots, s_Q (取自 r -PSK 或 r -QAM 星座点)。分布式线性疏散码将该节点要发送的数据疏散到两个固定的 $T \times 1$ 的复矢量 $\mathbf{C}_{q,i}$ 和 $\mathbf{D}_{q,i}$ 上, 即

2006-11-27 收到, 2007-07-02 改回
国家自然科学基金(60672079)和江苏省自然科学基金
(BK2006701)资助课题

$$\mathbf{S}_i = \sum_{q=1}^Q \mathbf{C}_{q,i} s_q + \mathbf{D}_{q,i} s_q^* \quad (1)$$

为简化分析, 将 s_q 分解为实部和虚部 $s_q = \alpha_q + j\beta_q$, $q = 1, 2, \dots, Q$, 则该节点在 T 个时刻内发送的数据为

$$\mathbf{S}_i = \sum_{q=1}^Q (\mathbf{A}_{q,i} \alpha_q + \mathbf{B}_{q,i} \beta_q) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{A}_{q,i} = \mathbf{C}_{q,i} + \mathbf{D}_{q,i}$, $\mathbf{B}_{q,i} = \mathbf{C}_{q,i} - \mathbf{D}_{q,i}$, 因此对于任意节点 $i \in \Lambda$, $\mathbf{A}_{q,i}$ 和 $\mathbf{B}_{q,i}$ 确定了该节点的编码方式。容易验证, 空时分组码^[2]及其线性加权^[3, 4]总可以表示为式(2)的形式。

分布式线性稀疏编码在 T 个符号间隔内传送 Q 个符号, 速率为 $(Q/T) \log_2 r$ 。

在接收节点, 接收符号可以表示为

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{\rho}{L}} \sum_{i=1}^L (\mathbf{S}_i \mathbf{H}_i) + \mathbf{V} \quad (3)$$

其中 ρ 为每根接收天线的信噪比, \mathbf{H}_i 为 $1 \times N$ 的信道矩阵, 其第 j 个元素为第 i 个节点与第 j 根接收天线的增益。

考虑有丰富散射环境的信道, \mathbf{H}_i 中的每个元素为单位方差的独立循环复高斯随机变量, 接收节点具有完全的信道状态信息。 \mathbf{V} 为加性复高斯白噪声。令 $\mathbf{A}_q = [\mathbf{A}_{q,1}, \dots, \mathbf{A}_{q,L}]$, $\mathbf{B}_q = [\mathbf{B}_{q,1}, \dots, \mathbf{B}_{q,L}]$ 为整个网络的稀疏矩阵, $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^T, \dots, \mathbf{H}_L^T]^T$ 为网络的等效信道矩阵, 则

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{\rho}{L}} \sum_{q=1}^Q (\mathbf{A}_q \alpha_q + \mathbf{B}_q \beta_q) \mathbf{H} + \mathbf{V} \quad (4)$$

令 $\mathbf{S} = \sum_{q=1}^Q (\mathbf{A}_q \alpha_q + \mathbf{B}_q \beta_q)$, 为了保证传输信号功率的归一化, 输出符号应满足 $E\{\text{Tr}(\mathbf{S}\mathbf{S}^H)\} = TL$, 当输入符号为单位方差且不相关时有

$$\sum_{q=1}^Q (\text{Tr} \mathbf{A}_q^T \mathbf{A}_q + \text{Tr} \mathbf{B}_q^T \mathbf{B}_q) = 2TL \quad (5)$$

经整理, 式(4)简写为

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{\rho}{L}} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{v} \quad (6)$$

\mathbf{H} 为 $2NT \times 2Q$ 的等效信道矩阵:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \mathbf{h}_1 & \mathbf{A}_2 \mathbf{h}_1 & \cdots & \mathbf{A}_{2Q-1} \mathbf{h}_1 & \mathbf{A}_{2Q} \mathbf{h}_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{A}_1 \mathbf{h}_N & \mathbf{A}_2 \mathbf{h}_N & \cdots & \mathbf{A}_{2Q-1} \mathbf{h}_N & \mathbf{A}_{2Q} \mathbf{h}_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{A}_{2q-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{R,q} & -\mathbf{A}_{I,q} \\ \mathbf{A}_{I,q} & \mathbf{A}_{R,q} \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_{2q} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{R,q} & -\mathbf{B}_{I,q} \\ \mathbf{B}_{I,q} & \mathbf{B}_{R,q} \end{bmatrix}$, $\mathbf{h}_n =$

$\begin{bmatrix} h_{R,n} \\ h_{I,n} \end{bmatrix}$, $h_{R,n}$ 和 $h_{I,n}$ 为信道矩阵 \mathbf{H} 第 n 列的实部和虚部分量, $(\cdot)_{R,i}$ 和 $(\cdot)_{I,i}$ 表示为矩阵第 i 列的实部和虚部。

令 $\underline{\mathbf{h}} = [\mathbf{h}_1^T, \dots, \mathbf{h}_N^T]^T$, 则式(7)可表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{A}_1 & \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{A}_{2Q} \end{bmatrix} [\mathbf{I}_{2Q} \otimes \underline{\mathbf{h}}] \quad (8)$$

对于式(6), 可以采用 MIMO 检测的各种算法进行译码。显然, 为了保证系统的性能, 在设计节点稀疏矢量 $\mathbf{A}_{q,i}$ 和 $\mathbf{B}_{q,i}$

时, 应尽可能避免等效信道矩阵 \mathbf{H} 的退化。

3 稀疏矢量的选择及其性能

由以上分析可知, 这种分布式稀疏码的性能由稀疏矢量 $\{\mathbf{A}_{q,i}, \mathbf{B}_{q,i}\}$, T , Q 和可用节点数 L 以及接收节点译码性能确定。当数据速率确定时 (T , Q 确定), 节点稀疏矢量的选取应该确保等效信道矩阵 \mathbf{H} 使接收节点获得尽可能好的性能。

在设计线性稀疏码时, 可以根据最大互信息^[5]和最小成对错误概率准则^[7]选取性能最佳的稀疏矩阵。本文分析分布式线性稀疏码的互信息, 并以此为依据设计各节点的稀疏矢量。

对于分布式稀疏码, 由式(6)可知, 发送信号和接收信号之间的互信息为

$$I(s; y) = \frac{1}{2T} E_{\mathbf{H}} \left\{ \log \det \left(\mathbf{I}_{2NT} + \frac{\rho}{L} \mathbf{H} \mathbf{H}^T \right) \right\} \quad (9)$$

给定 T , Q 和 N 时, 最优稀疏矢量 $\{\mathbf{A}_{q,i}, \mathbf{B}_{q,i}\}$ 应满足:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{A}_{q,i}, \mathbf{B}_{q,i}, q=1, \dots, Q; i=1, \dots, L} \frac{1}{2T} E_{\mathbf{H}} \left\{ \log \det \left(\mathbf{I}_{2NT} + \frac{\rho}{L} \mathbf{H} \mathbf{H}^T \right) \right\} \\ & \text{subject to: } \sum_{q=1}^Q (\mathbf{A}_q^T \mathbf{A}_q + \mathbf{B}_q^T \mathbf{B}_q) = 2TL, \forall L, 1 \leq L \leq M \end{aligned} \quad (10)$$

由于可用节点数 L 的随机性, 寻找式(10)的最优解是非常困难的。本文根据最大节点数 $L = M$ 时的最优解, 为每个潜在的可用节点指定稀疏矢量, 这种方法可获得节点数小于 M 时的次优解。首先生成 $L = M$ 时使系统互信息最大的稀疏矩阵, 然后将协同节点的可用概率作为参量, 推导一个稀疏矢量的分配准则在协同节点减少时使系统互信息尽可能大。

设稀疏矢量集合 $\{\mathbf{A}_{q,i}, \mathbf{B}_{q,i}\}$ 使得 $L = M$ 时, 收发两端互信息最大, 此时的稀疏矢量 $\mathbf{A}_q = [\mathbf{A}_{q,1}, \dots, \mathbf{A}_{q,M}]$, $\mathbf{B}_q = [\mathbf{B}_{q,1}, \dots, \mathbf{B}_{q,M}]$, 信道为 $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1^T, \dots, \mathbf{H}_M^T]^T$, 等效信道矩阵为 \mathbf{H} 。

首先分析当 $L = M - 1$ 时系统的互信息。不失一般性, 假定前 $M - 1$ 个节点可用, 则此时的稀疏矩阵为 $\mathbf{A}'_q = [\mathbf{A}_{q,1}, \dots, \mathbf{A}_{q,M-1}]$, $\mathbf{B}'_q = [\mathbf{B}_{q,1}, \dots, \mathbf{B}_{q,M-1}]$, 即在 \mathbf{A}_q 和 \mathbf{B}_q 中取出了 $\mathbf{A}_{q,M}$ 和 $\mathbf{B}_{q,M}$, 此时信道为 $\mathbf{H}' = [\mathbf{H}_1^T, \dots, \mathbf{H}_{M-1}^T]^T$, 由式(7)可得等效信道矩阵:

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_1 \mathbf{h}'_1 & \mathbf{A}'_2 \mathbf{h}'_1 & \cdots & \mathbf{A}'_{2Q-1} \mathbf{h}'_1 & \mathbf{A}'_{2Q} \mathbf{h}'_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{A}'_1 \mathbf{h}'_N & \mathbf{A}'_2 \mathbf{h}'_N & \cdots & \mathbf{A}'_{2Q-1} \mathbf{h}'_N & \mathbf{A}'_{2Q} \mathbf{h}'_N \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{A}'_{2q-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{R,q,M} & -\mathbf{A}_{I,q,M} \\ \mathbf{A}_{I,q,M} & \mathbf{A}_{R,q,M} \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}'_{2q} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{R,q,M} & -\mathbf{B}_{I,q,M} \\ \mathbf{B}_{I,q,M} & \mathbf{B}_{R,q,M} \end{bmatrix}$,

$\mathbf{h}'_n = \begin{bmatrix} h'_{R,n} \\ h'_{I,n} \end{bmatrix}$, $(\cdot)_{R,i,M}$ 和 $(\cdot)_{I,i,M}$ 表示节点 M 的稀疏矢量中第 i

个元素的实部和虚部。\$h'_{R,n}\$ 和 \$h'_{I,n}\$ 为信道矩阵 \$\mathbf{H}_M\$ 第 \$n\$ 个元素的实部和虚部。将式(11)记为

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H} - \mathbf{C} \quad (12)$$

此时系统容量可表示为

$$I'(s; y) = \frac{1}{2T} E_{\mathbf{H}} \left\{ \log \det \left(\mathbf{I}_{2NT} + \frac{\rho}{L} (\mathbf{H} - \mathbf{C})(\mathbf{H} - \mathbf{C})^T \right) \right\} \quad (13)$$

由式(7)可知

$$\mathbf{H}\mathbf{H}^T = \sum_{q=1}^{2Q} (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{A}_q) \mathbf{h} \mathbf{h}^T (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{A}_q^T) \quad (14)$$

由于 \$\mathbf{h}\$ 是零均值, \$1/2\$ 方差的独立同分布的高斯随机变量, 因此

$$E_{\mathbf{H}} \{ \mathbf{H}\mathbf{H}^T \} = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{2Q} \left(\mathbf{I}_N \otimes \sum_{q=1}^{2Q} \mathbf{A}_q \mathbf{A}_q^T \right) \quad (15)$$

且有

$$E_{\mathbf{H}} \{ (\mathbf{H} - \mathbf{C})(\mathbf{H} - \mathbf{C})^T \} = \frac{1}{2} \mathbf{I}_N \otimes \sum_{q=1}^{2Q} (\mathbf{A}_q \mathbf{A}_q^T - \mathbf{A}'_q \mathbf{A}'_q{}^T) \quad (16)$$

由式(13)可见, 分布式线性稀疏码在天线数减少时, 系统容量的变化在于 \$\mathbf{C}\$ 对系统的影响, 由于 \$\mathbf{H}\$ 和 \$\mathbf{C}\$ 的随机性, 计算出确切的互信息是困难的, 我们分析式(13)的一个上界, 并讨论节点 \$M\$ 的稀疏矢量 \$\{\mathbf{A}_{q,i}, \mathbf{B}_{q,i}\}\$ 对互信息的影响。

由于 \$\log \det(\mathbf{I} + \mathbf{X})\$ 在变量 \$\mathbf{X}\$ 为半正定矩阵时为凸函数, 由 Jensen 不等式^[8]可得:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2T} E_{\mathbf{H}} \left\{ \log \det \left(\mathbf{I}_{2NT} + \frac{\rho}{L} (\mathbf{H} - \mathbf{C})(\mathbf{H} - \mathbf{C})^T \right) \right\} \\ & \leq \frac{1}{2T} \log \det \left(\mathbf{I}_{2NT} + \frac{\rho}{L} E_{\mathbf{H}} \{ (\mathbf{H} - \mathbf{C})(\mathbf{H} - \mathbf{C})^T \} \right) \\ & = \frac{1}{2T} \log \det \left(\left(1 + \frac{M\rho}{L} \right) \mathbf{I}_{2NT} - \frac{\rho}{2L} \left(\mathbf{I}_N \otimes \sum_{q=1}^{2Q} \mathbf{A}'_q \mathbf{A}'_q{}^T \right) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

令 \$\mathbf{W} = \mathbf{I}_{2NT} - \frac{\rho}{2L + 2M\rho} \left(\mathbf{I}_N \otimes \sum_{q=1}^{2Q} \mathbf{A}'_q \mathbf{A}'_q{}^T \right)\$, 由 \$\mathbf{I}_{2NT} + \frac{\rho}{L} (\mathbf{H} - \mathbf{C})(\mathbf{H} - \mathbf{C})^T\$ 的正定性可知, \$\mathbf{W}\$ 一定是正定阵。根据矩阵 \$\mathbf{W}\$ 的正定性, 记 \$c_{ii}\$ 为矩阵 \$\mathbf{W}\$ 的对角元素, 由 Hadamard 不等式可得:

$$\det \mathbf{W} \leq \prod c_{ii} \quad (18)$$

可以看出, 为了使式(18)右边上界尽可能大, \$\sum_{q=1}^{2Q} \mathbf{A}'_q \mathbf{A}'_q{}^T\$

对角元素值应尽可能小, 记 \$\sum_{q=1}^{2Q} \mathbf{A}'_q \mathbf{A}'_q{}^T\$ 第 \$i, i = 1, \dots, 2T\$ 个对角元素为 \$a_{ii}\$, 经计算可得:

$$a_{ii} = \begin{cases} \sum_{q=1}^Q \|\mathbf{A}_{q,M,i}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,M,i}\|^2, & i = 1, \dots, T \\ \sum_{q=1}^Q \|\mathbf{A}_{q,M,i-T}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,M,i-T}\|^2, & i = T + 1, \dots, 2T \end{cases} \quad (19)$$

\$\mathbf{A}_{q,M,i}\$ 和 \$\mathbf{B}_{q,M,i}\$ 分别为稀疏矢量 \$\mathbf{A}_{q,M}\$ 和 \$\mathbf{B}_{q,M}\$ 的第 \$i\$ 个元素, 因此第 \$M\$ 个节点稀疏矢量应使得每个元素的模尽可能的小。

对于 \$M\$ 个协同节点, 假设已知第 \$k\$ 个节点能够参与协同

的概率为 \$p_k, k = 1, \dots, M\$, 不妨设 \$1 \geq p_1 \geq \dots \geq p_M \geq 0\$, 通过计算 \$a_{ii}\$ 的均值分析依 \$p_k\$ 分配稀疏矢量和随机分配方法的性能。网络中存在一个不可用节点, 采用随机分配时, 每组稀疏矢量分配给该节点的概率均为 \$1/M\$, 此时 \$a_{ii}\$ 的均值为

$$E_1 \{ a_{ii} \} = \begin{cases} \frac{1}{M} \left(\sum_{k=1}^M \left(\sum_{q=1}^Q \|\mathbf{A}_{q,k,i}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,k,i}\|^2 \right) \right), & i = 1, \dots, T \\ \frac{1}{M} \left(\sum_{k=1}^M \left(\sum_{q=1}^Q \|\mathbf{A}_{q,k,i-T}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,k,i-T}\|^2 \right) \right), & i = T + 1, \dots, 2T \end{cases} \quad (20)$$

根据 \$p_k\$ 和模值分配稀疏矢量时, 各节点稀疏矢量满足:

$$\sum_{q=1}^Q (\|\mathbf{A}_{q,k}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,k}\|^2) \geq \sum_{q=1}^Q (\|\mathbf{A}_{q,k+1}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,k+1}\|^2), \quad k = 1, \dots, M-1.$$

当存在一个不可用节点时, 该节点为第 \$k\$ 个节点的概率为 \$p'_k = (1 - p_k) / p_k \sum_{j=1}^M ((1 - p_j) / p_j), k = 1, \dots, M\$, 因此

\$1 \geq p'_M \geq \dots \geq p'_1 \geq 0\$, 此时 \$a_{ii}\$ 的均值为

$$E_2 \{ a_{ii} \} = \begin{cases} \sum_{k=1}^M \left(p'_k \left(\sum_{q=1}^Q \|\mathbf{A}_{q,k,i}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,k,i}\|^2 \right) \right), & i = 1, \dots, T \\ \sum_{k=1}^M \left(p'_k \left(\sum_{q=1}^Q \|\mathbf{A}_{q,k,i-T}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,k,i-T}\|^2 \right) \right), & i = T + 1, \dots, 2T \end{cases} \quad (21)$$

当各节点参与协同的概率相等时, \$E_1 \{ a_{ii} \} = E_2 \{ a_{ii} \}\$。

不等概时, 为简化分析, 假定 \$\forall i, i = 1, \dots, T, \sum_{q=1}^Q (\|\mathbf{A}_{q,k,i}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,k,i}\|^2) \geq \sum_{q=1}^Q (\|\mathbf{A}_{q,k+1,i}\|^2 + \|\mathbf{B}_{q,k+1,i}\|^2)\$, 此时有

$$E_1 \{ a_{ii} \} > E_2 \{ a_{ii} \} \quad (22)$$

在这种条件下, 依概率分配稀疏矢量总可以获得比随机分配更好的性能。由稀疏矩阵拆分得到的稀疏矢量, 满足式(22)的假设条件是困难的。依概率分配不能保证 \$\sum_{q=1}^{2Q} \mathbf{A}'_q \mathbf{A}'_q{}^T\$ 的

每个对角元素的均值都满足式(22), 但模值较大的稀疏矢量以较高的概率保留, 相应地, 模值较大的元素也会以较高的概率保留, 第4节通过仿真验证依概率分配可获得比随机分配更好的性能。

当系统中不可用的节点数增加时, 可以通过类推得出相似的结论。

4 仿真分析

本节通过仿真分析本文所采用的分布式线性稀疏码及稀疏矢量分配方法的性能。

仿真采用4个协同节点的网络, 可用节点数分别取4,3

和 2。最大可用节点数 $M = 4$ 时的稀疏矢量根据文献[5]的稀疏矩阵拆分得到，并取 $T = Q = 4$ ，总的编码码率恒为 1symbol/channel use。接收节点已知完全的信道状态信息，采用球形译码。4 个节点都能协同时分布式稀疏码和普通的线性稀疏码相同。

图 1 和图 2 给出了 4QAM 时随机分配稀疏矢量和依可用概率分配稀疏矢量的性能比较，实线和虚线分别为接收天线数 N 为 1 和 2 的情况。4 组可供分配的稀疏矢量的模值和分别为 2.96, 5.17, 9.20 和 14.67。考虑 4 个节点可用概率相差较大(P_1)和相近(P_2)两种情况，假定两组可用概率分别为 $P_1 = [0.95 \ 0.65 \ 0.35 \ 0.05]$, $P_2 = [0.6 \ 0.5 \ 0.4 \ 0.3]$ 。图 1 为网络中存在 3 个可用节点时，随机分配稀疏矢量和依概率分配稀疏矢量的性能。由图可以看出，依概率分配稀疏矢量可获得平均大约 3dB 增益，两种不同可用概率情况下的性能差距较小，可用概率相差较大时，性能稍好。图 2 为网络中存在 2 个可用节点时的两种分配方法的性能比较。可用概率相近时，依概率分配方法性能提高大约 1dB；可用概率相差较大时，性能提高大约 3dB。

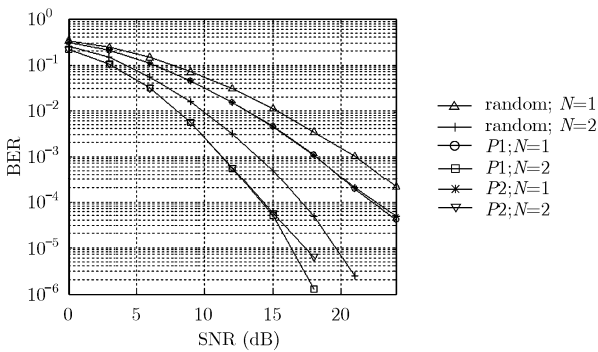


图 1 可用节点数为 3 时稀疏矢量随机分配和依概率分配的误比特性能比较

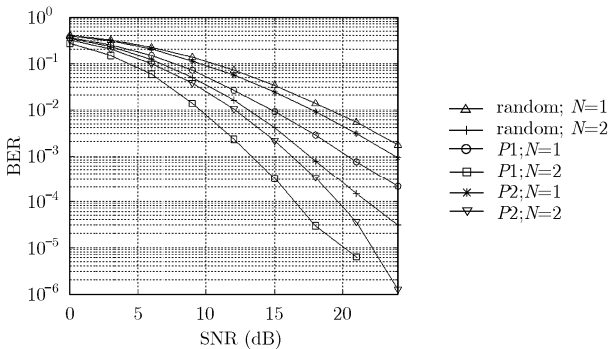


图 2 可用节点数为 2 时稀疏矢量随机分配和依概率分配的误比特性能比较

在接收节点，分布式线性稀疏码的译码复杂度与 Q, T 和 N 的大小有关，本文采用的分布式稀疏编码固定了这些参量，由式(11)可知，节点数减少不能减小等效信道矩阵的维数，因此也不能降低译码端的复杂度。如何根据节点数的变

化灵活调整 Q, T 的大小是需要进一步研究的问题。

5 结束语

本文提出了一种分布式的线性稀疏码用来解决协同通信中节点数不能先验确定时的空时编码问题。各个协同节点采用独立的稀疏矢量进行编码，当节点退出协同时，剩余的节点在不改变原有编码方式时，仍然能够提供空时编码的性能，这种方法可以用于译码转发协同或者协同节点数不能确定的无线传感器网络中。本文计算了这种分布式编码的互信息，并由此得出根据模值和可用概率分配稀疏矢量的方法。仿真结果表明这种分布式稀疏编码在节点数不确定时仍能保持较好的误比特性能。

当系统节点数增多时，稀疏矢量难以设计，译码复杂度也相应提高。如果将这种分布式稀疏编码方法用于大量节点的协同，还需要解决稀疏矢量设计和降低译码复杂度的问题。

参 考 文 献

- [1] Nosratinia A, Hunter T E, and Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Commun. Mag.*, 2004, 42(10): 74-80.
- [2] Laneman J N and Wornell G W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless network. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2003, 49(10): 2415-2425.
- [3] Yiu S, Schober R, and Lampe L. Distributed space-time block coding. *IEEE Trans. on Commun.*, 2006, 54(7): 1195-1206.
- [4] Mergen B S and Scaglione A. Randomized space-time coding for distributed cooperative communication. ICC 2006-IEEE Conference on Communication, Istanbul, Turkey. 2006, 10: 4501-4506.
- [5] Hassibi B and Hochwald M. High-rate codes that are linear in space and time. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2002, 48(7): 1804-1824.
- [6] Hassibi B and Vikalo H. On the sphere decoding algorithm I: Expected complexity. *IEEE Trans. on Commun.*, 2005, 53(8): 2806-2818.
- [7] Heath R W and Paulraj A J. Linear dispersion codes for MIMO systems based on frame theory. *IEEE Ttrans. on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2429-2441.
- [8] Cover T M and Thomas J A. *Element of Information Theory*. New York: Wiley. 1991.

张 勇： 男，1980 年生，博士生，研究方向为协同通信与空时编码。
 胡映波： 男，1982 年生，硕士生，研究方向为协同编码与路由。
 徐友云： 男，1966 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为移动通信、战术无线通信网、信道编码等。
 蔡跃明： 男，1961 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为移动通信、信号处理、无线资源管理等。