

# 基于协作中继的多点广播码分多址信息系统设计

吕闽晖<sup>1,2</sup> 熊伟<sup>3</sup> 沈来信<sup>4</sup>

(华中科技大学管理学院管理科学与信息管理系 武汉 430074)<sup>1</sup>

(海军工程大学装备经济管理学系 武汉 430033)<sup>2</sup>

(国防科技大学电子科学与工程学院工程系 长沙 410000)<sup>3</sup> (同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)<sup>4</sup>

**摘要** 为了提高多群多点广播中继网络系统的性能,提出一种改进的协作中继多点广播码分多址(CDMA)系统设计。该方案利用协作中继辅助的分布式波束形成实现单天线基站多播,获得了较好的空间分集增益。在该系统中,多个基站利用多个中继节点向多个目的地的各个小组传播消息;利用CDMA技术来减少中继节点以及目的地节点的多址干扰(MAI)障碍,同时每个中继节点作为线性预编码波束合成器,可以在合适的代码空间重塑基站信号;对线性波束形成矩阵进行优化,使得中继节点的功率最小化,从而满足QoS在信号干扰噪声比方面的要求。系统性能仿真对比实验的结果表明,提出的改进方案明显优于传统的正交复用方案(FDMA / TDMA)。

**关键词** CDMA, 多点广播, QoS, 协作中继

中图分类号 TP391

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.025

## Design of Multicast Code Division Multiple Access Information System Based on Cooperative Relay

LV Min-hui<sup>1,2</sup> XIONG Wei<sup>3</sup> SHEN Lai-xin<sup>4</sup>

(Department of Management Science and Information Management, School of Management,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)<sup>1</sup>

(Department of Equipment Economics and Management, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)<sup>2</sup>

(Department of Information Engineering, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)<sup>3</sup>

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)<sup>4</sup>

**Abstract** In order to improve the performance of multigroup multicast relay network system, an improved cooperative relay multipoint broadcast code division multiple access(CDMA) system was proposed. In this scheme, the distributed beamforming based on cooperative relaying is used to realize the multicast of single antenna base station, and a better spatial diversity gain is obtained. In this system, a plurality of base stations use multiple relay nodes to multiple destinations in each group to spread the news. CDMA techniques are used to reduce the relay node and the multiple access interference(MAI) barrier of the destination node. Each relay node as a linear precoding beamformer can reshape the space base station signal in the appropriate code. The linear beamforming matrix is optimized to make the power relay nodes minimize, so as to meet the requirements of QoS in signal to interference noise ratio. Through the contrast experiment, the performance of the system simulation shows that the proposed scheme outperforms the conventional orthogonal multiplexing scheme(FDMA / TDMA).

**Keywords** CDMA, Multicast, QoS, Cooperative relay

## 1 前言

多径衰落和多址干扰(MAI)是无线网络传输中需要克服的两个主要障碍,提出利用协作中继来对抗多径衰落<sup>[1]</sup>。由于每个信号都有可能通过数个中继节点进行传输,因此空间分集增益可以实现。在现有的协作中继协议中,非再生协议由于具有简单和可操作性强等优势<sup>[2,3]</sup>受到广泛的应用。

在多用户多点广播的通信场景中,多个基站传输信号,每个基站向一些目的地节点发送相同的数据<sup>[4]</sup>。在这样的环境中,多址干扰不可避免地存在于通向目的地链接的基站中以及通向目的地链接的中继节点中。

为了缓解多址干扰,在网络中可以利用多个多路复用方案,让多个用户相互交流。分时多址(TDMA)和频分多址(FDMA)是正交复用方案的常见例子<sup>[5,6]</sup>。这些方案的主要

到稿日期:2015-05-04 返修日期:2016-05-21 本文受国家自然科学基金项目(41271403),安徽省高校自然科学基金项目(KJHS2016B02),安徽省教育厅质量工程项目(2015ckjh089)资助。

吕闽晖(1975—),男,博士,副研究员,主要研究方向为信息管理、信息挖掘、通信系统;熊伟(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为空间数据库与地理信息系统、通信处理;沈来信(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为模式识别、复杂计算、信号处理。

缺点是时间和频率资源的使用效率较低<sup>[7]</sup>。另一方面,码分多址(CDMA)方案并没有试图将不同的时间、频率或空间分配给每个用户。相反,通过多个干扰非正交通道,将带宽和时间资源分配给大量的用户。

文献[8-10]对 CDMA 系统中的协作方法进行了研究。文献[8]对异步多用户协作 CDMA 的性能和故障概率进行了评估。文献[9]采用了多用户检测,以便缓解用户之间的干扰。文献[10]首次在 CDMA 网络中提出了一种 MIMO 中继模式,通过单独中继节点增加了点对点的性能。

然而,上述所有的研究都是关注上行场景或单独中继系统,本文提出一种新的协作多点广播 CDMA 系统方案,以应用于多个中继节点的广播。利用 CDMA 技术的优点和多个中继节点的协作来提高系统的性能。每个中继节点均配备调制器和解调器,都利用匹配滤波器组(MFB)来分离不同的基站信号。MFB 的输出由线性预编码矩阵进行处理。中继节点的线性预编码矩阵同时作为波束形成和干扰取消,旨在最小化总的中继功率,同时满足 QoS 要求,提出的中继系统默认使用非再生协议。本文的主要贡献有:1)将点对点的多用户协作中继网络<sup>[11]</sup>扩展为多群多点广播中继网络,其中每个基站服务多个目的节点;2)在协作多点广播网络中采用 CDMA 技术,与其他正交复用方案相比,提高了系统性能。

## 2 系统模型

假设一个无线中继网络由  $N_s$  个基站、 $N_R$  个中继节点和  $N_d$  个目的地组成。在这个网络中的每个节点都配备一根独立的天线。假设在基站和目的地之间的链接足够弱,以致于可以被忽略。

假设存在  $N_s$  个脱节的目的地组群  $\{U_1, \dots, U_{N_s}\}$ , 每组由  $q_k, k \in \{U_1, \dots, U_{N_s}\}$  个节点构成。每个基站服务这些组群中的一个组群。该系统执行两个阶段的非再生传播中继。在第一阶段,基站使用各自的传播序列将其数据发送到中继节点。每个中继节点使用匹配滤波器组(MFB)恢复基站信号。将线性处理应用于匹配滤波器组的输出,最后中继节点在第二阶段分散和传输信号。在每个目的地接收到的噪声信号经过另一个匹配滤波器恢复其相应的信号。

在同步传输中,第  $r$  个中继节点接收到的信号可以表示为:

$$y_r(t) = \sum_{j=1}^{N_s} h_{r,j} \phi_j \pi_j(t) + n_r(t), 0 \leq t \leq T_0 \quad (1)$$

其中,  $T_0$  表示符号的持续时间,  $\phi_j$  表示第  $j$  个基站信号, 传输功率  $p_j = E(|\phi_j|^2)$ ,  $h_{r,j}$  表示从第  $j$  个基站到第  $r$  个中继节点的复杂信道系数。  $n_r(t)$  表示第  $r$  个中继节点的加性高斯白噪声(AWGN),  $\pi_j(t) = \pi_j^l(t) + i\pi_j^q(t)$  表示分配给第  $j$  个基站信号的复杂传播序列。如果  $L_c$  表示传播因子, 那么传播序列  $\pi_j(t)$  可以表示为:

$$\pi_j(t) = \sum_{l=1}^{L_c} c_j[l] \varphi(t - lT_c), j=1, \dots, N_s \quad (2)$$

其中,  $c_j[l]$  表示分配给第  $j$  个基站的传播序列的第  $l$  个元素,  $\varphi(t)$  表示标准化的芯片, 单位能量和持续时间  $T_c = T_0/L_c$ 。假设  $C$  为传播序列的相关矩阵, 将其定义为:

$$C = [c_1, \dots, c_{N_s}] = \pi(t) * \pi^H(T_0 - t)|_{t=T_0} \in \mathbb{C}^{N_s \times N_s} \quad (3)$$

其中,  $\alpha_r = \Gamma_r u_r$ ,  $*$  表示卷积算子。  $C$  为 Hermitian 矩阵, 而且

匹配滤波器组的输出信号对应于第  $r$  个中继节点的  $\pi(t)$ , 因此可以得到以下公式:

$$\begin{aligned} u_r &= y_r(t) * \pi^*(T_0 - t)|_{t=T_0} \\ &= \sum_{j=1}^{N_s} h_{r,j} \phi_j \pi_j(t) * \pi^*(T_0 - t)|_{t=T_0} + n_r(t) * \pi^*(T_0 - t)|_{t=T_0} \\ &= \sum_{j=1}^{N_s} h_{r,j} \phi_j c_j^* + \hat{n}_r \\ &= h_{r,k} \phi_k c_k^* + \sum_{j \in \{1, \dots, N_s\} \setminus \{k\}} h_{r,j} \phi_j c_j^* + \hat{n}_r \\ &= u_{r,k} + u_{r,-k} + \hat{n}_r \end{aligned} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} u_{r,k} &= h_{r,k} \phi_k c_k^* \\ u_{r,-k} &= \sum_{j \in \{1, \dots, N_s\} \setminus \{k\}} h_{r,j} \phi_j c_j^* \\ \hat{n}_r &= n_r(t) * \pi^*(T_0 - t)|_{t=T_0} \end{aligned}$$

当  $\alpha_r = \Gamma_r u_r$  时, 第  $r$  个中继节点通过预编码矩阵  $\Gamma_r \in \mathbb{C}^{N_s \times N_s}$ , 对匹配滤波器组的输出进行线性处理, 然后通过以下 CDMA 技术的传播序列来传送调制和预编码信号:

$$x_r(t) = \alpha_r^T \pi(t) \quad (5)$$

从中继节点传输的信号可以重新格式化为:

$$\begin{aligned} x(t) &= [x_1(t), \dots, x_{N_R}(t)]^T \\ &= [\alpha_1^T \pi(t), \dots, \alpha_{N_R}^T \pi(t)] \\ &= [\alpha_1 \alpha_{N_R}]^T \pi(t) \\ &= [\Gamma_1 u_1, \dots, \Gamma_{N_R} u_{N_R}]^T \pi(t) \\ &= (\Gamma \Sigma)^T \pi(t) \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned} [\Gamma_1, \dots, \Gamma_{N_R}] &\in \mathbb{R}^{N_s \times N_R N_s} \\ \Sigma &= BD(\{u_j\}_{1 \leq j \leq N_R}) \in \mathbb{R}^{N_R N_s \times N_R N_s} \end{aligned}$$

$BD(\{A_m\}_{1 \leq m \leq M})$  表示从矩阵形成的分块对角矩阵  $\alpha_r = \Gamma_r u_r$ , 在第  $(k, \ell_k)$  个目的地(在第  $k$  个组群的第  $\ell_k$  个目的地)接收到的信号可以表述为:

$$\hat{z}_{k, \ell_k}(t) = \hat{h}_{k, \ell_k}^T x(t) + \eta_{k, \ell_k}(t) \quad (7)$$

其中,  $\hat{h}_{k, \ell_k}$  表示从中继节点到第  $(k, \ell_k)$  个目的地的信道向量,  $\eta_{k, \ell_k}(t)$  表示在第  $(k, \ell_k)$  个目的地的加性高斯白噪声。在第  $(k, \ell_k)$  个目的地的接收信号对应于  $\pi(t)$  通过匹配滤波器, 恢复了从第  $k$  个基站接收到的信号, 表示为:

$$\begin{aligned} \hat{z}_{k, \ell_k}(t) &= z_{k, \ell_k}(t) * \pi_k^*(T_0 - t)|_{t=T_0} \\ &= \hat{h}_{k, \ell_k}^T (\Gamma \Sigma)^T \pi(t) * \pi_k^*(T_0 - t)|_{t=T_0} + \eta_{k, \ell_k}(t) * \pi_k^*(T_0 - t)|_{t=T_0} \\ &= \hat{h}_{k, \ell_k}^T \underbrace{\Sigma^T \Gamma^T c_k}_{\text{信号}} + \underbrace{\hat{h}_{k, \ell_k}^T \Sigma^T \Gamma^T c_k}_{\text{干扰}} + \underbrace{\hat{h}_{k, \ell_k}^T \Sigma_{m_r}^T \Gamma^T c_k}_{\text{噪声}} + \eta_{k, \ell_k} \end{aligned} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_{k, \ell_k} &= \eta_{k, \ell_k}(t) * \pi_k^*(T_0 - t)|_{t=T_0} \\ \Sigma &= \Sigma_k + \Sigma_{-k} + \Sigma_{m_r} \\ \Sigma_k &= BD(\{u_{j,k}\}_{1 \leq j \leq N_R}) \\ \Sigma_{-k} &= BD(\{u_{j,-k}\}_{1 \leq j \leq N_R}) \\ \Sigma_{m_r} &= BD(\{n_j\}_{1 \leq j \leq N_R}) \end{aligned}$$

式(8)中的第1-3项分别表示期望信号、干扰和噪声分量。

### 3 中继节点波束形成设计优化

本文假定通过训练和来自目的地的反馈,中继节点可以获得信道状态信息(CSI)。此外,有一个数据融合中心可以计算预编码矩阵,并且通过无误差的信道将这些矩阵反馈给中继节点。中继节点传输的功率在一定程度上受制于 QoS,通过最小化功率,设计出中继节点预编码矩阵,即在所有目的地的信号干扰噪声比(SINR)必须高于某一预先设定的阈值。因此试图解决最小化的问题。

#### 3.1 中继节点传输的总功率优化

首先使得  $P_R$  满足如下条件:

$$\text{SINR}_{k,\ell_k} \geq \bar{\gamma}_{k,\ell_k}, k=1, \dots, N_s, \ell_k=1, \dots, q_k \quad (9)$$

其中  $P_R$ ,  $\text{SINR}_{k,\ell_k}$  和  $\bar{\gamma}_{k,\ell_k}$  分别表示中继节点传输的总功率,在第  $(k, \ell_k)$  个目的地的信号干扰噪声比,以及在第  $(k, \ell_k)$  个目的地的预先设定的信号干扰噪声比阈值。在第  $(k, \ell_k)$  个目的地的信号干扰噪声比被定义为:

$$\text{SINR}_{k,\ell_k} = \frac{P_{\text{信号}}^{k,\ell_k}}{P_{\text{干扰}}^{k,\ell_k} + P_N^{k,\ell_k}} \quad (10)$$

其中,  $P_{\text{信号}}^{k,\ell_k}$ ,  $P_{\text{干扰}}^{k,\ell_k}$  和  $P_N^{k,\ell_k}$  分别表示在第  $(k, \ell_k)$  个目的地所需的信号功率、干扰功率以及噪声功率。

式(8)中,在第  $(k, \ell_k)$  个目的地所需的信号功率可以计算为:

$$P_{\text{信号}}^{k,\ell_k} = \text{tr}(\Gamma^* E(\Sigma_k^* \hat{H}_{k,\ell_k} \Sigma_k^T) \Gamma^T C_k C_k^H) = \gamma^T R_{k,\ell_k} \gamma^* \quad (11)$$

其中,  $\text{tr}(\cdot)$  表示矩阵的迹,  $\gamma = \text{vec}(\Gamma)$ ,  $\text{vec}(\cdot)$  代表通过堆积叠加矩阵所有的列向量得到的向量。

$$\begin{aligned} \hat{H}_{k,\ell_k} &= \hat{h}_{k,\ell_k}^* \hat{h}_{k,\ell_k}^T \\ R_{k,\ell_k} &= \lambda_{k,\ell_k}^T \otimes C_k C_k^H \\ \lambda_{k,\ell_k} &= E(\Sigma_k^* \hat{H}_{k,\ell_k} \Sigma_k^T) \\ &= \hat{H}_{k,\ell_k} \otimes BM\{E(u_{i,k}^* u_{j,k}^T)\}_{1 \leq i,j \leq N_R} \end{aligned}$$

其中,  $[H_k]_{i,j} = h_{i,k}^* h_{j,k}$ 。  $BM\{A_m\}_{1 \leq m \leq M}$  表示从矩阵形成的分块矩阵  $A(m=1, \dots, M, n=1, \dots, N)$ ,  $\otimes$  表示克罗内克积。基于式(8),在第  $(k, \ell_k)$  个目的地的干扰功率由下式得出:

$$P_{\text{干扰}}^{k,\ell_k} = \text{tr}(\Gamma^T C_k C_k^H \Gamma^* E(\Sigma_k^* \hat{H}_{k,\ell_k} \Sigma_k^T)) = \gamma^T C_{k,\ell_k} \gamma^* \quad (12)$$

其中,  $C_{k,\ell_k} = (\delta_{k,\ell_k})^T = C_k C_k^H$ , 且

$$\begin{aligned} \delta_{k,\ell_k} &= E(\Sigma_k^* \hat{H}_{k,\ell_k} \Sigma_k^T) \\ &= \hat{H}_{k,\ell_k} \otimes BM\{E(u_{i,-k}^* u_{j,-k}^T)\}_{1 \leq i,j \leq N_R} \end{aligned} \quad (13)$$

$$E\{u_{i,-k}^* u_{j,-k}^T\} = \sum_{u \in \{1, \dots, N_s\} \setminus \{k\}} p_u [H_u]_{i,j} C_u C_u^H$$

此外,可以得出在第  $(k, \ell_k)$  个目的地的噪声功率为:

$$\begin{aligned} P_N^{k,\ell_k} &= \text{tr}(\Gamma^T C_k C_k^H \Gamma^* E(\Sigma_k^* \hat{H}_{k,\ell_k} \Sigma_k^T)) + \sigma_{\eta_{k,\ell_k}}^2 \\ &= \gamma \Delta_{k,\ell_k} \gamma^* + \sigma_{\eta_{k,\ell_k}}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta_{k,\ell_k}}^2 &= E(|\eta_{k,\ell_k}|^2) \\ \Delta_{k,\ell_k} &= \Theta_{k,\ell_k}^T \otimes C_k C_k^H \\ \Theta_{k,\ell_k} &= E(\Sigma_k^* \hat{H}_{k,\ell_k} \Sigma_k^T) \\ &= \hat{H}_{k,\ell_k} \otimes BD\{E(n_i^* n_i^T)\}_{1 \leq i \leq N_R} \\ E(n_i^* n_i^T) &= \sigma_n^2 C \end{aligned}$$

利用式(6)可以将从中继节点得到的总传输功率表示为:

$$P_R = E(x(t), x(t)) \quad (15)$$

其中,符号  $\langle a(t), b(t) \rangle$  表示  $a(t)$  和  $b(t)$  的内积,定义为:

$$\langle a(t), b(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} a^H(t) b(t) dt = a^H(T_0 - t) b(t) |_{t=T_0} \quad (16)$$

运用式(15)、式(16)可以得出中继节点的功率为:

$$\begin{aligned} P_R &= E \int (\pi(t))^H (\Gamma \Sigma)^* (\Gamma \Sigma)^T \pi(t) dt \\ &= \text{tr}(\Gamma^T \Gamma \Gamma^* E(\Sigma^* \Sigma^T)) = \gamma^T B \gamma^* \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $B = A^T \otimes C$ ,  $A = E(\Sigma^* \Sigma^T)$ 。此外,矩阵  $A$  还可以简化为:

$$A = BD(E(u_1^* u_1^T), \dots, E(u_{N_R}^* u_{N_R}^T))$$

$$E(u_i^* u_i^T) = \sum_{k=1}^{N_s} [H_k]_{i,i} C_k C_k^H + \sigma_n^2 C$$

#### 3.2 优化约束条件分析

通过式(10)一式(14)以及式(17),式(9)的优化问题可以表示为最小化  $\gamma^T B \gamma^*$  问题。使得  $\gamma^T B \gamma^*$  满足如下条件:

$$\frac{\gamma^T R_{k,\ell_k} \gamma^*}{\gamma^T C_{k,\ell_k} \gamma^* + \gamma^T \Delta_{k,\ell_k} \gamma^* + \sigma_{\eta_{k,\ell_k}}^2} \geq \bar{\gamma}_{k,\ell_k} \quad (18)$$

$$k=1, \dots, N_s, \ell_k=1, \dots, q_k$$

通过定义新的优化变量  $W = \gamma \gamma^H$ , 可以将优化问题式(18)重新表述为最小化  $\text{tr}(WB)$  的问题。

使得  $\text{tr}(WB)$  满足如下条件:

$$\begin{aligned} \text{tr}(W T_{k,\ell_k}) &\geq \sigma_{\eta_{k,\ell_k}}^2 \bar{\gamma}_{k,\ell_k} \\ k &= 1, \dots, N_s, \ell_k=1, \dots, q_k \\ \text{rank}(W) &= 1, W \geq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

其中,

$$T_{k,\ell_k} = R_{k,\ell_k} - \bar{\gamma}_{k,\ell_k} (C_{k,\ell_k} + \Delta_{k,\ell_k})$$

由于秩一约束,优化问题式(19)不具有凸性。然而,通过丢弃秩一约束它可以转化为一个凸面问题。众所周知的凸优化方法可以用于解决上述问题,没有秩一限制,通过运用内点方法在多项式时间内来实现<sup>[12]</sup>。用  $W_{opt}$  表示式(19)的解决方案,如果  $W_{opt}$  恰好是秩一,那么运用它的主要特征向量来获得。如果式(19)的解决方案不是秩一,则众所周知的随机化技术可以用来粗略估计最佳秩一的解决方案<sup>[13]</sup>。利用  $W_{opt}$  多次生成候选向量,每次迭代将这些向量按比例来满足式(19)的 QoS 约束。最后按比例缩小候选向量,选取具有优化问题的最小客观数值,该候选向量被选为适当的次佳解决方案。注意:优化问题简易形式的最小值为式(19)中原始问题的最小值下限。

### 4 实验结果与分析

本节通过仿真实验数值结果来验证所提方案的性能。为评价本文方法的性能,实验所用的计算机平台性能参数为

CPU: Inter i7 3.40GHz; 内存: DDR3 4G; 操作系统: 64 位 Windows 7; 软件平台: MATLAB 7.0。假设中继节点和目的地噪声功率都等于 0dBW。独立的高斯随机变量产生信道, 零均值和方差为 10dB, 进行了 1000 次随机仿真。所有目的地的信号干扰噪声比阈值都被假定为相等。

随机多次生成相关矩阵, 然后选择一个在不同用户之间具有最小相关性的矩阵, 生成了第  $k$  个用户传播序列的第  $\ell$  个候选元素, 表示为:

$$c_k[\ell] = \frac{\beta_k^i}{\|\beta_k^i\|}$$

其中,  $\beta_k^i$  表示高斯随机变量, 均值和单位方差为 0。

通过实现足够数量的矩阵, 并从以下条件选择指数  $i_{opt}$ , 以此选择最好的相关矩阵。

$$i_{opt} = \arg \min_i \max_j | [C_i]_{k,j} | \quad (20)$$

其中,  $[C_i]_{k,j} = u_k^i(t) * (u_j^i)(T_0 - t) |_{t=T_0}$ ,  $u_k^i(t) = \sum_{\ell=1}^{L_c} \varphi(t - \ell T_c)$ 。我们注意到在实现  $10^6$  次后, 结果不再改变。因此  $10^6$  足以选择最好的相关矩阵  $C_{i_{opt}}$ 。

#### 4.1 不同信号干扰噪声比阈值下的中继功率分析

假设首先考虑一个多点广播场景具有  $N_R = 6$  个中继节点, 而且  $k=1, \dots, N_s$ ,  $q_k=2$  (因此每组包含相同数量的目的地)。每个基站传输  $p_k=0\text{dBW}$ ,  $k=1, \dots, N_s$ , 传播因子  $L_c$  设置为 2。图 1 描述了在不同数量的用户情况下最低中继节点功率的变化结果, 显示了基站数量  $N_s$  越大, 需要的最低中继节点功率越高。同时, 可以观察到, 随着基站数量的增加, 式 (19) 中秩一的解决方案减少。

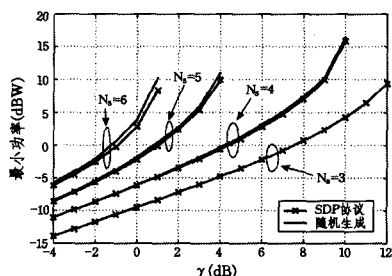


图 1 随着信号干扰噪声比阈值变化的最小中继传输功率

#### 4.2 不同正交复用技术的中继功率分析

图 2 显示了在 TDMA, SDMA 和 CDMA 3 种正交复用技术条件下中继节点的最小传输功率随着最低网络传输速率和用户数量变化的结果, 其中  $N_R=12$ 。对于每一个速率, 选择与 CDMA 方案最小功率相关的扩频因子。可以观察到, 对于整个范围的速率而言, CDMA 方案优于 TDMA 和 SDMA 方案。同时可以看到, 随着用户数量的增加, TDMA 和 SDMA 方案的性能比 CDMA 方案更差, 特别是在速率更高的情况下。

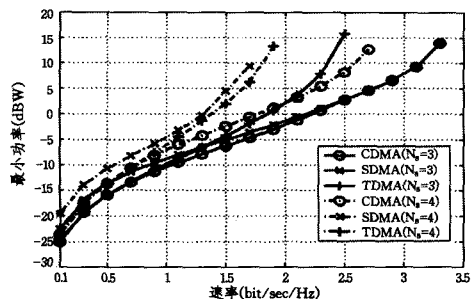


图 2 随着最低要求的数据速率变化的最小传输功率

#### 4.3 计算复杂度分析

传统 TDMA 和 SDMA 方案的计算复杂度为  $O(\sqrt{N_R} \log(N_R) \log(N_R/\epsilon))^{[3]}$ 。由式 (19) 的简易形式可以看出, 本文所提方案设计的计算复杂度为:  $O(\sqrt{N_R N_s^2} \log(N_R N_s^2) \log(N_R N_s^2/\epsilon))$ , 与 TDMA 和 SDMA 方案相比, 所提系统设计方案的计算复杂度要高于传统的 TDMA 和 SDMA 方案, 这是所提方案的一个弱势。

**结束语** 本文提出一种改进的协作中继多点广播码分多址 (CDMA) 系统设计。每个中继节点都配备一个匹配滤波器组和一个线性预编码矩阵。为了在中继节点获得预编码矩阵, 已经用公式表示功率最小化的问题。仿真结果证实了提出的协作 CDMA 方案的性能得到了改进, 与 TDMA 和 SDMA 方案相比较, 付出的代价是计算复杂度更高。

#### 参考文献

- [1] Wu Dan, Tian Ya-fei, Yang Chen-yang. Design and data rate performance analysis of cooperative multiple access broadcast transmission scheme for cooperative multiple access relay system [J]. Journal of Communication, 2012, 33(1): 45-52 (in Chinese)
- [2] Liu Ting-ting, Yang Chen-yang. Energy efficiency and spectral efficiency of multi carrier code division multiple access two hop amplify and forward relaying system [J]. Signal Processing, 2013, 29(10): 1283-1293 (in Chinese)
- [3] Zhang Shu-ping, Zhao Gui-qin. The performance of the relay assisted downlink direct sequence CDMA based on the pre processing of the transmitter [J]. Laser Journal, 2014(11): 75-80 (in Chinese)
- [4] Huang Cheng-rong, Guo Ying, Li Men-hao. Beamforming Communication Scheme Design for Synchronous Cooperative Relay Systems [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(1): 302-304 (in Chinese)
- [5] Guo Yan-yan, Kang Gui-xia, Zhang Ning-bo, et al. A Distributed Power Allocation for Cooperative Transmission in Cognitive Radio Systems [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 32(10): 2463-2467 (in Chinese)
- [6] Chen Bin, Li You-ming, Guo Tao, et al. Resource allocation algorithm for multi user cooperative relay system based on sub carrier matching [J]. Telecommunication Science, 2014, 30(6): 73-78 (in Chinese)

- 陈斌,李有明,郭涛,等.基于子载波配对的多用户协作中继系统资源分配算法[J].电信科学,2014,30(6):73-78
- [7] Yan Long, Qin Tuan-fa, Li Liang-liang, et al. Wireless body area network encoding multi relay cooperative strategy of energy saving technology based on [J]. Telecom, 2014(3):355-360(in Chinese)
- 闫龙,覃团发,李亮亮,等.基于网络编码的无线体域网多中继协作节能策略[J].电讯技术,2014(3):355-360
- [8] Vardhe K, Reynolds D, Valenti M C. The Performance Of Multi-User Cooperative Diversity In An Asynchronous Cdma Uplink [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5):1930-1940
- [9] Huang W J, Hong Y W P, Kuo C C J. Relay-Assisted Decorrelating Multiuser Detector(RAD-MUD) for Cooperative CDMA Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(3):550-560
- [10] Golbon-Haghighi M H, Mahboobi B, Ardebilipour M. Linear Pre-coding in MIMO-CDMA Relay Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 79(2):1321-1341
- [11] Mahboobi B, Ardebilipour M, Kalantari A, et al. Robust Cooperative Relay Beamforming[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2013, 2(4):399-402
- [12] Sturm J F. Using SeDuMi 1. 02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones[J]. Optimization Methods & Software, 1999, 11-12(1):625-653
- [13] Chalise B K, Vandendorpe L. Optimization of MIMO Relays for Multipoint-to-Multipoint Communications: Nonrobust and Robust Designs[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(12):6355-6368
- [14] Deng Guo-hui, Shao Yu-bin, Xia Teng-fei. Cooperation Multiplexing: Research on Realizing Higher Spectrum Efficiency in Multi-antenna Relay Network[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2011, 25(12):94-105(in Chinese)
- 邓国辉,邵玉斌,夏腾飞.协作复用:在多天线下继网中实现更高频谱效率的研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2011,25(12):94-105
- 
- (上接第120页)
- 陆中远.基于SOA的服务组合研究与平台设计[D].北京:北京邮电大学,2011
- [3] Zhang Cheng, Han Yan-bo. A context information model for service composition platform [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(4):712-720(in Chinese)
- 张程,韩燕波.一种适用于服务组合平台的语境信息使用模式[J].计算机学报,2005,28(4):712-720
- [4] Tong Yan. Research and algorithm design on platform for semantic Web services dynamic combination [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2006(in Chinese)
- 童艳.语义Web服务动态组合平台的研究与算法设计[D].成都:电子科技大学,2006
- [5] Song Bo, Li Miao-yan. Research and implementation of BPEL based on Web services [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(9):2212-2214(in Chinese)
- 宋波,李妙妍.面向Web服务的BPEL的研究与实现[J].计算机工程与设计,2007,28(9):2212-2214
- [6] <http://www.microsoft.com/en-us/bizalk/default.aspx>
- [7] Sheng Q Z, Qiao X, Vasilakos A V, et al. Web services composition: A decade's overview[J]. Information Sciences, 2014, 280: 218-238
- [8] 吴哲辉. Petri网导论[M].北京:机械工业出版社,2006:1-103
- [9] Xu K, Ma B. A Petri Net Based Execution Engine for Web Service Composition[M]//Web Information Systems Engineering-WISE 2013 Workshops. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 181-193
- [10] Yue kun, Wang Xiao-ling, Zhou Ao-ying. Web service core support technology: Research Summary [J]. Software Journal, 2004, 15(3):428-442(in Chinese)
- 岳昆,王晓玲,周傲英. Web服务核心支撑技术:研究综述[J].软件学报,2004,15(3):428-442
- [11] Li Shan-ping, Yin Qi-wei, Hu Yu-jie, et al. Overview of ontology research [J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(7):1041-1052(in Chinese)
- 李善平,尹奇韡,胡玉杰,等.本体论研究综述[J].计算机研究与发展,2004,41(7):1041-1052
- [12] Berners T L, Hendler J, Lassila O. The Semantic Web[J]. Scientific American, 2003, 284:34-43
- [13] Ma Bing-xian, Xie Neng-fu. From OWL-S to PNML+OWL for Semantic Web Services [C]//2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation. Beijing: IEEE, 2010, 4:326-328
- [14] Liu Bai-song. Semantic Web based knowledge: concepts, techniques and challenges [J]. Chinese Journal of Library, 2003, 29(2):18-21(in Chinese)
- 刘柏嵩.基于知识的语义网:概念、技术及挑战[J].中国图书馆学报,2003,29(2):18-21
- [15] Apache. Reasoners and rule engines: Jena inference support [EB/OL]. [2013-03-31]. <http://jena.apache.org/documentation/inference/#api>
- [16] <http://jgraph.github.io/mxgraph/docs/manual.html>
- [17] Liu Xing-Yu. Research on full text retrieval technology based on inverted index [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004(in Chinese)
- 刘兴宇.基于倒排索引的全文检索技术研究[D].武汉:华中科技大学,2004
- [18] McGuinness D L, van Harmelen F. OWL Web Ontology Language Overview [EB/OL]. (2004-02-10)[2013-03-31]. <http://www.w3.org/TR/owl-features>
- [19] Cheng Bian-ai. Resource Description Framework(RDF)—A very vital metadata tool [J]. Modern Library and Information Technology, 2000(6):62-64(in Chinese)
- 程变爱.试论资源描述框架(RDF)——一种极具生命力的元数据携带工具[J].现代图书馆情报技术,2000(6):62-64