

基于协作通信技术的无线再生中继网络中的功率最优分配

张 凯 钱焕延

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

摘 要 针对无线再生中继网络的系统性能与系统误帧率、中断概率等有关问题,以协作通信技术中的多用户协作分集协议 MDP(Multi-user Diversity-cooperative Protocol)为基础,设计了新型的 MDPTS(Multi-user Diversity-cooperative Protocol Transmission Scheme)传输方案,优化了信号传输过程,提升了信号传输效率与网络吞吐量。在此基础上以系统误帧率最小为目标,提出了在发射端和中继器间的功率分配方案,以误帧率下届为目标函数,通过拉格朗日法求得系统的功率分配最优解。仿真结果表明,与采用传统传输方案的网络相比,采用 MDPTS 传输方案的网络具有更高的分集增益和复用增益,因此系统性能也更好。

关键词 无线组播网络,协作通信技术,功率优化分配,再生中继

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Optimal Power Allocation for Wireless Multicast Networks with Regenerative Relaying Based on Cooperative Communication Technology

ZHANG Kai QIAN Huan-yan

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Aiming at all related issues between system performance of wireless regenerative relaying networks and system frame error probability, outage probability, based on the Multi-user Diversity-cooperative Protocol(MDP) of cooperative communication technology, a new type of transmission scheme(MDPTS) was designed, which optimizes the signal transmission process and enhances both signal transmission efficiency and network throughput. On this basis, the minimum SFEP(System Frame Error Probability) was set as target, and the optimal power allocation scheme between the source and the relay was proposed, the optimal solution of system power allocation was obtained by Lagrange multiplier method. Simulation results show that compared with the network using traditional transmission scheme, the network adopting MDPTS possesses higher diversity gain and multiplexing gain, therefore, has better system performance.

Keywords Wireless multicast networks, Cooperative communication technology, Optimal power allocation, Regenerative relaying

1 引言

协作通信技术(Cooperative Communication Technology)是指利用网络中闲置的多个基站或天线作为信号传输的中继,通过这些中继形成分布式虚拟天线阵列,为数据的传输提供更高的分集增益和能量效益。这种技术因其所具有的优点而被广泛地应用于无线通信网络中,并引起了众多学者的关注^[1-3]。根据中继对信号处理方式的不同,协作通信中的中继被定义为两类:非再生中继(Non-regenerative Relaying)和再生中继(Regenerative Relaying)。本文着重研究再生中继网络。再生中继是指中继接收到信号后会对信号进行译码处理,并将译码后的信号进行叠加,再转发给接收端。Lee, Beaulieu 等人以单信源、单信宿为系统模型,对无线再生中继网络中的误码率与中断概率进行了研究^[4,5]。Laneman 等人在此基础上提出了再生中继网络中空时调度的多用户协作分

集协议(Multi-user Diversity-cooperative Protocol,MDP)^[6,7]。Nabar 等人则以单信源、单信宿为系统模型提出了再生中继网络中的典型节点调度方案^[8,9]。遗憾的是这些研究都是以单信源单信宿的网络作为系统模型,对网络性能进行评测时也多以信道容量及误码率为衡量标准,未研究网络中多个信源利用相同的中继同时对多个信宿进行信号传播的情况,也没考虑到系统性能会受到信号的传输速率、中继对信号的处理效率、节点受物理限制条件(如半双工通信机制)等多个因素的影响。

根据 Laneman 等人在文献[6]中的研究,可以将传统的点对点的信号传输方案(Traditional Transmission Scheme, TTS)的传输过程描述为 4 个时隙:

- 1) s_1 将信号 x_1 广播到中继 r 和目的节点 d_1 ;
- 2) 中继 r 对信号进行处理后转发给 d_2 ;
- 3) s_2 将信号 x_2 广播到中继 r 和目的节点 d_2 ;

到稿日期:2010-04-05 返修日期:2010-07-29 本文受国防科工委应用基础资金(JI300D004)资助。

张 凯(1979-),男,博士生,主要研究方向为网络技术与网络安全,E-mail:zhangkai27@yahoo.com.cn;钱焕延(1950-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络技术与网络安全。

4) 中继 r 对信号进行处理后转发给 d_1 。

TTS 方案主要是用以解决单信源、单中继、单信宿模型中的信号传输问题,也适用于多信源多信宿模型。但是因其对于通信网络中闲置天线(中继)的利用率低下,所以我们会结合 MDP 协议对其进行进一步的改进,并在下面的仿真实验中比较其与改进后的传输方案间对于整个系统通信性能的影响。

为了能够进一步研究多信源多信宿网络环境下无线通信系统的性能,本文以对系统性能的分析与优化为目标,首先建立了多信源多信宿模型,在再生中继网络环境中提出了一种基于多用户协作分集协议的信号传输方案,通过对系统中断事件和误帧率事件的定义推导出分集复用权衡比,以此评测系统的性能。并在计算出中断概率与误帧率的基础上提出了系统功率最优分配方案。

2 系统的信道模型与数学模型

2.1 系统的信道模型

在无线组播网络下,多个发射端同时利用相同的中继器向各自的接收端发射信号的状况非常普遍。因此建立多信源与多信宿信道模型,不仅具有理论研究价值,而且具有实际应用价值。为了能够将整个研究过程简单明了化,本文将整个无线组播网络抽象简化为一个存在两个信源、两个信宿和一个中继的模型(对组播网络中存在 N 个信源 N 个信宿和 N 个中继的情况只要将其展开讨论即可)。

如图 1 所示,由于受到发射功率的限制,源节点 s_1, s_2 传输范围无法覆盖到目的节点 d_2, d_1 , 必须通过中继 r 的信号转发来达到传输范围的延伸。在无线非再生中继网络中,所有节点都工作在半双工模式下。

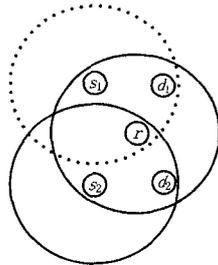


图 1 系统模型

在本文引言中已经介绍了传统的信号传输方案(TTS), 其主要的传输步骤分为 4 个步骤。为了能够进一步改善系统性能, Laneman 等人将协作通信技术引入了无线通信网络中, 在文献[6,7]中提出了再生中继网络中空时调度的多用户协作分集协议(MDP)。该协议利用系统中闲置的天线实现空间分集, 提升了网络吞吐量和信号传输效率。遗憾的是, Laneman 等人的研究只限于单信源单信宿模型, 并没有考虑到网络中存在多个信源同时利用中继对多个信宿进行信号传输的情况。本文在其研究的基础上, 将 MDP 协议引入多信源多信宿系统中, 设计出了将整个传输过程分为 2 个时隙的多用户协作分集协议传输方案(Multi-user Diversity-cooperative Protocol Transmission Scheme, MDPTS)。

1) 源节点 s_1, s_2 同时将信号广播到中继节点 r 和所对应的目的节点 d_1, d_2 上;

2) 中继 r 根据不同的处理方式对混合信号 $f = (x_{s_1}, x_{s_2})$

进行处理后广播到目的节点 d_1, d_2 。

通过比较可以看出, 本文采用的 MDPTS 方案传输时隙更少, 从而使得整个网络的吞吐量更大。图 2 为系统的信道模型, h_k, g_k, \tilde{h}_k 分别代表源节点与目的节点之间的信道系数、源节点与中继节点之间的信道系数以及中继节点与目的节点之间的信道系数, $k \in \{1, 2\}$, 模型中的信道均视为对称信道。为了方便阅读, 现对本文中可能出现的数学符号说明如下: 文中倾斜的英文小写字母一般代表为向量, 加粗的英文大写字母一般代表矩阵, $\epsilon(\cdot)$ 为期望值, $[\cdot]^T$ 代表矩阵转置, $[\cdot]^+$ 代表共轭转置, \hat{x} 是信号 x 在译码处理时对应的符号。

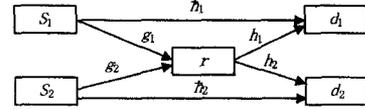


图 2 系统的信道模型

2.2 数学模型及定义

假设在一个时隙内网络中所有源节点的平均发射功率为 P , 目的节点观测到的噪声的均值为 0, 实部与虚部相互独立且方差均为 σ^2 , 服从高斯分布。假设系统的信噪比 $\rho = \frac{P}{\sigma^2}$, 定义模型中任意一个源节点发射的信号向量 x_k 为 $[x_{k,1}, x_{k,2}, \dots, x_{k,N}]^T$ 。由于每一个系统帧都是由两个源节点在相同时间内发出的信号向量组成的, 则定义一个系统帧 $x_s \triangleq [x_{s_1,1}, \dots, x_{s_1,N}, x_{s_2,1}, \dots, x_{s_2,N}]^T$ 包含 $2N$ 个时隙。在一个帧长时间内, 系统中任意一个目的节点接收到信号向量 $y_k \triangleq [y_{k,1}, y_{k,2}, \dots, y_{k,2N}]^T$ 。由于系统中的功率限制, 设源节点和中继节点的总可用功率为 1, 设 k_1, k_2, τ 为 s_1, s_2, r 的功率分配因子, 则系统的功率分配方式满足 $k_1 + k_2 + \tau = 1$ 。在协作通信网络中, 为了能够最大限度地利用信道资源增加系统分集增益, 可以利用空时编码技术优化信号传输过程中节点的空时调度, 让不同的发射节点在不同的时隙发射相同的信息, 以提高分集增益。本文采用文献[9]中给出的节点空时调度策略, 将系统中的发射节点传输一个包含 $2N$ 个时隙的系统帧的过程分为两个阶段:

在第一阶段中, 两个源节点 s_1, s_2 分别向中继节点和目的节点发射信号向量 x_{s_1}, x_{s_2} , 中继节点 r 接收到两个源节点发送过来的混合信号向量 $y_r = [y_{r,1}, \dots, y_{r,n}]^T$ 。由于在第一阶段中不涉及中继对信号的处理, 则系统中的中继节点和目的节点在第 i 个时隙内接收到的信号均有

$$\begin{aligned} y_{r,i} &= g_1 \sqrt{k_1} x_{s_1,i} + g_2 \sqrt{k_2} x_{s_2,i} + v_{r,i} \\ y_{d_k,i} &= h_k \sqrt{k_k} x_{s_k,i} + v_{d_k,i} \end{aligned} \quad (1)$$

$$i=1, \dots, n, k=1, 2$$

式中, $v_{r,i}$ 是中继节点在第 i 个时隙上观测到的噪声, $v_{d_k,i}$ 是目的节点在第 i 个时隙上观测到的噪声。

在第二个阶段中, 中继会对接收到的混叠信号进行译码处理。根据处理方式的不同, 再生中继又可以分为很多种。本文关注的再生中继所采用的译码方式为文献[10]中提及的复数域译码(CFD, Complex Field Decode)方式, 即中继对接收到的混合信号进行译码处理后, 会将编译后产生的符号在复数域上进行叠加, 并通过引入相位偏差 $\alpha = \frac{3j\pi}{4}$ 来解决信号经过中继处理后存在的符号的多义性问题, 则系统中的目的

节点在第 i 个时隙内接收到的信号为

$$u_{d_k, n+i} = h_k \sqrt{\tau_1} x_{r_1, i} + \sqrt{\tau_2} x_{r_2, i} + u_{d_k, n+i} \quad (2)$$

$$i=1, \dots, n, k=1, 2$$

3 系统的分集复用权衡与功率分配方案

信息的传输速率和传输可靠性是评判一个通信系统性能的两个关键性要素。在文献[11]中, Zheng 等人在信噪比 ρ 趋于无穷大的情况下, 定义了分集增益与复用增益这两个概念:

$$d \triangleq -\lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{\log(P_e(\rho))}{\log \rho}, r \triangleq \lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{R(\rho)}{\log \rho}$$

式中, $P_e(\rho)$ 为误帧率, $R(\rho)$ 为传输速率。通过分集复用权衡可以从信息传输的速度和可靠性两个方面分析系统的性能。当一个系统的资源一定时, 信息的传输速率和可靠性成反比, 即在复用增益为 $r(\rho)$ 时, 分集增益将不会超过 $d(r)$ 。由于运用分集复用权衡的方式可以更加全面均衡地评判系统的优劣, 因此本文将运用这种方式来分析非再生中继在多信源多新宿模型上的性能。

对分集复用权衡的推导是建立在系统的中断概率和误帧率基础上的, 因此需要对系统的中断事件和误帧率及分集增益进行如下定义。

系统中断事件: 设源节点集合为 $S = \{s_1, s_2\}$, 目的节点的集合为 $D = \{d_1, d_2\}$, 当源节点集合与目的节点集合的任意子集之间出现中断时, 则整个系统判定为传输信号中断。

系统的分集增益: 设系统的误帧率为 P_e , 根据文献[10]中的研究结果, 系统的分集增益 $d(r)$ 为在信噪比 ρ 趋于无穷大的情况下 P_e 的倒数的对数与 ρ 的对数的比值, 即

$$d(r) \triangleq -\lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{\log P_e}{\log \rho} \quad (3)$$

3.1 系统的分集复用权衡

设 O_{d_k} 为系统的中断事件, 在再生中继网络中中继节点会对从源节点接收到的混合信号进行再编码, 并将产生的新信号发射给目的节点, 因此系统的中断事件包括从源节点到中继节点的中断事件与从源节点到目的节点的中断事件这两个部分。设 O_{d_k} 为源节点到目的节点的中断事件, O_r 为从源节点到中继节点的中断事件, 根据上节对中断事件的定义, 得

$$O_s = O_r \cup O_{d_1} \cup O_{d_2} \quad (4)$$

O_s 为再生中继网络中的系统中断事件, 则系统的中断概率为

$$\begin{aligned} P_o &= P(O_s) = P(O_r \cup O_{d_1} \cup O_{d_2}) \\ &= P(O_r) + P(O_{d_1}) + P(O_{d_2}) - P(O_r)P(O_{d_1}) - P(O_r)P(O_{d_2}) - P(O_{d_1})P(O_{d_2}) + P(O_r)P(O_{d_1})P(O_{d_2}) \\ &= P_{o,r} + P_{o,d_1} + P_{o,d_2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $P_{o,r}$ 是信号从源节点传送到中继节点时发生中断事件的概率, P_{o,d_k} 是在信号从源节点传送到中继节点时不发生中断事件的情况下信号由源节点传送到目的节点时发生中断事件的概率。由于系统中源节点到中继节点的信道是多接入信道状态, 则 O_r 可以表示为

$$O_r = \{ \mathbf{H} | I(x_s; y_r | \mathbf{H}) < 2NR, I(x_{s_1}; y_r | \mathbf{H}) < NR, I(x_{s_2}; y_r | \mathbf{H}) < NR \} \quad (6)$$

式中, $y_r = [y_{r,1}, \dots, y_{r,n}]^T$ 是中继节点接收到的信号向量。

由于中继节点与目的节点之间的信道也为多接入信道状态, 因此可认为整个系统的信道状况保持统一, 则中断事件 O_{d_k} 为

$$O_{d_k} = \{ \mathbf{H} | I(x_s; x_r; y_{d_k}) | \mathbf{H} < 2NR, I(x_{s_1}; x_{r_1}; y_r) | \mathbf{H} < NR, I(x_{s_1}; x_{r_2}; y_r) | \mathbf{H} < NR, I(x_{s_2}; x_{r_1}; y_r) | \mathbf{H} < NR, I(x_{s_2}; x_{r_2}; y_r) | \mathbf{H} < NR, I(x_{r_1}; y_{d_k}) | \mathbf{H} < NR, I(x_{r_2}; y_{d_k}) | \mathbf{H} < NR \} \quad (7)$$

式中, 中继节点在对混合信号 x_{s_1} 和 x_{s_2} 进行译码时产生译码向量 x_{r_1} 和 x_{r_2} , $x_{r_1} = [x_{r_1,1}, \dots, x_{r_1,n}]^T$, $x_{r_2} = [x_{r_2,1}, \dots, x_{r_2,n}]^T$ 。向量 x_{r_1} 和 x_{r_2} 中对应的符号在中继节点上进行复数域叠加后产生一个新向量 x_r , 则 $x_r = x_{r_1} + x_{r_2}$ 。而在再生中继节点方式下系统的误帧率为

$$P_e = P_{e,r} + P_{e,d_1} + P_{e,d_2} \quad (8)$$

式中, $P_{e,r}$ 是中继节点的译码错误概率, P_{e,d_k} 是信号在中继节点译码转发正确的情况下目的节点 k 对接收到的信号的译码错误率。

文献[8]给出了系统中断概率是系统误帧率下届的证明, 文献[12]中给出了再生中继网络中系统中断概率的推导过程以及中断概率与分集增益的关系证明过程。结合这些证明, 可以推导出多信源多新宿模型中系统的分集复用权衡为

$$d(r) = \begin{cases} (1-r), & (0 \leq r \leq \frac{1}{3}) \\ (2-4r), & (\frac{1}{3} \leq r \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知, 当系统的复用增益不超过 $\frac{1}{3}$ 时, 系统的分集增益为 $1-r$ 。当系统的复用增益在 $(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2})$ 这个范围内时, 系统的分集增益为 $2-4r$ 。

3.2 再生中继的系统误帧率与功率分配方案

系统的功率最优方案是以最小化系统误帧率为基础的。式(8)给出了系统的误帧率 $P_e = P_{e,r} + P_{e,d_1} + P_{e,d_2}$ 。当中继节点接收到两个信源发来的信号 x_{s_1} 和 x_{s_2} 后, 会对 x_{s_1}, x_{s_2} 进行译码处理, 得到译码符号 x_{r_1}, x_{r_2} 。根据系统的对称性, 系统中的所有节点在一个系统帧的时间内满足以下条件

$$\epsilon \{ k^T |x_s|^2 + t^T |x_r|^2 \} = 2P$$

式中, k 为源节点的功率分配因子, x_r 是中继节点上的译码符号向量且 $x_r = [x_{r_1} + x_{r_2}]^T$, t 为译码符号的功率分配因子且 $t = \tau_1 + \tau_2$ 。因为中继上存在功率约束, 所以必须满足 $\tau_1 + \tau_2 = \tau$ 。而整个系统中的节点也存在功率约束, 则有 $k + \tau = 1$, 即 $k_1 + k_2 + \tau_1 + \tau_2 = 1$ 。在基于发射端已知统计信道信息的情况下, 根据模型的对称性, 则可知 $k_1 = k_2 = \frac{1}{2}k$ 和 $\tau_1 = \tau_2 = \frac{1}{2}\tau$ 。

要得到系统的优化功率分配, 就必须计算出系统的误帧率。再生中继网络的系统误帧率又与中继节点的误帧率相关, 因此首先计算中继节点上的误帧率。设中继节点 r 上的误帧率为 $P_{e,r}$, 平均成对差错概率为 $P_{pep,r}$, 根据文献[13,14]中的空时分组编码原则, $P_{e,r} = 2^{NR} P_{pep,r}$, R 为节点信号传输速率, 设帧长 N 为 2, 则中继节点上接收到的信号为

$$y_r = \sqrt{\frac{k}{2}} \mathbf{X}_s^T \mathbf{g} + v_r$$

式中,

$$\mathbf{X}_s = \begin{pmatrix} x_{s_1} & 0 & 0 \\ 0 & x_{s_2} & x_{s_2} \end{pmatrix}, \mathbf{g} = [h_k g_k g_h]^T$$

根据文献[15,16]中对系统成对差错概率的推导过程,可知 x_s 在中继节点 R 上的成对差错概率为

$$P_{pep,r} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \epsilon_g \{ \exp(-\rho \frac{g^H u_r^H u_r g}{8 \sin^2 \theta}) \} d\theta \quad (10)$$

式中, $U_r = \begin{bmatrix} u_{s_1} & u_{s_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_{s_1} & u_{s_2} \end{bmatrix}$ 。定义 x_{s_k} 能量归一化的译码误差值为 u_{s_k} 并且 u_{s_k} 也是 x_{s_k} 在矩阵 U 中的对应元素,则可得 $u_{s_k} = \sqrt{\frac{k}{2P}} (x_{s_k} - \hat{x}_{s_k})$ 。对于一个随机变量 $z \sim \nu(0, \Sigma_z)$ 和一个厄米特矩阵 H , 存在 $\epsilon[\exp(-z^H H z)] = 1/\det(I + \Sigma_z H)$, 将上述数值代入式(10), 对 g 的平均值求期望得

$$P_{pep,r} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \det(I_2 + \frac{\rho}{8 \sin^2 \theta} U^H U_r)^{-1} d\theta \\ = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 + \frac{\rho |u_{s_1}|^2}{8 \sin^2 \theta} + \frac{\rho |u_{s_2}|^2}{8 \sin^2 \theta})} \quad (11)$$

当 ρ 足够大时,

$$P_{pep,r} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(8 \sin^2 \theta \rho^{-1})}{|u_{s_1}|^2 + |u_{s_2}|^2} d\theta \quad (12)$$

其中,

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \theta d\theta = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

由式(11)、式(12)可得

$$P_{pep,r} = \frac{\rho^{-1}}{|u_{s_1}|^2 + |u_{s_2}|^2} \times \frac{8}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \theta d\theta \\ = \frac{2\rho^{-1}}{|u_{s_1}|^2 + |u_{s_2}|^2} \quad (14)$$

则中继节点的误帧率为

$$P_{e,r} = 2^{2R} \frac{2\rho^{-1}}{|u_{s_1}|^2 + |u_{s_2}|^2} \quad (15)$$

当中继节点译码正确并转发后,则对于目的节点来说可认为有 $x_r = x_s$ 。在目的节点对接收到的系统帧 x_s 进行还原译码时, $\mathbf{X}_s = \begin{bmatrix} x_{s_k} & 0 & 0 \\ 0 & x_{s_k} & x_{s_k} \end{bmatrix}$, 可以看到符号 x_{s_k} 比符号 x_{s_k} 少一阶分集增益,则很容易推断出 x_{s_k} 的译错概率比 x_{s_k} 的译错概率大。因此在 ρ 足够大时,可以用 x_{s_k} 的译错概率代替目的节点 d_k 的系统误帧率,则

$$P_{e,d_k} = 2^{2R} \frac{2\rho^{-1}}{|u_{r_k}|^2} + O(\rho^{-2}) \approx 2^R \frac{2\rho^{-1}}{|u_{r_k}|^2} \quad (16)$$

式中,定义 u_{r_k} 为 x_{s_k} 能量归一化时的译码误差值且 $u_{r_k} = \sqrt{\frac{\tau}{2P}} (x_{s_k} + \hat{x}_{s_k})$ 。系统的平均误帧率可以由目的节点的误帧率 P_{e,d_k} 和中继节点的误帧率 $P_{e,r}$ 共同决定。由于 $\epsilon(|x_{s_k} - \hat{x}_{s_k}|^2) = 4P$, 则信号能量归一化时译码误差值的方差 $\epsilon(|u_{s_k}|^2) = 2k$, $\epsilon(|u_{r_k}|^2) = 2\tau$, 其中 $u = [u_{s_1}, u_{s_2}, u_{r_1}, u_{r_2}]^T$ 。

将上述数值代入式(8), 得系统的平均误帧率为

$$P_e = 2^{2R} \frac{2\rho^{-1}}{4k} + 2 \times 2^R \frac{2\rho^{-1}}{2\tau} = 2^R \rho^{-1} (\frac{2^{R-1}}{k} + \frac{2}{\tau}) \quad (17)$$

要将系统误帧率最小化,只需最小化 $\frac{2^{R-1}}{k} + \frac{2}{\tau}$, 且令其服从 $k + \tau = 1$ 。采用拉格朗日法建立目标函数

$$F(k, \tau) = \frac{2^{R-1}}{k} + \frac{2}{\tau} + \lambda(k + \tau - 1) \quad (18)$$

对 k, τ 求偏导, 并解联立方程得最优解为 $k = \frac{\sqrt{2^{R-2}}}{\sqrt{2^{R-2}} + 1}$,

$\tau = \frac{1}{\sqrt{2^{R-2}} + 1}$ 。由上面一系列推导可知, 当 ρ 足够大时, 选择

中继节点分配因子 $k = \frac{\sqrt{2^{R-2}}}{\sqrt{2^{R-2}} + 1}$, 源节点功率分配因子 $\tau =$

$\frac{1}{\sqrt{2^{R-2}} + 1}$ 时, 系统的功率分配方案为最优化。

4 仿真结果与分析

式(8)给出了采用协作分集传输方案(MDPTS)的再生中继网络中的分集复用增益权衡表达式。为了更加直观地评判这种网络的系统性能, 本文将其与采用传统传输方案(TTS, Traditional Transmission Scheme)的再生中继网络的系统性能进行比较。通过上面传统传输方案的介绍可以了解到, 在 TTS 网络的信号传输过程中, 传输一个长为 $2N$ 的系统帧需要用 $4N$ 个时隙, 从而可以推导出 TTS 系统的最大复用增益将不超过 $\frac{1}{2}$ 。由于在采用 TTS 方案的系统中源节点 s_k 向目的节点 d_k 的信号广播过程没有分集保护, 则亦可以推断出其最大分集增益不超过 1。图 3 为两种传输方案下的分集复用权衡曲线。

其中取 TTS 网络中的系统性能为其理想值最优值, 即复用增益为 $\frac{1}{2}$, 分集增益为 1。

从图 3 中可以看出, 随着复用增益的增加, MDPTS 网络相比 TTS 网络具有更高的分集增益和复用增益, 这也意味着 MDPTS 网络相比传统的非再生中继传输网络具有更高的系统性能。

另一方面, 通过对系统中分集增益和复用增益的定义, 可以知道分集复用权衡也可以从一个侧面反映出系统的信号传输可靠性与网络吞吐量之间的关系。这也意味着, 可以利用这个权衡公式从信号的传输速率与系统的中断概率方面进一步评价系统性能。通过对图 3 中分集增益和复用增益的数值进行递减排序, 得到图 4。

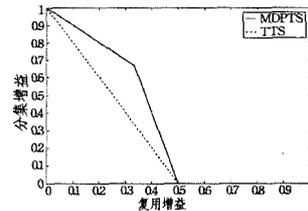


图 3 两种传输方案的复用权衡比曲线图

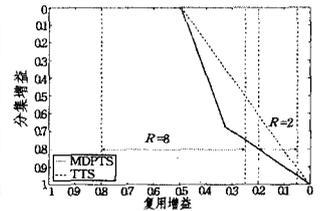


图 4 两种传输方案下基于复用权衡比的系统中断概率曲线图

图 4 即为非再生中继网络采用两种传输方案下信号传输速率与中断概率的大致走势图。其中, 由于仿真环境需要以信噪比足够大作为条件, 因此选择 $\rho \in (30 \sim 90)$ 这个范围。同时, 为了能够更加明显地体现出两种传输方案下系统性能的对比, 选择了 $R=2$ 及 $R=8$ 这 2 种传输速率。通过仿真图可以看到, 采用 MDPTS 的网络在低传输速率和高传输速率的条件下均具有更高的分集增益, 即更高的信号传输稳定性。

这也进一步证明了 MDPTS 网络具有更好的系统性能。

在此基础上,为了对 MDPTS 网络中的系统性能进行进一步的优化,本文以系统的误帧率最小为目标,采用蒙特卡罗方法对系统的功率分配方案进行仿真。在发射端已知统计信道信息的情况下,以信噪比 SNR 在 30dB~90dB 范围内, $R=2,8$ 为仿真条件,得图 5、图 6。

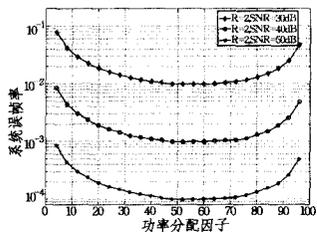


图 5 $R=2$ 时基于发射端已知统计信道信息的系统功率分配

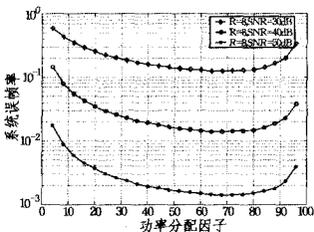


图 6 $R=8$ 时基于发射端已知统计信道信息的系统功率分配

分析图 5、图 6 中横坐标即功率分配因子的百分比 k ,可以看出,当 $R=2,8$ 时,再生中继网络中选择 $k=\frac{1}{2}, k=\frac{2}{3}$ 时系统的功率分配达到最优。这一仿真结果也与本文推导出的系统最优功率分配方案吻合,证明了式(18)中最优解的准确性。

结束语 本文将协作通信技术引入到无线再生中继网络中,设计了一种基于 MDP 协议的信号传输方案 MDPTS,对系统的中断事件进行了定义,进而推导出系统的中断概率与误帧率,并结合系统的传输速率利用分集增益与复用增益的权衡对系统的性能进行了细致的分析。在此基础上提出了在发射端和中继器间的功率分配方案,运用拉格朗日法求得最优解。仿真结果表明,与采用传统传输方案的网络相比,采用 MDPTS 的网络具有更高的分集增益和复用增益,因此具有更高的系统性能。最后,本文采用蒙特卡罗方法对系统的功率分配方案进行了仿真,仿真实验结果也与文中的功率分配方案最优化结果相吻合,证明了文中推导的准确性。

参考文献

- Nabar R U, Kneubuhler F W, Baolskei H. Performance limits of amplify-and-forward based fading relay channels[C]//Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing, Canada, Montreal, May 2004, 4:565-568
- Nabar R U, Baolskei H, Kneubuhler F W. Fading relay channels; Performance limits and space-time signal design[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2004, 22:1099-1109
- Azarian K, El-Gamal H, Schniter P. On the achievable diversity-multiplexing tradeoff in half-duplexing cooperative channels[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2005, 51:4152-4172
- Lee I, Kim D. BER analysis for decode-and-forward relaying in dissimilar Rayleigh fading channels[J]. IEEE Commun. Lett., 2007, 11:52-54
- Beaulieu N C, Hu J. A closed-form expression for the outage probability of decode-and-forward relaying in dissimilar Rayleigh fading channels[J]. IEEE Commun. Lett., 2006, 10:813-815
- Laneman J N, Wornell G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2003, 49:2415-2425
- Laneman N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks; Efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2004, 51:3062-3080
- Nabar R U, Kneubuhler F W, Baolskei H. Performance limits of amplify-and-forward based fading relay channels[C]//Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing, Montreal, QC, Canada, May 2004, 4:565-568
- Nabar R U, Baolskei H, Kneubuhler F W. Fading relay channels; Performance limits and space-time signal design[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2004, 22:1099-1109
- Wang T, Giannakis G B. High-throughput cooperative communications with complex field network coding[C]//Proc. 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2007). Mar 2007, 12:253-258
- Zheng L, Tse D N C. Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2003, 49:1073-1096
- Li Jun, Chen Wen, Zhao Cheng, et al. On the Throughput-Reliability Tradeoff Analysis in Amplify-and-Forward Cooperative Channels[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). Beijing, May 2008, 3:1034-1038
- Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communications: Performance Criterion and Code Construction[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1999, 44:744-765
- Tarokh V, Seshadri N, Calderbank R. Space-time block codes from orthogonal designs[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1999, 45:1456-1467
- Hunter T E, Nosratinia A. Diversity through coded cooperation [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2006, 5:283-289
- Hunter T E, Sanayei S, Nosratinia A. Outage analysis of coded cooperation[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006, 52:375-391
- Jin Z, Anand S, Subbalakshmi K P. Detecting Primary User Emulation Attacks in Dynamic Spectrum Access Networks[C] // IEEE International Conference on Communications (ICC), Dresden, Germany, June 2009
- 薛楠,周贤伟,辛晓,等.一种解决认知无线网络模仿主用户攻击问题的方案[J]. 计算机科学, 2009, 36(8)
- 薛楠,周贤伟,刘涛,等.基于簇的分布式认知无线网络安全体系结构[J]. 电信科学, 2008(11)
- Federal Communication Commission, Notice for Proposed Rule-making (NPRM 03-322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies[S]. No. 03-108. ET Docket, Dec. 2003
- Chen Tao, Zhang Hong-gang, Zhou Xia-fei, et al. CogMesh: A Cluster Based Cognitive Radio Mesh Network[C]//2nd IEEE International Symposium on. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007). 2007, 168-178
- Rappaport T S. Wireless communications: principles and practice [M]. Prentice Hall, 1996
- Seidel S Y, Rappaport T S, Jain S, et al. Path loss, scattering and multipath delay statistics in four European cities for digital cellular and microcellular radiotelephone[J]. IEEE Trans. Vehicular Technology, 1991, 40(4):721-730

(上接第 33 页)

- Jin Z, Anand S, Subbalakshmi K P. Detecting Primary User Emulation Attacks in Dynamic Spectrum Access Networks[C] // IEEE International Conference on Communications (ICC), Dresden, Germany, June 2009
- 薛楠,周贤伟,辛晓,等.一种解决认知无线网络模仿主用户攻击问题的方案[J]. 计算机科学, 2009, 36(8)
- 薛楠,周贤伟,刘涛,等.基于簇的分布式认知无线网络安全体系结构[J]. 电信科学, 2008(11)
- Federal Communication Commission, Notice for Proposed Rule-making (NPRM 03-322): Facilitating Opportunities for Flexible,