

无线传感网物理层协作分集的性能分析

陈贞贞 杨晨阳

(北京航空航天大学电子与信息工程学院 北京 100083)

摘要: 该文针对无线传感网中的远距传输问题, 研究了一种无需网络同步和正交信道的协作分集方法的性能, 给出了在两种典型信道中当解码转发存在误差传播时远程目的节点的误码率及分集指数; 分析了当转发节点间为白高斯信道时增加协作节点数能够提高目的节点性能的条件。研究表明, 当转发节点间为白高斯信道时, 只要转发节点处于正常工作点, 增加节点数就能提高目的节点的性能; 当转发节点间为瑞利平衰落信道时, 只有当转发节点处于一定位置时, 协作分集相对于直接发送或传统空间分集才有性能增益; 当转发节点间为瑞利平衰落信道时增加跳数性能更好, 为白高斯信道时增加分支数更有效; 当转发节点间为瑞利平衰落信道时, 误差传播将使目的节点的分集指数为 1, 但在较低信噪比条件下对分集性能影响很小。

关键词: 无线传感网; 协作分集; 误差传播

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2569-05

Performance Analysis of Cooperative Diversity at PHY Layer in Wireless Sensor Networks

Chen Zhen-zhen Yang Chen-yang

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the performance of cooperative diversity for reach-back problem in wireless sensor networks is studied, in which network synchronization or orthogonal channels are not necessary. The bit error rate and diversity order of destination are respectively developed for two typical channels, considering the error propagation appeared in the decode-and-forward procedure. It's shown by the analysis that the increase of the node's number will improve the performance in destination if relays are at normal working point. To increase hop number is more effective for the scenario of AWGN channel among relays, while it is better to increase the number of branches when the channels among relays are Rayleigh fading. Cooperation diversity outperforms the direct transmission or the traditional spatio diversity if the relays are located in a certain region. Error propagation will reduce the diversity order of destination to 1, whereas almost has no influence on the diversity gain at the medium and low signal-noise-rate.

Key words: Wireless sensor networks; Cooperative diversity; Error propagation

1 引言

无线传感网一般由大量传感器节点组成, 具有数据采集、信号处理及无线通信的能力, 被广泛应用于军事侦察、环境监测、医疗保健和应急救援等领域。无线传感网中的节点往往具有微型、低成本和低功耗等特点, 其中低功耗是无线传感网的首要设计目标。

在无线传感网的典型应用中, 传感器节点被用于感知某区域内的物理参数或现象。当传感器完成采集任务后, 通常要将数据发送给远方的处理中心(如代理或网关)进行信息融合和提取。当采用多跳模式进行中继传输时, 如果选择网络中的某一个节点来完成最后一跳的远距传输任务, 则复杂的节点选择过程将增加通信负载, 导致额外的能量消耗; 此外, 由于需要提高该节点的发射功率来保证传输的可靠性, 将导致其能量迅速

耗尽, 从而降低网络的连接度、缩短网络的生命周期。

上述远距无线传输信号往往不可避免地会经历无线衰落信道。利用多个传感器节点、通过共享天线来进行协作分集^[1]能够有效地对抗信道衰落, 从而大大降低远距通信时的发射功率。

近两年来, 对协作分集方法及其性能的研究已经引起了国内外学术界的广泛关注^[1-6]。对于重复编码协作分集, 文献[4,5]分别给出了放大转发协作分集误符号率、无误差传播时解码转发协作分集误码率的闭式解, 文献[6]针对线型拓扑, 分析了存在误差传播时解码转发多跳分集的性能。为了分析协作分集与传统空间分集的性能差异, 文献[7]针对 1-2 个中继节点的情况, 给出了当协作分集与传统空间分集的中断概率相当时转发节点所需的接收信噪比。

大多数协作分集方法均假定节点同步和正交信道。在由大量分布式节点组成的无线传感网中, 对节点进行网络同步

和分配正交信道是非常困难的。文献[8]将网络中的转发节点视为有源散射体,引入“网络多径”的概念,提出了一种无需同步和正交信道的物理层协作分集的思想,具有鲁棒性强、易于升级等优点。在其基础上,文献[9]提出了一种可实现的通信信令和接收算法,给出了在分布式网络中提高空间分集增益的方法,并在特定的网络拓扑和信道条件下给出了性能的仿真结果。

本文将用理论推导和数值分析结合的方法,研究多种网络因素和信道条件对无线传感网采用物理层协作分集方法的性能的影响。假定感知区域内的传感器已经对其采集的信息进行了融合,要将提取的数据通过多个节点传输给远方的处理中心。本文将在一般的网络拓扑下,导出存在误差传播时文献[9]中解码转发协作分集方法的误码性能,分析其分集指数与转发信道类型的关系,以及增加协作节点数目能够提高通信性能的条件;分析协作转发相对于直接发送或传统发射分集有性能增益时对转发节点位置的要求,及其与分支数和跳数的关系。本文着重考虑总发射功率一定时采用物理层协作分集方法能够获得的性能增益,暂未考虑增加协作节点导致的电路能耗的增加,关于能量有效性的研究可参见文献[10]。

本文的结构安排如下,第 2 节将建立转发协作分集系统的模型,第 3 节给出解码转发中存在误差传播时目的节点的分集指数、误码率及其随节点数增加而减小的条件,第 4 节将通过数值分析来研究节点个数、位置及分布方式对分集性能的影响,第 5 节总结全文。

2 系统模型

考虑图 1 所示的无线传感网,由一个源节点 S , 一个目的节点 D 和若干转发节点组成,转发节点呈网格分布,分为 M 个分支,每个分支上有 L 个节点,即每次转发时有 M 个节点参与,且需要进行 L 次转发。假设 L 个节点在 r 范围内等间隔分布,则相邻两个节点间距为 r/L ;假设 M 个分支间距很近,使得源节点到达离它最近的 M 个节点的接收信噪比近似相等。假设源节点与转发节点到目的节点间的信道为瑞利平衰落信道,其余节点间的信道可以是白高斯或瑞利平衰落信道。下面将“源节点到转发节点的信道及转发节点间的信道”简称为“转发节点间的信道”。

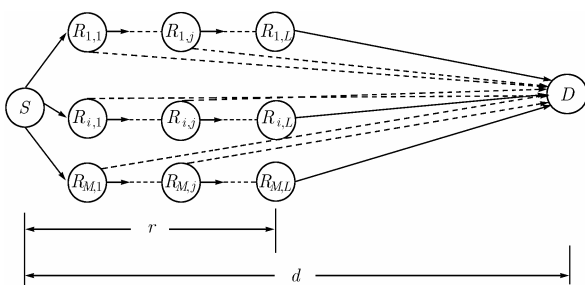


图 1 无线传感网的转发协作分集系统

不失一般地,假设不同节点发送的信号到达某节点的信号均可分辨。假设转发节点由于资源受限而没有分集能力,且转发节点与其接收信号中平均功率最强的一条“网络多径”信号同步,即该节点只处理与之距离最近的上一跳节点发送的信号;而目的节点有较充足的资源,所以能够采用高阶 Rake 接收机搜集能量并实现空间分集。

令 $R_{i,j}(i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, L)$ 表示位于第 i 个分支,第 j 跳的转发节点, $K\{\cdot\}$ 表示某节点处理的接收信号所对应的节点集合。当 $j \geq 2$ 时, $K(R_{i,j}) = \{R_{i,j-1}\}$, 当 $j = 1$ 时, $K(R_{i,j}) = \{S\}$, 即每个分支上第一跳的转发节点只处理源节点 S 发送的信号。目的节点 D 能够处理源节点和所有转发节点发送的信号,即 $K(D) = \{S, R_{1,1}, \dots, R_{M,L}\}$ 。

当转发节点解码结果与向其发送数据节点的发射数据不同时,称该节点“解码错误”;当某节点转发的数据与源节点相同时,称该节点“正确转发”,反之,称之为“错误转发”。令源节点与正确转发的节点集合为 $K_c(D)$, 错误转发的节点集合为 $K_e(D)$, 则有 $K(D) = K_c(D) \cup K_e(D)$ 。

节点 m (代表 $R_{i,j}$ 或者 D) 处理的接收信号为

$$r_{k,m}(t) = (h_{k,m} / \sqrt{d_{k,m}^\alpha}) s_k(t) + n_m(t), \quad k \in K(m) \quad (1)$$

其中 $s_k(t)$ 为来自节点 k 的发射信号, $n_m(t)$ 为节点 m 的白高斯噪声。设所有节点的噪声功率均为 σ_0^2 。 $h_{k,m}$ 、 $d_{k,m}$ 分别为节点 k 和 m 间的信道系数和距离, α 为路径损耗因子。

节点 k 发送的信号到达节点 m 时的瞬时信噪比为

$$\gamma_{k,m} = \frac{|h_{k,m}|^2 \cdot |s_k(t)|^2}{d_{k,m}^\alpha \cdot \sigma_0^2} \quad (2)$$

其中当节点 k 与 m 间的信道为瑞利平衰落信道时,信道系数 $h_{k,m}$ 为复高斯随机变量,设 $E\{|h_{k,m}|^2\} = 1$; 而当其为白高斯信道时, $h_{k,m} = 1$ 。

设总发射功率为 P_0 , 且每个节点的发射功率相同,均为 $P_0 / (ML + 1)$ 。将 $|s_k(t)|^2 = P_0 / (ML + 1)$, $d_{k,m} = r/L$ 代入式(2), 并求其均值, 可得转发节点的平均接收信噪比为

$$\bar{\gamma}_r = \frac{P_0}{\sigma_0^2} \cdot \frac{L^\alpha}{r^\alpha (ML + 1)} \quad (3)$$

3 性能分析

考虑在解码转发协作分集系统中采用 BPSK 调制方式, 则经过瑞利平衰落信道后转发节点解码的误码率为^[11]

$$P_{er}(\bar{\gamma}_r) = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_r}{1 + \bar{\gamma}_r}} \right) \quad (4)$$

当 $\bar{\gamma}_r$ 趋于无穷大时, 上式可近似为

$$\lim_{\bar{\gamma}_r \rightarrow \infty} P_{er}(\bar{\gamma}_r) \approx \frac{1}{4\bar{\gamma}_r} \quad (5)$$

若转发节点间的信道为白高斯信道, 则其误码率为

$$P_{er}(\bar{\gamma}_r) = Q(\sqrt{2\bar{\gamma}_r}) \quad (6)$$

当采用 Rake 接收机、且所有节点均正确转发时, 目的节点的误码率为^[11]

$$P_{eD}(N_e = 0) = \frac{1}{2} \left(\sum_{k \in K(D)} \left[\prod_{j \in K(D), j \neq k} \frac{\bar{\gamma}_{k,D}}{\bar{\gamma}_{k,D} - \bar{\gamma}_{j,D}} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{k,D}}{1 + \bar{\gamma}_{k,D}}} \right) \right] \right) \quad (7)$$

其中 N_e 为错误转发节点的个数, $\bar{\gamma}_{k,D}$ 为节点 k 发送的信号到达目的节点 D 时的平均信噪比。

当 $\bar{\gamma}_{k,D}$ 趋于无穷大时, 上式可近似为

$$\begin{aligned} \lim_{\bar{\gamma}_{k,D} \rightarrow \infty} P_{eD}(N_e = 0) &\approx C_{2ML+1}^{ML+1} \prod_{k \in K(D)} \frac{1}{\bar{\gamma}_{k,D}} \\ &= C_{2ML+1}^{ML+1} \prod_{k \in K(D)} \beta_k \cdot \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_r} \right)^{ML+1} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\beta_k = \left(\frac{r}{L \cdot d_{k,D}} \right)^\alpha$ 为常数, $C_{2ML+1}^{ML+1} = \frac{(2ML+1)!}{(ML+1)!(ML)!}$ 。

当错误转发的节点个数为 $i (1 \leq i \leq L)$ 时, $K_c(D)$ 和 $K_e(D)$ 中分别有 $ML - i + 1$ 个和 i 个节点, 则目的节点经最大比合并后的误码率为

$$P_{eD}(N_e = i) = \int P(\gamma_D) \cdot P_e(\gamma_D) d\gamma_D \quad (9)$$

其中 $\gamma_D = \sum_{i \in K_c(D)} \bar{\gamma}_{i,D} - \sum_{j \in K_e(D)} \bar{\gamma}_{j,D}$ 为目的节点经过 Rake 合并后的瞬时信噪比, $P(\gamma_D)$ 和 $P_e(\gamma_D)$ 为信噪比的概率密度函数及在该信噪比下传输的错误概率。

错误转发可视为一种特殊的多址干扰, 它导致的误码率在 $\bar{\gamma}_{k,D}$ 趋于无穷大时为常数 A_i [12], 即

$$\lim_{\bar{\gamma}_{k,D} \rightarrow \infty} P_{eD}(N_e = i) = A_i \quad (10)$$

在转发节点可能进行正确和错误转发的一般情况下, 目的节点的平均误码率为

$$\bar{P}_{eD} = \sum_{i=0}^{ML} P(N_e = i) \cdot P_{eD}(N_e = i) \quad (11)$$

其中 $P(N_e = i)$ 表示 $N_e = i$ 的概率。

令 P_{er} 表示转发节点解码的误码率, 则所有转发节点均正确转发的概率为 $(1 - P_{er})^{ML}$ 。由于 $P_{er} \ll 1$, 当错误转发的节点个数满足 $1 \leq i \leq L$ 时, 最可能发生的事件为某支路一个节点的解码错误引发该支路后续节点出现误差传播, 而其它支路所有节点均正确转发, 不难推导出该事件发生的概率为 $P(N_e = i) = C_M^i P_{er} (1 - P_{er})^{ML-i}$ 。当错误转发的节点个数大于 L 时, 一定有两个支路以上的节点同时发生解码错误, 这类事件发生的概率 $P(N_e = i)$ 将全部由 P_{er} 的高次幂组成, 它们相对于 P_{er} 为无穷小量, 可以忽略。进一步考虑 $(1 - P_{er})^{ML-i} \approx 1$, 则式(11)可简化为

$$\bar{P}_{eD} = P_{eD}(N_e = 0) + C_M^1 P_{er} \sum_{i=1}^L P_{eD}(N_e = i) \quad (12)$$

当节点的平均接收信噪比 $\bar{\gamma}_r$ 和 $\bar{\gamma}_{k,D}$ 趋于无穷大时, 同时考虑式(10), 则从式(12)可得:

$$\lim_{\bar{\gamma}_r, \bar{\gamma}_{k,D} \rightarrow \infty} \bar{P}_{eD} = \lim_{\bar{\gamma}_{k,D} \rightarrow \infty} P_{eD}(N_e = 0) + C_M^1 \sum_{i=1}^L A_i \cdot \lim_{\bar{\gamma}_r \rightarrow \infty} P_{er} \quad (13)$$

比较式(5)和式(8), 可知当转发节点间的信道为瑞利平衰落信道时, $(1/\bar{\gamma}_r)^{ML+1}$ 为 $1/\bar{\gamma}_r$ 的高阶无穷小量, 可以忽略, 此

时:

$$\lim_{\bar{\gamma}_r, \bar{\gamma}_{k,D} \rightarrow \infty} \bar{P}_{eD} \approx C_M^1 \sum_{i=1}^L A_i \cdot \lim_{\bar{\gamma}_r \rightarrow \infty} P_{er} \propto \frac{1}{\bar{\gamma}_r} \quad (14)$$

即目的节点的分集指数为 1。

当转发节点间的信道为白高斯信道时, $\lim_{\bar{\gamma}_r \rightarrow \infty} Q(\sqrt{2\bar{\gamma}_r})$ 为

$\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_r} \right)^{ML+1}$ 的高阶无穷小量, 此时:

$$\lim_{\bar{\gamma}_r, \bar{\gamma}_{k,D} \rightarrow \infty} \bar{P}_{eD} = \lim_{\bar{\gamma}_{k,D} \rightarrow \infty} P_{eD}(N_e = 0) \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_r} \right)^{ML+1} \quad (15)$$

即目的节点的分集指数为 $ML + 1$ 。

以上分析了存在误差传播时协作分集系统的误码性能, 以及在不同的信道条件下能够达到的分集指数。下面分析增加协作节点数目能够改善目的节点误码性能的条件, 即 \bar{P}_{eD} 是 M 或 L 的减函数的条件。

假设转发节点间的信道为白高斯信道。根据契诺夫界:

$$P_{er} = Q(\sqrt{2\bar{\gamma}_r}) \leq e^{-\bar{\gamma}_r}, \text{ 而 } P_{eD}(N_e = i) \leq 1, \text{ 由式(12)可得: } \bar{P}_{eD} \leq P_{eD}(N_e = 0) + ML \cdot e^{-\bar{\gamma}_r} \quad (16)$$

由于上式右边第 1 项是 M 或 L 的减函数, 故若第 2 项为减函数将使 \bar{P}_{eD} 为其减函数。

令 $f(M, L) = ML \cdot e^{-\bar{\gamma}_r}$, 其中 $\bar{\gamma}_r = \frac{P_0}{\sigma_0^2} \cdot \frac{L^\alpha}{r^\alpha (ML + 1)}$ 。

不难推导, 使 $\frac{\partial f(M, L)}{\partial L} < 0$ 或 $\frac{\partial f(M, L)}{\partial M} < 0$ 的转发平均信噪

比满足 $\bar{\gamma}_r > \frac{ML + 1}{(\alpha - 1)ML + \alpha}$ 或 $\bar{\gamma}_r > \frac{ML + 1}{ML}$, 其中 $\alpha \geq 2$,

因此, 当 $\bar{\gamma}_r > \frac{ML + 1}{ML}$ 时目的节点误码率将随着 M 和 L 的增加而减小。

当转发节点处于正常工作点时, 通常要求 $P_{er} < 10^{-4}$,

由式(6)可得此时 $\bar{\gamma}_r > 8\text{dB} \gg \frac{ML + 1}{ML}$ 。可见, 当转发节点

间的信道为白高斯信道时, 只要转发节点处于正常工作点, 目的节点误码率就将随着 M 和 L 的增加而减小。

4 数值分析

本节采用数值方法分析下列问题: 协作转发相对于直接发送或传统空间分集有性能增益时对节点位置的要求; 达到期望误码率时所需信噪比随节点数目变化的规律; 以及增加跳数和增加分支数哪种方式性能更好。

在数值分析中, 路径损耗因子 α 为 2.5。“比特信噪比”定义为当源节点直接发送至目的节点时目的节点的平均接收信噪比, 相同的“比特信噪比”意味着总发射功率相同。

由式(4)可知, 当比特信噪比为 15dB 时目的节点误码率约为 0.01, 即直接发送无法保证可靠通信, 这是需要分集来对抗信道衰落的典型情况。

图 2 为只有一个转发节点参与协作分集时, 目的节点的归一化误码率随着 r/d 的变化趋势。其中, “AWGN”或

“Fading”指转发节点间的信道为白高斯或瑞利平衰落信道，“归一化 1”表示用直接发送误码率进行归一化，“归一化 2”表示用 2 天线发射分集的性能进行归一化，归一化值小于 1 表示协作分集的性能优于直接发送或 2 天线发射分集。

图 2 表明，若转发节点间为瑞利平衰落信道，则当 $r/d < 0.75$ 时，协作分集性能优于直接发送；当 $r/d < 0.25$ 时，协作分集性能优于 2 天线发射分集。这是因为转发节点比源节点离目的节点更近，在提供分集增益的同时还减少了路径损耗，故当错误转发的负面影响小于减少路径损耗的正面影响时，协作分集的性能优于 2 天线发射分集；当错误转发对目的节点误码率的负面影响大于分集和减少路径损耗的正面影响时，协作分集性能比直接发送还差。当转发节点间为白高斯信道时，错误转发的负面影响非常小，对于所有的 r/d ，协作分集的性能总是优于直接发送和 2 天线发射分集的性能。

令当采用协作分集时目的节点的误码率与采用直接发送或多天线发射分集时的误码率相等时，所对应的 r/d 分别为临界位置 r/d_1 或 r/d_2 。当 r/d 小于临界位置时，采用协作分集时的误码性能优于直接发送或多天线发射分集。

图 3 为当转发节点间为瑞利平衰落信道、比特信噪比为 15dB 时， r/d_1 和 r/d_2 随着节点跳数 L ，分支数 M 的变化趋势。从图中可以看到，当 $M = 1$ 且 $L \geq 3$ 时，对于所有的 r/d ，协作分集相对于直接发送总有性能增益，而相对于多天线发射分集有性能增益的临界条件 r/d_2 小于 0.1；当 $L = 1$ 且 $M \geq 7$ 时，协作分集相对于直接发送总有性能增益；当 $M = 2, 3$ 时， r/d_1 最小；当 $L = 1$ 且 $M \geq 2$ 时，相对于多天线发射分集有性能增益的临界条件 r/d_2 小于 0.1。

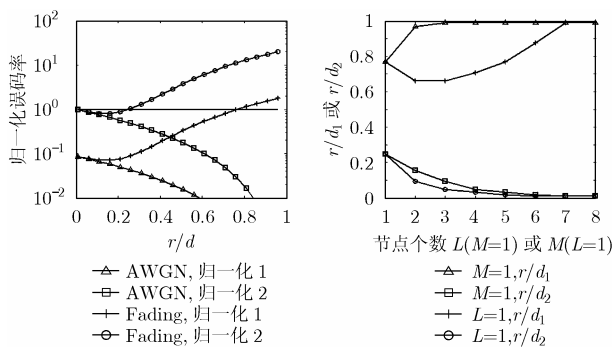


图 2 目的节点的归一化误码率

图 3 临界位置 r/d_1 和 r/d_2 与节点跳数 L 或分支数 M 的关系

图 4 为当转发节点间的信道为瑞利平衰落信道或白高斯信道时，目的节点误码率达到 10^{-5} 所需的比特信噪比随节点数目的变化趋势，其中 $r/d = 0.1$ 。图 4 表明，随节点数目 L 、 M 的增加，所需比特信噪比减小，即所需总发射功率降低。当转发节点间为瑞利平衰落信道时，对于相同的节点个数， $M = 1$ 比 $L = 1$ 所需比特信噪比更低，即增加跳数时目的节

点的能量有效性较好；而当转发节点间为白高斯信道时，增加分支数时目的节点性能更好。

图 5 为当转发节点间的信道为瑞利平衰落信道时， $M = 1$ 且 $L = 4$ ， $M = 2$ 且 $L = 2$ 以及 $M = 4$ 且 $L = 1$ 这 3 种情况下，目的节点误码率随比特信噪比的变化曲线。图中实线为转发节点存在解码误差和误差传播的情况，虚线为不存在解码误差的情况。由图 5 可以看出，在瑞利平衰落信道下，当不存在解码误差时，以上 3 种情况的分集指数均为 5，即此时的分集指数由转发节点的数目决定，为 $ML + 1$ 。转发节点的解码误差和误差传播所导致的错误转发大大减小了协作分集的分集指数，使其始终为 1，这与前人从瓶颈链路的角度分析解码转发分集指数的结论是一致的。从图 5 中还可以观察到一个新的现象，在信噪比较低时，即使存在错误转发，协作转发仍有分集增益。对于能量有限的无线传感网，特别是针对本文研究的通常工作在较低信噪比条件下的远距离传输问题，这个结论尤其具有实际意义。

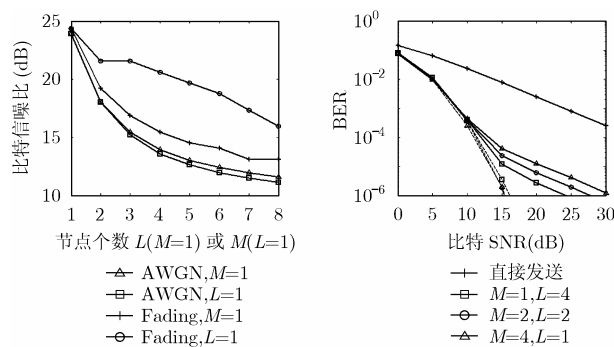


图 4 比特信噪比与节点数的关系

图 5 目的节点的误码率与比特信噪比的关系

5 结束语

本文针对无线传感网，研究了无需网络同步和正交信道的物理层协作分集方法的性能，给出了解码转发中存在误差传播时目的节点误码率的表达式，研究了不同转发信道条件下的分集指数，以及在转发信道为白高斯信道时增加协作转发节点数能够提高分集性能的条件。

研究结果表明，当转发节点间为瑞利平衰落信道时，误差传播将大大减小目的节点的分集指数，使之与协作节点数目无关而始终为 1，但是在较低信噪比条件下误差传播对分集性能影响很小，协作转发仍能提供很大的分集增益。当转发节点间为白高斯信道时，只要转发节点处于正常工作点，增加节点数目总能提高目的节点的误码性能；当转发节点间为瑞利平衰落信道时，只有当转发节点处于一定的相对位置时，协作转发才相对于直接发送或多天线发射分集有性能增益。达到期望误码率时所需的总发射功率随节点数目的增加而迅速减少；当转发节点间的信道为瑞利平衰落信道时，增加跳数时性能较好，而白高斯信道下，增加分支数更有效。

参 考 文 献

- [1] Laneman J N. Cooperative diversity in wireless networks: algorithms and architectures. [Ph.D. Thesis], Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, Aug. 2002.
- [2] Laneman J N, Tse D, and Wornell G. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2003, 49(10): 2415–2425.
- [3] Hunter T and Nosratinia A. Outage analysis of coded cooperation. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2006, 52(2): 375–391.
- [4] Ribeiro A, Cai X, and Giannakis G. Symbol error probabilities for general cooperative links. *IEEE Trans. on Commun.*, 2005, 4(3): 1264–1273.
- [5] Sadek A K, Su W, and Liu K R. Performance analysis for multi-node decode-and-forward relaying in cooperative wireless networks. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Philadelphia, 18–23 March 2005, vol.3: 521–524.
- [6] Boyer J, Falconer D D, and Yanikomeroglu H. Multihop diversity in wireless relaying channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 2004, 52(10): 1820–1830.
- [7] Mitran P, Ochiari H, and Tarokh V. Space-time diversity enhancements using collaborative Communications. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2005, 51(6): 2041–2057.
- [8] Scaglione A and Hong Y W. Opportunistic large arrays: Cooperative transmission in wireless multihop Ad hoc networks to reach far distances. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 2003, 51(8): 2082–2092.
- [9] 陈贞贞, 杨晨阳. 一种在物理层实现协作分集的无线传感器网络. *信号处理*, 2005, 21(4A): 440–443.
- [10] Chen Z Z and Yang C Y. Energy Efficiency of Cooperative Diversity at PHY Layer in wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Signal Processing*, Guilin, 16–19 Nov. 2006, accepted.
- [11] Proakis J 著, 张力军, 张宗橙, 郑宝玉等译, 数字通信. 第四版, 电子工业出版社, 2003, 第14章.
- [12] Rappaport T S 著, 蔡涛, 李旭, 杜振民译, 无线通信原理与应用. 电子工业出版社, 1999: 423.
- 陈贞贞: 女, 1981年生, 博士生, 目前从事无线传感网和协作分集技术的研究.
- 杨晨阳: 女, 1965年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超宽带无线通信、无线传感网和 MIMO-OFDM 等无线通信中的信号处理技术.