

## 用于无线传感网的协作分集跨层设计方法

陈永锐<sup>1</sup>, 杨扬<sup>1</sup>, 易卫东<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院研究生院 信息科学与工程学院, 北京 100049; 2. 中国科学院研究生院 地球动力学实验室, 北京 100049)

**摘 要:** 研究了多跳无线传感器网络中如何在保证端到端成功传输率的 QoS 条件下最小化能量消耗的问题。提出了一种新的分布式的基于机会中继的协作分集跨层设计算法, 对路由、中继选择和功率分配算法进行了联合优化。结果表明, 在相同 QoS 条件下, 采用跨层设计的协作分集算法具有更高的能量效率。进一步研究了几个参数对于协作分集的性能影响, 对于如何在多跳无线传感网中应用协作分集具有指导作用。

**关键词:** 通信技术; 协作分集; 跨层设计; 机会中继

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)9A-0009-07

## Cross-layer strategy for cooperative diversity in wireless sensor networks

CHEN Yong-rui<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, YI Wei-dong<sup>1,2</sup>

(1. Information Science and Engineering Institute, Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

2. Computational Geodynamics Laboratory, Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The problem of how to minimize the energy consumption in multi-hop wireless sensor network under the constraint of end-to-end reliability QoS requirement was investigated. Based on the investigation, jointly considering the routing, relay selection and power allocation algorithm, a novel distributed cross-layer strategy for cooperative communication based on opportunistic relaying was presented. The results show that under the same QoS requirement, the proposed cross-layer strategy performs better in energy efficiency. The impact of several parameters on the energy efficiency of the cooperative communication in wireless sensor networks was investigated, thus could be used to provide guidelines to decide when and how to apply cooperation for a given setup.

**Key words:** communication techniques; cooperative diversity; cross-layer design; opportunistic relaying

### 1 引言

在无线传感器网络中, 最大限度地降低能量消耗并提供可靠的数据传输, 是设计者需要考虑的最重要的设计目标<sup>[1]</sup>。无线信道具有的多径衰落特性是影响无线传感器网络可靠传输和阻碍服务质量改善的主要原因之一。分集技术可以通过在发射端发射多个信号样本, 在接收端合并多个经历独立衰

落的信号样本以对抗无线信道中的衰落。常见的分集方式主要有时间分集、频率分集和空间分集。其中空间分集技术由于不额外占用时间和带宽资源, 并且可与其他分集方式相结合, 因而更具吸引力。协作分集技术作为一种对抗多径衰落的方法, 通过使得具有单天线的多个传感器节点共享彼此的天线以形成一个虚拟的多天线结构, 实现空间分集<sup>[2]</sup>。与传统的多天线输入输出 (MIMO) 结构相比, 协

收稿日期: 2010-08-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2009AA12Z14)

**Foundation Item:** The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2009AA12Z14)

作分集能够克服无线传感器网络对节点体积、质量和功耗的要求,因而更适用于对服务质量有一定要求的无线传感器网络<sup>[3]</sup>。

早期的协作分集研究主要集中在如何提高链路质量和信道容量上。文献[2,4,5]等提出了放大中继、解码中继和编码中继等多种协作分集传输方案并分析了各自的分集增益和复用增益。针对多中继场景,文献[6]和文献[7]分别提出了采用空时编码和机会中继方法提高带宽效率的方法。文献[6]证明机会中继机制能实现最优的分集增益以及与空时编码方案相同的带宽效率。文献[8]研究了多中继场景下分组丢失率(PER)的问题。

由于协作分集需要多个节点联合进行通信,因此物理层的协作分集与上层协议间的跨层交互问题成为近期研究的热点。文献[9]提出了一种通过MAC层的RTS/CTS交互机制,将功率分配和机会中继选择进行联合优化的算法。文献[10]将协作分集与资源调度机制进行了综合考虑。文献[11]则研究了在协作分集条件下的最优路由问题。文献[12]把路由与功率控制结合起来进行优化,提出了2种吞吐量受限条件下的最小能耗路由算法。文献[13]和文献[14]针对簇形无线传感器网络分别对协作分集传输的吞吐量和时延进行了优化。

然而,针对多跳无线传感网络和衰落信道下的协作分集跨层设计还没有得到很好的研究。在多跳无线传感网络中,最重要的优化目标应该是节点的能量消耗,最重要的约束条件应当是端到端的传输可靠性。另外,考虑无线传感器节点的一些特殊要求,应尽量采用分布式的简单的算法。文献[15]所提出的迭代算法,需要在多个节点之间反复交互大量的信息才能达到收敛,因此对于无线传感器网络来说不太适合。更重要的一点是,以往的这些跨层优化算法在对能耗进行优化时,都没有考虑节点的接收能耗和处理能耗。而在传感器网络中,接收能耗和处理能耗可能占到总能耗的很大一部分。如果将这些能耗考虑在内,协作通信方式与直接传输模式相比,能耗不一定更低。本文将这2部分功率考虑在内,采用一种更准确的能耗模型<sup>[16]</sup>来进行跨层优化。本文的贡献主要在于:

1) 针对协作通信的网络提出了一种跨层设计方法,将路由、中继选择及功率分配进行联合优化;

2) 与文献[12]等不同的是,本文针对端到端的可靠性指标的约束,对节点的能耗进行了优化;

3) 与文献[15]等不同的是,本文适用于时变的信道,并且复杂度较低,可以分布式应用,适合于无线传感器网络;

4) 本文考虑了节点的接收功率和处理功率,采用一种更准确的能耗模型<sup>[16]</sup>来进行跨层优化。

## 2 系统模型

### 2.1 优化目标

给定一个多跳无线传感器网络。网络中的节点采集数据并多跳传输给汇聚节点。每个节点有一根全向天线,而且能调整传输功率。假定网络中采用基于TDMA的MAC协议,每个节点在各自分配的时隙中发送和接收数据分组,其余时间则进入休眠状态。不同链路间的干扰可以忽略不计。又假定信道为准静态瑞利平衰落信道,噪声为高斯白噪声。也就是说,信道参数在单个时隙中没有变化,在不同时隙间随机变化。

用一个图 $G(\mathbf{V}, \mathbf{E})$ 来描述整个网络。其中, $\mathbf{V}$ 表示节点集合, $\mathbf{E}$ 表示链路集合。节点数目为 $|\mathbf{V}|=N$ ,链路数目为 $|\mathbf{E}|=M$ 。对于给定的源节点、目的节点对 $(s, d)$ ,设 $\Omega$ 为 $s$ 到 $d$ 的所有路由集合。对于其中某一条路由 $\omega$ ,设 $P_{si}$ 为 $\omega$ 的第 $i$ 跳链路发送节点的传输功率。 $P_{tot}$ 为 $\omega$ 上所有节点的总功耗, $P_{end}$ 为 $\omega$ 的端到端的分组丢失率。由于是对路由、中继选择和功率控制进行联合优化,因此优化目标是

$$\min_{\omega \in \Omega, P_{si}} P_{tot} \quad \text{s.t.} P_{end} \leq 1 - Q_s \quad (1)$$

其中, $Q_s$ 是需要满足的端到端数据分组成功传输率,也就是给定的QoS参数。

### 2.2 机会中继协作传输方式

现在来说明采用机会中继进行协作分集的机制。与直接传输方式不同的是,协作分集路由的每一跳都是一个协作分集单元。协作分集单元由发送节点 $x$ ,接收节点 $y$ 以及 $m$ 个固定中继节点 $R_1, R_2, \dots, R_m$ 组成,如图1所示。这 $m$ 个中继节点中,只有一个节点实际担任中继转发的任务。这个节点是每次 $x$ 发送数据分组时,根据中继节点到 $x$ 和 $y$ 的链路状况选出来的。具体过程如下。当发送节点 $x$ 要传输一个数据分组给接收节点的时候,它首先广播一个RTS控制包。中继节点 $R_1, R_2, \dots, R_m$ ,以及接收节点 $y$ 收到RTS之后,首先通过RTS的信噪比获得本节点与发送节点间的当前的信道状态信息(CSI)。随后 $y$ 回应一个CTS,所有中继节

点接收 CTS 后同样获得当前的本节点与接收节点间的信道状态信息。之后，每个中继节点设置一个定时器并进入载波监听状态，定时器的时长  $T_r$  与节点所获得的 2 个 CSI 的最大值成反比（具体  $T_r$  的设置可参考文献[8]）。当定时器触发时，此中继节点广播一个 CONFIRM 信号，使得其余中继节点进入休眠状态直到下一个时隙。这样，拥有最大 CSI 的中继节点（设为  $R_i$ ）将获得在当前时隙转发数据分组的机会。发送节点和接收节点通过 CONFIRM 可以获知中继节点的节点号以及该节点到发送节点和接收节点的信道状态信息。

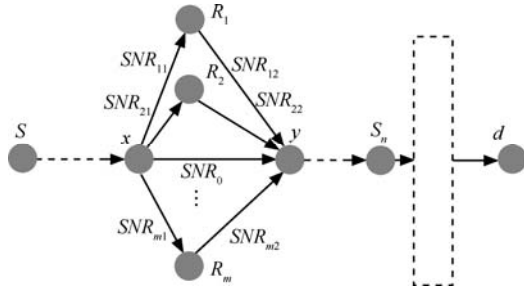


图1 机会中继协作路由

中继节点选定之后，发送节点  $x$  开始传输数据分组。如果接收节点  $y$  正确的解码了数据分组，它将发送一个 ACK 给发送节点和中继节点，发送节点将接着传输后面的数据分组。否则它会发送一个 NACK。中继节点接收到 NACK 之后，如果它能正确解码收到的数据分组，那么它将会在接下来的这个时隙发送数据分组给接收节点。这种只有在需要的时候才发送信号副本的中继方法称为增量中继。文献[3]已经证明，在单中继情形下，增量中继具有最优的分集增益和带宽效率。在接收节点这端，一般的说，最大合并比接收 (MRC) 可以获得最优的效果。但是，这需要接收节点存储接收数据的模拟信号，需要很大的内存空间，对于无线传感器网络节点是不合适的。因此，假定接收节点要么从第一个时隙接收数据分组，要么从中继节点接收数据分组，而不是把这 2 路信号合并起来。同样假定中继节点的发射功率与发射节点相同。因为文献[16]的结果表明，中继节点与发射节点分配相同功率产生的效果与最优功率分配很相近，同时也减少了在每一跳发送节点和中继节点间进行功率分配带来的算法上的复杂性。

采用机会中继的协作分集机制，可以保证每一次发送数据分组时，都是由 CSI 最大的节点作为中

继。文献[4]已经证明，机会中继机制能实现最优的分集增益 ( $m$ ) 以及与空时编码方案相同的带宽效率。同时每次传输只用一个中继节点进行转发，相比普通的多中继方案大大节省了能耗和带宽，也避免了采用空时编码带来的实施上的复杂性以及高要求的同步性。代价是需要 RTS、CTS 等控制信息的开销，以及定时器产生的时延。

### 3 跨层优化

如图 1 所示。首先考虑一条链路  $(x, y)$ 。设  $N_0$  为单边噪声功率谱密度， $h$  为瑞利信道的衰落系数。也就是说， $h$  为均值为 0，方差为 1 的复高斯随机变量。用  $P_s$ 、 $P_r$  和  $P_c$  分别表示发送节点  $x$  的发射功率、接收节点  $y$  的接收功率和处理功耗。于是，接收节点  $y$  的信噪比为  $SNR_0 = \frac{GP_s d^{-\alpha} |h|^2}{N_0}$ 。其中， $d$

为  $x$  与  $y$  的有效距离， $\alpha$  是路径损耗指数， $G$  是一个加权因子，代表了节点天线增益、功放损耗等一些实际因素的影响。假定接收机有一个接收门限  $\beta$ ，当接收机的信噪比大于或等于  $\beta$  时，接收机能准确地解码收到的数据分组。否则数据分组将无法被解码。因此，如果直接传输，链路  $(x, y)$  的分组丢失率为

$$P_c = \Pr\left(\frac{GP_s d^{-\alpha} |h|^2}{N_0} \leq \beta\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\beta N_0 d^\alpha}{GP_s}\right) \quad (2)$$

考虑一个机会中继协作分集的通信单元。设链路  $(x, R_i)$  和  $(R_i, y)$  的信噪比分别为  $SNR_{i1}$  和  $SNR_{i2}$ ，由于每次传输选择的都是 CSI 最大的节点作为中继，因此只有当直接传输链路和所有中继链路都失效的时候，数据分组的传输才会失效。此时分组丢失率为

$$\begin{aligned} P_e &= \Pr(SNR_0 \leq \beta) \prod_{i=1}^m \Pr(SNR_{i1} \leq \beta \text{ or } SNR_{i2} \leq \beta) \\ &= \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta N_0 d^\alpha}{GP_s}\right)\right] \\ &\quad \prod_{i=1}^m \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta N_0 d_{i1}^\alpha}{GP_s}\right) \exp\left(-\frac{\beta N_0 d_{i2}^\alpha}{GP_s}\right)\right] \end{aligned}$$

容易证明，当  $x_i \ll 1$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 时，有

$$\prod_{i=1}^n (1 - \exp(-x_i)) \simeq 1 - \exp\left(-\prod_{i=1}^n x_i\right)$$

因此,

$$P_c \simeq 1 - \exp\left(-\frac{\beta^{m+1} N_0^{m+1}}{G^{m+1} P_s^{m+1}} d_0^\alpha \prod_{i=1}^m (d_{i1}^\alpha + d_{i2}^\alpha)\right) \quad (3)$$

中继节点需要传输的概率是

$$P_{\text{relay}} = \Pr(\text{SNR}_0 \leq \beta) \left[1 - \prod_{i=1}^m \Pr(\text{SNR}_{i1} \leq \beta)\right] \\ \simeq \frac{\beta N_0 d_0^\alpha}{G P_s} \left(1 - \prod_{i=1}^m \frac{\beta N_0 d_{i1}^\alpha}{G P_s}\right) \quad (4)$$

当  $m=0$  时, 对应的是直接传输模式,  $P_{\text{relay}} = 0$ 。

因此  $P_{\text{relay}} = \frac{\beta N_0 d_0^\alpha}{G P_s} \left(1 - \prod_{i=1}^m \frac{\beta N_0 d_{i1}^\alpha}{G P_s}\right) (1 - \delta(m))$ 。

现在考察一条从源节点  $s$  到目的节点  $d$  的路由, 每一跳都是一个  $m$  中继的协作分集单元。于是, 端到端分组丢失率可以表示为

$$P_{\text{end}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{ei}) \\ = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \frac{\beta^{m+1} N_0^{m+1}}{G^{m+1} P_{si}^{m+1}} d_{i0}^\alpha \prod_{j=1}^m (d_{ij,1}^\alpha + d_{ij,2}^\alpha)\right) \quad (5)$$

其中,  $P_{ei}$  表示第  $i$  跳的分组丢失率,  $P_{si}$  表示第  $i$  跳发送节点和中继节点的发射功率。  $d_{i0}$  表示第  $i$  跳发送节点与接收节点的距离,  $d_{ij,1}$  和  $d_{ij,2}$  分别表示第  $i$  跳中第  $j$  个中继节点与发送节点和接收节点的距离。路由上所有节点的总功耗的期望为

$$E[P_{\text{tot}}] = \sum_{i=1}^n P_{si} + \sum_{i=1}^n P_{\text{relay},i} P_{si} + 2n(P_r + P_c) + nP_o \\ \simeq \sum_{i=1}^n P_{si} + \sum_{i=1}^n \frac{\beta N_0 d_0^\alpha}{G} + 2n(P_r + P_c) + nP_o \quad (6)$$

其中,  $P_r$  和  $P_c$  分别代表节点的接收功率和处理功率,  $P_o$  代表进行中继选择所消耗能量的开销。当  $m=0$  或  $1$  时, 不需要进行中继选择, 因而  $P_o = 0$ 。

当  $m>1$  时,

$$P_o = [(E_{s\_RTS} + E_{s\_CTS} + E_{s\_CONF}) + \\ (m+1)(E_{r\_RTS} + E_{r\_CTS} + E_{r\_CONF}) + E_{\text{delay}}] / T \quad (7)$$

式 (7) 中,  $E_{s\_RTS}$ 、 $E_{s\_CTS}$  和  $E_{s\_CONF}$  分别代表发送 RTS、CTS、CONFIRM 信号所需的能量,  $E_{r\_RTS}$ 、 $E_{r\_CTS}$  和  $E_{r\_CONF}$  分别代表接收 RTS、CTS、CONFIRM 信号所需的能量,  $E_{\text{delay}}$  代表延时期消耗的能量,  $T$  代表一个时隙的时间。

对于式 (1) 给出的优化目标, 可以使用拉普拉斯方法对它进行优化 (过程略)。得到每一跳的发射功率和总功耗分别为

$$P_{si} = A \left(\sum_{i=1}^n x_i^{m+2}\right)^{\frac{1}{m+1}} x_i^{\frac{1}{m+2}} \quad (8)$$

$$E[P_{\text{tot}}] = A \left(\sum_{i=1}^n x_i^{m+2}\right)^{\frac{m+2}{m+1}} + B \sum_{i=1}^n y_i + nK \quad (9)$$

其中,  $A = \frac{\beta N_0}{G} (\ln Q_s^{-1})^{-\frac{1}{m+1}}$ ,  $x_i = d_{i0}^\alpha \prod_{j=1}^m (d_{ij,1}^\alpha + d_{ij,2}^\alpha)$ ,

$$B = \frac{\beta N_0}{G} (1 - \delta(m)), \quad y_i = d_{i0}^\alpha。$$

当  $m=0$  时, 对应直接传输模式,  $K = P_r + P_c$ ; 当  $m=1$  时, 对应单中继传输模式,  $K = 2(P_r + P_c)$ ; 当  $m>1$  时, 对应多中继模式,  $K = 2(P_r + P_c) + P_o$ 。

#### 4 路由、中继选择和功率控制算法

为找到最小功耗路由, 对于给定路由  $\omega$ , 它的路由代价即为总功耗:

$$\text{Cost}(\omega) = A \left(\sum_{i=1}^n x_i^{m+2}\right)^{\frac{m+2}{m+1}} + B \sum_{i=1}^n y_i + nK \quad (10)$$

考虑到在第  $i$  跳中, 中继节点的位置只影响  $x_i$ , 因此为了让路由代价最小, 应选择使  $x_i$  最小的  $m$  个节点作为中继。因此中继选择方法如下:

假定发送节点和接收节点分别为  $x, y$ ,  $N_{x,y}$  是  $x$  和  $y$  的邻居节点集合。则  $\forall z \in N_{x,y}$ , 设  $V_z = d_{xz}^\alpha + d_{zy}^\alpha$ , 对  $V_z$  进行排序。选择最小的  $m$  个  $V_z$ , 它们所对应的节点即为中继节点  $R_1, R_2, \dots, R_m$ 。

为找到最低代价路由, 同样提出一种类似于 Bellman-Ford 算法的启发式算法。算法如下:

- 1) 每个节点  $x$  都对它的每一条链路选择  $m$  个中继 ( $m=0$  时跳过这一步);
- 2) 每个节点  $x$  计算它的每一条链路的链路代价:

$$LC_1(x, y) = d_{xy}^{\frac{a}{m+2}} \prod_{j=1}^m (d_{xR_j}^\alpha + d_{R_j y}^\alpha)^{\frac{a}{m+2}}$$

$$LC_2(x, y) = d_{xy}^a + \frac{K}{B}$$

节点间的距离信息可以通过测量 HELLO 信息的平均信噪比来计算;

- 3) 每个节点  $x$  通过广播方式与邻居节点交互

并更新到 *sink* 节点的路由代价直到收敛：

$$RC(x) = \min_{y \in N(x)} \{ A[RC_1(y) + LC(x, y)]^{\frac{m+2}{m+1}} + B[RC_2(y) + LC_2(x, y)] \}$$

$$RC_1(x) = RC_1(y) + LC(x, y)$$

$$RC_2(x) = RC_2(y) + LC_2(x, y)$$

其中， $N(x)$ 表示  $x$  的邻居节点集合；

4) 收敛后，节点  $x$  选择上式的节点  $y$  作为它到 *sink* 的路由的上一跳节点（父节点），所有节点选择好父节点后，网络中树形路由图就形成了；

5) 对于一条指定的路由和一个指定的 QoS，路由上每一个节点的发射功率都可以由式（8）确定。

不难看出，作为一种分布式算法，这种算法找到的是一条次最优路径。但实验表明，当  $\alpha \geq 2$  时，在网络的所有节点中，96%以上的次最优路径与最优路径是相同的。表 1 给出了  $100m \times 100m$  的场景中，在不同的节点数和不同的衰减因子条件下，最优路径与次最优路径的吻合概率的比较。

表 1 最优路径与次最优路径的吻合概率比较

$N$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\alpha = 4$
80	96.2%	99.7%	99.976%
50	96.7%	99.8%	99.989%
20	97.8%	99.9%	99.995%

## 5 性能评估

### 1) 不同参数的比较

仿真场景是  $N$  个传感器节点随机分布在  $(M \times M)m^2$  的方形区域，其中，源节点和目的节点分别位于方形区域的左上角和右下角。默认参数如下： $N=100$ ， $M=700$ ， $N_0 = -70dBm$ ， $G = 0.1$ ， $\beta = 10$ ， $\alpha = 2$ ， $P_t = 1mW$ ， $P_c = 1mW$ ， $P_o \approx 0.1(m+2)P_c$ ， $Q_s = 0.99$ 。本文考察的是采用直接传输和协作分集传输时路径节点总功耗的大小。协作增益为当数据传输达到同样的 QoS 时，直接传输和协作分集传输所需功耗的比率。由于路径损耗的存在，链路节点彼此间的距离起着很重要的作用。因此定义一个参数：平均节点间距离  $\bar{d} = \frac{M}{\sqrt{N}}$ 。显然，当网络是均匀分布时， $\bar{d}$  与相邻节点间距离是相等的。另外定义阈值距离  $\bar{d}_0$  为协作增益等于 1 时的平均节点间距离。

首先，考察改变接收功率  $P_r$  对性能的影响。图 2 给出了直接传输和单中继协作分集传输所需功耗在给定不同接收功率情况下与平均链路距离的关系。当  $P_r=10mW$  且平均节点间距离小于 25m 时，结果显示直接传输比协作分集传输更有效。这表明，当节点相距较近时，所需的传输能耗较小，因而接收和处理的能耗开销超过了采用协作分集带来的传输能耗的节省。当平均节点间距离大于 25m 时，协作分集开始变得更有效，因为随着节点间距离的增加，传输能耗开始在总能耗中占更大的比重。协作分集增益开始上升直到传输能耗占总能耗的绝大部分时达到饱和。当  $P_r=5mW$  时，阈值距离下降为 15m，而当  $P_r=1mW$  时，它下降为 10m。原因在于当接受能耗下降时，传输能耗在总能耗中占的比重更大，于是能够在相同 QoS 条件下需要更少传输能耗的协作分集模式变得更有能量效率。同样也可以看到，协作分集所需能耗对  $P_r$  的变化更敏感。这里有 2 个原因。一方面，在协作分集中，由于中继节点也需要接收数据分组，因此需要更多的接收能耗。另一方面，在协作分集中，由于实现了空间分集，所需要的传输能耗更少。因此在协作分集中，接收和处理能耗在总能耗中所占的比重更大。于是  $P_r$  的变化对协作通信的能量效率影响更大。

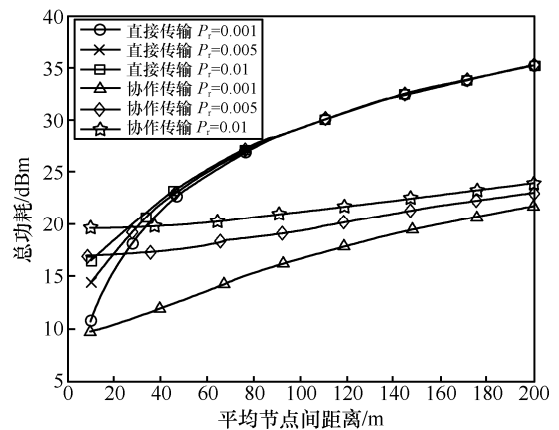


图 2 不同接收功率下直接传输与协作传输比较

在图 3 中，考察了 SNR 阈值  $\beta$  和加权因子  $G$ （包括天线增益和功放损耗）对协作分集性能的影响。在这里，平均节点间距离固定为 100m。从图中可以看出，协作增益随着  $\beta$  的增加而增加。这是由于 SNR 阈值越大，所需的传输能耗越大，协作分集带来的能量节省越多。直到传输能耗占总能耗绝大部分时，协作增益达到饱和。同样从图上可以看

出, 当其他参数一定时,  $G$  越小则协作增益越小, 这是由于天线增益越大, 为达到同样的信噪比所需传输功率越小, 因而协作增益也越小。

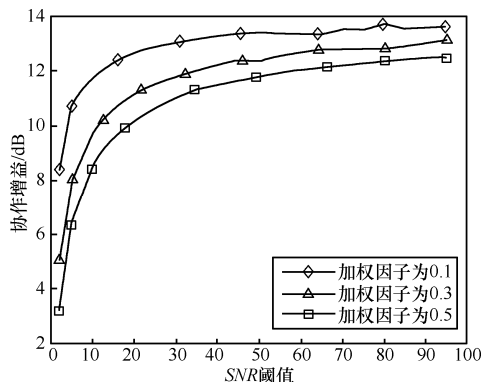


图 3 不同 SNR 阈值和加权因子对协作增益的影响

接下来考察 QoS 要求  $Q_s$  和中继数目对协作分集性能的影响。如图 4 所示, 当 QoS 要求变得更高时, 总功耗也将增加, 同时阈值距离将会减少。这是由于当  $Q_s$  很高时, 更多的能量将消耗在传输上, 因此协作通信将变得更加有效。同样从图上也能看出, 直接传输的能耗性能对  $Q_s$  的变化更加敏感。原因在于, 在直接传输模式中, 传输能耗在总能耗中占更大的比重, 因此  $Q_s$  的改变将对总能耗产生更大的影响。

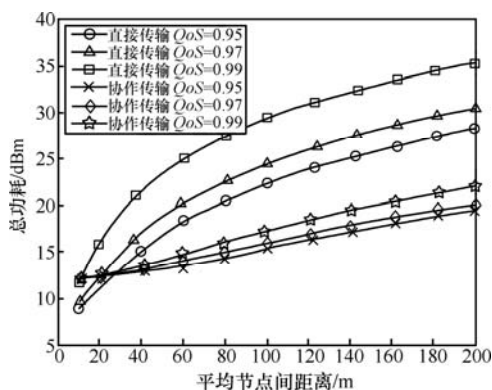


图 4 不同 QoS 指标下直接传输与协作传输比较

图 5 进一步描述了在不同中继数目条件下协作分集的性能。仿真时平均节点距离为 100m, 中继的数目分别设为  $N = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ , 其中,  $N = 0$  表示直接传输,  $N = 1$  表示单中继协作分集。结果表明, 对于 QoS 要求不是很高的场合, 单中继方案在能耗上更加有效。而当  $Q_s$  所表示 QoS 参数增加时, 最优中继数目将会相应增大。这表明, 由于机会中继机制存在一定的开销, 因此只有当 QoS 要求比较大时才能起到作用。因此, 本文的分析也可以作为在给定场景下确定最优中继数目的一个参考。

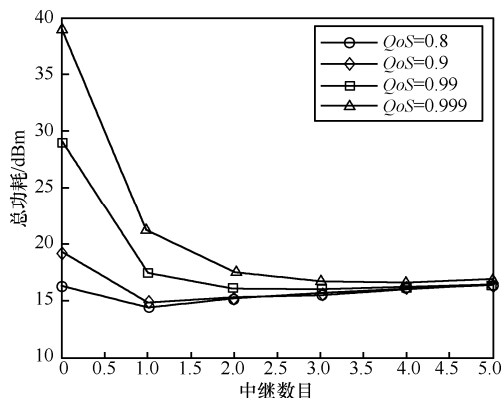


图 5 不同中继数目对总功耗的影响

### 2) 与其他最小功耗协作分集算法的比较

为了展示对协作分集进行跨层优化的效果, 对另 2 种近期提出的最小功耗协作分集路由算法<sup>[12]</sup>也进行了仿真, 并与本算法进行了比较。这 2 种算法分别是最小功耗协作路由算法 (MPRC) 和最短路径协作路由算法。这 2 种算法都是在保证一定吞吐量前提下对端到端传输总功耗进行最优化。MPRC 通过对路由和功率控制进行联合优化, 构造一条协作路由。而 CASNCP 则类似于已有的大多数协作路由: 先根据直接传输的条件找一条最小能耗路由, 然后在已存在路由的基础上采用协作分集。在仿真中,  $N=50, M=100$ , 其余参数均与上一节仿真的默认参数一致。本文进行了 1000 次仿真并对结果进行了平均。图 6 给出了不同 QoS 参数下 3 种算法的能耗比较。与 MPRC 相比, 本文提出的跨层设计算法能节省 24% 的能量。这里有 2 个原因: ①MPRC 是为吞吐量受限的情形设计的, 因此它的单跳成功传输率都是相等的, 而在本文的算法里, 端到端的成功传输率是给定的, 单跳成功传输率不一定相等, 可以进行优化; ②MPRC 没有考虑节点的接收功耗和处理功耗, 仅仅是对传输功耗进行了最优化, 总功耗不一定是最优; ③MPRC 仅仅考虑了单中继的情况, 没有考虑多中继, 而单中继不一定是最优。以上 3 个原因使得本文的算法优于 MPRC。另一种协作路由算法 CASNCP, 与本文的算法相比多消耗 45%~50% 的能耗, 与 MPRC 相比多消耗 27%~32% 的能量。这是由于 CASNCP 是先构造直接传输最优路由, 再在已有路由基础上选择中继, 应用协作分集。因此路由选择和协作分集没有进行跨层优化。实际上, 最优协作路由与直接传输时的最短路径路由往往是不同的。

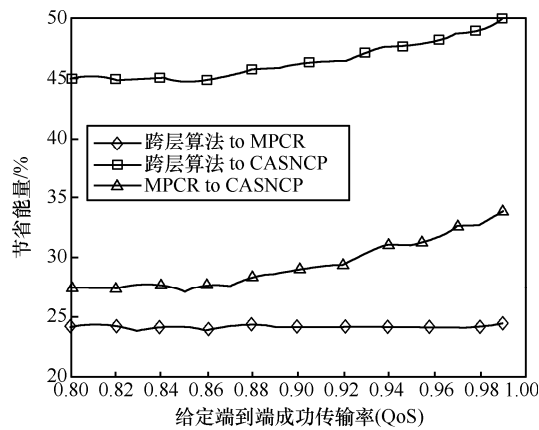


图6 不同算法的性能比较

## 6 结束语

针对多跳无线传感器网络，通过考察直接传输模式和协作分集传输模式下实现数据可靠传输所需能耗与端到端传输可靠性的 QoS 指标的关系，对协作分集的路由、中继选择和功率分配算法进行了联合优化，并提出了一种新的分布式算法。仿真结果显示，考虑传感器节点的接收能耗、处理能耗和控制开销，协作分集的能量开销与能量节省存在一个折中，这个折中依赖于一些网络参数，例如平均节点间距离、QoS 参数、中继数量以及节点接收能耗等等。在平均节点间距离较小时，直接传输的能量效率优于协作分集的能量效率。仿真结果同样表明，与近期提出的几种协作分集算法相比，采用基于机会中继的跨层设计方法能明显节省能量消耗。

## 参考文献：

- [1] AKYILDIZ I, SU F, SANKARASUBRAMANIAM W, *et al.* A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8):102-114.
- [2] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10):74-80.
- [3] HONG Y, HUANG W, CHIU F. Cooperative communication in resource-constrained wireless networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 47-57.
- [4] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity part I and part II[J]. IEEE Trans on Communication, 2003, 51(11):1927-1948.
- [5] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [6] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(10): 2415-2425.
- [7] BLETSAS A, KHITSI A, REED D P, *et al.* A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. IEEE Journal on Select Areas Communication, 2006, 24(3): 659-672.
- [8] SADEK A K, SU W, LIU K J R. Multimode cooperative communications in wireless networks[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(1): 341-355.
- [9] ZHOU Z, ZHOU S, CUI J H, *et al.* Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(8): 3066-3079.
- [10] CHEN W, LETAIEF K B, CAO Z. A unified cross-layer framework for resource allocation in cooperative networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2008,7(8): 3000-3009.
- [11] CUI B, LIN D, CIMINI L J. Routing strategies in multihop cooperative networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communication, 2009,8(2): 843-855.
- [12] IBRAHIM A S, HAN Z, LIU K J R. Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(10): 3930-3941.
- [13] GE W, ZHANG J, XUE G. Joint clustering and optimal cooperative routing in wireless sensor networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'08)[C]. Beijing,China,2008.
- [14] URGANONKAR R, NEELY M J. Delay-limited cooperative communication with reliability constraints in wireless networks[A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'09)[C]. Riode Janeiro, Brazil, 2009.
- [15] LE L, HOSSAIN E. Cross-layer optimization frameworks for multihop wireless networks using cooperative diversity[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2592-2602.
- [16] SADEK A K, SU W, LIU K J R, On the energy efficiency of cooperative communications in wireless sensor networks[J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2009, 6 (1): 5-26.

## 作者简介：



陈永锐（1978-），男，湖南湘潭人，中国科学院研究生院博士生，主要研究方向为无线传感器网络中的通信协议及数据的可靠传输。

杨扬（1983-），男，山东潍坊人，中国科学院研究生院博士生，主要研究方向为无线传感器网络中的信号处理及数据的可靠传输。

易卫东（1958-），男，云南昆明人，中国科学院研究生院教授、博士生导师，主要研究方向为无线传感器网络及其相关应用、MEMS 传感器、RF-MEMS 及信号处理。