

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2016.11.013

# 基于协作分集技术的无线传感器网络传输性能

胡锦涛<sup>1</sup>, 余根坚<sup>2</sup>

(1. 福建信息职业技术学院, 福州 350003; 2. 福建省信息处理与智能控制重点实验室, 福州 350121)

**摘要:** 对基于协作分集技术的传感器网络传输性能问题进行了深入研究,建立了多信源、多信宿和多中继的传感器网络协作分集模型,推导出了在该模型下传感器网络的传输性能具体表达式,据此可以定量地计算在协作分集下多信源、多信宿和多中继的传感器网络的传输性能指标,为进一步讨论协作选择策略等技术方案在实际的无线传感器网络环境中的应用提供理论上的判断依据.另一方面,本文也从理论上证明了协作分集技术可以提高传感器网络的传输性能.最后利用仿真参数,给出了主要的几个仿真结果,其反应出来的协作通信下的无线传感器网络传输性能变化特点与本文的结论相吻合.

**关键词:** 无线传感器网络; 协作分集技术; 传输性能; 仿真

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2016)06-1261-08

## Transmission capacity of wireless sensor networks based on cooperative diversity

HU Jin-Li<sup>1</sup>, YU Gen-Jian<sup>2</sup>

(1. Fujian Polytechnic of Information Technology, Fuzhou 350003, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Information Processing and Intelligent Control, Fuzhou 350121, China)

**Abstract:** This paper study the transmission capacity of wireless sensor networks based on the cooperative diversity technology. At first, the paper establish the cooperative diversity model for multi-source, multi-sink and multi-relay sensor networks, on which the specific transmission capacity expression of wireless sensor networks is deduced, it not only prove that the transmission capacity of wireless sensor networks will be increased by the cooperative diversity technology, but also give the criterion for discussing further the application effect of the technical scheme such as the cooperative selection strategy and so on in actual wireless sensor networks. In the other hand, the paper theoretically prove that cooperative diversity can improve the transmission capacity of wireless sensor networks. At last, some simulations are given and validity of the results is testified by the simulations.

**Keywords:** Wireless sensor networks; Diversity cooperative technology; Transmission capacity; Simulation

## 1 引言

无线通信经历了从模拟到数字、从固定到移动、从集中式(有基站)到分布式(无基站)的发展过程.现有的多输入多输出(MIMO)天线技术通过在

接收端和发射端同时安置多个天线而形成MIMO信道结构,从而充分利用了空域资源,大幅度提高了信道容量.但是现有的多天线技术多用于基站端,而对于移动终端,由于实现发射分集要求相邻天线之间的间距要大于电波波长并且多个收发天

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61401223); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAF12B15); 福建省高等学校教学改革研究项目(JAS14837); 福建省中青年教育科研项目(JA14249)

作者简介: 胡锦涛(1974-), 女, 福建永泰人, 副教授, 高级工程师, 研究方向为物联网应用研究. E-mail: 610336731@qq.com

线之间的传输信道是独立的或至少是不相关的,移动终端对体积、质量和功耗的要求又非常苛刻,所以在移动终端很难安装多天线.因而,很难在移动终端实现上行的发射分集.考虑到现有的无线传感器网络通信系统中多是由多用户组成,因而一种新的在移动终端实现发射分集的思想随之产生——协作分集.关于协作分集技术,近年来出现了相当多的研究成果<sup>[1-6]</sup>.

无线传感器网络是无中心的多跳无线网络,从源节点开始的信息传输可通过多种形式的中继后到达目的地.那么关于中继信道理论以及协作中继理论,众多的研究者已经做了相当多的研究工作,大量文章涌现<sup>[7-16]</sup>.其中奠基性的工作是 Cover 和 Ei Gamal 提出的经典中继信道理论<sup>[17]</sup>.

无线传感器网络信道的多径衰落、阴影衰落、路径损耗和干扰是阻碍信道容量增加和服务质量改善的主要原因.基于空间分集思想的 MIMO 技术在抗信道多径衰落方面具有明显的优势,并可以在不增加功率和频谱的前提下大幅度提高信道容量和网络吞吐量,已逐渐被新一代无线通信的主流协议所采纳.然而 MIMO 技术仍然存在很多问题,尤其是无线传感器移动终端较难安置多天线的难题使理想的 MIMO 技术在走向实用的过程中步履维艰.为此,Sendonaris 等人提出了一种新的空间分集技术——协作分集<sup>[14]</sup>.其基本思想是通过多用户之间共享天线和其他网络资源的形式构造“虚拟多天线阵列”,并通过分布式处理产生协作来获得一定的空间分集增益.从这个意义上来讲,协作分集为 MIMO 多天线技术走向实用提供了一条新的路径.

协作分集已经成为无线网络抗衰落的一种极具吸引力的手段<sup>[13,14]</sup>.文献[2]研究了两中继两跳异步网络中的协作性能.文献[4]基于协作分集技术提出了一种鲁棒性 MAC 协议,文献[5]提出了一种传感器网络中基于 MISO 的编码协作方案.文献[15]基于网络节点的功率分配给出一种自适应的协作编码算法.文献[16]给出了一个跨层的协作体系结构.文献[18]提出了一种网络中继节点对其它节点的中继请求的判定方法.文献[19]从 MAC 层面研究了协作分集的有效性问题.文献[20]设计了一种跨层设计方案.协作分集是一个极具吸引力的技术研究领域,基于协作分集技术的传感器网络技术和物联网技术研究在国内外已经引起广泛的关注.

不同于传统的点到点通信,基于协作分集思想的协作通信方式与组网技术允许无线传感器网络中不同用户或节点共享彼此的天线和其他网络资源,可望大大提高无线传感器网络吞吐量和复用增益,对降低选路问题的复杂性和实现无线无缝组网也颇有益处,因而在无线传感器网络中具有巨大的应用价值.目前,协作分集和协作通信的研究往往局限于单源节点、单目的节点和单/多中继的简单模型,这种合理简化的网络模型对于协作分集技术的研究及相关理论的建立作出了很大的贡献,但与实际的网络环境相去甚远,故不能简单地拓展到全网范围.将协作通信理论应用于实际的协作组网过程中,还有很多问题尚待研究解决.其中关键问题之一是如何将简单模型扩展到更接近于实际的多信源、多信宿和多中继的网络模型,实现网络层面上的协作分集,以及在多用户网络模型下协作分集对网络性能的影响.

基于上述考虑,本文的主要工作将致力于在多信源、多信宿和多中继的协作分集传感器网络模型下,侧重于研究其网络吞吐量性能.

## 2 无线传感器网络协作分集模型

考虑一个多信源、多信宿和多中继无线传感器网络  $\Omega(N)$ ,  $N$  为节点数.

如图 1,源(或中继)节点  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 分别以速率  $\dot{u}_i$  (nats per channel use) 要发送信号  $\zeta_i$  到目标(或中继)节点  $R_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ),表示为  $S_i \xrightarrow{\zeta_i} R_j$ , 其中  $\zeta_i \in A_c$  (表示符号集).

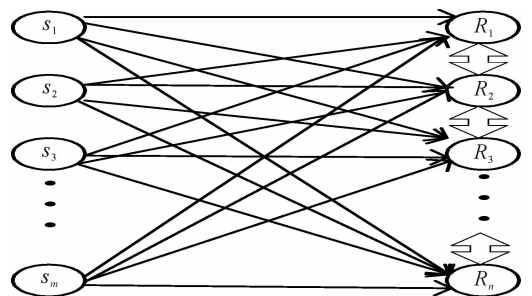


图 1 基于协作分集的无线传感器网络模型  
Fig. 1 Wireless sensor networks model based on cooperative diversity

具体地说,可设节点  $S_i, R_j$  ( $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ ) 分别发出复值基带信号流  $\alpha_{ik}$  和  $\beta_{jk}$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ), 它们在平均意义上满足节点功率条件如下.

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\alpha_{ik}|^2 \leq P(S_i) \\ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\beta_{jk}|^2 \leq P(R_j) \end{cases} \quad (1)$$

当源(或中继)节点  $S_i$  以概率  $p_{S_i}$  发送信号给目标(或中继)节点  $R_j$  时,其余的  $R_w$  ( $w \neq j$ ) 可以侦听该发送过程并可以通过中继协作手段来帮助该发送过程. 设目标(或中继)节点  $R_j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ) 接收到的信号记为  $\Upsilon(R_j)$ , 信道为瑞利衰落, 衰落指数记为  $\tau_j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ),  $C$  是均值为 0, 方差为 1 的加性高斯白噪声 (AGWN, Additive Gaussian White Noise), 且为圆周对称的独立同分布复值随机变量.  $S_i$  与  $R_j$  之间的信道增益为  $g_{ij}$ ,  $R_j$  与  $R_w$  之间的协作分集增益为  $G(\cos \theta_{jw} + i \sin \theta_{jw})$ , 这里  $i$  为虚数单位, 幅度  $G$  为常数, 相位  $\theta_{jw}$  为独立同分布于  $[-\pi, \pi]$  上的随机变量. 则基于协作的  $S_i \xrightarrow{\zeta_i} R_j$ , 目标(或中继)节点  $R_j$  的接收信号模型为

$$\Upsilon(R_j) = g_{ij}\zeta_i + G \sum_{w=1,2,\dots,m,w \neq j} (\cos \theta_{jw} + i \sin \theta_{jw}) \zeta_j^w + C_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中  $\zeta_j^w$  是在  $S_i \xrightarrow{\zeta_i} R_j$  中由  $R_w$  发出的,  $C_j$  是加性高斯白噪声. 式(2)可更为具体地写为

$$\Upsilon(R_j, k) = g_{ij}\alpha_{ik} + G \sum_{w=1,2,\dots,m,w \neq j} (\cos \theta_{jw} + i \sin \theta_{jw}) \beta_{wk} + C_{jk}, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

本文模型中的衰落信道是一个退化的高斯广播信道, 该信道承载着许多发送者和接收者所发出和接收的信息, 每一发送者、接收者都有着不同的 SNR 值, 具体来讲, 该 SNR 值取决于信道的状态. 另外, 与以往不同, 发射机能以不同的速率和相应的功率水平发送多个信息流, 而不是以固定的速率以及相关联的中断概率发送单个信息流. 这样当信道条件差时, 就解码多个信息流, 而信道条件好时, 就有更多的信息还获得更为可靠的解码.

### 3 无线传感器网络传输性能分析

一个码语 (CW, Code Word) 以何种方式传输取决于接收节点. 依据接收节点信息, 码语可运送多种类型的信息, 假定发送节点要传送消息

$$\begin{cases} \zeta_1 \in \{1, 2, \dots, 2^{k_{i_1}}\} \\ \zeta_2 \in \{1, 2, \dots, 2^{k_{i_2}}\} \\ \vdots \\ \zeta_m \in \{1, 2, \dots, 2^{k_{i_m}}\} \end{cases} \quad (4)$$

那么发送节点将形成一个  $2^{k_{i_1}} \times 2^{k_{i_2}} \times \dots \times 2^{k_{i_m}}$  的广义信息矩阵, 矩阵元素为随机高斯码, 记为  $X(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_m)$ . 如果信道容量  $Q \geq \dot{u}_1 + \dot{u}_2 + \dots + \dot{u}_m$ , 则接收节点能对消息  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_m$  进行解码; 若接收节点已知  $\zeta_{i_1}, \dots, \zeta_{i_j}, 1 \leq i_1, \dots, i_j \leq m$ , 且  $Q \geq \sum_{k \neq i_1, i_2, \dots, i_j} \zeta_k$ , 则接收节点通过广义信息矩阵可对  $\zeta_k$  ( $k \neq i_1, \dots, i_j, 1 \leq k \leq m$ ) 进行解码.

源(或中继)节点到目标(或中继)节点的无线信道如果是点到点无线信道, 且等概率地从(4)中的消息集合中选取消息进行发送, 对于无线中继信道, Madsen 在文献[3]首先提出了块马尔柯夫编码 BMC (Block Markov Coding), 一个要发送的信号被分成若干个组 (Block), 每组信号被单独分别编码, 假设信号  $\zeta_i$  被分成  $M$  个组:  $\zeta_i(1), \zeta_i(2), \dots, \zeta_i(M)$ , 源(或中继)节点编码函数为  $X_{S_i}(\zeta_i(1)), X_{S_i}(\zeta_i(2)), \dots, X_{S_i}(\zeta_i(M))$ . 在上述信号接收模型中, 中继节点  $R_w$  ( $w \neq j$ ) 对第  $l$  组密本信号 (Code Book)  $X_{S_i}(\zeta_i(l))$  进行解码. 当  $\dot{u}_i < \log(1 + |g_{ij}|^2 \cdot P(S_i))$  时, 最大误解码概率将变得充分小. 在得到解码组信号 (DB, Decode Block) 后, 接着在下一个分组时隙 (BS, Block Slot), 中继节点  $R_w$  ( $w \neq j$ ) 发送经过编码了的信号序列 0,  $X_{R_w}(\zeta_i(1)), X_{R_w}(\zeta_i(2)), \dots, X_{R_w}(\zeta_i(M))$ . 这种分组码信号传输方式就称为解码中继 (DR, Decode Relay). 对于本文的系统模型架构, 目标(或中继)节点采用并行解码技术<sup>[12]</sup>, 假定目标(或中继)节点已经接收了第  $k$  组信号  $\zeta_i(k)$ , 与此同时密本信号分组  $X_{S_i}(\zeta_i(k-2))$  以充分小的误解码概率被解码, 则目标(或中继)节点处, 基于接收信号模型(2)的并行解码信号形式为

$$\begin{aligned} & [X_{S_i}(\zeta_i(k)) + G \sum_{w=1,2,\dots,m,w \neq j} (\cos \theta_{jw} + \\ & i \sin \theta_{jw}) X_{R_w}(\zeta_i(k-1)) + \\ & C_j, X_{S_i}(\zeta_i(k-1)) + C_{j-1}] \end{aligned} \quad (5)$$

若源(或中继)节点  $S_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) 发送了一个码语, 该码语描述了目标(或中继)节点  $R_j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ) 将要接收的一个消息. 基于上述讨论, 中继节点  $R_w$  ( $w \neq j$ ) 将在  $R_j$  之前对消息进行解码. 因此, 每一个接收节点, 一旦成功地解码了消息, 就开始使用另一个预定的码语并在平均功率  $P(R)$  条件下来发送相同的消息. 假定节点  $R_j$  在一个码组周期内的解码时间用时间片  $t_j$  来表示. 则  $t_j$  意味着, 当节点  $R_j$  解码了消息并将其中继给节点  $R_w$  ( $w \neq j$ ) 时, 在一个衰落码组周期内的一个

时间段. 由正确解码的条件, 知道有  $\dot{u}_i / \log(1 + |g_{ij}|^2 \cdot P(S_i)) < 1$ .

基于实际的物理信道和解码条件, 可以合理地假设当  $t_j \geq 1$  时, 就意味着节点  $R_j$  将不能解码消息也不发送消息.

令  $p_j$  表示节点  $R_j$  成功解码的概率. 另外, 与

$$t_1 = \frac{\dot{u}_i}{\log(1 + |g_{i1}|^2 \cdot P(S_i))}, t_2 = \frac{\dot{u}_i + t_1 \log \frac{1 + |g_{i2}|^2 \cdot P(S_i) + G^2}{1 + |g_{i2}|^2 \cdot P(S_i)}}{\log(1 + |g_{i2}|^2 \cdot P(S_i) + G^2)}, \dots,$$

$$t_n = \frac{\dot{u}_i + t_1 \log \frac{1 + |g_{i2}|^2 \cdot P(S_i) + G^2}{1 + |g_{i2}|^2 \cdot P(S_i)} + t_2 \log \frac{1 + |g_{i3}|^2 \cdot P(S_i) + 2G^2}{1 + |g_{i3}|^2 \cdot P(S_i) + G^2} + \dots + t_{n-1} \log \frac{1 + |g_{in}|^2 \cdot P(S_i) + (n-1)G^2}{1 + |g_{in}|^2 \cdot P(S_i) + (n-2)G^2}}{\log(1 + |g_{in}|^2 \cdot P(S_i) + (n-1)G^2)}$$

( $i=1, 2, \dots, m$ )

自然地, 当  $t_j < 1$ , 而  $t_{j+1} \geq 1$  时, 则  $p_j > 0, p_{j+1} = 0$ , ( $j=1, 2, \dots, m$ ), 反之亦然. 所以

$$p_j = \Pr\{t_j < 1\} \quad (8)$$

由上述分析(节点解码、协作、中继), 基于协作分集模型的无线传感器网络吞吐量在概率期望的意义上可表达为

$$C_{\text{throughput}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\dot{u}_i}{n} p_{S_i} p_j \quad (9)$$

其中,  $p_{S_i}$  为源(或中继)节点发送信息的概率.

现在来分析无线传感器网络的传输性能. 我们从简单到复杂地分析问题, 首先分析当  $m = n = 1$  时的情况.

(1) 当  $m = n = 1$  时的传感器网络吞吐量.

这时只有一个源(或中继)节点  $S_1$  和一个目标(或中继)节点  $R_1, i = j = 1$ . 所以就是单播(unicast)的情形, 也就是无协作分集的情形. 由于增益  $|g_{ij}|^2$  的概率密度函数<sup>[16]</sup>为  $p_{|g_{ij}|^2}(x) = e^{-x}$ , 而这里  $i = j = 1$ , 所以由式(7)和式(9)可得

$$C_{\text{throughput}, m=n=1} = \dot{u}_1 p_{S_1} \Pr\{t_1 < 1\} = \dot{u}_1 p_{S_1} \Pr\left\{\frac{\dot{u}_1}{\log(1 + |g_{11}|^2 \cdot P(S_1))} < 1\right\} = \dot{u}_1 p_{S_1} \Pr\left\{\frac{e^{\dot{u}_1} - 1}{P(S_1)} < |g_{11}|^2\right\} = \dot{u}_1 p_{S_1} \int_{\frac{\dot{u}_1 - 1}{P(S_1)}}^{+\infty} e^{-x} dx = \dot{u}_1 p_{S_1} \exp\left\{-\frac{e^{\dot{u}_1} - 1}{P(S_1)}\right\} \quad (10)$$

若源(或中继)节点  $S_1$  以非零概率  $p_{S_1}$  和速率  $\dot{u}_1$  发送信息到  $R_1$ , 由(10)式知道, 当  $\dot{u}_1 \neq 0, \log P(S_1) = p_{S_1} + \log p_{S_1}$  时,  $C_{\text{throughput}, m=n=1}$  达到极大值.

节点  $S_i, R_j$  相关联的互信息<sup>[15]</sup>为

$$I_j = \sum_{l=1}^j (t_l - t_{l-1}) \log(1 + |g_{ij}|^2 \cdot P(S_i) + G^2(l-1)) \quad (6)$$

其中,  $t_0 = 0$ .

通过求解方程  $I_j = \dot{u}_i, j=1, 2, \dots, n$ , 可得

可见, 当节点功率水平和信息发送概率达到一种动态平衡时, 网络吞吐量最大.

(2) 当  $m = 2, n = 2$  时的传感器网络吞吐量.

这时分别有两个源(或中继)节点和两个目标(或中继)节点, 且网络是基于协作分集技术、广播策略和编解码技术. 由于增益  $|g_{i1}|^2, |g_{i2}|^2 (i=1, 2)$  的联合概率密度函数<sup>[16]</sup>为  $p_{|g_{i1}|^2, |g_{i2}|^2}(x, y) = e^{-x} e^{-y}$ , ( $i=1, 2$ ), 而条件概率密度函数为  $p_{|g_{i1}|^2 | |g_{i2}|^2}(x|y) = e^{-y-x}, (i=1, 2)$ . 我们有下面的定理 1.

**定理 1** 基于本文前面所述的协作分集模型、广播策略和编解码技术, 以及双源(或中继)节点和双目标(或中继)节点的传感器网络, 各种参数如下: 路径指数  $|g_{ij}|^2$ 、协作指数  $G^2$ 、源节点功率  $P(S_i)$ 、信息发送速率  $\dot{u}_i, i, j=1, 2$ . 则无线传感器网络传输性能可表示为

$$C_{\text{throughput}, m=n=2} = \sum_{i=1}^2 \frac{\dot{u}_i p_{S_i}}{2} \left(1 + e^L - e^{-L} + \exp\left\{-\frac{e^{\dot{u}_i} - 1}{P(S_1)}\right\} + \exp\left\{-\frac{e^{\dot{u}_2} - 1}{P(S_2)}\right\}\right) \quad (11)$$

$$\text{其中 } L = \frac{\exp\left\{\frac{\dot{u}_i}{F(G, g_{i2}, \dot{u})} - 1\right\}}{P(S_i)}, F(G, g_{i2}, \dot{u}) = \frac{\log(1 + |g_{i2}|^2 P(S_i) + G^2) - \dot{u}_i}{\log\left(\frac{1 + |g_{i2}|^2 P(S_i) + G^2}{1 + |g_{i2}|^2 P(S_i)}\right)}$$

证明 定义事件  $A_i = \{\text{源(或中继)节点 } S_i \text{ 以概率 } P_{S_i} \text{ 和速率 } \dot{u}_i \text{ 发送信息}\}, (i=1, 2, \dots, m)$ . 则对于  $\forall i, j, i \neq j$ , 有  $A_i$  和  $A_j$  相互独立. 结合(7), 我们有

$$\Pr\{t_1 < 1\} = \Pr\left\{\frac{\dot{u}_1}{\log(1 + |g_{11}|^2 \cdot P(S_1))} < 1 \text{ or } \frac{\dot{u}_2}{\log(1 + |g_{21}|^2 \cdot P(S_2))} < 1\right\} \quad (12)$$

$$= \Pr\left\{\frac{\dot{u}_1}{\log(1 + |g_{11}|^2 \cdot P(S_1))} < 1\right\} + \Pr\left\{\frac{\dot{u}_2}{\log(1 + |g_{21}|^2 \cdot P(S_2))} < 1\right\} \quad (13)$$

$$= \exp\left\{-\frac{e^{\dot{u}_1} - 1}{P(S_1)}\right\} + \exp\left\{-\frac{e^{\dot{u}_2} - 1}{P(S_2)}\right\} \quad (14)$$

而  $\Pr\{t_2 < 1\} = \Pr\{t_1 < F(G, g_{i2}, \dot{u})\} = \int_0^\infty \Pr\{t_1 < F(G, g_{i2}, \dot{u}) \mid |g_{i2}|^2 = y\} p_{|g_{i2}|^2}(y) dy$

$$= \int_0^\infty \Pr\left\{|g_{i1}|^2 > \exp\left\{\frac{F(G, g_{i2}, \dot{u})}{P(S_i)} - 1\right\} \mid |g_{i2}|^2 = y\right\} p_{|g_{i2}|^2}(y) dy \quad (15)$$

$$= \int_0^\infty \Pr\{|g_{i1}|^2 > L \mid |g_{i2}|^2 = y\} p_{|g_{i2}|^2}(y) dy \quad (16)$$

$$= \begin{cases} \int_0^\infty \int_L^\infty p_{|g_{i1}|^2 \mid |g_{i2}|^2}(x \mid y) p_{|g_{i2}|^2}(y) dx dy & \text{if } y < L \\ \int_0^\infty p_{|g_{i2}|^2}(y) dy & \text{if } y \geq L \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $F(G, g_{i2}, \dot{u}) = \frac{\log(1 + |g_{i2}|^2 P(S_i) + G^2) - \dot{u}_i}{\log\left(\frac{1 + |g_{i2}|^2 P(S_i) + G^2}{1 + |g_{i2}|^2 P(S_i)}\right)}$ ,  $L = \frac{\exp\left\{\frac{\dot{u}_i}{F(G, g_{i2}, \dot{u})} - 1\right\}}{P(S_i)}$  (18)

结合条件概率密度函数, 易知

$$\Pr\{t_2 < 1\} = \int_0^L \int_L^\infty e^{y-x} dx dy + \int_L^\infty e^{-y} dy = 1 - e^{-L} + e^L \quad (19)$$

所以

$$C_{\text{throughput}, m=n=2} = \sum_{i=1}^2 \frac{\dot{u}_i p_{S_i}}{2} (\Pr\{t_1 < 1\} + \Pr\{t_2 < 1\}) \quad (20)$$

$$= \sum_{i=1}^2 \frac{\dot{u}_i p_{S_i}}{2} (1 + e^L - e^{-L} + \exp\left\{-\frac{e^{\dot{u}_1} - 1}{P(S_1)}\right\} + \exp\left\{-\frac{e^{\dot{u}_2} - 1}{P(S_2)}\right\}) \quad (21)$$

显然(21)式中包含了非协作中继情形下的吞吐量, 这也正说明了协作分集能够提高网络总的吞吐量。

对于一般的  $m$  和  $n$ , 与上述中的记号类似, 我们有  $F(G, g_{i2}, g_{i3}, \dot{u}), \dots, F(G, g_{i2}, g_{i3}, \dots, g_{ij}, \dots, \dot{u})$ , 以及相对应的  $L_1, \dots, L_{j-2}$ , 从而有下面的一般的吞吐量计算公式。

**推论 1** 对于一般的  $m$  和  $n$ , 在定理 1 的条件下, 基于协作分集技术的无线传感器网络的传输性能的计算公式为

$$C_{\text{throughput}} = \sum_{i=1}^m \frac{\dot{u}_i p_{S_i}}{n} \left(1 + e^L - e^{-L} + \sum_{j=1}^n \exp\left\{-\frac{e^{\dot{u}_j} - 1}{P(S_j)}\right\}\right) + \sum_{j=3}^n \int_{L_{j-2}} \int_{L_{j-1}} \dots \int_{L_1} \Pr\{|g_{i,j-1}|^2 >$$

$$L_{j-2} \mid |g_{i,j}|^2 = y_j\} p_{|g_{i,j}|^2}(y_j) dy_3 \dots dy_j) \quad (22)$$

### 4 仿真

一些在仿真试验中使用到的参数如下: 路径指数  $|g_{ij}|^2 = 3.0$ 、协作增益指数  $G^2 = 1.0$ , 节点信号传输距离  $R$ , 一个时隙的节点发送信号概率  $p$ , 源节点发送功率  $P(S_i)$ 、信息发送速率  $\dot{u}_i$ 。仿真结果如图 2~图 7。

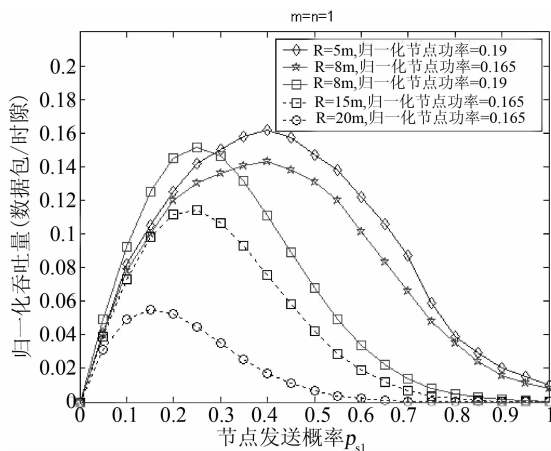


图 2 单对源宿(或中继)节点在不同节点功率和不同通信距离下的吞吐量传输性能

Fig. 2 Transmission capacity of single pair nodes under different node power and different communication distance

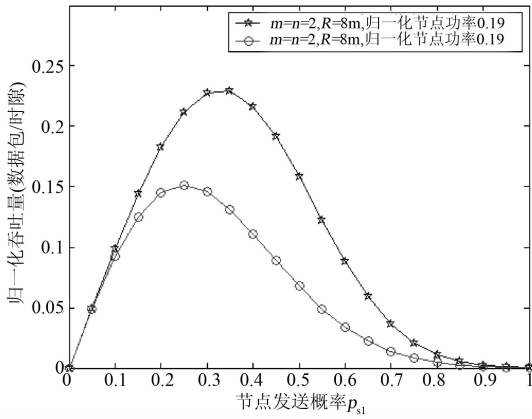


图 3 单对和双对源宿(或中继)节点在相同节点功率和相同通信距离下的吞吐量传输性能

Fig. 3 Transmission capacity of single pair and dual pairs nodes at the same node power and the same communication distance

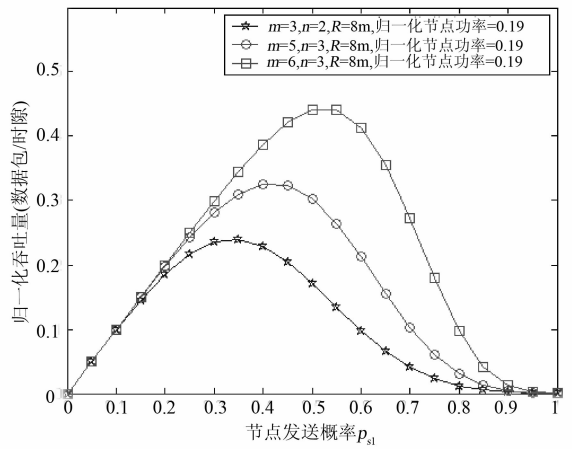


图 6 相同节点功率和相同通信距离下的吞吐量传输性能

Fig. 6 Transmission capacity under same node power and the same communication distance

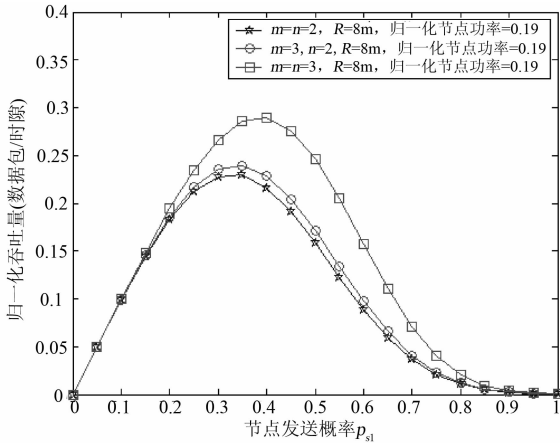


图 4 相同节点功率和相同通信距离下的吞吐量传输性能

Fig. 4 Transmission capacity under same node power and the same communication distance

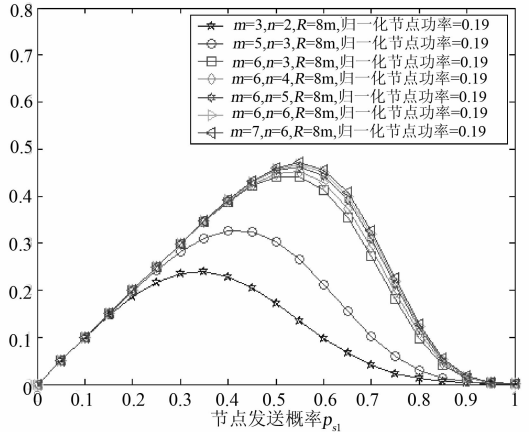


图 7 相同节点功率和相同通信距离下的吞吐量传输性能

Fig. 7 Transmission capacity under same node power and the same communication distance

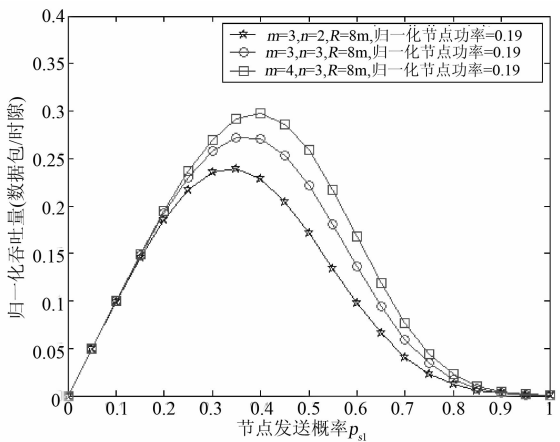


图 5 相同节点功率和相同通信距离下的吞吐量传输性能

Fig. 5 Transmission capacity under same node power and the same communication distance

图 2 的仿真结果说明,在无协作的情形下,传输性能是随着节点间距离的增加而逐渐下降的,也随着节点功率的增大而增大.说明网络节点间通信,当节点距离加大时丢包率也在加大.而节点功率增大,由于噪声功率一定,所以意味着接收机信噪比在增大,故能增强传输性能.另外,从图 2~图 7 都能看出,当  $p$  从 0 变大到 1 时,吞吐量传输性能先是一个上升阶段,而后又是一个下降阶段.在上升的开始阶段,吞吐量传输性能随着  $p$  的增大而快速上升,这是由于随着  $p$  的增大,有更多的数据包被发送.但是随着  $p$  的进一步增大,不管基于何种接收机技术,对于接收节点来说,数据包冲突与丢包率也将大幅度增加,这时吞吐量传输性能的增长就变得缓慢,进而达到一个峰值.过了这个峰

值,吞吐量传输性能就进入下降阶段了,在这个阶段,越大的 $\rho$ ,就意味着一个接收节点在同一时刻至少收到多个数据包的概率大增,进而造成更大量的冲突,这就是吞吐量传输性能在这个阶段不断下降的原因。

从图2的仿真过程和结果,我们以 $R=5\text{ m}$ ,归一化节点功率 $=0.19$ 为例,这时的归一化峰值吞吐量传输性能为 $0.162$ ,该峰值所对应的节点发送概率为 $0.4$ ,通过验证,该值满足吞吐量传输性能达到最大时的理论条件: $\log P(S_1) = p_{s_1} + \log p_{s_1}$ 。

从图3的仿真过程和结果看, $m=n=2$ 的协作通信可以提高吞吐量传输性能,特别在峰值附近,比无协作通信的吞吐量传输性能高出约 $50\%$ 。

从图4的仿真过程和结果看, $m=3, n=2$ 的协作通信与 $m=n=2$ 时没有显著区别;但是对于 $m=n=3$ 的协作通信,与 $m=n=2$ 时对比,在发送概率介于 $0.3\sim 0.7$ 之间时,其吞吐量性能就有显著提高。并且 $m=3, n=3$ 可以耐受更高的发送概率而不会导致数据包的冲突。

从图5的仿真过程和结果看,当 $m=4, n=3$ 时,在最优发送概率下,其吞吐量性能比 $m=n=3$ 时有一定程度的提高,但是在非最优发送概率下,它们的吞吐量性能没有显著差别。

从图6的仿真过程和结果看,在发送端,随着协作源(或中继)节点增加到 $m=6$ ,可以发现不仅可以最优发送概率提高到 $0.55$ 附近,而且在最优发送概率周围,吞吐量性能显著地高于 $m<6$ 的情形。

从图7的仿真过程和结果看,当协作源(或中继)节点 $m=6$ 或 $m>6$ ,随着接收(或中继)端的协作节点数的增加,其吞吐量性能并无明显差别,这说明无线传感器网络的协作通信在多信源多信宿的情况下,并不是参与协作的节点越多性能就越好,因为吞吐量性能增长已经有限,而付出的代价是通信带宽和能量的更多消耗。所以针对具体的实际无线传感器网络应用环境,根据本文的基于协作分集技术的无线传感器网络吞吐量传输性能研究结论,可以给出非常有价值的判断尺度,从而权衡网络传输性能和网络代价之间的关系。

## 5 结论

本文对基于协作分集技术的无线传感器网络传输性能问题进行了深入研究,建立了多跳多中继无线传感器网络协作分集模型,推导出了在该模型

下无线传感器网络的吞吐量传输性能具体表达式,据此可以定量地计算在协作分集下无线传感器网络的吞吐量传输性能指标,为进一步讨论协作选择策略等技术方案在实际的无线传感器网络中的应用提供理论上的判断依据。另一方面,本章也从理论上证明了协作分集技术可以提高无线传感器网络的传输性能。

最后利用仿真参数,给出了主要的几个仿真结果,其反应出来的基于协作通信技术的无线传感器网络传输性能的变化特点与本文的结论相吻合。针对具体的无线传感器网络应用环境,根据本文的研究结论和仿真结果,可以给出非常有价值的判断尺度,从而权衡实际传感器网络传输性能和网络代价之间的关系。

## 参考文献:

- [1] Jakllari G, Krishnamurthy S V, Faloutsos M. On broadcasting with cooperative diversity in multi-hop wireless networks[J]. IEEE J Sel Area Comm, 2013, 31(2): 484.
- [2] Nahas M, Saadani A, Hachem W. Performance of asynchronous two-relay two-hop wireless cooperative networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2010, 9(3): 1086.
- [3] Host-Madsen A. Capacity bounds for Cooperative diversity[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2012, 52(4): 1522.
- [4] Moh S, Yu C S. A cooperative diversity-based robust MAC protocol in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Trans Parallel Distrib Syst, 2011, 22(3): 353.
- [5] Asaduzzaman, Hyung K. Coded diversity for cooperative MISO based wireless sensor networks[J]. IEEE Commun Lett, 2009, 13(7): 516.
- [6] Mahinthan V, Mark J W. A simple cooperative diversity scheme based on orthogonal signaling[J]. IEEE Wireless Commun Netw, 2015, 25(2): 1012.
- [7] Li Y, Xia X G. A family of distributed space-time trellis codes with asynchronous cooperative diversity[J]. IEEE Trans Commun, 2012, 50(4): 790.
- [8] Shang Y, Xia X G. Shift-full-rank matrices and applications in space-time trellis codes for relay networks with asynchronous cooperative diversity[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2013, 55(7): 3153.
- [9] Yylmaz A O. Cooperative diversity in carrier frequency offset[J]. IEEE Commun Lett, 2014, 11(4): 307.

- [10] Mehrpouyan H, Steven D. Bounds and algorithms for multiple frequency offset estimation in cooperative networks[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2011, 10(4): 1300.
- [11] Luo J, Blum R S. Decode-and-forward cooperative diversity with power allocation in wireless networks [J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2014, 26 (3): 793.
- [12] Nicholas J, Laneman, Martinian E. Source - channel diversity for parallel channels[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2015, 57(10): 3518.
- [13] Laneman J N, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks; Efficient protocols and outage behavior[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2014, 56 (12): 3062.
- [14] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity Part I: System description[J]. *IEEE Trans Commun*, 2013, 51(11): 1927.
- [15] Li Li, Hu H, Chen X. Adaptive cooperative coding with power allocation in wireless relay networks [J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2009, 8 (9): 4604.
- [16] Wei Chen, Lin Dai, Ben Letaief K. A unified cross-layer framework for resource allocation in cooperative networks[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2012, 7(8): 3000.
- [17] Cover T M, El Gamal A A. Capacity theorems for the relay channel [J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2013, 25(9): 572.
- [18] Srinivasan V, Nuggehalli P, Chiasserini C F. An analytical approach to the study of cooperation in wireless ad hoc networks[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2015, 52(2): 722.
- [19] Hagenauer J. Rate-compatible punctured convolution codes (RCPC Codes) and their applications[J]. *IEEE Trans Commun*, 2013, 36(3): 389.
- [20] Bletsas A, Khisti A, Reed D P. A simple Cooperative diversity method based on network path selection [J]. *IEEE J Sel Area Comm*, 2014, 24 (4): 659.