

认知无线传感器网络中基于 GSC 的协作传输机制

秦智超¹, 周正¹, 赵小川¹, 章杨^{1,2}

(1.北京邮电大学 泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876; 2.中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266555)

摘要:针对无线传感器网络中单个节点能量和发射功率均受限的特点,在发送端已知信道状态信息(CSI)的条件下提出了一种基于广义选择合并算法(GSC)的协作传输机制。根据 GSC 算法和节点的功率受限条件来决定具体参与协作传输的节点个数,并结合信道状态和节点的剩余能量来对节点进行调度。理论分析和仿真结果表明该机制能够有效地延长网络寿命。

关键词:无线传感器网络;协作 OFDM;信道状态信息;广义选择合并

中图分类号:TP393

文献标识码:B

文章编号:1000-436X(2013)09-0158-08

Cooperative transmission scheme based on GSC for cognitive wireless sensor network

QIN Zhi-chao¹, ZHOU Zheng¹, ZHAO Xiao-chuan¹, ZHANG Yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: In response to the features that the sensor nodes are energy-limited and power-constrained in wireless sensor network, a cooperative transmission scheme based on general selection combine(GSC) algorithm was proposed when the channel state information (CSI) was known to the transmitter. The number of cooperative nodes was depended on the GSC algorithm subject to a power constraint at the transmitter, and these selected nodes were scheduled according to the channel state and individual residual energy. The analysis and simulation results show that the proposed scheme can effectively prolong the network lifetime.

Key words: wireless sensor network; cooperative OFDM; channel state information; general selection combine

1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)是由大量廉价的微型传感器节点组成的多跳自组织无线网络,在医疗、农业、环境监测、智能仪表等领域发挥着越来越重要的作用^[1]。传感器节点往往能量非常有限且在多数情况下无法进行能量补充^[2],如何提高能量效率成为 WSN 大规模推广应用中所面临的首要问题,因此,在各层的协议设计以及相关的支撑技术中均需要考虑能量因素。

节点除了能量受限以外,出于硬件成本和减少干扰的考虑,发送功率也往往有限,仅仅依靠单个节点难以满足远距离通信的要求。多跳通信是解决远距离通信的基本手段之一,但由于无线传感器节点一般采用随机布撒的方式(飞机播撒或火箭弹射),很可能出现有些节点在自身的通信范围内找不到下一跳中继节点的情况,这时必须借助协作通信来拓展通信范围,以寻找到合适的下一跳。

在远距离通信中,多径衰落也是一个不可忽视的重要问题。对于单信道网络而言,如果衰落比较

收稿日期:2012-07-27;修回日期:2012-12-28

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX03006-009);国家自然科学基金资助项目(60902046);韩国知识经济部仁荷大学 ITRC 基金资助项目(NIPA-2011-C1090-1111-0007)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of China (2009ZX03006-009); The National Natural Science Foundation of China(60902046); ITRC Support Program Supervised by the National IT Industry Promotion Agency of Korea (NIPA-2011-C1090-1111-0007)

严重,会造成大量的误码,甚至使通信中断。而对于多信道网络,由于信道状况的不同,不同的传感器节点的能耗速度不同^[3],这将会造成具有良好信道条件的节点只需少量的能量即可满足系统需求(如一定的误码率),而具有恶劣信道条件的节点则由于消耗大量的能量而过早死亡,对整个网络的寿命有致命的影响。这要求信道资源的分配必须具备一定的灵活性。

以上需求使得传感器节点应具备一定的认知功能,能够根据周围环境的变化和发生的事件按照推理和先验知识来调整自己的行为。引入认知功能的无线传感器网络称之为认知无线传感器网络^[4](CWSN, cognitive wireless sensor network),它能增强网络的可靠性,降低网络的维护成本和延长网络的寿命,是目前一个新兴的研究领域^[5]。本文的核心思想是在发送端已知信道状态信息的情况下,将广义选择合并(GSC)^[6,7]下平均误码率与信噪比的关系作为先验知识,以协作 OFDM 技术作为物理层传输方式,自适应地调整对应的协作策略(包括调整参与的节点个数和每个节点的发射功率等),以达到降低网络能耗、延长网络寿命的目的。

OFDM 技术是实现 WSN 中协作通信的理想方式,由于其具有一些非常优良的性能,如对多径衰落信道的顽健性、无线资源分配的灵活性和高的频谱效率均具备实现认知功能的内在特性,所以 OFDM 逐渐被应用到 WSN 中^[3]。文献[8~10]对 OFDM 在无线传感器网络中的应用做了一些基础性的研究。文献[11]将 OFDM 应用到基于位置的无信标路由中,在网络层方面获得了更好的时延性能。文献[12]给出了一种具体的物理层实现方案(COFDM-WSN),中继节点通过搬移源节点的频率在接收端形成一个标准的 OFDM 信号,通过对各子载波携带的信息进行最大比例的合并(MRC)来得到发射信号的最优化估计。但是该方案占用了全部的信道资源,由于状况较差的信道对分集增益的贡献很低,而占用该信道的节点却不可避免地消耗一定的电路能量,这种以高能耗换取低增益的策略对于能量非常宝贵的无线传感器网络来说并不合适。另外文献[12]没有将节点的调度纳入分析范围中。

本文结合节点的实际通信能耗模型,在考虑功率受限的基础上,针对发送端已知信道状态信息的

情况,提出了一种能量均衡的协作 OFDM 传输机制(COFDM-CWSN)。

2 系统模型

2.1 网络模型

图 1 给出了 OFDM 协作通信的模型,其中,无线传感器网络采用簇状拓扑结构(这可以通过一定的成簇算法来形成,如 LEACH^[13]、HEED^[14]等),并具有如下特点。

1) 簇间的距离 d 远远大于簇的半径大小 d_m , 可以认为各节点具有相同的子信道状况,即

$$CSI_i^j = CSI_k^j, \forall i, k \in [1, N], j \in [1, L] \quad (1)$$

其中, i, k 表示节点标号, N 表示簇内节点的个数, L 表示总的子信道数, CSI_i^j 则表示节点 i 与目标节点间子信道 j 的状态信息。不同的子信道间相互独立,均为遵循平方率衰减的瑞利衰落信道。

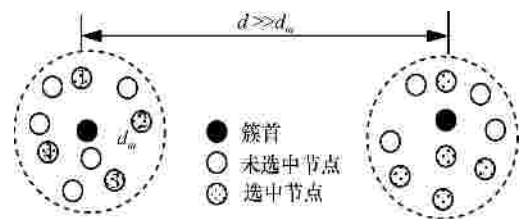


图 1 OFDM 协作通信示意

2) 簇首负责对整个簇进行管理,包括收集各节点的剩余能量信息、对参与协作传输的节点进行调度,以及管理簇内和簇间的分组交换。为了避免簇首消耗能量过快,可以将数据传输分为多轮,在每轮中由不同的节点承担簇首任务。

3) 各节点具有相同的最大发射功率 $P_{t,max}$,即节点实际发射功率 $P_i \leq P_{t,max}$,并能够进行调整。

4) 节点根据调度信息参与 OFDM 协作传输,被选中的节点在对应子信道上以分配的发射功率进行发射,未被选中的节点则进入休眠状态。

5) 为便于说明问题,假设每一轮只有一个节点提出传输请求,称其为源节点,其他的参与协作 OFDM 传输的节点则称之为协作节点。

2.2 能耗模型

图 2 给出了节点的所有信号处理模块^[12],每个模块的能耗在其上方进行标注。

关于该能耗模型,需要作以下几点说明。

1) 如果节点为协作节点,只需要进行频率搬移即可,不需要进行基带处理、A/D 及 D/A 转换,此

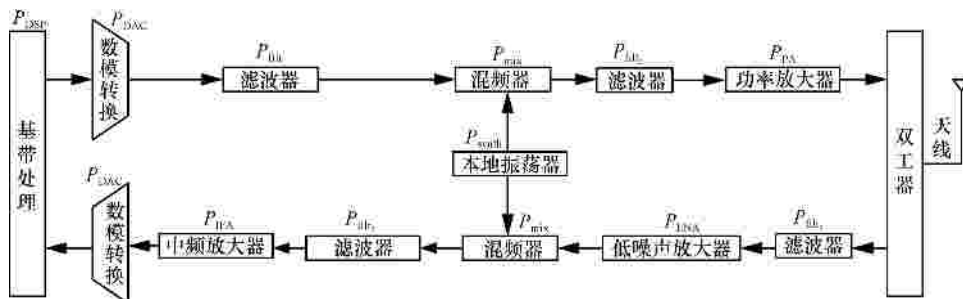


图 2 节点的发送接收模块

时信号所经历的模块位于虚线框内。

2) 为了避免模型过于复杂以及考虑到基带处理模块(如信源编码、信道编码、数字调制解调等)能耗很小,同文献[12],本文将忽略基带处理模块的能量消耗 P_{DSP} 。

3) 除基带处理模块外的能量消耗又可以分为 2 部分,一部分是由功率放大器消耗的能量 P_{PA} ,这部分能耗在总的能耗中比重最大,其值依赖于节点的发射功率 P_{tx} [15],并有下式成立。

$$P_{PA} = (1 + a)P_{tx} \quad (2)$$

其中, $a = \frac{e}{\eta}$, η 表示功率放大器的漏极效率, e 表示峰均比,该值的大小取决于具体的调制方式和星座图空间的大小。 P_{tx} 可以根据链路预算 [16] 来得到,具体对于只经历平方衰减的信道来说,有

$$P_{tx} = \frac{(4\pi)^2 d^2 M_1 N_f}{G_t G_r \lambda^2} R_b \bar{E}_b \quad (3)$$

其中, d 表示发射机与接收机间的距离, M_1 表示链路余量, N_f 表示噪声系数, G_t 和 G_r 分别表示发射机和接收机的天线增益, λ 表示载波波长, η 表示能量效率, R_b 表示传输速率, \bar{E}_b 为接收端满足给定误码率时所需的平均比特能量。

另一部分为其余模块消耗的能量 P_c ,这部分能耗在总能耗中比重较小,其值可以近似为 [12]

$$P_c \approx P_{c,src} + (N - 1)P_{c,relay} + P_{c,dst} \quad (4)$$

其中, $P_{c,src}$ 、 $P_{c,relay}$ 、 $P_{c,dst}$ 分别表示源节点、协作节点、目标节点的功耗, $N - 1$ 表示协作节点的个数。各变量的计算式为

$$\begin{aligned} P_{c,src} &= P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt} + P_{synth} \\ P_{c,dst} &= P_{LNA} + P_{IFA} + P_{ADC} + P_{mix} + P_{filr} + P_{synth} \\ P_{c,relay} &= P_{c,src} + P_{c,dst} - P_{ADC} - P_{DAC} - P_{synth} \end{aligned}$$

由式(2)~式(4)可知,传输每比特所需的总能耗

E_{bt} 为

$$E_{bt} = (1 + a) \frac{(4\pi)^2 d^2 M_1 N_f}{G_t G_r \lambda^2} N \bar{E}_b + \frac{P_c}{R_b} \quad (5)$$

对于固定速率的系统来说, E_{bt} 可以用来评估能量效率的高低。从式(5)中可以看出,接收端平均比特能量 \bar{E}_b 和参与协作的节点个数 N 是影响能量效率高低的关键因素。而 \bar{E}_b 又与系统所需的误码率、具体的调制方式以及合并判决方式密切相关。文献[12]采用了 BPSK 调制和 MRC 合并判决的方式,得到在瑞利衰落信道下误码率 \bar{p}_e 的表达式为 [14]

$$\bar{p}_e = \left[\frac{1}{2} (1 - \mu) \right]^N \sum_{k=0}^{N-1} \binom{N-1+k}{k} \frac{1}{2} (1 - \mu)^{1+k} \quad (6)$$

其中, $\mu = \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}}$, $\gamma = \frac{\bar{E}_b}{N_0}$ 表示子信道的平均信噪比。

3 协作传输机制

3.1 协作 OFDM

协作 OFDM 的核心思想是在不同的子信道上发射相同的信息,然后由接收机将其作为一个 OFDM 符号进行处理。同文献[12],本文同样采用 BPSK 调制方式(其他调制方式可以用同样方式进行处理)。在已知信道状态信息,即信道增益为 $r_i e^{j\theta_i}$ ($i = 1, 2, \dots, L$) 的情况下,分配了信道 i 的节点发射的信号可以描述为

$$s_i(t) = C_k e^{j2\pi f t} x_i e^{-j\theta_i} \quad (7)$$

其中, C_k 为归一化复数(即 $|C_k| = 1$),是第 k 轮数据传输中携带信息的部分, f_i 表示子信道载波频率, x_i 是信号中可以调节的部分,体现了信号波形在一个符号周期内的能量大小(即 $E_{s_i} = x_i^2$), $e^{-j\theta_i}$ 则实现信道相位补偿的功能。

在接收机端的接收信号为

$$\begin{aligned}
 r(t) &= \sum_{i=0}^{L-1} C_k e^{j2\pi f_i t} x_i e^{-j^2 i} r_i e^{j^2 i} + n(t) \\
 &= \sum_{i=0}^{L-1} C_k e^{j2\pi f_i t} x_i r_i + n(t) \\
 &= \sum_{i=0}^{L-1} C_{ki} e^{j2\pi f_i t} + n(t) \tag{8}
 \end{aligned}$$

其中, $C_{ki} = C_k x_i r_i$, $n(t)$ 是单边功率谱密度为 N_0 的复高斯白噪声。

对其进行采样后可以得到

$$r(kT_s) = \sum_{i=1}^L C_{ki} e^{j2\pi f_i kT_s} + n(kT_s) \tag{9}$$

所以接收序列可以表示为

$$r(k) = \sum_{i=1}^L C_{ki} e^{j2\pi f_i kT_s} + n(k) \tag{10}$$

很显然有 $\mathbf{r} = \text{IDFT}(\mathbf{C}_k) + \mathbf{n}$, 其中, $\mathbf{r} = [r(0), r(1), \dots, r(L-1)]$, $\mathbf{n} = [n(0), n(1), \dots, n(L-1)]$, 符合 OFDM 信号的标准形式。通过对 \mathbf{r} 进行 FFT 变换并进行合并可以得到最终的判决变量为

$$D_k = \sum_{i=0}^{L-1} C_k x_i r_i + j \tag{11}$$

其中, j 为合并后的噪声。

如果仅仅出于获得最大系统增益的目的, 则每个子信道发射信号的能量与其对应的信道增益成正比, 即 MRC 合并方式时, 将会获得最好的效果。但是考虑到总的系统能耗, 这种做法并不合适。因为对于信道状况比较差的节点来说, 由于其对系统的增益贡献非常小, 而其固有的电路消耗却不可忽略。3.2 节尝试利用 GSC 合并方式来改善系统在能耗方面的性能。

3.2 GSC 的应用及分析

GSC 合并方式一般不占用所有的子信道, 而是根据一定的准则灵活地选择其中若干个信道状态最好的子信道进行合并。当所有的子信道全部被占用时, GSC 合并方式就等同于 MRC 合并方式。为便于描述, 记 $GSC(L, m)$ 表示从 L 个子信道中选择性能最好的 m 个子信道进行合并, $MRC(n)$ 表示对 n 个子信道进行合并。

引入复常数信号 $s(t)$, 使其满足: $s(t) = C_k \|\mathbf{x}\|_2$ 其中 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_L]$, $\|\cdot\|_2$ 表示 l_2 范数。

则信号 $s_i(t)$ 又可以描述为 $s(t)$ 、频谱搬移 $e^{j2\pi f_i t}$ 及加权因子 $w_i e^{-j^2 i}$ 的乘积, 其中, 加权系数 $w_i = x_i / \|\mathbf{x}\|_2$ 。不难看出, $s(t)$ 的功率等于所有节点实际发射信号功率的总和, 其值为

$$P_s = \frac{(4p)^2 d^2 M_1 N_f}{G_t G_r} m \bar{E}_b R_b \tag{12}$$

对应的分配了信道 i 的节点发射功率为

$$P_i = \frac{(4p)^2 d^2 M_1 N_f}{G_t G_r} m \bar{E}_b R_b w_i^2 \tag{13}$$

从式(13)中可以看出, 影响各节点发射功率的变化因素有 m 、 \bar{E}_b 、 w_i 3 项。其中, w_i 调节各节点发射功率占总功率的比重, 在 CSI 条件已知的情况下, 根据发射功率与信道增益成正比的原则可以确定。而 \bar{E}_b 是 m 确定时满足系统误码率需求的比特能量统计平均值, 下面分析采用 $GSC(L, m)$ 方式下所需的平均比特能量 \bar{E}_b 。

根据文献[6], $GSC(L, m)$ 选择方式下的误码率为

$$\begin{aligned}
 P_{GSC(L, m)}(\gamma) &= \sum_{\substack{i, j, \dots, L, n=1 \\ i \neq j \neq \dots \neq n}}^L \{ \gamma(a_i, a_j, \dots, a_n) - \\
 &\sum_{i'=1}^L \frac{a_n \gamma(a_i, a_j, \dots, a_n + a_{i'})}{a_n + a_{i'}} + \\
 &\sum_{\substack{i', j'=1 \\ i' < j'}}^L \frac{a_n \gamma(a_i, a_j, \dots, a_n + a_{i'} + a_{j'})}{a_n + a_{i'} + a_{j'}} - L + \\
 &\frac{a_n}{a_n + \sum_{i'}^L a_{i'}} (-1)^{L-m} \gamma(a_i, a_j, \dots, a_n + \sum_{i'}^L a_{i'}) \} \tag{14}
 \end{aligned}$$

其中, $\gamma = \frac{\bar{E}_b}{N_0}$ 表示接收端的信噪比, $a_i = \frac{1}{\gamma_i}$ 为各子信道平均信噪比的倒数。而

$$\begin{aligned}
 \gamma(a_i, a_j, \dots, a_n) &= \int_0^\infty \int_{y_m}^\infty K \int_{y_2}^\infty \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{y_1 + y_2 + \dots + y_m}) \cdot \\
 &a_i e^{-a_i y_1} a_j e^{-a_j y_2} K a_n e^{-a_n y_m} dy_1 dy_2 \dots dy_m \tag{15}
 \end{aligned}$$

式(14)是否存在闭式解依赖于式(15)是否存在闭式解, 而在独立同分布瑞利衰落条件下只有少数 m 值存在闭式解^[6], 如 $m=1$ (对应选择合并方式, 即 SC 方式), $m=2$, $m=L$ (对应 $MRC(L)$)。所以本文中将采用蒙特卡罗仿真来获得系统的误码性能, 并通过逆推的方式得到所需的信噪比 γ , 从而获得对应的 \bar{E}_b 。图 3 给出了 $L=16$ 时, m 分别取 1、4、8、

16 时的误码率与信噪比的关系,同时也给出了对应 MRC 方式的性能。

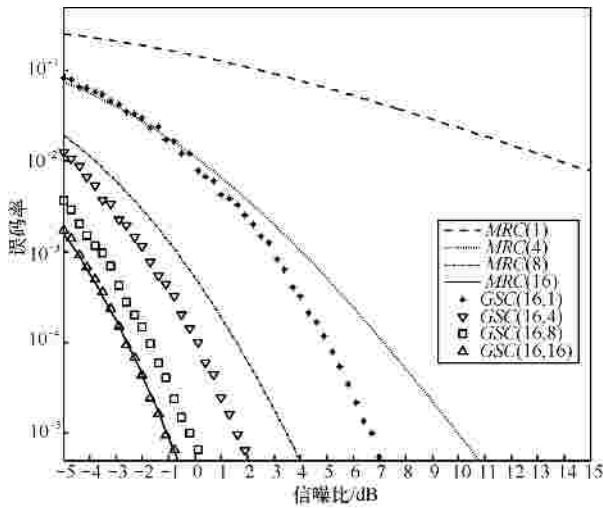


图 3 GSC 和 MRC 的误码率性能比较

从图 3 可以看出,采用 $GSC(L,m)$ 方式的系统性能在 $L > m$ 时优于相应的 $MRC(m)$ 方式,这是因为在 $GSC(L,m)$ 方式中消除了一些状态比较差的信道的影响。而当 $L=m$ 时, $GSC(L,m)$ 方式实质上就是 $MRC(L)$ 方式,此时的仿真结果与理论曲线吻合。图 4 给出了两者在满足系统需求(本文假设为 10^{-5})时所需的平均信噪比。

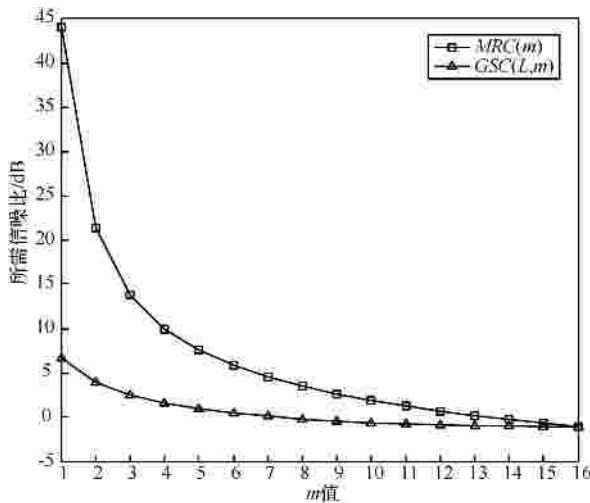


图 4 完成系统性能所需的信噪比

由图 4 可以看出, $GSC(L,m)$ 方式所需的信噪比要小于 $MRC(m)$ 方式。另外随着选择节点数的增加, $GSC(L,m)$ 方式获得的增益趋于平缓,这是因为由于信道条件的逐渐恶化,其对系统增益的贡献也随之降低。图 5 则给出了对应的系统总能耗 E_{bt} (相关参数与第 4 节一致)。

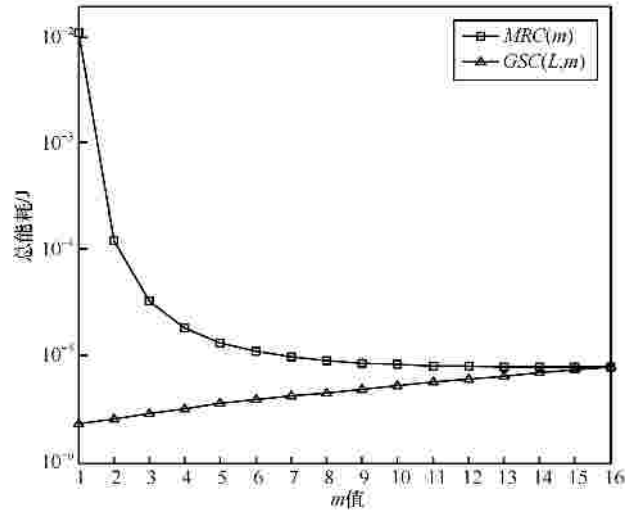


图 5 系统的总能耗

很明显 $GSC(L,m)$ 方式需要的系统总能耗要小于 $MRC(m)$ 方式。另外 GSC 方式下系统总能耗随着选择节点数的增加以近似线性的速度进行增长,这给 3.3 节的节点调度机制中步骤 3)所采用的做法提供了理论支持。

3.3 节点调度

簇首负责对节点进行调度,目的在于选择参与协作的节点,并为其分配相应的信道和发射功率,这是网络具备认知特性的关键。考虑到节点的最大发射功率的限制, m 值的选择不仅要遵循有利于减小网络总能耗的原则,同时也要保证各节点的发射功率满足系统要求。由于在 GSC 方式中使用最好信道的节点(称其为首节点)所发射的功率最大,所以只要该节点的发射功率(由式(13)确定)满足最大功率限制条件就可以保证所有的节点满足系统要求。

m 值确定之后,最简单的一种办法就是将信道随机分配给簇内的任意 m 个节点(称其为随机节点调度)。但是这样可能会造成个别节点过早死亡,解决这种问题的一种有效的手段就是使得剩余能量越大的节点发射功率越大。综合以上分析,现对本文所提的节点调度机制做详细的阐述,具体如下。

- 1) 簇首在每轮数据传输的开始,负责收集各子信道的状态信息以及簇内各节点的剩余能量信息。
- 2) 将簇内成员按照剩余能量的大小进行排序,取前面 L 个节点,并按照剩余能量越大,分配的子信道状态越好的原则将节点与各子信道进行匹配。
- 3) 依次添加各个节点,并检验完成系统要求时首节点所需的发射功率是否满足要求,如果不满足要求,则继续添加。否则将该调度方案作为现行可

选方案，并计算此时需要的系统总能耗 E_{bt_cur} ，将其与备选方案的总能耗 E_{bt_pri} (该值初始化为 ∞) 进行比较。如果 $E_{bt_cur} > E_{bt_pri}$ ，则停止添加节点，并将备选方案作为最终的调度方案，否则将现行可选方案存储为备选方案后继续添加节点。

4) 按照最终的调度方案为选中节点分配子信道和发射功率，完成本轮传输。

对应的流程如图 6 所示，需要指出的是本调度机制同样适用于 COFDM-WSN。

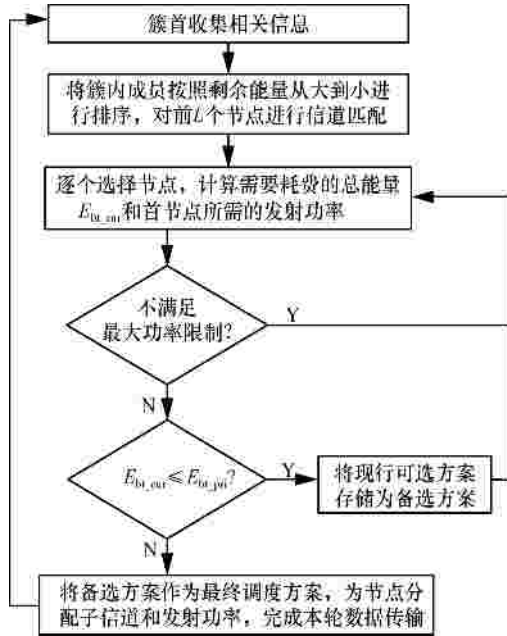


图 6 节点调度流程

4 系统仿真

不失一般性，仿真中簇首节点通过 LEACH 算法形成，由于成簇阶段的时间远小于数据传输阶段持续的时间且该阶段发生的通信仅局限于簇内，所以忽略成簇阶段产生的能耗。网络寿命定义为第一个节点死亡时成功传输的 OFDM 符号数。仿真场景为 100 个节点，其中，每个节点初始能量值为 10J，到目标节点的距离 $d = 500\text{ m}$ ，系统所需的误码率 $P_e = 10^{-5}$ 。参考 $\mu\text{AMPS-1}$ 节点^[17]的性能参数(即传输速率 $R=1\text{ Mbit/s}$ ，放大器最大功耗为 674 mW)，在本仿真中采用相同的值。各子信道建模为平方率衰减的路损加上遵循功率为 1 的零均值循环对称复高斯随机过程，且相互独立^[15]。其他的参数均与文献[12]相同,如表 1 所示。为节省篇幅，节点各处理模块的具体能耗参数不再给出，而给出计算后得到

的综合电路能耗 $P_{c,src}$ 、 $P_{c,relay}$ 和 $P_{c,dst}$ 。

表 1 仿真参数		
参数	意义	取值
M_1	链路余量	40 dB
N_f	噪声系数	10 dB
G_t	发射天线增益	5 dB
G_r	接收天线增益	5 dB
l	载波波长	0.12 m
r	能量效率	0.8
h	峰均比	0.35
e	功率放大器漏极效率	0.515
L	子信道个数	16
d_m	簇半径	10 m
$P_{c,src}$	源节点综合电路能耗	0.098 2 W
$P_{c,relay}$	协作节点综合电路能耗	0.138 6 W
$P_{c,dst}$	目标节点综合电路能耗	0.112 5 W
N_0	高斯白噪声功率谱密度	-171 dB/Hz

图 7 和图 8 分别给出了在其中一次节点调度过程中，逐个添加节点时首节点的发射功率和对应加权系数的变化情况。

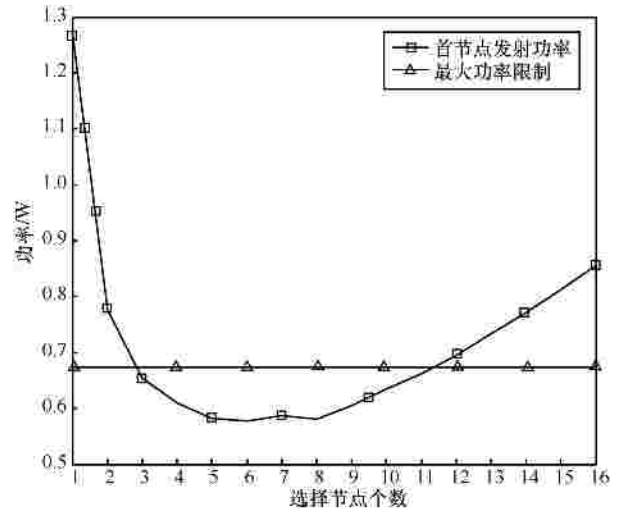


图 7 首节点的功率变化

由图 7 可以看出，随着选择节点数的增加，首节点的发射功率逐渐降低，然后又逐渐升高。这是因为在开始添加节点的过程中，所对应的子信道对系统增益的贡献比较大，满足系统要求所需的 \bar{E}_0 下降较快。随着节点数增加到一定程度后，子信道对系统增益的贡献越来越小， \bar{E}_0 趋于常数，根据式(12)

可知所要发送的总功率逐渐增加，而由图 8 可以看出其加权系数却趋于恒定，所以会导致其发射功率会再次升高。

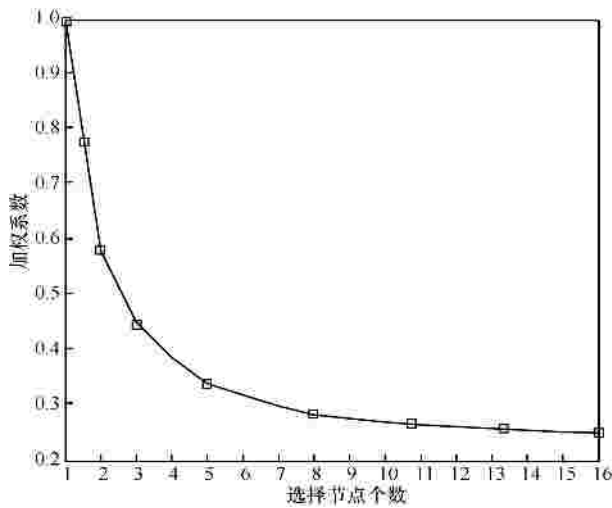


图 8 首节点的加权系数变化

为了满足最大发射功率的要求，协作节点数必须要限制在一定的范围内，对本例而言为[3 11]，结合图 5 可以最终确定满足系统要求的最佳合作节点数为 3。图 9 给出了成功传输 200 个 OFDM 符号时所对应的选择节点个数。

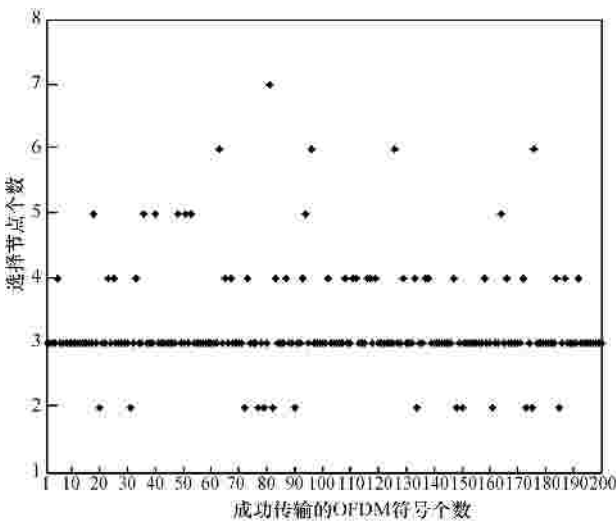


图 9 节点选择个数的变化情况

由图 9 可以看出，选择的节点个数呈现出一定的波动性，同时选择节点的个数从中间某个值(本实验中该值为 3)向两侧依概率逐渐降低。这种波动性是由信道条件的变化而引起的，在数据传输过程中节点调度遵循总能耗最小的原则，就要选择尽可能少的节点，而满足最大发射功率的限制条件则要选

择尽可能多的节点，本文所提的机制在这两者之间做了一个合理的权衡。

为了便于对本机制的整体性能进行分析，比较以下 4 种情形在网络寿命方面的性能。

- 1) 采用随机节点调度的 COFDM-WSN 机制。
- 2) 采用本文节点调度的 COFDM-WSN 机制。
- 3) 采用随机节点调度的非完整 COFDM-CWSN 机制(即除随机节点调度算法外，其他同 COFDM-CWSN 机制)。
- 4) 采用本文完整的 COFDM-CWSN 机制。

图 10 给出了 4 种情形在网络寿命方面的对比图，网络寿命分别为 330、515、1 067、1 436。从图 10 可以看出，情形 2 优于情形 1(或者情形 4 优于情形 3)，这是因为本文节点调度中充分考虑了节点的剩余能量，从而有利于网络的能耗均衡。另外情形 3 优于情形 1(或者情形 4 优于情形 2)，这是因为 GSC 方式充分利用了信道特性和能耗的关系，有效地降低了总能耗。

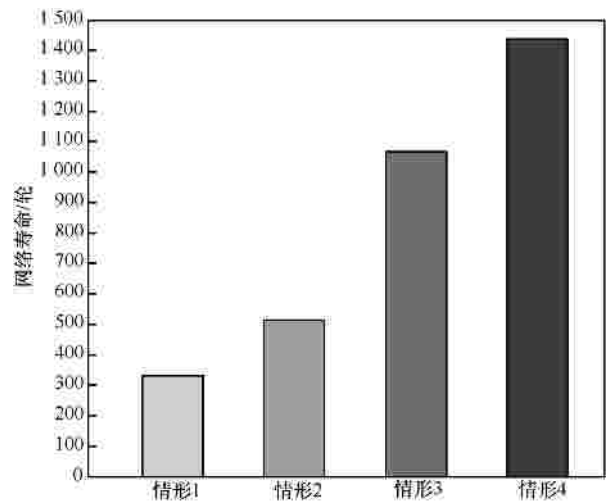


图 10 网络寿命对比

5 结束语

本文提出了一种基于 GSC 的协作 OFDM 传输机制，在发送端利用广义选择合并算法来选择部分状态良好的信道，解决了部分较差的信道对分集增益贡献较小但对总耗能影响较大的问题，在信道选择方面具有较大的灵活性。在节点调度中，充分考虑了节点的剩余能量，并根据节点的功率限制条件和总能耗最小化的原则来决定节点的个数和发射功率，使无线传感器网络具备了一定的认知功能。仿真结果表明，该机制有效地延长了网络的寿命。

本机制的主要困难是如何使得发送端得到精确的信道状态信息，这一点可以通过从周围环境中学习来得到，需要在未来的研究工作中进行考虑。

参考文献：

- [1] MAINETTI L, PATRONO L, VILEI A. Evolution of wireless networks towards the internet of things: a survey[A]. The 19th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)[C]. Split, Croatia, 2011. 1-6.
- [2] BARCELO-LLADO J E, MORELL A, SECO-GRANADOS G. Distributed source coding in large wireless sensor networks[A]. 2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)[C]. Pacific Grove, USA, 2010. 1535-1539.
- [3] WU D, ZHU G, ZHAO D M, *et al.* Energy balancing in an OFDM-based WSN[A]. IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)[C]. Budapest, Hungary, 2011. 1-5.
- [4] ZAHMATI A S, HUSSAIN S, FERNANDO X, *et al.* Cognitive wireless sensor networks: emerging topics and recent challenges[A]. 2009 IEEE Toronto International Conference on Science and Technology for Humanity (TIC-STH)[C]. Toronto, Canada, 2009. 593-596.
- [5] VIJAY G, BEN A B E, IBNKAHLA M. Cognition in wireless sensor networks: a perspective[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 1 (3):582-592.
- [6] KONG N, ENG T, MILSTEIN L B. A selection combining scheme for rake receivers[A]. Fourth IEEE International Conference on Universal Personal Communications[C]. Tokyo, Japan, 1995. 426-430.
- [7] KONG N, MILSTEIN L B. A closed form expression for the average SNR when combining an arbitrary number of diversity branches with non identical rayleigh fading statistics[A]. IEEE International Conference on Communications(ICC'99)[C]. Vancouver, Canada, 1999. 1864-1868.
- [8] LINTON L, CONDER P, FAULKNER M. Multiple-access communications for underwater acoustic sensor networks using OFDM-IDMA[A]. IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges[C]. Biloxi, USA, 2009. 1-8.
- [9] HENAUT J, DRAGOMIRESCU D, PLANAR R. FPGA based high data rate radio interfaces for aerospace wireless sensor systems[A]. Fourth International Conference on Systems(ICONS'09)[C]. Cancun, Mexico, 2009.173-178.
- [10] HENAUT J, DRAGOMIRESCU D, PERGET F, *et al.* Validation of the MB-OFDM modulation for high data rate WSN for satellite ground testing[A]. Fifth International Conference on Systems (ICO '10)[C]. Nice, France, 2010. 41-46.
- [11] BADER A, ABED-MERAIM K, ALOUINI M S. Utilization of OFDM for efficient packet forwarding in wireless sensor network . IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)[C]. Houston, USA, 2011. 1-5.
- [12] TANG W, WANG L. Cooperative OFDM for energy-efficient wireless sensor networks[A]. IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS 2008)[C]. Washington D C, USA, 2008. 77-82.
- [13] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences[C]. Hawaii, USA, 2000. 3005-3014.
- [14] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4):366-379.
- [15] CUI S G, GOLDSMITH A J, BAHAI A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6):1089-1098.
- [16] PROAKIS J G. Digital Communications, Fourth Edition[M]. New York: McGraw Hill, 2000.
- [17] MIN R, CHANDRAKASAN A. A framework for energy-scalable communication in high-density wireless networks[A]. Proceedings of the 2002 International Symposium on Low Power Electronics and Design(ISLPED'02)[C]. Monterey, USA, 2002. 36-41.

作者简介：



秦智超（1981-），男，河北沧州人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为无线传感器网络、认知无线电、无线和移动通信理论与技术等。



周正（1945-），男，上海人，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为短距离通信、无线和移动通信理论与技术等。



赵小川（1984-），男，宁夏银川人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为无线传感器网络、无线和移动通信理论与技术等。



章杨（1980-），男，湖南澧县人，中国石油大学(华东)讲师，北京邮电大学博士生，主要研究方向为无线通信理论与技术。