

# 传感器网络中提高吞吐量的机会波束调度算法

侯卫民, 苏佳\*, 王静

(河北科技大学信息学院 石家庄 050018)

**【摘要】**无线传播环境会影响传感器网络的信息传输质量, 为了提高通信时信噪比和系统的通信速率, 该文采用一种机会调度算法来有效地调度信道状态较好的传感器节点。中心节点采用多天线阵列, 传感器节点采用单天线以节省功率和体积, 通信分为两个阶段, 导频阶段, 多天线阵列随机生成酉波束; 波束选择阶段, 传感器节点接收导频信息后根据预设的阈值判断是否进入通信状态进而选择相应的随机波束。实验表明, 机会调度算法可以有效地提高系统的通信速率。

**关键词** 无线传感器网络; 多天线技术; 机会调度; 阈值

中图分类号 TN911.4 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.03.004

## Opportunistic Beamforming Scheduling Algorithm for Improving the SNR and Communication Rate of Wireless Sensor Networks

HOU Wei-min, SU Jia\*, and WANG Jing

(School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology Shijiazhuang 050018)

**Abstract** Wireless broadcast environment always affects the transmission quality in wireless sensor networks. In order to improve the SNR and communication rate, an opportunistic scheduling algorithm is adopted to schedule the sensor nodes which are in the good channel states. Multiple antennas are equipped at central node, the other nodes are equipped with single antenna to save energy and volume, which is a multiple input and single output multi-user system. The communication is divided into two stages: at first, the random unitary beamforming is generated by multi-antennas at the pilot stage; secondly, after receiving the pilot information, the sensor node determines whether to enter the communication state according to the preset threshold and then selects the corresponding random beam. The properly truncated threshold is given by Monte Carlo method through communication rate comparison under different situations. The results shows that the SNR and communication rate are both improved by the opportunistic scheduling.

**Key words** multi-antennas; opportunistic scheduling; threshold; wireless sensor networks

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)由分布式传感器节点组成, 节点间以无线方式通信, 应用场合十分广泛, 无线传输信道多径传播和多普勒效应会影响信号的有效传输。

无线信道的衰减和延迟会造成接收信号严重失真, 影响通信的质量, 因此提出了大量的抗衰落技术。但机会算法利用信道衰落过程中的变化, 选择峰值时刻通信可以显著提高系统的吞吐量<sup>[1-3]</sup>。无线传感器网络中的大量节点为了节省能量, 一般都处于休眠状态, 只有在被调度时才与中心节点进行通信, 关于调度算法已有大量的相关研究<sup>[4-8]</sup>。

本文中WSNs的中心节点采用多天线阵列, 其他节点采用单天线, 拓扑结构为星型网络。网络采用

机会波束模式调度传感器节点, 中心节点产生随机波束, 若某节点所经历的信道特性与随机波束相匹配时, 则相当于对此节点进行了相干波束形成, 其信干噪比(SINR)最大, 最适宜与中心节点进行通信。文章分析了采用带有阈值的机会波束算法后, 无线传感器网络中SINR、容量及反馈量的改善。

### 1 机会波束调度算法和系统模型

无线传感器网络结构如图1。中心节点配置天线阵列产生 $M$ 个随机波束, 网络中共存在 $K(K \gg M)$ 个传感器节点, 与中心节点之间为单跳的距离<sup>[9-15]</sup>。 $M$ 个天线产生随机波束, 通过反馈SINR值选择传感器节点, 且中心天线阵列的机会波束随机产生保证分

收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-05-04

基金项目: 国家863计划(2015AA7013030); 河北省教育厅高等学校科学研究计划(ZD2015033)

作者简介: 侯卫民(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线传感网、阵列信号处理方面的研究。

通信作者: 苏佳, E-mail: sujia@hebest.edu.cn

布式节点的公平性。传感器节点设定反馈阈值, 对接收SINR进行判决, 并只反馈大于门限值的SINR。中心节点选择最大信干噪比节点进行突发通信。

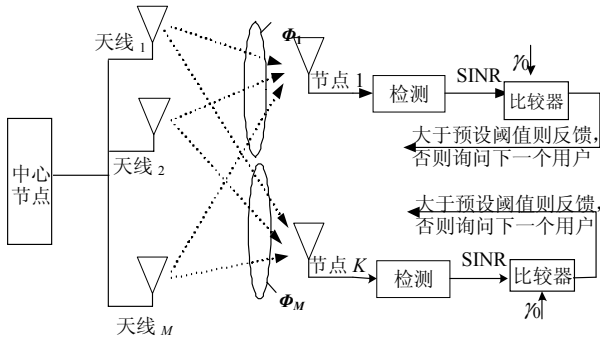


图1 无线传感器网络系统

图1所示中心站天线阵列在一帧内产生正交波束  $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_M] \in C^{M \times M}$ ,  $\Phi$  为  $M$  维随机预编码酉矩阵, 各列向量彼此正交,  $\Phi_i (1 \leq i \leq M)$  为第  $i$  个加权矢量。假设经历平坦衰落, 即信道相干时间大于符号持续时间, 衰落统计特性为Rayleigh分布。系统中第  $i$  个节点的接收信号为:

$$y_i = \sqrt{\frac{P}{M}} H_i \Phi x_b + N_i = \sqrt{\frac{P}{M}} H_i \Phi_b x_b + \sqrt{\frac{P}{M}} \sum_{j=1, j \neq b}^M H_i \Phi_j x_j + N_i \quad (1)$$

式中,  $H_i \in C^{1 \times M}$  为第  $i$  个节点与中心节点间的信道状态, 其分布为  $N(0,1)$  的 i.i.d. 的复高斯随机变量;  $P$  为平均发射功率;  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_B]^T \in C^{M \times 1}$  为随机波束的信息符号, 且  $|x_b|^2 = 1$ ;  $N_i \in C^{1 \times M}$  为  $N(0,1)$  分布的加性高斯白噪声。

在发射端已知信道状态信息 (channel state information, CSI) 的情况下, 利用奇异值分解将信道分解成多个并行空间子信道, 提高系统通信速率。在发射端未知CSI情况下, 中心天线阵列利用随机的预编码矩阵作为发射波束, 当此随机矩阵恰好与某个传感器节点的信道矩阵奇异值分解法相吻合时, 同样获得了已知CSI的效果。通过判断各节点反馈的接收信干噪比找到适合进行通信的节点, 其流程如图2所示。

机会波束调度算法按以下步骤进行:

- 1) 中心节点的  $M$  个天线产生  $M$  维随机酉矩阵  $\Phi$ , 并发送导频信息  $x_p$ 。
- 2)  $K$  个传感器节点分别计算每个随机波束上传输信息的  $SINR_{k,m}$  值 (即编号  $k$  的传感器接收第  $m$  个波束的信噪比值), 估计此时中心节点与传感器节点间的信道状态。

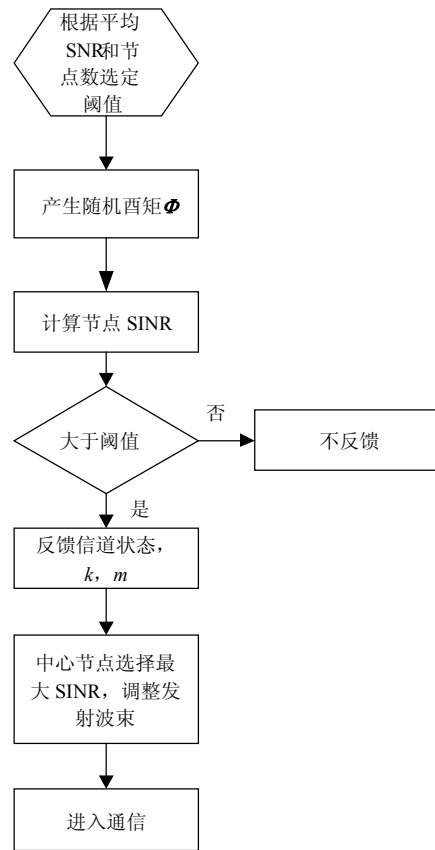


图2 算法流程

3) 传感器节点选择最大接收SNR, 并将其与预设的门限SNR进行比较, 若大于则反馈波束编号和此时的信道状态。

4) 中心节点根据反馈信息选定此时隙内的通信传感器节点, 并根据信道状态对发射波束进行调整, 舍弃没有反馈信息的发射波束。

5) 选定  $N (N \leq M)$  个传感器节点, 发射  $N$  个发射波束进行通信。

6) 下一个时隙再次生成随机酉波束矩阵, 并按照算法步骤选择通信节点。

## 2 性能分析与仿真

### 2.1 自适应截断机会波束策略

根据平均信噪比和系统中的用户数设定节点的信干噪比阈值, 若无线传感器网络的节点平均信噪比不同, 则门限阈值也不同; 截断门限根据蒙特卡罗仿真法得到不同状态下的最优门限值设定, 部分取值如表1所示。进入训练序列阶段, 中心节点  $M$  (一般为  $3 \sim 8$ ) 个天线利用随机酉矩阵进行发射波束成形, 网络节点计算对应于不同发射波束的接收信干噪比并存储; 一旦接收的信干噪比大于阈值, 则反馈相应的节点编号、发射波束编号  $n$  与瞬时接收信干

噪比, 收到反馈后中心节点停止训练序列阶段, 确定其与第一个反馈的用户利用该机会波束  $\Phi_n$  进行通信, 并截断其他的  $M-1$  个波束。若接收的信干噪比小于截断门限则不反馈, 中心节点继续询问下一个节点, 直至所有随机发射波束均找到合适的通信节点。

表1 10 dB下系统截断门限值

节点个数	20~60	60~120	120~200	200~300
阈值/dB	0.8~1	1~1.2	1.3	1.3

训练序列阶段中心节点随机产生的机会波束使得通信阶段选中的传感器节点也是随机的, 不会造成过度使用某个节点而使其失效。

### 2.2 节点SNR分析

训练序列阶段, 中心节点发射了  $M$  个正交随机波束, 而在通信阶段, 中心节点仅保留了与网络中选节点信道状态最为匹配的正交波束  $n$ , 且所有的能量均分配给波束  $n$ 。此时网络节点中不再接受干扰信号, 因此只需分析此时选中网络节点的信噪比 SNR。那么节点  $i$  对应于发射波束  $n$  的接收 SNR 为:

$$SNR_{i,n} = \rho |H_i \Phi_n x_n|^2 = z \quad (2)$$

因而  $z$  服从自由度为 2 的  $\chi^2$  分布, 即:

$$f_z(z) = e^{-z} \quad (3)$$

由于传感器节点值反馈大于预设门限 SNR 的波束编号和信道状态, 设门限 SNR 为  $\gamma_0$ , 故节点反馈概率为:

$$P_{FB} = 1 - F_{SNR}(\gamma_0) = (1 + \gamma_0)^{-(M-1)} e^{-M\gamma_0/\rho} \quad (4)$$

式中,  $\gamma_0$  依据网络节点的所需的传输速率设定, 根据香农定理可知, 若网络节点的传输速率为  $v$  bps/Hz, 则:

$$\gamma_0 \geq 2^v - 1 \quad (5)$$

此处, 令  $\gamma_0 = 2^v$ 。

### 2.3 系统仿真

为了分析在无线传感器网络中采用机会调度算法后的性能, 利用 MATLAB 仿真软件进行仿真验证。设中心节点的天线阵列产生的波束为 6 维, 信道为单位方差的瑞利衰落信道, 信号发射功率设为 10 dB。

图3画出了100个节点时, 机会波束调度算法和一般系统(指未采用本算法的无线传感器系统, 以下简称一般系统)中系统信噪比的分布函数, 截断门限

设为 0 dB(假设所有节点通信速率要求一致)。可以看出采用机会调度算法后, 系统的 SNR 集中分布在 0~4 dB, 而一般系统的 SNR 分布在 -10 dB 左右, 由此可知节点接收 SNR 取大值的概率明显增加, 提高了十几倍, 随着通信 SNR 的增加, 系统容量必然随之增加, 采用机会调度算法可以提高系统的容量。

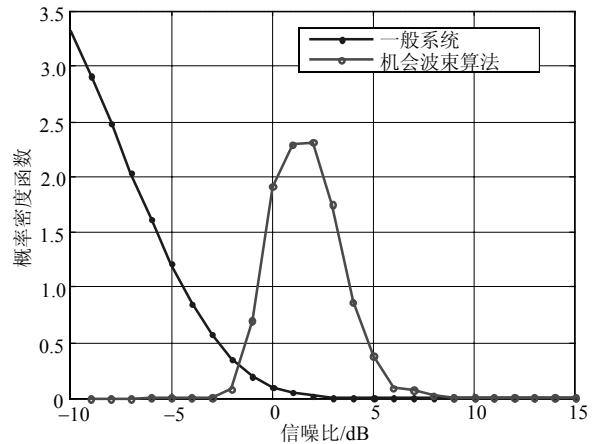


图3 机会调度算法中SNR的概率密度函数

图4给出了不同节点数的采用带有阈值的机会调度系统中节点反馈量与一般系统中节点反馈量之比, 从图中可以看出, 随着用户数的增加, 机会调度系统的反馈量少的优势就更加明显。

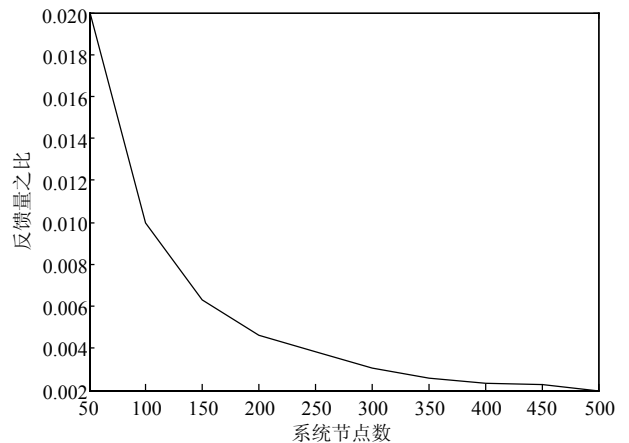


图4 机会调度算法与一般系统的反馈量之比

图5仿真了无线传感器节点数  $K$  取值为 80、160、300 时的系统容量。仿真结果表明, 采用带有不同阈值的机会调度系统的容量, 在节点数较低时的系统吞吐量低于节点数高的系统, 这是因为随着用户数的增加, 带来的多用户增益也增加, 因此系统吞吐量增加。而且随着阈值的增加系统吞吐量也增加, 这是因为阈值增加, 系统反馈的 SNR 也变大, 根据香农定理可知道随着信噪比的增加, 系统容量也增加。

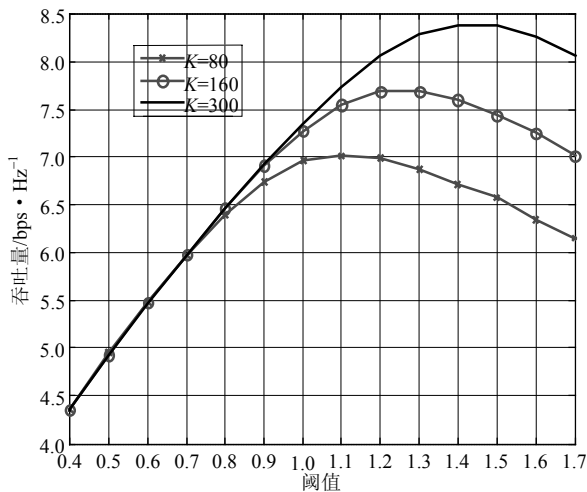


图5 机会调度算法下的系统容量

### 3 结束语

本文提出了在无线传感器网络中采用机会波束调度算法, 给出了算法流程, 通过仿真和分析得到了机会调度算法下系统的反馈量和系统容量, 表明采用机会波束调度算法后, 在降低系统反馈链路负荷的同时, 保证了系统的吞吐量。

#### 参考文献

- [1] VISWANATH P, TSE D N C, LAROAIA R. Opportunistic beamforming using dumb antennas[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [2] SHARMA N, OZAROW L H. A study of opportunism for multiple-antenna systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(5): 1804-1814.
- [3] MINGHUA X, YUANPING Z, HA J. Opportunistic beamforming communication with throughput analysis using asymptotic approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2608-2614.
- [4] AHMED M A, MAHMOUD H I, HAZIM T. Opportunistic beamforming using dumb basis patterns in cognitive multiple access channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017(99): 1-1.
- [5] TSAI J A, BUEHRER R M, WOERNER B D. Spatial fading correlation function of circular antenna arrays with Laplacian energy distribution[J]. IEEE Communications Letters, 2002, 6(5): 178-180.
- [6] JUNYOUNG N, ANSUMAN A, AHN J Y, et al. Joint spatial division and multiplexing: opportunistic beamforming, user grouping and simplified downlink scheduling[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 876-890.
- [7] 彭颖, 王高才, 黄书强, 等. 移动网络中基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略[J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1162-1175.  
PENG Ying, WANG Gao-cai, HUANG Shu-qiang, et al. An energy consumption optimization strategy for data transmission[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(6): 1162-1175.
- [8] 喻莉, 郑军, 罗超. 认知无线电中多址接入的随机延时边界分析[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2307-2313.  
YU Li, ZHENG Jun, LUO Chao. Stochastic delay bound analysis for multiple access in cognitive radio systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(10): 2307-2313.
- [9] GILWON L, SUNG Y C, SEO J Y. Randomly-directional beamforming in millimeter-wave multiuser MISO downlink[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2016, 15(2): 1086-1100.
- [10] THARAKA S, HAZER I, JAMIE S E. Modeling and analysis of opportunistic beamforming for poisson wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3732-3745.
- [11] LI Tan, LI Zhong-cai, XU Chao, et al. Partly random multiple weighting matrices selection for orthogonal random beamforming[J]. Journal of Communications and Networks, 2017, 18(6): 892-901.
- [12] QIAN Zhang, QI Xi, CHEN He, et al. User clustered opportunistic beamforming for stratospheric communications[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(9): 1832-1835.
- [13] FAIZAN Q, KAHARUDIN B D, MHD N H, et al. A comprehensive review on coordinated multi-point operation for LTE-A[J]. Computer Networks, 2017, 123(4): 19-37.
- [14] INOUE H, BENJEBBOURI A, HIGUCHI K. A study on beamforming matrix control method in non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular downlink[J]. Technical Report of Ieice Rcs, 2013(113): 183-188.
- [15] DU C D, LUNA-RIVERA J M. Distributed power allocation algorithm in wireless networks under SNR constraints[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2013, 67(12): 1015-1024.

编辑 税红