

负载均衡的异构 WMSN 节点布局方法

朱永红^{1,2}, 丁恩杰¹

(1. 中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221116; 2. 徐州工程学院 信电学院, 江苏 徐州 221111)

摘要: 传统无线传感器网络的多跳传输会在靠近 sink 节点的位置出现能量空洞, 证明在异构无线多媒体网络中, 传感器能量空洞会出现在网络的任何位置, 并提出基于负载均衡的节点布局方法来避免能量空洞。在进行节点能耗分析时综合考虑了节点数据收发能耗、数据处理能耗以及数据压缩比, 详细讨论并证明数据处理能耗对节点布局的影响, 提出数据处理收益的概念。仿真结果显示, 利用所提出的方法进行节点布局, 能够提高网络能量利用率, 延长网络生存周期。

关键词: WMSN; 节点布局; 负载均衡; 数据处理; 能量空洞

中图分类号: TP 393

文献标识码: A

Method of node distribution for heterogeneous WMSN based on load balancing

ZHU Yong-hong^{1,2}, DING En-jie¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221111, China)

Abstract: Multiple hop transmission in wireless sensor networks (WSN) would bring the energy hole problem near the sink. It proved that the energy hole problem would appear in any position in heterogeneous wireless multimedia sensor networks and propose a method of the node distribution based on load balancing to solve the problem. The energy consumption was analyzed on the basis of considering the data compression ratio and the energy consumed for data transmission and processing. It proved that in heterogeneous WMSN the energy consumption of data processing would affect the node distribution and define a word that profit of data processing. The simulation results show that the energy utilization rate and the survival time of the network can be effectively improved by using the method proposed.

Key words: WMSN; node distribution; load balancing; data processing; energy hole

1 引言

在无线传感器网络(WSN)中, 信息的多跳传输会导致能量空洞(energy hole)的问题^[1]。越靠近 sink 的节点需要转发的数据量越大, 节点负载的差异导致 sink 附近的节点能量被快速耗尽, 出现能量空洞, 最终造成整个网络通信中断。通过合理的节点布局, 有助解决这一问题, 提高网络的生存周期。

对于 WSN 节点布局和能量空洞问题的研究国内外学者已经做了大量的工作, 文献[2]证明了在节

点非均匀分布的圆形网络中, 如果节点持续向 sink 节点发送数据, 能量空洞现象将无法避免, 而当节点数目满足一定关系时, 网络中能够实现次优能耗均衡。提出一种节点非均匀分布策略及相应的路由算法用于实现这种次优能耗均衡。文献[3]研究了能量无线多跳传输技术, 通过改进 WSN 节点硬件, 使其能够无线传输和接收能量, 通过无线充电的方式给 sink 附近的节点进行充电, 防止能量耗尽导致的节点死亡, 解决能量空洞的问题。文献[4]提出用移动 sink 的方式避免能量空洞, 提高网络的生存周期。文献[5]给出了能量空洞的预测

收稿日期: 2014-11-03; 修回日期: 2015-04-03

基金项目: 国家科技支撑计划基金资助项目 (2012BAH27B04, 2012BAH12B01)

Foundation Item: The National Key Technologies R&D Program of China (2012BAH27B04, 2012BAH12B01)

和避免方法,并证明了能量空洞的形成与节点通信半径相关。文献[6]给出空闲侦听的方式获取负载情况,在负载不同的区域布局相应数量的节点,以达到负载相似,从而避免能量空洞的出现。文献[7]给出了多对一的传感器网络能量空洞问题的分析模型,并利用该模型对当前几种节点布局方法的优越性进行验证。指出利用分层结构和数据压缩机制能有效缓解能量空洞的问题,单位时间内收集的数据量越大,会加剧能量空洞的形成,而节点密度不会增加。文献[8]通过理论分析,得到网络中能量空洞的形成时间和位置以及持续时间的长短和空洞的大小,使网络生存周期最大化。并且认为网络的第一个节点死亡时间(FDT)和全部节点死亡时间(ADT)与节点通信半径有关,与节点密度无关。

上述文献作者较好地解决了传统 WSN 的能量空洞问题。无线多媒体传感器网络(WMSN)是在无线传感器网络中引入音频、视频等多媒体传感器而形成。随着硬件技术的发展,WMSN 已经被广泛应用与各个领域,包括监视、目标跟踪和环境监测等^[9]。与 WSN 一样,信息的多跳传输会导致能量空洞问题。与传统 WSN 不同的是,传统 WSN 一般认为能量的绝大部分消耗在无线收发过程中,能耗分布呈“聚集”状态。而 WMSN 由于采集数据量较大的多媒体信息,其图像采集、处理、存储器访问、无线收发等能耗基本相当,呈“均匀”分布状态^[9]。所以,关于 WSN 节点布局的研究结果不适合直接用于无线多媒体传感器网络。

文献[10]研究了与 WMSN 类似的(WISN, wireless image sensor network)的能量空洞问题,文中假设图像传感器节点以线性阵列的方式布局,通过调整节点间的距离使每个节点能量消耗相当,达到能耗均衡的目的,可以防止能量空洞。作者详细分析了节点的能耗情况,包括数据收发能耗、数据压缩能耗以及空闲侦听能耗。但是,文中的节点布局方式局限性较大(要求节点分布在一条直线上),并假设数据传输时需要经过内部每个节点,没有考虑路由,不太符合实际应用中的情况。

在实际应用中,多媒体信息的采集通常是针对特定目标,多采用异构多媒体传感器网络,如图 1 所示。

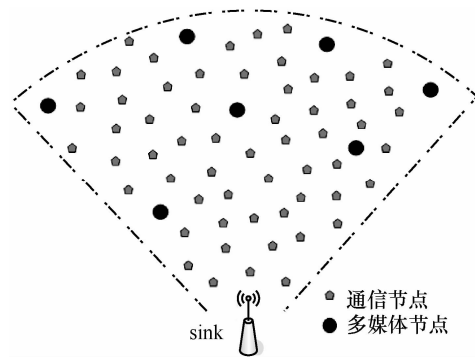


图 1 异构 WMSN

异构 WMSN 由多媒体节点(MSN, multimedia sensor node)和无线通信节点(CN, communication node)组成。

MSN: 多媒体信息的采集,本文讨论的多媒体信息指视频信息。

CN: 数据转发,参与协作数据处理。

那么,在异构 WMSN 中,能量空洞是否仍然出现在靠近 sink 节点的位置?节点数据处理能耗会产生何种影响?对于这个问题目前尚未有人研究。

2 问题描述及模型

2.1 问题描述

在图 1 所示网络中,MSN 采集视频信息,CN 协作 MSN 将数据进行处理并以多跳的形式传输至 sink 节点。在实际应用中异构 WMSN 有 2 种情况。

- 1) MSN 在观测区域内均匀分布。
- 2) MSN 布置在某个需要观测的点,位置随机。

显然,部分区域的 CN 需要转发外层数据,容易过早消耗完能量,导致节点死亡,存在上述能量空洞问题。MSN 只负责信息的采集和处理,不参与信息转发,不存在上述能量空洞。本文只讨论 CN 的能量空洞问题。

经过分析发现,能量空洞出现的根本是由于部分区域的节点负载过大造成的,如果在该区域布置数量较多的节点,使负载由相应数目的节点进行分担,达到每个节点负载均衡,能够避免能量空洞的出现。

2.2 相关模型

1) 网络模型

网络采用基于 ring 的网络模型,如图 2 所示,假设网络覆盖范围为一个半径为 R 的圆形区域, r 为节点通信半径。根据节点到 sink 的跳数,将网络

进行分层，圆形区域划分为 $i = \frac{R}{r}$ 个等宽的环形区域 (设 $R \gg r$, 且 R 能被 r 整除)。由内而外为每个环形区域依次编号, 并用 M_i 和 $N_i (1 \leq i \leq R)$ 表示第 i 个环形区域内 MSN 和 CN 的数量。

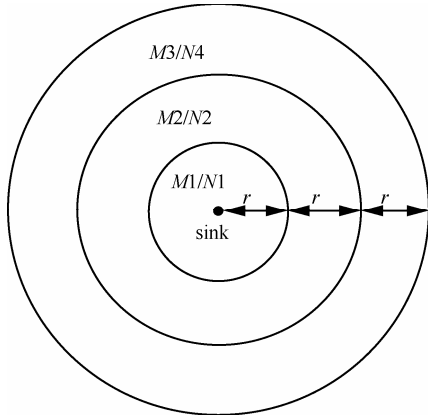


图 2 网络模型

2) 能耗模型

网络中各 CN 能耗由 3 部分组成：发送信息、接收信息和处理信息。由于空闲侦听、路由发现等能耗所占比重较小，这里不考虑。本文采用和文献 [11] 相似无线传输模型，如图 3 所示。

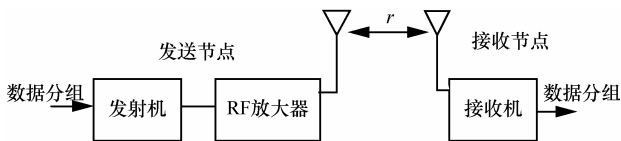


图 3 无线传输能耗模型

发送能耗： $E_T = (E_{elec} + \mu r^n) b$

接收能耗： $E_R = E_{elec} b$ 。

其中， b 表示单位时间产生的信息量； r 是发送距离； E_{elec} 是为射频能耗系数； μ 为电路放大器能耗系数； n 是路径损耗指数。

假设数据处理能耗： $E_c = \gamma b$

其中， γ 是处理单位比特数据耗费的能量，若采用基于双正交重叠变换(LBT, lapped biorthogonal transform) 压缩算法^[12]，处理每比特数据需要的能耗为

$$E_{CP} = 2(E_{pre} + E_{DCT}) + E_{code}$$

其中， E_{pre} 是 LBT 行时域预处理能耗； E_{DCT} 是行列 DCT 能耗； E_{code} 是编码能耗。利用文献 [12] 提出的分布式图像压缩算法，为了降低单个节点的计算复杂度和能量消耗，MSN 节点与周边的 CN 节点协作完成图像压缩与传输任务，LBT 行时域预处理由 MSN 完成，所以 $\gamma = E_{pre} + 2E_{DCT} + E_{code}$ 。

3 相关技术

3.1 数据压缩

资源受限的无线多媒体传感器网络中处理大量的视频数据，通常采用分布式数据压缩技术^[12-14]，Lu 等在分簇的网络结构中使用基于 LBT 的分布式协同图像压缩方案^[12]，为了降低单个节点的计算复杂度和能量消耗，MSN 节点与周边的 CN 节点协作完成图像压缩与传输任务，如图 4 所示。MSN 节点负责图像采集以及图像数据的列时域预处理，并将数据传输至 CN 节点；CN 节点负责进行列 DCT、行时域预处理、行 DCT 以及 8×8 LBT 系数块的编码；最后将压缩得到的码流转发出去。

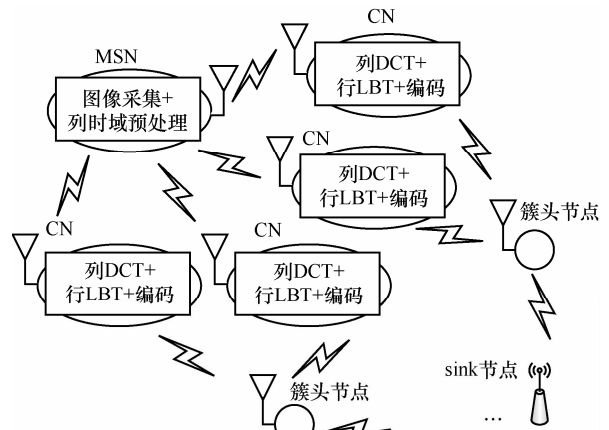


图 4 分布式图像压缩

假设 MSN 选择与自己同一层次的 CN 协作进行数据的压缩处理，下面证明该假设的合理性。

证明 根据无线数据能耗模型^[11]

发送能耗为

$$E_T = (E_{elec} + \mu r^n) b$$

接收能耗为

$$E_R = E_{elec} b$$

由数据发送能耗模型可见传输距离 r 的增加会使能耗急速增大，未压缩前的多媒体数据量巨大，应该尽量选择距离较近的节点进行协作压缩。根据多媒体节点位置不同有 3 种情况，如图 5 所示。

1) 多媒体节点 1 在本层次中间位置，距离其较近的节点就是本层节点。

2) 多媒体节点 2 在靠近外层的位置，距离其较近的节点有外层节点和本层节点，设压缩前数据量为 b_1 ，压缩后数据量为 $b_2 (b_2 \ll b_1)$ ，如果选择外层节点进行协作压缩，能耗情况如下。

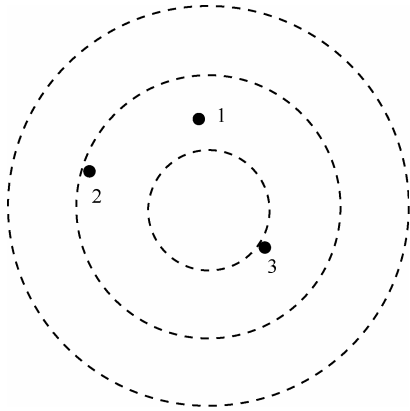


图 5 多媒体节点位置

外层节点接收能耗为

$$E_R = E_{elec} b_1$$

外层节点发送能耗为

$$E_T = (E_{elec} + \mu r^n) b_2$$

压缩完的数据仍然需要本层节点进行转发。

本层节点接收能耗为

$$E_R = E_{elec} b_2$$

本层节点发送能耗为

$$E_T = (E_{elec} + \mu r^n) b_2$$

如果选择本层节点进行协作压缩, 能耗情况如下。

本层节点接收能耗为

$$E_R = E_{elec} b_1$$

本层节点发送能耗为

$$E_T = (E_{elec} + \mu r^n) b_2$$

由于用于数据处理的能耗都相同, 这里不进行讨论。显然, 选择本层节点进行协作压缩的代价小于选择外层节点。

3) 多媒体节点 3 在靠近内层的位置, 距离其较近的节点有内层节点和本层节点, 同上, 选择内层节点进行协作压缩的代价小于选择本层节点。但是, 本文目标是内外层节点“负载均衡”, 为了避免增加“最内层”节点的负载, 不选择内层节点进行数据协作压缩。

综上, MSN 选择与自己同一层次的通信节点协作进行数据的压缩处理是合理的。证毕。

3.2 路由

假设网络采用基于能量均衡的路由^[15,16]。如 DING 提出了机会熵模型来表征网络内各节点状态的时变性以及剩余能量, 以机会熵模型作为选择下

一跳节点的理论依据, 蚂蚁选择下一跳节点的选择概率为

$$P(u_j, t) = \frac{\tau(u_j, t)}{\sum_{i \in N(u)} \frac{S_{op}(u_i, t)^\alpha \tau(u_i, t)}{S_{op}(u_i, t)^\alpha}}, u_j \in N(u)$$

其中, $N(u)$ 为 u 节点的邻居集, u_i 和 u_j 分别为 u 节点邻居集中的节点; $P(u_j, t)$ 为在第 t 时刻, 蚂蚁将报文从节点 u 传递到下一节点 u_j 的概率, $\tau(u_j, t)$ 为在第 t 时刻下, 节点 u_j 上的信息素浓度; $S_{op}(u_j, t)$ 为在第 t 时刻下, 节点 u_j 的机会熵; α 为系统参数, 用来调整 $S_{op}(u_j, t)$ 对 $P(u_j, t)$ 中的影响程度。在传输过程中, 选择 P 值最大的节点作为下一接收节点, 能够有效地选择下一跳节点, 从而使网络内各节点的通信资源和能量资源达到负载均衡。

4 数据处理能耗的影响

如上述, WMSN 与传统 WSN 的能耗分布不同, WMSN 的数据处理能耗与数据收发能耗相当, 不可忽略, 那么, 这部分能耗对能量空洞产生何种影响, 下面进行分析。

如果不考虑节点数据处理能耗, 由于内层节点除了要转发本层 MSN 采集的数据, 还要转发外层节点的数据, 所以, 越靠近 sink 的节点负载越大, 容易出现能量空洞。若要能耗均衡, 图 2 网络模型中外层节点数目应该和从本层开始所有外层 MSN 的数目相关。即

$$\frac{\sum_{j=i}^R M_j}{N_i} = \frac{\sum_{j=i+1}^R M_j}{N_{i+1}} \quad (1)$$

可以看出, 节点数量从内到外依次减少。而实际上, 由于网络中采用数据压缩技术, 节点转发的数据是压缩后的数据, 数据量远远小于压缩前。同时, 数据的压缩处理, 根据前面的假设, 由本层 CN 协作完成, 需要消耗和数据收发相当的能量。考虑这两点, 需要进一步分析。

用 E_i 表示第 i 层 CN 单位时间的能耗, c 表示每个 MSN 单位时间内采集的数据量, ϕ 表示数据压缩比, 有

$$E_i = E_c + E_R + E_T = \gamma b_c + E_{elec} b_R + (E_{elec} + \mu r^n) b_T \quad (2)$$

其中, b_c 、 b_r 和 b_t 分别表示节点需要处理、接受和发送的数据比特数。当 $1 \leq i < R$ 时, 第 i 层 CN:

1) 处理本层 MSN 采集的数据

$$b_c = M_i c$$

2) 接收本层 MSN 采集的数据, 接收外层所有 MSN 压缩后的数据

$$b_r = M_i c + \varphi \sum_{j=i+1}^R M_j c$$

3) 转发本层和外层所有 MSN 压缩后的数据

$$b_t = \varphi \sum_{j=i}^R M_j c$$

当 $i=R$, 即为最外层时的特殊情况, CN 的能耗只含接收、处理和转发本层 MSN 采集的数据

$$b_c = b_r = M_R c, b_t = \varphi M_R c$$

这里讨论 $1 \leq i < R$ 的一般情况。

若要使各层节点能耗均衡, 每层节点能持续存活时间相当, 有

$$\frac{E_0 N_i}{E_i} = \frac{E_0 N_{i+1}}{E_{i+1}}, \quad 1 \leq i < R \quad (3)$$

其中, E_0 为节点初始能量。

结合式(2)和式(3), 可得

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{E_{i+1}}{E_i} = 1 + \frac{M_{i+1} - M_i - \beta M_i}{M_i + \beta \sum_{j=i}^R M_j} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\varphi(2E_{\text{elec}} + \mu r^n)}{\gamma + E_{\text{elec}} - \varphi E_{\text{elec}}} \quad (5)$$

定义 1 在相同的硬件条件下 (E_{elec} 、 μ 、 r 相同), β 由数据处理能耗系数 γ 和数据压缩比 φ 确定 (式 5), 且 $\beta > 0$, 显然, β 越大, 将 1 bit 数据压缩至一定比率 φ , 消耗的能量 γ 越小, 用于数据压缩的能耗小于压缩后因数据量减小而节约的数据传输能耗, 数据处理带来的收益越大, 能够节约能耗。相反 β 越小, 将数据压缩至一定比率 φ 的 γ 越大, 用于数据压缩的能耗抵消了压缩后数据量减小带来的能耗节约, 数据处理带来的收益越小, 数据处理不仅不会减少能耗, 还可能增加能耗。称 β 为“数据处理收益”。

综上所述, 异构多媒体传感器网络中, 数据处理能耗会对网络能耗均衡情况产生上述影响, 不可忽略。同时, 如果确定了网络规模 (层数), 相

邻层次节点数目按式(4)比例进行布局, 可以使节点负载均衡, 每层节点能够存活的时间相当, 防止能量空洞的出现。

5 节点布局及能量空洞位置

5.1 负载均衡的节点布局

本文结合在实际应用中 MSN 的 2 种分布情况分别进行讨论。

1) MSN 在区域内均匀分布, MSN 的数量与面积成正比, 假设 A_i 为 i 层的面积, 根据式(4)有

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = 1 + \frac{A_{i+1} - A_i - \beta A_i}{A_i + \beta \sum_{j=i}^R A_j}$$

将圆环面积 $A_i = \pi[(ir)^2 - (i-1)^2 r^2]$ 代入有

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = 1 + \frac{2 - \beta(2i-1)}{2i-1 + \beta \left(\frac{R}{r}\right)^2 - \beta(i-1)^2} \quad (6)$$

由式(6)可知, 相邻层次的 CN 布局数量比值与节点所在的层 i 和数据处理收益 β 相关。当 β 的值较小, 即数据压缩带来的收益较小时, 式(6)中 $\frac{N_{i+1}}{N_i} > 1$, 即外层需要比内层布局更多的 CN 节点,

数量从内而外递增。这是因为外层面积大, MSN 数量更多, 采集的数据量更大, 由于 β 值较小, 将数据压缩到一定比率需要耗费更多的能量, 数据处理占用了节点的主要能耗。

当 β 值较大时, 式(6)中 $\frac{N_{i+1}}{N_i} < 1$, 即内层需要

比外层布局更多的 CN 节点, 数量从内而外递减。这是由于数据处理耗费的能量较少, 节点能耗主要用于数据的收发, 而内层节点需要转发外层节点的数据, 需要布局更多的节点。

当然, 当 β 的值适当时, $\frac{N_{i+1}}{N_i}$ 的值可能为 1,

即每层需要布局的节点数量相同。

2) 针对兴趣点随机布局 MSN 的网络, 由式(4)可以得到

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} \begin{cases} > 1, & M_{i+1} > (1 + \beta)M_i \\ = 1, & M_{i+1} = (1 + \beta)M_i \\ < 1, & M_{i+1} < (1 + \beta)M_i \end{cases}$$

即为了达到负载均衡, 网络相邻层次的 CN 布局情况和其所在层次中的 MSN 数量 M_i 以及数据处

理收益 β 相关，当外层 MSN 数量大于内层数量的 $1 + \beta$ 倍时，外层需要更多的 CN；当外层 MSN 数量等于内层数量的 $1 + \beta$ 倍时，外层需要和内层相同数量的 CN；当外层 MSN 数量小大于内层数量的 $1 + \beta$ 倍时，内层需要更多的 CN。由于层次中 MSN 数量不确定，网络各层次需要布局的 CN 数量也不确定，不一定呈由内而外递增或递减的趋势。

5.2 能量空洞位置

为了达到负载均衡，网络中能耗较大的层次需要布局更多的 CN，也就是说，负载均衡时网络中 CN 数量最多的层次就是能量消耗最大的层次，即为最容易节点能量耗尽出现能量空洞的位置。根据 5.1 节的分析，异构 WMSN 中，若 MSN 均匀分布，网络各层次需要布局的 CN 数量由内而外递增或递减，能量空洞可能出现在最内层或最外层；若 MSN 随机分布，网络各层次需要布局的 CN 数量不确定，不一定呈由内而外递增或递减的趋势，能量空洞可能出现在任何一层。

6 仿真结果

利用 Matlab 将本文提出的方法和文献[2]提出的方法以及均匀布局方法进行仿真对比。

假设在一个 $R=1\ 000$ 的圆形区域内，分布若干 MSN 进行多媒体信息采集，相关参数的取值与文献[8]相同，仿真参数如表 1 所示。

将对 φ 为 0.1 时不同 γ 值得出不同 β ，讨论节点布局情况，分析能量利用情况以及数据处理对节点布局情况的影响。由于通常数据处理与无线收发能耗基本相当，不妨取 γ 值为以下 3 种情况：

- 1) $\gamma \ll E_{elec}$;
- 2) $E_{elec} \leq \gamma \leq E_{elec} + \mu r^n$;

$$3) \gamma \gg E_{elec} + \mu r^n .$$

这里取 $\gamma = 0.1E_{elec}$ 、 $2E_{elec}$ 、 $10E_{elec}$ 这 3 个值。

表 1 仿真参数

参数	值
E_0/J	50
$E_{elec}/(nJ \cdot \text{bit}^{-1})$	50
$\mu/(J \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{m}^{-4})$	1×10^{-15}
n	4
r/m	100
φ	0.1

6.1 MSN 均匀分布

设在区域内均匀分布约 30 个 MSN，由上述节点布局方法，只要确定网络规模(CN 总数)，可以知道各层 CN 布局数量。图 6 是对不同 γ 这 3 种布局方法能量剩余情况的比较。

可以看出，在 MSN 均匀分布的情况下，当 γ 较小时，如图 6(a)所示，本文提出的负载均衡节点布局方法和文献[2]的布局方法，都能使各层节点能量消耗均衡，能量得到充分利用，避免出现能量空洞。实际上当 $\gamma=0$ 时，即不考虑数据处理能耗，文献[2]思想和本文相似。而利用均匀布局方法，内层能量很快被消耗完，而外层还剩余大量能量，能量浪费极大，并在靠近 sink 节点的层造成了能量空洞。

随着 γ 的增大，如图 6(b)和图 6(c)，本文节点布局方法仍然可以均衡各层能耗，避免能量空洞。文献[2]的方法则最外层出现了能量空洞。由于文献[2]中根据网络中数据的流量进行节点布局，即只考虑了数据的传输情况，未考虑数据处理。设数据处理能耗在所有能耗中所占比重为

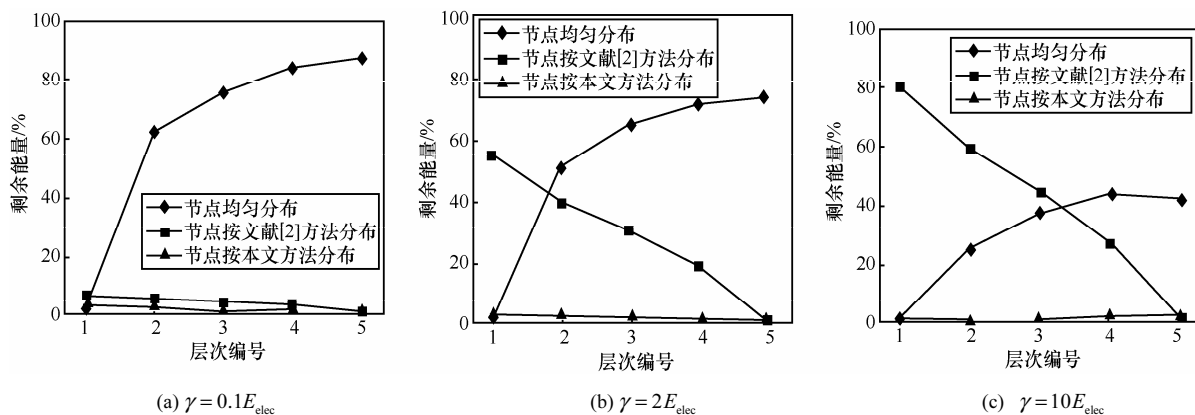


图 6 各层剩余能量(MSN 均匀分布)

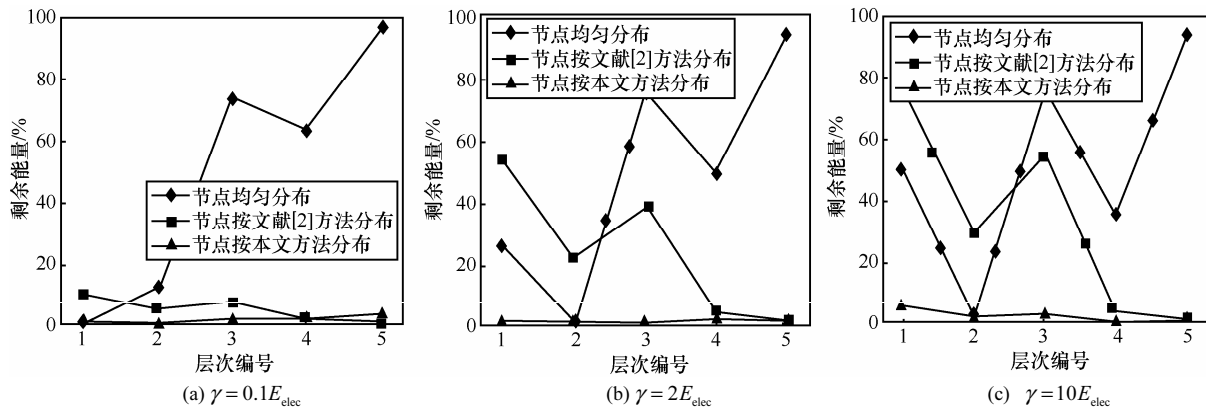


图 7 各层剩余能量(MSN 随机分布)

$$p = \frac{\text{数据处理能耗}}{\text{数据处理能耗} + \text{本层和外层数据传输能耗}}$$

显然，最外层 p 最大，最容易因数据处理能耗的影响出现能量空洞。CN 数量相当的情况下，由于能量的充分利用，用本文提出的节点布局方法能有效提高网络生存周期。

另外，图 6 是数据处理系数 γ 取不同值时的情况，可以明显看出数据处理能耗对布局情况的影响。 $\gamma = 0.1E_{elec}$ 时，数据处理收益 β 较大，本文方法远远优于均匀布局。随着 γ 的增大， β 减小，本文布局方法相对于均匀布局方法的优越性逐渐降低。

6.2 MSN 位置随机

在区域内随机分布 30 个 MSN 进行仿真。图 7 是对不同数据处理系数 γ 这 3 种布局方法能量剩余情况的比较。从仿真结果看，在 MSN 随机分布的情况下，本文提出的负载均衡布局方法同样能使各层节点能耗均衡，各层节点能量被充分利用，避免能量空洞，提高网络生存周期。

从图 7 可以看出，随着 γ 值的增加(β 的值减小)，能量空洞不仅在最内层或最外层出现，也出现在其他层次。这是因为在 MSN 数量较多的层，CN 不仅要接收和转发数据，还需要花费较多的能量进行数据的处理，使该层 CN 的能量迅速耗尽，导致能量空洞的出现，从而造成网络通信中断。

综上，在异构无线多媒体传感器网络中，能量空洞可能出现在网络环形模型中任何一个层次，利用本文提出的节点布局方法，对 MSN 均匀分布和随机分布情况都能均衡负载，避免能量空洞。

7 结束语

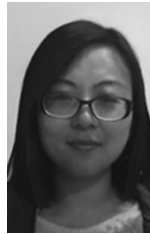
本文针对无线多媒体传感器网络的多跳传输，由于负载不均衡会出现能量空洞的问题，提出基于负载均衡的节点布局方法。通过对异构 WMSN 中节点能耗情况的分析，特别针对数据处理能耗部分进行了详细分析，讨论这部分能耗对网络能耗情况的影响。本文认为对于异构 WMSN，能量空洞会出现在网络环形模型的任意一层，如果确定了网络规模和网络中 MSN 的分布情况，计算出网络各层应该布局的 CN 数目，每层节点在布局时结合网络覆盖算法^[17]，能够保证网络连通性同时并避免能量空洞。

参考文献:

- [1] 刘安丰, 任炬, 徐娟, 等. 异构传感器网络能量空洞分析与避免研究[J]. 软件学报, 2012, (9): 2439-2447.
LIU A F, REN J, XU J, *et al.* Analysis and avoidance of energy hole problem in heterogeneous wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2012, (9): 2439-2447.
- [2] 吴小兵, 陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. 计算机学报, 2008,(2): 253-261.
WU X B, CHEN G H. The energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2008,(2): 253-261.
- [3] WATFA, MOHAMED K. A novel solution to the energy hole problem in sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(2): 949-958.
- [4] MARTA M, CARDEI M. Using sink mobility to increase wireless sensor networks lifetime[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks[C]. Newport Beach, USA, 2008. 1-10.
- [5] 王翥, 王祁, 魏德宝, 等. 无线传感器网络中继节点布局算法的研究[J]. 物理学报, 2012 (12): 12505.

- WANG Z, WANG Q, WEI D B, *et al.* Relay node placement and addition algorithms in wireless sensor networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012(12):12505.
- [6] 李巧勤, 刘明, 杨梅. 负载相似节点布局解决传感器网络能量洞问题[J]. *软件学报*, 2011, (3):452-465.
LI Q Q, LIU M, YANG M. Load-similar node distribution for solving energy hole problem in wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2011, (3):452-465.
- [7] LI J, MOHAPATRA P. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks[A]. *IEEE 62nd Vehicular Technology Conference*[C]. Dallas, USA, 2005.
- [8] LIU A F, LIU Z H. An elaborate chronological and spatial analysis of energy hole for wireless sensor networks[J]. *Computer Standards and Interfaces*, 2013, (1): 132-149.
- [9] 唐琳, 吴际. 异构多媒体传感器网络服务质量研究[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(4): 965-969.
TANG L, WU J. Study of QoS for heterogeneous wireless multimedia sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 965-969.
- [10] ASHRAF H, CHAKRABART S, BISWAS P K. Equal energy dissipation in wireless image sensor network: a solution to energy-hole problem[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2013, (39):1789-1799.
- [11] GAO Q, BLOW K J, HOLDING D J, *et al.* Radio range adjustment for energy efficient wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2006, 4(1):75-82.
- [12] LU Q, LUO W, WANG J, *et al.* Low-complexity and energy efficient image compression scheme for wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2008, 52: 2594-2603.
- [13] 樊晓平, 熊哲源, 陈志杰, 等. 无线多媒体传感器网络视频编码研究[J]. *通信学报*, 2011, 32(9):137-147.
FAN X P, XIONG Z Y, CHEN Z J, *et al.* Video coding in wireless multimedia sensor networks: a survey[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(9):137-147.
- [14] 秦智超, 周正, 赵小川. 一种分簇无线传感器网络中的分布式信源编码算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(2): 328-334.
- QIN Z C, ZHOU Z, ZHAO X C. A distributed source coding algorithm for clustering wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 328-334.
- [15] 丁男, 谭国真, 由笛, 等. 一种基于WSN时变性与节点剩余能量均衡的机会路由算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(3):716-720.
DING N, TAN G Z, YOU D, *et al.* Opportunistic routing algorithm based on topological time-varying and residual-energy balance in wireless sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3):716-720.
- [16] LEE, SUNG K. An energy-efficient QoS-aware routing algorithm for wireless multimedia sensor networks[J]. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 2014, (9):245-252.
- [17] 孟凡治, 王换招, 何晖. 基于联合感知模型的无线传感器网络连通性覆盖协议[J]. *电子学报*. 2011, (4):772-779.
MENG F Z, WANG H Z, HE H. Connected coverage protocol using cooperative sensing model for wireless sensor networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, (4):772-779.

作者简介:



朱永红 (1979-), 女, 江苏徐州人, 中国矿业大学博士生, 主要研究方向为无线多媒体传感器网络。



丁恩杰 (1962-), 男, 山东青岛人, 徐州工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为矿山物联网、无线传感器网络、现场总线。