

Compressed Sensing Clustering Routing Protocol for Energy Heterogeneous WSN*

JIANG Wenxian*

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of universal energy heterogeneous in wireless sensor networks (WSN), we proposed a compressed sensing clustering routing protocol for the energy of heterogeneous wireless sensor networks (CSCH algorithm). The algorithm determines the probability of multi-lever cluster head election by the energy of nodes, gathering the information of cluster nodes to cluster head, then uses the cluster head to dilute and compress the gathering data to reduce the number of nodes and the amount of communication of the data transmitted to the fusion center. The fusion center can restore signal source from a few data of cluster head using reconstruction algorithm. We also designed a weight coefficient based on normal distribution to optimize information reconstruction performance of compressed sensing algorithm in the case of lacking data. Simulation results show that this protocol can not only take full advantage of heterogeneous energy resources, balance energy dissipation of network and extend the lifetime of the entire network, but also accurately restore the signal source.

Key words: wireless sensor networks; compressed sensing; routing protocol; energy heterogeneous; energy-balanced EEACC:6150P doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.06.027

压缩感知的能量异构 WSN 分簇路由协议*

蒋文贤*

(华侨大学计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对无线传感器网络能量异构普遍存在的特点, 提出了一种基于压缩感知的能量异构分簇路由协议 (CSCH 算法)。该算法根据异构节点能量确定多级簇头选举的概率, 将簇内节点的信息集中在簇头上, 而簇头对所采集的数据进行稀疏、压缩, 以减少向汇聚节点传输数据的节点数和通信量, 汇聚节点利用重构算法可从来自簇头的少量数据中恢复出信号源。同时设计了一种基于正态分布的权值系数, 以优化在数据量过少情况下压缩感知算法的信号重构性能。仿真实验结果表明, 该协议不仅能充分利用能量异构资源, 均衡网络能耗, 延长整个网络生命周期, 而且能精确恢复信号源。

关键词: 无线传感器网络; 压缩感知; 路由协议; 能量异构; 能量均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)06-0894-07

无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Networks) 的主要目的是收集监测到的原始数据, 并进行多跳节点的数据发送、转发和处理。数量众多的传感器节点在网络中产生了大量的数据, 在传输的过程中需要消耗较大的能量, 而普通节点的能量有限, 减少数据传输量可以节约节点能耗, 因此, 可对监测数据进行压缩处理以减少数据的传输。目前很多文献提出了各种压缩方法, 如小波变换等。文献 [1] 提出了一个称为 DIMENSIONS 的层次系统, 先在底层的各个传感器节点对监测到的数据, 挖掘时间相关性, 进行小波压

缩, 然后基于一个称为 WavRoute 的路由协议, 由中间层的簇头收集底层节点传来的数据, 挖掘空间相关性, 并在簇头进行小波压缩后传送到上一层汇聚节点。虽然数据压缩可以减少 WSN 节点通信的数据量, 但增加了层次结构簇头的处理能耗和汇聚节点算法的复杂度。

异构无线传感器网络 HWSN (Heterogeneous Wireless Sensor Networks) 是指由不同感测能力、计算处理能力、通信能力和初始能量配置的传感器节点组成^[2]。相对于同构 WSN, 异构 WSN 是一种更

现实的网络模型。能量异构 WSN 主要特点是普通传感器节点的能量受限,簇头节点能量较高,而汇聚节点能量不受限。由于高能力节点具有可持续的能量资源,不需要对其进行频繁更换,可让高能力节点来完成复杂的任务,减轻普通节点的负担,达到延长网络生命周期的目的。因而能量异构 WSN 更适合分簇层次结构。

若用高能力的节点担任簇头则会大大减少簇维护带来的开销,但由于高能力簇头节点成本较高,不可能在网络中大量部署,甚至不能保证普通节点和高能力簇头之间能够一跳到达,因此需要在网络成本和网络性能之间做出均衡。在异构 WSN 中,普通节点最为显著的是节点信息处理能力不足,汇聚节点只能处理少数簇头传输的信息。因此,需要有一个算法能从少量的簇头信息中获得整个网络的情况。

Donoho 等人提出的压缩感知理论 CS(Compressed Sensing)^[3]能很好地满足要求。压缩感知的系统特点是:传感器节点直接采样少量数据,同时完成采样和压缩,不需要基于香农-奈奎斯特定理进行大量、高速采样再额外运行复杂的压缩算法。这使得传感器节点变得简单、廉价,付出的代价是信号恢复时的重构算法运算量较大,而信号重构可在汇聚节点进行,汇聚节点没有能量、计算能力的苛刻限制。因此,压缩感知的这种特点很适合异构 WSN 的。

分簇路由协议用于环境监测的 WSN 具有较好的节能性,这类协议的典型代表有 LEACH^[4]和 HEED^[5]等。这类算法将整个网络划分为相连的区域,簇头不仅负责簇内信息的收集和融合处理,还负责簇间数据转发,并将融合后的数据传输到基站汇聚节点。文献[6-9]针对各种监测应用的服务质量需求分别提出了相应的自适应、实时性和能量均衡的路由改进协议,以便延长节点网络生命周期;文献[10-12]针对能量异构的特点提出了相应的分簇路由协议,提高能量利用率;文献[13]将压缩感知应用于 WSN 多目标定位,设计了迭代回溯的压缩感知算法,能大大减少网络通信的数据量;文献[14]提出了一种联合 LEACH 协议和贝叶斯压缩感知方法,并设计了一种阈值机制,能对监测区域内的目标进行准确探测;文献[15]提出了一种双簇头交替和压缩感知的路由协议,能使簇的大小分布均匀,均衡网络能耗,延长生命周期。

本文在文献[13-15]等研究的基础上,利用 HWSN 能量异构普遍存在的特点,采用压缩感知的方法,提出了一种基于压缩感知的能量异构分簇路由协议 CSCH(Compressed Sensing for Clustering Hierarchy)算法。该

算法根据异构节点剩余能量确定多级簇头选举的概率,将簇内节点的信息集中在簇头上,而簇头对所采集的数据进行稀疏、压缩,以减少向汇聚节点传输数据的节点数和通信量。汇聚节点利用重构算法可从来自簇头的少量数据中恢复出信号源。同时设计了一种基于正态分布的权值系数,以优化在数据量过少情况下压缩感知算法的信号重构性能,并与经典 LEACH 协议进行了网络生命周期和剩余能量变化的比较,同时与 Wavroute 小波压缩算法进行了节点剩余能量方差性能的比较,能充分利用能量异构资源,均衡网络能耗,延长生命周期,恢复信号源。

1 压缩感知理论

1.1 基本过程

压缩感知一般过程为^[13,16]:已知测量矩阵 $\Phi \in R^{M \times N} (M \ll N)$,未知信号 $X \in R^N$,测量值 $Y \in R^M$:

$$Y_{M \times 1} = \Phi_{M \times N} X_{N \times 1} \quad (1)$$

压缩感知主要解决的问题就是由测量值 Y 重构信号 X 。压缩感知理论证明,如果信号 X 是 K 稀疏的,并且 Y 与 Φ 满足一定条件,信号 X 可以由测量值 Y 通过求解 l_1 范数最小的最优化问题精确重构:

$$X_{est} = \operatorname{argmin} \|X\|_1, s. t. \Phi X = Y \quad (2)$$

压缩感知包括两个阶段:压缩测量阶段和信号重构阶段。压缩测量阶段中得到压缩采样结果 Y ,而重构阶段为根据测量矩阵 Φ 和测量结果 Y 重构 X 的过程。

1.2 压缩测量

假设需要部署的区域为一 $N \times N$ 方形区域,将此方形区域划分为 N 个网格,区域中随机布设 M 个普通传感器节点,在整个区域中有 K 个簇头,测量矩阵 $\Phi \in R^{M \times N} (M \ll N)$ 中的元素 $\varphi_{m,n}$ 为第 m 个传感器节点接收到的位于第 n 个网格中簇头信号强度:

$$\varphi_{m,n} = P_{m,n}, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N \quad (3)$$

系统的压缩采样过程可用式(4)描述:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,N} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{M,1} & P_{M,2} & \cdots & P_{M,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中 $x_n = 0$ 或 $1 (1 \leq n \leq N)$ 。簇头的个数为 K 个, N 维向量 X 的稀疏度为 K 。WSN 的测量结果 Y 为测量矩阵与稀疏向量 X 的乘积,其物理意义就是 $y_m (1 \leq m \leq M)$ 为每个周期 T 内第 m 个传感器节点收到的多个监测信号强度之和。

式(4)简记为

$$Y_{M \times 1} = P_{M \times N} X_{N \times 1} \quad (5)$$

这样,WSN的基于接收信号强度的簇头选举问题转换为根据 M 个测量结果,重构 N 维稀疏向量的压缩感知问题。可以运用 l_1 范数最小的最优化算法求出问题的解。

1.3 信号重构

信号的重构结果和测量矩阵有很大关系,当测量矩阵满足约束等距性条件时信号可以得到精确重构。 X 是稀疏度为 K 的 N 维向量,对 X 进行 M 次随机测量,如果满足式(5),则可以通过求解 l_1 范数最小的凸优化问题,精确重构 X 。

$$M \geq CK\mu^2(\Phi, I) \lg N \quad (6)$$

式(6)中, C 为正的常数, $\mu(\Phi, I)$ 为矩阵 Φ 和单位矩阵 I 的互相关系数。

矩阵的互相关系数 $\mu(\Phi, \Psi)$ 表征了两个 $N \times N$ 单位正交矩阵 Φ 和 Ψ 的相关性:

$$\mu(\Phi, \Psi) = \sqrt{N} \max_{1 \leq k, j \leq N} |\varphi_k^T \psi_j| \quad (7)$$

式(7)中, φ_k^T 和 ψ_j 分别为 Φ 和 Ψ 的第 k 行和第 j 列,由于信号 X 本身就是稀疏信号,所以 $\Psi=I$,有式(8)

$$\mu(\Phi, I) = \sqrt{N} \max_{\substack{1 \leq m \leq M \\ 1 \leq n \leq N}} \varphi_{m,n} \quad (8)$$

由以上分析可得,需要的测量次数即传感器节点数量 M 和簇头个数 K 、测量矩阵和单位矩阵的互相关系数、网格划分数量 N 有关, $\max \varphi_{m,n}$ 取决于传感器和簇头之间的最短距离。这样测量矩阵中的值就比较平均,每个测量结果的权重大致相同,可以取得较好的均衡结果,一般要求 $M > 2K$,最好达到 $4K \sim 6K$,原始信号可以得到较好的重构。

因此,压缩感知特别适合应用在资源受限的WSN中,只需要明确节点的可压缩性,即在某些正交基下是可以稀疏表示,节点便可以运行低计算开销的编码算法,在簇头节点上进行数据的稀疏和观测,将较少的测量数据传递到汇聚节点,汇聚节点通过收集节点的感知数据的测量向量,运行较为复杂的压缩感知解码算法,对数据进行压缩和重构,显著减少了网络开销,达到节能的目的。

2 系统模型

2.1 能量异构模型

由于能量异构特征是普遍存在的,不同类型的传感器节点配置不同的初始能量。在能量异构WSN中,假设节点的能量值是在一个区间随机分布的,区分节点为普通节点和高能节点两种。普通节点的初始能量为 E_o ,高能节点的初始能量为 $E_o(1+M_i)$, M_i 表示高能节点超过普通节点能量的倍数。因此节点

的初始能量可以描述为在闭区间 $[E_o, E_o(1+M_{\max})]$ 内随机分布^[10]。

设任意节点配备的初始能量为 $E_o(1+M_i)$,则能量异构网络总的初始能量为:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N E_o(1+M_i) \quad (9)$$

由于每个节点配备的初始能量不同,簇头的选举必须充分考虑到节点剩余能量的状况,剩余能量多的节点有更高的概率成为簇头。所以每个节点当选为簇头的加权概率 p_i 如下式(10),其中, p_o 是首轮簇头占有所有节点的百分比,即首轮节点当选簇头的概率。

$$p_i = \frac{p_o N(1+M_i)}{N + \sum_{i=1}^N M_i} \quad (10)$$

另外,簇内和簇间分别使用不同的能量等级通信。在节点密度足够的情况下,簇间通信所使用的能量等级必须保证其通信覆盖半径大于簇半径的两倍以上。

2.2 过程描述

系统的工作方式如下:每个传感器节点周期性地发射信号,发送周期为 T ,节点之间相互独立,不要求时间同步。簇头周期性地收集信号,收集周期也为 T ,将该周期内收到的信号强度值做累加,周期时间片结束后,每个传感器节点将累加结果发送给簇头,簇头进行数据融合处理发送给汇聚节点。汇聚节点运行压缩感知算法,计算出节点所采集的信号。

由于传感器节点信息向量 X 中的元素值是 K 个信号源的叠加,可得 $X = \Psi V$,其中 Ψ 为传播矩阵。

数据压缩在WSN全体节点信息的基础上进行,但是汇聚节点只能接收处理少量传感器节点所传输的数据,因此压缩各节点上的本地信息成为必要的步骤。将数据压缩操作测量矩阵 Φ 表示,同时在信号传输时加入高斯白噪声,可得汇聚节点的信息收集模型, M 维测量向量

$$Y = \Phi X + n = \Phi \Psi V + n \quad (11)$$

Y 表示汇聚节点接收到的信息向量, M 为向汇聚节点发送信息的传感器节点数,即网络中的簇数;测量噪声向量 $n \in R^M$, $M \ll N$; Ψ 为稀疏矩阵; V 为稀疏系数向量, V 中非零元素数远小于维数,因此原始信号 V 具有稀疏性。通过该模型,数据压缩问题可转化为如何从 Y 中恢复出 V 的问题。式(11)为符合压缩感知理论模型。

3 协议描述

3.1 LEACH协议

低功耗自适应分簇路由协议LEACH(Low Energy

Adaptive Clustering Hierarchy)是由 Heinzelman^[4]等人设计提出的一种 WSN 最经典的能效分簇路由协议。其算法通过循环随机地选举簇头节点将整个网络的能量负载均匀地分配到每个节点上,以提高节点的能效和延长网络生命周期。为平衡网络各节点的能耗,簇头是周期性按轮随机选举的,每轮选举方法是:各节点产生一个 $[0,1]$ 之间的随机数,如果该数小于 $T(n)$,则该节点成为簇头。 $T(n)$ 的计算公式如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \times \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} & n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中, p 是网络中簇头数与总节点数的百分比, r 是当前的选举轮数, G 是最近 $1/p$ 轮不是簇头的节点集。成为簇头的节点在无线信道中广播这一消息,其余节点选择加入信号最强的簇头。节点通过一跳通信将数据传送给簇头,簇头也通过一跳通信将聚合后的数据传送给汇聚节点。该协议采用随机选举簇头的方式避免簇头过分消耗能量,提高了网络生存时间;数据融合能有效减少通信量。但分簇协议的目的在于数据融合,仍采用一跳通信,虽然传输时延小,但要求节点具有较大功率通信能力,不适合大规模网络;即使在小规模网络中,离汇聚节点较远的普通节点由于采用大功率通信也会导致生存时间较短,而且频繁簇头选举引发的通信量耗费了能量。

3.2 CSCH 协议

为了解决在 WSN 能量异构情况下节点负载不均衡的问题,CSCH 协议在成簇的过程中充分考虑节点的当前能量,让当前能量高的节点有更多地机会出任簇头,把节点分为3类:一级簇头,二级簇头和普通节点。选举簇头的工作包括两个阶段:选举一级簇头和选举二级簇头。WSN 分簇系统模型如图1所示。

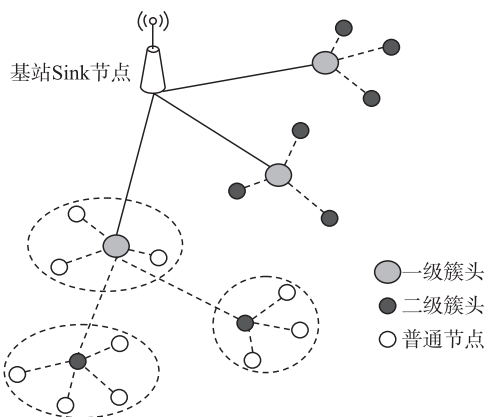


图1 多级层次网络拓扑图

3.2.1 一级簇头选举

第一阶段选举一级簇头。由于每个簇的大小以

及一级簇头到基站的距离不一样,WSN 存在异构性, p 值决定了每轮产生的一级簇头数量。

(1)首先,将同构 LEACH 中 $T(n)$ 计算公式推广到多级异构 WSN,即将式(10)代入式(12),得到式(13)。

$$T(n_i) = \frac{p_o N(1 + M_i)}{\left(N + \sum_{i=1}^N M_i \right) - P_o N(1 + M_i) \left[r \bmod \left[\frac{N + \sum_{i=1}^N M_i}{p_o N(1 + M_i)} \right] \right]} \quad (13)$$

(2)其次,将能量因素考虑进来,把能量均值与阈值大小的乘积作为多属性优化方法,如式(14)所示。

$$T(n_i) = \frac{p_o N(1 + M_i)}{\left(N + \sum_{i=1}^N M_i \right) - P_o N(1 + M_i) \left[r \bmod \left(\frac{N + \sum_{i=1}^N M_i}{p_o N(1 + M_i)} \right) \right]} \times \left[E_r + \left(r \bmod \frac{1}{p_i} \right) \Delta E_c \right] \quad (14)$$

其中, E_r 剩余能量百分率, ΔE_c 能量损耗百分率, r 表示节点连续未当选过一级簇头的轮次。一旦当选了一级簇头, r 重置为0。式(14)的改进有效地解决了 LEACH 协议 $T(n)$ 计算公式的缺陷,使能量消耗比例较低的节点优先当选一级簇头,并综合考虑了节点能量和阈值大小对一级簇头选举的影响,使算法更公平合理。

3.2.2 二级簇头选举

一级簇头选举好并且分簇过程完成后,可再选举二级簇头。每个一级簇头节点各自向簇间其他簇头节点广播,接收广播的节点向一级簇头节点发送确认信号,该确认信号包含这个节点的剩余能量百分比信息 E_r ,簇头节点根据 E_r 值从高到低的顺序选定若干 $(L-1)$ 个高能节点汇聚一级簇头节点完成数据传输阶段的数据收集,融合和发送任务,这些节点称为二级簇头节点。采用的方法是:该簇的一级簇头节点为第0号簇头节点,其他 $(L-1)$ 个高能一级簇头节点依次为第1号簇头节点, \dots ,第 $(L-1)$ 号簇头节点,在数据传输阶段所持续的时间平均划分为 L 个 TDMA 时隙,分别由第0,第1, \dots ,第 $(L-1)$ 簇头节点负责承担收集,融合并发送数据到汇聚节点的作用。

3.2.3 簇间路由

两级簇头产生之后,簇头广播当选的消息到周围节点,簇头广播信号的强弱决定加入哪个簇。

CSCH 协议从能量角度考虑簇的规模、数量以及负载均衡等问题,分簇方法和步骤如下:

挑选 k 个簇头,把 n 个节点分成 k 个簇(S_1, S_2, \dots, S_k),使得:

(1)簇头之间负载平衡,即

$$\frac{1}{k} - r \leq \frac{s_i}{n} \leq \frac{1}{k} + \delta \quad i=1, \dots, k \quad (15)$$

δ 是不平衡因子,依赖于簇头之间的实际负载能力差异。为了均匀网络能量消耗,其目标是追求簇头之间的负载平衡,即 $\delta=0$ 。

(2)簇的能量消耗总和最小,即

$$C_i = \sum_{x \in S_i} f(x, a_i) \quad (16)$$

a_i 是簇 S_i 的簇头, x 是簇中成员节点,函数 f 是簇头与成员节点之间的通信代价。

3.3 重构算法

每个传感器节点将本地信息乘以一个权值系数,然后发送给簇头,簇头把接收到的信息与自身信息相加,将所得的结果发送给汇聚节点,汇聚节点利用从各簇头接收到的信息重构出原始向量。重构算法的过程为

$$y_i = \sum_k^{K_i} w_{i,k} x_{i,k} + n_i \quad (17)$$

其中, y_i 为第 i 个簇的簇头传输信息; $x_{i,k}$ 为第 i 个簇中第 k 个节点上的信息; n_i 为第 i 个簇内各节点传输信息到簇头并由簇头到汇聚节点的过程中所受的噪声干扰的总和,假设 n_i 满足正态分布 $N(0, 1)$; $w_{i,k}$ 为第 i 个簇中第 k 个节点的权值系数; K_i 为第 i 个簇包含的节点数。令 $w_{i,k}$ 为权值矩阵 W 第 i 行第 k 列元素,则由式(17)可得

$$y = Wx + n = W\Psi v + n = \Gamma v + n \quad (18)$$

其中, W 为 $M \times N$ 矩阵, W 的每行对应 1 个簇,每列则对应 1 个传感器节点。因此,其第 i 行第 j 列元素对应的节点如果不属于第 i 个簇,则其元素值为 0。与式(11)的压缩感知测量矩阵相比, W 可看作 Φ , 此时测量值数即为簇数,式(18)可等价于式(11)。为满足压缩感知理论对测量矩阵的要求,可假设权值系数满足零均值正态分布 $N(0, 1)$,且各系数独立同分布。

压缩感知算法的重构性能与所得的采样值数紧密相关。当簇头数过少时,即采样值较小时,算法恢复性能较差,此时信号源的测量结果可能出现虚假的信号源。这些虚假信号源的信号强度较低时,可通过设置阈值 $0 \leq \omega \leq 1$ 来改善算法的重构性能。重构算法估计得到的信号源向量 v' 中的元素,只要

其值小于 $\omega \max_{0 \leq i \leq N} v'_i$, 则设为 0, 即不存在信号源,其中 v'_i 为 v' 中的元素。

4 仿真实验与性能分析

4.1 仿真环境

为分析 CSCH 协议的性能,本文使用 NS2 网络仿真软件和 MATLAB 工具对能量异构 WSN 进行仿真,多级簇头采用压缩感知进行数据融合时,测量矩阵采用高斯随机矩阵,重构算法采用 BP(l_1 范数最小重构算法)。

实验目的:(1)通过改变异构 WSN 的高能节点占总节点数的比例 α 和高能节点超过普通节点能量的倍数 M 验证 CSCH 协议对平衡网络负载,延长网络生命周期的作用;(2)通过比较采用压缩感知方法和小波压缩方法,验证 CSCH 协议的有效性;(3)通过设置和改变权值系数验证对协议执行的影响。

实验模拟了一个在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 正方形区域,平面中随机分布 100 个传感器节点,基站位置在 (50, 125), 节点间的通信距离 50 m,除基站能源不受限外,其余传感器节点的能源都是有限的且初始能源不相同,且节点的初始能量在 $[E_{\text{init}}, (1+K_{\text{max}})E_{\text{init}}]$ 之间随机分布,网络中事件的到来服从泊松分布 λ 。仿真参数的选取如表 1 所示。

表 1 网络仿真实验参数设置

| 参数 | 值 | 参数 | 值 |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 场景大小 m | [100, 100] | 节点总数 n | 100 |
| 数据包长度 l_{data} | 500 byte | 初始能量 E_{init} | [2 J, 4 J] |
| 信号处理功耗 | 50 nJ/bit | 计算功耗 E_{cda} | 5 nJ/bit |
| 放大器功耗 | 10 pJ/(bit·m ⁻²) | 放大器功耗 | 0.0013 pJ/(bit·m ⁻⁴) |
| 信道速率 r | 250 kbit/s | Sink 坐标 | (50, 125) |

4.2 性能分析

4.2.1 能量异构对延长网络生命周期的影响分析

网络生命周期是衡量算法能量有效性的重要依据。图 2 和图 3 的仿真结果描绘了在能量异构 WSN 中,采用 CSCH 协议,改变网络高能节点占总节点数的比例 α 和高能节点超过普通节点能量的倍数 M ,所观察到的协议性能。图 2 给出了当比例 α 从 10% 增加到 90% 和倍数 M 从 1 倍增加到 9 倍时,从开始到第一个节点死亡所经历的生命周期。可以看出,LEACH 协议没有较好地利用 α 和 M 的增加所带来的能量,采用 LEACH 协议的网络,其网络生命周期几乎保持不变,浪费了高能节点所带来

的能量,因而表明 LEACH 协议是一种不适应异构 WSN 的协议,将所有节点看成具有相同能量,没有考虑节点的能量差异。而 CSCH 协议由于采用基于剩余能量的机制,充分利用簇头的高能量,因此,网络生命周期大大提升,与 LEACH 协议相比,CSCH 协议使得网络寿命平均分别提高了 315% 和 270%。

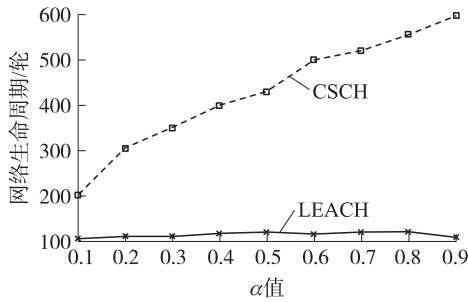


图 2 当 α 变化时的网络生命周期

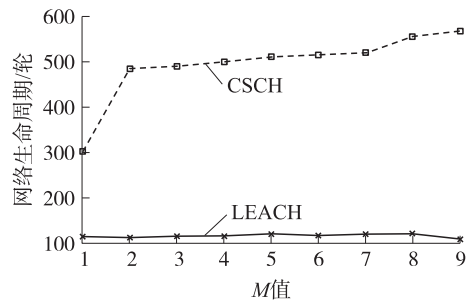


图 3 当 M 变化时的网络生命周期

从图 4 可以看出,由于 CSCH 协议使得网络能耗均匀地分布到异构 WSN 中的每个节点上,节点剩余能量较为均衡,其曲线是一条斜直线。因此,由高能力节点担任簇头可以更好地实现节能并改善网络性能。

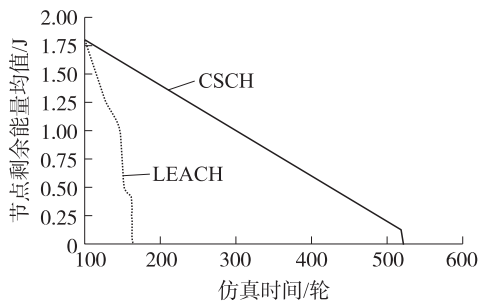


图 4 节点剩余能量均值变化曲线

4.2.2 压缩感知算法对重构性能的影响分析

CSCH 压缩感知算法与传统压缩算法相比如小波变换等,特点是减少了数据传输量,降低了通信开销。传统方法中对 K 个节点进行数据压缩需要传输数据量为 $M \times K$,压缩感知算法需要传输数据量仅为 M ,当 $K=10$ 时只需上传原来 10% 数据量,适用于通信环境恶劣的 WSN 网络。

图 5 所示为 CSCH 算法与 WavRoute 小波压缩算法的 WSN 节点剩余能量方差的性能对比。汇聚

节点在接收簇头信息后,分别用 CSCH 算法和 WavRoute 算法进行恢复。从图 5 可以看出,小波变换算法精确恢复所需的簇数大约为 80%,而 CSCH 算法大约 50% 就能精确恢复信号源,因此 CSCH 算法的应用具有一定的必要性。

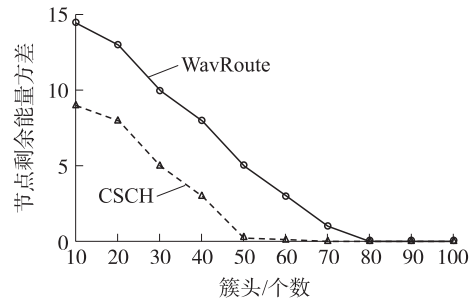


图 5 CSCH 和 WavRoute 的比较

4.2.3 权值系数对性能的影响分析

传统分簇算法的权值系数均为 1,图 6 展示了不同的权值系数($\mu=1, \mu=0$, 和正态分布 $\mu=(0,1)$)时,对信号重构性能的影响,当采用满足正态分布的权值系数时,重构性能远优于传统压缩算法,而且算法的重构性能随着簇数的增加而改善。

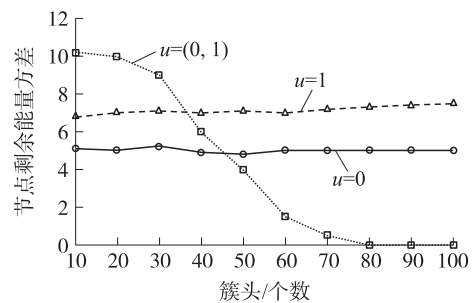


图 6 权值矩阵对性能的影响

5 结束语

本文采用压缩感知的思想,提出了一种能量异构分簇路由协议,同时设计了一种基于正态分布的权值系数,用以优化在数据量过少情况下压缩感知带来的信号重构性能。使用 NS2 网络仿真软件和 MATLAB 工具与经典 LEACH 协议进行了网络生命周期和剩余能量变化的比较,同时与 Wavroute 小波压缩算法进行了节点剩余能量方差性能的比较,结果表明,该算法不仅能充分利用异构能量资源,均衡网络能耗,延长网络生命周期,而且能精确地恢复信号源。

参考文献:

[1] Ganesan D, Estrin D, Heidemann J. Dimensions: Why Do We Need a New Data Handling Architecture for Sensor Networks? [J]. SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(1): 143-148.
 [2] 刘琳,于海斌. 异构无线传感器网络中簇首的优化部署策略 [J]. 通信学报, 2010, 31(10): 229-237.

- [3] Donoho D. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [4] Hernzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [5] 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): 660-669.
- [6] 吕涛, 朱清新, 张路桥. 一种基于 LEACH 协议的改进算法[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1405-1409.
- [7] 洪榛, 俞立, 张贵军. 无线传感器网络自适应分布式聚簇路由协议[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1197-1205.
- [8] 蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1222-1232.
- [9] 杨海波, 华惊宇, 刘半藤. 基于减聚类优化算法的无线传感器网络分簇路由协议研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(11): 1603-1606.
- [10] Kumar D, Trilok C, Aseri R, et al. EEHC: Energy Efficient Heterogeneous Clustered Scheme for Wireless Sensor Networks [J]. Computer Communications, Elsevier, 2009, 32(4): 662-667.
- [11] 蔡海滨, 琚小明, 曹奇英. 多级能量异构无线传感器网络的能量预测和可靠聚簇路由协议[J]. 计算机学报, 2009, 32(12): 2393-2402.
- [12] 徐小良, 裘君娜. 异构传感器网络中一种能量有效的簇头选择算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(3): 395-400.
- [13] 何风行, 余志军, 刘海涛. 基于压缩感知的无线传感器网络多目标定位算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 716-721.
- [14] 唐亮, 周正, 石磊, 等. 基于 LEACH 和压缩感知的无线传感器网络目标探测[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(3): 8-11.
- [15] 赵小川, 周正, 秦智超. 基于双簇头交替和压缩感知的 WSN 路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(Supp 1): 17-24.
- [16] 戴琼海, 付长军, 季向阳. 压缩感知研究[J]. 计算机学报, 2011, 33(3): 425-434.



蒋文贤(1974-),男,硕士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络,网络协议等,jwx@hqu.edu.cn。