

移动基站无线传感器网络2个参数的优化

王建明

(湖南商学院计算机与电子工程系, 长沙 410205)

摘要: 针对一种移动基站协助数据收集模式, 研究移动基站最佳缓冲区位置的设计问题, 得出节点在发射半径 $r=R$ 的情况下, 当移动基站缓冲区的中心位于 $2/3 R$ 时, 网络的总能量消耗最小, 当中心位于 $1/2R$ 时, 网络的寿命最长。在 $r \ll R$ 的情况下, 节点的发射功率可选择 $\{1..k\}$ 中的一种传送数据, 并给出通过插值作图法得到最佳基站缓冲区位置的设置与节点最佳发射功率的计算方法, 相比采用固定功率发射方法, 能够将网络寿命提高 5 倍。

关键词: 传感器网络; 移动基站; 网络优化; 能量消耗均衡; 网络寿命

Optimization for 2 Parameters in Mobility Base Station Wireless Sensor Networks

WANG Jian-ming

(Department of Computer and Electronic Engineering, Hunan Business College, Changsha 410205)

【Abstract】 This paper aims at a mobile base station data collection mode, the best location of the buffer zone of mobile base station is studied. The conclusions include that when nodes radius of the transmitting $r=R$, the total energy consumption is minimize when the centre of the data buffer is located on $2/3R$. The network longest life is expectancy when the centre of the data buffer is located on $1/2R$. When the situation is $r \ll R$, the transmitter power level of nodes can be chosen from $\{1..k\}$. The optimal location of the buffer zone and transmitter power level are given. Compared with fixed-fired power method, this method can greatly improve network life.

【Key words】 wireless sensor networks; mobile base station; network optimization; energy consumption balancing; network life

无线传感器网络的主要功能是对周边环境信息进行采集和管理, 并将感知到的数据发送到基站做进一步的处理^[1-3], 而传感器节点上的资源非常有限。因此, 如何提高能源的使用效率从而延长网络生命周期成为主要的研究问题。传统的数据收集模式都假设基站是静止不动的, 这样, 基站周围的节点将担负网络内的所有负载, 成为网络性能瓶颈, 不但降低了网络的吞吐量, 而且这些节点将快速死亡, 从而减少了网络的寿命。本文主要对文献[1]提出的移动基站协助数据收集模式及传感器节点发射功率可调的网络进行了研究。

1 网络模型与问题描述

(1)网络结构模型

本文采用了一种典型的无线传感器网络模型^[2-4], 与文献[4]的相同, 传感器节点的发射功率可变, 其最大发射半径是最小能量发射半径 r 的 k 倍, 即 kr 的传感器网络。例如, Berkeley Motes 节点具有 100 个发射功率等级^[5]。

(2)能量消耗模型

本文采用典型的能量消耗模型, 节点发送 1 bit 数据消耗的能量如式(1)所示, 节点接收 1 bit 数据消耗的能量如式(2)所示:

$$\begin{cases} E_{\text{member}} = IE_{\text{elec}} + I\epsilon_{\text{fs}}d^2 & \text{if } d < d_0 \\ E_{\text{member}} = IE_{\text{elec}} + I\epsilon_{\text{amp}}d^4 & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{\text{Rx}}(l) = IE_{\text{elec}} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 表示发射电路损耗的能量。若传输距离小于阈值 d_0 , 功率放大损耗采用自由空间模型; 当传输距离大于等于阈值 d_0 时, 采用多路径衰减模型, $\epsilon_{\text{fs}}, \epsilon_{\text{amp}}$ 分别为这 2 种模

型中功率放大所需的能量。以上参数的具体设置取自文献[4], 如表 1 所示。

表 1 网络参数

参数	值
传输距离阈值 d_0/m	87
传感器范围 r_s/m	15
发射电路损耗/(nJ/bit)	50
功率放大损耗/(pJ/bit·m ²)	10
功率放大损耗/(pJ/bit·m ⁴)	0.001 3
初始能量/J	0.5

(3)问题描述

如图 1 所示, 黑色区域为基站的移动缓冲位置, 将网络分为 Ω_1 和 Ω_2 2 个部分, 研究目标是安排基站的移动位置(从 $\{0..R\}$ 中选取)及节点的发射功率(从 $\{1..k\}$ 中选取), 使网络实现负载均衡, 能量消耗最小, 从而达到网络寿命的最大化。

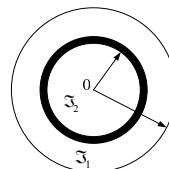


图 1 移动缓冲区及网络的 2 个区域

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20060400886); 湖南省科技计划基金资助项目(2008FJ3213)

作者简介: 王建明(1962-), 男, 副教授, 主研方向: 计算机网络, 信号处理, 无线传感器网络

收稿日期: 2008-10-10 **E-mail:** hnwjm6686@sina.com

2 $r \ll R$ 时数据收集模式缓冲区优化计算

2.1 $r \ll R$ 时多跳网络总能量消耗最小的网络参数取值

对能量消耗进行计算的网络参数如图2所示,其中,虚线表示缓冲区的位置。

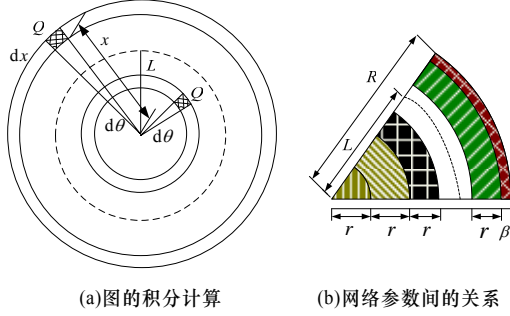


图2 网络模型及其缓冲区位置参数关系

定理1 当缓冲区位置为 $L = \frac{\sqrt{2}}{2}R$ 时,多跳网络的数据传输能量消耗最小,与节点的发射级 k 无关。

证明

对于 \mathfrak{S}_1 ,在距圆心为 x 、宽为 dx 的圆环上,取夹角为 $d\theta$ 的一小段扇环,如图2中的阴影区域 Q 。这一区域内的节点个数为 $x \times d\theta \times dx \times \rho$ 。其中的节点到缓冲区的数据传输是沿着最短路径到达即沿着到圆心的方向传输数据的,假设事件发生的频率为 λ ,则阴影部分节点产生的数据数为 $x \times d\theta \times dx \times \rho \times \lambda$,每个节点到达的跳数近似为 $(x-L)/ir$ 。因此,消耗的能量为发送 $(x-L)/ir$ 次、接收 $(x-L)/ir-1$ 次,每1跳所需要的能量消耗按式(1)和式(2)计算。

这一小段扇环到达缓冲区的能量消耗为

$$\frac{x-L}{ir} \times [xd\theta\rho\lambda E_{\text{elec}} + xd\theta\rho\lambda \varepsilon_{\text{fs}} r^2] + \left[\frac{x-L}{ir} - 1 \right] \times xd\theta\rho\lambda E_{\text{elec}} = xd\theta\rho\lambda \left\{ \left[2 \frac{x-L}{ir} - 1 \right] E_{\text{elec}} + \frac{x-L}{ir} \times \varepsilon_{\text{fs}} r^2 \right\}$$

对其进行积分,可得到 \mathfrak{S}_1 的总能量消耗为

$$E_{\mathfrak{S}_1} = \int_L^R \int_0^{2\pi} x\rho\lambda \left\{ \left[2 \frac{x-L}{ir} - 1 \right] E_{\text{elec}} + \frac{x-L}{ir} \varepsilon_{\text{fs}} r^2 \right\} d\theta dx = 2\pi\rho\lambda \frac{1}{ir} \left\{ \frac{1}{3} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) R^3 - \frac{1}{3} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^3 - \frac{1}{2} R^2 (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L - \frac{1}{2} R^2 E_{\text{elec}} ir + \frac{1}{2} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^3 + \frac{1}{2} L^2 E_{\text{elec}} ir \right\}$$

与前面的分析类似, \mathfrak{S}_2 的总能量消耗为

$$E_{\mathfrak{S}_2} = \int_0^L \int_0^{2\pi} x\rho\lambda \left\{ \left[2 \frac{L-x}{ir} - 1 \right] E_{\text{elec}} + \frac{L-x}{ir} \varepsilon_{\text{fs}} r^2 \right\} d\theta dx = 2\pi\rho \frac{1}{ir} \left\{ (E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2 / 2) L^3 - (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) \frac{L^3}{3} - \frac{L^2}{2} E_{\text{elec}} ir \right\}$$

则整个网络的总能量消耗为

$$E_{\text{total}} = E_{\mathfrak{S}_1} + E_{\mathfrak{S}_2} = 2\pi\rho\lambda \frac{1}{ir} \left\{ \frac{1}{3} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) R^3 - \frac{1}{3} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^3 - \frac{1}{2} R^2 (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L - \frac{1}{2} R^2 E_{\text{elec}} ir + \frac{1}{2} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^3 + \frac{1}{2} L^2 E_{\text{elec}} ir \right\} + 2\pi\rho \frac{1}{ir} \left\{ (E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2 / 2) L^3 - (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) \frac{L^3}{3} - \frac{L^2}{2} E_{\text{elec}} ir \right\}$$

要使整个网络的总能量消耗最小,只需要对其求导、求极值:

$$E_{\text{total}}' = 2\pi\rho\lambda \frac{1}{ir} \left\{ -(2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^2 - \frac{1}{2} R^2 (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) + \frac{3}{2} (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^2 + LE_{\text{elec}} ir + 3(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^2 - (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^2 - LE_{\text{elec}} ir = (2E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) L^2 - \frac{1}{2} (E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{fs}} r^2) R^2 \right\}$$

令 $E_{\text{total}}' = 0$, 推得: $L = \frac{\sqrt{2}}{2}R$ 。因此, L 与 k 无关。

2.2 $r \ll R$ 时多跳网络寿命最大的网络参数选择

网络的寿命是由最先死亡节点的寿命决定的,因此,本节讨论如何选择缓冲区位置以及最佳的能量发射级别 k ,使网络中能量消耗最大的节点的能量消耗最小化,很显然,最小化该节点的能量消耗可以使网络的寿命最大化。下面分析节点取不同的发射级别 i 时,最大能量消耗节点的情况。

2.2.1 \mathfrak{S}_1 区域的能量消耗情况

对于 \mathfrak{S}_1 ,后面论述所用的参数如下:

$$R-L = \omega(kr) + n_r r + \varepsilon \quad |n_r < k, \varepsilon < r$$

$$\omega = (R-L)/(kr) \quad // \text{取整}$$

$$n_r = \Gamma / r \quad |n_r < k, \Gamma = (R-L) - \omega(kr)$$

$$R-L = \alpha r + \varepsilon \quad | \varepsilon < r, \alpha \gg 1$$

对上面参数作简单的解释:假设发送的距离为 i 可以为 ir , $r \ll R$,因此, $i \gg 1$, i 的最大可能值为 α ,即 $\alpha r + \varepsilon = R$,其中, ε 为小于 r 的数。

对于一个给定的 L ,当跳数的取值为 kr 时,距离基站 D 处节点的数据都经由 j 个圆环转,其中, D 满足:

$$skr + (j-1)r < D < skr + jr \quad |j \in \{1, k\}, s \in \{0, R \bmod(kr)\}$$

例如, $k=3$, s 最大为 4,则表示 \mathfrak{S}_1 内 1, 4, 7, 10, 13 号圆环的数据经过 1 号圆环转发到缓冲区; 2, 5, 8, 11 号圆环的数据经过 2 号圆环转发到 sink; 3, 6, 9, 12 号圆环的数据经过 3 号圆环转发到 sink。如果 $k=1$,就是文献[7]分析的网络情况, \mathfrak{S}_1 网络的所有数据都经过 1 号圆环转发到缓冲区。

从上面的分析可以看出,当 $k > 1$ 时,离缓冲区近的节点所承担转发的数据量近似为 $k=1$ 时的 $1/k$ (这里的近似是指由于 $R-L$ 不是 kr 的整数倍,导致余下的数据经过离缓冲区近的环转发,而离得远的环少了这部分数据的转发)。可见,采用不同的发射级别可能会降低能量消耗,从而延长网络寿命。下面分析如何选择最佳 k 值。

定理2 对于 \mathfrak{S}_1 区域,不同的环属于 $(L+jr, L+(j-1)r) | 1 \leq j \leq k$ 。转发的数据量为

$$\begin{cases} D_r = \frac{\{\omega(\omega+1)k\pi r^2 + \pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr)\omega\} \rho r}{\pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr)\rho} \\ D_t = \frac{(\omega+1)\lambda + \{\omega(\omega+1)kr\} \lambda}{2jr - r + 2L} \end{cases} \quad (3)$$

证明

此圆环的面积为

$$\pi(L+jr)^2 - \pi((L+(j-1)r)^2) = 2\pi jr^2 - 2\pi r^2 + 2\pi Lr$$

节点数为

$$(2\pi jr^2 - 2\pi r^2 + 2\pi Lr)\rho$$

它所转发数据的区域面积为

$$\sum_{i=1}^{\omega} \pi \{ (L+ikr+jr)^2 - (L+ikr+jr-r)^2 \} = \sum_{i=1}^{\omega} \pi (2jr^2 - r^2 + 2Lr + 2ikr^2)$$

此区域共有节点个数为

$$\sum_{i=1}^{\infty} \pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr + 2ikr^2) \rho$$

此区域需要接收的数据为

$$\sum_{i=1}^{\infty} \pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr + 2ikr^2) \rho \lambda =$$

$$\{ \varpi(\varpi+1)k\pi r^2 + \pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr)\varpi \} \rho \lambda$$

那么发送的数据量为

$$\sum_{i=0}^{\infty} \pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr + 2ikr^2) \rho =$$

$$\{ \varpi(\varpi+1)k\pi r^2 + \pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr)(\varpi+1) \} \rho \lambda$$

设此区域节点承担的数据量相等。因此，该区域每个节点接收的数据量为

$$D_r = \frac{\{ \varpi(\varpi+1)k\pi r^2 + \pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr)\varpi \} \rho r}{\pi(2jr^2 - r^2 + 2Lr)\rho}$$

因此，发送的数据量为

$$D_i = (\varpi+1)\lambda + \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / \{ (2jr - r + 2L) \}$$

\mathfrak{S}_1 区域内第 2 个能量消耗最大的节点可能位于 $L+n_r+\varepsilon$ 处，这是因为此处的发送数据是整个网络最多的，比 $\{L+n_r+\varepsilon, L+kr\}$ 多，但发送距离小于 kr 。因此，当节点位于 $\{L, L+n_r+\varepsilon\}$ 时， $L+n_r+\varepsilon$ 处承担的数据量最多，发送距离最远，在此范围内，位于 $L+n_r+\varepsilon$ 处的节点能量消耗最大。下面研究位于 ε 圆环内最大能量消耗节点的能量消耗情况。

定理 3 对于 \mathfrak{S}_1 区域， $L+n_r+\varepsilon$ 处转发的数据量为

$$\begin{cases} D_r = \varpi\lambda + \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / \{ (2(L+n_r)+\varepsilon) \} \\ D_i = (\varpi+1)\lambda + \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / \{ (2(L+n_r)+\varepsilon) \} \end{cases} \quad (4)$$

证明

此 ε 圆环的面积为

$$\pi(L+n_r+\varepsilon)^2 - \pi(L+n_r)^2 = 2\pi(L+n_r)\varepsilon + \pi\varepsilon^2$$

节点数为

$$(2\pi(L+n_r)\varepsilon + \pi\varepsilon^2) \rho$$

负责接收数据的区域为

$$\sum_{i=1}^{\infty} \pi\{(L+ikr+n_r+\varepsilon)^2 - (L+ikr+n_r)^2\} =$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \pi(2(L+ikr+n_r)\varepsilon + \varepsilon^2)$$

此区域的节点数为

$$\pi\{2\varpi(L+n_r)\varepsilon + k\varepsilon\varpi(\varpi+1) + \varpi\varepsilon^2\} \rho$$

需要接收的数据为

$$\pi\{2\varpi(L+n_r)\varepsilon + k\varepsilon\varpi(\varpi+1) + \varpi\varepsilon^2\} \rho \lambda$$

节点需要发送的数据量为

$$\sum_{i=0}^{\infty} \pi(2(L+ikr+n_r)\varepsilon + \varepsilon^2) \rho =$$

$$\pi\{2(\varpi+1)(L+n_r)\varepsilon + k\varepsilon\varpi(\varpi+1) + (\varpi+1)\varepsilon^2\} \rho \lambda$$

设此区域内节点承担的数据量相等，则区域每个节点承担的数据量如下：

接收的数据量为

$$D_r = D_r = \varpi\lambda + \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / \{ (2(L+n_r)+\varepsilon) \}$$

发送的数据量为

$$D_i = (\varpi+1)\lambda + \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / \{ (2(L+n_r)+\varepsilon) \}$$

因此，此区域节点的能量消耗为

$$E = D_r \times E_{elec} + D_i \times E_{elec} + D_i \times \varepsilon_{fs}(n_r + \varepsilon)^2$$

图 3 给出了 $R=423$ 、 $r=10$ 、 $L=240$ 时不同 k 值下的能量消耗情况。可以发现，与只有一种发射功能的网络相比，在取得最佳 k 值时，其能量消耗下降了 5 倍左右，即寿命提高

了约 5 倍，因此， k 值的选择能够大幅度提高网络寿命。

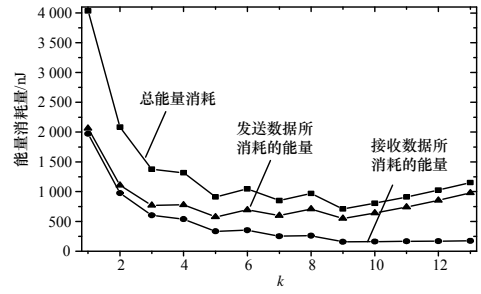


图 3 不同 k 值下的能量消耗

2.2.2 \mathfrak{S}_2 区域的能量消耗情况

定理 4 网络的 \mathfrak{S}_2 内的第 j 环的能量消耗为

$$\begin{cases} D_r = \varpi\lambda - \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / (2L - 2jr + r) \\ D_i = (\varpi+1)\lambda - \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / (2L - 2jr + r) \\ E = D_r \times E_{elec} + D_i \times E_{elec} + D_i \times \varepsilon_{fs}(jr)^2 \end{cases} \quad (5)$$

证明

位于 $jr|k \geq j \geq 1$ 的节点能量消耗的计算如下：

此圆环的面积为

$$\pi(L - (j-1)r)^2 - \pi(L - jr)^2 = \pi r(2L - 2jr + r)$$

节点数为

$$\pi r(2L - 2jr + r)\rho$$

它所负责转发数据的区域面积为

$$\sum_{i=1}^{\infty} \pi\{(L - ikr - (j-1)r)^2 - (L - ikr - jr)^2\} =$$

$$\pi \varpi r(2L - 2jr + r) - \pi \varpi r^2 k(\varpi + 1)$$

节点数为

$$\{\pi \varpi r(2L - 2jr + r) - \pi \varpi r^2 k(\varpi + 1)\} \rho$$

产生的数据量为

$$\{\pi \varpi r(2L - 2jr + r) - \pi \varpi r^2 k(\varpi + 1)\} \rho \lambda$$

发送的数据量为

$$\sum_{i=0}^{\infty} \pi\{(L - ikr - (j-1)r)^2 - (L - ikr - jr)^2\} \rho =$$

$$\{\pi(\varpi+1)r(2L - 2jr + r) - \varpi(\varpi+1)\pi r^2 k\} \rho \lambda$$

设此区域内节点承担的数据量相等。此区域内每个节点承担的数据量如下：

接收的数据量为

$$D_r = \varpi\lambda - \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / (2L - 2jr + r)$$

发送的数据量为

$$D_i = (\varpi+1)\lambda - \{ \varpi(\varpi+1)kr \} \lambda / (2L - 2jr + r)$$

因此，能量消耗情况为

$$E = D_r \times E_{elec} + D_i \times E_{elec} + D_i \times \varepsilon_{fs}(jr)^2$$

图 4 显示了 $R=423$ 、 $r=10$ 、 $L=240$ 时，不同 k 值下能量消耗最大节点的能量消耗情况。

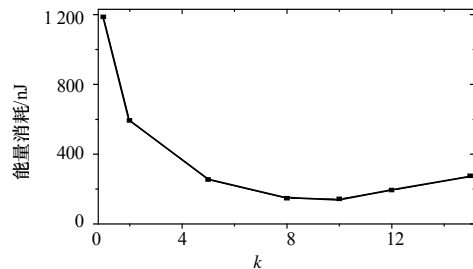


图 4 不同 k 时能量消耗最大节点的能量消耗

(下转第 113 页)