

基于无线传感器网络的传输距离控制方法

殷贞玲 王汝传 黄海平 孙力娟
(南京邮电大学计算机学院 南京 210003)

摘 要 在传感器节点受到能量严重制约的情况下,如何合理地选择自适应拓扑变化的路由协议,有效地控制节点传输半径来提高系统的整体性能,成为当前无线传感器网络研究领域的热点问题之一。在基于 RSSI 测距技术的基础上,引入了 3 种传输距离控制策略,同时结合时延和能耗这两个指标,对 3 种传输策略进行了比较。仿真结果表明,动态选择传输半径可显著提高网络的整体性能,延长网络的生命周期,并减少节点能耗和传输时延。

关键词 无线传感器网络,路由,传输距离控制,传输半径

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Transmission Distance Controlling Method of Wireless Sensor Networks

YIN Zhen-ling WANG Ru-chuan HUANG Hai-ping SUN Li-juan

(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract In the case of the restrictions of energy on wireless sensor nodes, how to choose a reasonable routing protocol of adaptive topology change and control transmission radius effectively to improve the whole performance of the sensor networks becomes the issue on current research fields. Based on RSSI ranging technology, this novel introduced and compared three transmission distance control strategies, which utilizes time-delay and energy-consumption as the reference index. Simulation results show that, choosing transmission radius dynamically can obviously improve the whole performance of the system, prolong the lifetime of the network and decrease the energy consumption and time delay of the sensor nodes.

Keywords Wireless sensor networks, Routing, Transmission distance controlling, Transmission radius

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks,简称 WSNs)由具有环境感知、数据处理和通信能力的各智能传感器节点以一种自组织的形式组成。节点间的通信需要路由协议的支持,固定网格的网络拓扑不满足应用路由机制的鲁棒性要求,因而合理选择基于自适应拓扑变化的路由协议^[1-3],有效控制节点每一跳传输距离成为当前无线传感器网络研究领域的关键技术之一。在该类路由协议中,使用动态选择可活动路由节点作为下一条节点转发数据,利用 RSSI(Received Signal Strength Indicator,接收信号强度指示)测距技术^[4]来定位并选择适合距离的节点作为可活动路由转发节点。为了在有限的节点资源下,节省能耗,减少每次数据传输时延,必须科学地动态规划出最合适的数据传输距离来延长网络的生命周期,以满足不同的需求。

2 问题的提出

本文基于一个随机布置节点、自组织成网的无线传感器

网络传输距离控制模型,如图 1 所示。

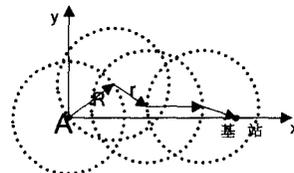


图 1 无线传感器网络传输距离控制模型

该无线传感器网络模型中,首先由源节点 A 采集节点信息数据,经过网络中可转发路由由中间节点的多跳转发至目的终端——基站。信息数据传输过程中,可选择 RSSI 值最小(即节点可达最大传输距离 R)处的某节点作为下一跳数据包转发节点,也可选择 RSSI 值在预先设定范围内(节点可达最大传输距离 R 范围内 r 处)的某节点作为下一跳数据包转发节点,经过多跳转发,最终将采集信息数据包发送至基站节点。

根据上述流程需要考虑以下几个方面的问题:

1) 传输时间的开销。保证节点在一定时间内将源节点采

到稿日期:2009-07-28 返修日期:2009-10-28 本文受国家自然科学基金(60973139,60773041),江苏省自然科学基金(BK2008451),国家高科技 863 项目(2007AA01Z404,2007AA01Z478),2006 江苏省软件专项,现代通信国家重点实验室基金(9140C1105040805),国家和江苏省博士后基金(0801019C,20090451240),江苏高校科技创新计划项目(CX08B-086Z)和江苏省六大高峰人才项目(2008118)资助。

殷贞玲(1985-),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、计算机软件在通信中的应用,E-mail:wangrc@njupt.edu.cn;王汝传(1943-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机软件、计算机网络、信息安全、移动代理和虚拟现实技术等;黄海平(1981-),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、计算机软件在通信中的应用和信息安全;孙力娟(1963-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络、计算机软件在通信中的应用。

集的节点信息数据包经过多跳可转发路由节点的转发至目的终端节点——基站。如果时间太长,目的基站节点势必认为本次数据包采集失败。

2) 能量消耗的开销。由于传感器节点往往设计成非常紧凑的形式,并且不可补充能量,网络寿命受至于有限的能量约束,因此传感器网络中一个非常关键的问题就是尽可能地节约能量,以延长网络活动寿命。

目前,对传感器网络中传输距离控制的研究已引起了广泛关注。文献[5]针对高速汽车移动实例研究,证实了在移动 Ad Hoc 网络中选择切实可行的节点并对传输范围进行一定的控制,可明显降低网络负荷以及减少端到端的延迟,但此传输控制并不适合于无线传感器网络。文献[6]对无线多跳网络可变量传输距离情况下的网络传输的能力进行了分析,并与等长传输范围情况进行对比,从理论上分析了可变量度的传输距离比等长传输范围具有更好的传输能力,但对于可变量度的控制存在实际不可操作性的困难。文献[7]将路由段分格后来确定每格的长度,在假设每个格子中存在候选路由节点的情况下,分析网络中节点的耗能等问题,它并没有考虑各格中路由节点的随机位置以及是否存在候选路由节点,因此不适合其他路由协议,如在广泛研究的 LEACH 协议^[7]中,簇头节点是随机选择出来的。文献[8]提出 3 种数据传输策略,分析了用适合的传输半径来控制网络数据包的转发,以使得寻找出下一跳目的节点的概率增大。但对于从节点冲突的角度分析寻找下一跳节点的概率问题,它仅仅从概率的角度出发证明了若有效地控制节点传输半径,可以增大寻找下一跳转发路由节点的概率,并没有给出传输半径选择的具体分析,以及传输半径对于整个网络传输的时延、能量开销等方面因素的影响。

本文基于无线传感器网络传输距离控制问题,针对文献[8]中给出的 3 种传输策略,在给定的无线传感器网络模型上和传感器节点随机布置的情况下,对传输时延、能量开销两方面的因素分别进行了讨论,给出了每个因素对于传输距离产生影响的相关计算和结果,并对仿真结果进行了分析。

3 网络模型

在一区域内随机分布无线传感器节点,它们自组织成一无线传感器网络。在无线传感器网络中,任意一通信节点的最大无线传输距离半径为 R ,如图 2 所示。以中心节点为基站、以基站为原点、半径为 R 作一圆,所覆盖的区域面积为 A ,在区域 A 内中分布的无线传感器节点均能在一跳之内接收基站传送的数据。

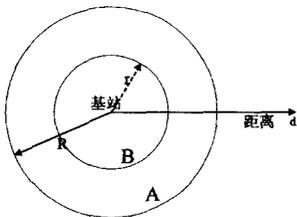


图 2 无线传感器节点传输网络模型

本文根据该节点传输网络模型,利用 RSSI 测距技术^[4]定位下一跳节点,具体讨论无线传感器网络中传输距离的控制。RSSI 值表示接收机接收到信道带宽上的宽带接收功率,

其通常作为判断系统干扰的依据,无线传感器节点接收数据包时,可测量出该接收包的信号强度值,距离越远,电压越大,接收包信号强度值越小。因此可以针对问题规模适合的传输距离,利用 RSSI 定位出下一跳的可转发路由节点,从而实现路由的动态更新。

由文献[8]可知,无线传感器网络中,在选择下一跳节点作为父节点继续广播消息时,有以下 3 种选择策略: MFR, NFP, MVR, 如图 2 所示。

MFR(Most Forward with Fixed Radius): 选择节点最大传输距离 R 处的节点作为下一跳节点,进行消息包的转发^[9],每跳节点的传输覆盖范围为 A ,如图 2 所示。此种选择策略的主要目标是尽可能减少传输过程中的跳数,将消息包以尽可能快的速度传递至目的节点。

NFP(Nearest with Forward Progress): 选择距离父节点最近的节点作为下一跳节点,进行消息包的转发。由于每跳节点间的传输距离较短,因此该选择策略的主要目标是尽可能减少每跳节点传输所消耗的能量。

MVR(Most Forward with Variable Radius): 选择距离父节点半径为 r 处圆弧上的节点作为下一跳节点,进行消息包的转发,每跳节点的传输覆盖范围为 B (以节点为圆心, r 为半径的圆),如图 2 所示。此种选择策略的主要目标是均衡网络整体的能量消耗和传输延时。

4 传输策略分析

为了方便讨论,本文将模型简化为一线性模型。假设目的节点 A 位于原点,基站位于 X 轴上距离 M 处,在 $(0, M)$ 范围内随机分布 N 个节点,节点最大传输距离为 R_{max} 。信息源(节点 A)采集信息并产生爱尔兰流量大小为 Q 的数据流量,经过距离 M 的路径到达目的节点,假设路径上不产生其他任何数据流量。在具体讨论 3 种传输策略中,若利用 RSSI 值直接计算比较麻烦,本文将采用距离对问题进行分析,在实际应用中,将距离和 RSSI 值进行转化,并利用 RSSI 定位技术选择适合的转发路由节点。

在无线传感器网络数据传输过程中,总期望源节点产生数据流经过多跳转发至目的节点的过程中,传输时间越小越好,节点能量消耗越小越好,下面将分别针对传输时延、能量消耗两个因素定量分析比较 3 种传输策略。

4.1 传输时延相关设定

目的节点 A 采集节点信息,并处理打包后产生爱尔兰流量大小为 Q 的数据,现从目的节点 A 将采集信息数据传输至基站节点,在传输过程中,假设节点接收、处理和发送单位流量数据包的时延分别为 $T_{receive}$, T_{deal} 和 T_{send} ,节点单位距离传播单位流量数据包的时延为 T_{trans} 。在数据包传输转发过程中,由于传输路径中普通节点只接收数据包但不参与数据包的转发,即它处理数据包所产生的接收时延、处理时延将不影响整个网络数据包的传输时延,因而传输路径中只有选中作为下一跳的节点(可转发路由节点)才需考虑其接收、处理以及发送时延。

4.2 能量模型

传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电路工艺的进步,处理器和传感器模块的功耗变得很低,绝大部分能量消耗在无线通信模

块上。因此本文在能量分析上只考虑消耗在无线通信模块上的能量消耗。

无线传感器节点发送信号时,每秒消耗的能量为^[10]:

$$E_t = (e_t + e_d r^n) B \quad (1)$$

式中, e_t 为每比特信息发射器所消耗的能量, e_d 为在传送阶段消耗的能量系数。 r 为节点的传输范围, n 为信道能量的损失参数, 该因子与传输的环境有关, 通常在 2 到 4 之间; B 为无线的比特速率, 一般采用一个固定的参数。

在接收端, 为了接收无线信号, 需消耗固定的能量, $E_r = e_r B$, 式中 e_r 为每比特信息接收器所需消耗的节点能量。当 $n=2$ 时, 参数值通常为^[10]:

$$e_t = 50 * 10^{-9} \text{ J/bit} \quad e_r = 50 * 10^{-9} \text{ J/bit}$$

$$e_d = 100 * 10^{-12} \text{ J/bit/m}^2 \quad B = 1 \text{ kbit/s}$$

在将爱尔兰流量大小为 Q 的数据从源节点 A 传输至目的节点的数据传输过程中, 节点的能量消耗主要发生在接收、处理和发送数据状态(假设模型中 N 个节点均处于活动状态)。由于传输 1 比特信息 100m 距离需要的能量大约相当于执行 3000 条计算指令消耗的能量^[11], 因此传感器节点处理数据消耗的能量相对于传输数据消耗的能量很低。本文对 3 种传输策略的能量分析将不考虑处理数据状态消耗的能量。

4.3 MFR 策略

选择节点最大传输距离 R_{\max} 处的节点作为下一跳节点, 需经过 $M/R_{\max} + 1$ 跳 (M 能被 R_{\max} 整除) 或 $\lfloor M/R_{\max} \rfloor + 2$ 跳 (M 不能被 R_{\max} 整除) 传输数据包至目的节点。模型中, 节点在 $(0, M)$ 范围内随机分布, 即在 R_{\max} 或 $2R_{\max}$ 或 nR_{\max} ($n < M/R_{\max}$) 处不一定存在可转发的活动路由节点, 本文采用如下方法: 近似选择最接近 nR_{\max} ($n < M/R_{\max}$) 处的可活动节点代替作为路由节点进行消息包转发, 当分布节点密度较大时, 可近似认为传输距离为 R_{\max} 。

• 传输时延 T_{MFR}

$$T_{MFR} = Q[\lfloor M/R_{\max} \rfloor + 1] (T_{\text{receive}} + T_{\text{deal}} + T_{\text{send}}) + MT_{\text{trans}} + T_{\text{send}} + T_{\text{receive}} = Q[\lfloor M/R_{\max} \rfloor + 2] (T_{\text{receive}} + T_{\text{send}}) + (\lfloor M/R_{\max} \rfloor + 1) T_{\text{deal}} + MT_{\text{trans}} \quad (2)$$

(M 不能被 R_{\max} 整除)

$$T_{MFR} = Q[(M/R_{\max}) (T_{\text{receive}} + T_{\text{deal}} + T_{\text{send}}) + MT_{\text{trans}} + T_{\text{send}} + T_{\text{receive}}] = Q[(M/R_{\max} + 1) (T_{\text{receive}} + T_{\text{send}}) + (M/R_{\max}) T_{\text{deal}} + MT_{\text{trans}}] \quad (3)$$

(M 能被 R_{\max} 整除)

• 能量消耗 E_{MFR}

源节点 A 产生 Q 爱尔兰流量的数据, 考虑其发送能量为 $E_A = Q(e_t + e_d R_{\max}^n) B$, 数据传输经过 M/R_{\max} (M 能被 R_{\max} 整除) 或 $\lfloor M/R_{\max} \rfloor + 1$ (M 不能被 R_{\max} 整除) 个可活动转发路由节点到达目的节点, 每个可转发路由节点均需要接收、处理并转发数据, 消耗能量: $E_{\text{routing}} = Q(e_t + e_d R_{\max}^n + e_r) B$, 目的节点接收数据消耗能量 $E = Q e_r B$ 。数据传输过程中的其他普通节点(不作为路由转发节点)处于上一跳路由节点的覆盖范围内, 也接收数据, 但并不转发数据, 故每个普通节点消耗 $E_{\text{normal}} = Q e_r B$ 能量。

采用 MFR 传输策略将爱尔兰流量大小为 Q 的数据传输至目的节点 A 消耗的总能量:

$$E_{MFR} = Q(e_t + e_d R_{\max}^n) (\lfloor M/R_{\max} \rfloor + 1) B + N Q e_r B \quad (4)$$

(M 不能被 R_{\max} 整除)

$$E_{MFR} = Q(M/R_{\max}) (e_t + e_d R_{\max}^n) B + N Q e_r B \quad (5)$$

(M 能被 R_{\max} 整除)

4.4 NFP 策略

模型中, 在 $(0, M)$ 范围内随机分布 N 个节点, 假设这 N 个节点均可作为活动路由节点, 且这 N 个路由节点相邻两节点间距离不大于 R_{\max} , 则经过 $N+1$ 跳, 爱尔兰流量大小为 Q 的数据包可转发至目的节点。

• 传输时延 T_{NFP}

$$T_{NFP} = Q[(N+2) (T_{\text{receive}} + T_{\text{send}}) + (N+1) T_{\text{deal}} + MT_{\text{trans}}] \quad (6)$$

• 能量消耗 E_{NFP}

假设这 N 个可活动转发路由节点离基站的距离分别为 X_j ($j=1, 2, \dots, N$), $0 < X_1 < X_2 < \dots < X_N < M$, 那么源节点 A 至第一个可活动转发路由节点间距离为 X_1 , N 个路由节点两相邻间距为 $X_i - X_{i-1}$ ($i=2, \dots, N$), 第 N 个转发路由节点至目的节点间距离为 $M - X_N$ 。为了满足 NFP 传输策略, 传输路径中的两相邻节点间距离均小于 R_{\max} , 即 $X_1 < R_{\max}$, $X_i - X_{i-1} < R_{\max}$ ($i=2, \dots, N$) 且 $M - X_N < R_{\max}$, 则经过 $N+1$ 跳, Q 流量的数据包可转发至目的节点。类似上述 MFR 数据传输策略能量消耗的分析, NFP 数据传输策略将节点分为基站、可活动转发路由节点 (N 个) 及目的接收节点 3 类。

假设源节点位置表示为 $X_0=0$, 采用 NFP 传输策略将爱尔兰流量大小为 Q 的数据传输至目的节点 A 消耗的总能量:

$$E_{NFP} = \sum_{i=1}^N Q(e_t + e_r + e_d (X_i - X_{i-1})^n) B + Q(e_t + e_r + e_d (M - X_N)^n) B = Q(\sum_{i=1}^N e_d (X_i - X_{i-1})^n + e_d (M - X_N)^n) B + Q(N+1)(e_t + e_r) B \quad (7)$$

4.5 MVR 策略

选半径为 r ($0 < r < R_{\max}$) 处节点作为下一跳活动路由节点。该传输策略采用类似 MFR 传输策略的方法: 由于可活动路由节点的位置的随机特点, 不一定总能找到正好相距 r 的候选节点, 当 $r, 2r, 3r, \dots$ 距离处没有节点时, 选择距离最近节点替代路由节点, 当节点分布密度较大时, 可近似为每跳传输距离为 r 。

• 传输时延 T_{MVR}

$$T_{MVR} = Q[\lfloor M/r \rfloor + 2] (T_{\text{receive}} + T_{\text{send}}) + (\lfloor M/r \rfloor + 1) T_{\text{deal}} + MT_{\text{trans}} \quad (8)$$

($0 < r < R_{\max}$) (M 不能被 r 整除)

$$T_{MVR} = Q[(M/r + 1) (T_{\text{receive}} + T_{\text{send}}) + (M/r) T_{\text{deal}} + MT_{\text{trans}}] \quad (9)$$

($0 < r < R_{\max}$) (M 能被 r 整除)

• 能量消耗 E_{MVR}

源节点 A 产生源数据, 其发送能量为 $E_A' = Q(e_t + e_d r^n) B$, Q 爱尔兰流量的数据传输经过 M/r (M 能被 r 整除) 或 $\lfloor M/r \rfloor + 1$ (M 不能被 r 整除) 个可活动转发路由节点到达目的节点, 每个路由转发节点需要接收、处理并转发数据, 消耗能量 $E_{\text{routing}}' = Q(e_t + e_d r^n + e_r) B$, 目的节点接收数据消耗能量 $E' = Q e_r B$ 。数据传输过程中的其他普通节点(不作为路由转发节点)处于上一跳路由节点的覆盖范围内, 也接收数据, 但并不转发数据, 因此每个普通节点消耗 $E_{\text{normal}} = Q e_r B$ 的能

量。

采用 MVR 传输策略将爱尔兰流量大小为 Q 的数据传输至目的节点 A 消耗的总能量:

$$E_{MVR} = Q(e_t + e_d r^n)(\lfloor M/r \rfloor + 1)B + NQe_r B \quad (M \text{ 不能被 } r \text{ 整除}) \quad (10)$$

$$E_{MVR} = Q(M/r)(e_t + e_d r^n)B + NQe_r B \quad (M \text{ 能被 } r \text{ 整除}) \quad (11)$$

4.6 系统的多目标规划求解

对于整个传感器网络系统而言,需要综合以上两个因素来进行考虑,从而使整个网络的性能尽可能达到最优,因此选择数据传输策略问题是一个多目标规划问题,简单比较式(2)、式(6)和式(8)可知,其时延差距主要存在跳数这个参数上。另一方面,由于传感器接收和发送时消耗的能量比^[12]为 1.05:1.4,当一定的传输距离中的节点跳数增多时,每一跳距离减少,发送消耗的能量减少,因此总体能量消耗将减少。现规划模型如下:

MFR:

$$\begin{cases} T_{MFR} = \begin{cases} Q[(\lfloor M/R_{max} \rfloor + 2)(T_{receive} + T_{send}) + (\lfloor M/R_{max} \rfloor + 1)T_{deal} + MT_{trans}] \\ Q[(M/R_{max} + 1)(T_{receive} + T_{send}) + (M/R_{max})T_{deal} + MT_{trans}] \end{cases} \\ E_{MFR} = \begin{cases} Q(e_t + e_d R_{max}^n)(\lfloor M/R_{max} \rfloor + 1)B + NQe_r B \\ Q(M/R_{max})(e_t + e_d R_{max}^n)B + NQe_r B \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

NFP:

$$\begin{cases} T_{NFP} = Q[(N+2)(T_{receive} + T_{send}) + (N+1)T_{deal} + MT_{trans}] \\ E_{NFP} = Q(\sum_{i=1}^N e_d (X_i - X_{i-1})^n + e_d (M - X_N)^n)B + Q(N+1)(e_t + e_r)B \end{cases} \quad (13)$$

MVR:

$$\begin{cases} T_{MVR} = \begin{cases} Q[(\lfloor M/r \rfloor + 2)(T_{receive} + T_{send}) + (\lfloor M/r \rfloor + 1)T_{deal} + MT_{trans}] \\ Q[(M/r + 1)(T_{receive} + T_{send}) + (M/r)T_{deal} + MT_{trans}] \end{cases} \\ E_{MVR} = \begin{cases} Q(e_t + e_d r^n)(\lfloor M/r \rfloor + 1)B + NQe_r B \\ Q(M/r)(e_t + e_d r^n)B + NQe_r B \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

该规划模型中每个数据传输策略都有 2 个目标函数,第一个目标函数的作用是使网络中的数据包的总时延尽可能小,第二个目标函数的作用是使网络中的总能量消耗尽可能小,根据网络的拓扑结构,给出了对应的限制条件。

为了便于求解该模型,将计算模型和实际情况相结合,引入求解数据^[10,11]:

$$T_{receive} = 50\text{ns} \quad T_{deal} = (1/7.3728) * 10^{-6}\text{s}$$

$$T_{send} = 50\text{ns} \quad T_{trans} = (1/3) * 10^{-8}\text{s}$$

当 $n=2$ 时, $e_t = 50 * 10^{-9}\text{J/bit}$, $e_r = 50 * 10^{-9}\text{J/bit}$, $e_d = 100 * 10^{-12}\text{J/bit/m}^2$, $B = 1\text{kbit/s}$ 。

利用 Friis 自由空间方程式^[13]节点发送器功率与发送器和接收器之间的距离的关系,调节传感器节点发射功率,将节点最大传输距离设置为 $R_{max} = 100\text{m}$ 。代入式(12)一式(14)可得:

$$\begin{cases} T_{MFR} = \begin{cases} Q[(\lfloor M/100 \rfloor + 2)(10^{-4}) + (\lfloor M/100 \rfloor + 1)(1/7.3728) * 10^{-6} + M * (1/3) * 10^{-8}] \\ Q[(M/100 + 1)(10^{-4}) + M * (1/7.3728) * 10^{-8} + M(1/3) * 10^{-8}] \end{cases} \\ E_{MFR} = \begin{cases} Q[1.05 * 10^{-3} * (\lfloor M/100 \rfloor + 1) + N * 5 * 10^{-5}] \\ Q[M * 1.05 * 10^{-5} + N * 5 * 10^{-5}] \end{cases} \\ T_{NFP} = Q[(N+2)(10^{-4}) + (N+1)(1/7.3728) * 10^{-6} + M(1/3) * 10^{-8}] \\ E_{NFP} = Q[N * 10^{-7} * (\sum_{i=1}^N (X_i - X_{i-1})^2 + (M - X_N)^2) + (N+1) * 10^{-4}] \\ T_{MVR} = \begin{cases} Q[(\lfloor M/r \rfloor + 2)(10^{-4}) + (\lfloor M/r \rfloor + 1)(1/7.3728) * 10^{-6} + M(1/3) * 10^{-8}] \\ Q[(M/r + 1)(10^{-4}) + (M/r)(1/7.3728) * 10^{-6} + M(1/3) * 10^{-8}] \end{cases} \\ E_{MVR} = \begin{cases} Q[10^{-7}(500 + r^2)(\lfloor M/r \rfloor + 1) + N * 5 * 10^{-5}] \\ Q[(M/r) * 10^{-7}(500 + r^2) + N * 5 * 10^{-5}] \end{cases} \end{cases}$$

当 $M=500\text{m}$, $r=40\text{m}$, 节点个数 $N=50$ 时,利用仿真得出节点随机分布位置如表 1 所列,其中▲表示对应策略选中的可转发路由节点。

表 1 节点随机分布位置(单位:m)

i	$X_i(\text{NFP})$	MFR	MVR	i	$X_i(\text{NFP})$	MFR	MVR
1	5.34060			27	261.011		
2	19.0125			28	274.856		
3	31.3534			29	283.124		▲
4	40.3145		▲	30	288.809		
5	47.3256			31	300.451	▲	
6	59.2134			32	319.845		▲
7	65.2356			33	337.561		
8	79.9012		▲	34	361.365		▲
9	81.3256			35	364.120		
10	88.9828			36	367.111		
11	101.560	▲		37	372.031		
12	120.691		▲	38	381.172		
13	123.245			39	388.973		
14	140.897			40	391.358		
15	148.235			41	401.639	▲	▲
16	160.761		▲	42	413.724		
17	179.235			43	420.144		
18	182.234			44	438.342		▲
19	189.865			45	459.252		
20	198.990	▲	▲	46	477.128		
21	214.357			47	480.210		▲
22	222.087			48	487.105		
23	234.793			49	496.327		
24	241.621		▲	50	498.142		
25	251.028			目	500.000	▲	▲
26	258.801						

分别对 3 种传输策略进行延时和能量消耗的计算结果如下:

MFR:

$$T_{MFR} = 6.02345 * 10^{-4}\text{Qs}, E_{MFR} = 0.00755\text{QJ}$$

NFP:

$$T_{NFP} = 5.20858 * 10^{-3}\text{Qs}, E_{NFP} = 0.037891\text{QJ}$$

MVR:

$$T_{MVR} = 1.45349 * 10^{-3}\text{Qs}, E_{MVR} = 0.005545\text{QJ}$$

通过上述计算可以看出,平均每 100m 分布有 10 个节点时,NFP 传输策略的时延和能耗都是最大的。因此,这种传输策略不符合无线传感器网络能耗小、时延短的要求。而在

另外两种策略中, MFR 较 MVR 传输时延小, 但其消耗的能量相对较大。当能量消耗要求比较高时, MVR 策略优于 MFR; 当对时延要求比较高时, MFR 策略优于 MVR, 但并不是很明显。根据上述计算, 传输 500m 距离长度, 当数据流量很小时, 时延只相差毫秒数量级的数据。因此, 在实际应用中, 利用 MVR 策略合理选择传输半径, 有利于减少整个无线传感器网络的能量消耗, 控制整个网络的传输时延, 达到优化整个网络的目的。

4.7 MVR 策略仿真和数值分析

根据 4.4 节的分析, 表明 MVR 策略能够优化整个传感器网络, 而在实际应用中, 需要确定传输半径的具体数值, 因此为了具体分析 MVR 策略的传输半径选择问题, 现进行如下实验。

在该实验中, 采用 NS-2 仿真平台得出源目节点间的随机分布序列, 并使用 4.3 节 MVR 传输策略的计算公式, 通过 Matlab 仿真平台分别对策略的传输时延和整个网络能量消耗两个因素进行仿真。当网络中源节点和目的节点随机分布 20, 70, 120 个节点时, 实验结果如图 3 和图 4 所示。实验中, 节点最大传输距离 $R_{max} = 100m$, $0 < r < 100m$, 由 Friis 自由空间方程式调节节点发射功率可得, 图 4 中自上至下的 3 条曲线分别为 $N = 120/70/20$ 时的能量消耗变化曲线。

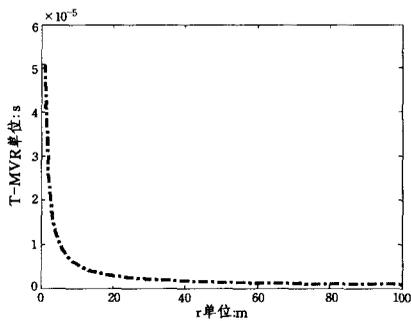


图 3 传输时延 T-MVR 随 r 变化曲线

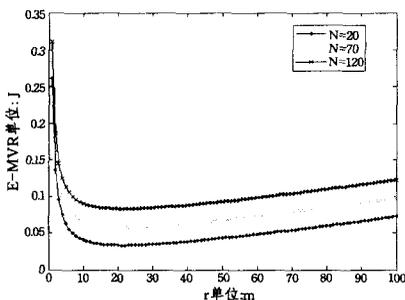


图 4 能量消耗 E-MVR 随 r 变化曲线

由图 3 看出, 传输时延和节点个数无关系, 并且当 r 逐渐增大时, 传输时延逐渐减小。当 $r > 25m$ 时, 传输时延趋于均衡状态且很小。

由图 4 看出, 当 N 增大时, 整个无线传感器网络消耗的能量增大。当 $10 < r < 50m$ 时, 能量消耗相对平衡, 是整个分布消耗的能量最低值。

因此, 综合传输时延和能量消耗这两个因素考虑, 当 $25 < r < 50m$ 时, 整个网络的能量消耗和传输时延小。

结束语 本文提出了无线传感器网络传输距离控制的 3 种传输策略, 并针对传输时延和能量消耗这两个指标对 3 种传输策略进行了比较, 最后对 MVR 策略传输半径进行了实验分析, 结果表明: 当 $25 < r < 50m$ 时, 整个网络的能量消耗和传输时延比较小且相对平衡。本文引入的 3 种传输策略在不同使用情况下, 各方案具有不同的传输效果。但在进行传输策略分析时, 没有考虑节点覆盖度的问题, 根据节点圆周内的覆盖度, 利用概率计算出源目直线上的节点对应覆盖度, 这将是今后要进一步研究的重点之一。

参考文献

- [1] Deng J, Han Y S, Chen P N. Optimal transmission range for wireless ad hoc networks based on energy efficiency[J]. IEEE Transaction on Communications, 2007, 1772-1782
- [2] Hu Jingde, Shi Gang, Yu Chao. Wireless Sensor Network Optimal Hop Routing Algorithm Study[C]// Intelligent Networks and Intelligent Systems. 2008, 183-186
- [3] Dong Ping, Gao Suixiang. Adjustment of Transmission Radius in Linear Wireless Sensor Networks[C]// Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2008, 1-4
- [4] Fox D, Hightower J, Schulz D, et al. Bayesian Filtering for Location Estimation[J]. Pervasive Computing, July-Sep. 2003, 24-33
- [5] Maihofer C, Eberhardt R. Geocast in Vehicular Environments; Caching and Transmission Range Control for Improved Efficiency[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Parma, Italy, 2004, 14-17
- [6] Gomez J, Campbell A T. A case for variable-range transmission power control in wireless multihop networks [J]. IEEE INFOCOM 2004-The conference on Computer Communications, 2004, 23(1): 1426-1437
- [7] 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
- [8] 杨贺, 张树东, 孙利民. 无线传感器网络的拓扑控制机制[J]. 计算机科学, 2007, 34(1): 36-40
- [9] Jiang Nan, Yang Shuqun. Impact of small-world topologies on broadcasting for wireless sensor networks[J]. Journal of System Engineering and Electronics, 2009, 20(1)
- [10] Liu Wen-jiunn, Feng Kai-ten. Greedy Routing with Anti-Void Traversal for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(7)
- [11] Li Y, Chen C S, Song Y-Q, et al. Real-time QoS support in wireless sensor networks: A survey[C]// Proc. IFACFET. Nov. 2007, 373-380
- [12] Boughanmi N, Song Y-Q. A new routing metric for satisfying both energy and delay constraints in wireless sensor networks [J]. J. Signal Process. Syst., 2008, 51(2): 137-143
- [13] Chang Ben-jye, Peng Jia-bin. Minimizing Transmission Delay and Deployment Cost for Sensors Placement in Sparse Wireless Sensor Networks[C]// Wireless Communications & Networking Conference. IEEE, 2007