

基于链路质量的无线传感器网络任播路由协议

徐 昕^{1,2} 顾云丽^{1,2} 钱焕延¹

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)¹

(南京信息工程大学计算机与软件学院 南京 210044)²

摘 要 无线传感器网络(WSN)中,由于无线链路的链路质量问题,经常有传递失败导致重传耗费能量的现象出现。传统任播路由协议只以路由距离作为路由判据,而没有讨论链路质量问题,将其应用在 WSN 中会造成路由权重设置不合理。提出了基于链路质量的 WSN 任播路由协议,该协议在讨论链路质量的计算之上,以能耗均衡和系统能耗最小这两个因素决定任播路径的路由权重,并以参数 α 来权衡两者之间的关系。实验证明,在 WSN 中,相比传统任播路由协议,该协议能更有效地均衡能耗,减少系统能耗,从而优化网络生存期。

关键词 无线传感器网络,任播,路由协议,链路质量,碰撞

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Anycast Routing Protocol in Wireless Sensor Networks Based on Link Quality

XU Xin^{1,2} GU Yun-li^{1,2} QIAN Huan-yan¹

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)¹

(School of Computer & Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)²

Abstract In Wireless Sensor Networks(WSN), there is the probability of transmission failure and energy waste for retransmission because of link quality problem. Routing criteria of conventional anycast routing protocols are based only on routing distance but not in consideration of link quality problem, it will lead to unreasonable routing weight setting if we apply those protocols in WSN. A WSN anycast routing protocol based on link quality was proposed. Calculation of link quality was discussed. The routing criterion of our protocol is based on the hybrid of load balancing and minimum total energy cost, and we balanced the two factors by parameter α . In contrast to conventional anycast routing protocols, experiment results show that performances in WSN are improved in terms of energy balancing and network energy consuming hence network lifetime is optimized.

Keywords Wireless sensor networks, Anycast, Routing protocol, Link quality, Collision

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)节点的工作依赖于有限电源,因此 WSN 的生存期是一个关键参数。在提高 WSN 生存期的路由协议研究领域,已有大量研究成果,如周期性休眠-唤醒机制、数据融合等。随着 WSN 规模增大,在单基站(或称 Sink)中,节点汇报其监测数据分组至基站的能耗越来越高,而解决办法是增加基站的数目,如文献[1]提出一种多基站的 WSN 体系。本文的研究工作是关于任播技术在多基站 WSN 中的应用。

任播是 IPv6 提供的一种新型网络服务,指一个发送者和通信组中的任意一个之间的通信。因此,在多基站 WSN 采用任播技术,节点可以将分组任播至任一基站处,可以避免 WSN 中部分节点能量消耗过快而影响网络生存期。关于 WSN 任播路由协议的研究有:基于邻居节点信息的多跳 WSN 任播路由协议^[2];基于构造树结构的 WSN 任播路由协

议^[3];基于休眠-唤醒机制的 WSN 任播路由协议^[4];将 WSN 节点分成上下两层,讨论上层簇头的任播路由策略^[5]。上述 WSN 任播路由协议仍采用传统任播路由协议用于以路由距离来确定路由权重的方法,如随机权重选择法(Weighted Random Selection, WRS)^[6],但没有讨论路由路径的链路质量问题。在 WSN 中,链路质量常用分组丢失率来表示^[7]。本文通过重传机制解决分组丢失问题,但重传会导致节点能耗相应增加,因此路由距离最短路径能耗不一定最少,而仅以路由距离作为路由判据的路由协议并不能很好地适用于 WSN。本文提出基于链路质量的 WSN 任播路由协议。该协议用于 WSN 链路质量中传递碰撞及分组错误概率的计算,并以能耗均衡及系统能耗最小这两个因素作为路由判据,而不仅仅是根据路由距离。因此本文协议与以往任播路由协议相比,更适用于 WSN。实验证明,在 WSN 中,相比传统任播路由协议,本文协议节点能耗更均衡,系统能耗减少,网络生存期更长。

到稿日期:2009-05-06 返修日期:2009-07-24 本文受国防科工委应用基础资金(J1300D004)资助。

徐 昕(1975-),男,博士生,讲师,CCF 会员,研究方向为网络应用,E-mail: xuxin1975715@sina.com;顾云丽(1978-)女,博士生,讲师,研究方向为网络应用;钱焕延(1950-),男,教授,博士生导师。

2 WSN 模型及问题描述

WSN 可以抽象地表示为有向连通图 $G(V, E)$ 。其中, V 为所有传感器节点的集合, E 为节点间有向通信链路的集合。节点 $v \in V$ 的传输范围为 $R(v)$, 串听 (overhearing) 范围为 $R_h(v)$ 。本文设定 $R(v) = R_h(v)$, 并且各节点传输范围相同。节点 v 传输范围 $R(v)$ 内的节点被称为节点 v 的邻居节点, 其集合记为 $N(v)$ 。节点 v 可以与邻居节点建立直接的无线链路, 与其直接通信传递和接收分组。设节点 $u \in N(v)$, 则节点 u 至节点 v 的有向链路表示为 (u, v) , $(u, v) \in E$ 。

各传感器节点 v 以泊松分布概率产生分组。节点 v 的泊松分布参数记为 λ_v , 因此在时间间隔 Δt 内, 节点 v 平均产生的分组数为 $\rho_v = \lambda_v \Delta t$ 。

当节点需传递分组时, 本文协议采用 IEEE 802.11 协议载波侦听多点接入 (CSMA) 机制来实现信道接入控制, 采用节点竞争信道来传递分组。CSMA 的基本思想是: 若节点 v 有分组需传递, 首先检查 $R(v)$ 内所有节点 $N(v)$, 观察信道是否空闲。若信道处于空闲状态, 节点 v 占用信道开始传递; 否则, 节点 v 退避 (backoff)。

节点 v 至基站 i 的路由权重记为 $w_i(v)$, 可得 $\sum_{i=1}^N w_i(v) = 1$ 。其中, N 为系统中基站的数目, 记 $W(v)$ 为节点 v 至各基站的路由权重的向量。

记 W 为各节点路由权重向量的集合, 其表达式为 $W = \{W(v) | v \in S\}$ 。其中, S 是系统各基站节点的集合。节点 v 至基站 i 的路径为 $p_i(v)$ 。 $p_i(v) \in P(v)$, $P(v)$ 是节点 v 至各基站的路径的集合。

对于每个数据源节点, 其产生的分组需根据其路由权重任播至基站处, 而传递会导致路由路径上的节点能量消耗较快。一旦有节点耗尽能量, 就可能引起网络的分割。此时, 虽然大多数节点仍然能够正常工作, 但是从整体上说, 网络已经无法提供用户需要的服务, 从而认为网络失效。因此, 为了保证较长的网络生存期, 合理的路由方法是通过任播均衡地使用所有节点的能量, 以避免部分节点过早地耗尽能量而分割网络。最小化能耗方差选择方法^[8]可以实现对节点能量的均衡使用, 但该方法经常为了均衡系统各节点能耗, 而给与距离 (代价) 较大的路径较多的权重, 从而降低了能耗效率。文献^[9]提出, 若路径所有节点的能量满足给定的阈值, 则采用系统能耗最小选择方法。该方法虽然能耗效率最高, 但经常无法均衡地使用节点能量, 导致某些节点过早耗完能量而分割网络。由于能耗均衡与能耗效率都会直接影响网络生存期, 因此本文将能耗均衡与系统能耗最小这两个因素混合作为本文路由判据。所以, 本文提出的方法一方面保证了系统均衡耗能, 另一方面减少了距离 (代价) 较大的路径所占的路由权重, 提高了能量效率。

对于 $w \in W$, 单位时间系统能耗 $Z(w)$ 为

$$Z(w) = \sum_{(u \in V) \cap (u \notin S)} E(u) \quad (1)$$

式中, $E(u)$ 为节点 u 单位时间能耗。本文假设基站具有强大或无尽的能量, 因此基站的能耗不在计算范围之内。

WSN 中各节点能耗方差 $V(w)$ 为

$$V(w) = \sum_{(u \in V) \cap (u \notin S)} (E(u) - \frac{1}{M} Z(w))^2 \quad (2)$$

式中, M 为网络节点数目 (不包括基站)。采用最小-最大规

范化方法分别将 $Z(w)$ 和 $V(w)$ 区间映射到 $[0, 1]$ 区间, 分别记为 $Z^{0-1}(w)$ 和 $V^{0-1}(w)$ 。 $Z^{0-1}(w)$ 计算如下

$$Z^{0-1}(w) = \frac{Z(w) - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (3)$$

式中, $Z_{\max} = \max_{w \in W} (Z(w))$; $Z_{\min} = \min_{w \in W} (Z(w))$ 。类似有 $V^{0-1}(w)$ 。

本文协议路由判据为 $\min_{w \in W} f(w)$, 其中

$$f(w) = \alpha Z^{0-1}(w) + (1 - \alpha) V^{0-1}(w) \quad (4)$$

α 为调节最小化能耗方差选择方法与系统能耗最小选择方法的权重参数, 取值范围在 $[0, 1]$ 。当 $\alpha = 0$ 时, 为最小化能耗方差选择方法; 当 $\alpha = 1$ 时, 为系统能耗最小选择方法。因此本文可以通过参数 α 来调节能耗均衡与能耗效率两者之间的平衡, 从而优化网络生存期。

3 协议相关参数

3.1 接收和传递分组数

3.1.1 链路 (u, v) 传递分组数

单位时间内节点 v 平均产生并需传递给基站的分组数为 λ_v , 因此节点 v 发送给基站 i 的分组数目为 $w_i(v) \lambda_v$ 。单位时间内在链路 $(u, v) \in E$ 由节点 u 成功传递至节点 v 的分组数记为 $\kappa(u, v)$, $\kappa(u, v)$ 有来自于节点 u 产生的分组, 也有来自于其他节点但由节点 u 中转的分组。因此, $\kappa(u, v)$ 计算如下

$$\kappa(u, v) = \sum_{k \in V_i=1}^N w_i(k) \lambda_k \times b \quad (5)$$

式中, b 是一个辅助布尔变量。当链路 (u, v) 属于路径 $p_i(k)$ 时, b 的值为 1, 反之则为 0。

3.1.2 节点 u 传递分组数

单位时间内由节点 u 需成功传递的分组数 $\kappa(u)$ 计算如下

$$\kappa(u) = \sum_{n \in N(u)} \kappa(u, n) = \sum_{k \in V_i=1}^N \kappa(u, p_i(k)) \quad (6)$$

式中, $\kappa(u, p_i(k))$ 表示在节点 $k \in V$ 传递 $w_i(k) \lambda_k$ 个分组至基站 i 的路径 $p_i(k)$ 中, 导致节点 u 传递 (接收) 的分组数。

当节点 $u \in p_i(k)$ 且节点 u 不是路径 $p_i(k)$ 的终点, 即 $u \neq S_i$ (S_i 指基站 i) 时, 节点 u 需向路径 $p_i(k)$ 的节点 u 的后继节点 u^+ 传递分组。标记在路径 $p_i(k)$ 上节点 u 的前驱节点为 u^- , 节点 u 的后继节点为 u^+ 。

$$\kappa(u, p_i(k)) = w_i(k) \lambda_k \quad (7)$$

当节点 $u \notin p_i(k)$, 即节点 u 不需传递该路径的分组时, $\kappa(u, p_i(k)) = 0$ 。

3.1.3 节点 u 接收分组数

单位时间内节点 u 成功接收的分组数 $\psi(u)$ 计算如下

$$\psi(u) = \sum_{n \in N(u)} \kappa(n, u) = \sum_{k \in V_i=1}^N \kappa(u, p_i(k)) \quad (8)$$

当节点 $u \in p_i(k)$, 且节点 u 不是路径 $p_i(k)$ 的源节点时, $u \neq k$, 节点 u 需接收路径 $p_i(k)$ 的节点 u 的前驱节点 u^- 的分组; 当节点 $u \notin p_i(k)$ 时, 节点 u 不需接收该路径的分组。

3.2 实际接收和传递分组数

3.2.1 链路 (u, v) 实际传递分组数

由前述可知, 在无线链路 (u, v) 中需成功传递的分组数为 $\kappa(u, v)$ 。但因为链路质量问题, 导致部分分组不能成功到达。本文通过重发技术解决分组丢失问题。因此, 单位时间内在无线链路 (u, v) 上实际传递的分组数 $D(u, v)$ 计算如下

$$D(u, v) = \frac{\kappa(u, v)}{1 - \beta(u, v)} \quad (9)$$

式中, $\beta(u, v)$ 表示无线链路 (u, v) 的链路质量。

3.2.2 节点 u 实际传递分组数

单位时间内节点 u 实际传递的分组数 $D(u)$ 计算如下

$$D(u) = \sum_{k \in V_i=1}^N \kappa(u, p_i(k)) / (1 - \beta(u, u^+)) \quad (10)$$

本文假设传递(接收)分组失败与传递(接收)分组成功占用相等的节点传递(接收)时间和能耗。

3.2.3 节点 u 实际接收分组数

单位时间内节点 u 实际接收的分组数 $\xi(u)$ 计算如下

$$\xi(u) = \sum_{k \in V_i=1}^N \kappa(u, p_i(k)) / (1 - \beta(u^-, u)) \quad (11)$$

3.3 链路质量 $\beta(u, v)$

如前文所述,传统任播协议根据距离来确定至各基站的路由权重值,却没有考虑 WSN 的链路质量问题。通常评价链路的链路质量的方法是计算该链路的分组传递失败的概率。在无线链路 (u, v) 中出现分组传递失败主要有以下几个原因。

(1) 比特差错和分组丢失

波形的失真和反射等现象、节点的运动、比特或帧不能同步、距离、传播环境及干扰因素都会造成比特错误和分组丢失。记在单位时间内无线链路 (u, v) 出现比特差错和分组丢失的事件为 Y , 其出现概率记为 $Pr\{Y\} = e(u, v)$ 。 $e(u, v)$ 是链路 (u, v) 上的平均比特差错和分组丢失率。

(2) 传递碰撞(Collision)

传递碰撞(Collision)导致在该链路上分组传递失败。记在单位时间内无线链路 (u, v) 出现传递碰撞的事件为 X , 其出现概率记为 $Pr\{X\}$ 。

因此,链路质量 $\beta(u, v)$ 计算如下

$$\beta(u, v) = 1 - (1 - Pr\{X\})(1 - Pr\{Y\}) \quad (12)$$

在 WSN 中,无线链路 (u, v) 会因为隐终端问题(hidden terminal problems)的传递碰撞导致分组传递失败。采用 RTS/CTS 握手机制可部分解决隐终端碰撞的问题,但仍然无法彻底消除碰撞的可能性(RTS 帧导致的碰撞)。而且,通常在 WSN 中的实际有效负载是很低的(本文设定 WSN 工作负载较低),而 RTS/CTS 机制给 WSN 带来的额外开销很大,因此 RTS/CTS 机制并不适用于 WSN^[10]。文献[11]证明 RTS/CTS 机制虽增加了 WSN 的代价,却没有明显提高网络的效率。基于以上原因,本文没有采用 RTS/CTS 机制,而采用传统的 CSMA 竞争接入方法访问信道。由于在 WSN 中实际负载很低,本文不采用 ACK 帧来确认传递成功,减少了大约 9% 的开销^[7]。下面讨论传递碰撞率 $Pr\{X\}$ 的计算。

设有节点 u, v, n 和 s , 各自传递和串听范围如图 1 所示。

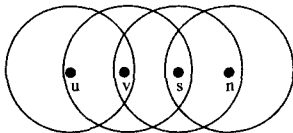


图 1 传递碰撞示意图

在时刻 $t=0$, 节点 u 开始传递分组给节点 v , 该分组为初次传递或者是重传。目的是计算该分组因隐终端问题与接收者(即节点 v)碰撞的概率。记有向链路的隐终端节点集合为 $H(u, v)$, 有

$$H(u, v) = N(v) - (N(u) \cap N(v)) \quad (13)$$

链路 (u, v) 的传递被碰撞是由于节点 $s \in$ 节点 u 的隐终端 $H(u, v)$ 也正在传递所致。

设节点 $s \in H(u, v)$, 记状态变量 q_s 表示在时刻 $t=0$ 时节点 s 的传递状态。 $q_s=0$ 表示此时节点 s 无分组在传递; $q_s>0$ 表示此时节点 v 有分组正在传递。

隐终端 s 导致 (u, v) 的传递被碰撞的事件记为 $X(s)$, $Pr\{X(s)\}$ 为其概率。记 $Pr\{q_s>0\}$ 为单位时间内 $q_s>0$ 的概率; 记 $Pr\{q_s=0\}$ 为单位时间内 $q_s=0$ 的概率。因此,可得

$$Pr\{X(s)\} = Pr\{X(s) | q_s>0\} Pr\{q_s>0\} + Pr\{X(s) | q_s=0\} Pr\{q_s=0\} \quad (14)$$

当 $q_s>0$ 时,节点 s 正在传递数据,因此此时节点 u 发送给节点 v 的分组必然被碰撞。于是可得

$$Pr\{X(s) | q_s>0\} = 1 \quad (15)$$

节点 s 的状态可分为正在传递分组,或正在接收分组(包括串听),或空闲等待状态。因通常情况下 WSN 的负载很低,节点之间竞争传递概率较低,且为方便计算,本文对节点处于退避期(Backoff Time)和帧间间隔(InterFrame Space)的状态忽略不计。

因此,节点 s 传递分组的事件呈泊松分布,其泊松分布参数记为 $\lambda(s)$, 可得 $\lambda(s) = D(s)$ 。单位时间内 s 正在传递分组的概率 $Pr\{q_s>0\}$ 如下。

$$Pr\{q_s>0\} = \lambda(s) T_s \quad (16)$$

式中, T_s 为节点传递一个分组的平均时间。本文近似计算 T_s 的值为

$$T_s = \frac{\text{Packet Length}}{\text{Transmission Bit Rate}} \quad (17)$$

当 $q_s=0$ 即当 $t=0$ 时,节点 s 无分组正在传递,有

$$Pr\{q_s=0\} = 1 - Pr\{q_s>0\} \quad (18)$$

当时间 $t \in (0, T_s]$ 时,节点 s 若传递分组,仍会与 (u, v) 的传递产生碰撞。在时间 $t \in (0, T_s]$ 内,节点 s 无分组传递的概率为 $e^{-\lambda(s)T_s}$, 可得

$$Pr\{X(s) | q_s=0\} = 1 - e^{-\lambda(s)T_s} \quad (19)$$

综上分析, $Pr\{X(s)\}$ 计算如下。

$$Pr\{X(s)\} = \lambda(s) T_s + (1 - e^{-\lambda(s)T_s})(1 - \lambda(s) T_s) = 1 - e^{-\lambda(s)T_s} (1 - \lambda(s) T_s) \quad (20)$$

因此,单位时间传递碰撞率 $Pr\{X\}$ 为

$$Pr\{X\} = 1 - \prod_{k \in H(u, v)} (1 - Pr\{X(k)\}) \quad (21)$$

3.4 节点 u 的能耗 $E(u)$

本节分析单位时间节点 u 的平均能耗 $E(u)$ 。节点 u 的能耗分以下 4 种情况:

(1) 接收分组能耗 $E_r(u)$

$$E_r(u) = \xi(u) E_r \quad (22)$$

式中, E_r 是节点接收一个分组的平均能耗。

(2) 传递分组能耗 $E_s(u)$

$$E_s(u) = D(u) E_s \quad (23)$$

式中, E_s 是节点传递一个分组的平均能耗。

(3) 串听耗能 $E_o(u)$

如前文所述,当节点 $u \notin p_i(k)$ 时,节点 u 无需为路径 $p_i(k)$ 接收和传递分组。但当所有节点 $h \in p_i(k)$, 并且 $h \in N(u)$ 时,节点 u 在串听路径 $p_i(k)$ 时有串听耗能 $E_o(u)$ 。单位时间节点 u 串听的分组数 $\tau(u)$ 为

$$\tau(u) = \sum_{k \in V_i=1}^N \sum_{h \in p_i(k) \cap h \in N(u)} w_i(k) \lambda_k / (1 - \beta(h, h^+)) \quad (24)$$

因此,单位时间串听耗能 $E_v(u)$ 为

$$E_v(u) = \tau(u) E_r \quad (25)$$

(4)空闲等待能耗 $E_d(u)$

当节点 u 既未接收和传递分组,也未串听信道,即节点处于空闲等待状态时,单位时间节点 u 空闲等待能耗记为 $E_d(u)$,有

$$E_d(u) = (1 - D(u)T_s - \xi(u)T_r - \tau(u)T_r)E_d \quad (26)$$

式中, T_r 为接收一个分组的平均耗时; E_d 为空闲等待状态下的单位时间平均能耗。

综上所述,单位时间节点 u 的能耗 $E(u)$ 计算如下。

$$E(u) = E_r(u) + E_s(u) + E_v(u) + E_d(u) \quad (27)$$

3.5 网络生存期 T

节点 u 的生存期为

$$T(u) = \frac{E_{init}}{E(u)} \quad (28)$$

式中, E_{init} 是节点的初始能量。本文 WSN 网络生存期为到第一个节点失效的时间。WSN 的网络生存期 T 表示如下。

$$T = \min(\{T(u) | (u \in V) \cap (u \notin S)\}) \quad (29)$$

4 实验结果及分析

在本节中,采用最短路径优先路由策略(Shortest Path First, SPF)、随机路由权重路由(WRS)策略^[6]、无碰撞路由优先(Non-Collision First, NCF)策略和本文路由协议,以一个具体的网络实例来分析不同路由策略下 WSN 的链路质量、能耗、能耗方差及网络生存期。网络实例如图 2 所示。

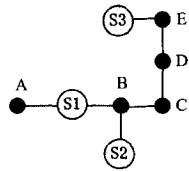


图 2 WSN 拓扑结构图

图 2 中, $S1, S2$ 和 $S3$ 为基站,节点 A 和节点 C 需周期性任播其监控数据分组至基站,其分组产生分别服从参数为 $\lambda_A = 15$ 和 $\lambda_C = 20$ 的泊松分布。因空闲等待状态与接收状态的能耗差别很小^[7],所以本文设定接收分组能耗与空闲等待状态能耗相同,其余参数设置如表 1 所列。

表 1 WSN 参数设置

传输距离	12m	传递能耗	24.75mW/s
相邻节点距离	12m	接收能耗	13.5mW/s
串听距离	12m	空闲等待能耗	13.5mW/s
传输速度	250kb/s	节点初始能量	1J
分组长度	256B	比特差错分组丢失率	0

设节点 A 的路由表中至基站的路由信息只有 $p_1(A)$,即节点 A 将分组只传给 $S1$,而节点 C 的路由表中至基站的路由信息有 $p_1(C), p_2(C)$ 和 $p_3(C)$,即节点 C 任播分组至 $S1$ 或 $S2$ 或 $S3$ 。路径 $p_1(C)$ 中有向链路 $(B, S1)$ 的传递会与 $(A, S1)$ 的传递出现碰撞,路径 $p_2(C)$ 中 $(B, S2)$ 的传递会被 $S1$ 串听,导致与 $(A, S1)$ 的传递产生碰撞。反之, $(A, S1)$ 的传递也会分别与 $(B, S1)$ 和 $(B, S2)$ 的传递产生碰撞。

采取 SPF 策略,因 $S1, S2$ 的路径距离最短,节点 C 将分组只传递给 $S1$ 或 $S2$ (本文取 $S1$);采取 WRS 策略,节点 C 至

基站的路径 $p_1(C), p_2(C)$ 和 $p_3(C)$ 的路由权重 $W(C) = (0.375, 0.375, 0.25)$,即节点 C 将 $0.375\lambda_C$ 的分组分别传递给 $S1$ 和 $S2$,将 $0.25\lambda_C$ 分组传递给 $S3$;采用 NCF 策略,在本例中,即 $W(C) = (0, 0, 1)$ 。本文协议路由判据为优化目标 $\min_{w \in W} f(w)$ 。取 $\alpha = 0.5$,根据所给网络参数及式(3)、式(27)等,可解得当 $w_1(C) = w_2(C) = 0.24, w_3(C) = 0.52$ 时, $f(w)$ 取得最小值 0.0154。由于 $(B, S1)$ 和 $(B, S2)$ 这两者的传递都会与 $(A, S1)$ 的传递产生碰撞,因此将 $(B, S1)$ 和 $(B, S2)$ 所传递的分组做整体考虑,记 $w_{12}(C) = w_1(C) + w_2(C)$ 。 $w_{12}(C)$ 值对 $V^{-1}(w), Z^{0-1}(w)$ 和 $f(w)$ 的影响如图 3 所示。

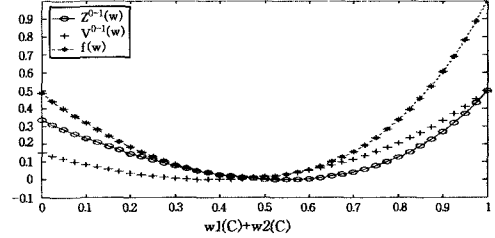


图 3 $w_{12}(C)$ 的影响

在不同路由策略下(也就是在不同的 $W(C)$ 值),各链路的链路质量及单位时间实际分组数、各节点能耗、方差和 $f(w)$ 分别如表 2 和表 3 所列。

表 2 各链路的链路质量及实际分组数

	SPF	WRS	NCF	本文协议
$\beta(A, S1)$	0.4109	0.3032	0	0.1937
$D(A, S1)$	25.4626	21.5270	15	18.6035
$\beta(B, S1)$	0.3504	0.3032	0	0.2655
$D(B, S1)$	30.7882	10.7635	0	6.5440
$\beta(B, S2)$	0	0.3032	0	0.2655
$D(B, S2)$	0	10.7635	0	6.5440
$\beta(C, D, E)$	0	0	0	0
$D(C, D, E)$	0	5.000	20	10.4000

表 3 各节点能耗/s、方差和 $f(w)$

能耗(mW)	SPF	WRS	NCF	本文协议
节点 A	15.5878	15.2651	14.7300	15.0255
节点 B	16.0248	15.2651	13.5000	14.5733
节点 C	15.1400	15.1400	15.1400	15.1400
节点 D	13.5000	13.9100	15.1400	14.3528
节点 E	13.5000	13.9100	15.1400	14.3528
总能耗	73.7526	73.4902	73.6500	73.4444
方差	1.4010	0.5201	0.5043	0.1823
$f(w)$	1.0000	0.2370	0.4871	0.0154

由表 2、表 3 和图 3 可知,本文协议考虑了链路质量问题导致重传及其能耗的影响因素,因此相比其他任播路由协议,本文协议作出的路由安排更加合理。而且本文协议能够通过参数 α 权衡能耗均衡及能耗效率,从而优化网络生存期。在该实例中,本文协议系统能耗最少,能耗最均衡,网络生存期最长。

结束语 在 WSN 中因链路质量问题常会出现传递失败造成能量浪费的问题。而传统任播路由协议的路由判据只与路由距离有关,没有考虑链路质量因素,因此将其应用在 WSN 中会产生路由权重设置不合理的现象。本文提出基于链路质量的 WSN 任播路由协议,协议在讨论无线链路质量计算的基础上(主要是传递碰撞概率的计算),以能耗均衡和系统能耗最小这两个因素来决定各任播路径的路由权重,以

(下转第 116 页)

$$\sum_{t \in T(m,k), m \in M} Am(t) \leq SA, \quad \sum_{t \in T(m,k), m \in M} Dm(t) \leq SA \quad (12)$$

在 t 时刻,任务可实际获得分析区资源数不大于该时刻分析区可分配资源数:

$$\sum_{t \in T(m,k), m \in M} Vo(t) \leq Grs(t) \quad (13)$$

最后,在 t 时刻分析区全部任务实际占用资源数, t 时刻获得资源数、释放资源数以及空闲资源数的代数和不大分析区内的总资源数:

$$\sum_{t \in T(m,k), m \in M} [Gos(t) + Vo(t) + Grs(t+1) + Am(t)] \leq SA \quad (14)$$

($t+1$)为 t 时刻后 1 单位时间。

2.2 数学模型仿真

收集在 t 时刻同时进入等待分配至分析区的任务序列 $M = \{m1, m2, m3, m4\}$, 分配损失系数和资源损失系数分别为 6.5 和 2.4, 各任务耗费时间如表 1 所列。

表 1 任务耗费时间

	分配等待 1	分配等待 2	资源 1 等待	资源 2 等待	资源 3 等待
M1	3	1.5	6.5	4.5	3
M2	3.5	3.5	4	6	7.5
M3	2.5	3.5	5	3	2.5
M4	1	2.5	2	6	4

由表 1 可以看到,在分配区最多只能容纳两个任务。若按照传统分配方案, M1 进入分配等待 1, 资源 1 等待; M2 进入分配等待 2, 资源 2 等待; M3 进入分配等待 1, 资源 1 等待; M4 进入分配等待 2, 资源 2 等待。该方案分配等待耗时 $T1 = 3 + 3.5 + 3.5 + 2.5 = 12.5$; 资源等待耗时 $T2 = 6.5 + 6 + 5 + 6 = 23.5$; 总费用 $f = 6.5 * 12.5 + 2.4 * 23.5 = 137.65$ 。按照优先考虑损失系数和消耗时间的原则,可以得到另外一个方案:等待分配 1 最低等待时间为 1, 即 M4 进入分配等待 1; M4 资源等待最低耗时为 2, 即 M4 等待分配完毕后进入资源 1 的等待, 此时分配等待 1 被占用。对分配等待 2 进行分析, 其最低耗费时间为 1.5, 即 M1 进入分配等待 2; M1 资源等待最低耗时为 3, 即 M4 等待分配完毕后进入资源 3 的等待, 同理, 该方案分配等待耗时 $T1' = 1 + 1.5 + 2.5 + 3.5 = 8.5$; 资

源等待耗时 $T2' = 2 + 3 + 3 + 4 = 12$; 总费用 $f' = 6.5 * 8.5 + 2.4 * 12 = 84.05$ 。综上可见,改进方案在分配等待耗时降低 32%, 在资源等待耗时降低 48.9%, 总费用降低 38.9%, 充分体现了资源选择性配置低耗时、低费用的原则。

结束语 本文提出了网格资源选择性的配置策略, 并通过引入脉冲函数建立数学模型以达到整数规划的效果, 并且综合考虑了多任务和资源受限的影响, 最后通过仿真数据验证了模型的有效性。但模型本身的复杂度和收集数据的局限性, 使其还存一些问题。通过加强对单位时间内资源采集的灵敏度和时间精确度, 可寻求更好的效果。

参考文献

- [1] Foster I, Kesselman C. The Grid: Blueprint for a Future Computing Infrastructure [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2000
- [2] 孔劫, 吴晓, 邓正宏. 基于计算期望的网格资源管理模型[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(4): 836-838
- [3] 尚明生. 网格计算中的任务调度模型研究[J]. 计算机工程, 2006
- [4] 洪一帆, 荣冈. 面向对象的模型管理系统[J]. 科技通报, 2002
- [5] Ruohomaa S, Kutvonen L. Trust management survey [C]// LNCS 3477. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 77-92
- [6] Abrams M D. Trusted system concepts [J]. Computers and Security, 2005
- [7] 王育民, 刘建伟. 通信网的安全[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999
- [8] 纪其进. 主动队列管理算法性能评价[J]. 通信学报, 2005, 26(11): 100-105
- [9] 唐勇, 唐雪飞, 王玲. 基于遗传算法的排课系统[J]. 计算机应用, 2002(10)
- [10] 都志辉, 陈渝, 刘鹏, 等. 网格计算[J]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [11] 陈国良. 并行计算机体系结构[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [12] 谢昊航, 张忠辅, 郑小平, 等. 基于模糊数学的网格资源综合调度算法[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(3): 133-137, 143
- [5] Hou Y T, Yi S, Sherali H D. Optimal base station selection for anycast routing in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(3): 813-821
- [6] Xuan D, Jia W, Tu W Q, et al. Distributed Admission Control for Anycast Flows [J]. Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2004, 15(8): 673-686
- [7] 陈林星, 曾曦, 曹毅. 移动 Ad Hoc 网络--自组织分组无线网络技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 57-80
- [8] Toh C K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Communications, 2001, 39: 138-147
- [9] Xiao L, Boyd S, Kim S J. Distributed Average Consensus with Least-Mean-Square Deviation [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2007, 67(1): 33-46
- [10] Karl H, Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks [M]. Hoboken: John Wiley Publishing House, April 2005: 128-157
- [11] Bicket J, Aguayo D, Biswas S, et al. Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network [C]// Proceedings of ACM MobiCom'05. 2005

(上接第 102 页)

参数 α 来权衡两者之间的关系。因此本文协议一方面能保证系统能耗均衡, 另一方面能降低距离(代价)较大的路径所占的路由权重, 提高能耗效率。通过以上措施, 本文协议能有效地优化网络生存期。

参考文献

- [1] Oyman E I, Ersoy C. Multiple sink network design problem in large scale wireless sensor networks [C]// Proceedings of IEEE ICC'04. Istanbul, Turkey, 2004, 6: 3663-3667
- [2] Iqbal M, Gondal I, Dooley L. Energy Aware Neighbourhood Protocol for Anycast Routing in Ad Hoc Sensor Networks [C]// Proceedings of ICON'06. Singapore, 2006, 2: 1-6
- [3] Thepvilajanapong N, Tobe Y, Sezaki K. HAR: hierarchy-based anycast routing protocol for wireless sensor networks [C]// Proceedings of Symposium on Applications and the Internet Workshops. 2005: 204-212
- [4] Kim J, Lin X J, Shroff N B, et al. On Maximizing the Lifetime of Delay-sensitive Wireless Sensor Networks with Anycast [C]// Proceedings of INFOCOM'08. 2008: 807-815