

基于 Max-Min 模型的无线体域网路由协议

李 彦 冯贤菊 陈 卓 周 艺 王 斌

(重庆理工大学计算机科学与工程学院 重庆 400054)

摘 要 针对无线体域网(WBAN)节点能量的有限性,基于多径路由机制和 Max-Min 模型提出了一种能效路由协议。该路由协议在路由过程中使剩余能量最小的节点的剩余能量尽可能大,从而均衡了网络中节点的能耗,延长了网络生存时间。通过 MATLAB 对该路由协议进行仿真,并与基于 Min 模型的路由协议进行对比,结果表明,基于 Max-Min 模型的路由协议相对于基于 Min 模型的路由协议能够更好地均衡节点的能耗,并延长网络生存时间。

关键词 无线体域网,路由协议,Max-Min 模型

中图法分类号 TP393.1 文献标识码 A

Wireless Body Area Network Routing Protocol Based on Max-Min Model

LI Yan FENG Xian-ju CHEN Zhuo ZHOU Yi WANG Bin

(College of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract Due to the limited energy of nodes in wireless body area network (WBAN), an energy efficient routing protocol was proposed based on multipath routing mechanism and Max-Min model, which makes the residual energy of the nodes in the routing process as large as possible, thus balancing the energy consumption of nodes in the network, and prolonging the network lifetime. The routing protocols are simulated and compared with the routing protocols based on Min model. The result shows that the routing protocol based on Max-Min model can better balance the energy consumption of nodes and prolong the lifetime of network.

Keywords Wireless body area network, Routing protocol, Max-Min model

无线体域网,一种新型的智能监测系统,在医疗、健身、娱乐、军事和电子产品等领域中引发了一股个性化的、先进的和综合的应用浪潮。它是由人体体表或植入人体内的传感器以及 sink 节点共同形成的一个无线传感器网络(WSN),其重要应用是医疗监测。在具体的医疗监测中,WBAN 通过人体的传感器来采集人体的生理信息,并由 sink 节点将这些信息发送到远程服务器,从而获取到相应的诊断响应。WBAN 的出现使慢性病人或有潜在健康危险的人不需要一直待在医院也可以随时监测到身体的各种生理参数,从而了解其身体状况。最近几年 WBAN 已经在医疗保健领域表现出越来越大的优势,也吸引了国内外很多学者的目光。然而 WBAN 中传感器的能量是有限的,它们几乎是不可充电和不可替换的,尤其是那些植入人体内的传感器。因此如何设计一个 WBAN 的高能效路由协议成为一个很有挑战性的工作。

在过去几十年里,人们对无线传感器网络的能效路由协议的研究已经非常深入了。然而由于 WBAN 的特殊性,WSN 中的路由协议并不是特别适合 WBAN。WSN 的路由协议更注重最小化路由代价和最大化吞吐量,而 WBAN 的路由协议却认为最小化能耗更重要。WSN 一般是由同构结点组成,而 WBAN 的结点是异构的且它们的数据速率不同。另外,为了提供可用资源的有效利用,WBAN 路由协议必须考

虑人体运动的变化以及辐射对组织发热的影响^[1,2]。因此,尽管 WBAN 属于 WSN,但是仍然需要设计出满足 WBAN 特殊性的路由协议。

1 WBAN 能效路由协议的研究现状

WBAN 路由协议的研究主要有单径路由和多径路由两个方向,划分的依据是路由协议在数据传输时使用的不同路径数量^[3]。单径路由的结构简单,通信开销量较少,设计难度不大。WBAN 中的单径路由主要有以下几种。

HIT 协议(Hybrid Indirect Transmission)^[4],该协议集中了 LEACH 和 PEGASIS 的优点,采用 LEACH 的层次路由机制和 PEGASIS 的链路拓扑结构相结合的方式来提高能效。

EER 协议(Energy Efficient Location Routing)^[5],该协议是基于位置信息而提出的。所有节点都配置了 GPS,同时每个节点都知道其他节点的能量等级。每个节点从自身传输范围内的节点中选取高能量水平和距离较近的节点作为下一跳节点,如此以来,节点不需要 flooding 就可以向 sink 节点发送信息,从而能很好地减小网络的能耗。

传统的单径路由虽然具有结构简单、通信开销量小等优点,但其能量均衡性、稳定性和容错性较差,一旦某些关键节点失效就很容易导致出现盲区^[6]。多径路由通过在源节点和

本文受重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2013jcyjA40024)资助。

李彦(1976—),男,博士生,教授,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:479207717@qq.com;冯贤菊(1990—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;陈卓(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络。

sink 节点之间建立多条链路,有效提高稳定性和容错性,同时能够平衡能量消耗,从而达到延长网络生存期的目标。目前的多径路由有很多,常见的有 Flooding 协议、SPIN 协议、DD 协议、HREEMR 协议、MDR 协议、H-SPREAD 协议、按需 MSR 协议等。WBAN 中的很多路由协议都采用了多径路由机制^[7,8]。为了均衡网络能量消耗,延长网络生存期,本文基于多径路由机制和 Min-Max 多个路由请求的数学模型,提出了一个能效路由协议。该路由协议综合考虑节点的剩余能量和发送数据的耗能,使网络中剩余能量最少的节点的剩余能量最大化,从而最大化网络生存时间。

2 系统描述

为了延长 WBAN 的生存时间,需要平衡每个节点的能耗,同时应该尽可能少地使用那些剩余能量较少的节点。本文在深入考虑节点能效和节点剩余能量的基础上,构建了 Max-Min 数学模型,用于寻求最佳路由方案。为了简化 WBAN 模型,作以下假设:

采用单 sink 节点网络,传感器节点和 sink 节点在部署之后不再移动,所有传感器节点的初始能量不同,且不可以替换,不可充电。用 E_i 表示节点 i 的剩余能量,在初始化时, E_i 表示节点 i 的初始能量。

2.1 无线体域网描述

本文中的无线体域网可以用一个有向图 $G(N,A)$ 表示,其中 N 表示传感器节点集(其中包括一个汇聚节点), A 表示有向弧的集合,其中每一条弧都表示 N 中两个可以直接通信的节点的连线。对于一个最大传输半径 R ,如果两个节点之间的距离小于 R ,那么这两个节点就是可以直接通信的。常见的无线体域网如图 1 所示。

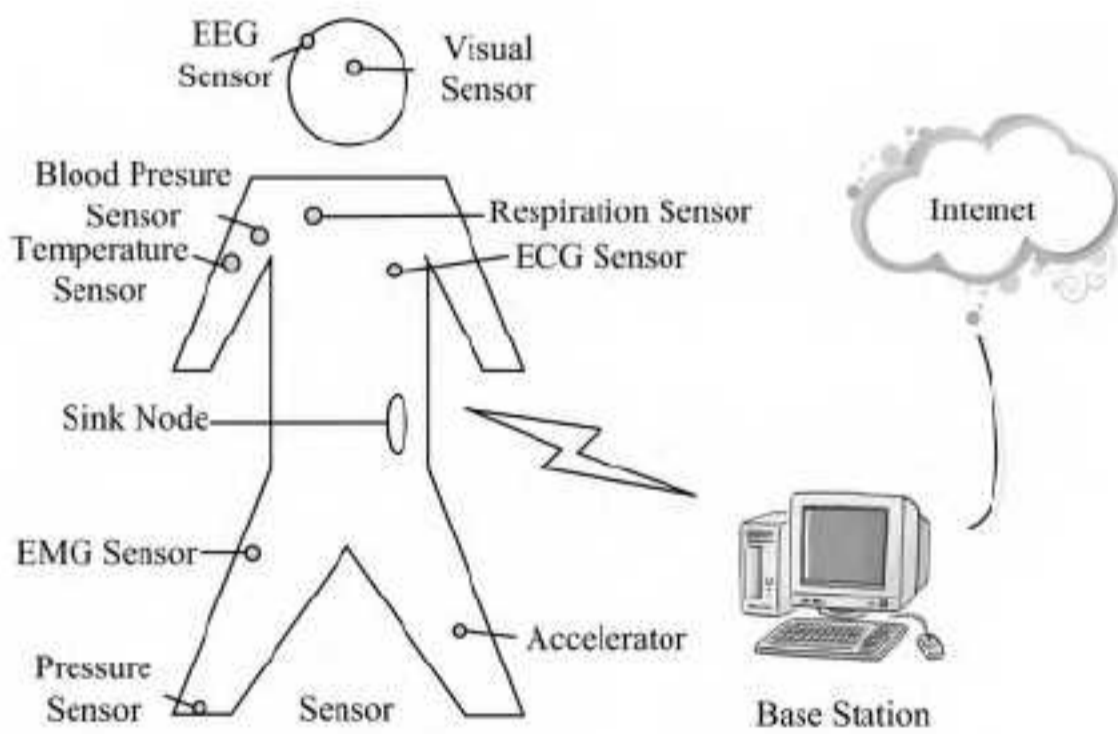


图 1 无线体域网

2.2 能耗模型

在文献^[9]中,刘汉春等学者指出每个传感器节点的功耗主要由 3 部分构成:采集数据功耗、接收数据功耗和发送数据功耗。因此节点 i 的平均功率可表示为:

$$\omega_i = e_i g_i + \sum_{j \in N_i} r_{i,j} u_{i,j} + \sum_{j \in N_i} r_{j,i} v_{j,i} \quad (1)$$

其中, ω_i 表示节点 i 的平均功率, e_i 和 g_i 分别表示节点 i 采集单位数据消耗的能量和平均采集数据速率, $u_{i,j}$ 和 $r_{i,j}$ 分别表示节点 i 发送给节点 j 单位数据所消耗的能量和平均发送数据速率, $r_{j,i}$ 和 $v_{j,i}$ 分别表示节点 j 接收节点 i 单位数据所消耗的能量和平均接收数据速率。

但是文献^[8]却指出每个传感器的能耗主要由通信功耗组成,采集数据的功耗只是很小的一部分,所以本文中考虑传

感器功耗时只是考虑了发送和接收数据的功耗,并采用如下的能耗模型。

传感器节点 i 向节点 j 发送一个 p 字节的分组所消耗的能量可表示为: $TR_{ij} = p(Q + Bd_{ij}^2)$,而传感器节点 j 接收节点 i 发送的一个 p 字节的分组所消耗的能量可表示为: $RE_{ij} = Qp$,其中 Q 是独立于距离的,表示运行发送器和接收器线路所消耗的能量, B 表示发送器的放大器所需要的能量, d_{ij} 表示传输距离。由此可得:节点 j 路由(接收和发送)一个从 i 发送来的分组的能耗为:

$$e_{ij} = TR_{ij} + RE_{ij} = p(2Q + Bd_{ij}^2) \quad (2)$$

2.3 数据发送模型

一个源节点为了将自己采集到的数据发送到 sink 节点,就需要初始化一个路由请求 c ,其中该路由请求 c 的数据量为 D^c 。另外,引入一个流变量 f_{ij}^c 表示路由请求 c 在弧 (i,j) 上传输数据的分组数,其满足约束条件: $\sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^c - \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ji}^c = b_i^c$, $\forall i \in N$,其中 $\delta^-(i) = \{j \in N: (j,i) \in A\}$, $\delta^+(i) = \{j \in N: (i,j) \in A\}$,如果节点 i 为源节点, b_i^c 为节点 i 针对路由请求 c 所发送的数据量,如果 i 为汇聚节点, b_i^c 为节点 i 针对路由请求 c 所接收的数据量,否则, $b_i^c = 0$ 。

3 Max-Min 模型及其求解过程

3.1 Max-Min 模型

根据上述系统描述,可得:为了完成对路由请求 c 的传输,节点 i 所消耗的能量为: $e_i = \sum_{j \in \delta^-(i)} e_{ij} D^c f_{ij}^c$,而此时节点 i 的剩余能量 E_i 为: $E_i = E_{i,old} - e_i$ 。综合考虑节点 i 为了完成 c 所消耗的能量和节点 i 剩余的能量,可以定义如下最优化模型:

$$\begin{aligned} \max \min_{i \in N} E_i \\ \text{s. t. } \sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^c - \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ji}^c = b_i^c, \forall i \in N \\ \sum_{j \in \delta^-(i)} e_{ij} f_{ij}^c \leq E_i, \forall i \in N \\ f_{ij}^c \geq 0, \forall (i,j) \in A \end{aligned} \quad (3)$$

3.2 最小值最大化问题的求解模型

通常研究的规划问题是求某个函数在约束条件下的最大值或最小值,而本文所研究的问题则是求某个最小值函数的最大值,这类问题就是最小值最大化问题。为了描述的方便,将本文的问题抽象为下面的问题:

$$\begin{aligned} \max \min_{1 \leq i \leq m} c_i^T x \\ \text{s. t. } Aeqx = beq \\ Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{aligned} \quad (I)$$

式中, A 为 $s \times n$ 矩阵, b 为 s 维向量, c_i 为 n 维向量, x 为决策变量。

由于问题(I)的目标函数为 m 个线性函数的最小值函数,因此考虑将问题(I)转化成线性规划问题来求解。为此,考虑下面的线性规划问题:

$$\begin{aligned} \max c_k^T x \\ \text{s. t. } c_k^T x \leq c_i^T x (i \in I \setminus \{k\}) \\ Aeqx = beq \\ Ax \leq b \\ x \geq 0 \\ (k=1,2,\dots,m) \end{aligned} \quad (II)$$

其中, $I = \{1, 2, \dots, m\}$ 为指标集。

问题(II)包含了 m 个线性规划问题, 为了叙述的方便, 称问题(II)中的第 k 个线性规划问题为问题(II_k)。

在文献[10]中给出了问题(I)的最优解和问题(II)的最优解之间的关系。

定理1 若问题(I)有最优解 x^* , 则必存在 $k(1 \leq k \leq m)$ 使得 x^* 为问题(II_k)的最优解。

定理2 若对所有 $k(k=1, 2, \dots, m)$, 问题(II_k)有最优解 x_k^* , 取 $p(1 \leq p \leq m)$ 使:

$$c_p^T x_p^* = \max_{1 \leq i \leq m} c_i^T x_i^*$$

则 x_p^* 为问题(I)的最优解。

推论 若对某个 $k(1 \leq k \leq m)$, 问题(II_k)无最优解, 则问题(I)也无最优解。

根据定理2及推论, 只要求出问题(II)的最优解或判断出其中某个问题无最优解, 就可以求出问题(I)的最优解或判断出其无最优解。另外, 由定理1可知问题(I)的最优解必为(II)中某个线性规划问题的最优解, 所以当求出(II)中某个线性规划问题的最优解时, 若能判断出此解即为问题(I)的最优解, 则无需求解其他的线性规划问题。

3.3 Max-Min 多路由请求模型的求解

针对本文 Max-Min 模型求解时, 决策变量 f_{ij}^c 为路由请求 c 在节点 i 到节点 j 的路径上的数据量, 则 Max-Min 模型进一步细化为:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{j \in \delta^-(k)} e_{kj} f_{kj}^c \\ & \text{s. t. } \sum_{j \in \delta^-(k)} e_{kj} f_{kj}^c \leq \sum_{j \in \delta^-(i)} e_{ij} f_{ij}^c, i \in N \setminus \{k\} \\ & \sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^c - \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ji}^c = b_i, \forall i \in N \\ & \sum_{j \in \delta^-(i)} e_{ij} f_{ij}^c \leq E_i, \forall i \in N \\ & f_{ij}^c \geq 0, \forall (i, j) \in A \\ & (k=1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (4)$$

从而将非线性规划问题转换成 N 个线性规划问题, 然后就可以用 MATLAB 中的线性规划函数进行求解了。

4 路由算法实现

在该算法开始时, 每一个节点向 sink 节点发送其路由表、剩余能量值和自身产生数据的数量。sink 节点在收到所有节点的信息之后, 运行最优路由算法来获得最优解决方案——通过解 Min-Max 模型。然后, sink 节点向网络中的所有节点发送路由信息控制路由。当节点发送数据时, 它会将它当前的剩余能量值一起发送给 sink 节点。具体的算法流程为:

1. 每个节点 i 以直接通信的方式向 sink 节点发送其路由表、剩余能量值 E_i 和自身产生的数据的数量 D^c , 其中每一个节点只是在算法最开始的时候发送路由表。

2. sink 节点收到所有节点的信息后, 运行基于 Min-Max 模型的路由协议计算出针对每一个路由请求 c , 节点 i 应向节点 j 发送的数据量 f_{ij}^c ; sink 节点将计算出的每一个 f_{ij}^c 值发送给节点 i , 以控制节点 i 向节点 j 发送的数据量。

3. 每一个节点 i 根据 sink 节点发送给自己的 f_{ij}^c 值, 向节点 j 发送数据, 同时要将自己的剩余能量一同发送过去, 最后所有的数据都将发送到 sink 节点处。

对该路由算法进行分析, 其第 1 步是以直接通信的方式

向 sink 节点发送数据, 这需要消耗一定的能量, 但是好在对于一些应用来说, 路由表在一段时间内是不变的, 所以只需要在算法刚开始的时候发送路由表信息。当各个节点的数据发送到 sink 节点处之后, 由 sink 节点运行基于 Min-Max 的路由协议, 虽然这一部分可能需要很大的能量, 但由于 sink 节点的能量是无限大的, 因此并不需要考虑 sink 节点的能耗。最后, 节点向 sink 节点发送数据时, 顺带将自身剩余能量 (1byte) 一同发送过去, 自身剩余能量和要发送的数据相比实在是太小, 所以发送自身能量所消耗的能量是可以忽略的。

5 基于 Min 模型的路由协议

为了方便仿真实验的分析, 在此先介绍一下基于 Min 模型的路由协议。文献[6]中提出的基于 Min 模型的路由协议与本文的基于 Min-Max 模型的路由协议非常相似, 唯一不同的是基于的模型不同。基于 Min 模型的路由协议的模型如下所示:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{c \in C} \sum_{(i, j) \in A} e_{ij} f_{ij}^c \\ & \text{s. t. } \sum_{j \in \delta^+(i)} f_{ij}^c - \sum_{j \in \delta^-(i)} f_{ji}^c = b_i, \forall i \in N \\ & \sum_{j \in \delta^-(i)} e_{ij} f_{ij}^c \leq E_i, \forall i \in N \\ & f_{ij}^c \geq 0, \forall (i, j) \in A \end{aligned} \quad (5)$$

Min 模型以最小化系统整体能耗为目标, 因此, 基于 Min 模型的路由协议在路由数据时, 总是选择最优路径。文献[8]也通过实验证明了基于 Min 模型的路由协议确实可以保证较小的整体能耗。

6 仿真结果及其分析

通过上面对 Max-Min 模型的理论分析, 可以确保基于 Max-Min 模型的路由协议的完整性和正确性。下面将利用 MATLAB 对该路由算法进行仿真, 并从网络节点的最大能耗差值、网络总能耗和网络生存期内成功的路由数目 3 个方面与基于 Min 模型的路由算法进行比较。仿真环境及网络节点部署如图 1 所示, 模拟参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数及相关说明

仿真参数	说明
网络节点总数(个)	10, 包含一个 sink 节点
传感器初始能量(J)	0.5
Q(nJ/bit)	50
B(pJ/bit/m ²)	100
节点最大通信距离(m)	1

关于表 1 中的 Q 和 B 的取值, 在国内外很多文献中都是这样给出的[7,11], 所以本文也如他们一样。

假设人身高为 180cm, 以 sink 节点为坐标原点, 建立二维坐标, 那么可得到其他的节点的大致坐标, 并根据最大传输距离 r 可以得到 WBAN 的连接图, 如图 2 所示。

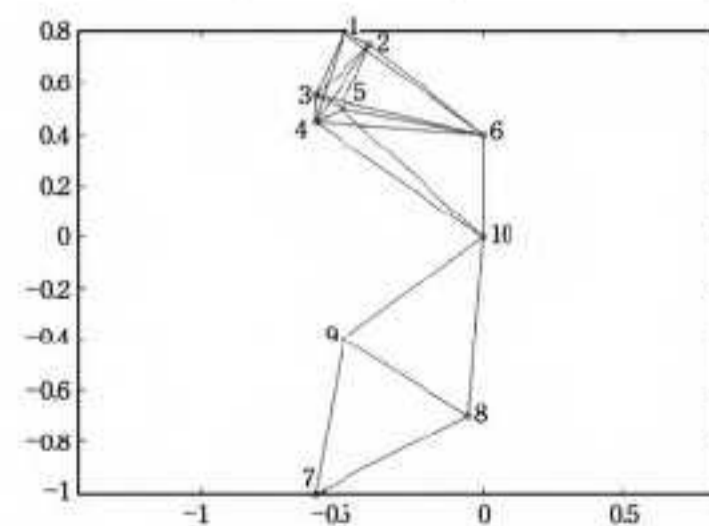


图 2 WBAN 的连接图

另外,在求解过程中,规定数据传输方向为从节点编号小的节点到节点编号大的节点,因为在该模型中,节点编号较大的节点相比节点编号较小的节点离 sink 节点的距离更近,所以这个规定是合理的。

本文从网络节点的各种能耗值出发,来对基于 Max-Min 模型的路由协议和基于 Min 模型的路由协议(基于最小能耗的路由协议)的能耗性进行对比分析。仿真中假设 EEG sensor、Visual sensor、ECG sensor 和 Accelerator 这 4 个传感器节点均向 sink 节点发送 50000bit 数据包,那么可以得到基于 Max-Min 的路由协议和基于最小能耗的路由协议的数据流向图,如图 3 所示。另外,本文又分别求得这两种路由协议的系统总能耗(TE)、节点中耗能最小的节点的能耗(MinE)、节点中耗能最大的节点的能耗(MaxE),以及 MaxE 与 MinE 的差值(Gap),如表 2 所列。

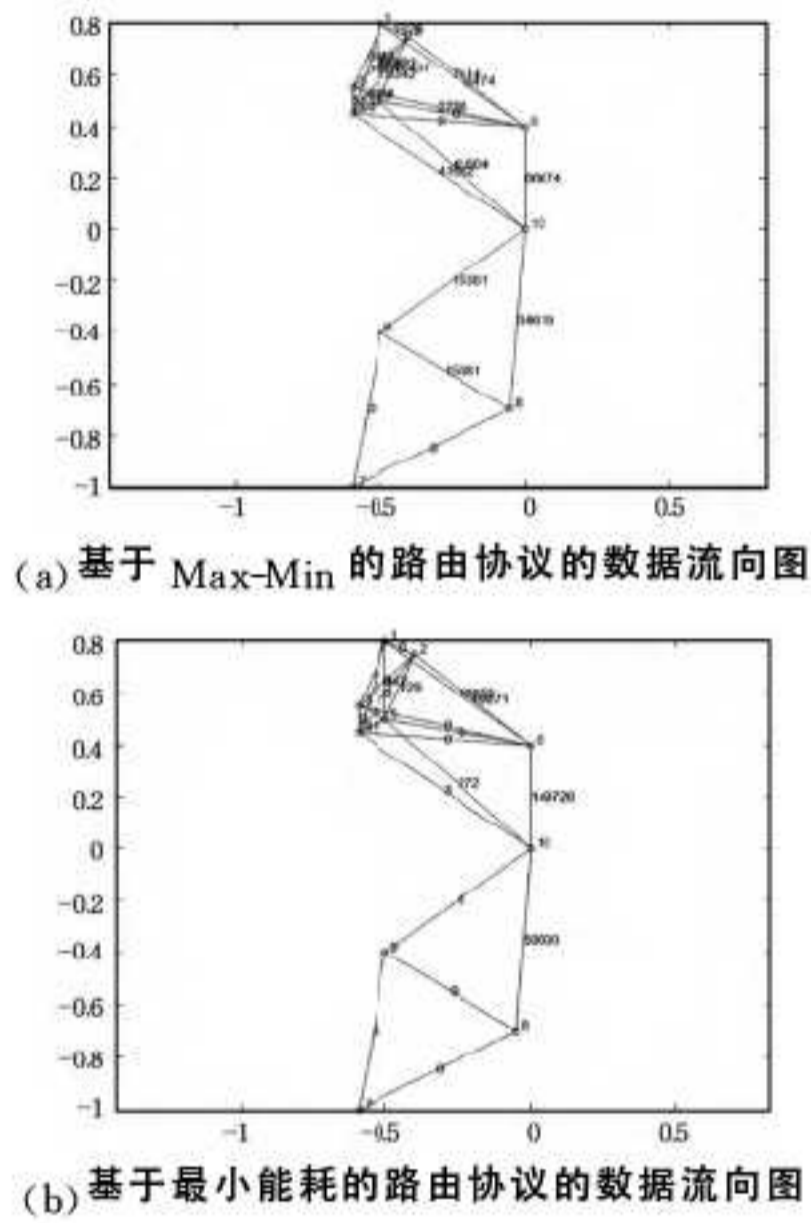


图 3 数据流向图

表 2 基于 Min 模型的路由协议与基于 Max-Min 模型的路由协议的对比

	基于 Min 模型的路由协议	基于 Max-Min 模型的路由协议
TE(J)	0.5200	0.5232
MaxE(J)	0.5000	0.5000
MinE(J)	0.4875	0.4958
Gap(J)	0.0125	0.0042

由表 2 可知,与基于 Max-Min 模型的路由协议相比,基于 Min 模型的路由协议能够保证较小的系统总能耗,然而,采用该路由协议的 WBAN 节点间能量差值 Gap 却更大,这样会导致某些节点过早衰亡。基于 Max-Min 模型的路由协议却可以通过将任务分配到较多的传感器来保证任务分配的均衡性。另外,从图 3 中也可以发现,基于 Min 模型的路由协议在向 sink 节点发送数据时,只用到少数的几个节点,很多的节点并没有参与数据的发送;而基于 Max-Min 模型的路由协议在向 sink 节点发送数据时,几乎使用了所有的节点。

节点间的能量差值 Gap 较小只能保证数据流的均衡性,并不能说明一个协议就是优秀的、节能的。于是本文进一步测试基于 Min 模型的路由协议和基于 Max-Min 模型的路由协议随着发送数据量的增多,能量差值 Gap 和总能耗 TE 的

变化情况。为了保证仿真的简洁性,假设只有 EEG sensor、Visual sensor、ECG sensor 和 Accelerator 这 4 个传感器节点向 sink 节点发送数据包;并假设当数据量为 10000 时,表示 EEG sensor、Visual sensor、ECG sensor 和 Accelerator 这 4 个传感器节点均向 sink 节点发送 10000bit 数据包,依次类推,当数据量为 50000 时,表示 EEG sensor、Visual sensor、ECG sensor 和 Accelerator 这 4 个传感器节点均向 sink 节点发送 50000bit 数据包。图 4 显示了随着发送数据量的增加,两路由协议的 Gap 值和 TE 值如何变化。

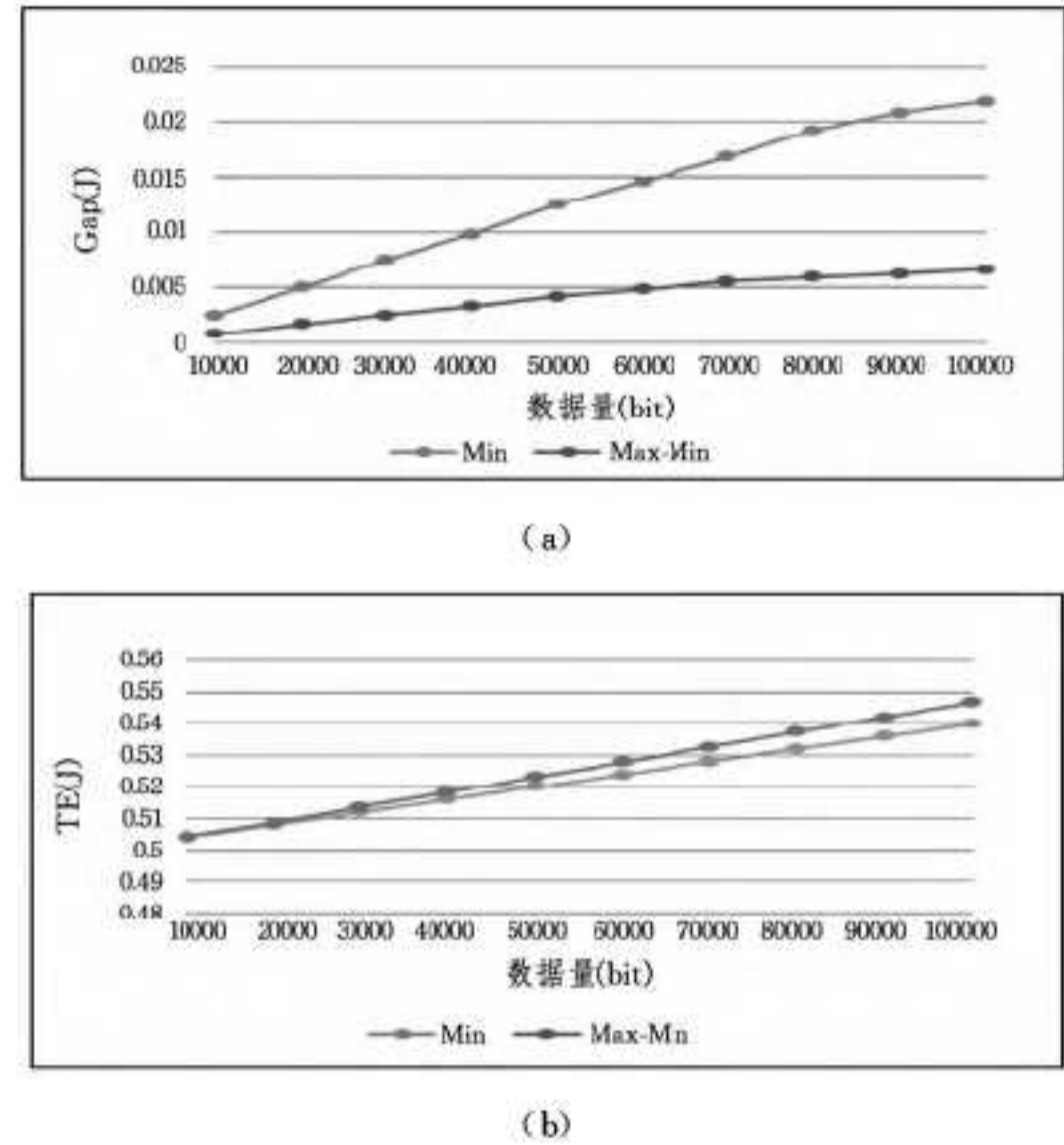


图 4 两路由协议的能量差值 Gap 和总能耗 TE 与发送数据量的关系

分析图 4(a),发现随着数据量的增大,基于 Max-Min 模型的路由协议和基于 Min 模型的路由协议的节点间能量差值 Gap 均增加,且随着数据量的增加,Gap 值均渐渐趋于稳定。而从图 4(a)也可以发现,基于 Min 模型的路由协议的 Gap 值增加的速度比基于 Max-Min 模型的路由协议的更快,且基于 Min 模型的路由协议的 Gap 值趋于稳定的值要远远大于基于 Max-Min 模型的路由协议的 Gap 值。因此从能量差值角度来看,基于 Max-Min 模型的路由协议要优于基于 Min 模型的路由协议。分析图 4(b),发现随着数据量的增大,基于 Max-Min 模型的路由协议和基于 Min 模型的路由协议的系统总能耗 TE 均增加。基于 Max-Min 模型的路由协议增加的速度更快,从总能耗 TE 的角度来看,基于 Min 模型的路由协议优于基于 Max-Min 模型的路由协议。简单地从图 4(a)和图 4(b)中可以发现,随着数据量的增大,基于 Max-Min 模型的路由协议和基于 Min 模型的路由协议的总能耗差距非常小,而能量差值 Gap 的差距却非常明显。

但因为图中的数据量太少,所以数据的说服力不是太大。因此,本文最后进一步根据网络生存期内成功的路由请求数目来对基于 Max-Min 模型的路由协议和基于 Max 模型的路由协议进行评估。

本文使用了简单却常用的 WBAN 生存时间的定义, WBAN 生存时间为所有节点的生存时间中的最小值。假设一个节点的生存时间定义为 T_i ,那么 $T = \min_{i \in N} T_i$ 。仿真假设 EEG sensor、Visual sensor、ECG sensor 和 Accelerator 这 4 个传感器节点均向 sink 节点发送 50000bit 数据包,那么可得基于 Max-Min 模型的路由协议和基于 Min 模型的路由协议在

网络生存期内成功的路由请求数目,如表 3 所列。

表 3 两种路由协议在网络生存期内成功的路由请求数目

	基于 Max-Min 模型的路由协议	基于 Min 模型的路由协议
网络生存期内成功的路由请求数目(个)	480	164

从表 3 可以看出在网络生存期内,基于 Max-Min 模型的路由协议成功的路由请求数目明显多于基于 Min 模型的路由协议。因此,基于 Max-Min 模型的路由协议要优于基于 Min 模型的路由协议。

结束语 本文在分析国内外 WBAN 能效路由协议的基础上,提出一个基于多径路由协议和 Max-Min 模型的能效路由协议,该协议能够均衡网络中节点的能耗,延长网络生存时间,然后从理论上验证了该路由协议的完整性和正确性;最后通过 MATLAB 对该路由协议进行仿真,并与基于 Min 模型的路由协议进行对比,结果表明,基于 Max-Min 模型的路由协议相对于基于 Min 模型的路由协议来说,能够更好地延长网络生存时间。

参 考 文 献

[1] Ullah S, Higgins H, Braem B, et al. A Comprehensive Survey of Wireless Body Area Networks: On PHY, MAC, and Network Layers Solutions [J]. Journal of Medical Systems, IN PRESS, 2010, 36

[2] Latr'e B, Braem B, Moerman I, et al. A Survey on Wireless Body Area Networks [J]. Wireless Network, 2010

[3] 王颖. 基于能效均衡的 WSN 多径路由算法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013

[4] Culpepper J, Dung L, Moh M. Hybrid Indirect Transmission (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks with biomedical applications [C] // Proc. IEEE 18th Annu. Workshop on Computer Communications. 2003

[5] Kim K, Lee I S, Yoon M, et al. An efficient routing protocol based on position information in mobile wireless body area sensor networks [C] // Proc. 1st Int. Conf. on Networks and Communications. 2009

[6] 陈良文, 李敬兆. 无线传感器网络多径路由机制研究 [J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2014, 23(3): 208-212

[7] 王小永. WSN 中基于最大最小化的优化路由算法 [J]. 工矿自动化, 2011(12): 34-39

[8] Mounsla H, Touati N, Salem O. et al. A Min-Max multi-commodity flow model for Wireless Body Area Networks routing [J]. IEEE CCNC, 2012(1): 424-428

[9] 刘汉春, 刘静, 徐友云, 等. 基于临时节点的无线体域网高效节能路由算法 [J]. 信息科技, 2010(6): 1-5

[10] 何尚录, 白利华. 解一类最大值最小化问题的线性规划方法 [J]. 兰州铁道学院学报, 1997, 16(3): 83-86

[11] 董荣胜, 马争先, 郭云川, 等. 一种基于马尔科夫博弈的能量均衡路由算法 [J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1500-1508

(上接第 248 页)

[37] Sattari P, Markopoulou A, Fragouli C. Multiple source multiple destination topology inference using network coding [C] // NetCod'09 Workshop on Network Coding, Theory and Applications. 2009: 36-41

[38] Sattari P, Fragouli C, Markopoulou A. Active topology inference using network coding [J]. Physical Communication, 2012, 6(5): 142-163

[39] Sattari P. Network coding for network tomography [D]. University of California, 2012

[40] Ho T, Koetter R, Medard M, et al. The Benefits of Coding over Routing in a Randomized Setting [C] // ISIT. 2003

[41] Ho T, Medard M, Koetter R, et al. A Random Linear Network Coding Approach to Multicast [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 52(10): 4413-4430

[42] Sharma G, Jaggi S, Dey B K. Network tomography via network coding [C] // Proceedings of the Information Theory and Applications Workshop 2008. San Diego, CA, USA, February 2008: 151-157

[43] Yao H, Jaggi S, Chen M. Network coding tomography for network failures [C] // INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE. San Diego, CA, USA, March 2010: 1-5

[44] Yao H, Jaggi S, Chen M. Passive network tomography for erroneous networks: A network coding approach [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(9): 5922-5940

[45] Siavoshani M J, Fragouli C, Diggavi S. Subspace properties of randomized network coding [C] // 2007 IEEE Information Theory Workshop Information Theory for Wireless Networks. 2007:

1-5

[46] Siavoshani M J, Fragouli C, Diggavi S. Subspace Properties of Network Coding and their Applications [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(5): 2599-2619

[47] Koetter R, Kschischang F. Coding for errors and erasures in random network coding [J]. IEEE Transactions Information Theory, 2008, 54(8): 3579-3591

[48] Ho T, Leong B, Chang Y, et al. Network monitoring in multicast networks using network coding [C] // Proc. of IEEE ISIT. 2005: 1977-1981

[49] Firooz M H, Roy S, Bai L, et al. Link status monitoring using network coding [R]. UW Technical Report, Sept 2009

[50] Firooz M H, Roy S, Bai L, et al. Link Failure Monitoring via Network Coding [C] // 2010 IEEE 35th IEEE Conference on Local Computer Networks. 2010: 1068-1075

[51] Siavoshani M J, Fragouli C, Diggavi S, et al. Bottleneck discovery and overlay management in network coded peer-to-peer systems [C] // Proceedings of the 2007 SIGCOMM Workshop on Internet Network Management ACM. Aug. 2007: 293-298

[52] Siavoshani M J, Fragouli C, Diggavi S. On locating byzantine attackers [C] // Fourth Workshop on Network Coding Theory and Applications, 2008 (NetCod 2008). 2008: 1-6

[53] Duan Q, Cai W, Tian G. A simple graph-structure network tomography topology identification method [C] // Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2009). Hainan Island, China, April 2009: 337-340

[54] 戴斌, 秦鹏, 等. 基于网络编码的被动式动态网络拓扑层析方法, CN201110254234. 5 [P]