

无线体域网中基于时隙滑动窗口的概率路由协议

李 彦 周 艺 刘雨声 梁 智

(重庆理工大学计算机科学与工程学院 重庆 400054)

摘 要 无线体域网(Wireless Body Area Network, WBAN)不仅应用于医疗保健领域,而且在特殊人群监护、运动、娱乐以及军事等领域也有着巨大的应用价值,然而 WBAN 技术自身的特点将严重影响数据传输的可靠性,如何设计一个可靠的路由协议成为一个具有挑战性的工作。基于时隙滑动窗口提出了一种概率路由协议,提高了数据包传递的可靠性并减少了网络延迟。在 VS2012 上用 C# 语言对该路由算法进行实现,结果证明,在概率路由协议中加入时隙滑动窗口确实能够提高网络的可靠性。

关键词 无线体域网, WBAN, 时隙滑动窗口, 概率路由协议

中图分类号 TP393.1 文献标识码 A

Probability Routing Protocol Based on Slotted Sliding Window in Wireless Body Area Network

LI Yan ZHOU Yi LIU Yu-sheng LIANG Zhi

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

Abstract Wireless body area network (WBAN) is applied not only to the health care field, it also has great value in special populations care, sports, entertainment, military and other fields, but its own characteristics will seriously affect the reliability of data transmission. How to design a reliable routing protocol has become a challenging task. A probabilistic routing protocol based on sliding window slot was proposed to improve the reliability of packet delivery and reduce network latency. The routing algorithm is implemented by C # language on VS2012 and the result shows that the probability of joining slot sliding window in routing protocol can really improve the reliability of network.

Keywords Wireless body area network, WBAN, Slotted sliding window, Probability routing protocol

无线体域网(WBAN)是由许多附着于人体体表或植入人体体内的传感器节点自组网形成的一个无线传感器网络。作为一门新兴的技术, WBAN 最初主要应用于医疗保健领域,如使用 WBAN 对某些病人进行持续监测可以及时发现病人身体异常,从而为抢救赢取时间(例如 WBAN 可以持续监测心脏病人的心电图,观察心电信号变化并及时提供心脏病突发的预警);可以将 WBAN 和传感器网络结合起来,构建一个慢性病人和老年人的居家健康监测系统,从而减轻社会医疗保健的压力;可以用 WBAN 对特定社会群体的健康状态进行监测,如监测青少年流感的发病状态,寻找发病规律,从而丰富医疗信息系统^[1]。WBAN 技术给我们的医疗保健等领域带来了希望,然而它是一个依附于人体的网络,会随着人体运动而运动,从而引起数据链路的动态变化。此外衣服和身体阻挡也会造成无线信号的衰减。无线链路的动态变化和无线信号的衰减都可能引起数据包丢失,从而严重影响网络的可靠性传输,这给 WBAN 设计带来了较大困难。上述 WBAN 的特点使可靠性成为 WBAN 中很重要的技术指标,关系到 WBAN 服务于实际应用的质量。因此如何设计一个可靠的路由协议成为一个很有挑战性的工作。

1 WBAN 可靠路由机制的研究现状

目前,研究者主要从以下不同的角度对无线体域网可靠数据传输进行研究。

(1)针对 WBAN 链路动态变化和信号衰减的问题,不能单纯地靠增加发射功率来解决。一方面,发射功率的增加会导致能耗过大;另一方面,发射功率的增加会引起信号干扰。为此,目前的方案都采取了多跳的方式来进行数据传输。如文献[2]采用多跳无线体域网对 WBAN 网络中链接的可靠性进行模型化,使用对数正态分布确定节点的范围,保证节点间的 k-连接性来提高传输的可靠性。

(2)中继传输机制是另一种提高可靠性的方法,该机制在源节点和 sink 节点之间增加中继节点,由此不仅能够源节点和 sink 节点之间直接传输数据,还可以通过中继节点将数据包转发至 sink 节点。实践证明,采用中继传输机制确实可以提高无线体域网数据传输的可靠性^[3,4-6]。然而,过多的中继节点也会给病人带来不适,因此不能一味地增加中继节点的数量。

(3)有些学者^[7-9]提出采用活动调度(Activity Schedu-

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

李彦(1976—),男,教授,主要研究方向为无线传感器网络;周艺(1990—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络, E-mail: 854656960@qq.com;刘雨声(1990—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络。

ling)机制来控制节点发送数据的时间点,从而有效避免数据冲突,提高网络可靠性。如:CICADA 协议采取树型拓扑结构,将时间轴分成以周期为单位的时间片。然后将时间片以分布式的方式分配给各个节点,由此每个节点只能在自己的时间片内进行数据传输,从而有效地降低了干扰,避免了空间侦听,提高了数据包的投递率。TICOSS 协议和 WASP 协议也采取同样的方式提高网络可靠性。

(4)随着计算机智能的不断发展,智能算法也渐渐地被用来提高无线体域网的可靠性。如 Bahanfar 等人^[10]提出使用神经网络算法进行错误检测从而提高传输的可靠性。另外,S. Hassan^[11]等人也基于遗传算法提出一种提高网络可靠性的方法。

(5)也有些学者将延迟容忍网络的概念引入到无线体域网中,从链路连接信息的角度出发来提高网络可靠性。基于预测的安全可靠路由(Prediction-based Secure and Reliable Routing,PSR)^[12]的每个节点维持一个链路质量的预测矩阵,在路由时选择与 sink 节点有较好链路质量的节点,从而保证较高的信息投递率。与此类似,基于姿势链路代价的概率路由(Probabilistic Routing with Postural Link Costs,PR-PLC)^[13]定期更新一个链路连接可能性因子,该因子表示链路在某时刻 t 连接的可能性。在路由过程中,选择连接可能性最大的路径,从而保证信息高投递率。

2 延迟容忍网络概述

2.1 延迟容忍网络的特点

作为一种新型的网络体系结构,延迟容忍网络(Delay Tolerant Network,DTN)由延迟容忍网络研究组首次提出,旨在研究和解决星际网络的通信问题。DTN 是从具有链路间歇性连通、时延长、节点存储/计算能力低等特性的网络中抽象出来的网络模型,具有如下特点。

(1)节点资源受限:DTN 的很多应用场景中的节点通常比较小,因此节点在存储空间、能量、计算能力及通信能力等方面严重受限,这个问题在无线体域网中尤其突出。

(2)链路间歇性连通:在 DTN 中,由于节点的频繁移动、节点的分布稀疏、节点通信范围有限等原因使得链路经常性断开,链路之间的连通只是间歇性的。

(3)拓扑结构时变性:链路由于节点移动等原因频繁断开,从而导致网络拓扑随时可能发生变化。

(4)数据以“存储-携带-转发”方式传输:在数据传输中,DTN 采取“存储-携带-转发”的方式来解决网络的间歇性连通的问题。节点对产生或收到的数据并不立马转发出去,而是先存放于自己的缓存中,直到遇见满足条件的邻节点才会转发。

(5)延迟容忍:由于网络拓扑的动态变化,源节点的数据发送到目的节点可能需要经过多跳,而每个节点都需要等待时间才能碰到合适的下一跳,那么一个完整的数据传输就需要更长的时间,因此要求 DTN 应用能够容忍一定的时延。

2.2 延迟容忍网络的路由协议

路由问题一直是 DTN 网络研究的热点问题。由于 DTN 间歇性连接和延迟大等特性使得传统的 Internet 路由协议已经不再使用。传统的路由协议的目的是针对某一衡量标准选择一条“最优”的路径,如选择跳数最小的路径、时间最短的路径或成本最小的路径等。然而 DTN 路由选择的主要目的是最大化数据包成功交付的可能性,路由选择的关键问题是“在

到达目的节点的路径不存在的情况下,选择哪个节点作为下一跳最合适”。

DTN 路由协议非常多,从不同的角度,有不同的分类。根据一个数据包在网络中的副本数量可以把 DTN 的路由分为单副本路由和多副本路由。单副本路由只允许一个数据包在网络中存在一个副本,当节点遇到合适的下一跳时就将消息转发,同时将该节点中缓存的数据副本进行删除。多副本路由允许网络中存在同一数据包的多个副本,所有副本均独立进行路由,只要有一个副本到达目的节点就算数据发送成功,从而大大提高了数据的成功发送率和鲁棒性。然而,多副本复制技术虽然可以提高数据的成功发送率,但却增加了网络能量消耗。

从路由选择是否基于所获得的网络知识这一角度出发,DTN 的路由可以分为不依赖网络知识的路由和基于网络知识的路由。不依赖网络知识的路由协议在消息传输时对网络状态一无所知,只能采取随机的方式进行路由。基于网络知识的路由协议对网络状态有一定的了解,可以根据自己了解到的网络知识来预测节点和目的节点成功通信的可能性,并将消息转发给可能性更高的节点。

2.2.1 不依赖网络知识的路由

直接传输^[14-17]和传染路由^[18]作为 DTN 中较具代表性的两种路由协议,都不依赖于任何网络知识。直接传输方式的消息只有一次转发机会,是典型的单副本路由。节点产生消息之后就一直携带,直到与汇聚节点相遇才递交消息。这种方式只有在网络拓扑变化较大时才能保证节点与网络中的其他节点有相遇机会,才能保证消息有转发机会。虽然采取该方式的传输能耗很低,但没有充分利用存在的连接机会,从而导致传输延迟较长。与直接传输方式相反,传染路由是多副本路由,它采用泛洪方式充分利用了所有连接机会,节点相遇时互相交换自己缓存中没有的消息。这种方式确实可以提高消息的投递率,缩短传输延迟,但大量重复的数据包也会造成带宽和能量资源的浪费。

2.2.2 基于网络知识的路由

相较于不依赖于网络知识的路由来说,基于网络知识的路由在路由时对网络状态有一定的了解,消息传递的方向变得更加明确。由于 DTN 的动态性比较大,因此在设计路由时需要网络的信息了解得越全面越好。网络中的信息包括消息的传输延迟估计、节点的效用、相遇概率预测等。

基于链路延迟估计的路由(Mean Expected Delay,MED)算法试图利用平均时延作为静态 Dijkstra 算法的链路权重,辅助路由选择。它使用平均时延来衡量一条链路的容量信息,因此需对链路的未来状况有一个大致的了解,即获取一些先验信息。但在实际的 DTN 中,先验信息的获取并不容易,因此文献^[19]对 MED 进行了改进,提出了 MEED(Minimal Estimated Expected Delay)算法。该算法使用了滑动窗口来记录节点间的历史连接情况,使用一种估计算法来估算每条链路的平均时延,并将估算出的平均时延作为链路平均时延的预测值,该预测值随着时间不断更改。虽然 MED 和 MEED 方式相对于直接传输方式能有效降低传输延迟,但是当网络拓扑动态性较大时,链路信息的传递将产生较大的开销。

基于节点效用(Utility Based)的路由:基于效用的路由可以利用网络的历史信息来预测网络未来的情况,该方法把网络的历史信息转化为节点的效用值,节点的效用值可能是一

个关于历史相遇信息、相遇频率或节点速度等的函数。

DF(Delegation Forwarding)路由算法^[20]把节点与目的节点的连接频率作为效用值,在数据传递时每次都选择效用值较高的节点,以此来提高消息成功交付的可能性。

基于上下文信息的路由决策 CAR^[21]综合了节点的能量、移动速度、位置、到达汇聚点所处的连通域的概率等属性信息来求得节点的效用值,节点在路由时选择效用值最高的邻节点作为下一跳,从而增加数据包到达目的节点的可能性。

王博等人提出从节点中心度、关联度、节点相似度以及节点移动连通度 4 个方面对节点之间的历史相遇信息进行分析,得到一个总体效用作为消息转发的尺度^[22]。

概率路由:概率路由根据节点间连接历史记录、节点间消息历史传递信息等来预测节点与目的节点通信的概率,在路由时优先选择与目的节点通信概率较高的节点来保证消息的传输成功率^[23]。

基于历史相遇和传递信息的概率路由协议 PRoPHET 是一个经典的概率路由^[24-27]。该路由协议是对传染路由算法的一种改进,在路由时充分利用节点相遇和传递性历史规律。通过对网络历史信息分析,提出了一种衡量链路的性能指标——传送预测概率 $P(a, b)$ 。 $P(a, b)$ 表示节点 a 成功发送数据到节点 b 的概率, $P(a, b) \in [0, 1]$ 。每个节点维持了一个包含该节点到达其他所有节点的传递预测概率信息的预测向量。当两节点相遇时,它们将相互交换各自的预测向量。节点根据接收到的预测向量来更新自己的预测向量信息,具体更新分为 3 个部分。

当节点 a 与 b 相遇时,按如下方式更新它们之间的传送预测概率:

$$P(a, b) = P(a, b)_{old} + (1 - P(a, b)_{old}) \times P_{mit} \quad (1)$$

其中, P_{mit} 是初始常数。

当节点 a 与 b 在一段时间内没有相遇,它们之间的传送预测概率将会按如下方式衰减:

$$P(a, b) = P(a, b)_{old} \times \gamma^k \quad (2)$$

其中, γ 是衰减常数, k 表示衰减的时间间隔。

利用传送预测概率的传递性更新节点 a 与非邻节点的传送预测概率。如果 a 经常遇到 b , b 又经常遇到 c , 那么 a 与 c 通过 b 传递。 a 与 c 之间的传送预测概率更新如下:

$$P(a, c) = P(a, c)_{old} + (1 - P(a, c)_{old}) \times P(a, b) \times P(b, c) \times \beta \quad (3)$$

其中, β 是传递系数,反映了传递对于传送预测概率的影响大小。

完成预测向量的更新后,两节点之间开始传送数据。转发规则为:针对节点 a 上的每条目节点为 d 的信息,如果 $P(b, d) > P(a, d)$,则将节点 a 上目的节点为 d 的信息转发给节点 b 。信息按此规则不断转发直到到达目的节点。

3 基于时隙滑动窗口机制的 WBAN 概率路由协议

本文所提出的 WBAN 路由协议也是一种概率路由协议,根据记录的节点间相遇的历史信息预测节点以及其邻节点到目的节点的概率,并通过将数据发送给到达目的节点概率最大的邻居节点来减少网络延迟,提高网络可靠性。不过本文在记录节点间相遇的历史信息时,加入了时隙滑动窗口机制,从而能够保存长期的节点间相遇的信息,提高了节点间未来相遇概率预测的准确率,提高了数据包传递的可靠性。

3.1 基于时隙滑动窗口机制的概率预测公式

受其他概率路由协议逻辑的启发,首先定义一个链路似

然因子(LLF) $P_{i,j}^t$ ($0 \leq P_{i,j}^t \leq 1$)表示节点 i 和节点 j 之间的链路 $L_{i,j}$ 在离散时间间隔 t 内连接的可能性。

第 t 个时间间隔后,LLF 按如下方式进行动态更新:

$$P_{i,j}^t = \begin{cases} P_{i,j}^{t-1} + (1 - P_{i,j}^{t-1}) \cdot \omega, & \text{如果链路 } L_{i,j} \text{ 连接} \\ P_{i,j}^{t-1} \cdot \omega, & \text{如果链路 } L_{i,j} \text{ 不连接} \end{cases} \quad (4)$$

如果链路连接, $P_{i,j}^t$ 以由常数 ω ($0 \leq \omega \leq 1$) 决定的速率增长,且当前值和它的最大值 1 之间的差距减小。其结果是:如果链路长时间处于连接状态, $P_{i,j}^t$ 将会渐渐达到它的最大值 1。如果链路不连接, $P_{i,j}^t$ 以由常数 ω ($0 \leq \omega \leq 1$) 决定的速率渐渐达到 0。因此,对于一个给定的 ω , $P_{i,j}^t$ 可以近似地反映链路 $L_{i,j}$ 在时间 t 的连通状态。

根据式(4),LLF 每个时间间隔的变化率可以写成:

$$\dot{P}_{i,j}^t = \begin{cases} (1 - P_{i,j}^{t-1}) \cdot \omega, & \text{如果链路 } L_{i,j} \text{ 连接} \\ -P_{i,j}^{t-1} \cdot (1 - \omega), & \text{如果链路 } L_{i,j} \text{ 不连接} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)显示:对于一个较高的 ω (如 0.9),当链路连接时, $P_{i,j}^t$ 增长很快,当链路不连接时, $P_{i,j}^t$ 减少却非常慢。相反,对于一些较小的 ω (如 0.1),当链路连接时, $P_{i,j}^t$ 增加非常慢,当链路不连接时, $P_{i,j}^t$ 减小非常快。理想情况下, ω 应该是可变的,对于一个过去较好的链路(如在较长的时间内经常连接), $P_{i,j}^t$ 应该增长非常快,减少非常慢;而对于一个过去较坏的链路, $P_{i,j}^t$ 应该增长非常慢,减少非常快。这就意味着参数 ω 应该能够捕获链路的长期历史信息,因此它应该是链路相关的和时变的。

基于上面的观察,下一步工作将是根据维度化参数 ω 来捕获长期的链路信息。引入时间窗口机制,定义人体链路 $L_{i,j}$ 在时间间隔 t 时的历史连接质量(Historical Connectivity Quality, HCQ)为:

$$\omega_{i,j}^t = \frac{\sum_{r=t-T_{window}}^t L_{ij}}{T_{window}} \quad (6)$$

如果链路在时间间隔 r 内连接,那么 $L_{i,j}$ 为 1;否则为 0。常量 T_{window} 代表一个测量窗口(间隔的个数),通过该窗口可以获得连接质量的平均值。参数 $\omega_{i,j}^t$ ($0 \leq \omega_{i,j}^t \leq 1$) 表示上一个 T_{window} 时间内链路连接的质量,链路质量越好, $\omega_{i,j}^t$ 越大;链路质量越坏, $\omega_{i,j}^t$ 越小。通过实验发现,对于大部分人来说 T_{window} 的最优值在 7s 和 14s 之间。

图 1 显示了 LLF($P_{i,j}^t$) 和 HCQ($\omega_{i,j}^t$) 随时间的变化。

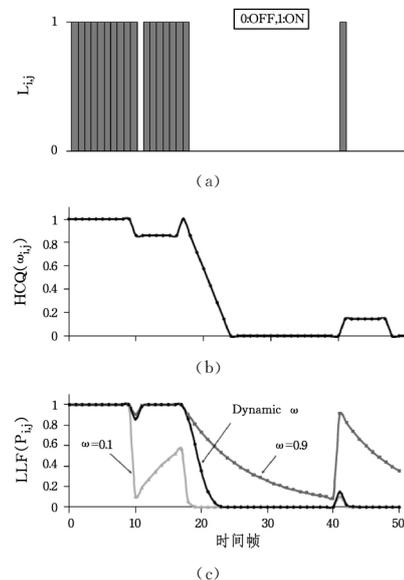


图 1 随链路状态的变化 LLF 和 HCQ 的变化情况

图 1(a)显示了链路活动实例:前半部分链路处于非常稳定的连接状态,只是在第 10 帧的时候断开了一下;后半部分链路处于非常稳定的不连接状态,只是在第 41 帧的时候连接了一下。图 1(b)显示了 T_{window} 为 7 时 $\omega_{i,j}^t$ 的变化。图 1(c)显示了当 $\omega=0.1$, $\omega=0.9$ 以及 $\omega=\omega_{i,j}^t$ 时, $P_{i,j}^t$ 的变化。当链路是稳定的连接时(前半部分),大的 ω 值(如 0.9)在处理链路短暂的断开时只是稍微地减小,从而 $P_{i,j}^t$ 在链路重新连接起来时很快恢复过来。小的 ω 值(如 0.1)却不能很好地处理这种情况,因为它正好相反——减小很快,恢复却很慢。

相似地,当链路一直稳定地处于不连接状态时(后半部分),小的 ω 值(如 0.1)响应得比大的 ω 值(如 0.9)快,对于链路的短暂连接,小的 ω 值缓慢地增加 $P_{i,j}^t$ 值,当链路断开时迅速地减小 $P_{i,j}^t$ 的值。图 1 清楚地显示出:当 ω 分别为常量 0.1 和 0.9 时,不能同时有效地处理好连接和坏连接两种情况。链路相关和时变的参数 $\omega_{i,j}^t$ 反而能够同时很好地处理两种情况,在历史链路质量较好的情况下,模仿 $\omega=0.9$;在历史链路质量不好地情况下,模仿 $\omega=0.1$ 。图 1 清楚地显示了 HCQ 和 LLF 可以同时捕获链路动态的短期和长期的信息,并表明 HCQ 和 LLF 在设计可靠路由协议时的有效性。通过加入时隙滑动窗口机制,所提出的机制能够超越只利用短期信息的路由协议,如文献[28]中的概率路由协议。

3.2 基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议

从 3.1 节可知 $\omega_{i,j}^t$ 表示链路 $L_{i,j}$ 的历史连接情况,而每条链路连接概率的预测正是基于链路 $L_{i,j}$ 的历史连接情况的统计而不断地修正。最终概率 $P_{i,j}^t$ 按照如下方式计算:

$$P_{i,j}^t = \begin{cases} P_{i,j}^{t-1} + (1 - P_{i,j}^{t-1}) \cdot \omega_{i,j}^t, & \text{如果链路 } L_{i,j} \text{ 连接} \\ P_{i,j}^{t-1} \cdot \omega_{i,j}^t, & \text{如果链路 } L_{i,j} \text{ 不连接} \end{cases} \quad (7)$$

基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议是在 $\omega_{i,j}^t$ 和 $P_{i,j}^t$ 两个参数不断更新的基础上建立起来的。其基本思想是节点 i 需要路由数据到节点 d ,且它遇到了节点 j ,只有当条件 $P_{i,d}^t < P_{j,d}^t$ 为真时,节点 i 才会将其数据转发给节点 j 。换句话说,如果节点 i 的邻居节点到达目的节点的概率大于其自身到达目的节点的概率,那么节点 i 就将该数据包传递给邻居节点。

该转发逻辑假设每个节点能在两跳之内到达目的节点。而这种假设在本文中的小型域网中是成立的。基于上述基本思想和假设,就可以得出图 2 所示的基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议的过程。

每个传感器节点执行图 2 所示的算法。使用周期性 Hello 机制,每个节点 i 渐渐地建立了与网络中所有的其他节点的 $P_{i,j}^t$ 值。节点 i 也使用同样的 Hello 信息为目前与它相连的所有节点发送它与共同目的节点 d 的连接似然因子 $P_{i,d}^t$ 。这样,每个节点都知道了所有邻节点到共同的节点 d 的 LLF 值。

在任何的时间点,如果节点 i 的缓冲中有数据包(由节点 i 或其他节点产生的),节点 i 检查与它相连的节点中是否有节点到目的节点 d 的 LLF 值比自己到目的节点的 LLF 值要高。如果节点 i 到目的节点 d 的 LLF 值是最高的,那么它将继续缓存这些数据。否则,它将寻找到目的节点 d 的 LLF 值

最高的节点,并将数据发送给该节点。这确保了节点 i 将数据发送给最有可能遇见目的节点的节点,从而降低了预期的端到端的传输延迟。

Routing Logic for node- i to forward packets to sink- d at time slot- t

```
while(true){
    for(all node j[j ∈ N, j ≠ i]){
         $\omega_{i,j}^t = \sum_{r=t-T_{window}}^t L_{i,j}^r / T_{window}$ 
        if( $L_{i,j}^t = 1$ )
             $P_{i,j}^t = P_{i,j}^{t-1} + (1 - P_{i,j}^{t-1}) \cdot \omega_{i,j}^t$ 
        else
             $P_{i,j}^t = P_{i,j}^{t-1} \cdot \omega_{i,j}^t$ 
        if( $L_{i,j}^t = 1$ )
            Send  $P_{i,d}^t$  to node- $j$ 
    }
    find node- $k$  so that  $P_{k,d}^t$  is maximum for [ $k \in N, k \neq i, d, L_{i,k}^t = 1$ ]
    for(all buffered packets to be forwarded to sink node- $d$ ){
        if ( $L_{i,d}^t = 1$ )//node- $i$  has direct link to node- $d$ 
            Deliver the packet to sink node- $d$ ;
        else{
            if ( $P_{k,d}^t > P_{i,d}^t$ )//node- $k$  has better link likelihood with sink- $d$ 
                Forward the packet to node- $k$ ;
            else
                Continue buffering the packet in node- $i$ 
        }
    }
}
```

图 2 路由算法

4 实验仿真及其结果分析

为了验证在概率路由协议中加入时隙滑动窗口的有效性,本文用 C# 语言在 VS2012 上对基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议(SSW-PR)和概率路由协议(PR)进行代码实现,并从数据包到达率、平均数据包延迟两个性能指标出发进行对比。

4.1 仿真场景

无线域网按图 3 对传感器节点进行放置,其中节点 1 为 sink 节点,其他的节点为普通的传感器节点。网络范围为 $0.5m \times 2m \times 0.5m$ 的区域,以 sink 节点为原点,以平行于地面的射线为 x 轴,以垂直于地面的射线为 y 轴,以同时垂直于 x 轴和 y 轴的射线为 z 轴,建立三维坐标系。仿真过程中所涉及的参数如表 1 所列。

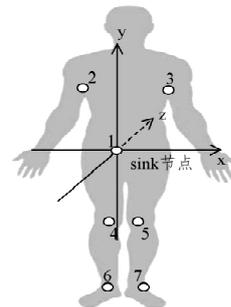


图 3 无线域网节点布置

表 1 仿真场景参数

参数	值
网络范围	0.5m * 2m * 0.5m
节点个数	1 个 sink 节点, 6 个传感器节点
仿真时间	40s
节点间最大通信距离	0.6m
P_{init}	0.6
γ	0.1

为了简化实验过程,本文作如下假设:

(1)假设人体高度为 180cm,实验开始时网络中所有的节点都处于 x 轴和 y 轴形成的平面上,那么可得所有节点的位置坐标,如表 2 所列。

表 2 初始化时节点的坐标位置

	x 坐标(m)	y 坐标(m)	z 坐标(m)
节点 1	0	0	0
节点 2	-0.1	0.4	0
节点 3	0.2	0.42	0
节点 4	-0.02	-0.4	0
节点 5	0.1	-0.41	0
节点 6	0	-0.9	0
节点 7	0.08	-0.9	0

(2)模拟人体跑步的行为时,人体按 1 步/秒的频率慢跑,那么传感器节点的位置会以 2 秒为周期进行重复变化,在一个周期内传感器节点的具体位置变化如表 3 所列。

表 3 人体的一个行走周期内节点的坐标变化情况

	t=0.5s	t=1s	t=1.5s	t=2s
节点 1 的坐标	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
节点 2 的坐标	(-0.1,0.42,0.05)	(-0.1,0.4,0)	(-0.1,0.42,-0.05)	(-0.1,0.4,0)
节点 3 的坐标	(0.2,0.44,-0.05)	(0.2,0.42,0)	(0.2,0.44,0.05)	(0.2,0.42,0)
节点 4 的坐标	(-0.02,-0.35,-0.05)	(-0.02,-0.4,0)	(-0.02,-0.4,0)	(-0.02,-0.4,0)
节点 5 的坐标	(0.1,-0.41,0)	(0.1,-0.41,0)	(0.1,-0.36,-0.1)	(0.1,-0.41,0)
节点 6 的坐标	(0,-0.85,0)	(0,-0.9,0)	(0,-0.9,0)	(0,-0.9,0)
节点 7 的坐标	(0.08,-0.9,0)	(0.08,-0.9,0)	(0.08,-0.85,0)	(0.08,-0.9,0)

(3)模拟人体跑步的行为时,人体按 2 步/秒的频率慢跑,那么传感器节点的位置会以 1 秒为周期进行重复变化,在一个周期内传感器节点的具体位置变化如表 4 所列。

表 4 人体的一个跑步周期内节点的坐标变化情况

	t=0.25s	t=0.5s	t=0.75s	t=1s
节点 1 的坐标	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
节点 2 的坐标	(-0.1,0.47,0.1)	(-0.1,0.4,0)	(-0.1,0.47,-0.1)	(-0.1,0.4,0)
节点 3 的坐标	(0.2,0.49,-0.1)	(0.2,0.42,0)	(0.2,0.49,0.1)	(0.2,0.42,0)
节点 4 的坐标	(-0.02,-0.3,-0.1)	(-0.02,-0.4,0)	(-0.02,-0.4,0)	(-0.02,-0.4,0)
节点 5 的坐标	(0.1,-0.41,0)	(0.1,-0.41,0)	(0.1,-0.3,-0.15)	(0.1,-0.41,0)
节点 6 的坐标	(0,-0.8,0)	(0,-0.9,0)	(0,-0.9,0)	(0,-0.9,0)
节点 7 的坐标	(0.08,-0.9,0)	(0.08,-0.9,0)	(0.08,-0.8,0)	(0.08,-0.9,0)

(4)依次模拟人体行走和跑步的行为,每个行为持续 20 秒。由于网络范围的限制,走路和跑步行为都在原地进行。

4.2 性能分析

本文主要从数据包到达率和平均数据包延迟两个性能指标来对可靠路由协议进行分析。

数据包到达率是指 sink 节点收集到的数据包数量与其他传感器节点生成的所有的数据包数量的比值。数据包到达率越高,那么网络的可靠性越好。

平均数据包延迟时间是指网络中所有数据包延迟时间的平均值,而数据包延迟时间是指数据包从发出到 sink 节点接收的时间差。平均数据包延迟时间越短,网络的可靠性越好。

4.2.1 数据包到达率的分析

本文假设两人体持续走路 40s,并分别在相同的时刻从相同的源节点向 sink 节点发送相同大小的数据包,并分别求出在 PR 和 SSW-PR 下的数据包到达率,如图 4 所示。

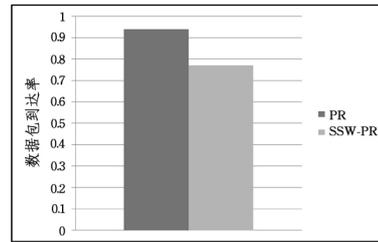


图 4 数据包到达率对比图

观察图 4 发现:SSW-PR 的数据包到达率要远远高于 PR。那是因为概率路由协议 PR 在更新传送预测概率时是由 P_{init} 和 γ 决定的,而 P_{init} 和 γ 的值在路由过程中是一个常数,不会根据网络状况而动态变化,因此计算出来的传送预测概率不能准确地预测未来网络状况。而 SSW-PR 在计算节点间未来相遇的概率时加入了时隙滑动窗口,可以根据节点间长期的历史相遇信息来较准确地预估未来的相遇概率,从而保证了较高的数据包到达率。

4.2.2 平均数据包延迟时间的分析

在 0~20s 模拟走路的行为,在 21~40s 模拟跑步的行为。从图 5 可以看出,随着人体动作从走路到跑步的变化,网络拓扑动态变化性增强,所以平均数据包时间延迟变大。而 PR 的平均数据包时间延迟明显高于 SSW-PR,这也说明了相对于 PR 来说,SSW-PR 能更好地处理网络拓扑频繁变化,同时能更好地减少网络延迟。

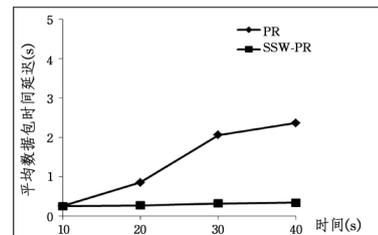


图 5 平均数据包时间延迟对比图

结束语 本文对延迟容忍网络的特点和路由协议进行了介绍,并在此基础上提出了一个适合于 WBAN 的基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议。该路由协议在记录节点间相遇的历史信息时,加入了时隙滑动窗口机制,从而能够保存长期的节点间相遇的信息,提高了节点间未来相遇概率预测的准确率,提高了数据包传递的可靠性。最后用 C# 语言在

(下转第 285 页)

- [2] 陈北海,赵萌. 输电线路状态监测通信传输网络技术的研究[J]. 电力系统通信,2012,33(5):47-51
- [3] 卞峰,李荣,连艳,等. 基于3G通信的输电线路状态监测系统主机研制[J]. 智能电网,2015,3(10):943-946
- [4] 王玮,张浩,郭经红. 基于EPON的输电线路状态监测数据传输系统[J]. 电力系统通信,2011,32(7):20-23
- [5] 王峰,李丹. 基于以太网和McWiLL的输电线路在线监测系统设计[J]. 电力信息与通信技术,2015,13(1):86-89
- [6] 柯贤文,张伟,张志谦,等. 光载无线通信技术及其应用分析[J]. 通信技术,2011,44(4):45-47
- [7] 许盛,曾强,易浩勇,等. 电力光载无线宽带接入技术研究[J]. 光通信技术,2011,35(11):21-24
- [8] 姚继明,郑泽寰,梁云,等. 光载无线技术在智能电网中的应用模式研究[J]. 中国电力,2014,47(1):129-132

(上接第263页)

VS2012上对概率路由协议和基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议进行实现,从平均数据到达率和平均数据时间延迟两个性能指标进行分析,最后得出:基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议能够更好地提高数据到达率,减少网络时延,从而提高了网络的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 霍宏伟. 医疗护理无线传感器网络系统[D]. 北京交通大学,2010
- [2] Braem B, Latre B, Blondia C, et al. Analyzing and Improving Reliability in Multi-Hop Body Sensor Networks[J]. International Journal on Advances in Internet Technology, 2009, 2(1): 151-161
- [3] 丰慧. 无线体域网中可靠高效数据传输策略研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014
- [4] Oliveira C, Makowiak M, Correia L M. Challenges for Body Area Networks Concerning Radio Aspects[C]//11th European Wireless Conference on Sustainable Wireless Technologies. 2011:1-5
- [5] de Silva N B, Yap K K, Motani M, et al. Link layer behavior of body area networks at 2.4 GHz[C]//15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2009:241-252
- [6] Chebbo H, Abedi S, Lamahewa T A, et al. Reliable body area networks using relays: restricted tree topology[C]//International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). 2012:82-88
- [7] 刘艳丽. 基于人体环境的无线体域网网络结构研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008
- [8] Braem B, Latre B, Moerman I, et al. The wireless autonomous spanning tree protocol for multihop wireless body area networks [C]//Proc of the Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services, San Jose. 2006:1-8
- [9] Braem L B, Moerman I, Blondia C, et al. A low-delay protocol for multihop wireless body area networks[C]//2007 4th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services. Philadelphia, PA, USA, 2007
- [10] Bahanfar S, Darougaran L, Kousha H, et al. Reliable Communication in Wireless Body Sensor Network for Health Monitoring [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2011, 8(5):366-372
- [11] Hassan S, Asadi B, Vejdandparast Y, et al. Improving Reliability of Routing in Wireless Body Area Sensor Networks Using Genetic Algorithm[C]//IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. 2011:590-593
- [12] Liang X, Li X, Shen Q, et al. Exploiting Prediction to Enable Secure and Reliable Routing in Wireless Body Area Networks[C]//The 31st IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). Orlando, United States, 2012:388-396
- [13] Quwaider M, Biswas S. Probabilistic routing in on-body sensor networks with postural disconnections[C]//Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access. 2009:149-158
- [14] Zhao W, Ammar M, Zegura E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks[C]//Proceeding of ACM MobiHoc. 2004:187-198
- [15] Tariq M, Ammar M, Zegura E. Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes[C]//Proceeding of ACM MobiHoc. 2006:37-48
- [16] Zhao W, Ammar M, Zegura E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network[C]//Proceeding of INFOCOM. 2005:1407-1418
- [17] Grossglauser M, Tse D. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(4):477-486
- [18] Vahdat, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks[R]. CS-2000-06, Duke University, 2000
- [19] Jones E, Li L, Ward P. Practical routing in delay-tolerant networks[C]//Proceeding of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. 2005:237-243
- [20] Erramilli V, Crovella M, Chaintreau A, et al. Delegation forwarding[C]//Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'08). New York: ACM Press, 2008:251-260
- [21] Musolesi M, Hailes S, Mascolo C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks[C]//Proceeding of the 6th IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks. WoWMoM, 2005:183-189
- [22] 王博, 黄传河, 杨文忠. 时延容忍网络中基于效用转发的自适应机会路由算法[J]. 通信学报, 2010, 31(10):36-47
- [23] Jones E, Li L, Ward P. Practical routing in delay-tolerant networks[C]//Proceeding of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. 2005:237-243
- [24] 刘杰彦. 延迟容忍网络路由协议研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006
- [25] 卢莲英. 延迟容忍网络路由算法研究[D]. 中国海洋大学, 2010
- [26] 杨炎. 延迟容忍网络路由算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012
- [27] 刘耀. 延迟容忍网络中路由与缓存管理算法[D]. 中南大学, 2012
- [28] Lindgren A, Doria A, Schelén O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev., 2003, 7(3):19-27