

基于 time 偏移机制的移动传感网数据 中继节点感知优化算法

黄煜栋, 郝 平

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 为解决移动传感网数据传输过程中中继节点转发数据能力较弱, 且难以降低数据链路的拥塞水平, 易导致网络拥塞的难题, 提出了基于 time 偏移机制的移动传感网数据中继节点感知优化算法。首先, 通过感知节点拟碰撞过程中的 time 偏移因素, 采取级联判断机制, 计算最佳数据传输成功率, 实现对网络传输链路的筛选; 然后根据节点数据成功传输率, 通过分析节点的数据接收-发过程, 计算数据转发投递阈值, 降低了数据转发过程中的时延; 随后基于节点自适应感知的方式, 在节点存在多条数据传输路径时, 通过定义节点缓存拥塞控制规则, 优化传输节点的缓存拥塞控制, 降低数据链路抖动对传输的影响。仿真实验表明: 与 CS_WSN 算法、PR_CARA 算法相比, 此算法具有更高的下一跳传输节点的成功投递概率与数据分组传输水平, 以及更低的链路拥塞程度, 且有效降低了数据传输的时延。

关键词: 移动传感网络; Time 偏移; 中继节点感知; 节点缓存拥塞控制; 投递阈值

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)04-0069-07

Data Relay Node Aware Optimization Algorithm of Mobile Sensor Networks Based on Time Migration Mechanism

HUANG Yu-dong, HAO Ping

(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the data transmission process of mobile sensor network data transmission, the ability to transmit data is weak, and it is difficult to reduce the level of data link, which is easy to cause the problem of network congestion. In this paper, a data relay node aware optimization algorithm for mobile sensor networks based on time migration mechanism is proposed. First of all, through the sensor nodes in the collision process of quasi time migration factors, take based on series parallel calculation of the optimal data transmission success rate, to achieve the initial screening of network transmission link; and then according to the node data delivery success rate, through the analysis of the data receiving node - sending process, data delivery threshold, reduce the delay of data the forwarding process; then based on the adaptive node perception, there are multiple paths to transmit data in the node, the perception of the optimal transmission path and a suboptimal transmission path as the optimal transmission path to the backup cache, optimize the transmission congestion control node, reduce the effect of jitter on data link transmission. Simulation results show that compared with the CS algorithm in WSN, PR Cara algorithm, algorithm in this paper has higher next hop node transmission success delivery probability and data packet transmission level, and lower the degree of link congestion, effectively reducing the data transmission delay.

Key words: mobile sensor networks; time migration; relay node aware; node buffer congestion control; delivery threshold

收稿日期: 2016-07-15; 修回日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(60874074); 浙江省重大科技专项资助项目(2012C11043); 浙江省教育厅科研项目(Y201534900)

1 引言

随着无线传感网技术从固定无线传感技术逐步向移动无线传感技术过渡,各种新兴移动传感网的运用需求也呈现与日俱增的态势^[1].然而,由于传统无线传感网技术难以适应移动领域中的节点移动速率快,网络链路抖动频繁,节点分布密集等新特点,特别是移动传感网节点在进行数据转发、传输过程中需要频繁根据当前移动状况进行拥塞控制,导致数据汇聚效率不高等难题,严重阻碍了移动传感网技术的发展与应用^[2].

为了改善当前传感网数据传输算法中存在的链路抖动频繁、拥塞发生频率高的问题,提高当前算法对移动状态下网络拓扑结构的适应性,学者们基于传统传感网技术提出了一些能够与移动传感网络相适应的感知算法,用于稳定移动传感网络中的数据传输质量,减少数据链路的抖动性能.如 Heinzellnan^[3]等提出了基于链路锚定位锁定机制的节点感知优化算法,通过引入锚节点评估的方式对数据传输周期内的链路节点进行多跳锁定评估,降低了链路在传输周期内出现抖动的概率.然而,该算法对周期交替过程中的切换重视不够,当链路处于抖动状态时,容易导致因节点切换失败而导致的网络拥塞现象. Ali. M^[4]等基于量子交替感知机制的无线传感网数据传输稳定算法,采取量子调制的方式实现传输节点网络编码的有效自适应,减少了链路稳定过程中存在的拥塞难题.但是,在节点分布密集时,采用量子调制极易导致网络控制开销呈现飞速上升态势,同时降低了链路对拥塞节点的感知效率,反而会降低网络数据分组投递水平,造成一定的拥塞现象. Zhao. T^[5]等基于超欧里几何映射机制,针对节点分布不均匀时将网络进行超欧里几何球面映射处理,有效提高网络拓扑的收敛特性,且能够在子拓扑结构内部实现数据传输节点的有效搜寻,降低了拥塞节点出现的数量,提高了链路感知水平.但是,该算法对节点移动速率较低时,由于此时超欧里几何球面为一平面,导致算法的收敛性较差,搜寻传输节点的过程将变得异常复杂,算法感知功能的鲁棒性将随着时延现象频繁发生而减弱,致使数据传输受到严重的阻碍.

对此,本文提出了一种基于 time 偏移机制的移动传感网数据中继节点感知优化算法,通过考虑节点拟碰撞过程中的 time 偏移因素,提高下一跳节点的成功投递概率,并通过构建投递阈值模型,实现对

下一跳传输节点的最优选择.考虑到数据传输过程中的拥塞现象,通过自感知机制实现对传输节点的拥塞控制,提高网络分组投递水平.最后通过 MATLAB 7.0 仿真实验平台进行了对比测试实验,证明了本文算法的优异性.

2 本文数据中继节点感知优化算法

本文提出了基于 time 偏移机制的移动传感网数据中继节点感知优化算法,其过程见图 1,由三部分构成.

(1)基于 time 偏移机制的链路质量感知:通过对节点在移动过程中的连通性能及节点转发概率进行评估计算,实现数据链路的稳定感知初始化过程.

(2)节点转发优化控制:通过构建节点投递阈值模型,优化传输数据在节点转发过程中的目的选择,降低数据拥塞水平.

(3)节点缓存拥塞控制:通过建立自感知机制,对传输链路进行逐条优化,并及时将节点冗余进行丢弃处理,改善节点转发过程中的拥塞控制质量.

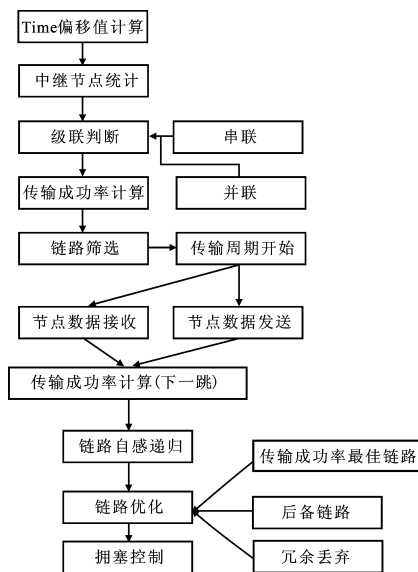


图 1 本文算法流程图

2.1 基于 time 偏移机制的链路质量感知

移动传感网中节点往往处于移动状态,网络链路的抖动性要远超过固定式传感网络^[6].但是,由于传感节点具有移动特性,使其能够以一定的概率与传输质量较高的中继节点进行数据传输与信息交互^[7],交互过程中可以通过对传感节点的 time 偏移特性进行模型分析,研究移动节点与其他节点进行数据交换的规律,提高传输链路的稳定性与流动性.

设节点 i 为当前数据在传输过程中的任意一个

节点,该节点与无线传感网覆盖区域内固定的各个 sink 节点均可能存在数据交换,若假设节点 i 与某个 sink 节点 j 之间连通时的 time 偏移值低于数据传输周期,则节点 i 与节点 j 均能够进行正常的数据信息传输,令数据成功交换率为 $Time_mrv(i,j)$,则 $Time_mrv(i,j)$ 为

$$Time_mrv(i,j) = \frac{T_tran(i)}{T_tran(j)} \quad (1)$$

式中, $T_tran()$ 表示任意节点的 time 偏移值,对于任意节点而言,该 time 偏移值的大小在数据生存周期内将是固定的。

若对于任意处于运动状态的传感节点而言,若该节点 i 并非处于孤立运动状态,即同一时刻在某个分区内与节点 i 共同运动的节点数量不为 1,任取一个节点 m ,根据模型(1)可知,节点 i 与节点 m 之间均有可能通过中继节点交替传输,实现节点 i 与节点 m 之间的数据交换,因此可在 $T_tran(i)$ 与 $T_tran(m)$ 存续的时间内逐跳进行概率计算,计算节点 i 与节点 m 间的数据转发成功概率。设节点 n 为 i 与 m 之间的节点,链路 $i-n-m$ 处于稳定传输状态,若在 $T_tran(i)$ 与 $T_tran(m)$ 的共同存续期间内三个节点均处于串联状态,因此,节点 i 、节点 m 与节点 n 的数据传输时间 $Time_tran(i,n)$ 、 $Time_tran(m,n)$ 及数据转发成功概率 $P_cs(i,n)$ 满足如下条件:

$$P_cs(i,n) = \left[\frac{Time_tran(i,n)}{T_tran(i)} \right] \times \left[\frac{Time_tran(m,n)}{T_tran(m)} \right] \quad (2)$$

一般的,若节点 i 、节点 m 与节点 n 处于并联状态,则模型(2)可改写为如下的形式:

$$P_cs(i,n) = \max \left\{ \left[\frac{Time_tran(i,n)}{T_tran(i)} \right], \left[\frac{Time_tran(m,n)}{T_tran(m)} \right] \right\} \quad (3)$$

由于区域内任意两个节点若不能直接与 sink 节点进行数据交换,往往需通过至少一个或一个以上的节点作为中继传输节点,才能有效地进行数据交换^[8]。因此,设节点 i 与 m 间的中继传输节点为 $b_1, b_2, \dots, b_n$,依据模型(2)可知,链路 $i-b_1-b_2-\dots-b_n-m$ 的数据传输成功率 $P_cs(i,m, \sum b_n)$ 满足:

$$P_cs(i,m, \sum b_n) = \prod_{n=1,2,\dots} P_cs(i,m,b_n) \quad (4)$$

同理可得,若节点 i 与 m 间中继传输节点均以并联方式进行数据传输,则式(4)可改写为如下的形式:

$$P_cs(i,m, \sum b_n) = \max_{n=1,2,\dots} P_cs(i,m,b_n) \quad (5)$$

由模型(1)~(5)可知,当任意两个节点进行数据交换时,均可通过模型(4)、(5)计算其数据传输的成功率,且该成功率与节点的 time 偏移值密切相关,如图2所示,因此可通过不断改善节点 time 偏移值对传输的影响,提高模型(4)、(5)得到的数据传输成功率。在不同的链路中,通过模型(4)、(5)可形成的一条数据传输成功率最好的链路,从而控制数据传输链路抖动。

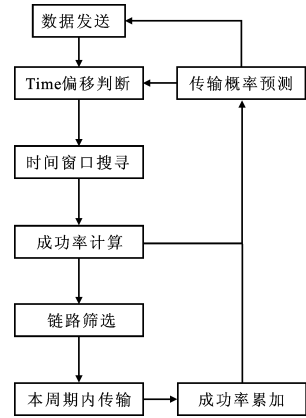


图2 基于 time 偏移机制的链路质量感知

2.2 节点转发优化控制

对于任意节点 i 而言,通过 time 偏移机制的链路质量感知过程,能够搜寻到一条抵达本区域内 sink 节点最优的一条链路,特别是存在多条不同的传输链路时,可将从中选取一条抖动最低的链路,并以最佳的传输成功率进行传输。然而,在数据传输中,任意节点均存在 time 偏移值,需要在时间窗口存续区间内完成数据交换,因此,还需要考虑节点对数据的转发性能,即通过一定的转发控制手段,降低节点对数据分组转发过程中的压力,提高节点的数据转发性能。

对于任意数据分组而言,其有一定的 time 偏移值,当接收节点在数据分组的 time 偏移值内尚未完成该数据分组的转发,则该数据分组将处于失效状态。因此,节点在转发数据时需要考虑数据分组的发送时间与该数据分组的 time 偏移值,若发送该数据分组的时耗要高于数据分组的 time 偏移值,则该数据分组时,必须被丢弃,并由原发送节点重新选择一条链路进行发送。由模型(4)、(5)可知,若本轮数据传输周期内的最优链路因故不可使用时,可直接选取数据传输成功率排第二位的那条传输链路,以便

进行数据传输。

因此,当中继节点在发送数据分组时,需要优先选择数据转发能力较强的节点,即单位时间内接收/发送数据分组最强的节点,以便降低数据拥塞现象。

对于任意一个中继节点 i 而言,本文定义其转发投递阈值 $P_{r-s}(i)$ 的计算模型为

$$P_{r-s}(i) = \sum_i Recv(i) / \sum_i Sent(i) \quad (6)$$

在中继节点 i 的 time 偏移值 T_i 范围内,模型(6)可改写为

$$P_{r-s}(i) = \sum_{i=0}^{T_i} \frac{\sum_i Recv(i)}{\sum_i Sent(i)} \quad (7)$$

式中, $Recv(i)$ 和 $Sent(i)$ 分别表示节点 i 在自身时间窗口内接收的数据和发送的数据总量,若计算得到的 $P_{r-s}(i)$ 数值小于 1,说明节点 i 在当前时刻发送数据能力要强于接收数据能力,可以继续接收其他节点转发的数据,实现正常的转发功能。此外,节点 i 在接受数据分组时,还需要考虑该数据分组的 time 偏移值的影响,见图 2 所示,当仅当分组 time 偏移值在模型(1)所示的 time 偏移范围内,才能够进行数据转发。

若中继节点 i 处于串联链路上,则此时该节点的数据成功传输率 $P_{cs}(i)$ 可计算如下:

$$P_{cs}(i) = \prod_{n=1,2,3,\dots} \frac{Time_tran(i,n)}{T_tran(i)} \quad (8)$$

当传输链路为并联链路时,则 $P_{cs}(i)$ 为

$$P_{cs}(i) = \max_{n=1,2,3,\dots} \frac{Time_tran(i,n)}{T_tran(i)} \quad (9)$$

式中,节点 n 为节点 i 全部下一跳节点的总和。

由于传输过程中的链路可以由串联形成,也可以由并联形成,因此可以根据模型(8)与模型(9),灵活采用不同的级联形式,实现对数据收发过程中的优化控制。如图 3 所示。

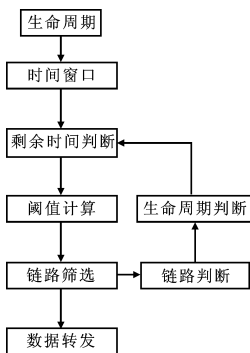


图 3 节点转发优化控制

2.3 节点缓存拥塞控制

由于不同链路上的节点拥塞情况均有很大的不同,因此会直接影响到数据成功传输率^[9],故需要对链路上的节点拥塞状况进行评估控制,以便进一步的优化节点的拥塞控制水平。

不妨设传感节点 i 在投递数据分组时成功投递的概率为 μ ,且当前网络中以级联形式进行数据传输的节点共有 k 个,这些节点均有一定的参与概率 α 参与对数据分组投递的竞争,则当前数据分组被成功投递的概率 μ 为

$$\mu = \alpha k (1 - \alpha)^{1-k} \quad (10)$$

设节点转发数据的最大时间为 T ,则节点缓存中发生的延时 t 满足:

$$t = \mu T = T \alpha k (1 - \alpha)^{1-k} \quad (11)$$

不妨设节点对于编码长度为 L 的数据分组成功转发率为 L_i ,且节点的转发带宽为 B ,则当节点缓存上全部数据被转发完成时,整体缓存编码长度的平均长度 η 满足:

$$\eta = L \sum_i^k L_i \quad (12)$$

因此在整个缓存转发时间内,被成功传输的数据分组个数 X_{num} 满足:

$$X_{num} = Ct/L = \frac{CT}{L} \alpha k (1 - \alpha)^{1-k} \quad (13)$$

首先对链路上的任意一个节点 i 进行拥塞评估,根据模型(4)计算其转发投递阈值 $P_{r-s}(i)$ 。显然 $P_{r-s}(i)$ 能够反映当前时刻节点 i 的拥塞控制水平。若下一跳节点的 $P_{r-s}(i)$ 大于 1,则果断地将该节点进行抛弃出来。此外,通过模型(1)~(3)能够有效的评估该过程的数据成功传输率,如图 4 所示,通过分析当前链路的数据分组信息,并代入模型(1)~(3)计算得到数据传输成功率,随后利用该指标有效评估发送节点 i 将数据发送到接收节点 m 中的成功发送概率,若发送节点 i 有若干个备选的接收节点 m ,且根据模型(10)~(13)计算得到的数据分组长度小于节点缓存大小,则应该优先选择 $P_{cs}(i, m, b_n)$ 较大的链路,以便发送节点能够将数据以最佳的方式投递到接收节点中,降低数据传输周期中的延时现象,因此,本文定义节点缓存拥塞控制规则如下:

①节点在发送数据时,根据式(3)逐条计算传输链路的数据传输成功率,并选出数值最佳的一条进行数据传输。

②传输过程中按模型(4)所示计算其转发投递

阈值,当仅当该阈值小于 1 时才进行数据传输。若在数据分组的 time 偏移值内该阈值一直大于 1,则果断的抛弃该条链路并选取数据传输成功率次优的链路进行数据传输。

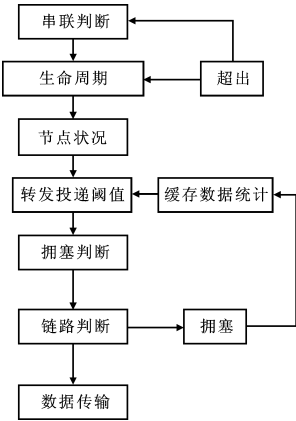


图 4 节点缓存拥塞控制流程

3 仿真实验与分析

为了体现所提算法的优异性,本文将 CS_WSN 算法^[10]及 PR_CARA 算法^[11]设立为对照组,利用 MATLAB 7.0 仿真环境对本文算法与对照组算法性能进行测试,评估指标有^[12-13]:数据分组投递率、最大传输时延、网络拥塞节点数量以及网络带宽利用率.详细仿真参数见表 1.

表 1 仿真参数表

参数	数值
区域布洒面积	6 400 m×6 400 m
数据仿真时间/min	60
数据传输方式	随机
最大节点缓存/MB	128
节点最大游走速度/(m/s)	24
最大数据传输率/(kB/s)	256
节点功率/J	<24

(1)数据分组投递率

图 5 反映了本文算法与对照组算法的数据分组投递率测试结果,依图可知,随着最大节点缓存数量的增加,本文算法与 CS_WSN 算法、PR_CARA 算法的数据分组投递率也呈现一定程度的增加,但是,本文算法的分组投递率是最高的.这是由于最大节点缓存不断增加,节点对数据转发能力也随之提高,大大增加了节点对数据分组投递的成功率.本文算法综合对节点转发及节点缓存进行了控制,特别是考虑到缓存中的数据分组具有一定的生命周期,通

过基于 time 偏移值的调度与转发,能够将数据分组在生命周期内顺利的发送,降低了因拥塞而导致的投递不畅的情况,而 CS_WSN 算法仅针对节点转发进行了一定的优化,当前数据分组一旦未被及时发出,将一直滞留在节点缓存中,影响其他数据分组的发送;而 PR_CARA 算法仅对节点缓存进行了优化,难以及时将生命周期即将结束的数据分组进行丢弃处理,因此在提高数据分组投递率性能上,本文算法具有明显的优势.

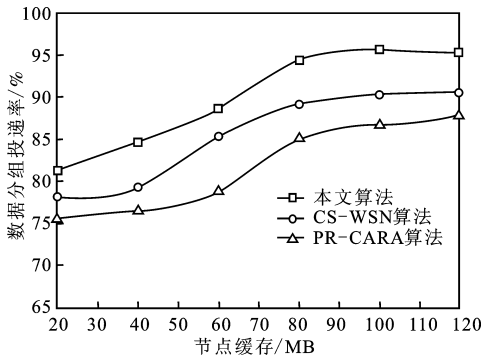


图 5 三种算法的数据分组投递率测试

(2)最大传输时延

图 6 反映了本文算法与 CS_WSN 算法、PR_CARA 算法的最大传输时延测试结果,可见,随着节点最大游走速度增加,本文算法与对照组算法的最大传输时延均呈现一定程度的增加趋势,但是本文算法的传输时延要低于对照组.这是由于随着节点最大游走速度的增加,网络拓扑结构更迭频繁,大大增加了数据传输链路的抖动性,导致传输时延呈现不断增加的态势.而 CS_WSN 算法虽然对分区内数据链路进行了一定的优化处理,然而当节点速度移动过快时,由于搜寻不到 sink 节点,导致其难以优化传输链路,从而扩大了时延. PR_CARA 算法仅对链路进行一次筛选,当链路节点处于拥塞状态时,将被被动地等待下一传输周期到来时才进行数据传输.而本文算法针对传输过程中出现的节点拥塞现象,通过定义拥塞控制规则,特别是当传输链路出现异常时能够迅速切换出次优链路,实现对数据的稳定传输,从而使得所提算法的传输时延较低.

(3)网络拥塞节点数量

图 7 反映了本文算法与对照组算法的网络拥塞节点数量测试结果,随着最大数据传输率增加,本文算法与对照组算法的网络拥塞节点数量均呈现一定程度的增加趋势,但是本文算法的增加幅度始终低于对照组算法.这是用于最大数据传输率增加,节点

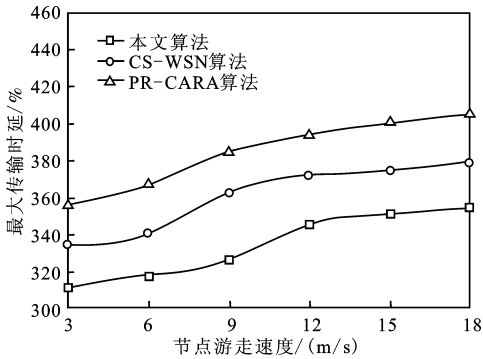


图 6 三种算法的最大传输时延测试

接收数据的数量也随之提高,大大增加了节点缓存的压力. 本文算法综合对节点转发及节点缓存进行控制,在传输过程时可以根据链路的串并联情况选择数据传输成功率最大的链路进行数据传输,从而大大降低了节点转发数据的压力,

而 CS_WSN 算法采用简单收发模式,数据分组到达时即进行发送操作,当缓存较大时将难以将数据分组发出. PR_CARA 算法虽在 CS_WSN 算法基础上采取调度机制对缓存中的待发送分组进行调度处理,然而并未考虑到数据分组的 time 偏移情况,当分组的 time 偏移值大于分组生命周期时,该数据分组将难以发送,导致拥塞节点数量增加. 因此本文算法在网络拥塞节点性能上具有一定的优势.

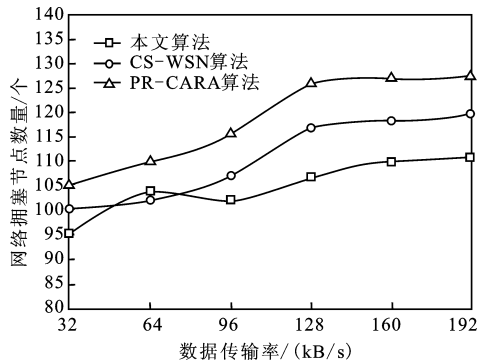


图 7 三种算法的网络拥塞节点数量测试

(4)网络带宽利用率

图 8 反映了本文算法与对照组算法的网络带宽利用率测试结果,由图 8 可知,随着节点功率的不断增加,本文算法与 CS_WSN 算法、PR_CARA 算法的带宽利用率均有一定程度的增加,这是由于移动无线传感网数据汇聚均通过分区区域内的簇头节点进行数据汇聚,当节点功率增加时,网络带宽利用率也得以增加. 然而,本文算法的带宽利用率要高于对照组算法. 这是由于本文算法在带宽受限的情况下,

传输节点能够根据当前下一跳节点的串并联情况动态的选择传输成功率最高的路径进行传输,且在传输受阻的情况下能够迅速的通过模型(4)、(5)计算出传输性能最好的下一跳节点,因此难以造成因拥塞而导致的汇聚不畅问题. CS_WSN 算法由于只能对当前接收的数据分组进行处理,当网络带宽受限时会导致大量数据分组滞留在节点缓存中,大大降低了汇聚带宽的使用效率. PR_CARA 算法在进行缓存优化的过程中未通过 time 偏移值对数据分组的传输进行控制,导致过期的数据分组难以被丢弃,降低了节点的传输性能,造成网络带宽利用率较低.

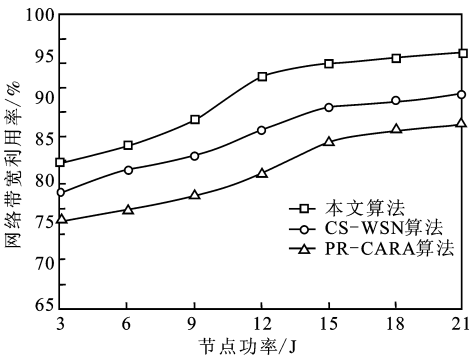


图 8 三种算法的网络带宽利用率测试

4 结束语

为改善移动传感网数据传输过程中的节点转发困难、拥塞处置效率低等问题. 本文提出了基于 time 偏移机制的移动传感网数据中继节点感知优化算法,通过基于 time 偏移机制的链路质量感知、节点转发优化控制、节点缓存拥塞控制等过程,在提高中继节点对数据的传输能力的同时,大大减轻网络中出现的拥塞现象,通过改善数据分组投递中的时延. 仿真实验结果显示:与 CS_WSN 算法、PR_CARA 算法相比,本文算法的网络性能最佳,其下一跳传输节点的成功投递概率与数据分组传输水平更高,而链路拥塞程度更低,有效降低了数据传输的时延.

参考文献:

[1] LEE W. A node localization for constructing features and models for wsn[D]. New York: Columbia University,2012,1(2): 33-76.

[2] 杨国宁,冯秀芳,樊刘娟. 一种基于最优融合集的多传感器数据定位算法[J]. 软件学报,2012,23(11): 134-140.

[3] Heinzellnan,Chandrakasan A P,Bal Krishnan. An application specific protocol architecture for wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 1(4):660-670.

[4] Ali M,Stewart B G. Congestion adaptive multipath routing for load balancing in mobile WSN [J]. Innovations in Information Technology, 2012, 21 (16): 305-309.

[5] Zhao T. A framework of physical layer technique assisted authentication for vehicular communication networks [J]. Science China (Information Sciences), 2014, 10(12):1996-2004.

[6] Wang D, Zhang Q, Liu J C. Partial network coding: theory and application for continuous sensor data collection[C] // Proc. of the 14th IEEE International Workshop on Quality of Service, IEEE,2012, 35(10): 93 - 101.

[7] 闫新芳,王志龙,闫新申,等. WSN 中基于梯度场节点定位算法的维护更新[J]. 传感器与微系统,2011,30 (8):56-58.

[8] 罗守山,杨文川. 基于矢量定位技术的 wsn 节点定位的模型及研究[J]. 北京邮电大学学报,2013,31(3): 5-9.

[9] Wang Y H. Evidence-based trust a mathematical model geared for multivalent systems [J]. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 2013, 5 (3):1-25.

[10] Hao Xiaochen, Jia Nan, Liu Bin. Multi-path optimizing routing protocol based on predicting congestion for wireless sensor network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(5): 1261-1265.

[11] Luo Shoushan, Yang Wenchuan, Xiao Qiang. Model and research of WSN node localization based on vector localization technology [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013,31 (3): 5-9.

[12] Nguyen D, Tran T, Nguyen T. Wireless broadcast using network coding [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2013, 58(2): 914-925.

[13] Jolliffe D, Tran T, Nguyen T. Node location in wsn [J]. Vehicular Technology, 2014, 58(2): 914-925.

作者简介:

黄煜栋 男,(1981-),硕士,副教授. 研究方向为网络通信、人工智能. E-mail:hugydong1981gd@sina.com.

郝平 男,(1961-),硕士,教授. 研究方向为移动网络、模式识别与数据挖掘.

(上接第 68 页)

[4] 孙颖,姚慧,张雪英,等. 基于混沌特性的情感语音特征提取[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015,48(8):681-685.

[5] 吕金虎,陆君安,陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002:20-60.

[6] 丁伟. 基于 MFCC 说话人识别算法研究[D]. 合肥:安徽大学,2009.

[7] 赵力,黄程韦. 实用语音情感识别中的若干关键技术[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(2): 157-170.

[8] 韩贵丞,李锋. 股票指数信号的似混沌特性研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(2): 711-715.

[9] 陈鑫. 相空间重构在语音情感识别中的研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2014.

[10] Faúndez Z M, McLaughlin S, Esposito A, et al. Non-linear speech processing: Overview and applications [J]. Control and Intelligent Systems, 2002, 30(1): 1-10.

作者简介:

张子恒 男,(1991-),硕士研究生. 研究方向为语音信号处理.

孙颖(通讯作者) 女,(1981-),讲师,硕士生导师. 研究方向为语音信号处理. E-mail:tyutsy@163.com.

姚慧 女,(1991-),硕士研究生. 研究方向为语音信号处理.