

基于路径到达率和动态广播时延的汇聚树协议^①

赵 城^② 潘露萍

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 汇聚树路由协议(CTP)是目前无线传感器网络(WSN)中常用的数据采集路由协议。它是基于期望传输次数(ETX)的树型路由协议。但对多跳路径的衡量,简单的 ETX 相加往往无法良好刻画实际路径质量,致使该协议很难选出最优路径。本文提出了基于端到端的数据到达率(PDR)的 CTP 改进协议,能更好地衡量多跳路径的网络质量。据此选出的最优路径能构建更优的汇聚树,提高端到端数据传递的成功率,减少平均传递次数和平均传递时间,这样可以节省能耗,提高网络生存时间。同时,本文提出在建树过程中采取动态时延广播策略,可以有效减少建路由树时的广播次数,节省开销。

关键词 汇聚树路由协议(CTP);期望传输次数(ETX);到达率(PDR);无线传感器网络(WSN);动态时延

0 引 言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)由具有传感、数据处理和短距离无线通信功能的传感器节点组成,已广泛应用于国防军事、环境监测、生物医药、交通管理、抢险救灾等众多领域。传感器节点通常都由干电池供电,能量和无线通信能力有限,因此如何快速有效又节能地采集传感器数据,延长网络寿命一直是研究的重点。

汇聚树路由协议^[1](collection tree protocol, CTP)是基于树状结构的汇聚协议,应用非常广泛^[2,3]。在 CTP 协议下,每个节点将各自的数据上传给父节点,最后汇聚到根节点 sink,采用了基于期望传输次数(expected transmissions count, ETX)的距离向量路由算法。传统的 CTP 协议用 ETX^[4]来衡量链路质量,虽然计算比较简便,但在多跳路径中,ETX 的简单相加往往会与实际链路质量产生偏差。对 CTP 这种逐级上传的多跳网络架构,用单跳链路质量的乘积能更好地表示整条上传路径的质

量。
本论文采用节点到根节点整条路径的数据包到达率(packet delivery ratio, PDR)来衡量路径质量。本文的主要贡献如下:

- (1) 提出了基于路径到达率的 PDR-CTP 协议,通过计算和仿真表明,同传统的基于 ETX 的 CTP 协议相比,可以有效提高路径端到端数据传递的成功率,另外还可以节省平均总传递次数和平均延时,节省能耗,提高网络生存时间。
- (2) 提出了动态延时广播算法,在建树过程中,通过动态延迟,使得质量好的节点先行广播,提高建树过程的稳定性,减少广播次数,节省能耗。

1 相关工作

在 WSN 中,无线链路质量一直是研究的重点^[5],目前比较常用的衡量指标有 ETX、packet reception ratio(PRR)^[6]、four-bit(4B)^[7]、request number of packets(RNP)^[8]、window mean with exponentially weighted moving average(WMEWMA)^[9],这些

① 国家自然科学基金(61379124, 61871348)资助项目。
② 男,1981 年生,博士生,讲师;研究方向:无线传感器网络,物联网,网络编码;联系人,E-mail: zhaocheng@zjut.edu.cn
(收稿日期:2019-03-02)

指标各有侧重点,文献[10]对这些指标进行了详细的分析和比较。但这些指标都只衡量了2个相邻节点的链路质量,对于多跳路径质量,只是简单地将这些指标进行线性叠加,显然这与实际多跳路径的质量不符。因此如何衡量多跳链路的质量是本文研究的出发点。

对 CTP 协议,目前已有一些相关研究工作。文献[11]和文献[12]分别对传统 CTP 协议的静态和动态性能进行了评价,并分析了原因。文献[13]提出了多通道汇聚树概念,在增加相应路由开销的基础上提高了汇聚树的稳定性,并可以减少数据汇聚时间。为了解决网络抖动和拥塞,文献[14]提出用概率来随机选择父节点,虽然能在一定程度上减少广播开销,但显然有很大概率无法选到最佳的父节点。文献[15]提出了衡量链路质量的 fuzzy logic indicator (FLI) 指标,它将 PRR 和其动态方差以及更新时间统一在一起考虑,利用模糊逻辑控制思维来选择路由节点,实验数据显示比原有协议有所提高。文献[16]也对路由选择指标进行了改进,但它们都只考虑了单跳的链路质量。文献[17]将 PDR 和 ETX 结合起来,提出了 QoF 指标,实验表明该算法减少了汇聚树的传输开销,并提高了端到端的到达率,但没有对建树时的广播泛滥进行改进。文献[18]对通信系统时延进行了研究,指出时延能影响通信性能,因此在 CTP 协议中设置合适的时延很有必要。文献[19]提出了 average transmission time (ATT) 用最短传输时间来代替 ETX,平均减少了 17.7% 的延迟。文献[20]提出了一种基于度约束最短传输树的多路径传输协议,使网络中每个节点均有 2 条互不相关路径到达汇聚节点并且传输距离最短,提高了数据传输可靠性,但以上算法都没有考虑多跳链路的质量。

综上所述,本文提出的基于路径 PDR 和动态广播延迟策略的 CTP 协议对建立高效节能的汇聚树路由具有一定的研究意义。

2 基于链路 PDR 的 CTP 协议

2.1 传统 CTP 存在问题

在多跳路径中,ETX 的简单相加往往会与实际

链路质量产生偏差,如图 1 所示。

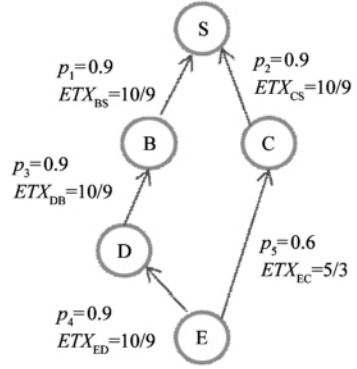


图 1 CTP 例子

图中,节点 S 为网络中的根节点,即数据汇聚中心, B、C、D、E 为其子节点。 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 为相邻节点间数据包传递成功的几率,对节点 E,它到根节点 S 有两条路径, $E \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow S$ 和 $E \rightarrow C \rightarrow S$ 。在不考虑失败重传的情形下,2 条路径端到端传递成功几率 PDR 为

$$PDR_{EDBS} = p_1 \times p_3 \times p_4 = 0.729$$

$$PDR_{ECS} = p_2 \times p_5 = 0.54$$

可得 $PDR_{EDBS} > PDR_{ECS}$ 。

但是 2 条路径的 ETX 却正好相反:

$$ETX_{ECS} = 10/9 + 5/3 = 30/9$$

$$ETX_{EDBS} = 10/9 + 10/9 + 5/3 = 25/9$$

可得 $ETX_{EDBS} > ETX_{ECS}$ 。

可见,在多跳链路中,ETX 的简单相加不能很好地表示整条链路的质量,因此本文采用单跳链路质量的乘积这一指标,能更好地刻画整条上传路径的质量。

2.2 PDR-CTP 路由策略

同传统 CTP 协议类似,本文提出的基于路径 PDR 的 CTP 协议,在新节点加入汇聚树时,计算它通过各条备选路径到达根节点的到达率,从中选择 PDR 最高的路径。同时为了避免建树时的广播泛滥,在建树时,对 PDR 较低的节点进行延迟发送广播,以确保 PDR 高的节点先发送广播,减少广播泛滥几率。PDR-CTP 建立树的过程如下:

(1) sink 节点发起建立汇聚树通知,向周围节点广播自身信息, $PDR_{s \rightarrow s} = 1$ 。

(2) 节点 k 收到 sink 节点的广播信号后,更新自己到 sink 节点的到达率 $PDR_{k \rightarrow s}$, 并根据 $PDR_{k \rightarrow s}$ 设置一定的延迟 T_{delay} 后,向周围节点广播自身信息 $PDR_{k \rightarrow s}$ 。

(3) 中间过程,节点 i 收到 j 发出的汇聚树广播信号后,计算自身到 sink 节点的到达率 $PDR_{i \rightarrow s} = PDR_{i \rightarrow j} \times PDR_{j \rightarrow s}$ 。同时检查是否已有到达 sink 节点的路径,若没有则选择节点 j 作为自身的父节点加入汇聚树。若已经存在,则比较新旧 $PDR_{i \rightarrow s}$ 大小,若新 $PDR_{i \rightarrow s}$ 较小,则忽略该广播信息,若新 $PDR_{i \rightarrow s}$ 较大,则放弃原来的父节点,选择 j 作为自身的父节点重新加入汇聚树。并根据 $PDR_{i \rightarrow j}$ 设置一定的延迟 T_{delay} 后,向周围节点广播自身信息 $PDR_{i \rightarrow s}$ 。

(4) 重复过程(3)直到所有节点都加入汇聚树。本协议关键在于到达率 PDR 的计算,对一个单跳链路 $i \rightarrow j$,影响 $PDR_{i \rightarrow j}$ 主要有以下 2 点:

- (1) i 与 j 之间单个数据包的传递成功率 p_{ij} ;
- (2) 重传上限 r ,当 i 与 j 之间重传次数大于 r 次时,将放弃数据包的再次传递。

根据以上 2 点,可以计算出 i 与 j 间总的数据包到达率为

$$PDR_{i \rightarrow j} = 1 - (1 - p_{ij})^{r+1} \quad (1)$$

这样 i 到 sink 节点总的数据包到达率为

$$PDR_{i \rightarrow s} = PDR_{i \rightarrow (i-1)} \times PDR_{(i-1) \rightarrow (i-2)} \times \dots \times PDR_{(s-1) \rightarrow s} \quad (2)$$

2.3 PDR-CTP 性能分析

PDR-CTP 协议从到达率 PDR 着手,将一个多跳路径的各链路质量进行相乘,而传统 CTP 则是将多条路径的各链路质量进行相加。从理论上讲,各链路质量相乘更能体现整条路径的质量优劣。

对到达率要求比较高的网络,显然采用路径 PDR 作为选择路径的指标会更好一点。特别是在链路质量比较差的 LLN 网络中,选用 PDR 指标要明显优于 ETX 指标。

对某个节点 i ,它到 sink 节点的到达率和 ETX 分别为 $PDR_{i \rightarrow s}$ 、 $ETX_{i \rightarrow s}$ 。由于到达率 PDR 的下降, i 节点信息成功传递到根节点 S 的几率下降,失败之后,节点 i 只能重新发起上传任务。这样节点 i 信息成功传递到根节点 S,所需要的总传递次数设为

$ETXT_{i \rightarrow s}$ (expected transmission count in total) 可得:

$$ETXT_{i \rightarrow s} = ETX_{i \rightarrow s} / PDR_{i \rightarrow s} \quad (3)$$

对于一条路径 $n \rightarrow (n-1) \rightarrow \dots \rightarrow 1$,有:

$$ETX_{n \rightarrow 1} = \sum_i^n ETX_{(i+1) \rightarrow i} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} ETX_{n \rightarrow 1} &= \prod_i^n ETX_{(i+1) \rightarrow i} \\ &= \prod_i^n \left(1 - \left(1 - \left(\frac{1}{ETX_{(i+1) \rightarrow i}} \right)^{r+1} PDR_{(i+1) \rightarrow i} \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} PDR_{n \rightarrow 1} &= \prod_i^n PDR_{(i+1) \rightarrow i} \\ &= \frac{\sum_i^n ETX_{(i+1) \rightarrow i}}{\prod_i^n \left[1 - \left(1 - \left(\frac{1}{ETX_{(i+1) \rightarrow i}} \right)^{r+1} PDR_{(i+1) \rightarrow i} \right) \right]} \end{aligned} \quad (6)$$

由上式可以看出, $ETXT_{n \rightarrow 1}$ 表示了实际的平均传递次数,与 $ETX_{n \rightarrow 1}$ 存在很大的差异。而在传统 CTP 协议中, $ETXT_{n \rightarrow 1} = ETX_{n \rightarrow 1}$ 因此从理论上用此标准往往无法找到数据传递的最优路径。

ETXT 指标不仅衡量了数据节点 i 到 sink 节点所需要的总传递次数,同时也体现了平均能耗和平均时延的大小。

假设传输一次数据包的平均时间为 T_0 , 可得 $T_0 = t_s + t_p + t_t$, 其中, t_s 为数据包发送时间, t_p 为数据包处理时间, t_t 为数据包在空中的传递时间。

计算可得 i 节点到 sink 节点路径的平均时延 $T_{i \rightarrow s}$ 。

$$T_{i \rightarrow s} = ETXT_{i \rightarrow s} \times T_0 \quad (7)$$

同样可假设每次送一个数据包所需要的平均能耗为 E_0 (实际中质量较差的链接可能会选择更高的发射功率), 可得 i 节点到 sink 节点路径的平均能耗 $E_{i \rightarrow s}$ 为

$$E_{i \rightarrow s} = ETXT_{i \rightarrow s} \times E_0 \quad (8)$$

当路径跳数为 1 时, ETX 评价指标与实际到达率 PDR、总传递次数 ETXT 相符。随着跳数的增加, ETX 评价指标与实际到达率 PDR、总传递次数 ETXT 将产生偏差, 因此选用链路总 PDR 作为指标能更好地体现实际情况, 这不仅可以提高总的到达率, 还可以减少总的传递次数, 节省能耗。

以图 1 为例, 若取 $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 0.5$, $p_5 =$

0.3, $r=3$, 有:

$$ETXT_{EDBS} = 10/5 + 10/5 + 10/5 = 6$$

$$ETXT_{ECS} = 10/5 + 10/3 = 80/15$$

可得 $ETXT_{EDBS} > ETXT_{ECS}$ 。

$$\begin{aligned} PDR_{EDBS} &= [1 - (1 - 0.5)^4] \\ &\quad \times [1 - (1 - 0.5)^4] \\ &\quad \times [1 - (1 - 0.5)^4] = 0.8239 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PDR_{ECS} &= [1 - (1 - 0.5)^4] \times [1 - (1 - 0.3)^4] \\ &= 0.7124 \end{aligned}$$

可得 $PDR_{EDBS} > PDR_{ECS}$ 。

以节点 E 信息成功传递到根节点 S 为前提, 所需要的总传递次数为 $ETXT$, 有:

$$\begin{aligned} ETXT_{EDBS} &= ETXT_{EDBS} / PDR_{EDBS} = 6 / 0.8239 \\ &= 7.282 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ETXT_{ECS} &= ETXT_{ECS} / PDR_{ECS} = (80/15) / 0.7142 \\ &= 7.486 \end{aligned}$$

可得 $ETXT_{ECS} > ETXT_{EDBS}$, 这表明链路 $E \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow S$ 不仅到达率 PDR 优于链路 $E \rightarrow C \rightarrow S$, 而且总传递次数 $ETXT$ 也要优于 $E \rightarrow C \rightarrow S$ 。

另外可得 2 条路径的平均时延分别为

$$T_{EDBS} = ETXT_{EDBS} \times T_0 = 7.282T_0$$

$$T_{ECS} = ETXT_{ECS} \times T_0 = 7.486T_0$$

$T_{EDBS} < T_{ECS}$, 可见链路 $E \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow S$ 平均时延要小于链路 $E \rightarrow C \rightarrow S$ 。

能耗方面, 假设每次送一个数据包所需要的能耗为 E_0 , 同样可得:

$$E_{EDBS} = E_{EDBS} \times T_0 = 7.282E_0$$

$$E_{ECS} = E_{ECS} \times T_0 = 7.486E_0$$

$E_{EDBS} < E_{ECS}$, 可见链路 $E \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow S$ 平均能耗也要小于链路 $E \rightarrow C \rightarrow S$ 。

2.4 建树过程中时延 T_{delay} 的选择

在建立汇聚树的过程中, PDR 较小的节点有可能先接收到建树的广播信息, 若其先行继续向下广播, 很多节点会以此节点作为父节点。而当这些节点接收到 PDR 较大的节点发出的广播时, 这些节点会更改自身在树中的结构并再次广播, 这样就会产生广播泛滥。因此, 如何让 PDR 大的节点先行广播也是一个很重要的问题。

本文在建树过程中, 采取了一种动态延迟策略,

当一个节点 i 接收到建树的广播信息后, 根据上一跳的链路质量 (ETX), 设立一个动态延时值, $T_{\text{delay}} = K(ETX - 1)$, K 为加权因子。通过延时值的动态调整, 加大 PDR 好的节点先行广播的几率, 以减少建树时广播的泛滥, 节省能耗。

对于一条路径 $1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow n$, 假设 p_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间单次传递成功的概率, 假设重传上限为 r , 可以得到一个数据包经过 k 次重传, 从节点 1 成功传到节点 n 的概率为 $P_{1 \rightarrow n}$ (重传 = k)。

$P_{1 \rightarrow n}$ (重传 = k)

$$\begin{aligned} &= \sum_{j_1=0}^r (1 - p_{12})^{j_1} \times (\sum_{j_2=j_1}^{j_1+r} (1 - p_{23})^{j_2}) \\ &\quad \dots \times (\sum_{j_{n-1}=0}^{\sum_{i=1}^{n-2} j_i + r} (1 - p_{(n-1)n})^{j_{n-1}}) \dots \\ &\quad \prod_{i=1}^n P_{(i-1)i} \end{aligned} \quad (9)$$

数据包成功从节点 1 传到 n 的总传递次数为 $(n - 1 + k)$ 。可得节点 1 传到 n 的总传递次数为 m 的概率 $P_{1 \rightarrow n}$ (总 = m) 为

$$P_{1 \rightarrow n} (\text{总} = m) = P_{1 \rightarrow n} (\text{重传} = m - n + 1) \quad (10)$$

以图 1 为例, 节点 E 有很大概率先收到 C 发出的广播信息, 若直接向下继续广播, 会造成广播泛滥, 因此需要设置延迟, 使节点 E 接收到 D 发出的广播信息后, 再向下广播。

假设重传上限为 $r=3$, 每次传输处理时间都一致, 则数据包时延主要取决于重传递次数。

数据包从路径 $E \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow S$ 走时, 当总传播次数为 m , 传递成功, 概率记为 P_{EDBS} (总 = m), 有:

P_{EDBS} (总 = m) = P_{EDBS} (重传 = $m - 3$), 根据式(7)计算, 可得:

$$P_{EDBS} (\text{总} = 3) = p_1 p_3 p_4 = 0.729$$

$$\begin{aligned} P_{EDBS} (\text{总} = 4) &= [(1 - p_1) + (1 - p_3) \\ &\quad + (1 - p_4)] p_1 p_3 p_4 = 0.2187 \end{aligned}$$

$$P_{EDBS} (\text{总} = 5) = 0.04374$$

$$P_{EDBS} (\text{总} = 6) = 0.005103$$

$$P_{EDBS} (\text{总} = \text{loss}) = 0.002997001$$

数据包从路径 $E \rightarrow C \rightarrow S$ 走时, 有:

$$P_{ECS} (\text{总} = m) = P_{ECS} (\text{重传} = m - 2)$$

$$P_{ECS} (\text{总} = 2) = p_2 p_5 = 0.54$$

$$P_{ECS} (\text{总} = 3) = 0.27$$

$$\begin{aligned} P_{ECS}(\text{总} = 4) &= 0.1134 \\ P_{ECS}(\text{总} = 5) &= 0.0108 \\ P_{ECS}(\text{总} = 6) &= 0.000864 \\ P_{ECS}(\text{总} = \text{loss}) \\ &= 0.064936 \end{aligned}$$

则 E 在收到 C 建树信息之前进行向下广播的概率为 $P_f = P(ECS < EDBS)$:

$$\begin{aligned} P(ECS < EDBS) &= P_{ECS}(\text{总} = 2)P_{EDBS}(\text{总} > 2) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 3)P_{EDBS}(\text{总} > 3) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 4)P_{EDBS}(\text{总} > 4) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 5)P_{EDBS}(\text{总} > 5) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 6)P_{EDBS}(\text{总} > 6) \\ &= 0.6191 \end{aligned}$$

加入动态延迟后,广播泛滥概率 P_f 将减少。

当 $K=2.5$ 时,有:

$$\begin{aligned} P(ECS < EDBS, K = 2.5) \\ &= P_{ECS}(\text{总} = 2)P_{EDBS}(\text{总} > 3) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 3)P_{EDBS}(\text{总} > 4) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 4)P_{EDBS}(\text{总} > 5) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 5)P_{EDBS}(\text{总} > 6) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 6)P_{EDBS}(\text{总} > 7) \\ &= 0.13 \end{aligned}$$

但同时付出的代价是建树时延增加了 $1.11T_0$ 。

当 $K=5$ 时,有:

$$\begin{aligned} P(ECS < EDBS, K = 5) \\ &= P_{ECS}(\text{总} = 2)P_{EDBS}(\text{总} > 4) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 3)P_{EDBS}(\text{总} > 5) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 4)P_{EDBS}(\text{总} > 6) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 5)P_{EDBS}(\text{总} > 7) \\ &\quad + P_{ECS}(\text{总} = 6)P_{EDBS}(\text{总} > 8) \\ &= 0.0265 \end{aligned}$$

付出的代价是建树时延增加了 $2.22T_0$ 。以上结果见表 1。

表 1 动态时延算法结果

K	0	2.5	5
P_f	0.6191	0.13	0.0265
建树时延	0	$1.11 T_0$	$2.22 T_0$

由以上分析可以得出,动态延迟算法能够提高 PDR 大的节点先行进行广播的概率,减少建树期间的广播数量,节省能源。

对于能量受限和负荷过重的节点 i ,同样可以选择合适的 T_{delay} ,让剩余能量较高和空闲的节点承担更多的中继任务,以提高整个网络的生存时间。剩余能量较多的节点,选择较小的 T_{delay} ,可以提高被选中做中继节点的概率,承担更多的任务。能量剩余较少的节点,选择较大的 T_{delay} ,当有别的候选路径时,能避免被选中,同时在没有备用路径时,也可以承担起中继任务。

3 仿真分析

本节使用 OMNET 网络仿真软件对本协议进行了网络仿真验证。网络拓扑结构如图 2 所示,100 个节点均匀分布在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的平地上。使用 IEEE802.15.4 协议,传输速率为 $1 \sim 35\text{ kbps}$,传输频段为 $2\,440\text{ MHz}$ 。

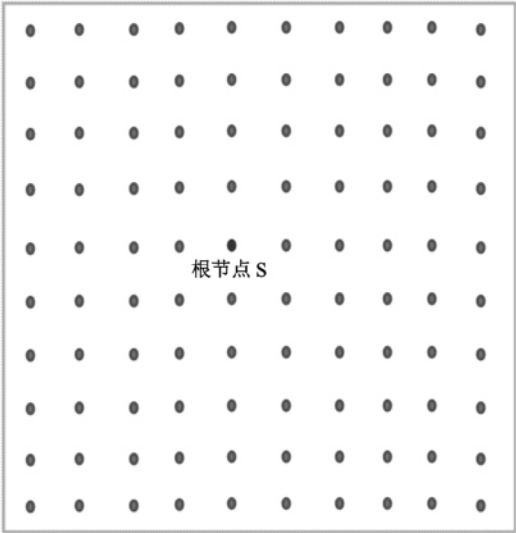


图 2 仿真网络场景

初始时刻,随机选取图中任一节点为根节点,分别用 CTP 和 PDR-CTP 路由协议进行建树。图 3 是 2 种路由协议在不同速率下的建树时间和广播开销。采用 PDR-CTP 建树时,延迟参数 $K = 3$ 。仿真结果显示,PDR-CTP 协议的广播开销要明显小于 CTP 协议,而且平均建树时间只增大了 20%。

表 2 建树开销

协议	CTP	PDR-CTP
平均建树时间(s)	43	55
平均广播次数	723	236

树建立后,选取相同的较远节点,分别对 2 种协议下的节点到根节点 S 的到达率、时延和吞吐率进行了统计平均。图 3、图 4、图 5 为仿真结果。可见,利用 PDR-CTP 协议建立起的采集树,其端到端平均到达率 PDR,平均时延和吞吐率要明显好于 CTP 协议,这充分说明根据 PDR-CTP 协议建立起的采集树成功避免了 ETX 小但整体质量不佳的链路。

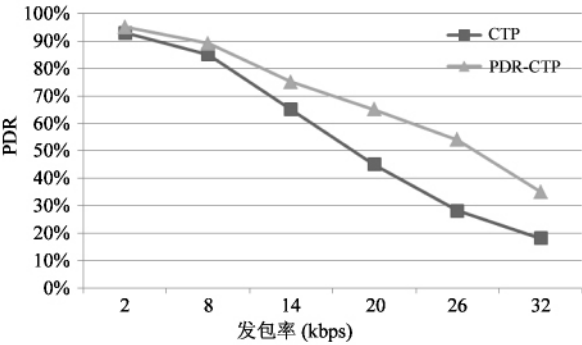


图 3 平均端到端到达率

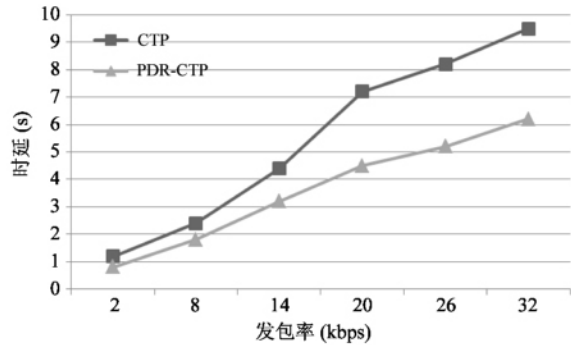


图 4 平均延时

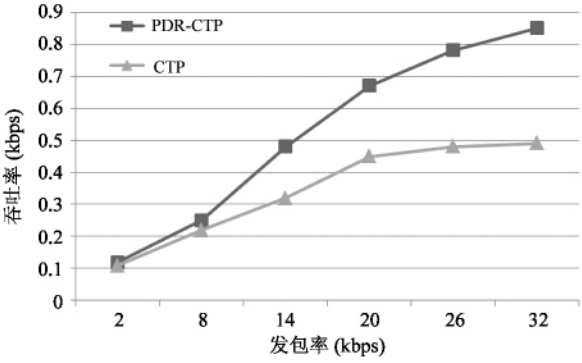


图 5 平均数据吞吐率

4 结 论

本文提出了一种基于路径到达率 PDR 和动态广播时延的汇聚树路由协议。同传统的基于 ETX 的汇聚树协议相比,本协议能更好地刻画多跳路径质量,有效提高端到端的数据到达率,还可以在一定程度上减少总的数据传递次数,减少平均时延。另外建树时的动态延迟策略可以减少建树时经常发生的广播泛滥,节省建树开销。

参考文献

[1] Gnawali O, Fonseca R, Jamieson K. Collection tree protocol[C] // Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York, USA, 2009: 1-14

[2] Guodong S, Xinna S, Yan Z. La-CTP: loop-aware routing for energy-harvesting wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2018, 18(2):434-442

[3] Masoud M, Belkasim S. WSN-EVP: a novel special purpose protocol for emergency vehicle preemption system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 67(4): 3695-3700

[4] Couto D, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multihop wireless routing[J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 419-434

[5] 钟达夫,薛晶晶,何锋,等. 基于距离分区的多级异构无线传感器网络成簇算法[J]. *高技术通讯*, 2017, 27(6):530-536

[6] Jiang P, Huang Q, Wang J, et al. Research on wireless sensor networks routing protocol for wetland water environment monitoring[C] // International Conference on Innovative Computing, Washington, USA, 2006: 251-254

[7] Fonseca R, Gnawali O, Jamieson K, et al. Four bit wireless link estimation[C] // Proceedings of the 6th Workshop on Hot Topics in Networks, New York, USA, 2007: 36-42

[8] Cerpa A, Wong J L, Potkonjak M, et al. Temporal properties of low power wireless links: modeling and implications on multi-hop routing[C] // Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile AdhocNetworking and Computing, New York, USA, 2005: 414-425

- [9] Woo A, Culler D. Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks, technical report UCB/CSD-03-1270 [R]. Berkeley: University of California, 2003
- [10] Nouha B, Anis K, Maissa B, et al. A comparative simulation study of link quality estimators in wireless sensor networks[C] // IEEE International Symposium on Modeling, London, UK, 2009: 1-10
- [11] Tao L, Kamthe A, Lun Jiang, et al. Performance evaluation of link quality estimation metrics for static multihop-wireless sensor networks[C] // IEEE Communications Society Conference on Sensor, Rome, Italy, 2009: 1-9
- [12] Jambli M, Azlina A, Farha A, et al. Performance evaluation of CTP routing protocol for mobile wireless sensor network[C] // International Conference on Information Technology in Asia, Kuching, Malaysia, 2013: 97-101
- [13] Buengbon C, Tanwongvarl C, Chantaraskul S. Multi-channel collection tree protocol for wireless sensornetworks[C] // International Conference on Electrical Engineering/electronics, Krabi, Thailand, 2013: 1-5
- [14] Li Y G, Chen H, RC He, et al. ICTP: an improved data collection protocol based on CTP[C] // Wireless Communications and Signal Processing, Huangshan, China, 2012: 653-657
- [15] Guo Z Q, Wang Q, Li M H, et al. Fuzzy logic based multidimensional link quality estimation for multi-hop wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2013, 13(10): 3605-3615
- [16] 朱璇, 李虹, 刘云飞, 等. 基于 CTP 协议的路由算法优化设计[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(16): 7-12
- [17] Jiliang W, Yunhao L, Yuan H, et al. QoF: towards comprehensive path quality measurement in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2014, 25(4): 1003-1013
- [18] 韩存武, 常舒瑞, 刁奇, 等. 多时滞无线通信网络的功率和速率最优跟踪[J]. *高技术通讯*, 2017, 27(4): 303-309
- [19] Tang Y, Bu C Q, Fan A H. A transmission time based routing protocol for clustered collection tree wireless sensor networks[C] // International Conference on Computational & Information Sciences, Washington, USA, 2010: 21-24
- [20] 杨楠, 陈远波, 王燕杰, 等. 基于度约束最短传输树的多路径传输协议[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(11): 126-130

A novel collection tree protocol depends on packet delivery ratio with adaptive broadcast delay

Zhao Cheng, Pan Luping

(Information Engineering College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

Collection tree protocol(CTP) is a commonly used data collection routing protocol in wireless sensor networks (WSNs). It is a tree routing protocol that depends on expected transmissions count(ETX). Measuring quality of a multi-hop route by simply summing ETX up is not able to characterize the actual performance of a route and to find the best route. This article proposes a novel CTP routing that depends on packet delivery ratio(PDR) which is able to characterize the multi-hop route much better. The best route selected by this rule can create a better collection tree, improve the end to end packet delivery ratio, reduce the average transmit number and average transmit time which can save energy to increase network life. Meanwhile this work proposes an adaptive delayed broadcasting solution which can effectively reduce broadcast times when creating the routing tree which save cost.

Key words: collection tree protocol (CTP), expected transmissions count (ETX), packet delivery ratio (PDR), wireless sensor network (WSN), adaptive delay