

基于簇的认知多媒体传感器网络实时路由协议

李灵俐^{1,2} 白光伟¹ 沈航^{1,3} 王天荆¹

(南京工业大学计算机科学与技术学院 南京 211816)¹

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)²

(南京邮电大学通信与网络技术国家工程研究中心 南京 210003)³

摘 要 认知无线电传感器网络中信道的可变性使得多媒体数据传输面临着巨大考验,在主要用户的干扰下如何让数据实时传输到汇聚节点是许多研究者正在研究的问题。文中提出一种基于簇的认知多媒体传感器网络实时路由协议,该协议通过对主要用户活动时间的预测获得信道的预期可用时间,并选择合适的信道进行数据传输;同时考虑可靠性指标,将数据丢失概率控制在合理的范围内,使得数据可以在规定的时间内可靠地传输到目的地;在选择下一跳节点时,除了考虑距离问题,还兼顾了信道的可用时间问题,尽可能地减少数据的传输时间。仿真结果表明,CBRTR 可以均衡节点能耗,延长网络的生命周期,实现数据的实时、可靠传输。

关键词 认知多媒体传感器网络,分簇,实时路由,可靠性

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.016

Cluster-based Real-time Routing Protocol for Cognitive Multimedia Sensor Networks

LI Ling-li^{1,2} BAI Guang-wei¹ SHEN Hang^{1,3} WANG Tian-jing¹

(College of Computer Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)¹

(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210093, China)²

(National Engineering Research Center for Communication and Network Technology,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)³

Abstract Variability of channel in cognitive radio sensor network makes transmission of multimedia data more difficult. How to make data transmit to sink in real time is the problem faced by many researchers. This paper proposed a Cluster-Based Real-Time Routing (CBRTR) for cognitive multimedia sensor networks. The expected available time of channels was estimated by forecasting PU's activity based on which the appropriate channel was chosen for data transmissions. Meanwhile, the reliability was considered to control data loss probability within reasonable extent, so that data can be transmitted reliably to sink in required time. When choosing the next hop, this paper not only considered the distance, but also added the expected available time of channels. Therefore, CBRTR reduces the amount of available time as much as possible. Simulation results show that the proposed CBRTR can balance nodes' energy, prolong network lifetime, and achieve real-time reliable transmission of data.

Keywords Cognitive multimedia sensor networks, Clustering, Real-time routing, Reliability

1 引言

认知无线传感器网络(Cognitive Radio Sensor Networks, CRSN)是由认知无线电技术和无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)融合产生的一种网络系统,利用认知无线电来改善无线传感器网络中的频谱资源短缺问题^[1-5]。

在 CRSN 中,主要用户(Primary Users, PU)可以随时接入授权频谱,次要用户(Secondary Users, SU)只能在频谱空闲时接入,从而使得多媒体数据的实时传输面临着巨大考验。在 PU 的干扰下如何让多媒体数据实时、有效地传输到汇聚节点在近年来引起了许多研究者的关注。随着 CRSN 研究的深入和应用的日益广泛,服务质量(QoS)成为了人们关注和

到稿日期:2017-09-11 返修日期:2017-12-04 本文受国家自然科学基金项目(61502230,61073197,61501224),江苏省自然科学基金项目(BK20150960),江苏省普通高校自然科学基金项目(15KJB520015),南京市科技计划项目(201608009),南京大学计算机软件新技术国家重点实验室资助项目(KFKT2017B21),南京邮电大学通信与网络技术国家工程研究中心资助项目,江苏省六大高峰人才基金资助项目(第八批)资助。

李灵俐(1992-),女,硕士生,主要研究方向为认知无线传感器网络实时路由协议,E-mail:1979952320@qq.com;白光伟(1961-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为无线传感器网络、移动互联网、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价、多媒体网络服务质量等,E-mail:bai@njtech.edu.cn(通信作者);沈航(1984-),男,博士,讲师,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线多媒体通信协议等;王天荆(1978-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为认知无线网络、压缩感知等。

研究的热点;同时,多媒体应用对 QoS 尤其敏感,对延迟和带宽提出了很高的要求。因此,在 CRSN 上实现多媒体数据的实时与可靠传输面临着许多问题^[6-9]。

路由协议用于发现和维护传输路径^[10-12]。由于 CRSN 的不确定性很大,通信延迟难以预测^[13],因此实现实时路由时要考虑许多问题。1)PU 在信道上传输数据时,SU 必须切换到空闲信道或者停止数据传输;2)PU 活动的不确定性使得 SU 频繁地在信道之间切换;3)现有的认知模块不允许频谱检测和数据传输同时进行,连续的频谱检测和数据传输会导致对 PU 的丢失检测^[9];4)实时性与可靠性的均衡,通过权衡传输的延时与传输的可靠性,以期获得更高的传输成功率。

本文提出一种基于簇的 CMSN 实时路由协议,其在进行路由选择时,寻找满足 QoS 实时性和可靠性要求的下一跳节点。该协议主要分为两个部分:分簇和路由。分簇时,CMSN 根据频谱检测和数据传输功能将 SU 分为两类节点,并通过簇头更新均衡网络的能量消耗。路由选择时,频谱检测节点对 PU 活动情况进行周期性检测,得到信道的预期可用时间。如果信道的预期可用时间大于两节点间的数据传输时间,那么这些信道就会被选作候选信道。然后,在可靠性的约束下从候选信道中选择出一条用时最短的信道,并选择该信道对应的节点作为转发节点。最后,利用反馈回压机制缓解拥塞区域的传输压力,减少数据的传输时间,延长网络的生命周期。

本文第 2 节介绍现有的一些实时路由算法并深入分析其存在的缺点;第 3 节介绍簇结构的生成与更新,给出网络的模型;第 4 节深入研究路由算法,给出理论分析和算法描述;第 5 节通过 Matlab 仿真对路由协议进行性能分析;最后总结全文。

2 相关工作

传感器节点如何根据端到端的传输时间来合理分配数据包的传输路径,从而实现数据包的实时可靠传输,一直是人们关注的焦点。近年来,在 WSN,WMSN 和 CRSN 中有许多方案被提出。

SPEED 协议^[14]的提出是为了给传感器网络中的实时数据包提供端到端的延迟保证,它使用地理转发机制来为每个数据包选路,扩展性较强。为了达到实时性要求,它保证了数据包的一个期望投递速率。但是,SPEED 协议没有考虑节点的能耗和数据传输的可靠性要求。MMSPEED 协议^[10]作为 SPEED 协议的扩展,通过多路径和多速率机制,在实时性和可靠性方面为无线传感器网络提供了区分服务和概率的 QoS 保证,并在数据传输的过程中使用动态补偿来修正路线,使得多媒体数据最终实时、可靠地传递到 sink 端。就满足可靠性和实时性的数据传输而言,MMSPEED 实现了这一目标,但是该协议仅限于 WSN,没有考虑 CR 技术,不适用于认知环境。

文献[8]提出了实时视频流动态传输整形机制,该机制通过调整数据传输速率来管理发送到网络中的数据量及速度,避免了网络拥塞。选择下一跳节点时,RTVP 协议将动态运行时间作为衡量指标;同时,RTVP 协议会根据视频内容对数

据包进行分类(I,P 或 B),并选择可靠路径用于转发优先级高的 I 数据包。该协议能够保证较高的投递率和可靠性,但是服务分化模式缺少端到端的实时性保证。

文献[15]针对 CRSN 提出了频谱感知分簇的能量有效多媒体路由协议 SCEEM,其同时克服了能量和频谱的限制,并通过最佳化簇的数量来最小化数据包丢失和延迟造成的多媒体质量的失真。文中假设次要用户的传输是不可剥夺的,即一旦次要用户开始传输多媒体数据,当前数据帧的传输就会在节点空出信道之前结束。该协议在没有损失多媒体质量的情况下实现了能量的有效性,保证了每个数据源的服务质量,但是数据传输过程将会对 PU 造成干扰甚至影响 PU 传输。

文献[16]针对 CRSN 中多媒体视频流的传输,提出了能量有效机制 EMCOS,其利用认知无线电技术和分簇机制来实现频谱的有效使用和节能。EMCOS 根据频谱可用性和频谱预测结果对网络节点进行分簇;基于对 PU 活动的预测情况选择路由和信道。该机制通过阻止频繁的信道切换来改善多媒体数据的通信质量,但是并没有为多媒体数据的传输提供 QoS 保证。

以上协议没有兼顾认知环境下多媒体数据包的 QoS 保证以及对 PU 造成的影响。鉴于此,本文提出一种基于簇的 CMSN 实时路由协议,综合考虑了 PU 的活跃情况和多媒体数据 QoS 要求对路由选择的影响。下面首先阐述网络节点的分簇,然后介绍路由算法。

3 簇结构的生成

网络中所有的节点均匀地分布在一个正方形网络中,所有 SU 具有相同的传输范围和初始能量。汇聚节点位于网络的中心,用于分散附近节点的传输压力,避免热区效应,减少汇聚节点附近节点的能量消耗。PU 和 SU 共享一组信道,PU 可以任意接入授权频谱,SU 用户只能在信道空闲时使用授权频谱。为了有效利用认知环的优势,使得频谱检测和数据传输可以同时进行,将 SU 节点分为两类,一类为频谱检测节点 SU_s ,其专门用于检测信道的使用情况,并将检测到的数据通过公共控制信道传送给簇头进行融合处理;另一类为数据传输节点 SU_d ,其专门负责进行多媒体数据的传输。这样划分既可以实现对授权频段的实时检测,又可以实现数据的连续性传输,在提高检测可靠性的同时,增大了网络的吞吐量。

3.1 簇建立

为了确保数据能够快速、有效地传输到汇聚节点,对 PU 行为的准确预测是必不可缺的。分簇时以 PU 为中心,PU 传输范围内的 SU_s 节点作为簇内节点分布在簇的内部,便于对 PU 行为进行预测。 SU_d 位于两个簇的公共区域时,会选择加入到距离 PU 更近的簇。当各节点加入到相应的簇中后,簇头选择过程即开始。节点 i 向周围发送消息,获知自己的邻居节点总数 e_i ,并计算节点与 PU 之间的欧几里得距离 d_i 以及节点剩余能量 E_i 与簇内节点总能量 E 的比值。根据以上参数,可以得到每个节点的权重 W_i , W_i 值最大的节点会被选择作为簇头节点。

$$W_i = \frac{e_i}{d_i} \cdot \frac{E_i}{E} \quad (1)$$

簇建立好之后,频谱检测节点 i 会对信道 p 是否空闲进行实时检测,然后通过公共控制信道将检测结果 $f_p^i(\tau)$ 传送给簇头进行融合处理,簇头使用逻辑 Majority 准则^[8]来对 PU 是否使用信道做出最终决议。如果簇中有一半以上的频谱检测节点检测到 PU 在使用信道 p ,就认为信道 p 被 PU 占用,此时不可将其分配给数据传输节点使用。簇头融合 SU_s 发送过来的数据,可以得到 τ 时刻检测到信道 p 被 PU 占用的 SU_s 数量,记为 $F_p(\tau)$ 。用 $v_p(\tau)$ 表示 τ 时刻信道 p 是否被占用,1 表示信道被占用,0 表示信道空闲。

$$v_p(\tau) = \begin{cases} 1, & F_p(\tau) \geq N/2 \\ 0, & F_p(\tau) < N/2 \end{cases} \quad (2)$$

$a_f(\tau)$ 表示在 τ 时刻所检测到的可用信道矩阵:

$$a_f(\tau) = [v_1(\tau), v_2(\tau), \dots, v_k(\tau)]^T \quad (3)$$

3.2 簇更新

在 CMSN 对节点进行分簇后,各个簇区域中形成了以簇头-簇成员节点交互的簇区域结构。在簇区域结构形成以后,只要簇头正常运转,簇区域中正常的频谱检测与数据传输过程就不会受到影响。相比于成员节点,簇头消耗的能量更多,当簇头的能量小于成员节点的平均能量时,簇头的更新过程便开始。因此,簇的更新主要是平衡簇区域中节点的能量,确保簇头及成员节点的正常运作。成员节点的平均能量为簇区域中各节点能量的加权平均,如式(4)所示:

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

若当前簇头的能量不足以支持其能量消耗的速度,与 \bar{E} 相差较大,将触发簇头更新,利用式(1)选择出下一个簇头节点,进入到新一轮的簇循环中。同时,在每进行一次频谱检测或数据传输之后,簇中的 SU_s 与 SU_d 的能量都会相应地减少。当节点的能量不够支持节点的行为时,节点会向簇头和邻居节点发送节点死亡的消息。得知节点死亡后,簇头与邻居节点不再向该节点发送消息,也不会选择它作为下一跳节点。

4 基于簇的实时路由

基于簇的实时路由通过对 PU 活跃时间进行预测,来获得信道的预期可用时间。如果信道的预期可用时间大于两节点间的数据传输时间,那么这些信道就会作为候选信道。为了保证数据实时、可靠地传输到 sink,数据帧丢失概率应控制在合理的范围内。在数据每经过一跳传输之后,节点会重新计算两节点间的数据帧丢失率,并更新数据传输时间。如果新的帧丢失率较大,超出阈值 Φ ,则可以判断上一跳链路出现了拥塞,此时会开始反压回馈机制,向上一跳节点发送消息以告知链路状况,避免节点选择该链路进行数据传输。

Given: $a, b \in \{N_a^1, N_a^2, \dots, N_a^n\}, p \in A_a^b(\tau)$

Find: b

Maximize: T_a^b

Subject to: $\tau_p - \tau_0 > t_a^b$

$$L_a^b < \Phi$$

4.1 预测信道空闲时间

假设 PU 是否占用信道是相互独立的,到达时间间隔服

从指数分布。因此,PU 的活动情况可以模型化为出生率为 β 、死亡率为 α 的两阶段的出生-死亡过程,如图 1 所示。PU 的 ON 状态表示信道当前正在被 PU 占用,OFF 状态则表示信道处于空闲状态,可以被 SU 接入使用。根据假设的 PU 活动模型,可以得到:

$$P_{ON} = \frac{\beta}{\beta + \alpha}, P_{OFF} = \frac{\alpha}{\beta + \alpha} \quad (5)$$

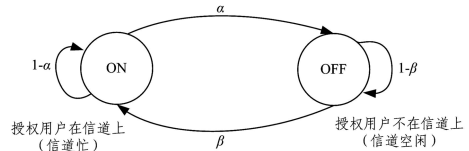


图 1 PU 活动的两阶段模式

Fig. 1 Two-state model of primary user activity

我们假设频谱检测机制能够正常运行,不会出现丢失检测和错误检测的情况。因此,PU 的活动检测概率在仿真上可以直接等同于 PU 的活动概率。

假设 SU 通过频谱检测得知当前时刻 τ_0 每个信道被 PU 占用的情况,定义参数 $\epsilon_p = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta}$,则可以得到未来时刻 τ_1 信道空闲的概率^[17-18]为:

$$A_f^p(\tau_0, \tau_1) = \begin{cases} P_{OFF} + (1 - P_{OFF}) e^{-\epsilon_p(\tau_1 - \tau_0)}, & p \text{ 在 } \tau_0 \text{ 时刻的状态为 OFF} \\ P_{OFF} - P_{OFF} e^{-\epsilon_p(\tau_1 - \tau_0)}, & p \text{ 在 } \tau_0 \text{ 时刻的状态为 ON} \end{cases} \quad (6)$$

4.2 实时性保证

在 CMSN 中进行多媒体数据实时传输面临的最大问题是 PU 的干扰所造成的信道可变性,使得数据传输过程被迫中断。如何正确预测出 PU 的活动时间,最大程度地减小其对数据传输的影响,是协议所须考虑的问题。协议对节点 a 与节点 b 间的可用信道进行预测,根据 PU 可能出现的时间点来得到信道的空闲时间,从而找到节点 a 与节点 b 间的数据传输信道 C_a^b 。

在数据节点转发数据之前,节点 a 计算当前节点 a 与下一跳节点 $b \in \{N_a^2, \dots, N_a^n\}$ 在 τ 时刻可用的公共信道矩阵。假设这两个节点可以使用的信道矩阵为 A_a 与 A_b ,那么可以得到它们的联合可用信道矩阵 $A_a^b(t) = \frac{A_a + A_b}{2} * a_f(\tau)$,值为 1 时表示当前信道可以为当前两个节点使用。假设数据传输速度为 v ,两个节点间的欧几里得距离为 d_a^b ,对 $\frac{d_a^b}{v}$ 进行取整,可以得到数据传输到下一跳节点 b 时所需要的时间 t_a^b 。

$$t_a^b = \lceil \frac{d_a^b}{v} \rceil \quad (7)$$

分别计算当前时刻 τ_0 到时刻 $t_a^b + \tau_0$ 时间段内每个时刻的信道预测概率 $A_f^p(\tau_i, \tau_{i+1})$,可以得到该时间段内第一个概率小于阈值的时刻 τ_p ,那么在该时间段内预测到的 p 信道的可用时间为 $\tau_p - \tau_0$ 。如果信道的预期可用时间 $\tau_p - \tau_0$ 大于节点 a 与节点 b 间的数据传输时间,则信道 p 成为下一跳节点 b 的候选信道,将其加入到节点 b 的候选信道集合 b_c 中;然后在可靠性限制下选择一个剩余传输时间最大的信道作为节

点 a 与节点 b 间的数据传输信道 C_a^b 。

假设信道切换的时间可以忽略,根据信道预测概率公式,数据传输到当前节点时,下一跳节点的路由选择有以下两种情况:

1) τ_0 时刻信道空闲,数据传输期间 PU 出现在信道上的概率很小;

2) τ_0 时刻信道被 PU 占用,需等待一段时间后才能开始数据传输,此时需要考虑 PU 干扰下信道与节点的选择。

对于情况 1),需要对两节点间的所有可用信道计算出信道预测时间,最后为每个下一跳节点选择出信道预测时间最长且满足数据传输要求的信道作为该节点的候选传输信道。

对于情况 2),当在数据传输过程中可能出现 PU 时,要单独考虑 PU 在哪段时间内出现的概率较大,如果 PU 在 τ_s 与 τ_w 之间的 $\Lambda_f^p(\tau_s, \tau_w)$ 值超出阈值,而在 τ_w 与 $\tau_w + t_a^b$ 之间的所有时间段内都不会出现,就可以认为 PU 只在 τ_s 与 τ_w 时间段内出现,数据传输需要等待 $\tau_w - \tau_0$ 时间才可以传输。相对于没有 PU 干扰的信道,被 PU 干扰的信道的空闲概率会越来越大,可用时间也会更多,数据传输时所用的时间更少,因此这些信道也可以作为数据传输信道。

4.3 可靠性保证

当数据实时传输到 sink 时,还应保证其完整性,避免出现数据实时到达目的地但大部分丢失的情况。我们假设源节点发送的数据都已经过视频编码,路由协议能够跨层合作,应用层可以获取数据帧的情况。数据有 3 种形式: I 帧、P 帧和 B 帧^[19]。在一个特定的视频序列中,所有帧形成一个图像集 GOP,多媒体数据传输时每个数据包内会有多个 GOP。假设每个数据传输节点都配备有数据包分类器,可以用来获知数据包中帧的数量、图像帧的编号和图像帧的类型。

已知节点 a 与节点 b 之间的丢失概率为 L_a^b ,数据包 D 传输所要求的时间为 \mathcal{T}_D ,则可以得到数据包从节点 a 传输到节点 b 后所剩余的数据传输时间为:

$$T_a^b = \mathcal{T}_D - \frac{S_a}{(1-L_a^b) \cdot v_f} - (\tau_w - \tau_0) \quad (8)$$

其中, S_a 和 S_b 分别为第 a 跳与第 b 跳的数据帧长度。选择 T_a^b 值最大的节点作为节点 a 的下一跳节点 \mathcal{A}_a 进行传输。在数据传输之后, L_a^b 的值更新为 $L_a^b = S_b/S_a$,代入新的 L_a^b 值后得到数据传输的剩余时间。

算法 1 CBRTR 下一跳节点的选择

Input: $\{N_a^1, N_a^2, \dots, N_a^n\}, \mathcal{A}_a^b(\tau), L_a^b$

Output: $\mathcal{A}_a, L_a^b, T_a^b$

1. for each $b \in \{N_a^1, N_a^2, \dots, N_a^n\}$
2. while $\mathcal{A}_a^b(\tau) = 1$
3. for $\tau_0 < \tau < \tau_0 + t_a^b$
4. if $\Lambda_f^p(\tau, \tau+1) < T$
5. $\tau_p \leftarrow \tau+1$
6. break
7. end if
8. end for
9. if $\tau_p - \tau_0 > t_a^b$
10. add p to b_c

11. end if

12. end while

13. if $\tau_p > \tau_i, i \in b_c$

14. $C_a^b \leftarrow p$

15. end if

16. $T_a^b \leftarrow \mathcal{T}_D - \frac{S_a}{(1-L_a^b) \cdot v_f} - (\tau_w - \tau_0)$

17. end for

18. for $j \in \{N_a^1, N_a^2, \dots, N_a^n\}$

19. if $T_a^b > T_a^j$

20. $\mathcal{A}_a \leftarrow b, C_a^b \leftarrow p$

21. end if

22. end for

4.4 反压回馈机制

当大量数据涌入到网络时,会导致局部网络的拥挤,避免选择拥塞区域中的节点可以有效减小拥塞带来的影响。每当数据传送到一个数据传输节点时,节点都会重新计算与上一节点间的丢失概率 L_a^b ,然后根据新的丢失概率得到实际的数据传输时间。当丢失概率 L_a^b 的值超过给定值时,节点会向上一跳节点发送链路拥塞消息,以避免其选择该链路进行数据传输。节点如果检测到 I 帧丢失,就会通知上一节点重新发送数据包。

如图 2 所示,节点 5 与节点 6 更新数据帧丢失率后发现所在区域出现了拥塞情况,此时通过反压回馈,节点 3 会知道这一情况。算法会减少向拥塞区域的节点发送数据包的次数,节点 3 会选择节点 4 作为下一跳节点。节点 5 与节点 6 的所有邻居节点都会做出节点 3 的反应,最终该区域的拥塞会得以缓解,并能够达到传输数据包的要求。

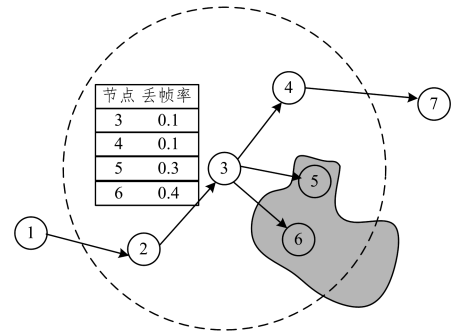


图 2 反压回馈机制

Fig. 2 Backpressure mechanism

5 仿真实验与结果分析

本节通过仿真的方法对基于簇的实时路由协议进行性能分析。下面介绍实验环境和参数设置,然后针对实验数据进行分析。

本文在 Matlab 平台上实现基于簇的实时路由协议,并设计一系列的仿真实验。网络中的所有节点分布在一个正方形区域中, sink 位于区域中心,传感器节点随机且均匀地分布在正方形区域内,所有节点具有相同的初始能量。各节点的位置固定不动,每个数据传输节点都配置有数据包分类器。基本参数设置如表 1 所列。

表 1 实验参数设置

Table 1 Setting of experimental parameters

参数名称	参数值
目标区域/m ²	100×100
频谱检测节点数量	160
数据传输节点数量	240
CR 节点感知距离/m	10
sink 节点坐标	(50,50)
CR 节点初始能量/J	200
数据传输速率/(frames/s)	25
节点感知过程能耗/mW	18
节点传输数据能耗/mW	20
信道数量	10
PU 数量	20
PU 覆盖范围/m	20

下面主要从可靠性、端到端延迟、投递率和节点死亡率几个方面来考查协议的性能。

5.1 可靠性

不同实时性要求下,数据包传输时间随着可靠性的变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出,当实时性要求固定时,随着可靠性要求的增加,数据包的传输时间呈上升趋势。因为当可靠性要求增加之后,数据包丢失概率减小,根据传输时间的计算公式,总的数据传输时间会相应增加。图 3 中的曲线也验证了在数据传输过程中实时性和可靠性成反比的关系。为了在两者之间达到均衡,可以将可靠性指标设置为 0.8,此时的数据传输能满足各自的传输时间限制。

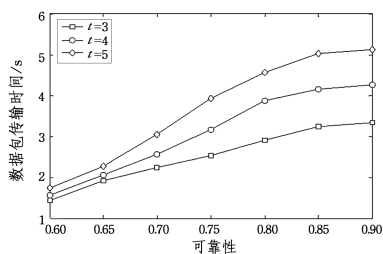


图 3 可靠性对数据传输时间的影响

Fig. 3 Effect of reliability on data transmission time

5.2 端到端延迟

图 4 给出了不同可靠性指标下 PU 活跃程度对端到端延迟的影响。PU 共有 ON 和 OFF 两种状态,它们的概率如式(5)所示。将 P_{ON} 与 $P_{ON} + P_{OFF}$ 之间的比值定义为 PU 活跃程度,其反映了信道被 PU 占用的情况。CBRTR 在进行路由选择时,会对 PU 在信道上出现的时刻进行预测,进而得到信道的空闲时间,然后选择空闲时间大于数据包传输时间的信道和相应的节点进行传输。当 PU 活跃程度逐渐增加时,满足时间要求且不需要节点等待就直接传输数据的信道数逐渐变少,有时甚至在该时刻找不到合适的节点与信道,这种情况下需要等到满足条件的节点出现才可以传送数据包。

在考虑 PU 活跃性的同时,多媒体数据传输还要权衡可靠性与实时性之间的关系。由图 3 可知,数据包的可靠性要求越低,数据包的实时性就越高,因此端到端的延迟就会越短,图 4 中的曲线也验证了这一结论。SCEEM 假设数据在

传输过程中是不能被打断的,直到数据传输结束才会释放出信道。因此,PU 的活跃程度对 SCEEM 算法没有太大的影响。如图 4 所示,即使降低了可靠性要求,也要避免对 PU 造成干扰,因此 CBRTR 的数据传输时间仍然大于 SCEEM 算法的数据传输时间。

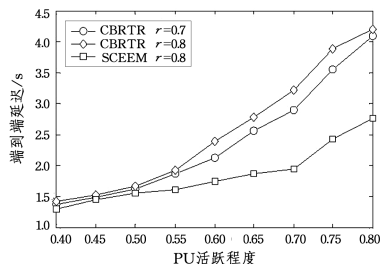
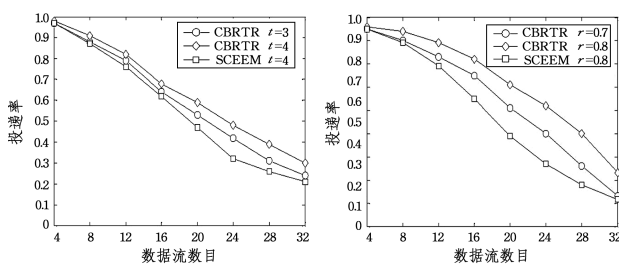


图 4 PU 活跃程度对端到端延迟的影响

Fig. 4 Effect of PU activity on end-to-end delay

5.3 投递率

数据包投递率随数据流数目的变化情况如图 5 所示。图 5(a)和图 5(b)分别反映了固定可靠性指标和实时性指标时数据包投递率随数据流数目的变化情况。可以看到,随着网络中数据流数目的增加,网络负载加重,数据包投递率呈现下降趋势。如图 5(a)和图 5(b)所示,在 CBRTR 协议中,当可靠性指标固定为 0.8 时,随着实时性要求变高,为了使数据及时传递到 sink,数据在传输过程中的丢失会被容忍,从而导致投递率下降;当数据传输时间固定时,可靠性越低,数据包的丢失情况就越严重,导致最后传输到汇聚节点的数据越少,从而使得数据包的投递率越低。CBRTR 在数据传输的过程中综合考虑了传输时间与数据包丢失的情况,同时采用反馈回压机制避免数据传输到拥塞区域,从而在一定程度上保证了投递率。SCEEM 虽然在决定簇的最佳数量时考虑了数据帧传输时的失真情况,但是由于数据传输忽略了对 PU 的影响,造成了干扰条件下的数据包丢失,不能保证可靠性。因此, CBRTR 比 SCEEM 有着更高的投递率。



(a) 不同实时性要求下的数据包投递率($r=0.8$)

(b) 不同可靠性要求下的数据包投递率($t=4s$)

图 5 数据流数目对数据包投递率的影响

Fig. 5 Effect of number of flows on packet delivery ratio

5.4 节点死亡率

图 6 给出了不同实时性指标下网络节点死亡数占节点总数目的比值随着网络运行时间的变化情况。可以看出,在相同的时间要求下,相比 SCEEM, CBRTR 节点的死亡速度缓慢。这是因为 CBRTR 分簇时将节点分为两类,分别负责频

谱检测和数据传输,使得网络中所有节点均匀地消耗能量,延长了网络的生存周期,减少了节点的死亡。同时,CBRTR进行簇头选择时,考虑了簇头相比于其他节点能量消耗大的因素,把能量作为衡量指标,每隔一段时间会重新选择簇头。同样,在CRSN环境中,SCEEM在分簇时也考虑了节点的能量消耗问题,通过周期性地更换簇头来均衡网络节点的能量消耗。因为节点的频谱检测和数据传输没有分开,SCEEM比CBRTR的能量消耗更快,死亡节点的数量更多。当CBRTR的实时性要求更高时,数据传输节点需要消耗更多的能量来转发数据包。如图6所示, $t=3$ 时的CBRTR比 $t=4$ 时的SCEEM拥有更高的节点死亡率。

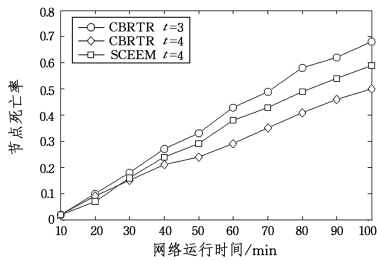


图6 节点死亡率随网络运行时间的变化

Fig. 6 Effect of network running time on node death rate

结束语 本文提出了一种基于簇的实时可靠路由协议CBRTR,以寻找满足实时性和可靠性QoS要求的下一跳节点。在分簇阶段,传感器节点分为两类,分别负责频谱检测和数据传输。路由选择时利用对主要用户在数据传输时间范围内的出现时间进行预测来选择候选信道,并根据当前信道的使用时间、可用情况及可靠性来选择用时最短的下一跳节点,以局部最优实现整体最优。本文通过一系列仿真实验,对其性能进行全面分析和评价。仿真结果表明,CBRTR可以均衡节点能耗,延长网络生命周期,实现数据的实时、可靠性传输。

参考文献

- [1] AKAN O B, KARLI O B, ERGUL O. Cognitive radio sensor networks[J]. Network IEEE, 2009, 23(4): 34-40.
- [2] OZGER M, AKAN O B. Event-driven spectrum-aware clustering in cognitive radio sensor networks[C]//IEEE INFOCOM. IEEE, 2013: 1483-1491.
- [3] BICEN A O, GUNGOR V C, AKAN O B. Delay-sensitive and multimedia communication in cognitive radio sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2012, 10(5): 816-830.
- [4] REN J, ZHANG Y, ZHANG N, et al. Dynamic Channel Access to Improve Energy Efficiency in Cognitive Radio Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3143-3156.
- [5] SHEN H, BAI G. Routing in wireless multimedia sensor networks: A survey and challenges ahead[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2016, 71(3): 30-49.
- [6] LIANG Z, FENG S, ZHAO D, et al. Delay Performance Analysis for Supporting Real-Time Traffic in a Cognitive Radio Sensor Network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(1): 325-335.
- [7] YAO L, WEN W, GAO F. A real-time and energy aware QoS routing protocol for Multimedia Wireless Sensor Networks[C]//World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008 (Wcica 2008). IEEE, 2008: 3321-3326.
- [8] AHMED A A. A real-time routing protocol with adaptive traffic shaping for multimedia streaming over next-generation of Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. Pervasive & Mobile Computing, 2017, 40: 494-511.
- [9] JAVAID S, FAHIM H, HAMID Z, et al. Traffic-aware congestion control (TACC) for wireless multimedia sensor networks [J]. Multimedia Tools & Applications, 2018, 77(4): 4433-4452.
- [10] FELEMBAN E, LEE C G, EKICI E. MMSPEED: multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and Timeliness in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 738-754.
- [11] LI W, ZHU C, ZHU C, et al. Scheduling and routing methods for cognitive radio sensor networks in regular topology [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2016, 16(1): 47-58.
- [12] LIU Y, CAI L X, SHEN X S. Spectrum-Aware Opportunistic Routing in Multi-Hop Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(10): 1958-1968.
- [13] STANKOVIC J A, ABDELZAHER T F, LU C, et al. Real-time communication and coordination in embedded sensor networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(7): 1002-1022.
- [14] HE T, STANKOVIC J A, LU C, et al. SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks[C]//International Conference on Distributed Computing Systems. IEEE Computer Society, 2003: 46.
- [15] SHAH G A, ALAGOZ F, FADEL E A, et al. A Spectrum-Aware Clustering for Efficient Multimedia Routing in Cognitive Radio Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3369-3380.
- [16] BRADAI A, SINGH K, RACHEDI A, et al. EMCOS: Energy-efficient Mechanism for Multimedia Streaming over Cognitive Radio Sensor Networks[J]. Pervasive & Mobile Computing, 2015, 22: 16-32.
- [17] KIM H, KANG G S. Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks [M]. IEEE Educational Activities Department, 2008.
- [18] KIM H, KANG G S. Adaptive MAC-layer sensing of spectrum availability in cognitive radio networks; Tech. Rep. CSE-TR-518-06[R]. University of Michigan, 2006.
- [19] SEELING P, REISSLEIN M, KULAPALA B. Network performance evaluation using frame size and quality traces of single-layer and two-layer video; A tutorial [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2004, 6(3): 58-78.