

基于信道评估的 IEEE 802.15.4e TSCH 快速接入方案

许 勇 张晓荣 祝玉军

(安徽师范大学计算机与信息学院 安徽 芜湖 241000)

摘 要 时隙信道跳频(TimeSlotted Channel Hopping, TSCH)是 IEEE 802.15.4e 标准中定义的接入行为技术之一。在 TSCH 模式下,想要加入网络的新节点需要侦听到包含网络信息的 EBs,但是 IEEE 802.15.4e 标准没有给出与 EBs 相关的广播策略,而 EBs 的广播策略是新节点快速加入网络的关键性技术之一,目前学术界虽然提出了许多解决方案,但却十分依赖于网络密度,且没有考虑实际中的干扰。为此,文中主要研究了 TSCH 在存在严重干扰的环境下的网络的形成过程,提出了基于信道评估(HSJCE)的快速接入方案,通过设计一个新的时隙帧结构对信道质量进行评估排序,同时采用新的加入节点和同步器机制增加发送的 EBs 数量和选择质量最优的信道来发送和侦听 EBs。实验数据及其分析充分表明,新的加入和同步机制大大增加了加入节点成功侦听到 EBs 的概率且不依赖网络密度,即使在严重拥堵的情况下,HSJCE 也能提供较短的加入时间。

关键词 IEEE 802.15.4e,物联网,网络形成,时隙信道跳频,同步

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

High Speed Joining Scheme Based on Channel Evaluation for IEEE 802.15.4e TSCH

XU Yong ZHANG Xiao-rong ZHU Yu-jun

(School of Computer and Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract Time Slotted Channel Hopping (TSCH) is one of the access behavior techniques defined in the IEEE 802.15.4e standard. In TSCH mode, new nodes that want to join the network must listen to EBs containing network information, but the IEEE 802.15.4e standard does not give a broadcast policy related to EBs, and the broadcast policy of EBs is a key technology for new node quickly joining the network. For the decisive technology, although the current academic community has proposed many solutions, it relies heavily on network density, and does not consider the actual interference. To this end, the paper mainly studied the network formation process of TSCH in severe interference environment, and proposed a fast access scheme based on channel estimation (HSJCE). By designing a new slot frame structure and evaluating the channel quality, The new join node and synchronizer mechanisms were used to increase the number of EBs sent and select the best quality channel to send and listen to EBs. Experimental data and analysis have fully shown that the new join and synchronization mechanism greatly increases the probability for joining nodes successfully detecting EBs and does not depend on network density. Even in the case of severe congestion, HSJCE can provide shorter join time.

Keywords IEEE 802.15.4e, Internet of things, Network formation, Time-slotted channel hopping, Synchronization

1 引言

各种无线标准如 ISA 100.11a^[1]、WirelessHART^[2] 高效可靠地运行在工业应用中。2012 年 IEEE 发布了新的 IEEE 802.15.4e 修正案标准^[3], 扩展了 IEEE 802.15.4^[4] 介质访问控制(MAC)的特性, 解决了嵌入式工业应用程序的新兴需求。除此之外, 它还定义了时隙信道跳频(Time Slotted Channel Hopping, TSCH)模式, 以保证无线通信的高可靠性。

在 TSCH 网络形成过程中, 同步器节点通过增强信标(EBs)来传输网络的当前状态, 想要加入网络的新节点在接收到 EBs 后即可执行后续操作加入网络。然而, IEEE 802.

15.4e 标准既没有给出与 EBs 相关的广播策略, 也没有表明哪个信道应该以何种速率发送 EBs。但在能源消耗方面, 一个想要加入现有网络的新节点必须时刻打开信道进行侦听, 直到接收到一个可以连接拓扑的 EBs 消息。因此, 持续侦听的时间越长, 消耗的能量就越多, 这对于小容量电池上运行的设备来说十分不利。为了解决这个问题, 文献[5]提出了一种简单的随机广播算法, 该算法规定网络中的所有节点都在同一时间点发送 EBs, 并且为减少发送 EBs 消息时发生的冲突, 根据相邻节点数量调整了发送 EBs 消息的概率。但是该方案中新节点的平均连接时间受网络密度、包错误率和信道数的影响较大。文献[6]提出了随机垂直填充(RV)算法和随机

本文受安徽省教育厅自然科学重点项目(KJ2017A325)资助。

许 勇(1966—), 博士, 教授, 主要研究方向为高性能计算机网络协议、网络安全, E-mail: yxull@ahnu.edu.cn; 张晓荣(1994—), 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络; 祝玉军(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为无线传感网络, E-mail: zhuyujun@mail.ahnu.edu.cn(通信作者)。

水平填充(RH)算法。在RV算法中,所有的节点都随机地选择一个可用的通道,并在相同的时间点发送一个EBs消息;而在RH算法中,RH算法随机地为每个节点选择一个可用的时间序列,并在同一个信道上发送EBs,然而该算法的性能非常依赖于网络密度。文献[7]把IEEE 802.15.4e的时隙帧结构分成了两个部分:广播部分和通信部分。在一个由5个时间段组成的广播段中,该作者提出了一种算法,将EBs消息发送到多个通道,同时根据邻近的已经被同步的节点数量来调整EBs的数量,但是算法的性能非常依赖网络密度。

目前为止,大多数的文献都没有把通信干扰作为评估的指标。然而,在实际使用的情况下,几乎所有环境中都存在干扰,而且IEEE 802.154e标准使用的2.4 GHzISM频段,在其他协议如ZigBee和Wi-Fi等中都普遍使用。此外,工业环境中还普遍存在着由铁结构引起的通信干扰,进一步降低了通信的可靠性。工业自动化已经催发了一系列的移动场景,例如在无线设备或设备移动时改变接入点或连接其他网络。但现有的接入方案不足以覆盖这些场景,因为平均连接时间太长,不能用于实时系统或敏感控制设备。此外,在拥挤和频繁的移动中,保证快速连接时间有时也十分关键。

本文针对上述问题提出了一种基于信道质量评估技术的快速连接方案(HSJCE),在高干扰和频繁通信连接变化的情况下,可以更快地获得平均连接时间。

本文第2节介绍了关于IEEE802.15.4e标准和信道质量估计的背景;第3节介绍了TSCH网络中网络形成的接入方法;第4节为仿真实验和实验结果;最后总结全文。

2 相关技术

IEEE 802.15.4e标准是IEEE 802.15.4标准的扩展版。时隙信道跳频(TSCH)具有可以降低工业环境中无线网络的高能耗的特点,并具有高可靠性。

2.1 时隙信道跳频

TSCH是IEEE 802.15.4e标准中引入的新的MAC技术,该技术包含了时隙访问、多通道和跳频技术。时隙访问是一种通过以时隙为单位来消除竞争节点之间的冲突从而提高吞吐量的技术,TSCH使用多信道增加网络容量,使得更多的节点可以同时交换数据包,信道跳频通过使用同步网络中的所有节点共享的跳频公式来使用多个信道,这种技术可以减弱信道干扰和多径衰落的影响[8]。

TSCH网络中的所有节点都会与具有 N 个时隙的时隙帧同步,图1描绘了具有4个时隙($N=4$)的时隙帧。TSCH将时隙分为4种类型:广播时隙(ADV时隙)、发送时隙(TX时隙)、接收时隙(RX时隙)和睡眠时隙。IEEE 802.15.4e标准定义了TSCH调度的最基本元素是逻辑链路,该逻辑链路映射到时隙并由slot-Offset表示。式(1)中逻辑信道 ch_{of} 被定义为序列对 (t_s, ch_{of}) ,通过式(1)可将逻辑信道改变为物理信道。

$$f = F\{(ASN + ch_{of}) \bmod n_{ch}\} \quad (1)$$

其中,绝对时隙值(ASN)表示自TSCH网络开始以来的时隙总数,并随每个时隙而增加,该值由网络中的所有设备共享。 $ASN = (k \times s + t_s)$, t_s 表示时隙, k 为时隙帧周期, S 为时隙帧大小。 $F\{\}$ 函数是一个包含可用频道的查找表,而 n_{ch} 表示可用的物理频率。其中, $0 \leq t_s \leq s-1$, $0 \leq ch_{of} \leq n_{ch} - 1$ [9]。使用2.4 GHz频带的IEEE 802.15.4e网络中

可以使用16个信道(11~26)[10]。

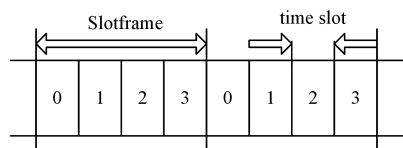


图1 TSCH时隙帧结构

2.2 TSCH中的同步和网络构成

当TSCH网络初始化配置时,汇聚节点首先将包含当前网络状态的EBs广播出去,EBs中包含ASN、信道跳频、时隙和时隙帧信息[11]。新节点必须通过选择一个可用信道来监听EBs数据包以求加入网络。属于网络拓扑的发送节点(同步器)根据EBs调度方案将EBs发送到所选择的信道。如果发送节点所选择的通道与加入节点正在侦听的通道相匹配,则加入节点可以接收到EBs。然后加入节点发送加入请求消息给发送EBs的同步器节点最后加入网络。加入网络的节点根据网络的调度和路由策略执行通信活动。同步之后,加入节点成为同步器节点,并不断地广播包含自己信息的EBs来继续扩大整个网络。

2.3 信道质量评估

无线传感器网络中评估信道质量的方法有很多,文献[12]使用RSSI值来评估信道质量,如式(2)所示,通过简单的指数平滑(SES)技术即可获得测量的信道质量,以此来算出每个信道的质量估计。

$$Q[c]_k = \begin{cases} NF[c]_0, & k=0 \\ \alpha Q[c]_{k-1} + (1-\alpha)NF[c]_k, & k \in [1, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

$$c \in [11, 26], \alpha \in [0, 1]$$

其中, $Q[c]_k$ 表示在信道质量 $k^{\#}$ 实例之后获得的信道 c 的质量估计。初始估计 $Q[c]_0$ 被指定为 $NF[c]_0$,这是第一个信道质量读数。根据式(2), k 的下一个估计是使用先前的记录 $Q[c]_{k-1}$ 和最近的信道质量 $NF[c]_k$ 计算的,且受系数 α 的影响。

3 HSJCE快速接入方案

IEEE 802.15.4e TSCH使用了信道跳频技术。但是,在干扰较高的环境中,并不是跳频列表中的所有信道都可用于通信。因此,若在考虑信道质量的情况下使用全部的16个信道是非常低效的。为了解决这个问题,我们提出了一种基于信道质量的信道选择方法,使加入节点可以在严重的干扰情况下监听同步器节点发送的EBs包。首先,为了设计一个有效的连接方案,我们将时隙帧分成3部分:由黄色部分组成的广播平台、由浅蓝色部分组成的通信平台以及由蓝色部分组成的信道评估平台。

3.1 多时隙帧结构

通常,IEEE 802.15.4e TSCH并没有为时隙帧定义任何特定的结构,本文提出了基于信道质量的EBs调度多时隙帧结构,如图2所示。定义的多时隙帧结构包含3个时隙帧,广播平台包含5个ADV时隙,执行有关EBs的调度任务,执行周期为一个多时隙时间。通信平台执行数据交换的任务,执行周期为一个时隙帧。除此之外,还有一种称为质量评估的新时隙类型,它可以在一个时隙内测量8个信道。因此,全部16个信道的质量信息可以用两个质量评估时隙来测量。

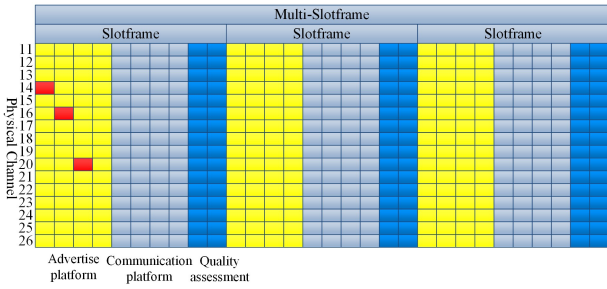


图2 多时隙帧结构(电子版为彩色)

3.2 加入节点和同步器节点机制

一般来说,在所有信道可以通信且没有干扰的情况下,加入节点通过选择16个可用信道之一来监听EBs包,而无需任何特殊调节。但是,如果由于信道拥塞导致16个信道的质量不同,根据信道选择的不同,加入时间将会相应的不同,因此我们需要一种方法来选择最合适的信道。基于信道质量的快速加入方案是一种通过基于节点周围的信道状态来选择最佳质量信道的方法。在加入过程中,加入节点重复收听最佳质量信道直到接收到有效的EBs。算法1给出了在加入节点上运行的算法,初始时,先对16个信道的质量进行评估,得出16个信道质量后再进行排序,侦听时选择信道质量最高的信道进行侦听。算法2给出了在同步器节点上运行的算法,与算法1类似,同步器节点选择信道质量最高的信道来发送EBs。

算法1 HSJCE加入节点算法

1. While(join=0)
2. for each $N_{ch} \leftarrow \{11, \dots, 26\}$ do
3. $Q[N_{ch}] \leftarrow \text{Quality estimation}(N_{ch})$
4. End
5. $ch_{best} \leftarrow \text{best quality channel in } Q[N_{ch}]$
6. Listen EBs in ch_{best}
7. End While

算法2 HSJCE同步器节点算法

1. n:发送EBs信道的数量
2. While(1)
3. for each $N_{ch} \leftarrow \{11, \dots, 26\}$ do
4. $Q[N_{ch}] \leftarrow \text{Quality estimation}(N_{ch})$
5. End
6. $Q_{sort}[N_{ch}] \leftarrow \text{decreasing Sort channel } Q[N_{ch}]$
7. for each $E_{list} \leftarrow \text{update top n of } Q_{sort}[N_{ch}]$ do
8. Advertise EBs message in E_{list}
9. End
10. End While

3.3 基于信道质量的快速连接算法

当上述两种算法同时工作时,可以在高拥塞的环境上进行通信。HSJCE加入节点选择最佳质量的信道,HSJCE同步器节点可以在本地选择高质量信道,并确定向哪个频道发送EBs以及何时发送它们。考虑到将新节点加入网络的过程,由加入节点选择的最佳质量信道和由同步器节点选择的高质量信道很可能重叠,由于EBs消息频繁且重复地在高质量信道上传输,因此加入节点能够侦听到的EBs的概率也增大。因此,加入节点将具有较短的平均加入时间。

基于上述理论,新提出的基于信道质量的快速加入算法的步骤如下:每个同步器节点在广播平台选择信道质量最高的3个信道来发送EBs(例如图2中红色部分的14,16,20信

道),以一个多时隙帧为周期执行此过程,加入节点则选择信道质量最高的信道来侦听EBs,这样就增加了加入节点成功侦听到EBs的概率,减少了加入节点持续侦听的时间,节约了能源,扩大了网络寿命。

3.4 理论分析

本小节从理论上分析所提出的方案。我们假设加入节点 J 在时间 t_0 开始在信道 f_j 上侦听EBs以加入具有 N 个同步器节点的网络,且 N 个节点构成集合 $S = \{S_i\}, i=1, \dots, N$ 。

节点 J 在周期 T 内加入网络的必要条件是 $\exists S_i (\forall S_i \in S), S_i$ 在时间 $t_i (t_i - t_0 \leq T)$ 使用相同的 f_j 信道发送了至少1个EBs包,并且在 t_i 时刻 $\forall S_k$ 使用的频道 $f_k, f_k \neq f_j$ 。此外,我们还考虑了另外两个条件:1)保证至少有一个同步器使用与 J 相同的通道在 J 的收听周期内发送EBs;2)确保 S_i 的EBs广播不因碰撞而失败。

在有 N 个同步器节点的网络中,第一个条件发生的概率为:

$$P_1 = N \times \frac{1}{C} \quad (3)$$

我们知道在 t_1 时刻 $\forall S_k$ 使用的频道有 $f_k \neq f_j$ 的概率为 $1 - \frac{1}{C}$,推广到剩余 $N-1$ 个节点就可以算出条件2发生的概率:

$$P_2 = (1 - \frac{1}{C})^{N-1} \quad (4)$$

通过式(3)、式(4)可推算出必要条件发生的概率为:

$$P = N \times \frac{1}{C} \times (1 - \frac{1}{C})^{N-1} \quad (5)$$

节点 J 可选的信道 f_j 有 C 个,每个信道能使必要条件发生的概率为 P ,因此我们可算出使必要条件发生情况下可选信道数 ∂ 的期望值:

$$\partial = C \times P = N \times (1 - \frac{1}{C})^{N-1} \quad (6)$$

现在我们在理想的网络环境下考虑加入节点 J 成功加入网络所需的多时隙帧 M_s 的数量,因为信道数量为 C ,所以 M_s 可以认为是一个均匀的离散随机变量,其范围为 $[1-C]$,在每一个多时隙帧内节点会使用不同的信道发送 N_{EBs} 个EBs包,因此 M_s 的期望值为:

$$M_s = \frac{C+1}{2 \times \partial} = \frac{C+1}{2 \times N \times N_{EBs}} (1 - \frac{1}{C})^{1-N} \quad (7)$$

然而,现实的网络环境常常存在通道上的传输错误,也就是说分组传送比率PDR通常小于1。因此考虑到PDR, M_s 的期望值应为:

$$M_s = \frac{C+1}{2 \times N \times N_{EBs} \times PDR} (1 - \frac{1}{C})^{1-N} \quad (8)$$

若一个多时隙帧的持续时间为 T_M ,则一个节点接入网络所需时间 T_{Join} 的期望值为:

$$T_{Join} = M_s \times T_M = \frac{(C+1) \times T_M}{2 \times N \times N_{EBs} \times PDR} (1 - \frac{1}{C})^{1-N} \quad (9)$$

通过式(9)我们可以观察到加入时间不仅仅与网络中的同步器节点有关,也与每个同步器节点发送的EBs数量有关。

而在RV算法中,一个节点接入网络所需时间 T_{Join} 的期望值为:

$$T_{Join} = M_s \times T_M = \frac{(C+1) \times T_M}{2 \times N \times PDR} (1 - \frac{1}{C})^{1-N} \quad (10)$$

通过式(9)和式(10)的对比可知,对时隙帧进行重新设计,并且增加每个同步器节点发送的 EBs 数量,所提出的方案即使在同步器数量较少的情况下也可实现短时间的加入。因此,所提出的方案有助于减少网络形成的重大延迟和开销,尤其是在网络初期和部署节点较少的情况下。

4 仿真实验与分析

本文所有实验的仿真平台均为 OpenWSN^[13],图3为实验的拓扑图,实验包含了 sink 节点、加入节点和 5 个同步器节点。此外,实验还准备了定期将数据包发送到随机选择的频道的干扰节点(Traffic nodes),以便创建一个严重干扰的环境。一个多时隙帧结构包含 10 个时隙帧,每个时隙帧包含 101 个时隙,每个时隙的持续时间为 15 ms,101 个时隙中有 3 个是用来执行 EBs 调度的广播平台,最后 2 个时隙是用来评估信道质量的,剩下的则是通信平台部分。干扰程度根据 Traffic 节点数量划分成 3 个等级:3~9 个节点记为低干扰水平、12~18 个节点记为中等干扰水平、大于 18 个节点记为高干扰水平。本文在干扰的无线拥堵环境下进行了 3 组实验,第一组实验只评估了本文所提出的 HSJCE 加入节点算法的性能,为了排除 HSJCE 同步器节点的算法影响,实验在加入节点上执行的是 HSJCE 加入节点算法,在同步器节点上执行的是其他快速接入算法。第二组实验评测了 HSJCE 同步器算法的性能,加入节点上执行的是 HSJCE 算法,此时同步器节点上执行的调度算法分别为 RV 算法、Rapid 算法和 HSJCE 算法,并且在各种干扰程度下做了重复实验。最后一组实验将 HSJCE 调度算法和其他算法进行了全面对比。

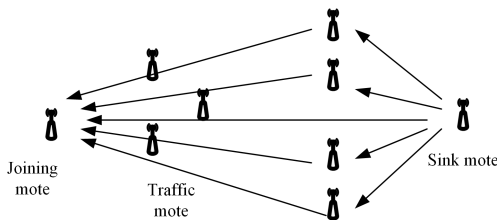


图3 实验拓扑

图4给出了第一组实验的结果,虚线为采用了 HSJCE 加入节点算法的结果,实线为未采用 HSJCE 的结果,并且红色线代表 RV 算法的结果,蓝色线代表 Rapid 算法的结果。

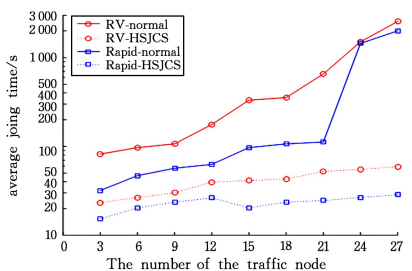


图4 加入节点使用不同算法的平均加入时间比较(电子版为彩色)

首先,我们观察到当 HSJCE 加入节点算法未应用于 RV 时,随着通信拥塞的增加,平均加入时间会迅速增长。当拥挤严重时,加入时间甚至会增长到接近 2600 s。在这种情况下,我们无法使用 TSCH 的任何功能。另一方面,当我们使用 HSJCE 加入节点算法时,即使在非常拥挤的情况下,加入时间也少于 60 s。Rapid 算法也是同意如此,并且可以看出由于发送的 EBs 的数量大于 RV 算法,因此花费的时间更短。第

一个实验证明 HSJCE 加入节点算法缩短了加入时间。它还表明,无论拥塞有多严重,拓扑配置都是可能的,这可以帮助提高工业环境中使用的 TSCH 的可靠性。

图5给出了第二组实验的结果。在低干扰部分与其他算法相比,HSJCE 同步器算法降低明显,虽然因为信道的质量是相似的,质量评估还未起到作用,但是由于 HSJCE 采取发送更多的 EBs 导致加入时间显著缩短。中间部分是 HSJCE 效果的最佳体现,与 RV 相比平均时间减少了 65 s,与 Rapid 相比平均时间减少了 15.12 s。干扰节点在 12~15 个时是 HSJCE 算法性能最优的时间段。在高拥塞情况下,随着拥塞的增加,所有算法的时间都会增长。HSJCE 的平均加入时间比 RV 短 70 s,比 Rapid 短 15 s。在实验中可以看到,HSJCE 同步器算法在干扰环境下的性能优于现有的算法。图6给出了第三组实验的结果,显示了 RV 和 Rapid 与 HSJCE 的性能比较。HSJCE 和其他算法之间的性能差异在干扰小的环境下可以忽略不计。然而,随着拥塞程度的增加,其他算法的时间迅速增加。可以看出,在非常拥挤的状态下加入是不可能的,但是随着拥塞的增加,HSJCE 的平均加入时间显著缩短。

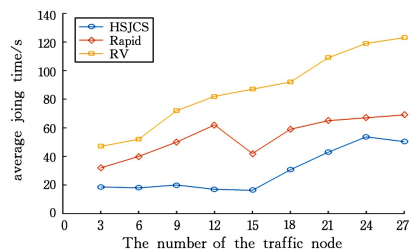


图5 不同数量干扰节点下的同步算法平均加入时间的比较(加入节点采用 HSJCE 加入算法)

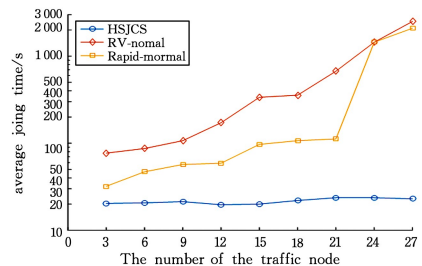


图6 不同数量干扰节点下的3种算法的综合比较

结束语 本文提出基于信道质量的快速接入(HSJCE)方案,旨在在严重的通信干扰情况下快速创建 TSCH 网络。HSJCE 方案通过使用基于 RSSI 的信道测量方法来选择可以快速连接通信的信道,实验证明,与其他算法相比,所提出的算法可以在通信干扰严重的环境中显著缩短加入时间。

参考文献

- [1] ISA, ISA100, Wireless systems for automation [EB/OL]. <http://www.isa.org/Community/SP100WirelessSystemsforAutomation>.
- [2] Highway Addressable Remote Transducer, a group of specifications for industrial process and control devices administered by the HART Foundation[EB/OL]. <http://www.hartcomm.org>.
- [3] IEEE 802.15.4e-2012. IEEE standard for local and metropolitan areanetworks. Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs) amendment 1: MAC sublayer[EB/OL]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6161600>.