

802.15.4 规范的增强型保障时隙通信协议的研究^①

姚道远^② 邓翰林 黄河清 沈 杰 刘海涛^③

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

摘 要 针对 IEEE 802.15.4-2006 标准的保障通信时隙(GTS)分配机制存在系统容量低和传输时延大的不足,提出了增强型的 GTS 方案。该方案设计了新的 GTS 分配算法,以支持端设备之间的直接端对端通信;将原标准中的单信道分配算法扩展为多信道分配算法,以充分利用物理层规范提供的多信道资源;设计了 GTS 通信维护算法,以增强系统的可靠性。理论分析和仿真结果均表明,该方案可将相邻端对端设备之间的平均传输时延减少到原标准的 1/3,系统容量最大可以扩展 2N 倍(N 为系统数据信道数),且增加的网络开销可接受。

关键词 802.15.4, 保障通信时隙(GTS), P2P 通信, 通信时延, 系统容量

0 引 言

IEEE802.15.4-2006 标准(简称 802.15.4 规范)的保障通信时隙(guaranteed time slot, GTS)分配机制存在明显不足,如通信的传输时延有所增长,系统的容量有所降低,此外,在 1 个超帧周期内能够支持的 P2P 通信节点对数非常有限。针对以上问题,本文提出了增强型 GTS 方案——EGTS,其中包括其分配算法、维护算法及实现协议,并对其性能进行了分析,最后给出了仿真结果。

1 802.15.4GTS 分配机制分析

IEEE802.15.4-2006 规范主要针对低速无线个人域网(low rate-wireless personal area network, LR-WPAN)应用,包含物理层和媒体接入控制(MAC)层两个规范^[1],其支持两种网络拓扑,即单跳星型

(STAR)及多跳簇树拓扑,同时支持有限的 MESH 结构(由网络层定义)^[2]。802.15.4 规范规定网络有两种工作方式:信标方式(beacon)和非信标方式(non-beacon)。在信标方式中,设备通信是基于超帧结构实现的。完整的超帧结构包括活动部分和可选的非活动部分。其中,活动部分中的竞争接入时段(contention access period, CAP)采用载波侦听-冲突避免(CSMA-CA)的信道接入方式^[3],实现控制信息和短数据帧的收发;调度访问时段(contention free period, CFP)阶段适用于保障高服务质量(quality of service, QoS)要求的数据通信,由普通设备在 CAP 时段向个域网(personal area networks, PAN)协调器申请,协调器根据需要分配 GTS^[4]。

802.15.4 规范中普通设备使用 GTS 需要向 PAN 协调器申请,这就制约了 GTS 的使用和网络的效率。当在彼此通信范围之内的设备之间需要传输数据时,如图 1 所示,设备 A 向设备 C 预约保障时隙

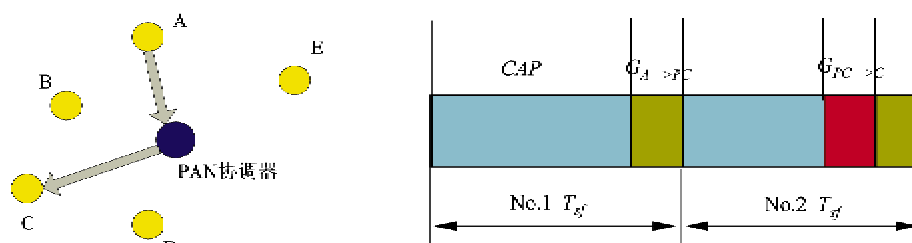


图 1 802.15.4-2006 GTS 分配示意图

① 863 计划(2007AA01Z2A8)和中科院知识创新工程重要方向性项目(KGCX2-YW-120)资助。
② 男,1982 年生,博士,助研;研究方向:无线传感器网络标准与协议;E-mail: yaody1982@163.com
③ 通讯作者;E-mail: lht@mail.sim.ac.cn
(收稿日期:2009-03-23)

通信,须通过 PAN 协调器中转,在第 1 个超帧内分配设备 A 到 PAN 协调器的 GTS,在第 2 个超帧内分配 PAN 协调器到设备 C 的 GTS 时隙,相比直接的端到端(Peer to Peer, P2P)通信显然增加了传输时延,也降低了系统容量,这是现有规范中 GTS 机制存在的不足之一^[5]。此外,原有规范中的 GTS 分配没有利用设备物理层可以支持多信道的优势,使得 802.15.4 规范在 1 个超帧周期内能够支持的 P2P 通信节点对数非常有限。

针对时延敏感的短数据帧和长数据帧共存的工业应用领域应用的 QoS 需求^[6],本文在 802.15.4 规范的基础上,利用物理层可提供多个无线信道的优势(2.4GHz 频段可提供 16 个信道),提出了增强型 GTS 方案,本文的主要贡献如下:

(1)在原规范的 GTS 模式(简称 P2C 模式)基础上,引入邻居设备直接数据传输的 GTS 模式(简称 P2P 模式),设计了增强型 GTS 分配算法,理论分析和仿真结果均表明该算法能将相邻设备间平均传输时延减少到原有规范的 1/3。

(2)引入多信道 GTS 分配机制以支持 P2P 模式的 GTS 通信,扩展了网络容量。

(3)考虑到 GTS 传输中设备失效的可能性,设计了 P2P 模式的 GTS 通信维护算法,增强了网络可靠性。

为实现增强型 GTS 方案,在 MAC 协议中扩展了原规范中定义的超帧结构,实现了增强型 GTS 的申请和维护算法,该协议兼容现有 15.4MAC 协议。经理论分析和仿真验证,协议可有效降低设备间的通信时延,极大提高系统的数据吞吐能力。

2 增强型 GTS 方案

首先定义方案中的一些基本概念:

公共信道: PAN 协调器启动后,扫描无线信道选取的一个可用信道,实现其与普通设备之间的信息交互,用 CH_0 表示。

P2P 数据信道: 普通设备之间传输数据使用

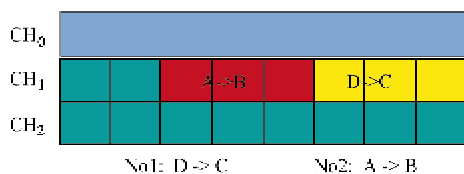


图 3 P2P-EGTS 分配原则图

的无线信道,由 PAN 协调器扫描选定,用 $CH_i(i > 0)$ 表示。

EGTS: 意即增强型 GTS,包括 P2C 和 P2P 这两种基本模式,前者是目前 802.15.4 规范中定义的普通设备和 PAN 协调器之间 GTS 通信模式,后者是本文定义的相邻普通设备之间的直接 GTS 通信模式。前者统一用 P2C-EGTS 表述,后者用 P2P-EGTS 表述。由于 P2C-EGTS 分配算法在原有规范中具体阐述过,下文主要给出 P2P-EGTS 分配算法。

2.1 EGTS 的分配算法

EGTS 主要包括两个基本属性:时隙序号和信道序号。如图 2 所示,在 802.15.4-MAC 的 GTS 时隙属性的基础上,增加了信道属性,使最大可用的 GTS 时隙数扩展到原来的 16 倍(以 2.4GHz 频段为例)。

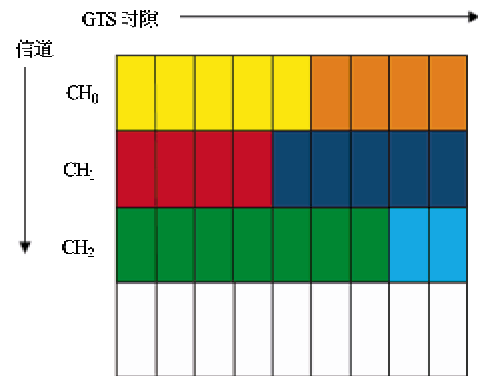
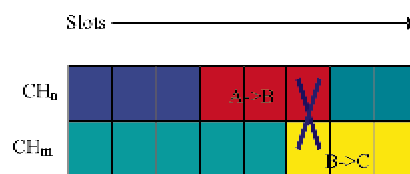


图 2 EGTS 基本属性示意图

EGTS 基本属性信息可用矢量符号 $\langle \text{SrcAddr}, \text{DestAddr}, \text{StartSlot}, \text{EndSlot}, \text{Len}, \text{CH}_n \rangle$ 表示,其中 SrcAddr 表示源设备地址, DestAddr 表示目标设备地址, StartSlot 表示 EGTS 起始时隙序号, EndSlot 表示结束槽序号, Len 表示分配时隙数, CH_n 表示 P2P 数据信道序号。为了简化算法的复杂度,在此做一些符合实际应用的约定:(1)所有的 P2P-EGTS 申请的时隙长度都是相同的;(2) CFP 阶段的最大可用时隙数 $\text{CFP_NUM} = k \times \text{Len}$,即等于 Len 的整数倍。

P2P-EGTS 分配的总原则是节省信道和时隙资源,示意图如图 3 所示。包括以下分原则:



资源分配优先级原则:假设公共信道为 CH_0 , 信道号为 CH_i 的优先级 $Prio(CH_i) = i, i = 1, \dots, 15$, 其中 1 为最高优先级, 15 为最低优先级。分配时隙序号的优先级 $Prio(Slot_i)$, 序号最大的时隙(协议参数为 CFP_SLOT_MAX)优先级最高。即搜索时域和频域资源的顺序分别是从小到大和距离公共信道从近到远。

GTS 通信互斥原则:在任意两个时隙重叠的 P2P-EGTS, 不允许其中之一的源设备或目的设备与另一个 EGTS 的源设备或目的设备地址相同。

保证 CAP 时隙长度原则:为保持和原有规范兼容, 要求 CAP 阶段必须有最小的时隙数, 该值由

协议参数 $aMinCAPperiod$ 确定。

根据以上原则设计 P2P 模式的 EGTS 分配算法。首先给出 P2P-EGTS 分配算法的伪代码中需要使用的变量说明:

SrcAddr: 申请分配 EGTS 的源设备地址;

DestAddr: 申请分配 EGTS 的目标设备地址;

esAddr: 根据信道号和时隙号查询已分配 EGTS 的源设备地址;

edAddr: 根据信道号和时隙号查询已分配 EGTS 的目标设备地址。

接下来给出 P2P-EGTS 分配算法的伪代码, 如算法 1 所示。

算法 1 P2P-EGTS 分配算法伪代码

```

1: Input: Len; // 申请 GTS 时隙长度;
    $A_1 \leftarrow \{SrcAddr, DestAddr\}$ ; // 源设备和目标设备地址集合  $A_1$ 
2: for all  $CH_i$  do
3:   for all available  $Slot_j$  do
4:      $A_2 \leftarrow \text{query } \{esAddr, edAddr\} \text{ from EGTS list with } CH_i \text{ and } Slot_j$ ; // 查询地址集合  $A_2$ 
5:     if ( $A_2 = \Phi$ ) then
6:       break;
7:     else if ( $A_1 \cap A_2 \neq \Phi$ ) then // 集合  $A_1$  与  $A_2$  的交集非空
8:       update Max Available Slot; // 更新最大可用时隙序号
9:     end if
10:   end for
11: end for
12: if no available channel or slot then // 若无可用信道或者时隙
13:   PAN coordinator rejects allocate EGTS;
14: else
15:   PAN coordinator allocates EGTS with available channel and slot;
16: end if

```

步骤 2 - 11 遍历 PAN 协调器分配的所有 GTS 的信道和时隙, 执行信道和时隙分配优先级原则和互斥原则。步骤 12 - 16 对遍历结果进行处理, 确定分配成功与否。

2.2 EGTS 维护算法

普通设备在 GTS 数据传输中可能会失效而中断 GTS 传输。由于 PAN 协调器工作在公共信道, 而已分配信道和时隙资源的 P2P-EGTS 工作在 P2P 数据信道上, 因此 PAN 协调器无法及时发现设备失效故障, 如不及时处理会导致网络资源浪费, 为解决该问题, 须设计 EGTS 维护算法。

PAN 协调器为普通设备分配 GTS 后, 将设备地址 SrcAddr、DestAddr 和对应的 EGTS 关联存放于

EGTS 列表中。所有待分配的 P2P-EGTS 均维护计数器 eCount, 初始值为协议常量 $eThr$, 分配 EGTS 后的每个超帧周期结束时刻, PAN 协调器将所有的 EGTS 计数器 eCount 减 1, 当计数器 eCount 减到 0 时, PAN 协调器将对应的 EGTS 解除资源分配, 并在下一个超帧起始时刻广播该信息。源设备在申请并获得 EGTS 资源分配后, 每隔 $hThr$ 个超帧周期向 PAN 协调器发送 EGTS 保持控制帧, 其中 $hThr$ 为协议变量, 要求 $hThr \leq eThr$ 。PAN 协调器接收到该帧, 复位对应的 $eCount = eThr$, 并继续计数, 直到源或目的设备发送 EGTS 解除请求帧或 $eCount = 0$ 时截止。PAN 协调器端和普通设备端的维护算法伪代码如算法 2 和算法 3 所示。

算法 2 PAN 协调器端 EGTS 维护算法

```

1: Input: EGTSReqType; // EGTS 请求帧类型,请求分配、解除分配或保持。
   SrcAddr; DestAddr; // 源设备和目的设备地址
2: ptrGTS  $\leftarrow$  QueryEGISList(SrcAddr, DestAddr);
3: if EGTSReqType == EGTS_ALLOC then
4:   ptrGTS  $\rightarrow$  eCount  $\leftarrow$  eThr;
5:   Start Counting, ptrGTS  $\rightarrow$  eCount--;
6: else if EGTSReqType == EGTS_DEALLOC then
7:   ptrGTS  $\rightarrow$  eCount  $\leftarrow$  0;
8:   Dealloc EGTS;
9: else if EGTSReqType == EGTS_HOLD then
10:  ptrGTS  $\rightarrow$  eCount  $\leftarrow$  eThr;
11:  Continue Counting, ptrGTS  $\rightarrow$  eCount--;
12: end if
    
```

算法 3 普通设备端 EGTS 维护算法

```

1: CAP Period of Superframe, App Packets arrival;
2: SendEGTSRequest(EGTS_ALLOC);
3: Next CAP Period, SrcAddr has been Allocated EGTS;
4: hCount  $\leftarrow$  hThr;
5: Start Counting, hCount--;
6: if (hCount = 0) then
7:   SendEGTSRequest(EGTS_HOLD);
8: else if (GTS is over) then
9:   SendEGTSRequest(EGTS_DEALLOC);
10: end if
    
```

3 MAC 协议描述

3.1 超帧结构的扩展

超帧结构是 IEEE 802.15.4-2006 中 MAC 层信标方式通信调度的基础。因此,针对 Adhoc 网络结构下的 P2P 通信需求,需要对原有的超帧结构做相应扩展,充分利用其多信道的资源,解决 P2P 通信问题。支持多信道的 P2P 通信的超帧结构如图 4 所示。在 CAP 时段仍然使用公共信道,在 CFP 时段可以根据 PAN 协调器所描信道结果选择多个信道同时进行 GTS 通信。

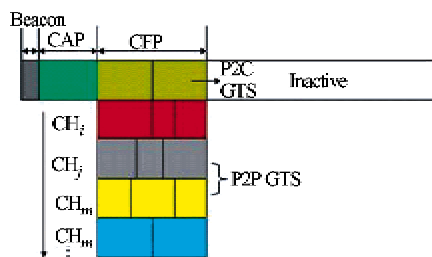


图 4 增强型 GTS 的超帧结构

3.2 EGTS 申请过程

因 P2C-EGTS 在原有 IEEE 802.15.4-2006 规范中已充分说明,接下来描述 P2P-EGTS 的申请流程。通信源设备向 PAN 协调器发送 EGTS 请求帧, PAN 协调器立即应答 ACK,并启动分配算法,根据网络状态为其分配可用的 EGTS。在下一个超帧的起始时刻 PAN 协调器广播携带已分配的 EGTS 描述符的 BEACON 帧, P2P 通信的源设备和目的设备解析 BEACON 帧后,获取对应 EGTS 的信息。

3.3 控制帧的扩展和开销

为了在 IEEE 802.15.4-MAC 协议中实现我们的增强型方案,在规范原有控制帧的基础上,我们增加了 EGTS 请求保持帧和 EGTS 申请帧。为节省篇幅,我们不具体描述控制帧的内容。在表 1 中我们对比了增强型方案和原有规范中与 GTS 有关的控制帧的开销。

表 1 控制帧开销对比

开销 帧类型	802.15.4 GTS	EGTS	备注
GTS 请求帧	10 byte	12 byte	修改
BEACON 帧	$(16 + 3m)$ byte	$(16 + 3m + 6n)$ byte	修改
GTS 保持帧	—	12 byte	增加

其中 m 为已分配的 P2C-EGTS 数, n 为已分配的 P2P-EGTS 数。

4 算法性能分析

我们将从时延、网络容量以及控制开销等方面对比增强型方案与原有方案。分析之前,对星型网

络做以下基本假设:

无线信道为理想信道,除非信号在信道上冲突,否则不会发生出错。这在家居和工业环境是基本满足的。

所有普通设备在超帧的起始时刻均唤醒射频接收 PAN 协调器广播的信标帧。

协调器在网络工作期间不失效,普通设备可能失效,但概率很小。

设备在数据传输期间不移动或者移动范围很小,源设备和目的设备的拓扑关系不变。所有设备能获得其通信范围之内邻居节点信息。

4.1 时延分析

首先分析 IEEE802.15.4-2006 规范前提下设备之间 GTS 通信的时延。GTS 的时隙长度均为 L_G 个时隙,每个时隙长度为 T_s ,超帧长度为 T_{sf} ,根据 GTS 分配的优先级原则,在第 1 个超帧分配设备 A 到 PAN 协调器的 GTS,第 2 个超帧分配 PAN 协调器到设备 C 的 GTS,分别用 $G_{A \rightarrow PC}$ 和 $G_{PC \rightarrow C}$ 表示,如图 2 所示。数据帧可能在超帧周期的 $[0, T_{sf}]$ 中任意时刻 t 到达,因此第 1 个超帧内到达的数据平均生成时刻可表示为

$$T_{gen}(G) = T_{sf}/2 \quad (1)$$

这些数据帧可在第 2 个超帧的 $G_{PC \rightarrow C}$ 内传送结束,根据 EGTS 分配原则, $G_{PC \rightarrow C}$ 分配在 $G_{A \rightarrow PC}$ 之前的相邻时隙,所以平均传输结束时刻 $T_{comm}(G)$ 在第 2 个超帧的 $G_{PC \rightarrow C}$ 中间位置,即

$$T_{comm}(G) = 2T_{sf} - 3L_G T_s/2 \quad (2)$$

因此平均传输时延 $D(G) = T_{comm}(G) - T_{gen}(G)$ 根据式(1)和(2)计算得到

$$D(G) = 3(T_{sf} - L_G T_s)/2 \quad (3)$$

若采取本文的 EGTS 通信机制,在第 1 个超帧即可直接传输完毕,相应地,有

$$T_{comm}(EG) = T_{sf} - L_G T_s/2 \quad (4)$$

显然 $T_{gen}(EG) = T_{sf}/2$, 因此平均传输时延 $D(EG) = T_{comm}(EG) - T_{gen}(EG)$ 可计算得到

$$D(EG) = (T_{sf} - L_G T_s)/2 \quad (5)$$

对比得到

$$D(EG)/D(G) = 1/3 \quad (6)$$

即 EGTS 的平均传输时延减少为原有 IEEE802.15.4-2006 规范的 1/3。

4.2 网络容量分析

超帧内最大可用 CFP 时隙设为 L_{CFP} , 显然 IEEE802.15.4-2006 规范最大可支持设备到 PAN 协调器(可称为会聚型)的 GTS 数为 L_{CFP}/L_G , 最大可

支持的相邻设备之间的 GTS 数为 $L_{CFP}/(2L_G)$ 。本文的通信机制最大可支持的会聚型 GTS 数为 L_{CFP}/L_G , 最大可支持的相邻设备之间的 GTS 数为 $N \cdot L_{CFP}/L_G$, N 为最大可用数据信道数。在所有通信设备均可以直接 P2P 通信的前提下,本文提出的 GTS 增强型方案相对于原规范网络容量扩展了 $2N$ 倍。

4.3 网络开销分析

考虑网络中存在 m 对设备的端对端通信,每次应用需要的超帧周期为 $SF = DataNum \cdot DataInterval / T_{sf}$, 维护周期为 $hThr$, 维护帧数为 $k = SF/hThr$, 则 15.4 MAC 规范控制帧的总开销为 $C_{total}(G) = m \cdot (C_{Alloc} + C_{Dealloc} + 2C_{ACK}) + SF \cdot C_{Beacon}$, EGTS 的总开销为 $C_{total}(EG) = m \cdot (C_{E-Alloc} + C_{E-Dealloc} + 2C_{ACK}) + SF \cdot C_{E-Beacon} + m \cdot k \cdot (C_{Hold} + C_{ACK})$, 开销增加比例可表示为

$$\eta = \frac{C_{total}(EG) - C_{total}(G)}{C_{total}(G)} \times 100\% \quad (7)$$

5 仿真验证

5.1 仿真场景设置

本文采用网络仿真软件 QualNet v4.0 搭建仿真平台,设置仿真区域为 $300m \times 300m$ 的正方形区域,在其中随机布设 10 个节点,PAN 协调器节点位于场景的中心位置,其他节点均为全功能设备,与 PAN 协调器一跳可达。在 QualNet 中设置物理层采用 802.15.4 协议,双径模型,理想无衰落信道;MAC 层采用改进的 802.15.4 协议;数据流模拟固定码率(constant bit rate, CBR)流量模式的语音通信服务, $L_G = 2$, 其他参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

参数名	描述	默认值
Len	GTS 申请时隙长度	2
aMinCapPeriod	CAP 时段最小时隙数	8
CFP_MAX_NUM	CFP 时段最多可分配时隙数	8
DATA_LEN	数据帧长度(含 MAC 和 PHY 头)	36byte
DataInterval	数据包到达间隔(语音采集率)	20ms
DataNum	数据包总长度(语音持续时间)	50
SO(超帧指数) 或 BO	超帧指数	2
LIFS	长帧间隔	0.64ms

根据 IEEE802.15.4 2006 MAC 规范^[1], 结合仿真参数,可以计算得到 $T_s = 2^{80} \times 0.96ms = 3.84ms$, $T_{sf} = 16 \times T_s = 61.44ms$

5.2 仿真结果

通信时延: 原有规范和改进研究的平均传输时延的理论数值在默认参数设置下根据公式(3)和公式(5)分别计算得 $D(G) = 80.64\text{ms}$ 、 $D(EG) = 26.88\text{ms}$, 仿真结果为 $D_{\text{sim}}(G) = 82.94\text{ms}$ 、 $D_{\text{sim}}(EG) = 28.64\text{ms}$, 仿真统计次数为 1000 次。考虑到帧间隔和保护时隙等因素影响, 仿真结果和理论分析基本吻合。

选取不同的 SO 值, 得到的两种机制下的理论和仿真结果对照图如图 5 所示, 横坐标为 SO, 纵坐标为传输时延, 单位为 ms。GTS-Calc 表示原规范的理论计算值, GTS-Sim 表示原规范的仿真统计值; EGTS-Calc 表示增强型 GTS 的理论计算值, EGTS-Sim 表示增强型 GTS 的仿真统计值。

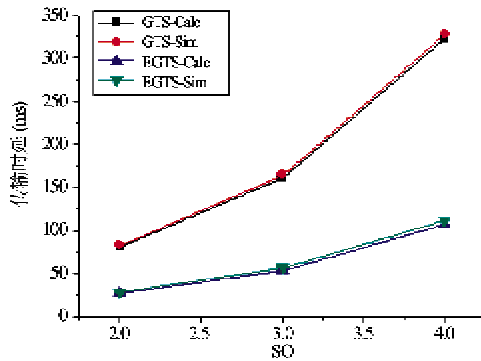


图 5 EGTS 方案和原 GTS 方案的理论和仿真传输时延对比

系统容量

考虑 m 个设备对通信按照泊松过程的应用服务请求到达, 平均应用到达间隔为 λ , 譬如设 $m = 3$, 观察两种实现机制对不同的 λ , 统计数据成功传输率和平均时延。

通过仿真中对比 GTS 与 EGTS 的性能, 对比结果如图 6 和图 7 所示。

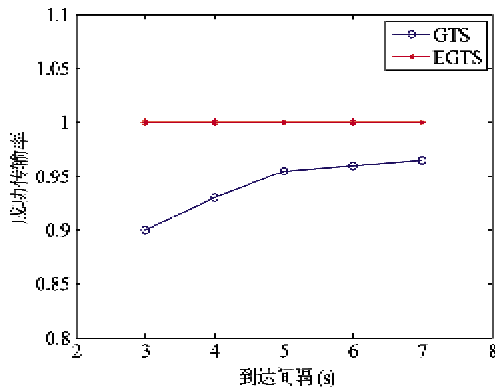


图 6 传输成功率对比

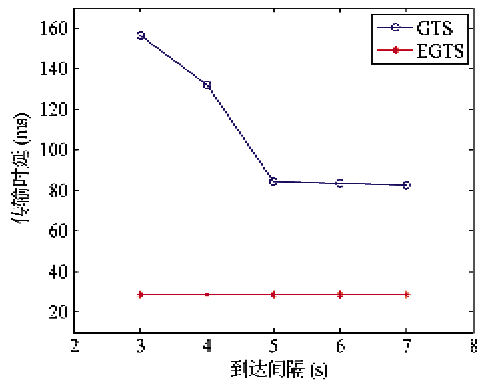


图 7 传输时延对比

仿真结果图中横坐标为语音服务请求到达平均间隔, 纵坐标分别为数据成功传输率和平均传输时延。综合图 6 和图 7 可以看出, 当服务请求间隔达到或超过 5s 时, 原有 GTS 规范的网络性能基本满足 QoS 需求。而对应的 EGTS 方案在所有情况下均可达到理想的网络性能。

网络开销

考虑网络中有 $m = 2$ 对设备之间通信, 根据仿真参数的默认设置可计算得 $SF = 162$, 选取不同的维护周期 $kThr$, 得到维护帧数 k 的不同取值, 相应可获得控制开销增加百分比 η , 仿真结果如图 8 所示。从图中可以看出, 控制开销的增加基本和维护帧的频率成正比, 在节点故障不是非常大的情况下, 开销的增加完全可以接受。

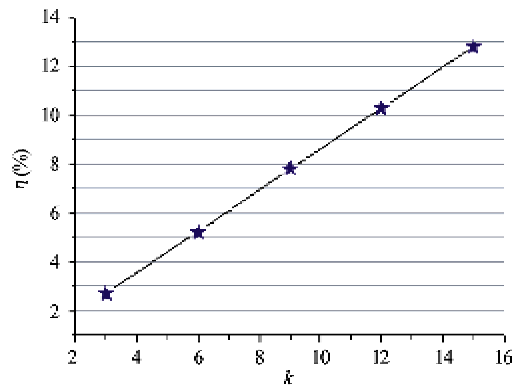


图 8 控制开销增加示意图

6 结论

本文针对现有 IEEE802.15.4-2006 标准规范在星型拓扑下暂不支持直接的端对端通信以及未利用信道资源导致可分配的 GTS 数目较少从而限制了系统容量的不足, 设计了增强型的 GTS 方案 EGTS,

其内容主要包括该方案的分配算法和维护算法,可支持从低数据流量到较高数据流量的不同应用需求。并在现有标准的基础上实现了该方案的 MAC 协议,通过理论分析和仿真结果,显示增强型 GTS 方案的系统容量和传输时延比 IEEE802.15.4-2006 规范的 GTS 方案均有较大的改善。在所有通信设备均可以直接 P2P 通信的前提下,系统容量扩展了 $2N$ 倍(N 为可用数据信道数),时延减少到原规范的 $1/3$ 。实现 EGTS 方案的 MAC 协议已在 2008 年 11 月份被无线个域网 IEEE802.15.4e 国际标准化组织采纳为 MAC 关键技术之一。将来的工作包括深入研究解决 CAP 阶段的突发数据帧增多以及冲突加剧导致网络性能下降的问题^[8],同时还需要考虑网络规模扩展后如何保障多跳通信的 QoS 问题。

参考文献

- [1] IEEE 802.15.4 Standard-2006. Wireless MAC and PHY specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). USA, 2006. 46-225
- [2] Cuevas A, Cuevas R, Uruena M, et al. A proposal for zigbee clusters interconnection based on Zigbee extension devices. In: Proceedings of the 23rd Conference of International Federation for Information Processing, Alhacete, Spain, 2007. 227-238
- [3] Tay Y C, Jamieson K, Balakrishnan H. Collision minimizing CSMA and its applications to wireless sensor networks. *IEEE Trans Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6):1048-1057
- [4] Koubaa A, Alves M, Tovar E. GTS allocation analysis in IEEE 802.15.4 for real-time wireless sensor networks. In: Proceedings of the 20th Conference of Parallel and Distributed Real-Time Systems, Greece, 2006. 1-10
- [5] Singh C K, Kumar A, Ameer P M. Performance evaluation of an IEEE 802.15.4 sensor network with a star topology. *Wireless Networks*, 2007, 14(4):543-568
- [6] Cagley R E, McNally S A, Wiatt M R. Dynamic channel allocation for dynamic spectrum use in wireless sensor networks. In: Proceedings of Military Communications Conference, Washington DC, USA, 2006. 1-5
- [7] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330
- [8] Song J, Shin K, Yu M, et al. NACA: A new adaptive CSMA/CA algorithm of IEEE 802.15.4 in beacon-enabled networks. In: Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Communication Technology, Gangwon-Do Korea, 2007. 266-269
- [9] Chen F, Wang N, German R. Performance evaluation of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for industrial applications. In: Proceedings of the 5th IEEE/IFIP Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2008. 89-96

An enhanced guaranteed time slot protocol based on 802.15.4 standard

Yao Daoyuan, Deng Hanlin, Huang Heqing, Shen Jie, Liu Haitao

(Institute of Micro-system and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract

In consideration of the IEEE 802.15.4-2006 shortages of low system capacity and long delivery latency in guaranteed time slot (GTS) allocation, the paper proposes an enhanced GTS (EGTS) scheme. The EGTS scheme not only designs a new GTS allocation algorithm to support the peer to peer communication between two adjacent end devices, but also utilizes available multi-channel resources specified in the physical layer specification and designs a GTS conservation algorithm to increase the system reliability. The results of theoretical analysis and simulation show that when using the EGTS the communication latency between two adjacent end devices can be decreased to one third of the former specification and the capacity can be expended $2N$ (N is the number of system data channels) times with acceptable incremental overheads.

Key words: 802.15.4, guaranteed time slot (GTS), peer to peer communication, latency of communication, system capacity