

抗反射干扰的时间感知重传机制在物联网中的应用

罗涵^{1,2}, 刘宇泓^{1,2}, 张洪光^{1,2}, 章翀^{1,2}, 刘元安^{1,2}

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;

2. 北京市安全生产智能监测重点实验室, 北京 100876)

摘要: 在封闭空间中, 无线传输会产生较强的反射干扰, 如何降低反射干扰对无线通信的影响是拓展物联网在封闭空间中应用的关键问题之一。提出了时间感知重传机制, 该机制能够调整每帧的时间时延, 并利用空间导体表面的反射损耗来减少反射信号造成的干扰。为了证明该机制的适应性, 使用了能够产生强反射干扰信号的实验环境, 实验结果证明了这种重传机制的可行性及其在不同环境下的有效性。在某种意义上, 时间感知重传机制扩展了无线通信在强反射空间的应用, 此外, 在机内、船内和星内的物联网应用中, 该机制可以实现无线传输代替部分有线传输, 从而达到提高系统可靠性、有效减重等重要目标。

关键词: 时间感知重传; 反射信号干扰; 反射损耗; 封闭空间通信

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00129

Application of time-aware retransmission against reflection signal interferences in Internet of things

LUO Han^{1,2}, LIU Yuhong^{1,2}, ZHANG Hongguang^{1,2}, ZHANG Chong^{1,2}, LIU Yuan'an^{1,2}

1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Beijing Key Laboratory of Work Safety Intelligent Monitoring, Beijing 100876, China

Abstract: In the enclosed spaces, wireless transmissions lead to the strong interferences of reflection signals, because of multipath effects. However, how to reduce the reflection signal effect on wireless transmissions is a kernel problem to expand the application scope of Internet of things. The time-aware retransmission MAC (TR-MAC) was proposed, which can adjust the time delay of each frame and reduce the interference caused by the reflected signal by using the reflection loss of the space conductor surface. In order to prove the adaptability of TR-MAC, an experimental environment that can generate strong reflection interference signals was used. The experimental results proved the feasibility and effectiveness of the TR-MAC in different environments. In a sense, TR-MAC extends the application of wireless communication in strongly reflective space. Besides, in the application of the Internet of things in the aircraft, ship and satellite, TR-MAC can realize wireless transmission instead of part of the wired transmission, so as to improve the system reliability, effective weight reduction and other important goals.

Key words: time-aware retransmission, reflection signal interferences, reflection loss, wireless intra communications

1 引言

物联网协议是物联网应用的理论基石与应用基础, 通常可以分为两大类: 第一类是商业公司

主导的标准协议, 是面向大众的标准应用; 第二类是定制的非标准协议, 是仅针对小众的特定应用。近 10 年来, 随着物联网大规模地部署, 信号干扰问题已经变得越来越棘手。在物联网协议栈中, 介

收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-08-08

通信作者: 张洪光, hongguang-zhang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61876199)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61876199)

质访问控制 (MAC, media access control) 层具有非常重要的位置, 其主要实现了节点的接入, 并且决定了吞吐量、时延等关键指标。抗干扰 MAC 协议设计是解决信号干扰的重要手段之一, 抗干扰 MAC 协议的研究背景如下。

首先, 近些年来, 商业公司主导的 2.4 GHz ISM 频段标准无线协议数量快速增长, 如 WLAN (IEEE 802.11b/g/n)、蓝牙 (IEEE 802.15.1)、无线个人局域网 (IEEE 802.15.4) 和无线传感网 (IEEE 802.15.4) 等。与此同时, 无线设备的部署数量也在快速增加, 这导致了在 2.4 GHz ISM 频段产生了越来越多的内部干扰和外部干扰问题^[1-4]。如何抑制内部与外部干扰是 2.4 GHz ISM 频段研究中的重要问题^[5-7]。目前, 有许多方法被用来减少信道干扰的影响, 如干扰感知信道切换^[8]、智能频谱分配^[9]、自适应功率控制^[10]和轻量级跳频方法^[11]等。

其次, 定制的非标准 MAC 协议是以应用场景为研究脉络的, 根据不同的应用场景进行研究与设计。本文研究场景是机内、船内和星内等封闭空间 (以下简称“封闭空间”), 封闭空间示例如图 1 所示。图 1(a) 中, 上半部分展示了飞机内部有线通信的布线结构, 可以看出, 使用有线通信的布线十分复杂; 下半部分是使用飞机内部无线通信进行数据传输的示意图, 该方案不需要进行复杂的布线。图 1(b) 展示了其他封闭空间环境, 如铁厂、大罐、船舶、汽车等, 这些环境下由信号反射产生的干扰相对较强, 目前基本使用有线传输。这些封闭空间通常由金属构成, 在此类空间中使用无线通信时, 内部会产生较强的反射干扰信号, 从而形成了一个强反射信号干扰的应用场景。在物联网中, 著名的此类应

用之一是无无线航空电子内部通信, 在该环境下使用无线传输有很多优点, 如可以使用无线来替换有线电缆, 以减轻飞机的重量。此外, 从网络拓扑的角度分析, 无线链路有良好的可重配置能力, 能够提高系统可靠性。

重传机制是 MAC 协议设计的重要组成部分之一, 为了优化网络性能, 近年来出现了以下几种重传机制, 如 ACK ARQ 协议^[12]、统一数据速率重传^[13]、可变数据速率重传^[13]、跨层决策重传^[14]和协作重传^[15]等。在目前的研究中, 使用重传机制来降低信道干扰的研究很少。本文提出的时间感知重传机制 (TR-MAC, time-aware retransmission MAC), 用于减少无线通信中强反射信号的干扰, 其主要特点如下。

1) TR-MAC 能够调整每帧的时间时延, 并使用金属导体表面的反射损耗来减少强反射信号干扰。此外, TR-MAC 是一种低成本的干扰缓解方案, 不需要任何额外的硬件支持。

2) TR-MAC 能够适用于不同的电磁环境中, 且能够与 IEEE 802.15.4 中的标准重传 MAC (SR-MAC) 共存。

3) 如实验结果所示, 在某种意义上, TR-MAC 扩展了无线通信在强反射空间中的应用。此外, 在机内、船内和星内的物联网应用中, 该机制可以实现无线传输代替部分有线传输, 从而达到提高系统可靠性、有效减重等重要目标。

2 TR-MAC 协议设计

TR-MAC 的设计目标是在强反射信号的空间中, 减小反射信号干扰造成的影响, 从而实现可靠

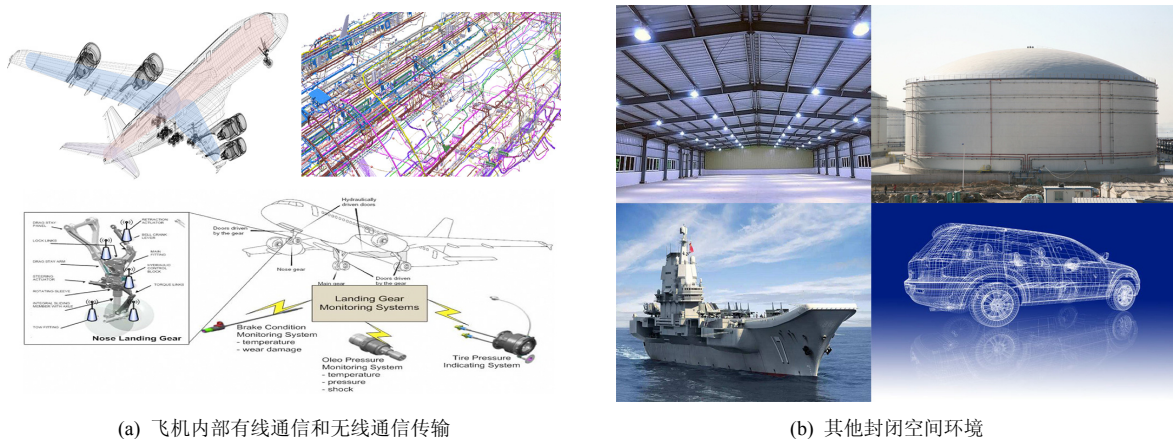


图 1 封闭空间示例

的无线通信。为了简明地解释 TR-MAC，本文使用了与 IEEE 802.15.4 协议栈中相同的术语和定义^[16]，如确认帧 (ACK, acknowledgement)、同步头 (SHR, synchronization header)、物理层头 (PHR, PHY header) 等。

2.1 TR-MAC

TR-MAC 基本方案如图 2 所示，其中， t_0 和 t_{ackTR} 分别由式(1)和式(2)给出。

$$t_0 = (\text{TransmitterPHYPacketSize} + \text{SHR} + \text{PHR}) \times 8 \text{ bit} / 250 \text{ kbit/s} = (127 + 5 + 1) \times 8 \text{ bit} / 250 \text{ kbit/s} = 4.256 \text{ ms} \quad (1)$$

$$t_{ackTR} = (\text{ackTRPHYPacketSize} + \text{SHR} + \text{PHR}) \times 8 \text{ bit} / 250 \text{ kbit/s} = (11 + 5 + 1) \times 8 \text{ bit} / 250 \text{ kbit/s} = 0.544 \text{ ms} \quad (2)$$

式(1)与式(2)中的 SHR 和 PHR 分别是同步头和物理层头。在图 2 中， t_{IFS} 代表帧间隔，在本文中，帧间隔有两种： $t_{LIFS} = 0.64 \text{ ms}$ (对应间隔 40 符号的长帧间隔) 与 $t_{SIFS} = 0.192 \text{ ms}$ (对应间隔 12 符号的短帧间隔)。

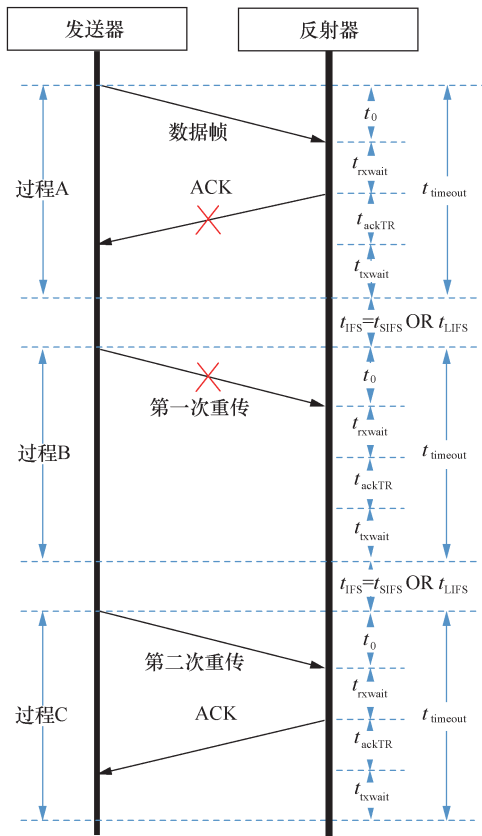


图 2 TR-MAC 基本方案

此外，标准重传 MAC 方案 (SR-MAC) 如图 3 所示，给出了标准重传 MAC， t_2 和 t_{ack} 分别由式(3)和式(4)给出。

$$t_2 = \text{macAckWaitDuration} \times 4 \text{ bit} / 250 \text{ kbit/s} = 54 \times 4 \text{ bit} / 250 \text{ kbit/s} = 0.864 \text{ ms} \quad (3)$$

$$t_{ack} = (\text{ackPHYPacketSize} + \text{SHR} + \text{PHR}) \times 8 \text{ bit} / 250 \text{ kbit/s} = (5 + 5 + 1) \times 8 \text{ bit} / 250 \text{ kbit/s} = 0.352 \text{ ms} \quad (4)$$

通过比较图 3 中的 SR-MAC 与图 2 中的 TR-MAC 可以看出，TR-MAC 的时间感知特性是其与 SR-MAC 的主要区别。TR-MAC 帧结构如图 4 所示，TR-MAC 中的发送器不仅控制自身的时延 $t_{timeout}$ ，而且利用反射器的等待时间 (reflector wait time) 来控制反射器的时延 t_{rxwait} 。需要注意的是，图 4(b)中给出的 TR-MAC 的 ACK 格式是自定义的，与图 3 中的 SR-MAC 的 ACK 格式不同。这是由于大多数 SR-MAC 的收发器是通过硬件自动响应 ACK，而这些自动响应 ACK 的动作不能通过软件进行控制。

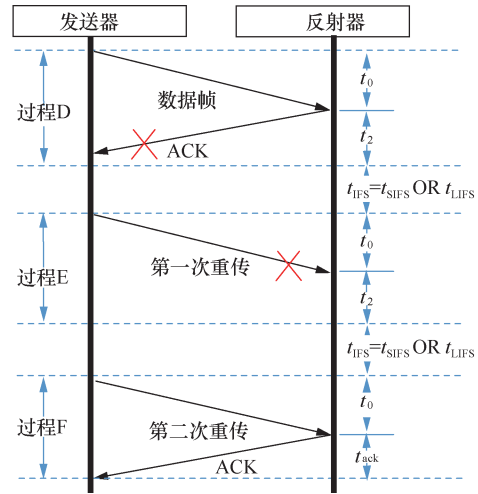


图 3 标准重传 MAC 方案 (SR-MAC)

Frame Control Field (2 bytes)	DSN (1 byte)	Destination ID (2 bytes)	Destination Address (2 bytes)	Source Address (2 bytes)	Data Payload (116 bytes)	FCS (2 bytes)
-------------------------------	--------------	--------------------------	-------------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------

(a) 发送器PSDU

Frame Control Field (2 bytes)	DSN (1 byte)	Destination ID (2 bytes)	Destination Address (2 bytes)	Source Address (2 bytes)	FCS (2 bytes)
-------------------------------	--------------	--------------------------	-------------------------------	--------------------------	---------------

(b) 接收器ACK

图 4 TR-MAC 帧结构

TR-MAC 方案解释如下。

1) 接收节点的时延 t_{rxwait} 的功能解释如下。以图 2 中的过程 C 为例, 如果 $t_{rxwait} \neq 0$, 则反射信号的干扰功率会因其在金属表面不断反射而逐渐减弱。否则, 若 $t_{rxwait} = 0$, 反射器会立即回复 ACK, 这时, 由于回复 ACK 的电磁波和反射信号产生的干扰会相互叠加, 反射信号的干扰会变得更强。因此, 控制反射器的时延 t_{rxwait} 是降低反射信号干扰对发送器数据帧影响的一种合理方法。

2) $t_{timeout}$ 的功能主要包括两个方面: 一方面, 以图 2 中的过程 A 与过程 B 为例, 如果反射器在时间段 $t_{timeout}$ 内没有回复 ACK, 则发送器将执行数据重传; 另一方面, 时间段 $t_{timeout}$ 中包括 t_{txwait} 和 t_{rxwait} 。 t_{txwait} 的功能与 t_{rxwait} 的功能相似。以图 2 中的过程 C 为例, 对发送器回复的时延 t_{txwait} 是为了降低信道干扰对接收节点 ACK 回复的影响。

2.2 时延的二分算法

由于一次数据传输持续的时间较短, 因此电磁环境基本不变, 发送不同帧时 2.4 GHz 收发器的发射功率大致相等。因此, 可以使用式(5)来降低 t_{rxwait} 和 t_{txwait} 的计算成本。

$$t_{rxwait} = t_{txwait} = (t_{timeout} - t_0 - t_{ackTR}) / 2 \quad (5)$$

为了减少 $t_{timeout}$ 的计算成本, $t_{timeout}$ 的最小调整时间间隔被设置为 0.1 ms。 $t_{timeout}$ 的取值范围在 $(t_0 + t_{ackTR})$ 至 $(t_0 + t_{ackTR} + t_{scope})$ 之间, 其中, t_{scope} 是一个设置参数。 $t_{timeout}$ 的初始值是 $t_0 + t_{ackTR} + 0.5t_{scope}$ 。同时, 设置 $t_{last_min_timeout}$ 和 $t_{last_max_timeout}$ 两个变量, $t_{last_min_timeout}$ 的初始值是 $(t_0 + t_{ackTR})$, $t_{last_max_timeout}$ 的初始值是 $(t_0 + t_{ackTR} + t_{scope})$ 。在本文的计算中, 需要满足 $t_{last_min_timeout} < t_{timeout} < t_{last_max_timeout}$ 。

TR-MAC 使用二分法控制每帧的时延。控制方法具体如下。

1) 如果连续传输成功的数据帧的数目 $N_{success}$ 不小于阈值 $T_{decrease}$, 则通过算法 1 来减小 $t_{timeout}$ 。

2) 如果连续传输失败的数据帧的数目 $N_{failure}$ 不小于阈值 $T_{increase}$, 则通过算法 2 来增大 $t_{timeout}$ 。

算法 1 由于信道良好, 则减小 $t_{timeout}$

Step 1: 更新 $N_{success}$

```
if ( $N_{success} < T_{decrease}$ ) && 传输成功
     $N_{success} = N_{success} + 1$ 
else
     $N_{success} = 0$ 
end if
```

Step 2: 判断是否减小 $t_{timeout}$

```
if ( $N_{success} \geq T_{decrease}$ ) && ( $|t_{timeout} - t_{last\_min\_timeout}| > 2 \times 0.1 \text{ ms}$ )
    if ( $t_{timeout} < t_{last\_max\_timeout}$ ) && ( $t_{timeout} > t_{last\_min\_timeout}$ ) //更新  $t_{last\_max\_timeout}$ 
         $t_{last\_max\_timeout} = t_{timeout}$ 
    end if
     $t_{timeout} = (t_{timeout} + t_{last\_min\_timeout}) / 2$  //减小  $t_{timeout}$ 
     $N_{success} = 0$  //重置  $N_{success}$ , 这是由于减小了  $t_{timeout}$ 
     $N_{reset\_min\_timeout} = N_{reset\_min\_timeout} + 1$ 
    if ( $N_{reset\_min\_timeout} \geq 10$ ) //判断是否重置  $t_{last\_min\_timeout}$ 
         $t_{last\_min\_timeout} = t_0 + t_{ackTR}$ 
         $N_{reset\_min\_timeout} = 0$ 
    end if
end if
```

算法 2 由于信道较差, 则增大 $t_{timeout}$

Step 1: 更新 $N_{failure}$

```
if ( $N_{failure} < T_{increase}$ ) && 传输失败
     $N_{failure} = N_{failure} + 1$ 
else
     $N_{failure} = 0$ 
end if
```

Step 2: 判断是否更新 $t_{timeout}$

```
if ( $N_{failure} \geq T_{increase}$ ) && ( $|t_{timeout} - t_{last\_max\_timeout}| > 2 \times 0.1 \text{ ms}$ )
    if ( $t_{timeout} < t_{last\_max\_timeout}$ ) && ( $t_{timeout} > t_{last\_min\_timeout}$ ) //更新  $t_{last\_min\_timeout}$ 
         $t_{last\_min\_timeout} = t_{timeout}$ 
    end if
     $t_{timeout} = (t_{timeout} + t_{last\_max\_timeout}) / 2$  //增加  $t_{timeout}$ 
     $N_{failure} = 0$  //重置  $N_{failure}$ , 这是由于  $t_{timeout}$ 
     $N_{reset\_max\_timeout} = N_{reset\_max\_timeout} + 1$ 
    if ( $N_{reset\_max\_timeout} \geq 10$ ) //判断是否更新  $t_{last\_max\_timeout}$ 
         $t_{last\_max\_timeout} = t_0 + t_{ackTR} + t_{scope}$ 
         $N_{reset\_max\_timeout} = 0$ 
    end if
end if
```

3 理论分析

在金属导体表面产生的反射信号，导致了强反射信号干扰。为了说明 TR-MAC 抗强反射信号干扰的原理，本节对信号反射损耗进行了分析，该分析可以解释 TR-MAC 在封闭空间中应用于不同 MAC 协议的可行性。

3.1 导体表面的反射损耗

强反射干扰不考虑在空气中传播造成的能量损耗，这是由于空气和真空并不具有导电性。此外，与电磁波速度 c (3×10^8 m/s) 相比，封闭或半封闭金属内部的空间过小。因此，对于强反射干扰而言，由于传输造成的能量损耗可以忽略不计。

反射损耗是强反射干扰产生损耗的主要因素。文献[17]分析了电磁波在导体表面反射的损耗，本文使用了该文献提供的导体表面反射系数 R ，它可由式(6)定义。

$$R = \frac{\text{反射波功率}}{p} \approx 1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} \quad (6)$$

式(6)中， p 为入射波功率， ω 为电磁波的角频率， ϵ_0 为 8.85×10^{-12} F/m， σ 为导体表面的导电率。

3.2 案例分析

本文使用第4节中的实验作为案例对问题进行研究。

使用式(6)计算反射系数 R 。电磁波频率为 2.4 GHz，则 ω 为 1.507×10^9 rad/s，导体表面为铝，则 σ 为 3.45×10^7 s/m，因此， $R = 1 - 1.7586 \times 10^{-4} = 0.999824$ 。详细分析如下。

讨论 1 在一次反射中，入射波的功率损失约为 $1.7586 \times 10^{-4} \times p$ ，能量损失很小。在一般情况下，由于电磁波的传播空间不封闭，电磁波的反射不会经常发生。然而，在本文的实验中使用封闭空间作为实验环境，因此，电磁波的反射会频繁发生。在电磁波的不断反射中，随着反射次数 N 的增加，反射信号的能量会逐渐减小。

讨论 2 根据讨论 1 的结论，封闭金属空间越小，越有利于减少反射信号造成的干扰，即反射平均距离越短，反射次数 N 的增长速率越大，反射信号能量减少得越快。

讨论 3 根据讨论 1 的结论，如果相邻传输的时间间隔足够长，则反射波的总能量损失率约等于 1。即只有当相邻传输的时间间隔足够长时，在封闭空

间中的无线传输才不会受反射信号的影响。

讨论 4 根据讨论 1 的结论，在 N 次反射后无线传输有两种不同结果：Result-TR 和 Result-SR。

1) Result-TR 与 TR-MAC 的结果相对应。在 Result-TR 中，两个相邻传输（即图 2 中的数据帧和 ACK）的时间间隔足够长。因此，反射信号经过 N 次反射后，其产生的干扰将不会影响下一次传输，这意味着在封闭空间内能够实现有效的、可靠的无线通信。

2) Result-SR 与 SR-MAC 的结果相对应。在 Result-SR 中，两个相邻传输（即图 3 中的数据帧和 ACK）的时间间隔太短。因此，反射信号经过 N 次反射后，仍能够造成很强的干扰，该干扰会导致封闭空间中通信质量的下降。

为了进一步论证讨论 4，TR-MAC 与 SR-MAC 的理论结果示例如图 5 所示，以图 5 为例，给出 SR-MAC 和 TR-MAC 的理论结果如下。

1) 经过 N 次反射后，反射信号干扰的功率 pr 由式(7)给出。在式(7)中， p 是信号入射波的功率， N 是信号反射的次数。 PR 由式(8)给出。为了与之后的实验相对应，因此直接从 AT86RF231 数据手册中获得 $10\lg(p/1 \text{ mw})$ 的值为 3 dBm。因此， N 可以通过式(9)来计算。此外，实验中使用 AT86RF231 的接收灵敏度 (-101 dBm) 作为 PR 的阈值，若 $PR \leq -101$ dBm，则对无线传输没有影响。因此，反射次数 N 的具体值由式(10)得出。

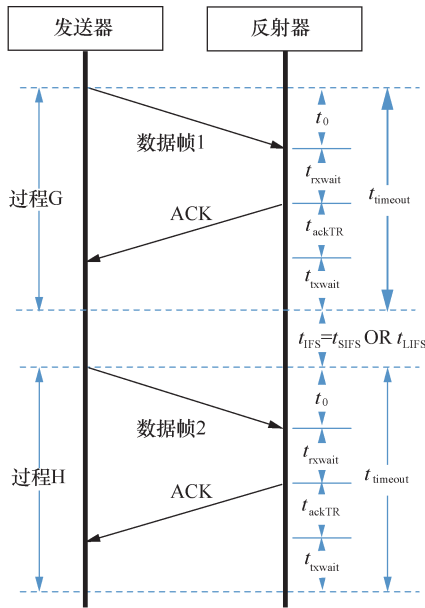
$$pr = p \times R^N \quad (7)$$

$$\begin{aligned} PR &= 10\lg(pr / 1\text{mw}) \\ &= 10\lg(p / 1\text{mw}) + 10\lg(R^N) \\ &= 10\lg(p / 1\text{mw}) + 10N \lg R \end{aligned} \quad (8)$$

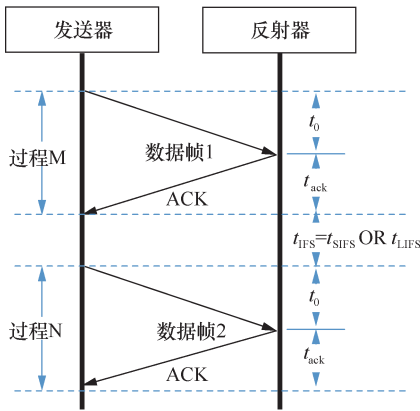
$$N = (PR - 3) / 10 \lg R \quad (9)$$

$$N = (-101 - 3) / 10 \lg(0.999824) = 136050 \quad (10)$$

2) 图 5(a)中给出了 TR-MAC 中的过程 G 。 t_{rxwait} 和 t_{txwait} 的最大值 TW_{max} 和最小值 TW_{min} 分别由式(11)和式(12)给出。在本实验中，使用铝封闭箱作为实验环境，其尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，因此电磁波的平均反射距离为 $1 \sim 1.732$ m (1.732 m 为铝盒最长距离)。通过计算可以得到 TW_{max} 的值为 0.785 ms，当相邻信号发送时间间隔大于 TW_{max} 时，它们之间不会出现干扰。 TW_{min} 的值为 0.454 ms，当相邻信号发送时间间隔小于 TW_{min} 时，它们之间会出现强反射干扰。



(a) TR-MAC的理论结果示例



(b) SR-MAC的理论结果示例

图 5 TR-MAC 与 SR-MAC 的理论结果示例

$$TW_{\max} = \frac{N \times 1.732 \text{ m}}{c} = \frac{136\,050 \times 1.732 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.785 \text{ ms} \quad (11)$$

$$TW_{\min} = \frac{N \times 1 \text{ m}}{c} = \frac{136\,050 \times 1 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.454 \text{ ms} \quad (12)$$

3) SR-MAC 中的过程 M 在图 5(b)中给出。根据式(4)可知, $t_{\text{ack}}=0.352 \text{ ms}$, t_{ack} 小于 TW_{\min} 。这表明当发送器接收到 ACK 时, 在封闭空间中仍存在很强的反射信号干扰, 这些强反射信号干扰对无线传输有很大影响。

4) 综上所述, SR-MAC 不适用于封闭空间中的无线传输; 由于 TR-MAC 可以针对反射信号的干扰调整每帧的时间时延, 因此能够在封闭空间中使用。

4 实验设计与结果讨论

4.1 实验设计

本文的实验方案如下。

1) 实验环境与设备

为了证明 TR-MAC 的性能, 本文使用 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 封闭铝盒作为实验环境, 这是一种会产生强反射干扰的、严格的实验环境。测试节点摆放位置如图 6 所示, 4 个节点摆放在盒内 0.5 m 高的位置。一组点对点通信系统是节点 A1 和 A2, 另一组点对点通信系统是节点 B1 和 B2。每个节点由 AT32UC3C0512C (32 位 AVR 微控制器) 和 AT86RF231 组成。两组点对点系统使用相同的频率进行无线通信, 同时, 通过串行端口发送数据, 用于事后统计并计算实验结果。

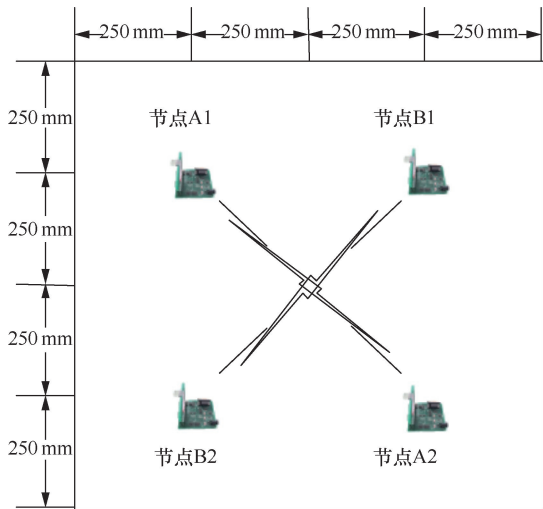


图 6 测试节点摆放位置

2) 对比协议

检索了 SCI 数据库, 但是未找到针对强反射信号干扰的重传机制论文。因此, 本文使用 SR-MAC 作为 TR-MAC 的对比协议。

3) 参数设置

TR-MAC 的参数设置为 $t_{\text{scope}}=10 \text{ ms}$ 、 $T_{\text{decrease}}=10$ 、 $T_{\text{increase}}=2$ 。在每一次实验中, 数据有效载荷的长度为 116 字节, 重传次数为 3 次, 每组点对点通信系统发送 2 万个数据分组。

4) 实验目标

① 为了证明本文所提出 TR-MAC 的可行性, 在第 4.2 节中, 仅使用节点 A1 和 A2 作为点对点通信系统。

② 为了证明 TR-MAC 对于不同电磁环境的有效性, 在第 4.3 节中, 使用节点 A1 和 A2、节点 B1 和 B2 两组点对点通信系统。其中, 设计了场景 A、B 和 C。在场景 A 中, 存在两组 SR-MAC 点对点通信系统; 在场景 B 中, 存在一组 TR-MAC 点对点通信系统和一组 SR-MAC 点对点通信系统; 在场景 C 中, 存在两组 TR-MAC 点对点通信系统。

4.2 可行性实验

可行性实验的分组丢失率 (PLR) 和吞吐量如表 1 所示, 给出了 PLR 和吞吐量的实验结果。SR-MAC 的 PLR 为 9.175%, 这在实际应用中是无法接受的, 说明 SR-MAC 无法在封闭空间中应用; TR-MAC 的 PLR 为 0.105%, 这意味着 TR-MAC 可以在强反射信号干扰的环境下使用。

表 1 可行性实验的 PLR 和吞吐量

协议	PLR	吞吐量/(kbit·s ⁻¹)
SR-MAC	9.175%	200.552
TR-MAC	0.105%	149.395

可行性实验的平均时延和总传输时间如表 2 所示, 分析如下。

表 2 可行性实验的平均时延和总传输时间

协议	平均时延/ms	总传输时间/s
SR-MAC	5.305	106.107
TR-MAC	7.122	142.441

1) SR-MAC 的实际平均时延为 5.305 ms。SR-MAC 的理论平均时延为 5.294 ms, 可以由 $(1-PLR) \times (t_0 + t_{ack} + t_{LIFS}) + PLR \times (t_0 + t_2 + t_{LIFS})$ 计算得出, 平均时延的理论值 (5.294 ms) 和实际值 (5.305 ms) 基本相同。此外, SR-MAC 的 t_{ack} 为 0.352 ms, 小于式(12)中计算的 TW_{min} (0.454 ms), 这是 SR-MAC 的 PLR 较高的主要原因。

2) TR-MAC 的实际平均时延为 7.122 ms。TR-MAC 的理论平均时延可以由 $(t_0 + t_{ackTR} + t_{txwait} + t_{rxwait} + t_{LIFS})$ 计算得出。由于 t_{txwait} 和 t_{rxwait} 的理论取值范围在 TW_{min} (0.454 ms) 至 TW_{max} (0.785 ms), 因此, TR-MAC 的理论平均时延取值为 6.348~7.01 ms, 而平均时延的实际值 (7.122 ms) 大于 7.01 ms。这表明 t_{txwait} 和 t_{rxwait} 的实际值都将大于其理论最大值 TW_{max} , 这是 TR-MAC 的 PLR 较低的主要原因。此外, 根据图 6 中的节点位置, 实际平均反射距离更接近 1.732 m, 这对应于 TR-MAC 的最高理论时延 7.01 ms,

TR-MAC 平均时延的实际值 (7.122 ms) 和最高理论时延 (7.01 ms) 之间存在 0.112 ms 的误差, 误差来源包括 $t_{timeout}$ 的最小调整时间间隔 (0.1 ms) 等。

4.3 有效性实验

为了证明 TR-MAC 在不同电磁环境(对应场景 A、B 和 C)下的有效性, 本文主要使用有效吞吐量 (goodput) 和平均分组传输成功时延 (APTS, average packet-transmission-success delay) 作为指标。其中, 在式(13)中, 116 是数据有效负载长度, 133 是 PHY 包的大小。

$$\text{goodput} = (1 - \text{packet loss rate}) \times \text{throughput} \times 116/133 \quad (13)$$

$$\text{APTS} = \frac{\text{total transmission time}}{\text{the number of the received packets}} \quad (14)$$

4.3.1 PLR、吞吐量和有效吞吐量

有效性实验中的 PLR 和吞吐量如表 3 所示, SR-MAC 的 PLR 最小值为 48.825%, 然而, 在这些不同的电磁环境中, TR-MAC 的 PLR 最大值为 5.725%, 相比于 SR-MAC, 这表明 TR-MAC 在封闭空间中更节能。有效吞吐量如图 7 所示, 根据表 3 中的 PLR 与吞吐量和图 7 的实验结果, 证明 TR-MAC 的有效吞吐量是可以接受的, 这说明 TR-MAC 适用于不同的电磁环境。

表 3 有效性实验中的 PLR 和吞吐量

场景	系统	PLR	吞吐量/(kbit·s ⁻¹)
场景 A	SR-MAC system I	94.485%	198.226
	SR-MAC system II	96.870%	198.147
场景 B	SR-MAC system	48.825%	198.016
	TR-MAC system	5.725%	95.181
场景 C	TR-MAC system I	3.075%	76.544
	TR-MAC system II	2.535%	77.257

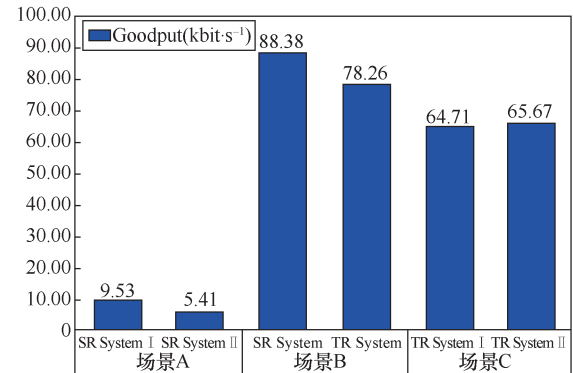


图 7 有效吞吐量

表 3 表明, TR-MAC 能够与 SR-MAC 或其他 TR-MAC 网络共存。TR-MAC 的网络共存能力是基于降低其与同频无线设备发出的信号相互干扰概率的原理。该原理的具体解释如下: 当无线设备数量不变且信道较差时(如场景 B 和 C), TR-MAC 会增大 t_{timeout} (见算法 2), 也就是说, 在单位时间内, TR-MAC 减少了传输数据帧的数量。因此, TR-MAC 降低了其与同频率无线设备发出的信号相互干扰的概率。

4.3.2 平均分组时延、总传输时间与平均分组传输成功时延

有效性实验中的平均分组时延和总传输时间如表 4 所示。根据表 3 中的 PLR 和表 4 中的总传输时间, 有效性实验中的 APTSD 如图 8 所示。结果证明 TR-MAC 的 APTSD 是可接受的, 如在场景 B 中, TR-MAC 的 APTSD 为 10.50 ms, TR-MAC 的 APTSD 为 11.86 ms。相比之下, SR-MAC 有很大的 PLR (48.825%)。这意味着 SR-MAC 中两个连续数据帧时延的随机性较大, 这对于实时性较高的物联网应用是无法接受的。

表 4 有效性实验中的平均分组时延和总传输时间

场景	系统	平均分组时延/ms	总传输时间/s
场景 A	SR-MAC System I	5.368	107.352
	SR-MAC System II	5.370	107.395
场景 B	SR-MAC System	5.383	107.466
	TR-MAC System	11.179	223.575
场景 C	TR-MAC System I	13.901	278.011
	TR-MAC System II	13.772	275.443

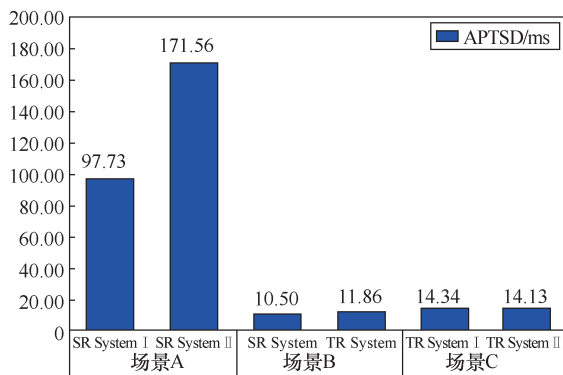


图 8 有效性实验中的 APTSD

5 结束语

本文中提出的 TR-MAC 能够使无线网络抵

抗由反射信号产生的干扰。此外, 分析了由金属导体表面反射信号产生干扰的反射损耗, 并设计了一个基于 IEEE 802.15.4 的实验, 实验结果证明了 TR-MAC 的可行性及其在不同环境中的有效性。

参考文献:

- [1] GUO W, HEALY W M, ZHOU M C. Impacts of 2.4-GHz ISM band interference on IEEE 802.15.4 wireless sensor network reliability in buildings[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(9): 2533-2544.
- [2] BARAC F, GIDLUND M, ZHANG T. Scrutinizing bit and symbol-errors of IEEE 802.15.4 communication in industrial environments[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(7): 1783-1794.
- [3] WU K, TAN H, NGAN H L, et al. Chip error pattern analysis in IEEE 802.15.4[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(4): 543-552.
- [4] ZHONG Y, QUEK T, GE X. Heterogeneous cellular networks with spatio-temporal traffic: delay analysis and scheduling[J]. IEEE Journal Selected Areas Communications, 2017, 35(6): 1373-1386.
- [5] GE X, HUANG K, WANG C X, et al. Capacity analysis of a multi-cell multi-antenna cooperative cellular network with co-channel interference[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3298-3309.
- [6] AZMI N, KAMARUDIN L M, MAHMUDIN M, et al. Interference issues and mitigation method in WSN 2.4GHz ISM band: a survey[C]// International Conference on Electronic Design. IEEE, 2014: 403-408.
- [7] LE T T, MOH S. Interference mitigation schemes for wireless body area sensor networks: a comparative survey[J]. Sensors, 2015, 15(6): 13805-13838.
- [8] THIEN L, SANGMAN M. Interference mitigation schemes for wireless body area sensor networks: a comparative survey[J]. Sensors, 2015, 15(6): 13805-13838.
- [9] MOVASSAGHI S, ABOLHASAN M, SMITH D. Smart spectrum allocation for interference mitigation in wireless body area networks[C]//ICC. IEEE, 2014: 5688-5693.
- [10] CHINCOLI M M, BACCHIANI C C, SYED A, et al. Interference mitigation through adaptive power control in wireless sensor networks[C]//IEEE International Conference on Systems. IEEE, 2016: 1303-1308.
- [11] CAO B, GE Y, KIM C W, et al. An experimental study for inter-user interference mitigation in wireless body sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10): 3585-3595.
- [12] LIU Y, LIU A, CHEN Z. Analysis and improvement of send-and-wait automatic repeat-request protocols for wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 81(3): 923-959.
- [13] SINGH B, LOBIYAL D K. A MAC-layer retransmission technique for collided packets in wireless sensor network[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 72(4): 2499-2518.
- [14] TSENG H W, CHUANG Y R. A cross-layer judgment scheme for solving retransmission problem in IEEE 802.15.4-based wireless body sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(8): 3124-3135.
- [15] CHIANG J L, SHEU J P, TSENG H C, et al. An efficient MAC pro-

tolocol with cooperative retransmission in mobile Ad Hoc networks[J].
Wireless Communications & Mobile Computing, 2012, 12(9): 813-821.

[16] IEEE. IEEE Std 802.15.4™-2006 (Part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs))[S]. 2006.

[17] FRANKLIN J. Classical electromagnetism[M]. United Kingdom: Createspace Independent Publishing Platform, 2016.

[作者简介]



罗涵（1994-），男，辽宁沈阳人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为无线传感网络协议和任务分配。



张洪光（1978-），男，吉林白城人，北京邮电大学副教授、博士生导师，主要研究方向为 TSP、消防救援优化、实际优化算法、在线优化系统和智能通信等。



章翀（1992-），男，福建建阳人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为无线传感网络协议。



刘宇泓（1995-），男，湖南邵阳人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为无线传感网络协议。



刘元安（1963-），男，四川成都人，北京邮电大学教授，主要研究方向为 5G 系统、电磁干扰和智能天线等。