



中华人民共和国国家标准

GB/T 38618—2020

信息技术 系统间远程通信和信息交换 高可靠低时延的无线网络通信协议规范

Information technology—Telecommunications and information exchange
between systems—Specification for high reliability and low latency
wireless network communication protocol

2020-04-28 发布

2020-11-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 3

5 概述 4

6 物理层 5

 6.1 概述 5

 6.2 操作频率范围 5

 6.3 物理层射频要求 6

 6.4 物理层服务规范 8

7 数据链路层..... 21

 7.1 数据链路层参考模型 21

 7.2 MAC 层 22

 7.3 数据链路子层 25

参考文献 30



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由全国信息技术标准化技术委员会(SAC/TC 28)提出并归口。

本标准起草单位：重庆邮电大学、中国电子技术标准化研究院、深圳市海思半导体有限公司、上海工业自动化仪表研究院有限公司、浙江中控技术股份有限公司。

本标准主要起草人：魏旻、王平、张弛、姜彤、王英、陆卫军、严冬、卓兰、韩丽、刘培、陈政熙、章维、李彩芹、赵向阳、李强、王嘉宁、裘坤。



信息技术 系统间远程通信和信息交换 高可靠低时延的无线网络通信协议规范

1 范围

本标准规定了高可靠低时延应用场景下无线通信网络的物理层的操作频率范围、射频要求和服务,以及数据链路层参考架构、MAC 层功能、精确时间同步、数据链路子层功能及自适应跳信道和确定性调度等。

本标准适用于无线网络在工业级现场应用中规划、部署及实施。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 15629.11—2003 信息技术 系统间远程通信和信息交换 局域网和城域网 特定要求 第 11 部分:无线局域网媒体访问控制和物理层规范

GB/T 15629.15—2010 信息技术 系统间远程通信和信息交换 局域网和城域网 特定要求 第 15 部分:低速无线个域网(WPAN)媒体访问控制和物理层规范

GB/T 26790.1—2011 工业无线网络 WIA 规范 第 1 部分:用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范

IEEE 802.15.4—2011 局域网和城域网 第 15.4 部分:低速率无线个域网(LR-WPAN)[Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)]

3 术语和定义

GB/T 26790.1—2011 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 GB/T 26790.1—2011 中的某些术语和定义。

3.1

自适应跳频 adaptive frequency hopping

在工业无线网络超帧簇内通信阶段的每个时隙,根据实际的信道状况更换通信信道。

[GB/T 26790.1—2011,定义 3.1.3]

3.2

自适应频率切换 adaptive frequency switch

在工业无线网络超帧中,信标阶段和活动期在一个超帧周期内根据实际的信道状况更换通信信道,在不同的超帧周期内使用不同的信道。

[GB/T 26790.1—2011,定义 3.1.4]

3.3

信标 beacon

在工业无线网络中由接入点或充当父节点的终端节点设备广播节点的帧。

注:信标帧用于新的父节点或终端节点加入工业无线网络。

3.4

广播 broadcast

将包发送给工业无线网络中所有可接收到的节点。

[GB/T 26790.1—2011, 定义 3.1.8]

3.5

信道 channel

从发送端到接收端传递包的无线射频媒质。

3.6

簇 cluster

包括一个父节点和多个终端节点的逻辑节点组。

3.7

共存 coexistence

一个网络在不被干扰或者不干扰同一环境下的其他网络的情况下具有执行任务的能力。

注：这些网络遵循相同或者不同规则。

3.8

兼容 compatibility

一个网络具有向其他网络提供服务或者接收来自其他网络服务，并且通过服务互换实现多个网络之间有效运作的功能。

3.9

数据链路子层 data link sub-layer

位于 MAC 层之上，用于处理工业无线网络拓扑、链接和通信资源。

[GB/T 26790.1—2011, 定义 3.1.17]

3.10

终端节点 end node

安装在工业现场，连接或者控制生产过程的设备。

3.11

跳频 frequency hopping

收发信道切换方法，目的为抗干扰和减少信号衰落。

[GB/T 26790.1—2011, 定义 3.1.20]

3.12

接入点 access point

连接工业无线网络与其他工厂网络的设备。

3.13

跳 hop

工业无线网络中，包在两个相邻节点之间传递的过程，而没有其他节点的参与。

注：多跳用于延长传输距离、绕过干扰源和避免阻塞。

3.14

互操作 interoperability

两个或两个以上的网络彼此交互信息且利用所交互信息的能力。

3.15

加入 joining

工业无线网络节点通过认证，并且允许接入工业无线网络的过程。

3.16

链路 link

规定了邻近节点间传输帧所需的通信参数。

注：包括源地址和目的地址对、时隙、信道、方向和链路类型。

3.17

网络管理者 network manager

负责配置网络、分配通信资源、管理路由表、监视和汇报网络性能的逻辑角色。

注：在工业无线网络中有且仅有一个网络管理者。

3.18

包 packet

在物理媒体上同时发送的一组有格式的位。

[GB/T 26790.1—2011, 定义 3.1.32]

3.19

父节点 parents node

工业无线网络中,负责终端节点的管理和包转发等功能的设备。

3.20

超帧 superframe

周期性重复的时隙集合。

注：超帧用于规定周期性通信的收发时间。

3.21

时隙 timeslot

在工业无线网络中交换数据所采用的基本时间单位。

注：工业无线网络中的时隙长度是可配置的。

3.22

时隙跳频 timeslot hopping

为了避免干扰和衰减,按照一定规律,在每个时隙改变收发频率。

[GB/T 26790.1—2011, 定义 3.1.40]

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AFH 自适应跳频(Adaptive Frequency Hopping)

AFS 自适应频率切换(Adaptive Frequency Switch)

CAP 竞争接入期间(Competitive Access Period)

CFP 免竞争期(Contention Free Period)

CSMA/CA 载波侦听多路接入/冲突避免(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)

DLDE 数据链路子层数据实体(Data link sub-Layer Data Entity)

DLDESAP 数据链路子层数据实体服务访问点(DLDE Service Access Point)

DLME 数据链路子层管理实体(Data link sub-Layer Management Entity)

DLMESAP 数据链路子层管理实体服务访问点(DLME Service Access Point)

DLSL 数据链路子层(Data Link Sub-Layer)

DMAPI 设备管理应用进程(Device Management Application Process)

DSME 确定性同步多信道增强网络(Deterministic and Synchronous Multi-channel Enhanced)
ED 能量检测(Energy Detection)
FFD 全功能设备(Full Function Device)
FSK 频移键控(Frequency Shift Keying)
GFSK 高斯频移键控(Gauss Frequency Shift Keying)
GTS 有保障的时隙(Guaranteed Time Slot)
LLDN 低时延确定性网络(Low Latency Deterministic Network)
LQI 链路质量指示符(Link Quality Indicator)
MAC 媒体访问控制(Medium Access Control)
MLDESAP MAC子层数据实体服务访问点(MAC sub-Layer Data Entity Service Access Point)
MLME MAC子层管理实体(MAC sub-Layer Management Entity)
MLMESAP MAC子层管理实体服务访问点(MLME Service Access Point)
MPDU MAC协议数据单元(MAC Protocol Data Unit)
MPSK 多进制相移键控(M-ary Phase-Shift Keying)
O-QPSK 偏置四相相移键控(Offset Quadrature Phase-Shift Keying)
PAN 个域网(Personal Area Network)
PDSAP 物理层数据服务接入点(Physical layer Data-Service Access Point)
PHY 物理层(Physical Layer)
PIB PAN信息库(PAN Information Base)
PLMESAP 物理层管理实体服务接入点(Physical Layer Management Entity Service Access Point)
PPDU 物理协议数据单元(Physical layer Protocol Data Unit)
PSDU 物理层服务数据单元(Physical layer Service Data Unit)
RFSAP 射频服务接入点(Radio Frequency Service Access Point)
RFD 简化功能的设备(Reduced Function Device)
RSSI 接收信号强度值(Received Signal Strength Indication)
SAP 服务接入点(Service Access Point)
SFD 帧首定界符(Start of Frame Delimiter)
TH 时隙跳频(Time Slot Hopping)
TSCH 时隙信道跳变(Time Slotted Channel Hopping)

5 概述

高可靠性仅指网络中通信模块的接收机灵敏度在满足 6.3.1.2、6.3.2.2 和 6.3.3.2 规定下误包率小于或等于 1% 的状态;低时延是指网络中端到端时延小于或等于 50 ms 的状态。不涉及高可靠和低时延的细节及其实现。

物理层、数据链路层及其接口的概念略图见图 1。

物理层通过 RFSAP 访问物理媒体。物理层通过 PDSAP 向媒体访问控制层提供数据服务,通过 PLMESAP 向媒体访问控制层提供管理服务。数据链路层中的媒体访问控制层通过 MLDESAP 向数据链路子层提供数据服务,通过 MLMESAP 向数据链路子层提供管理服务。数据链路层中的数据链路子层通过 DLDESAP 向更高层次提供数据服务,通过 DLMESAP 向更高层次提供管理服务。图 1 中箭头表示接口。

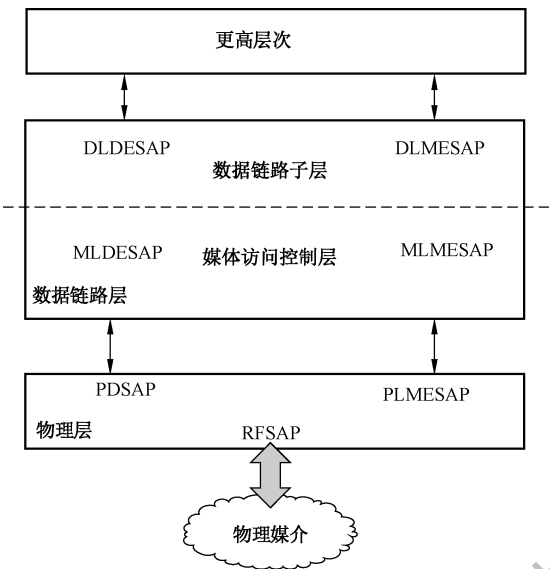


图 1 物理层、数据链路层及其接口的概念略图

6 物理层

6.1 概述

高可靠低时延场景下无线网络的物理层基于 GB/T 15629.15—2010 构建的物理层和 GB 15629.11—2003 构建的物理层。相对于 GB/T 15629.15—2010,增加了 433 MHz 操作中心频率、470 MHz～510 MHz 操作频段以及相应的调制方式,规定了接收机灵敏度、接收端干扰抑制(相邻信道)、接收端干扰抑制(非相邻信道非相邻信道)、接收端 ED,以及同频商用无线网络共存测试。

6.2 操作频率范围

物理层相应的频段以及对应的调制和扩频方式如表 1 所示,设备应使用表 1 中的调制和扩频方式在一个频段上运行。

表 1 不同频带下的参数

频带 MHz	码片(chip)速率 Mchip/s	调制方式	比特率 kbit/s	符号速率 ksymbol/s
430.00～432.79	0.2	MPSK	50	12.5
	—	GFSK	200	—
433.00～434.79	0.2	MPSK	50	12.5
	—	GFSK	200	—
779～787	1	O-QPSK(可选)	250	62.5
779～787	1	MPSK(可选)	250	62.5
470～510	—	滤波 2FSK	50	50
			100	100
		滤波 4FSK	200	100

表 1 (续)

频带 MHz	码片(chip)速率 Mchip/s	调制方式	比特率 kbit/s	符号速率 ksymbol/s
470~510	—	GFSK	100	—
	—	OFMD	—	—
	0.1	O-QPSK	6.25~50	3.125
注：— 不适用； GFSK 高斯频移键控； MPSK 多进制相移键控； MFSK 多进制频移键控； 2FSK 二进制频移键控； 4FSK 四进制频移键控； OFMD 正交频分复用； O-QPSK 偏置四相相移键控。				

6.3 物理层射频要求

6.3.1 433 MHz 频段射频要求

6.3.1.1 调制方式

433 MHz~510 MHz 频段模块接收端使用 GFSK 调制方式,PHY 的数据速率为 200 kbit/s。

6.3.1.2 接收机灵敏度

433 MHz~510 MHz 频段模块接收机灵敏度应符合:433 MHz 频段的每个信道内,当接收机灵敏度降至 $-110\text{ dBm}^{1)}$ 时,误包率不大于 1%。

6.3.1.3 接收端干扰抑制(相邻信道)

433 MHz~510 MHz 频段模块接收端干扰抑制(相邻信道)应符合:当干扰信号功率升至 $-50\text{ dBm}^{1)}$ 时,误包率不大于 1%。

特定条件为工作信道内的输入功率等于 $-82\text{ dBm}^{1)}$,间隔信道对工作信道的干扰信号输入功率相对值至少为 0 dB²⁾。

6.3.1.4 接收端干扰抑制(非相邻信道)

433 MHz~510 MHz 频段模块接收端干扰抑制(非相邻信道)应符合:当干扰信号功率升至 $-35\text{ dBm}^{1)}$ 时,误包率不大于 1%。

特定条件为工作信道内的输入功率等于 $-82\text{ dBm}^{1)}$,非相邻信道对工作信道的干扰信号输入功率相对值至少为 30 dB²⁾。

1) dBm 为信道功率绝对值单位,计算公式为 $10 \log(\text{功率值}/1\text{ mW})$ 。

2) dB 表征干扰信号功率比工作信道功率的相对值单位,计算公式为 $10 \log(\text{干扰信号功率}/\text{工作信道功率})$ 。

6.3.1.5 接收端 ED

433 MHz~510 MHz 频段模块接收端 ED 的测试场景应符合基于 GB 15629.11—2003 构建的较强干扰场景,即存在至少 2 个商用无线网络,且与其中 2 个商用无线网络持续网络连接,进行数据交换。在此场景下 433 MHz 频段的每一个信道的 ED 曲线满足左右平移 6 dB²⁾ 精度要求,在此范围内呈线性和适度单调。

6.3.2 470 MHz~510 MHz 频段射频要求

6.3.2.1 调制方式

470 MHz~510 MHz 频段模块接收端使用 GFSK 调制方式,数据速率为 100 kbit/s。

6.3.2.2 接收机灵敏度

470 MHz~510 MHz 频段模块接收机灵敏度应符合:470 MHz~510 MHz 频段的每个信道内,接收机灵敏度降至 $-107\text{ dBm}^{1)}$ 时,误包率不大于 1%。

6.3.2.3 接收端干扰抑制(相邻信道)

470 MHz~510 MHz 频段模块接收端干扰抑制(相邻信道)应符合:当干扰信号功率升至 $-50\text{ dBm}^{1)}$ 时,误包率不大于 1%。

特定条件为工作信道内的输入功率等于 $-82\text{ dBm}^{1)}$,间隔信道对工作信道的干扰信号输入功率相对值至少为 0 dB²⁾。

6.3.2.4 接收端干扰抑制(非相邻信道)

470 MHz~510 MHz 频段模块接收端干扰抑制(非相邻信道)应符合:当干扰信号功率升至 $-35\text{ dBm}^{1)}$ 时,误包率不大于 1%。

特定条件为工作信道内的输入功率等于 $82\text{ dBm}^{1)}$,非相邻信道对工作信道的干扰信号输入功率相对值至少为 30 dB²⁾。

6.3.2.5 接收端 ED

470 MHz~510 MHz 模块接收端 ED 的测试场景应符合基于 GB 15629.11—2003 构建的较强干扰场景,即存在至少 2 个商用无线网络,且与其中 2 个商用无线网络持续网络连接,进行数据交换。在此场景下 470 MHz~510 MHz 频段的每一个信道的 ED 曲线满足左右平移 6 dB²⁾ 精度要求,在此范围内呈线性和适度单调。

6.3.3 780 MHz 频段射频要求

6.3.3.1 调制方式

780 MHz 频段模块接收端使用 O-QPSK 调制方式,数据速率为 250 kbit/s。

6.3.3.2 接收机灵敏度

780 MHz 频段模块接收机灵敏度应符合:780 MHz 频段的每个信道内,接收机灵敏度降至 $-100\text{ dBm}^{1)}$ 时,误包率不大于 1%。

6.3.3.3 接收端干扰抑制(相邻信道)

780 MHz 频段模块接收端干扰抑制(相邻信道)应符合:当干扰信号功率升至 $-40\text{ dBm}^{1)}$ 时,误包

率不大于 1%。

特定条件为工作信道内的输入功率等于 $-82\text{ dBm}^{1)}$ ，间隔信道对工作信道的干扰信号输入功率相对值至少为 $0\text{ dB}^{2)}$ 。

6.3.3.4 接收端干扰抑制(非相邻信道)

780 MHz 频段模块接收端干扰抑制(非相邻信道)应符合：当干扰信号功率升至 $-25\text{ dBm}^{1)}$ 时，误包率不大于 1%。

特定条件为工作信道内的输入功率等于 $-82\text{ dBm}^{1)}$ ，非相邻信道对工作信道的干扰信号输入功率相对值至少为 $30\text{ dB}^{2)}$ 。

6.3.3.5 接收端 ED

780 MHz 频段模块接收端 ED 的测试场景应符合基于 GB 15629.11—2003 构建的较强干扰场景，即存在至少 2 个商用无线网络，且与其中 2 个商用无线网络持续网络连接，进行数据交换。在此场景下 780 MHz 模块的每一个信道的 ED 曲线满足左右平移 $6\text{ dB}^{2)}$ 精度要求，在此范围内呈线性和适度单调。

6.3.4 同频商用无线网络共存

6.3.4.1 共存定义

同频商用无线网络共存定义为工作在 2.4 G ISM 频段的高可靠低时延无线网络不受工作在 2.4 G 频段的基于 GB 15629.11—2003 的无线网络的信道干扰，实现与 GB 15629.11—2003 无线网络共存。

共存测试主要在 3 个不同程度的基于 GB 15629.11—2003 的无线网络干扰场景下进行。

6.3.4.2 干扰场景

基于 GB 15629.11—2003 的 3 个无线网络干扰场景：

- a) 干扰场景 1——轻度干扰场景：本干扰场景中，存在 1 个商用 GB 15629.11—2003 无线网络，与该商用无线网络未进行特意的网络连接，即未构造特意的数据交互干扰；
- b) 干扰场景 2——一般干扰场景：本干扰场景中，存在至少 2 个商用 GB 15629.11—2003 无线网络，且与其中 1 个商用 GB 15629.11—2003 无线网络进行特意的间断网络连接，即进行少量的数据交互，未进行持续干扰；
- c) 干扰场景 3——较强干扰场景：本干扰场景中，存在至少 2 个商用 GB 15629.11—2003 无线网络，且与其中 2 个商用 GB 15629.11—2003 无线网络进行特意的持续网络连接，即进行持续的数据交互。

6.3.4.3 同频商用无线网络共存判定

2.4 GHz 模块与同频商用无线网络共存应符合分别在 GB 15629.11—2003 无线网络干扰场景 1、无线网络干扰场景 2、无线网络干扰场景 3 下，2.4 GHz 模块能自动跳到 2.4 GHz 频段中不受当前无线网络工作信道干扰的信道进行通信，实现与 GB 15629.11—2003 无线网络共存。

6.4 物理层服务规范

6.4.1 物理层参考模型

物理层(PHY)服务的参考模型如图 2 所示。

物理层定义了两种服务：连接到物理层数据服务接入点(PDSAP)的 PHY 数据服务和连接到物理层管理实体服务接入点(PLMESAP)的 PHY 管理服务。物理层管理实体(PLME)维护一个与物理层

相关的数据组成的物理层管理信息库(PHY PIB)。PHY 通过 RFSAP 在物理发射信道上收发 PHY 协议数据单元(PPDUs)。

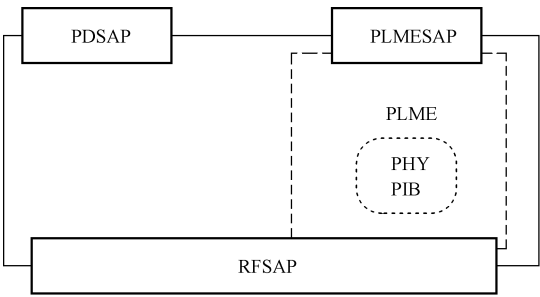


图 2 物理层参考模型

6.4.2 物理层数据服务

6.4.2.1 原语表示形式

物理层数据服务接入点支持在点对点 MAC 层的实体之间传输 MPDU。

表 2 列出了物理层数据服务接入点所支持的物理层数据接入的请求、确认和指示接口,它们的原语表示形式分别是 PD-DATA.request、PD-DATA.confirm 和 PD-DATA.indication,见 6.4.2.2、6.4.2.3 和 6.4.2.4 中定义。

表 2 物理层数据服务接入点接口

物理层数据服务接入点接口	PD-DATA.request(请求)	PD-DATA.confirm(确认)	PD-DATA.indication(指示)
接口定义	见 6.4.2.2	见 6.4.2.3	见 6.4.2.4

6.4.2.2 PD-DATA.request(物理层数据请求)

6.4.2.2.1 语义

MAC 层用 PD-DATA.request(请求)向本地物理层实体发送一个 MPDU,即物理层服务数据单元 PSDU。

PD-DATA.request 的语义如下:

PD-DATA.request (
 PsduLength,
 Psdu
)

表 3 列出了 PD-DATA.request 的参数。

表 3 PD-DATA.request 参数

参数名	类型	取值范围	说明
PsduLength	无符号整型	$\leq aMaxPHYPacketSize$ (物理层最大数据包容量)	物理层实体发送 PSDU 的字节数
Psdu	字节	2	物理层实体发送由字节构成的 PSDU 内容

6.4.2.2.2 使用场合

PD-DATA.request 由 MAC 层实体产生,并发送到物理层实体,请求发送一个 MPDU。

6.4.2.2.3 接收响应

当物理层实体接收到 PD-DATA.request 后,就会尝试发送一个物理层服务数据单元(PSDU)。此时,如果发射机处于激活状态(即 TX_ON 状态),物理层将首先构造一个物理层协议数据单元(PPDU),该单元包含有要发送的 PSDU,之后发送 PPDU。在物理层实体完成发送任务后,它将返回一个 SUCCESS 状态的 PD-DATA.confirm。

当物理层实体收到 PD-DATA.request 时,设备的收发机如果正处于接收状态(即 RX_ON 状态),物理层实体将忽略 PSDU,并返回一个带有 RX_ON 状态的 PD-DATA.confirm。当物理层收到 PD-DATA.request 时,设备的收发机如果正处于关闭状态(即 TRX_OFF 状态),物理层实体将忽略 PSDU,并返回一个带有 TRX_OFF 状态的 PD-DATA.confirm。当物理层收到 PD-DATA.request 时,设备的发射机如果正处于忙状态(即 BUSY_TX 状态),物理层实体将忽略 PSDU,并返回一个带有 BUSY_TX 状态的 PD-DATA.confirm。

6.4.2.3 PD-DATA.confirm(物理层数据确认)

6.4.2.3.1 语义

物理层用 PD-DATA.confirm 向 MAC 报告向对等的 MAC 层实体发送 MPDU(即 PSDU)的结果。PD-DATA.confirm 的语义如下:

```
PD-DATA.confirm (
    Status
)
```

表 4 列出了 PD-DATA.confirm 的参数。

表 4 PD-DATA.confirm 参数

参数	参数类型	取值范围	说明
Status	枚举	SUCCESS, RX_ON, TRX_OFF 或者 BUSY_TX	请求发送一个数据包的结果

6.4.2.3.2 产生条件

PD-DATA.confirm 由物理层实体产生,并将发送给 MAC 层实体作为 PD-DATA.request 的响应。PD-DATA.confirm 将返回一个代表发送请求执行的状态,如果发送数据请求成功地执行,则返回状态为 SUCCESS;否则返回一个代表出错的代码,如 RX_ON, TRX_OFF, 或者 BUSY_TX。

6.4.2.3.3 使用场合

当 MAC 层实体收到 PD-DATA.confirm 之后,就可知发送请求 PD-DATA.request 的结果。如果发送成功,那么 PD-DATA.confirm 的状态参数就设置为 SUCCESS;否则,状态参数设置为错误状态。

6.4.2.3.4 接收响应

不适用。

6.4.2.4 PD-DATA.indication(物理层数据指示)

6.4.2.4.1 语义

物理层利用 PD-DATA.indication 向本地 MAC 层实体传送一个 MPDU(即 PSDU)。

PD-DATA.indication 的语义如下：

PD-DATA.indication (

PsdLength,

Psd,

PpduLinkQuality

)

表 5 列出了 PD-DATA.indication 的参数。

表 5 PD-DATA.indication 参数

参数	类型	取值范围	说明
PsdLength	无符号整型	$\leq aMaxPHYPacketSize$	物理层实体接收包含在 PSDU 中的字节数
Psd	字节	—	物理层实体接收由字节组构成的 PSDU
PpduLinkQuality	整型	0x00~0xff	从 PPDU 的接收过程中测量的 LQI

6.4.2.4.2 产生条件

PD-DATA.indication 由物理层实体产生,用来向 MAC 层实体发送一个收到的物理层服务数据单元。如果收到的 psduLength 为 0 或者比 aMaxPHYPacketSize 还大,则不产生该原语。


6.4.2.4.3 使用场合

MAC 层收到 PD-DATA.indication 之后,MAC 层实体即获知了一个 MPDU 的到来。

6.4.2.4.4 接收响应

不适用。

6.4.2.5 数据服务时序

 图 3 给出了数据服务时序关系,时间关系从上往下,从上至下先出现的箭头表示时间在前,后出现的箭头表示时间在后。图 4~图 8 的箭头从上到下的时间先后关系与图 3 一致。

当 MAC 层协议数据单元(MPDU)要发往接收设备的 MAC 层数据实体时,发送设备的 MAC 层数据实体生成 PD-DATA.request。

发送设备的 PHY 收到 PD-DATA.request 后,就会尝试发送一个物理层服务数据单元。此时,如果发射机处于激活状态(即 TX_ON 状态),物理层将首先构造一个 PPDU,该单元包含有要发送的 PSDU,之后发送物理层协议数据单元。在物理层实体完成发送任务后,它将返回一个 SUCCESS 状态的 PD-DATA.confirm。

接收设备的 PHY 调用 PD-DATA.indication 向接收设备的 MAC 层数据实体汇报收到的数据帧。

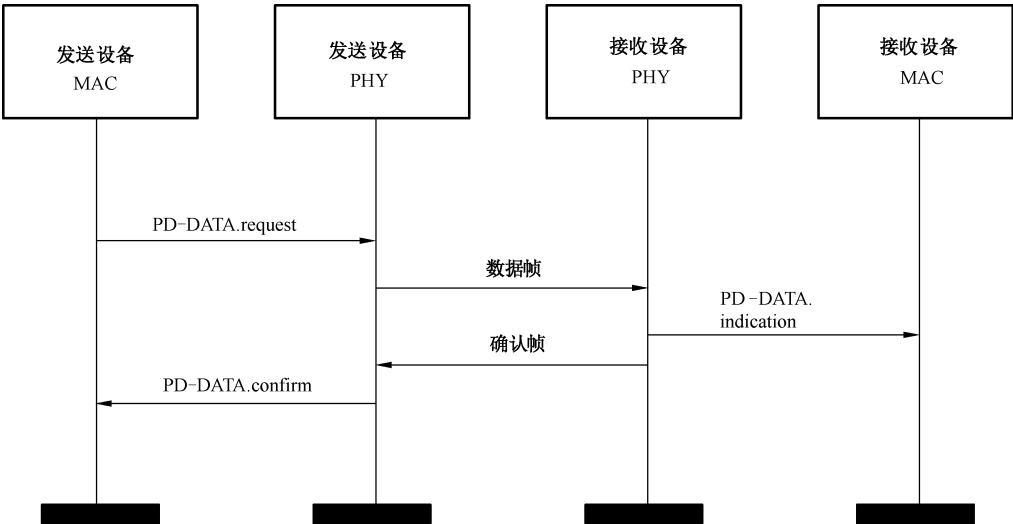


图 3 数据服务时序图

6.4.3 物理层管理服务

6.4.3.1 原语表示形式

物理层管理实体服务接入点允许管理命令在 MAC 层管理实体和物理层管理实体之间进行传送。
表 6 列出了物理层管理实体服务接入点支持的物理层管理实体清除信道评估等五个接入点及它们的请求和确认接口。这 5 个接入点的请求和确认接口在后面各条分别定义。

表 6 物理层管理实体各接入点接口

物理层管理实体各接入点接口	请求	确认
物理层管理实体清除信道评估接入点接口定义	见 6.4.3.2	见 6.4.3.3
物理层管理实体能量检测接入点接口定义	见 6.4.3.4	见 6.4.3.5
物理层管理实体获取信息接入点接口定义	见 6.4.3.6	见 6.4.3.7
物理层管理实体设置发射机状态接入点接口定义	见 6.4.3.8	见 6.4.3.9
物理层管理实体设置接入点接口定义	见 6.4.3.10	见 6.4.3.11

6.4.3.2 PLME-CCA.request(物理层管理实体清除信道评估请求)

6.4.3.2.1 语义

PLME-CCA.request 请求物理层管理实体执行清除信道评估。
PLME-CCA.request 的语义如下：
PLME-CCA.request()
PLME-CCA.request 没有相关参数。

6.4.3.2.2 使用场合

当 CSMA/CA 算法要求进行清除信道评估时,PLME-CCA.request 由 MAC 层管理实体产生并发送给物理层管理实体。

6.4.3.2.3 接收响应

如果物理层管理实体收到 PLME-CCA.request 时,接收机处于激活状态,则物理层实体就会立即执行清除信道评估。当物理层完成清除信道评估之后,物理层管理实体将返回一个带有 BUSY 或者 IDLE 状态的 PLME-CCA.confirm,其状态取决于清除信道评估的执行结果。

如果收到 PLME-CCA.request 时,收发机处于关闭状态 (TRX_OFF 状态) 或者发射机处于发射状态 (TX_ON 状态),物理层管理实体将分别返回带有 TRX_OFF 或者 TX_ON 状态的 PLME-CCA.confirm。

6.4.3.3 PLME-CCA.confirm(物理层管理实体清除信道评估确认)

6.4.3.3.1 语义

PLME-CCA.confirm 报告信道清除评估请求的执行结果。

PLME-CCA.confirm 的语义如下:

PLME-CCA.confirm (
Status
)

表 7 列出了 PLME-CCA.confirm 的参数。

表 7 PLME-CCA.confirm 参数

参数	类型	取值范围	说明
Status	枚举	TRX_OFF,BUSY,IDLE	执行清除信道评估请求的结果

6.4.3.3.2 产生条件

PLME-CCA.confirm 由物理层管理实体产生,并作为对 PLME-CCA.request 的响应返回给 MAC 层管理实体。PLME-CCA.confirm 将返回一个 BUSY 或者 IDLE 的状态,以表明清除信道成功,或者 TRX_OFF 的错误代码。

6.4.3.3.3 使用场合

MAC 层管理实体收到 PLME-CCA.confirm 之后,得知请求清除信道评估执行的结果。如果清除信道评估是成功的,状态参数就被设置为 BUSY 或者 IDLE。否则,状态参数将表明出错。

6.4.3.3.4 接收响应

不适用。



6.4.3.3.5 物理层管理实体清除信道评估时序

图 4 给出了物理层管理实体清除信道评估的时序。

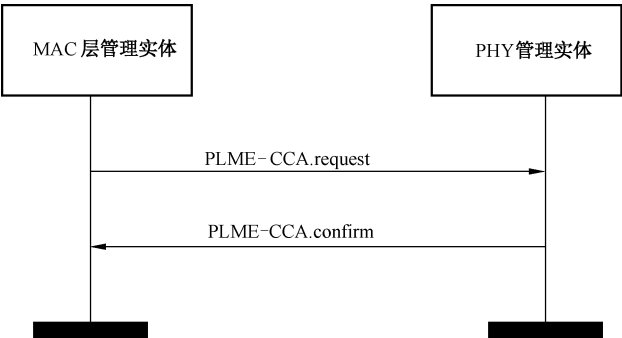


图 4 物理层管理实体清除信道评估时序图

6.4.3.4 PLME-ED.request(物理层管理实体能量检测请求)

6.4.3.4.1 语义

PLME-ED.request 请求物理层管理实体执行能量检测。
PLME-ED.request 的语义如下：
PLME-ED.request()
PLME-ED.request 没有相关参数。

6.4.3.4.2 产生条件

PLME-ED.request 由 MAC 层管理实体产生,并发送给物理层管理实体来请求能量检测。

6.4.3.4.3 使用场合

PLME-ED.request 原语由 MLME 生成并发送给她 PLME 以请求 ED 测量。

6.4.3.4.4 接收响应

当物理层管理实体收到 PLME-ED.request 时,如果接收机处于激活状态,则物理层执行能量检测。当物理层完成能量检测后,物理层管理实体将返回一个带有 SUCCESS 状态的 PLME-ED.confirm。
如果物理层收到 PLME-ED.request 时,收发机处于关闭状态(TRX_OFF 状态)或者发射机处于发射状态(TX_ON 状态),物理层管理实体将分别返回一个带有 TRX_OFF 或者 TX_ON 状态的 PLME-ED.confirm。

6.4.3.5 PLME-ED.confirm(物理层管理实体能量检测确认)

6.4.3.5.1 语义

PLME-ED.confirm 向 MAC 层报告能量检测的结果。
PLME-ED.confirm 的语义如下：
PLME-ED.confirm (
 Status,
 EnergyLevel
)

表 8 列出了 PLME-ED.confirm 的参数。

表 8 PLME-ED.confirm 参数

参数	类型	取值范围	说明
Status	枚举	SUCCESS, TRX_OFF, TX_ON	执行能量检测请求的结果
EnergyLevel	整数	0x00~0xff	当前信道的能量检测等级。如果状态被设置为 SUCCESS,这是当前信道的能量检测等级。否则,参数的值将被忽略

6.4.3.5.2 产生条件

PLME-ED.confirm 由物理层管理实体产生,作为对 PLME-ED.request 的响应发送给 MAC 层管理实体。PLME-ED.confirm 将返回一个 SUCCESS 状态,表明一次成功的能量检测;或者返回一个 TRX_OFF 或 TX_ON 错误代码。

6.4.3.5.3 使用场合

MAC 层管理实体收到 PLME-ED.confirm 之后,就可得到能量检测的结果。如果能量检测是成功的,状态参数就被设置为 SUCCESS。否则,状态参数将表明出错。

6.4.3.5.4 接收响应

不适用。

6.4.3.5.5 物理层管理实体能量检测时序

图 5 给出了物理层管理实体能量检测时序。

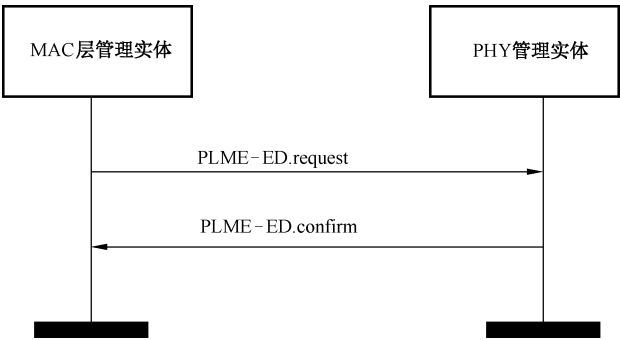


图 5 物理层管理实体能量检测时序图

6.4.3.6 PLME-GET.request(物理层管理实体获取信息请求)

6.4.3.6.1 语义

PLME-GET.request 请求获得有关物理层 PIB 属性的信息。
PLME-GET.request 的语义如下：
PLME-GET.request (
 PIBAttribute
)

表 9 列出了 PLME-GET.request 的参数。

表 9 PLME-GET.request 参数

参数	类型	取值范围	说明
PIBAtribute	枚举	见 GB/T 15629.15—2010	物理层 PIB 属性标识符

6.4.3.6.2 产生条件

PLME-GET.request 由 MAC 层管理实体产生,并发送给物理层管理实体以获得物理层 PIB 信息。

6.4.3.6.3 使用场合

当物理层管理实体收到 PLME-GET.request 之后,尝试在它的数据库中检索所请求的 PIB 属性。如果物理层管理实体在它的数据库中并没有找到 PIB 属性标识符,那么它就会返回一个带有 UNSUPPORTED_ATTRIBUTE 的状态的 PLME-GET.confirm。

如果物理层管理实体成功地检索到所请求的物理层 PIB 属性,那么将向 MAC 层返回一个带有 SUCCESS 状态的 PLME-GET.confirm。

6.4.3.6.4 接收响应

不适用。

6.4.3.7 PLME-GET.confirm(物理层管理实体获取信息确认)

6.4.3.7.1 语义

PLME-GET.confirm 向 MAC 层报告请求物理层 PIB 属性信息的结果。

PLME-GET.confirm 的语义如下:

PLME-GET.confirm (
Status,
PIBAtribute,
PIBAtributevalue
)

表 10 列出了 PLME-GET.confirm 的参数。

表 10 PLME-GET.confirm 参数

参数	类型	取值范围	说明
Status	枚举	SUCCESS, UNSUPPORTED_ATTRIBUTE	请求得到物理层 PIB 属性信息的结果状态
PIBAtribute	枚举	见 GB/T 15629.15—2010	所指定的物理层 PIB 属性标识符
PIBAtributevalue	多种类型	属性确定	所得到的物理层 PIB 属性值。当状态参数被设置为 UNSUPPORTED_ATTRIBUTE 时,这个参数长度为 0

6.4.3.7.2 产生条件

PLME-GET.confirm 由物理层管理实体产生,作为对 PLME-GET.request 的响应返回给 MAC 层

管理实体。PLME-GET.confirm 将返回一个代表成功获得物理层 PIB 属性的状态 SUCCESS, 或者返回一个代表出错的代码 UNSUPPORTED_ATTRIBUTE。

6.4.3.7.3 使用场合

当 MAC 层管理实体收到 PLME-GET.confirm 之后, 就可得知物理层 PIB 属性请求的执行结果, 得到所读取的物理层 PIB 属性。如果物理层 PIB 属性请求执行成功, 则状态参数就被设置为 SUCCESS; 否则, 状态参数将表明出错。

6.4.3.7.4 接收响应

不适用。

6.4.3.7.5 物理层管理实体获取信息时序

图 6 给出了物理层管理实体获取信息时序。

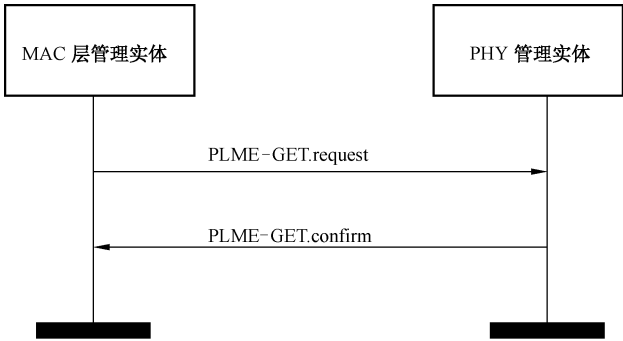


图 6 物理层管理实体获取信息时序图

6.4.3.8 PLME-SET-TRX-STATE.request(物理层管理实体设置发射机状态请求)

6.4.3.8.1 语义

PLME-SET-TRX-STATE.request 向物理层实体请求改变收发机的内部的工作状态。收发机内部主要分为 3 种状态:

- a) 收发机关闭状态(TRX_OFF);
- b) 发射机激活状态(TX_ON);
- c) 接收机激活状态(RX_ON)。

PLME-SET-TRX-STATE.request 的语义如下:

PLME-SET-TRX-STATE.request (
 State
)

表 11 列出了 PLME-SET-TRX-STATE.request 的参数。

表 11 LME-SET-TRX-STATE.request 参数

参数	类型	取值范围	说明
State	枚举	RX_ON, TRX_OFF, FORCE_TRX_OFF, TX_ON	给收发机设置新的状态

6.4.3.8.2 产生条件

PLME-SET-TRX-STATE.request 是由 MAC 层产生,如果当前接收机的工作状态需要改变时,MAC 层通过该请求给物理层管理实体来转换收发机的工作状态。

6.4.3.8.3 使用场合

当物理层管理实体收到 PLME-SET-TRX-STATE.request 之后,根据请求的设置状态,将收发机的状态转换到所请求的状态。如果收发机状态转换成功,物理层将向 MAC 层返回一个带有 SUCCESS 状态的 PLME-SET-TRX-STATE.confirm;如果当前收发机的状态已经为所请求的工作状态,则物理层将向 MAC 层返回一个表明当前工作状态(也就是 RX_ON, TRX_OFF 或者 TX_ON 状态)的 PLME-SET-TRX-STATE.confirm。如果该所请求的工作状态为 RX_ON 或者 TRX_OFF,而物理层正在忙于传送一个 PPDU,在完成 PPDU 发送后,才能设置改变收发机的工作状态,这时物理层将返回一个带有 SUCCESS 状态的 PLME-SET-TRX-STATE.confirm。如果该所请求的工作状态为 TRX_OFF,而物理层处在 RX_ON 状态并且已经收到一个有效的帧定界符,在接收完成物理层协议数据单元后,才能设置改变收发机的工作状态,这时物理层将返回一个带有 SUCCESS 状态的 PLME-SET-TRX-STATE.confirm。如果所请求的工作状态为 TX_ON 状态,不管当前收发机工作在什么状态,都将使收发机转变为 TX_ON 状态,之后物理层将返回一个带有 SUCCESS 状态的 PLME-SET-TRX-STATE.confirm。如果被标为 FORCE_TRX_OFF 状态,不管当前收发机工作在什么状态,都将其状态使转变为 FORCE_TRX_OFF 状态,之后物理层将返回一个带有 SUCCESS 状态的 PLME-SET-TRX-STATE.confirm。

6.4.3.8.4 接收响应

不适用。

6.4.3.9 PLME-SET-TRX-STATE.confirm(物理层管理实体设置发射机状态确认)

6.4.3.9.1 语义

PLME-SET-TRX-STATE.confirm 向 MAC 层返回执行设置收发机工作状态请求的结果。

PLME-SET-TRX-STATE.confirm 的语义如下:

PLME-SET-TRX-STATE.confirm (

Status

)

表 12 列出了 PLME-SET-TRX-STATE.confirm 的参数。

表 12 PLME-SET-TRX-STATE.confirm 参数

参数	类型	取值范围	说明
Status	枚举	SUCCESS, RX_ON, TRX_OFF, TX_ON	设置收发机工作状态的请求结果

6.4.3.9.2 产生条件

PLME-SET-TRX-STATE.confirm 由物理层管理实体产生,物理层实体根据 PLME-SET-TRX-STATE.request 的状态尝试改变收发机工作状态之后,向 MAC 层管理实体返回原语 PLME-SET-TRX-STATE.confirm。

6.4.3.9.3 使用场合

当 MAC 层管理实体收到 PLME-SET-TRX-STATE.confirm 之后,就可得知执行 PLME-SET-TRX-STATE.request 的结果。状态值为 SUCCESS 表明所要改变的收发机工作状态已经由物理层接受。状态值为 RX_ON, TRX_OFF 或者 TX_ON, 表明收发机已经是 PLME-SET-TRX-STATE.request 所请求的状态。

6.4.3.9.4 接收响应

不适用。

6.4.3.9.5 物理层管理实体设置发射机状态时序

图 7 给出了物理层管理实体设置发射机状态时序。

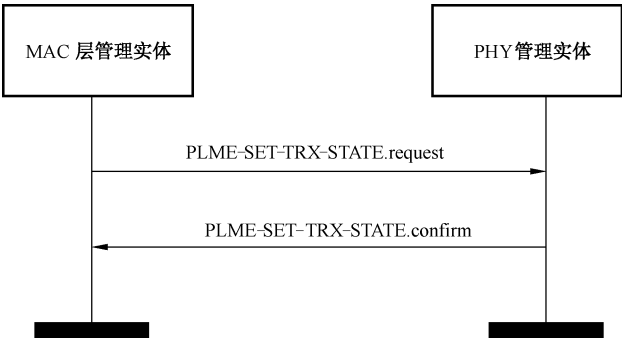


图 7 物理层管理实体设置发射机状态时序图

6.4.3.10 PLME-SET.request(物理层管理实体设置请求)

6.4.3.10.1 语义

PLME-SET.request 来将所指定的物理层 PIB 属性设置为给定的值。
PLME-SET.request 的语义如下:

PLME-SET.request (

PIBAttribute,

PIBAttributeValue

)



表 13 列出了 PLME-SET.request 的参数。

表 13 PLME-SET.request 参数

参数	类型	取值范围	说明
PIBAttribute	枚举	见 GB/T 15629.15—2010	要设置的 PIB 属性的标识符
PIBAttributeValue	多种类型	属性特定	要设置的指定的 PIB 属性值

6.4.3.10.2 产生条件

PLME-SET.request 由 MAC 层管理实体产生,并发送给物理层管理实体,将所指定的物理层 PIB

属性标识符设置为所规定的物理层 PIB 属性。

6.4.3.10.3 使用场合

物理层收到 PLME-SET.request 之后,物理层管理实体将尝试在它的数据库中对指定的物理层 PIB 属性写入给定的值。不是所有的 PIB 值都是可设置的。如果 PIBAttribute 参数指明的属性在数据库中没有找到,物理层管理实体将返回一个带有 UNSUPPORT_ATTRIBUTE 状态的 PLME-SET.confirm。如果 PIBAttribute 参数表明的属性值是只读的,物理层管理实体将返回一个带有 READ_ONLY 的 PLME-SET.confirm。如果 PIBAttributeValue 参数给出的属性值超出了该属性的取值范围,物理层管理实体将返回一个带有 INVALID_PARAMETER 的 PLME-SET.confirm。

如果请求的物理层 PIB 属性被成功写入到数据库中,物理层管理实体将返回一个带有 SUCCESS 状态的 PLME-SET.confirm。

6.4.3.10.4 接收响应

不适用。

6.4.3.11 PLME-SET.confirm(物理层管理实体设置确认)

6.4.3.11.1 语义

PLME-SET.confirm 报告设置 PIB 属性的执行结果。

PLME-SET.confirm 的语义如下:

PLME-SET.confirm (
Status,
PIBAttribute
)

表 14 列出了 PLME-SET.confirm 的参数。

表 14 PLME-SET.confirm 参数

参数	类型	取值范围	说明
Status	枚举	SUCCESS,UNSUPPORTED_ATTRIBUTE,INVALID_PARAMETER,READ_ONLY	请求设置 PIB 属性的结果状态
PIBAttribute	枚举	见 GB/T 15629.15-2010	所确认 PIB 属性标识符

6.4.3.11.2 产生条件

PLME-SET.confirm 由物理层管理实体产生,并作为对 PLME-SET.confirm 的响应返回给它的 MAC 层管理实体。PLME-SET.confirm 返回一个 SUCCESS 状态表明被请求的值写入了所要求的物理层 PIB 属性,或者返回一个 UNSUPPORTED_ATTRIBUTE,INVALID_PARAMETER 或者 READ_ONLY 的错误代码。

6.4.3.11.3 使用场合

MAC 层管理实体收到 PLME-SET.confirm 之后,就得知设置物理层 PIB 属性值的请求结果。如果请求的值被写入指定的物理层 PIB 属性,状态参数就被设置为 SUCCESS。否则,状态参数将表明



出错。

6.4.3.11.4 接收响应

不适用。

6.4.3.11.5 物理层管理实体设置时序

图 8 给出了物理层管理实体设置时序。

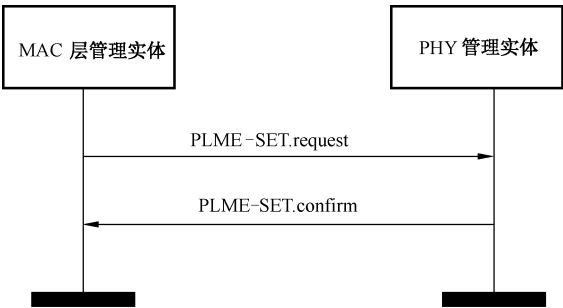


图 8 物理层管理实体设置时序图

7 数据链路层

7.1 数据链路层参考模型

数据链路层参考模型如图 9 所示。图中示出的数据链路层协议栈结构,包括 MAC 层和数据链路子层以及相关的服务接入点(SAP)。数据链路子层通过数据链路子层数据实体服务访问点(DLDESAP)为更高次层提供数据服务。数据链路子层通过数据链路子层管理实体服务访问点(DLMESAP)为更高次层提供管理服务。MAC 层通过 MAC 子层数据实体服务访问点(MLDESAP)为数据链路子层提供数据服务。MAC 层通过 MAC 子层管理实体服务访问点(MLMESAP)为数据链路子层提供管理服务。

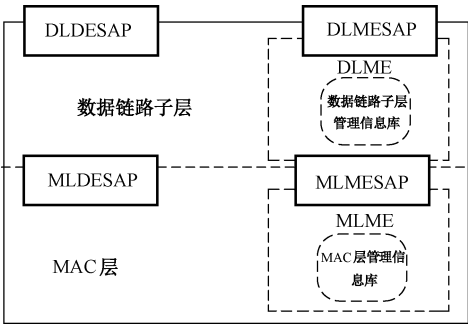


图 9 数据链路层参考模型

MAC 层 MLDESAP 中的数据服务接口和 MLMESAP 中的管理服务接口见 GB/T 15629.15—2010 的第 7 章。

数据链路子层 DLDESAP 中的数据服务接口和 DLMESAP 中的管理服务接口见 GB/T 26790.1—2011 的第 8 章。

7.2 MAC 层

7.2.1 MAC 层功能

MAC 层负责物理无线射频信道的访问以及以下的任务：

- a) 如果设备类型为接入点设备或者充当父节点的终端节点设备，负责生成信标帧；
- b) 利用信标帧实现网络同步；
- c) 支持网络一跳范围内的加入和离开；
- d) 支持设备安全功能；
- e) 利用 CSMA/CA 实现设备的加入过程；
- f) 处理和维持 GTS；
- g) MAC 层具备相应的信道访问控制功能，以合理分配信道资源；
- h) 为对等设备的 MAC 层之间提供可靠链路；
- i) 现场设备对应 RFD；
- j) 充当父节点的终端节点设备和接入点设备对应 FFD。

MAC 层帧格式支持 TSCH、LLDN、DSME。LLDN MAC 通用帧格式如图 10 所示。

MAC 层帧头 (MHR)			MAC 负载	MAC 层帧尾 (MHR)
帧控制	序列号	辅助安全头	帧载荷	FCS
1 字节	0 或 1 字节	0 或 1 或 5 或 6 或 10 或 14 字节	可变	2 字节

图 10 LLDN MAC 通用帧格式

帧控制字段包含定义 LLDN 帧的子帧类型的信息。帧控制字段格式应如图 11 所示。

帧类型	安全使能	帧版本	ACK 请求	子帧类型
第 0 位～第 2 位	第 3 位	第 4 位	第 5 位	第 6 位～第 7 位

图 11 帧控制字段格式

LLDN MAC 命令帧格式如图 12 所示。不同类型的低时延 MAC 命令帧，它们命令帧格式相同，仅在命令帧载荷上不同。

MAC 层帧头 (MHR)			MAC 负载		MAC 层帧尾 (MHR)
帧控制	序列号	辅助安全头	命令帧标识符	命令帧载荷	FCS
1 字节	0 或 1 字节	0 或 1 或 5 或 6 或 10 或 14 字节	1 字节	可变	2 字节

图 12 LLDN MAC 命令帧格式

LLDN MAC 命令帧的字段顺序符合通用 LLDN MAC 帧的顺序。在帧控制字段中，帧类型字段应包含指示 LLDN 帧的值，并且帧类型字段将包含指示 LLDN MAC 命令帧的值。命令帧标识符字段标

识正在使用的 MAC 命令。命令帧载荷字段包含 MAC 命令本身。命令帧载荷字段具有可变长度,并且包含特定且不同于命令帧类型的数据。

7.2.2 精准时间同步

7.2.2.1 分类

时间同步关键技术主要分为广告帧/信标帧时间同步方式以及命令帧时间同步等方式。

7.2.2.2 信标帧时间同步

信标帧时间同步是基于广播的单向时间同步,为了减少由时间同步带来的能量开销,在采用 IEEE 802.15.4—2011 物理层的工业级无线网络中,可利用信标帧来完成时间同步。信标帧时间同步步骤如下:

- a) 接入点周期性广播时间同步信标帧给它的邻居父节点,并且将信标发送时间装载到信标帧的指定字段;
- b) 父节点在接收信标帧时产生 SFD 中断,记录本地的信标接收时间;
- c) 父节点通过发送和接收得到的时间戳计算本节点时钟与标准时钟的时间偏差,补偿本地时钟,这样就实现了与时间源节点的同步。

同样的,在星型网中,父节点周期性的广播信标帧,星型网中的终端节点同样接收信标帧完成同步,这样网络中所有节点都能与自己的时间源同步,最终完成全网的时间同步。

7.2.2.3 命令帧时间同步

为了满足不同工业应用对精度的要求,使时间同步的精度达到毫秒(ms)甚至几十微秒(μ s)级,高可靠低时延无线网络还可使用专门的时间同步命令帧进行二次同步。

时间同步命令帧可由接入点和充当父节点的终端节点周期性的发送:

- 接入点利用簇间通信时段发送时间同步命令帧,实现网状网络的时间同步;
- 父节点利用簇内通信时段发送时间同步命令帧,实现星型网络的时间同步。

在时间同步命令帧的具体设计上,宜采用以下两种命令帧同步方式:

- a) 周期广播同步。时间源节点周期性的发送时间同步命令帧,这种情况与信标帧同步相类似。
- b) 点到点按需同步。节点向时间源申请时间同步命令帧。其步骤如下:
 - 1) 节点向时间源节点发出装载发送时间戳 T_1 的同步请求;
 - 2) 时间源节点接收到请求,记录接收到的请求时间 T_2 ,并且解析请求中时间信息;
 - 3) 时间源节点在 T_3 时刻发送时间同步命令帧给节点,需同步节点在 T_4 时刻接收到命令帧;需同步节点计算时间偏差 θ 值和同步帧传输时间 d 由式(1)和式(2)给出。

$$\theta = \frac{(T_1 - T_2) - (T_4 - T_3)}{2} \dots\dots\dots (1)$$

$$d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \dots\dots\dots (2)$$

式(1)和式(2)中:
 θ ——时间偏差;
 d ——同步帧传输时间;
 T_1 ——节点发送时间;
 T_2 ——源节点接收请求时间;

T_3 ——同步命令帧发送时间；

T_4 ——命令帧接收时间。

4) 申请同步节点根据计算的时间偏差补偿自己的本地时钟。

7.2.2.4 多跳网络时间同步补偿

7.2.2.4.1 同步补偿

在大规模千点级的高可靠低时延无线网络应用中,终端节点发送的数据报文往往需要通过多跳传输才可到达接入点,而时间同步精度误差会随着跳数的增加不断的积累。多跳网络时间同步应进行同步补偿。

7.2.2.4.2 拟合频率漂移

时间同步误差的来源除了两个设备时钟的初始时间偏差之外,时钟的晶振漂移是最主要的因素。利用多次同步对时钟的晶振频率漂移做线性拟合的算法能对漂移值做补偿。算法建立了一次函数的时钟同步模型如式(3)所示。

$$T_n = \alpha T_m + \beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

T_n ——同步帧的接收时间;

α ——晶振频率漂移;

T_m ——发送时间;

β ——原始时间偏差。

周期性多次同步可得到多个时间数据点,对这些点进行参数拟合可得到频率漂移和时间偏差值。

7.2.2.4.3 统计参数估计

时间同步误差的另一个重要来源是同步报文的发送、传输和接收过程中产生的时间延迟,其中包括确定性延时和不确定性延时。为了减小时延误差,利用统计信号处理的方法对时间偏差做参数估计。时钟同步模型如式(4)所示。

$$T_{2i}^{SA} = f_{\text{skew}} \times (T_{1i}^S + X_i^{SA} + d^{SA}) + \theta_{\text{offset}}^{SA} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

T_{2i}^{SA} ——第 i 次同步节点 A 的同步报文接收时间;

T_{1i}^S ——时间源节点 S 同步报文发送时间;

f_{skew} ——两节点的相对频率漂移;

$\theta_{\text{offset}}^{SA}$ ——两节点的原始时间偏差;

d^{SA} ——报文传输时间(确定性延时);

X_i^{SA} ——报文传输过程中的随机延时(不确定性延时)。

假设 X_i^{SA} 服从高斯正态分布,进而可通过最大似然估计对时间的偏差做参数估计,得到时间偏移值。

7.2.2.4.4 监听同步

监听同步用来减小多跳网络同步误差积累。该方法是利用无线信道的广播特性而产生的“监听”效果,处于下一跳的节点可监听广播范围内的本层节点与上一跳的节点之间的同步过程来达到同步的目的。这样就可有效控制和减少同步报文传递的跳数,减少误差积累。

7.3 数据链路子层

7.3.1 数据链路子层功能

7.3.1.1 功能概述

高可靠低时延无线网络的 DLSL 为网络层和 MAC 层提供服务接口。DLSL 包括数据链路子层数据实体(DLDE)和数据链路子层管理实体(DLME)。DLDE 负责提供数据服务接口,DLME 用于配置 DLSL 的参数和监视 DLSL 的运作。

7.3.1.2 共存

高可靠低时延无线网络需要考虑与其他工业级无线网络的共存问题,最低限度地保证网络不会因为其他外界因素而出现运行上的干扰问题。在共存问题解决后,可考虑网络的互连问题。即与不同的无线网络相连,提高工业应用的互操作性。

7.3.1.3 时隙通信

时隙通信的关键是帧的传输要在限定的时间内完成,即帧要在规定的时隙内进行传输,不能被延迟。高可靠低时延无线网络中数据链路子层的时隙长度与 IEEE 802.15.4—2011 协议的时隙长度保持兼容。

高可靠低时延无线网络支持可变长时隙。时隙的长度由网络管理者在节点加入网络后进行设置。

7.3.1.4 超帧

高可靠低时延无线网络可有选择性地使用超帧结构,可存在多种超帧,每个超帧在相邻的工作范围内有互不相同的跳信道序列,而且拥有多个时隙,其中每个时隙可被配置为相应链路。超帧格式由网络管理者定义。超帧可分为管理超帧和数据超帧两种:

- a) 管理超帧一般用于完成对节点的管理;
- b) 数据超帧一般用于配置与用户应用进程有关的通信。

超帧由网络信标来限定,并由充当父节点的终端节点发送,第一个时隙为 PAN 的信标帧。信标帧在每一个超帧的第一个时隙中进行传输。如果主节点不使用超帧结构,那么,它将关掉信标的传输。信标主要用于使各从节点与主协调器同步、识别 PAN 以及描述超帧的结构。任何从节点如果想在两个信标之间的竞争接入期间(CAP)进行通信,则需要使用具有时隙和冲突载波检测多路接入(CSMA/CA)机制同其他节点进行竞争通信,只有在当前时隙获得信道访问权限的节点才能在该时隙内进行发送或接收帧。需要处理的所有事务将在下一个网络信标时隙前处理完成。在免竞争期(CFP),数据的传输不使用 CSMA/CA 机制。只要设备分配了 GTS,则设备就可在该 GTS 包含时隙内直接进行数据的传输。

为减小节点的功耗,将超帧分为两个部分,即活动部分和静止部分。在静止部分时,主协调器与 PAN 的节点不发生任何联系,进入一个低功率模式,以达到减小节点功耗的目的。

7.3.1.5 链路

链路包含时间和频率,决定节点如何占用时隙进行数据传输。链路的类型包括发送链路、接收链路以及共享发送链路。其中,在共享发送链路,节点可同时竞争使用该链路发送数据。而在发送链路和接收链路,只能允许指定的节点利用该链路收发数据。

7.3.2 自适应跳信道

7.3.2.1 自适应跳信道功能概述

在高可靠低时延无线网络中,网络节点应支持自适应跳信道功能。

自适应跳信道技术是短距离无线通信网中一种主要的抗干扰技术。高可靠低时延无线网络的信道序列可由网络管理者预先指定,同时可采用 3 种跳信道方式。用户指定跳信道序列和间隔时间等参数后,可由硬件直接完成频率管理,在发送数据时跳到指定的信道上。

7.3.2.2 自适应跳信道方式

高可靠低时延无线网络支持自适应跳信道通信方式,跳信道序列由网络管理者指定。

高可靠低时延无线网络支持 3 种跳信道方式,它们分别为自适应频率切换(AFS)、自适应跳频(AFH)和时隙跳频(TH):

- a) 自适应频率切换(AFS):在超帧结构中,信标阶段、竞争接入阶段和非竞争接入阶段在不同的超帧周期根据信道质量按照跳信道序列进行更换信道。
- b) 自适应跳频(AFH):根据超帧每个时隙所在信道的信道质量进行切换信道,信道质量通过误包率进行评估,超过一定的阈值则认为该信道是差的信道,则将该信道从信道列表中屏蔽,并广播全网;当该信道由差状态变为良好状态时,则将该信道从信道列表中恢复,然后通知网络中的设备进行解除。非活动期的簇内通信段采用 AFH 跳频机制。
- c) 时隙跳频(TH):时隙跳频主要应用在超帧的非活动期的 Mesh 网络通信过程,按照预先设定的跳信道序列,每次新的时隙到来就按照序列切换信道,不管信道的质量是好或差。

7.3.2.3 自适应跳信道系统

自适应跳信道系统在跳信道通信过程中自适应地选择好的信道,实时屏蔽被干扰的信道,拒绝使用曾经用过但传输不成功的信道,从而提高跳信道通信中接收信号的质量。

自适应跳信道通信的主要过程一般分为通信链路建立、信道信息采集和通信保持三个阶段:

- a) 通信链路建立阶段:建立同步,在保证通信双方时钟同步、帧同步的基础上,确保双方跳信道序列的同步;
- b) 信道信息采集阶段:终端节点对信道的误包率、重传次数以及链路质量等信息进行采集统计,将信道信息发送给接入点;接入点根据信道质量评估准则确定被干扰的信道,并把被干扰的信道通过黑名单技术通知对方,使网络的设备同时删除被干扰的全部信道,跳信道序列保持一致,并在确定的时刻同时进入自适应跳信道通信阶段;
- c) 通信保持阶段:由于信道条件的变化(如终端节点位置的变化或干扰环境的改变等),接入点的信道质量评估单元会将变化的检测结果通过广播方式通知网络节点,及时屏蔽跳信道序列中被干扰的信道,并保证通信的设备跳信道序列保持一致。

根据上述内容,一个自适应跳信道系统参考案例如下:

终端节点周期性发送本节点的信道质量状况给网络的接入点,接入点的信道质量评估单元监测终端节点所有信道的质量状况,并根据可靠的信道质量评估算法及接收信号的质量判定信道的好坏,从而选出可用的信道,根据评估结果更新信道黑名单信息,并将黑名单信息通过广播通知终端节点;终端节点收到数据包,根据黑名单信息修改本节点的跳信道列表,然后按照新的信道列表进行跳信道发送/接收数据。

节点在发送/接收链路下先搜索发送消息队列,如果有匹配的数据需要发送,则按照发送时隙内的

发送时序来发送数据,如果没有找到匹配的数据,则打开接收机,按照接收时隙内的接收时序来接收数据。

7.3.2.4 信道评估机制

7.3.2.4.1 信道序列选取

信道选取序列将 16 个信道分成两种类型信道,分别为专用信道和一般信道:

- a) 专用信道主要用于节点的入网、簇内管理、重传,对信道质量要求较高,因此选用信道受干扰的几率比较小的信道作为其专用信道;
- b) 其余的信道作为一般信道,用于一般数据的发送与接收。

为了提高网络的抗干扰性,16 条信道宜按照如下的规则组合成不同的跳信道序列:当一个信道被使用后,它的下一跳信道要与该信道保持 3 个信道以上的间隔。某一信道受到干扰时,下一跳选用的信道应保证不会再在这个干扰的范围内。当网络中包含几个子网节点的时候,同一子网的节点应选择同一个跳信道序列,不同子网之间的节点应选择不相同的跳信道序列。同一时刻,不同子网之间的节点保证在不同的信道上工作,从而避免了节点之间的相互干扰。

7.3.2.4.2 信道序列更新

通信的过程中根据干扰情况随时更新跳信道序列,从跳信道序列中去除被干扰的坏信道,实现收发双方在无干扰的频率集上同步跳信道。根据网络中可使用信道数的不同,提供如下两种方法:

- a) 可使用的信道个数较多:将全部可使用的信道分成两组,一组定义为使用信道序列,另一组为备用信道序列,当使用信道序列中出现被干扰的坏信道时,则随机地从备用信道序列中选出一个可使用的信道来替代该坏信道,这种替代可一直进行下去,直至备用信道序列中没有可使用的信道为止;
- b) 可使用的信道个数较少:不分使用和备用信道序列,所有信道组成一个跳信道序列,当发现被干扰的坏信道时,则可选择当前信道中的下一个好信道来加以替代。

7.3.2.4.3 信道评估时间

信道评估时间的长短会直接影响高可靠低时延无线网络的安全性和实时性。网络的信道评估时间与系统的调度(链路的配置)、超帧周期、跳信道模式、跳信道序列以及信道评估门限值相关。信道评估时间由信道使用频率决定。

7.3.2.4.4 信道评估参数

网络中的每一个节点需要定期对工作的信道进行质量评估。质量评估可根据如下参数:

- a) 误包率(ErrorPacketRate);
- b) RSSI;
- c) LQI;
- d) 重传次数(RetryNum)。

网络中的节点检测出每一条信道的质量状况,将评估结果存储在信道状况报告表中,然后周期地将信道状况报告表发送给接入点。

7.3.2.5 黑名单技术

高可靠低时延无线网络通过黑名单技术来管理网络频谱资源的使用。如果某一信道受到大规模长时间的信道干扰,则该信道被加入黑名单。接入点首先查询设备管理应用进程(DMAP),判断是否收到

设备的信道质量状况报告：

- a) 如果接收到节点的信道报告,则按照信道评估方法对信道进行评估,判断信道是好信道还是坏信道,如果信道是坏信道,修改黑名单信息,并发送信标帧通知网络的设备;节点收到信标帧之后,解析黑名单子域;
- b) 如果与本节点的黑名单属性信息不相同,则立即更新。

7.3.3 确定性调度

7.3.3.1 确定性调度功能概述

高可靠低时延无线网络中对终端节点进行通信调度是基本要求,确定性调度关系到整个网络能否可靠有序地运行。确定性调度的主要功能是在相互竞争的用户之间分配通信资源(如信道、时隙等),从而避免冲突,提高吞吐量和带宽利用率。根据用户配置的参数,可实现网络节点直接监视和控制超帧的CAP、CFP、簇内通信、簇间通信、休眠各时段的到达时间,并在时段按照调度规则从发送缓冲中自动发送数据。支持自适应时段调节机制,还可动态调节休眠时段长度,降低网络的功耗。

7.3.3.2 资源分配者

针对不同网络拓扑,资源分配者不同:

- a) 在网状拓扑网络中,调度是由接入点为充当父节点的终端节点分配时隙和信道等资源,其中包括父节点在网络中通信所需资源和父节点分配给其星型网内的终端节点的通信资源;
- b) 在星型拓扑网络中,调度是由父节点为终端节点分配资源,使父节点的资源与终端节点集合在一起。

7.3.3.3 通信调度实体结构

通信调度实体结构共包括 5 个模块:时隙模块、链路模块、超帧模块、跳信道模块和邻居模块:

- a) 时隙模块定义了发送时隙和接收时隙的时序,并完成与跳信道模块中跳频信息的结合;
- b) 链路模块查看链路表,首先找到当前时隙优先级最高的链路,其次根据该链路所属超帧的跳信道序列和时隙偏移进行跳信道,然后按照发送时隙的时序发送数据或按照接收时隙的时序接收数据,其中包括确认帧的接收或发送;
- c) 超帧模块是一组由信标帧标、活跃期和非活跃期组成的时隙集合,主要实现设备时间资源管理;
- d) 跳信道模块支持三种多信道跳频机制,分别是自适应频率切换、自适应跳频和时隙跳频;
- e) 邻居模块添加邻居设备的通信状况信息(如通信链路质量等)。

通信调度实体中的五个部分组成紧密联系、相辅相成、不可分割的整体。

7.3.3.4 通信调度

高可靠低时延无线网络给出参考通信调度的逻辑结构如图 13 所示,企业用户可对其调度逻辑图不采用或对其进行拓展。图 13 中发送数据缓存队列存有 4 个数据链路层协议数据单元,数据 1 的目的地址是节点 A,数据 2 的目的地址是节点 B,数据 3 的目的地址是节点 A,数据 4 的目的地址是节点 B。超帧表中超帧 1 的优先级高于超帧 2 的优先级,并与跳频序列相对应。每个超帧包含 8 条链路(图中未完全画出),超帧 1 的时隙 2 是一个接收链路(R),超帧 2 的时隙 2 是一个发送链路(T),发送目的地址为节点 B 的数据。链路优先级解决了通信调度实体的通信链路冲突问题,它取决于链路类型和它所属的超帧优先级。发送链路和接收链路的优先级高于发送/接收链路,发送/接收链路的优先级高于空闲链路。如果在某时隙,通信调度实体具有多个发送链路或接收链路,则它们所属超帧的优先级就决定了链路优先级。高可靠低时延无线网络通信调度实体规定发送一个数据单元和接收该数据单元的确认帧应在一个时隙内完成,如果接收到确认帧,则认为数据发送成功,然后从发送数据缓存队列中删除该数据

单元,否则进行差错处理。

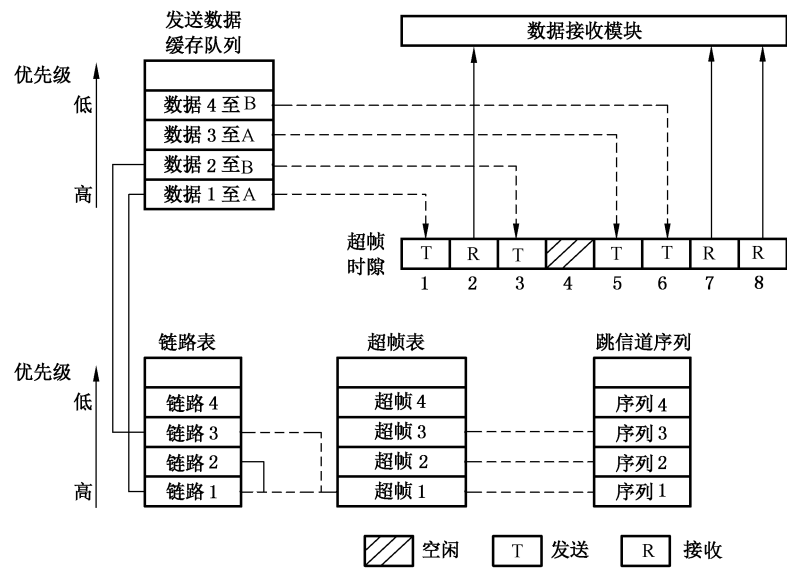


图 13 高可靠低时延无线网络典型的通信调度逻辑结构

高可靠低时延无线网络通信调度实现流程如图 14 所示,当一个时隙开始时即触发通信调度实体,根据超帧信息和链路信息决定该时隙的任务,首先查看链路表,找到当前时隙优先级最高的链路,根据链路所属超帧的跳信道序列和时隙偏移进行跳信道。然后根据链路属性判断链路类型,如果是空闲链路,则结束;如果是发送链路则在发送数据缓存队列找到匹配的优先级最高的数据单元;如果是接收链路则打开接收机,按照接收时隙的时序接收数据;如果是发送/接收链路,则在发送数据缓存队列找到匹配的优先级最高的数据单元,最后按照发送时隙的时序发送数据。

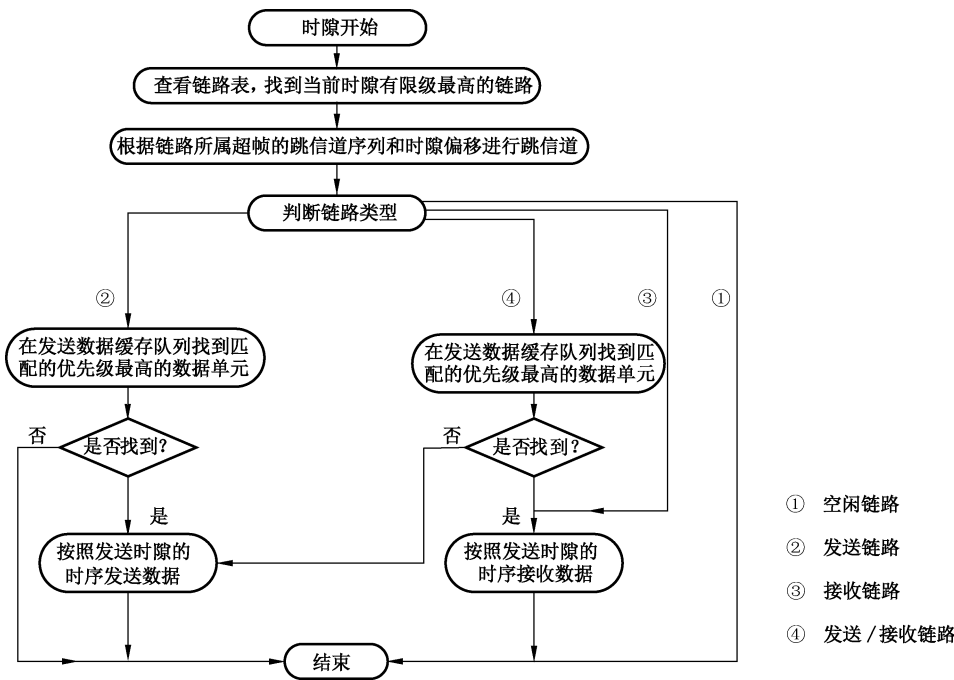


图 14 高可靠低时延无线网络典型通信调度实现流程

参 考 文 献

- [1] GB/T 26790.1—2011 工业无线网络 WIA 规范 第 1 部分：用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范
-

