

Q/GDW

国家电网有限公司企业标准

Q/GDW 12020—2019

输变电设备物联网微功率无线网 通信协议

Micro-power wireless network communication protocol for the internet of
power transmission and transformation equipment

2020 - 11 - 27 发布

2020 - 11 - 27 实施

国家电网有限公司

发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 缩略语.....	2
5 网络拓扑与协议栈结构.....	3
5.1 网络拓扑.....	3
5.2 协议栈结构.....	4
6 物理层协议规范.....	4
6.1 物理层选型.....	4
6.2 帧结构.....	5
7 媒体接入控制层协议规范.....	7
7.1 媒体接入控制层组成.....	8
7.2 媒体接入控制层帧结构.....	8
7.3 时间同步.....	12
7.4 接入过程.....	14
附录 A（资料性附录） CSS 物理层.....	20
附录 B（资料性附录） IEEE802.15.4 物理层.....	24
附录 C（资料性附录） 默认配置参数.....	27
附录 D（资料性附录） 输变电物联网传感终端数据格式.....	28
编制说明.....	30

前 言

为规范输变电设备物联网感知层微功率传感终端在采用无线通信方式接入时的通信协议，制定本标准。

本标准由国家电网有限公司设备管理部提出并解释。

本标准由国家电网有限公司科技部归口。

本标准起草单位：国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、国网江苏省电力有限公司、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、东南大学、国网天津电力有限公司、国网河北电力有限公司、国网浙江电力有限公司、国网安徽电力有限公司、国网四川电力有限公司、珠海一多监测科技有限公司、南京英锐祺科技有限公司、西安金源电气股份有限公司、杭州休普电子技术有限公司、江苏大烨物联科技有限公司、北京国网富达科技发展有限责任公司。

本标准主要起草人：胡成博、张国江、李勇、张军、黄强、刘洋、陶风波、邵进、郑敏、贾骏、秦剑华、杨霄、路永玲、姚楠、王真、徐江涛、刘洪、张兴辉、王如山、张在琛、刘创华、高树国、朱义勇、季坤、熊泽群、李旭旭、李隆基、张克谦、丁敬、赵常威、罗磊、吴亮、汪俊、吴斌、李小兵、吴孝兵、王国华、王威、解玉文。

本标准首次发布。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至国家电网有限公司科技部。

输变电设备物联网微功率无线网通信协议

1 范围

本标准规定了输变电设备物联网传感终端微功率无线接入协议，包括通信网络拓扑与协议栈结构、物理层协议规范和媒体接入控制层协议规范。

本标准适用于输变电设备物联网传感终端的微功率无线通信过程。

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。

LoRaWAN™ 1.1 Specification LoRaWAN™ 1.1 规范

IEEE Std 802.15.4TM-2015 LoRa 低速率无线网络标准(Standard for Low-Rate Wireless Networks)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

传感终端 sensor

输变电设备物联网感知层中的终端设备，可实现对输变电设备运行状态感知，并通过无线或者有线方式接入汇聚节点或接入节点。

3.2

微功率无线通信 micro-power wireless communication

传感终端使用 470-510MHz 频段且发射功率小于 50mW，或者使用 2400-2483.5MHz 频段且发射功率小于 10mW 无线通信技术。

3.3

频分多址（FDMA） frequency division multiple access

把总带宽分隔成多个频道，每个用户占用一个频道，并且不同的用户占用不同的频道。

3.4

时分多址（TDMA） time division multiple access

把时间分割成互不重叠的时段，再将时段分割成互不重叠的时隙，每个用户被分配一个时隙。依据时隙区分来自不同地址的用户信号，从而完成多址连接。

3.5

模糊时分多址（模糊 TDMA） imprecise time division multiple access

基于TDMA的时间段划分，时间段远大于单个用户实际需求的传输时间，在同一个时间段内可支持多个用户随机竞争进行数据传输。

3.6

线性调频扩频 chirp spread spectrum

在一个周期内，发射的射频脉冲信号载频的频率作线性变化的调制方式。

3.7

接入节点 access node

输变电设备物联网的感知层中的通信主设备，具备边缘计算、自组网和终端接入的功能。

3.8

汇聚节点 sink node

输变电设备物联网的感知层中的通信中继设备，具备计算、自组网和终端接入等功能。

3.9

微功率无线接入网 micro-power wireless access networks

输变电设备物联网传感终端以微功率无线通信的方式接入到汇聚节点，从而构建起由多个汇聚节点和传感终端所组成的数据传输业务承载网络，以下简称为“无线接入网”。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ACK: 确认 (Acknowledgement)

BW: 带宽 (Bandwidth)

CR: 编码率 (Coding Rate)

CSS: 线性调频扩频 (Chirp Spread Spectrum)

FEC: 前向纠错 (Forward Error Correction)

GFSK: 高斯频移键控 (Gauss frequency Shift Keying)

NWK: 网络层 (Network Layer)

MAC: 媒体接入控制 (Media Access Control)

MAC Payload: 媒体访问控制层负载 (Media Access Control Payload)

MIC: 信息完整性校验 (Message Integrity Check)

O-QPSK: 偏移四进制相移键控 (Offset-Quadrature-Phase-Shift-Keying)

PSD: 功率谱密度 (Power spectral density)

REQ: 请求 (Request)

RF: 无线电频率 (Radio Frequency)

RFU: 保留备用 (Reserved For Use)

RSP: 响应 (Response)

SF: 扩频因子 (Spreading Factor)

5 网络拓扑与协议栈结构

5.1 网络拓扑

5.1.1 总体架构

网络拓扑结构包含汇聚节点和传感终端，网络配置为星型网络模型，即多个传感终端与一个汇聚节点直接相连，如图1所示。本网络模型支持两种通信传输，分别为单向传输和双向传输。

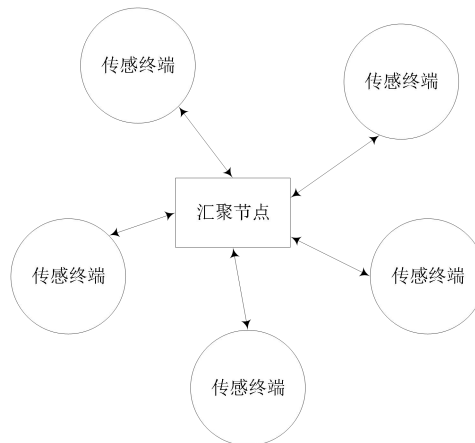


图 1 星型网络模型

5.1.2 单向传输

单向传输指汇聚节点与传感终端在一个单独的信道上直接相连，传感终端通过上行链路上传数据，如图2所示。单向传输只能在传感终端发起，汇聚节点进行接收。

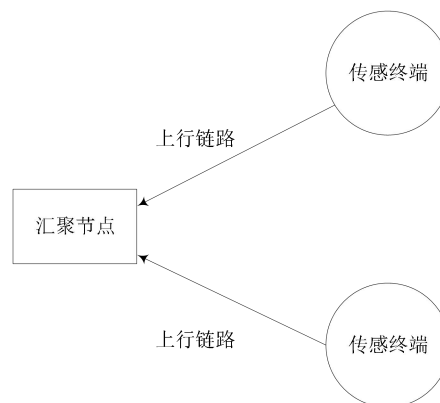


图 2 单向传输

5.1.3 双向传输

双向传输指传感终端和汇聚节点通过给定信道的上行链路和下行链路进行数据传输，如图3所示。多个传感终端有序接入同一个汇聚节点时，双向传输由传感终端在上行链路发起，汇聚节点在下行链路上进行应答。

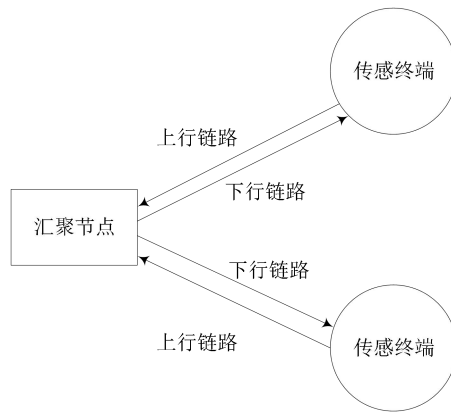


图 3 双向传输

5.2 协议栈结构

5.2.1 分层结构

微功率无线网通信协议分为物理层（PL）和媒体接入控制层（MAC）两部分，如图 4 所示。其中，物理层用于物理比特流的数据传输，媒体接入控制层用于数据链路的连接和管理。网络层部分是由上层通信协议决定，不在本协议中进行规定。

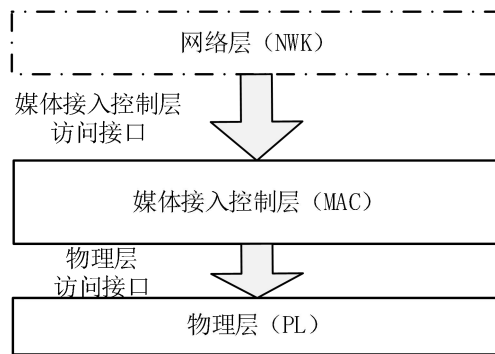


图 4 微功率无线网通信协议架构

5.2.2 物理层

物理层负责处理比特流的物理传输，包括发送和接收，物理层具有调制与解调、发送状态和接收状态的切换等功能。

5.2.3 媒体接入控制层

媒体接入控制层用于处理逻辑链路的连接和控制问题，包括数据包顺序传输、交互应答、接入控制、信道管理、组帧和时间同步、传输控制参数配置等功能。

6 物理层协议规范

6.1 物理层选型

物理层通过无线物理信道发送和接收物理层协议数据单元,并对物理层数据信息和控制信息进行管理,物理层宜在以下类型中选择其一,其它符合国家电网公司无线通信管理要求的物理层调制方式和通信频段,经论证后满足本标准第7章媒体接入控制层协议规范的前提下,可以参照本标准执行:

- a) CSS物理层:工作在470-510MHz或者2400-2483.5MHz频段,采用线性调频扩频(CSS)调制。线性调频扩频(CSS)调制应符合LoRaWAN™ 1.1 Specification 中第3章对物理层的规定。
- b) IEEE 802.15.4物理层:工作在2400-2483.5MHz频段,采用偏移四进制相移键控(O-QPSK)调制。偏移四进制相移键控(O-QPSK)调制应符合IEEE Std 802.15.4™-2015中第12章对物理层的规定。

6.2 帧结构

6.2.1 帧结构定义

物理层的帧结构如表1所示。

表1 物理层帧结构

前导	物理层头 (可选)	物理层头校验 (可选)	物理层负载	物理层负载校验 (可选)
注1: CSS 物理层帧结构参见附录 A, 物理层头、物理层头校验、以及物理层负载校验字段为必选。				
注2: IEEE 802.15.4 物理层帧结构参见附录 B, 不需要物理层头校验字段和物理层负载校验字段, 物理层头为必选。				

6.2.2 工作频段

本标准共设置2个工作频段:470-510MHz频段和2400-2483.5MHz频段。

6.2.3 CSS 物理层参数

本标准采用的CSS物理层参数见表2和表3, CSS物理层470-510MHz频段和2400-2483.5MHz频段信道分配表见表4和表5, CSS物理层发送功率见表6和表7, CSS物理层的调制和传输及RF参数要求参见附录A。

表2 2400-2483.5MHz 频段 CSS 物理层配置表

物理层配置编号	扩频因子	带宽 (kHz)	编码率	前导长度	发射功率	备注
1	8	812.5	CR4/5	6 字节	<10mW	默认业务信道和控制信道配置方式
2	7	812.5	CR4/5	6 字节	<10mW	
3	6	812.5	CR4/5	6 字节	<10mW	
4	5	812.5	CR4/5	6 字节	<10mW	
5	10	812.5	CR4/5	6 字节	<10mW	
6	6	1625	CR4/5	6 字节	<10mW	

表 3 470-510MHz 频段 CSS 物理层配置表

物理层配置编号	扩频因子	带宽 (kHz)	编码率	前导长度	发射功率	备注
1	8	500	CR4/5	6 字节	<50mW	默认业务信道和控制信道配置方式
2	7	500	CR4/5	6 字节	<50mW	
3	6	500	CR4/5	6 字节	<50mW	
4	5	500	CR4/5	6 字节	<50mW	
5	10	500	CR4/5	6 字节	<50mW	

表 4 CSS 物理层 470-510MHz 频段信道分配表

信道编号	信道类型	中心频率
1	默认控制信道	470.5MHz
2	可配信道	471.5MHz
.....
n	可配信道	(469.5+n) MHz
.....
40	可配信道	509.5MHz

注 1: 默认业务信道频点为 494.5MHz。
注 2: n=1、2、...、40。除默认控制信道频点和默认业务信道频点外, 其它频点可以根据带宽和业务要求进行选定。

表 5 CSS 物理层 2400-2483.5MHz 频段信道分配表

信道编号	信道类型	中心频率
1	默认控制信道	2400.5 MHz
2	可配信道	2401.5MHz
.....
n	可配信道	(2399.5+n) MHz
.....
83	可配信道	2482.5MHz

注 1: 默认业务信道频点为 2424.5MHz。
注 2: n=1、2、...、83。除默认控制信道频点和默认业务信道频点外, 其它频点可以根据带宽和业务要求进行选定。

表 6 CSS 物理层 2400-2483.5MHz 发送功率

发送功率编号	发送功率
80	-20dBm
81	-19dBm
.....
n	(n-100) dBm
.....

表 6 (续)

发送功率编号	发送功率
109	9dBm
110	10dBm
注: n=80、81、…、110。	

表 7 CSS 物理层 470-510MHz 发送功率

发送功率编号	发送功率
80	-20dBm
81	-19dBm
……	……
n	(n-100) dBm
……	……
116	16dBm
117	17dBm
注: n=80、81、…、117。	

6.2.4 IEEE 802.15.4 物理层参数

本标准采用的IEEE 802.15.4物理层参数见表8, IEEE 802.15.4物理层2400-2483.5MHz频段信道分配见表9, IEEE 802.15.4物理层的调制和传输及RF参数要求参见附录B。

表 8 IEEE 802.15.4 物理层参数

频段	2400-2483.5MHz
发射功率	<10mW

表 9 IEEE 802.15.4 物理层 2400-2483.5MHz 频段信道分配表

信道编号	信道类型	中心频率
1	控制信道	2403.0 MHz
2	可配信道	2404.0 MHz
……	……	……
n	可配信道	(2402.0+n) MHz
……	……	……
80	可配信道	2482.0MHz
注 1: 默认业务信道频点为 2427.0MHz。		
注 2: n=1、2、…、80。除默认控制信道频点和默认业务信道频点外, 其他频点可以根据带宽和业务要求进行选定。		

7 媒体接入控制层协议规范

7.1 媒体接入控制层组成

媒体接入控制层在物理层提供服务的基础上向上层提供服务，媒体接入控制层与物理层的帧结构关系如图5所示。

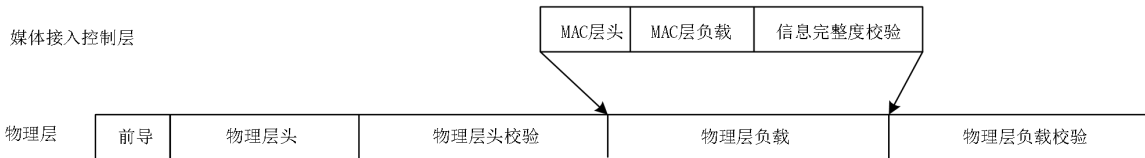


图 5 各层帧结构关系

7.2 媒体接入控制层帧结构

7.2.1 字段组成

传输数据采用帧结构作为基本单元，帧结构见表10，物理层负载长度为9到264字节，用来记录物理层需要传输的数据。

表 10 物理层负载结构

字段名称	MAC 层头	MAC 层负载	信息完整度校验
字段长度	(8 字节)	(0-255 字节)	(1 字节)
注 1: MAC 层头描述帧的类型、负载字段的长度和传感终端 ID 等配置信息。 注 2: MAC 层负载承载 MAC 层传输的数据。此字段的数据结构根据帧类型字段的定义进行结构组织和编码，其承载的数据长度还受限于物理层约束。 注 3: 信息完整度校验用于对 MAC 层头和 MAC 层负载进行校验，判断发送数据是否被第三方篡改。校验方法是 将 MAC 层头和 MAC 层负载以 1 字节为单位进行累加，累加结果作为信息完整度校验字段的值填入信息完整度校验字段。			

7.2.2 MAC 层头

7.2.2.1 MAC 层头结构

MAC层头由帧类型 (MType)、通信信令指示 (CC_Ind)、加密指示 (Key_If)、MAC层负载长度 (Length) 和传感终端ID等字段组成，见表11。

表 11 物理层负载结构

字段名称	帧类型	通信信令指示	加密指示	MAC 层负载长度	传感终端 ID
字段长度	(4 比特)	(1 比特)	(3 比特)	(1 字节)	(6 字节)
注: 除特殊说明, 本协议各字段均采用高位字节在前方式传输。					

7.2.2.2 帧类型

帧类型字段长度为4比特，定义帧的具体类型和功能。帧类型的具体编码及对应的含义见表12。

表 12 帧类型内容

比特序列	帧类型（英文）	帧类型（中文）
0b0000	MESSAGE	业务信道信息帧
0b0001	REQ	控制信道请求帧
0b0010	RSP	控制信道应答帧
0b0011	RSP_END	控制信道应答终帧
0b0100	BURST	突发数据帧
0b0101	ACK	控制信道确认帧
其他	RFU	保留备用
注：0b 表示二进制数字。		

7.2.2.3 通信信令指示

通信信令指示（CC_Ind）用于指示MAC负载是业务或通信指令；取值0b1表示控制报文，取值0b0表示是通信指令。该指示只在控制信道应答帧（RSP帧）或控制信道应答终帧（RSP_END帧）中有效。

7.2.2.4 加密指示

加密指示字段表明发送的MAC层负载和信息完整性校验是否进行了加密，长度为3比特；取值0表示不加密；取值1表示加密。

7.2.2.5 MAC层负载长度

MAC层负载长度字段定义了MAC层负载字段的字节长度，此字段长度为1字节，因此MAC层负载字段的长度为0到255字节。

7.2.2.6 传感终端ID

传感终端ID是传感终端设备在网络中的唯一标识，每个传感终端都会被分配一个唯一的传感终端地址。传感终端ID字段的长度为6字节，传感终端ID的构成参见附录表D。

7.2.3 业务信道信息帧

业务信道信息帧（MESSAGE）为在业务信道中传输的一种帧的类型，其功能主要为将发送端的数据按照指定的数据格式以及传输规则有序地传输给接收端，用于传感终端上报监测数据报文，报文格式见附录D。为减少数据传输，省略了检测数据报文中的传感终端ID，只保留MAC帧头中的传感终端ID。

7.2.4 控制信道突发帧

控制信道突发帧（BURST）为在控制信道中传输的一种帧的类型，用于传感终端上报告警数据报文，报文格式见附录D。为减少数据传输，省略告警数据报文中的传感终端ID，只保留MAC帧头中的传感终端ID。

7.2.5 控制信道请求帧

控制信道请求帧（REQ）为在控制信道中传输的一种帧的类型，其功能主要为发送端以一定的传输规则向接收端发送信息，并请求回复。发送端根据需求将数据写入请求数据类型字段。控制信道请求帧的MAC层负载字段的结构见表13，由信息类型和保留备用组成。

表 13 控制信道请求帧的 MAC 层负载

信息类型	保留备用
1 字节	1 字节
注 1：信息类型字段取值范围是 0~2，取值为 0 表示“任意类型”，取值为 1 表示“通信指令”，取值为 2 表示“控制报文”。	
注 2：信息类型字段的默认值为 0；保留备用字段的默认值为 0。	

7.2.6 控制信道应答帧

7.2.6.1 控制信道应答帧功能

控制信道应答帧可承载通信指令或者控制报文。控制信道应答帧（RSP）是在控制信道中传输的一种帧的类型，其功能主要为接收端在接收到控制信道请求帧后，根据控制信道请求帧的信息类型字段向发送端进行控制信息的回复。通信指令和控制报文不能在同一个的RSP帧或控制信道应答终帧（RSP_END）内传输。

7.2.6.2 通信指令

MAC帧头中的通信指令指示取值0b0。为减少传输的交互次数，把多个通信指令组合成单帧进行发送，单帧的数据结构见表14，单个RSP帧或RSP_END帧承载的数据不能超过MAC负载上限，即255字节。每个通信指令数据由通信指令类型和通信指令内容组成见表15，其中通信指令类型和内容字段的定义见表16。

表 14 通信指令数据结构

通信指令 1	通信指令 2	通信指令 i	通信指令 N
注 1：通信指令 i 字段为回复的第 i 个通信指令，通信指令 N 字段为为回复的最后一个通信指令。					
注 2：每组数据采用统一的数据格式，具体格式如表 16。					

表 15 通信指令数据格式

数据 i	
通信指令类型（1 字节）	通信指令内容（变长）

表 16 通信指令类型和内容定义

通信指令分类	通信指令类型取值	通信指令内容长度/字节	单位
业务周期长度	0b00000000	4	ms
控制周期长度	0b00000001	2	/业务周期
延迟	0b00000010	4	ms
最大随机扰动时长	0b00000011	1	/5ms

表 16 (续)

通信指令分类	通信指令类型取值	通信指令内容长度/字节	单位
业务信道频点配置 (编号)	0b00000100	1	-
物理层参数配置 (编号)	0b00000101	1	-
REQ 帧等待回复周期	0b00000110	1	ms
BURST 帧等待回复周期	0b00000111	1	ms
发送功率配置 (编号)	0b00001000	1	-
保留备用	0b00001000~0b01111111	-	-
用户自定义	0b10000000~0b11111110	-	-
业务周期+控制周期组合+ 延迟+随机退避时长	0b11111111	11	-

注 1: 业务周期长度定义为发送端发送业务信息的周期。

注 2: 控制周期长度定义为发送端发送控制信息请求的周期, 以业务周期 (默认或配置后的业务周期) 为单位。控制周期为 0 时, 发送端不发射控制信息请求帧; 控制周期为 1 时, 每个业务周期发送 1 次控制信道请求帧, 不发送业务信道信息帧; 控制周期为 m 时, 每 m 个业务周期, 发送一次控制信道请求帧, 发送 m-1 次业务信道信息帧。

注 3: 延迟时间定义为业务信息发送时刻的时间偏移量。

注 4: 最大随机扰动时长定义为发送端发送时刻偏离发射基准时刻的最大允许范围, 以 5ms 为单位。随机扰动时长与延时配合使用, 确定发送端的发射时刻。

注 5: 业务信道频点用于控制业务信道的频点, 默认业务信道频点不支持动态配置, 默认业务信道被配置在固定的频点, 并且采用默认的物理层配置。传感终端可以在汇聚节点的指派下, 从默认业务信道频点转移到其它业务信道频点下进行通信。

注 6: 物理层参数配置用于指定业务信道和控制信道的物理层参数配置编号, 默认物理层参数不支持动态配置。传感终端可以在汇聚节点的指派下, 按指定的物理层参数配置编号进行配置。

注 7: REQ 帧等待回复周期定义为发送端发送 REQ 帧后等待回复的时间。

注 8: BURST 帧等待回复周期定义为发送端发送 BURST 帧后等待回复的时间。

7.2.6.3 控制报文

MAC 帧头中的通信信令指示 (CC_Ind) 取值 0b1。MAC 层负载内容承载控制报文, 报文格式见附录 D。为减少数据传输, 省略报文中的传感终端 ID, 只保留 MAC 帧头中的传感终端 ID。

7.2.7 控制信道应答终帧

控制信道应答终帧 (RSP_END) 为控制信道应答帧的扩展。当发送端回复控制信道应答帧时, 表明发送端发送的信息还没有结束, 此后还会有信息发送。当发送端回复控制信道应答终帧时, 表明此次发送的信息已经结束, 此后没有新帧发送。控制信道应答终帧的 MAC 层负载字段与控制信道应答帧相同, 参见 7.2.5 小节。

7.2.8 控制信道确认帧 (ACK)

控制信道确认帧为在控制信道中传输的一种帧的类型, 其功能主要为接收端在接收到需要确认回复的帧后, 向发送端发送控制信道确认帧进行确认。控制信道确认帧的使用情况见表 17。控制信道确认帧的 MAC 层负载字段定义了控制信道确认帧的类型, 长度为 1 字节, 具体的编码及对应含义见表 18。

表 17 控制信道确认帧的使用

发送帧类型	是否需要回复 ACK 帧 (Y/N)
业务信道信息帧	N
控制信道请求帧	N
控制信道应答帧	N
控制信道应答终帧	Y
控制信道突发帧	Y

表 18 控制信道确认帧的 MAC 层负载字段结构

比特序列 b7b6b5b4b3b2b1b0	ACK 帧类型 (英文)	ACK 帧类型 (中文)
0b00000001	RSP_END_ACK	RSP_END 帧确认帧
0b00000010	BURST_ACK	BURST 帧确认帧
其它	RFU_ACK	保留

7.2.9 保留备用帧 (RFU)

保留备用帧是用来保留以备使用者需要增加新的定义帧所准备的一种帧的类型。使用者可以根据需要添加的功能，在不与现有的帧发生冲突的情况下，定义设计此帧的结构和编码形式。新的帧格式和编码必须在收发双方设备中同时更新，确保收发双方通信的可靠性。保留备用帧的使用增加了本协议的可扩展性。

7.3 时间同步

7.3.1 时间参数定义

本标准采用FDMA的技术将频段分为业务信道和控制信道两种信道。在每个业务信道上，采用模糊TDMA机制解决信息接入的问题。在每个信道进行详细的时间划分，配置相应的时间参数。可配置的时间参数类型及名称如表19所示。这些参数均可通过控制信道的接入过程进行配置。

表 19 时间可配参数类型及名称

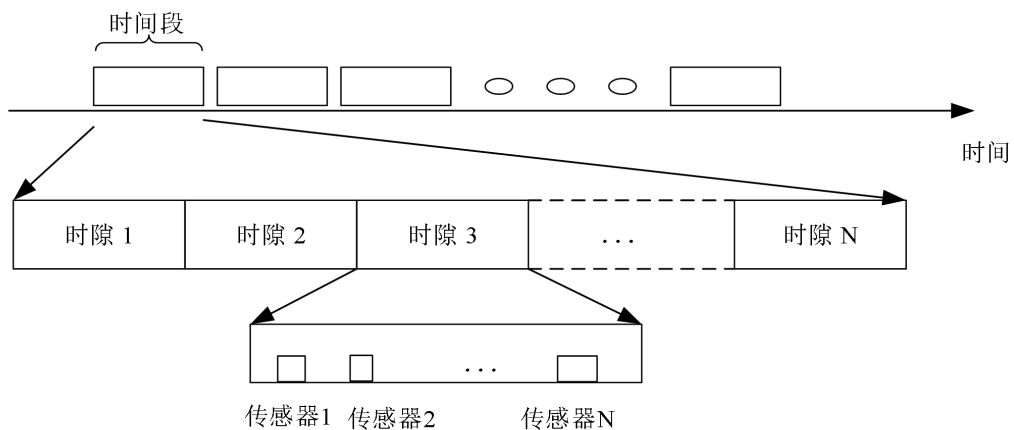
时间定义类型	参数名称	初值	
业务周期长度	Message_Cycle	5min	
业务周期时隙数	Time_Slot	200	
控制周期长度	Control_Cycle	1h	
等待回复周期	Wait_Cycle	470-510MHz 频段	2400-2483.5MHz 频段
		150ms	30ms
连续帧发送间隔	Transmission_Interval	20ms	
最大随机扰动时长	Random_Pert	5 ms	
延迟	Delay	--	

表 19 (续)

注 1: 业务周期长度 (Message_Cycle) 定义为发送端发送业务信息的周期, 即发送端连续两次发送业务信息的时间间隔。
注 2: 业务周期时隙数 (Time_Slot) 定义为一个业务周期内所划分的时隙的个数。
注 3: 控制周期长度 (Control_Cycle) 定义为发送端发送控制信息请求的周期, 即发送端连续两次发送控制信息的时间间隔。
注 4: 等待回复周期 (Wait_Cycle) 定义为发送端等待回复的时间, 即发送端在发送完需要等待回复的帧后, 处于等待接收状态的时间。
注 5: 连续帧发送间隔 (Transmission_Interval) 定义为发送端发送连续多个控制信道应答帧 (RSP) 时, 帧之间的发送间隔。此参数需要小于发送端等待回复时间 (Wait_Cycle)。
注 6: 最大随机扰动时长 (Random_Pert) 定义为发送端控制发送时刻随机数的绝对值的最大值, 默认最大随机扰动时长为 5ms, 也就是随机扰动值为 -5~+5ms 内的随机数。
注 7: 延迟 (Delay) 用于调整业务信道信息帧 (MESSAGE) 的发送时刻, 在下次业务时刻延后对应的时间后再发送。

7.3.2 时间同步过程

本标准采用模糊时隙同步的方案进行时间同步, 减小传感终端的能耗。由汇聚节点将时间分段, 再将每段时间平均分成多个时隙, 且时隙的数量远远小于网络中传感终端的数量。同时每个时隙的长度大于单个传感终端发送一次业务信息的时间长度, 因此每个时隙可以容纳多个传感终端。具体时隙划分如图6所示。



- 注1: 汇聚节点根据接收到的传感终端业务信息所处的时隙, 确定延迟、业务周期长度和控制周期长度三个参数。
- 注2: 传感终端随机发送业务信道信息帧 (MESSAGE), 汇聚节点接收到业务信道信息帧 (MESSAGE) 后, 记录接收到的时间。
- 注3: 汇聚节点计算下一次发送业务信道信息帧 (MESSAGE) 的时刻与此时刻的间隔, 即延迟参数。
- 注4: 汇聚节点在接收到传感终端的控制信道请求帧 (REQ) 后, 将保存在汇聚节点的延迟参数、业务周期长度参数和控制周期长度参数记录在控制信道应答帧 (RSP) 中回复给传感终端。
- 注5: 传感终端根据以上的参数, 调整业务信道信息帧 (MESSAGE) 和控制信道请求帧 (REQ) 的发送时间。通过以上参数的交互, 完成时间的同步。

图 6 时隙划分示意图

7.4 接入过程

7.4.1 接入初始化

汇聚节点中存储两个传感终端列表，分别为白名单和黑名单，初始化时两个名单均为空。接入初始化过程如下：

- a) 白名单记录汇聚节点完成注册的传感终端地址。当汇聚节点收到传感终端发送的消息，若传感终端的地址在白名单中，则进行正常的通信。
- b) 黑名单中记录汇聚节点不进行信息转发的传感终端地址。当汇聚节点收到传感终端发送的消息，若传感终端的地址在黑名单中，则丢弃此帧。
- c) 若汇聚节点收到既不在白名单也不在黑名单中的传感终端发送的业务信息，则汇聚节点认为该传感终端为新加入的传感终端。汇聚节点接收该传感终端的业务信息后，由上层决定该传感终端在当前汇聚节点中的黑白名单属性。

7.4.2 业务信道接入过程

业务信道的接入过程如图7所示，具体过程如下：

- a) 在业务信道的固定时隙，传感终端进行无回复的单向传输，完成业务信息的传输；
- b) 在业务信道上，传感终端在特定时隙从休眠状态中激活，监测业务信道，若为忙，则进入休眠状态，根据业务周期长度等待下一次激活；若为空闲，则随机退避一个时长后向汇聚节点发送业务信道信息帧，随后进入休眠状态，并根据业务周期长度等待下一次激活。
- c) 汇聚节点一直处于等待接收状态，若成功接收到传感终端发送的业务信道信息帧，则保存该业务信息；若接收不成功，则丢弃该业务信道信息帧。

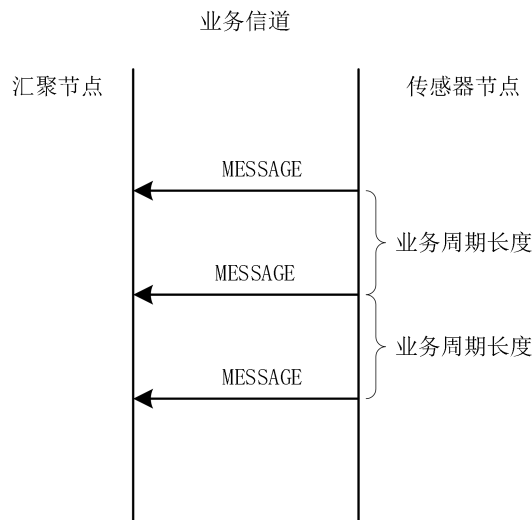


图7 业务信道传输过程

7.4.3 控制信道请求与应答接入过程

7.4.3.1 控制信道请求与应答正常过程

控制信道请求与应答的正常过程如图8所示，具体过程如下：

- a) 传感终端在固定的配置时隙被激活向汇聚节点发送控制信道请求帧，然后进入等待接收状态，长度为等待回复周期（Wait_Cycle）。
- b) 汇聚节点在正确接收到传感终端发送的控制信道请求帧后与白名单中的传感终端地址进行匹配。若匹配成功，则汇聚节点向传感终端发送控制信道应答帧或者控制信道应答终帧；若匹配不成功，则汇聚节点继续处于等待接收状态。
- c) 当汇聚节点需要回复的内容大于一帧的长度时，则连续发送多帧，前N-1帧发送控制信道应答帧（RSP），发送间隔为连续帧发送间隔（Transmission_Interval），最后一帧发送控制信道应答终帧（RSP_END）。
- d) 传感终端每成功接收到一个控制信道应答帧（RSP）后，进入下一个等待回复周期（Wait_Cycle），等待接收下一帧。
- e) 传感终端成功接收到控制信道应答终帧（RSP_END）后，回复控制信道确认帧（ACK）。

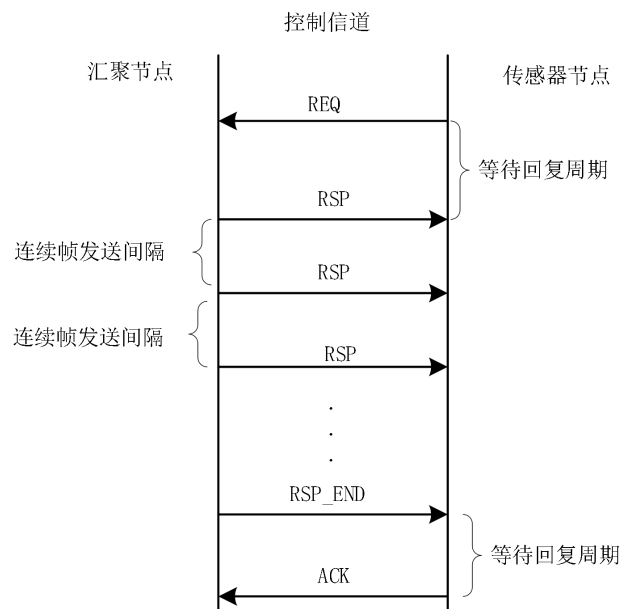


图 8 控制信道配置信息请求与响应过程

7.4.3.2 传感终端请求发送异常

传感终端发送异常指传感终端发送的控制信道请求帧（REQ）由于传输错误或者匹配错误，汇聚节点没有接收成功。传感终端在发送完控制信道请求帧（REQ）后，若在等待回复周期（Wait_Cycle）内没有收到RSP/RSP_END报文，则传感终端进入休眠状态，并在下一个控制周期到达后，再次尝试请求通信。具体异常处理如图9所示。

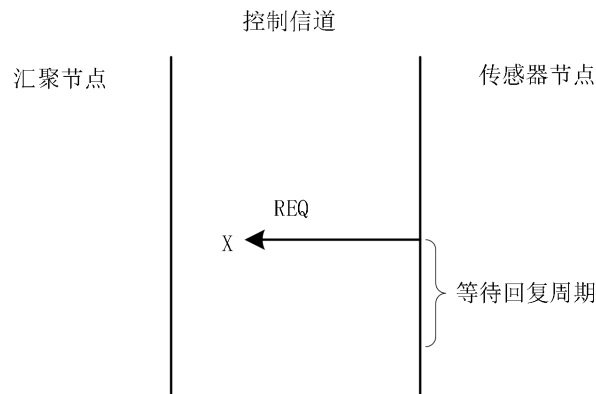


图 9 异常情况 1

7.4.3.3 汇聚节点应答发送异常

汇聚节点发送异常指汇聚节点发送的控制信道应答帧（RSP）或者控制信道应答终帧（RSP_END）由于传输错误或者匹配错误，传感终端没有接收成功。汇聚节点发送异常时，传感终端在等待回复周期（Wait_Cycle）内没有收到回复，则进入休眠状态，根据控制周期长度等待下一次激活，汇聚节点按序发送控制信道应答帧（RSP）和控制信道应答终帧（RSP_END）后，进入等待接收状态，如图10所示。

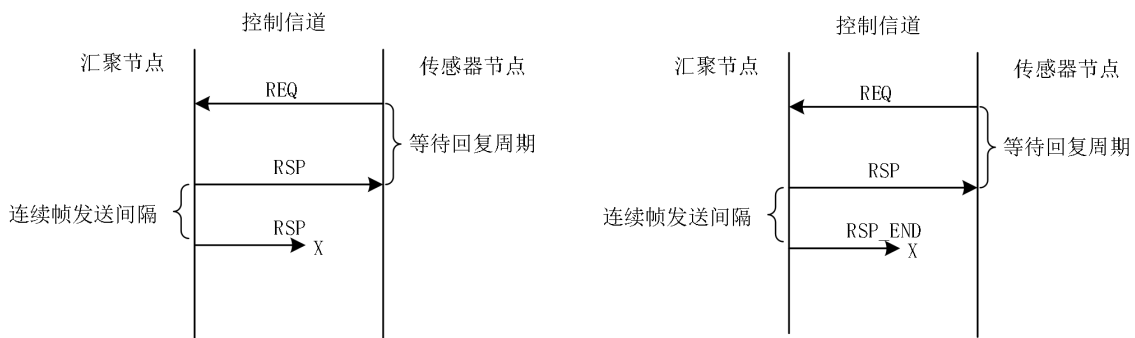


图 10 异常情况 2

7.4.3.4 传感终端确认回复异常

传感终端回复异常指传感终端回复的控制信道确认帧（ACK）由于传输错误或者匹配错误，汇聚节点没有接收成功。传感终端回复异常时，传感终端在成功接收到控制信道应答终帧（RSP_END）后，向汇聚节点回复控制信道确认帧（ACK），然后进入休眠状态，根据控制周期长度等待下一次激活，汇聚节点在发送完控制信道应答终帧（RSP_END）后，进入等待接收状态，如图11所示。

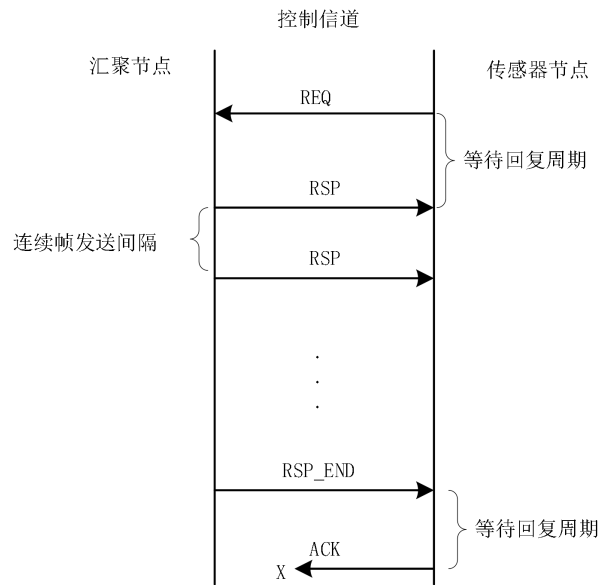


图 11 异常情况 3

7.4.4 控制信道突发信息接入过程

7.4.4.1 控制信道突发信息请求和响应过程

控制信道突发信息接入过程适用于突发性业务的传输。传感终端需要上报突发情况时被激活，在控制信道立刻发送控制信道突发帧（BURST），进入等待回复周期（Wait_Cycle）；若汇聚节点成功接收并完成匹配，则回复控制信道确认帧（ACK）；若汇聚节点没有接收成功，则不回复。传感终端若没有成功接收到控制信道确认帧（ACK），则使用重传机制，直到传感终端成功接收到控制信道确认帧（ACK）或重传次数达到上限，其中默认最大重传次数为3。控制信道突发信息请求和响应过程如图12所示。

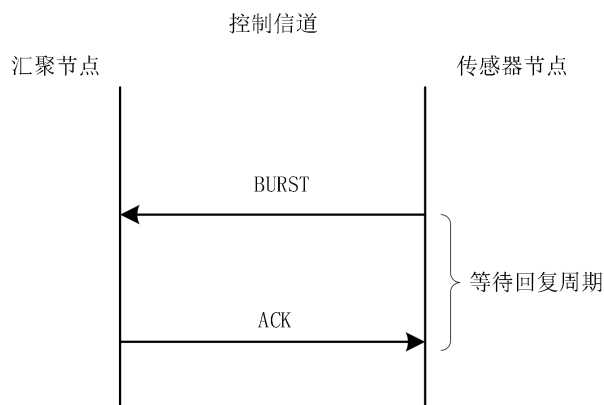


图 12 控制信道突发信息请求和响应过程

7.4.4.2 传感终端突发帧发送异常

传感终端突发帧发送异常指当传感终端发送的控制信道突发帧（BURST）由于传输错误或者匹配错误，汇聚节点没有接收成功。传感终端在等待回复周期（Wait_Cycle）内没有收到相应的控制信道确认帧（ACK），立刻重新发送控制信道突发帧（BURST），重复上述操作；若在最大重传次数内接收到控制信道确认帧（ACK），则停止重发，进入休眠状态；若达到最大次数但没有接收到控制信道确认帧（ACK），则进入休眠状态。具体过程如图13所示。

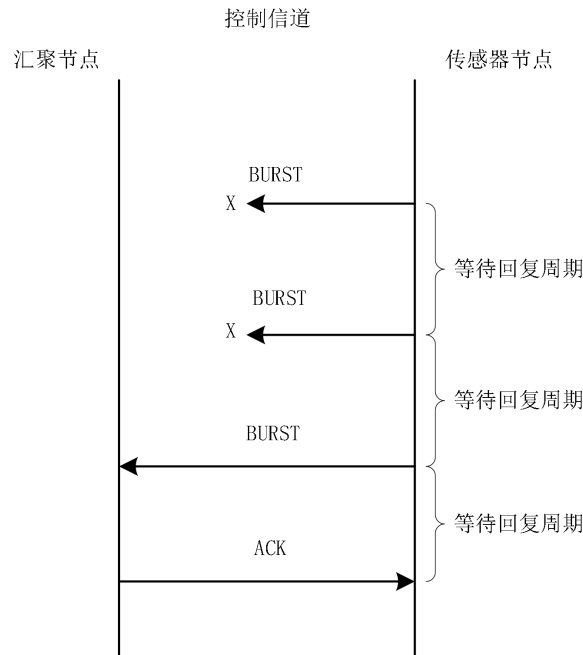


图 13 异常情况 1

7.4.4.2 汇聚节点确认帧发送异常

汇聚节点确认帧发送异常指汇聚节点发送的控制信道确认帧（ACK）由于传输错误或者匹配错误，传感终端没有接收成功。传感终端在等待回复周期（Wait_Cycle）内没有收到相应的控制信道确认帧（ACK），立刻重新发送控制信道突发帧（BURST），重复上述操作；若在最大重传次数内接收到控制信道确认帧（ACK），则停止重传，进入休眠状态；若达到最大次数但没有成功接收到控制信道确认帧（ACK），则进入休眠状态。具体过程如图14所示。

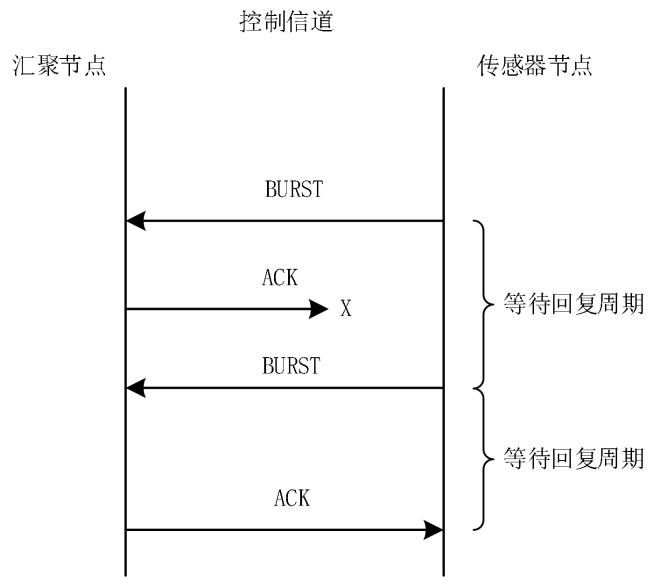


图 14 异常情况 2

附 录 A
(资料性附录)
CSS 物理层

A.1 帧结构

CSS物理层的帧结构参见表A.1。

表 A.1 CSS 物理层帧结构

前导	物理层头	物理层头校验	物理层负载	物理层负载校验
----	------	--------	-------	---------

A.2 总体参数

A.2.1 扩频因子SF

CSS物理层使用扩频技术发送数据，可有效对抗多普勒频移。扩频因子、码片速率和符号速率之间的关系如式（A.1）所示：

$$R_c = SF \cdot R_s \quad (\text{A.1})$$

式中：

R_c —— 码片速率；
 SF —— 扩频因子；
 R_s —— 符号速率。

A.2.2 编码率CR

编码率是指数据流中有效数据（非冗余）所占的比例。对每k位有用信息，编码器总共产生n位的数据，其中n-k是多余的，那么编码率为k/n。CSS物理层采用循环纠错编码进行前向错误检测与纠错。

A.2.3 带宽BW

在本协议中，带宽指设置双边调制带宽。符号速率关系如式（A.2）所示，增加信号带宽相当于提高有效数据速率。码片速率定义如式（A.3）所示。

$$R_s = \frac{BW}{SF} \quad (\text{A.2})$$

$$R_c = \frac{SF}{T_s} \quad (\text{A.3})$$

式(A.2)~(A.3)中：

- R_s ——符号速率；
 BW ——带宽；
 SF ——扩频因子；
 R_c ——码片速率；
 T_s ——符号时间。

A.3 调制和传输

A.3.1 调制方式

CSS物理层使用CSS技术并结合8进制双正交编码，并且提供子啁啾序列划分以及频分策略。在具有不同啁啾方向的不同频率子带中，CSS物理层使用交替时间间隙进行啁啾信号（子啁啾）序列的结合。

A.3.2 波形和子啁啾序列

CSS物理层定义了四种不同的子啁啾序列。每个子啁啾使用时域中的升余弦窗加权。四个单独的啁啾信号（即子啁啾），应连接起来形成一个完整的啁啾符号（子啁啾序列），它占据两个相邻的频率子带。子啁啾共有4种组合，啁啾符号的图形表示如图A.1所示，显然，这四个子啁啾具有线性下啁啾特性或线性上啁啾特性，并且在中心频率处连续。后续啁啾之间的频率不连续性不会影响频谱，因为在这些点处信号幅度将为零。

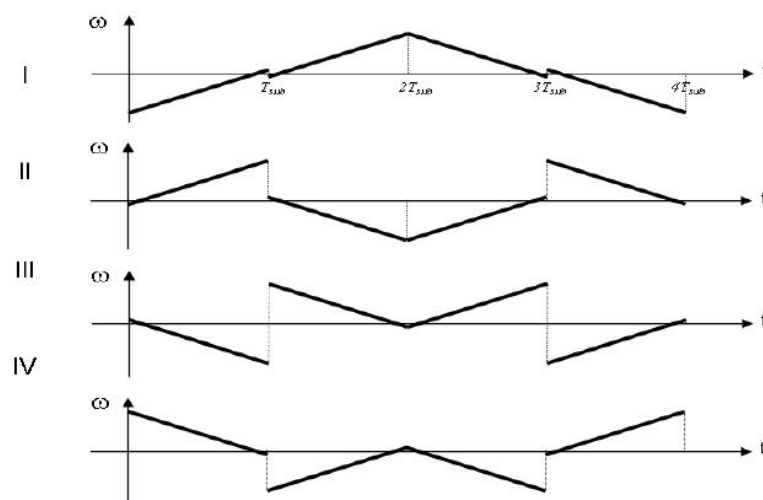


图 A.1 子啁啾的四种不同组合

A.3.3 时隙使用

CSS物理层定义了不同的时间间隙对。如图A.2所示，通过选择时间间隙可以使四个子啁啾序列更接近正交，时间间隔应在后续的啁啾符号之间交替应用。

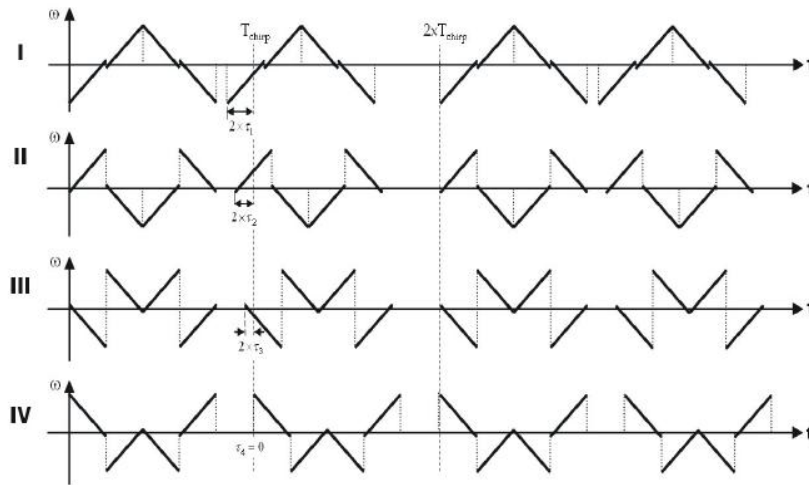


图 A.2 四种不同子啁啾序列的不同时隙对

A.3.4 用于啁啾脉冲整形的升余弦窗口

子啁啾信号应使用此处描述的升余弦时间窗口形成，如图A.3所示，升余弦窗口应用于时域中的每个子啁啾信号。

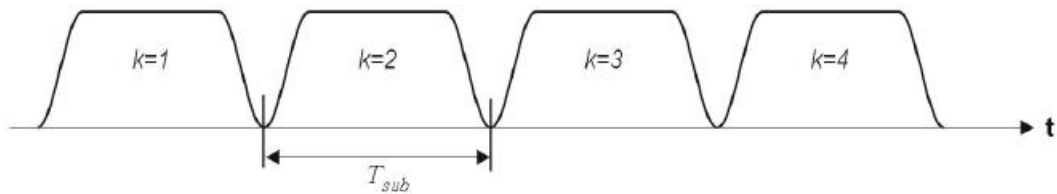


图 A.3 子啁啾时域脉冲整形

升余弦窗口函数定义如式 (A.4) 所示：

$$P_{RC}(t) = \begin{cases} 1 & |t| \leq \frac{(1-\alpha) T_{sub}}{2} \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{(1+\alpha)\pi}{\alpha T_{sub}} \left(|t| - \frac{(1-\alpha) T_{sub}}{2} \right) \right) \right] & \frac{(1-\alpha) T_{sub}}{2} \leq |t| \leq \frac{T_{sub}}{2} \\ 0 & |t| \geq \frac{T_{sub}}{2} \end{cases} \quad (A.4)$$

式中：

P_{RC} ——子啁啾信号函数；

α ——滚降因子， $\alpha=0.25$ ；

T_{sub} ——子啁啾信号的持续时间。

A.3.5 子啁啾传输顺序

在每个啁啾符号周期期间，首先发送子啁啾1（ $k=1$ ），然后依次发送子啁啾2（ $k=2$ ）和子啁啾3（ $k=3$ ），最后发送子啁啾4（ $k=4$ ）。

A.4 CSS物理层RF要求

A.4.1 发射功率谱密度（PSD）掩模

CSS信号的发射功率谱密度应在如图A.4所示规定的相对限制范围内。

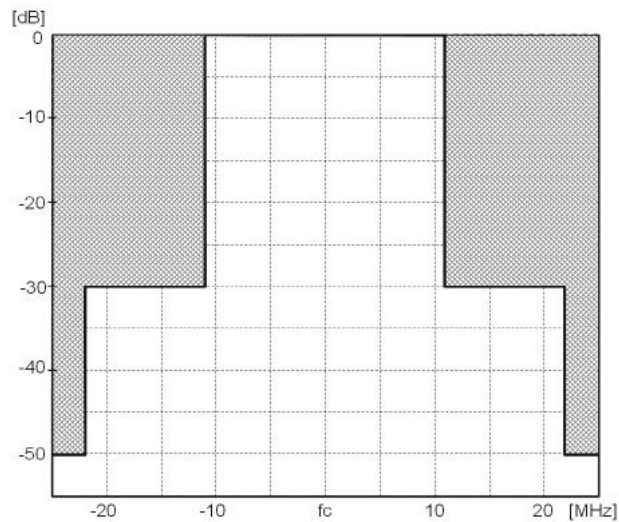


图 A.4 发射功率谱密度掩模

A.4.2 接收机灵敏度

本协议定义的接收机应能够在相应速率下实现-91 dBm或更好的接收机灵敏度。

A.4.3 中心频率误差

CSS物理层发射中心频率误差最大为 $\pm 40 \times 10^{-6}$ 。

附 录 B
(资料性附录)
IEEE802.15.4 物理层

B.1 帧结构

IEEE 802.15.4物理层的帧结构参见表B.1。

表 B.1 物理层帧结构

同步头	物理层头	物理层负载
-----	------	-------

B.2 调制和传输

B.2.1 调制方式

IEEE 802.15.4物理层采用16进制准正交调制技术。在每个数据符号周期，选择要发送的16个几乎正交的伪随机噪声（PN）序列的其中一个，并且使用4比特表示。连接连续数据符号的PN序列并使用偏移正交相移键控（O-QPSK）将聚合码片序列调制到载波上。

B.2.2 数据速率

IEEE 802.15.4物理层的数据速率应为250kbps。

B.2.3 参考调制器

图B.1功能框图可以作为IEEE 802.15.4物理层的调制和扩展功能的参考。

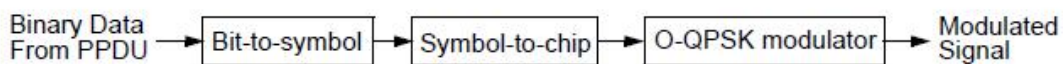


图 B.1 IEEE 802.15.4 物理层的调制和扩展功能

B.2.4 位到符号（Bit-to-symbol）映射

PPDU中包含的所有二进制数据都应使用图中的调制和扩展功能进行编码。其中每个八位字节的4个LSB（b0, b1, b2, b3）应映射成一个数据符号，4个MSB（b4, b5, b6, b7）应映射到下一个数据符号。PPDU的每个8比特通过调制和扩展功能进行处理，从Preamble字段开始，以PSDU的最后一个8比特结束。在每个8比特内，首先处理最低有效符号（b0, b1, b2, b3），然后处理最高有效符号（b4, b5, b6, b7）。

B.2.5 符号到芯片（Symbol-to-chip）映射

在2.4GHz频段，每个数据符号应映射到如表B.2所示的32码片PN序列。PN序列通过循环移位和/或共轭彼此相互正交。

表 B. 2 符号到芯片映射关系

Data symbol	Chip values ($c_0 c_1 \dots c_{30} c_{31}$)
0	11011001110000110101001000101110
1	11101101100111000011010100100010
2	00101110110110011100001101010010
3	00100010111011011001110000110101
4	01010010001011101101100111000011
5	00110101001000101110110110011100
6	11000011010100100010111011011001
7	10011100001101010010001011101101
8	10001100100101100000011101111011
9	10111000110010010110000001110111
10	01111011100011001001011000000111
11	01110111101110001100100101100000
12	00000111011110111000110010010110
13	01100000011101111011100011001001
14	10010110000001110111101110001100
15	11001001011000000111011110111000

B. 2. 6 O-QPSK调制

通过使用具有半正弦脉冲整形的O-QPSK将表示每个数据符号的码片序列调制到载波上。将奇数索引的码片调制到正交相位（Q）载波上，并将偶数索引的码片调制到同相（I）载波上。在2.4GHz频段中，码片速率是符号率的32倍，这是因为每个数据符号由32码片序列表示。如图B.2所示，为了形成I相和Q相芯片调制之间的偏移，Q相芯片应相对于I相芯片延迟 T_c ，其中 T_c 是芯片的反转率。

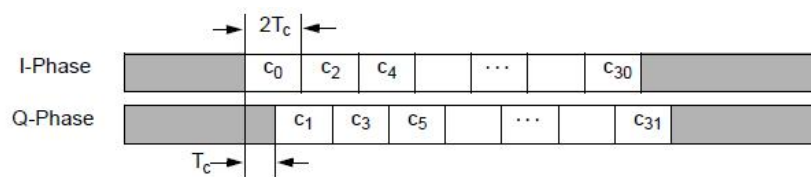


图 B. 2 O-QPSK 芯片偏移

B. 2. 7 脉冲形状

在2.4GHz频段，每个基带芯片表示为半正弦脉冲形状，正弦脉冲生成的函数定义如式（B.1）所示：

$$p(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{2T_c}\right), & 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

式中：

$p(t)$ ——脉冲幅值；

T_c ——脉冲周期。

图B.3展示了采用半正弦脉冲整形的基带芯片序列示例（零序）。

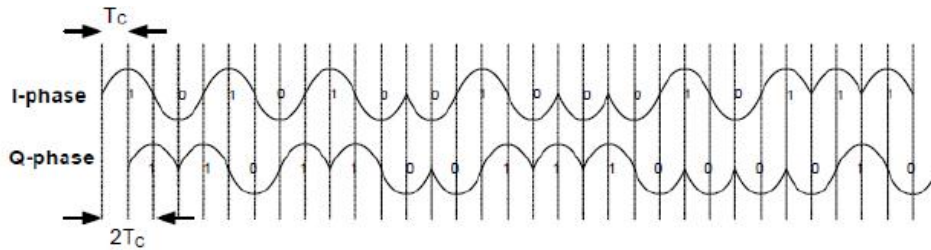


图 B. 3 采样脉冲整形的基带芯片序列

B. 3 IEEE 802.15.4 物理层RF要求

B. 3. 1 接收机灵敏度

符合要求的IEEE 802.15.4物理层设备应能够实现-85 dBm或更高的灵敏度。

B. 3. 2 中心频率误差

IEEE 802.15.4物理层发射中心频率误差最大为 $\pm 40 \times 10^{-6}$ 。

B. 3. 3 发送功率

IEEE 802.15.4物理层应能够以至少-3dBm的功率进行发送。

附 录 C
(资料性附录)
默认配置参数

2400-2483.5MHz频段CSS物理层默认参数如表C.1所示，2400-2483.5MHz频段CSS控制信道配置参数如表C.2所示，2400-2483.5MHz频段业务信道默认配置参数如表C.3所示。

表 C.1 2400-2483.5MHz 频段 CSS 物理层参数

频段	2400-2483.5MHz
扩频因子	8
编码率	CR4/5
带宽	812.5K
发射功率	<10mW
物理层前导长度	6 字节

表 C.2 2400-2483.5MHz 频段 CSS 控制信道配置参数

参数名称	数值
控制信道中心频率	2400.5 MHz
控制周期长度	4h
等待回复周期	30ms
连续帧发送间隔	20ms

表 C.3 2400-2483.5MHz 频段 CSS 业务信道默认配置参数

参数名称	数值
默认业务信道中心频点	2424.5MHz
业务周期长度	5min
业务周期时隙数	200
随机扰动时长	-5~+5ms

附录 D

(资料性附录)

输变电物联网传感终端数据格式

D.1 数据帧定义

输变电物联网传感终端数据报文使用数据帧模式，一个完整的报文包括传感终端ID、参量个数、分片指示、报文类型、报文内容、校验位，数据帧定义参见表D.1，传感终端ID定义参见表D.2。其中：

- a) 传感终端ID即为EID，是传感终端唯一标识，传感终端ID由厂商代码、版本标签、版本号、产品序列号组成。
- b) 参量个数用于标识传感终端所采集的参量个数。
- c) 分片指示用于标识传感终端数据是否采用分片方式传输。
- d) 报文类型用于标识数据帧的功能类型，分为监测数据报文、监测数据响应报文、告警数据报文、告警数据响应报文、控制报文、控制响应报文、分片数据应答报文、预留8类。
- e) 报文内容用于标识传感终端采集的数据及相关控制参数，支持多参量或分片数据。
- f) 校验位用于校验数据传输过程中是否产生错误。

表 D.1 报文结构定义

序号	名称	代码	数据长度	备注
1	传感终端ID	SensorID	6byte	
2	参量个数	DataLen	4bit	下文以m表示。
3	分片指示	FragInd	1bit	默认取0：不分片
4	报文类型	PacketType	3bit	0b000：监测数据报文 0b001：监测数据响应报文 0b010：告警数据报文 0b011：告警数据响应报文 0b100：控制报文 0b101：控制响应报文 0b110：分片数据应答报文 0b111：预留
5	报文内容	Data	n byte	n byte(可变长)
6	校验	Check	2byte	CRC16校验

表 D.2 传感终端 ID 构成

名称	代码	数据长度 (bit)	数据类型	备注
厂商代码	ManufacturerID	16	无符号整数	取值范围为[0-65535] (十进制)。
版本标签	VersionLetter	5	无符号整数	取值范围为[1-26] (十进制)，分别依次代表字符[a-z]，即 1 代表 a，26 代表 z。
版本号	VersionNumber	6	无符号整数	取值范围为[0-63] (十进制)。

表 D.2 (续)

名称	代码	数据长度 (bit)	数据类型	备注
产品序列号	SerialNumber	21	无符号整数	取值范围为[0-2097151]。
注：传感终端 ID 采用高字节在前传输。				

D.2 数据传输方式

数据传输采用数据帧模式，传输序列为二进制字节流。

D.3 报文数据排列格式

除特殊说明，整型（占2 Byte）、长整型（占4 Byte）、浮点数（占4byte）均采用低位字节在前方式存储：即字节由低B1到高Bn 上下排列，字节位由高b7到b0左右排列，格式如表D.3所示。

表 D.3 报文数据排列格式

b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0	B1 字节
b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0	B2 字节
b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0	B3 字节
.....
注：bit字段依照连续多个bit字段组成的数据类型，依其在报文中的先后次序，由高位到低位依次排列。	

输变电设备物联网微功率无线网 通信协议

编 制 说 明

目 次

1 编制背景.....	32
2 编制主要原则.....	32
3 与其他标准文件的关系.....	32
4 主要工作过程.....	32
5 标准结构和内容.....	32
6 条文说明.....	33

1 编制背景

本标准依据《国家电网公司关于下达2019年度国家电网公司第一批技术标准制修订计划通知》（国家电网科〔2019〕119号文）的要求编写。

输变电设备物联网微功率无线网通信协议主要解决一个区域内大量的微功率传感终端的数据接入问题，这些传感终端的共性是数据量小、传输频次高、种类多且随机接入网络，比如温度、湿度、倾斜、风偏等传感终端，此类传感终端对于工作寿命要求较高，因此必须将功耗控制在极低的水平，经过多年的输变电设备物联网技术应用实践，以控制通信功耗和传输可靠性为目的设计了微功率无线通信协议，并在大量的实践工程中应用验证其有效性，为加快输变电物联网技术的推广应用制定了本标准。

本标准的编写目的是规范电力设备传感终端微功率无线接入网的通信网络拓扑与协议栈结构、物理层协议规范和媒体接入控制层协议规范。

2 编制主要原则

本标准根据以下原则编制：

- a) 符合并贯彻国家现行的法律、法规和文件；
- b) 借鉴目前已经执行国家标准、电力行业已有企业标准或规定，结合具体情况，制订适用的标准；
- c) 做到技术规范、指导性强。

3 与其他标准文件的关系

本标准与相关技术领域的国家现行法律、法规和政策保持一致。

本标准不涉及专利、软件著作权等知识产权使用问题。

4 主要工作过程

2019年2月，按照公司制修订计划，项目启动，召开标准编制启动会。

2019年3月，成立编写组，制定编制计划。

2019年4月，完成标准大纲编写，组织召开大纲研讨会，确定标准主要内容。

2019年6月，完成标准初稿编制，组织召开标准讨论会。

2019年7月，完成标准验证工作，根据标准要求完成通信代码开发并进行应用测试。

2019年8月，完成标准征求意见稿编写，采用研讨会、邮件等方式广泛、多次在全国范围内征求意见。

2019年9月，公司设备管理技术标准专业工作组（TC04）组织召开了标准审查会，审查组的审查结论为：修改后以技术标准形式报批。

2019年11月，修改形成标准报批稿。

5 标准结构和内容

本标准按照《国家电网公司技术标准管理办法》（国家电网企管〔2018〕222号文）的要求编写。

本标准的主要结构和内容如下：

本标准主题章分为3章，由通信网络拓扑与协议栈结构、物理层协议规范和媒体接入控制层协议规范组成。本标准兼顾了传感终端功耗与通信距离，本着现场应用为导向、传感终端统一接入等原则，给出了物理层选型、频段选取以及帧结构设计和参数的要求，最后提出了输变电设备物联网微功率无线网通信协议，以指导输变电设备物联网微功率传感终端的无线通信规范。第5章介绍了微功率无线网的网络拓扑与协议栈结构，定义了基本概念，第6章规范了物理层与帧结构设计，为传感终端的统一组网奠定了基础，第7章规范了媒体接入控制层的协议规范，统一了微功率传感终端的通信协议，实现了输变电物联网传感终端与节点间的互联互通。

6 条文说明

本标准第1章中，说明了标准使用的范围为电力设备传感终端微功率无线接入网的网络架构与功能、物理层协议和媒体接入控制层协议；

本标准第5章中，对协议的结构和网络模型进行了说明；

本标准第6章中，对协议的物理层进行了规范；

本标准第7章中，对协议的媒体接入控制层进行了规范。