

Z

电气及电子工程师学会信息技术标准——

系统间远程通信和信息交换——

局域网和城域网——规范需求——

**Part 15.4: 低速率无线PAN（个人局域网）
的无线介质访问控制和物理层规范**

目录

目录	2
1. 总论:	7
1.1 概述:	7
1.2 范围.....	7
1.3 目的.....	7
2. 标准参考.....	7
3. 定义.....	8
4. 首字母缩写以及缩略词.....	9
5. 一般描述:	11
5.1 简介:	11
5.2 IEEE 802.15.4WPAN 的组成.....	12
5.3 网络拓扑结构.....	12
5.3.1 星型网络的形成.....	13
5.3.2 对等网络拓扑结构的形成.....	14
5.4 结构.....	15
5.4.1 物理层.....	16
5.4.2 介质访问控制层.....	16
5.5 功能概述.....	16
5.5.1 超帧结构.....	16
5.5.2 数据传输模式.....	17
5.5.3 帧结构.....	20
5.5.4 鲁棒性.....	22
5.5.5 功耗.....	23
5.5.6 安全性.....	23
5.6 原语的概念.....	24
6. 物理层 (PHY) 详述.....	25
6.1 一般要求和定义.....	25
6.1.1 工作频率范围.....	26

6.1.2	信道分配.....	27
6.1.3	最小的长帧间间隔 (LIFS) 和短帧间间隔 (SIFS) 周期.....	28
6.1.4	无线电能量度量.....	28
6.1.5	发射功率.....	29
6.1.6	频带外伪发射.....	29
6.1.7	接收器灵敏度定义.....	29
6.2	物理层服务细则.....	29
6.2.1	物理层数据服务.....	30
6.2.2	物理层管理服务.....	32
6.2.3	物理层枚举型数据的描述.....	38
6.3	物理层协议数据单元的结构.....	38
6.3.1	前同步码.....	39
6.3.2	帧定界符 SFD.....	40
6.3.3	帧长度字段.....	40
6.3.4	物理层服务数据单元 PSDU.....	40
6.4	物理层参数和 PIB 属性.....	40
6.4.1	物理层的常量.....	40
6.4.2	物理层的 PIB 属性.....	41
6.5	2450 MHz 物理层功能描述.....	42
6.5.1	数据传输速率.....	42
6.5.2	扩频调制.....	42
6.5.3	2450MHz 频带的无线通信规范.....	44

6.6	868 / 915MHz 频率带二进制相移键控 (BPSK) 物理层功能描述	45
6.6.1	868 / 915MHz 频率数据率	45
6.6.2	扩展调制.....	45
6.6.3	868/915MHz 频带无线通信规范	47
6.7	868 / 915MHz 频率带 (可选) 幅移键控 (ASK) 物理层功能描述	48
6.7.1	868/915MHz 频带数据率	48
6.7.2	扩展调制.....	48
6.7.3	868/915MHz 频带使用 ASK 调制方式的物理层规范	53
6.7.4	使用 ASK 调制方式的物理层的同步包头	53
6.8	868 / 915MHz 频率带 (可选) 使用 O-QPSK 调制方式的物理层功能描述....	56
6.8.1	868 / 915MHz 频率带数据速率	56
6.8.2	扩展调制.....	56
6.8.3	868/915MHz 频带的无线通信规范	58
6.9	无线通信的通用规范.....	59
6.9.1	发射状态到接收状态转换时间	59
6.9.2	接收状态到发射状态转换时间	60
6.9.3	差错向量的定义.....	60
6.9.4	发射信号的中心频率误差	61
6.9.5	发射功率.....	61
6.9.6	接收机最大输入电平	61
6.9.7	接收机的能量检测	61
6.9.8	链路品质信息.....	61

6.9.9	清除信道评估.....	62
7.	MAC 层规范	62
7.1	MAC 层服务规范.....	63
7.1.1	MAC 数据服务	63
7.1.2	MAC 层管理服务	71
7.1.3	连接原语	72
7.1.4	断开连接原语	81
7.1.5	信标通告原语	87
7.1.6	读取个域网信息库属性的原语	89
7.1.7	保护时隙管理原语	92
7.1.8	孤点通告原语	98
7.1.9	复位 MAC 层原语	101
7.1.10	指定接收机工作时间的原语	103
7.1.11	信道扫描原语	107
7.1.12	通信状态原语	112
7.1.13	写 MAC 层 PIB 属性原语	116
7.1.14	更新超帧配置原语	118
7.1.15	与协调器同步的原语	124
7.1.16	原语为协调器请求数据	129
7.1.17	MAC 枚举值描述	132
7.2	MAC 层帧结构	135
7.2.1	通用 MAC 层帧结构	135
7.2.2	不同类型帧的结构	139
字节 2	143
7.2.3	帧的兼容性	144
7.3	MAC 层命令帧	144
7.3.1	连接请求命令	145
7.3.2	连接响应命令	146
7.3.3	断开连接通告命令	147
7.3.4	数据请求命令	148
7.3.5	PAN ID 冲突通告命令	149
7.3.6	孤立通告命令	149
7.3.7	信标帧请求命令	149
7.3.8	协调器重新同步命令	150
7.3.9	GTS 请求命令	151
7.4	MAC 常量和 PIB 属性	152
7.4.1	MAC 常量	152
7.4.2	MAC 层 PIB 属性	153
7.5	MAC 功能描述	157
7.5.1	信道访问	158

7.5.2	启动和维护 PAN	163
7.5.3	连接和断开连接	170
7.5.4	同步	173
7.5.5	事务处理	175
7.5.6	发送，接收和确认	176
7.5.7	保护时隙（GTS）的分配与管理	182
7.5.8	帧安全	187
7.6	安全单元规范	196
7.6.1	PIB 安全材料	196

1. 总论:

1.1 概述:

无线个人局域网(WPAN)用于短距离的信息传输。不像无线局域网(WLAN),无线个域网(WPAN)的连接起来很少包括**底层基础设备**。WLAN的用于短距离传输的特征允许在大范围的设备上执行简单的、低功耗的、廉价的解决方案。

这篇文章为低速率的无线个人局域网定义了一个标准。

1.2 范围

这个版本对 IEEE 802.15.4 做了特别的改进和修正,并将和 IEEE 802.15.4-2003 兼容。新规范明确了一些模糊的概念,减少了不必要的复杂性,增加了安全密钥使用的灵活性,并将一些新的频率分配考虑在内。

IEEE 802.15.4 规定了物理层(PHY)和媒体接入控制子层(MAC)与固定、便携式及移动设备之间的低数据率无线连接的规范,这些设备都没有电池,或者电池电量和功耗要求都很小。一般在 10m 的个人操作空间内运行。根据应用的不同,也可以采取更大的范围和更低的数据率来作为一个权衡方案。

这一修改的目的在于使之可以和其它与 IEEE 及其它共存任务组相关的设备相共存,例如 IEEE 802.15.2 和 IEEE 802.11/ETSI-BRAN/MMAC 5GSG.。

1.3 目的

这次校订的目的是为了拓展IEEE 802.15.4标准的市场应用,删除标准中一些不明确的地方。此标准2003版留下了一些有可能改进的领字段。很多国家对这一应用领字段很感兴趣,它们正在积极地开发其他的频带。

2. 标准参考

编写这篇文献使用了下面的这些参考文档。对于有时间可考的文献,只写了版本号。对于没有时间可考的文献,使用参考文档的最新版本(包括任何改善和校对)。

联邦信息标准 pub 197, 高级编码标准.1

IEEE 802标准 8, 为局域网以及城域网的IEEE标准: 概述以及结构体系.2

ISO/IEC 8802-2 (IEEE Std 802.2™), 信息科技—系统间远程通信和信息交换—局域网以及城域网—特殊要求—第二部分: 逻辑链路控制.3

ISO/IEC 9646-7 (ITU-T Rec. X.296), 信息技术—开放式系统互联—合格测试的方

法和结构—第七部分：实现一致性报告书。

3. 定义

在本标准中，使用以下的术语和定义，没有定义的术语，可以在The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms第七版[B3].4中找到。

3.1 备用PAN协调器：如果PAN协调器由于某种原因离开了网络，有能力取代这个PAN协调器的协调器。一个PAN可以有零个或者多个备用PAN协调器。

3.2 关联操作：在WPAN中，用来为设备建立成员关系的服务。

3.3 认证标签：允许对信息真实性进行确认的信息。

3.4 信标使能PAN：所有协调器产生规则的信标帧的PAN，比如，有信标命令<0x0F。

3.5 块加密：在一个固定长度的字符串上实行的加密功能。

3.6 块大小：块加密操作的字符串的大小，按位计算。

3.7 竞争接入期（CAP）：信标帧出现之后的一段时间，在这段时间内，希望发送数据的设备通过使用一个时隙的CSMA—CA机制竞争访问信道。

3.8 竞争接入期（CAP）标志：在竞争接入期发生的一个标志时期。

3.9 协调器：有传递信息能力的全功能设备，如果一个协调器是PAN的主要控制器，就被称为PAN协调器。

3.10 数据认证：接收消息的实体确认消息中信源的真实性，并且在传输过程中没有被修改的过程。

3.11 数据真实性：确保信源。

3.12 设备：执行IEEE 802.15.4MAC层和物理层接口连接到无线媒介的操作的任一实体。可能是精简功能设备（RFD）或全功能设备（FFD）。

3.13 加密：把信息转换为一种新的表现形式，因此需要有特权的信息去复原最初的信息。

3.14 帧：来自MAC层实体的被一起实时传输的聚合的比特的格式。

3.15 全功能设备（FFD）：有能力作为协调器工作的设备。

3.16 组密钥：只被一组设备知道的密钥。

3.17 空闲周期：没有安排收发活动的一个持续时间段。

3.18 密钥：可能用到的保密信息，例如：用于保护信息对不能访问这些特权信息的组织暴露，以及/或被他们没有觉察的修改。

3.19 密钥建立：两个或多个成员组建立一个密钥的过程。

3.20 密钥材料：密钥与关联安全信息的组合（如当前值）。

3.21 密钥管理：系统上的密钥关系的建立与维护的过程的集合。

3.22 密钥共享组：共用一个密钥的一组设备。

3.23 本地时钟：设备的内部标志时钟。

3.24 连接密钥：只在两个设备之间共用的一个密钥。

3.25 最低安全水平：在信息传输过程中要求的最低保护指标。

3.26 移动设备：使用过程中可以在网络中改变逻辑位置的设备。

3.27 M序列：最大长度线性反馈移位寄存器序列。

3.28 非信标使能PAN：协调器不产生规则的信标帧的PAN，例如信标命令=0x0F。

3.29 临时值：一个不重复的值，比如一个递增计数器，一个足够长的随机字符

串，或者一个时间戳。

3.30 孤立设备：已经与它所连接的协调器失去联系的设备。

3.31 包：通过物理介质一起实时传输的格式化的聚合比特。

3.32 有效载荷数据：被传输的数据信息内容。

3.33 PAN协调器：PAN中的主要控制器。IEEE 802.15.4网络只有一个PAN协调器。

3.34 个人操作空间：通常是方圆10m的空间，并且包括不管是静止还是运动的人或者物体。

3.35 纯文本：译出密码信息的字符串。

3.36 保护：为信息传输提供各种安全服务的集合，例如机密性，数据真实性、以及/ 或重传保护

3.37 电波作用范围：一个通讯设备可以与其他设备成功通信的空间区域。

3.38 精简功能设备：不能作为一个协调器工作的设备。

3.39 安全水平：应用消息传输的保护指标。

3.40 自愈：在没有人工干涉的情况下，网络检测、修复在网络节点或通信链路出现的问题的能力。

3.41 自组织：在没有人工干涉的情况下，网络节点检测其他网络节点并且组织成一个结构功能网的能力。

3.42 对称密钥：共用在两个或多个组织之间的一组密钥，用于加密技术/解密技术或合法保护/完整性确认，视用途而定。

3.43 事务：两个对等的介质访问控制实体媒介的相关的、连续的帧交换，要求MAC命令与数据帧的成功传输。

3.44 事务队列：将要使用间接的传输进行发送的未决的网络事务列表，未决事务物被给定的协调器的MAC层初始化。在进程中，事务队列由协调器保持，并且队列长度依赖于执行，但至少为1。

4. 首字母缩写以及缩略词

AES 高级加密标准

ASK 幅移键控

AWGN 加性高斯白噪声

AWN 受干扰无线网络

BE 倒退指数

BER 误码率

BI 信标帧时间间隔

BLE 电池寿命延时

BO 信标次序

BPSK 二进制相移键控

BSN 信标序列号

CAP 竞争接入期间

分块加密法成链信息证明密码CBC-MAC

CCA 畅通信道评估

CCM 带有CBC-MAC(运行模式)的计数器

CCM* CCM延伸
CFP 免竞争时期
CRC 循环冗余码检测
CSMA-CA 冲突避免的载波检测多路访问
CTR 计数器模式
CW 竞争窗口(长度)
DSN 数据序列号
DSSS 直接序列扩频
ED 能量检测
EIRP 有效全向辐射功率
EMC 电磁兼容性
ERP 有效辐射功率
EVM 误差向量
FCS 帧检验序列
FFD 全功能设备
FH 跳频
FHSS 跳频扩频
GTS 保护时隙
IFS 帧间隔
ISM 工业、科技、医学
IUT 试验阶段
IWN 干扰无线网络
LIFS 长帧间隔
LLC逻辑链路控制
LQI 链路质量指示
LPDU 逻辑链路控制协议数据单元
LR-WPAN 低速率个人无线区域网
LSB 最低有效位
MAC 媒体接入控制
MCPS MAC层公共子层
MCPS-SAP MAC层公共子层-服务接入点
MFR MAC层帧尾
MHR MAC层帧头
MIC 信息完整码
MLME MAC层管理实体
MLME-SAP MAC层管理实体-服务接入点
MSB 最高有效位
MPDU MAC层协议数据单元
MSDU MAC层服务数据单元
NB 回退数(周期)
OCDM 正交码分复用
O-QPSK 偏移四相移相键控
OSI 开放系统互联
PAN 个人区域网

PC 个人计算机
PD 物理层数据
PD-SAP 物理层数据服务接入点
PER 包出错率
PHR 物理层头
PHY 物理层
PIB 个域网信息库
PICS 协议实现一致性状态
PLME 物理层管理实体
PLME-SAP 物理层管理实体-服务接入点
PN 伪随机噪声
POS 个人操作空间
PPDU 物理层协议数据单元
PSD 能量谱密度
PSDU 物理层服务数据单元
PSSS 平行的序列扩频
RF 射频
RFD 精简功能设备
RX 接收或接收器
SD 超帧持续时间
SER 错误率标志
SFD 帧起始定界符
SHR 同步头
SIFS 短帧间隔
SIR 信号干扰比
SNR 信噪比
SO 超帧序列
SPDU 服务协议汇聚层协议数据单元
SRD 短程设备
SSCS 服务协议汇聚层
SUT 测试系统
TRX 收发机
TX 发送和发送器
WLAN 无线局域网
WPAN 无线个域网

5. 一般描述:

5.1 简介 :

低速率的无线个人区域网络（LR-WPAN）是一种简单的，低成本的通信网络，具有有限的功率和灵活的吞吐量。LR-WPAN的主要目标是实现安装容易，

数据传输可靠，短距离通信，非常低的成本以及功耗，并且有一个简单而灵活的通信网络协议。

低速无线个人网络的一些特性如下：

- 在空中数据传输率为250kb/s， 100kb/s， 40 kb/s, and 20 kb/s
- 星型网络或对等网络
- 分配16bit短地址或64bit长地址
- 可选的保护时隙的分配
- 冲突避免载波多路检测访问（CSMA-CA）信道接入方式
- 传输可靠性充分确认协议
- 低功耗
- 能量检测
- 链路质量指标
- 在2450 MHz频带有16个信道， 915 MHz频带有30个信道， 在868MHz频带有3个信道。

在一个IEEE 802.15.4协议的网络中，可以存在两种不同类型的设备，一种是具有完整功能的设备（FFD），另一种是简化功能设备（RFD）。在网络中，FFD通常有3种工作状态：（1）作为个人区域网络（PAN）的主协调器；（2）作为一个协调器；（3）作为一个终端设备。一个FFD可以同时和多个RFD或多个其他的FFD通信，而对于一个RFD来说，它只能和一个FFD通信。RFD的应用非常简单，例如一个电灯开关，或者一个红外线传感器。由于它们不需要发送大量的数据，并且每次只能同一个FFD连接通信，因此，RFD仅需要使用较小的资源和存储空间来实现。

本标准向前兼容2003版本，换句话说，遵循本版本的设备可以加入遵循IEEE Std 802.15.4-2003.的设备组成的PAN里面，并且发挥作用。

5.2 IEEE 802.15.4WPAN 的组成

遵从本标准的系统由几部分组成，其中最基本的就是设备，可以是一个RFD，也可以是一个FFD。在POS（个人操作空间）通信范围中，两个或两个以上的设备就可构成一个WPAN。但是，在这一网络中至少要求有一个FFD作为PAN主协调器。

IEEE 802.15.4 网络是WPAN家庭标准的一部分，其覆盖范围可能超出WPAN所规定的POS范围。

对无线媒质而言，其传播特性具有动态性和不确定性，因此，不存在一个精确的覆盖范围，位置或方向的微小变化都会导致信号强度或者链路质量的巨大变化。无论是静止的设备，还是移动的设备，这些变化都会对站和站之间的无线传播造成影响。

5.3 网络拓扑结构

根据应用的需求，IEEE 802.15.4 LR-WPAN可以有两种网络拓扑结构：星型的拓扑结构和点对点的拓扑结构，这两种拓扑结构如图1所示。星型拓扑结构由一个叫做PAN主协调器的中央控制器和多个从设备组成，主协调器必须为一个具

有完整功能的设备，从设备既可为完整功能设备也可为简化功能设备，在实际应用中，应根据具体应用情况，采用不同功能的设备，合理地构造通信网络。在网络通信中，通常将这些设备分为起始设备或者终端设备，PAN主协调器既可以作为起始设备、终端设备，也可以作为路由器，是PAN网络的主控制器。在任何一个拓扑网络上，所有设备都有一个唯一的64位长地址码，该地址可以在PAN中用于直接通信，或者当设备之间已经存在连接时，可以将其转变为16位短地址码分配给设备。PAN主协调器是主要的耗电设备，而其他从设备经常采用电池供电。星型拓扑结构通常在家庭自动化、PC外围设备、玩具、游戏以及个人健康检查方面得到应用。

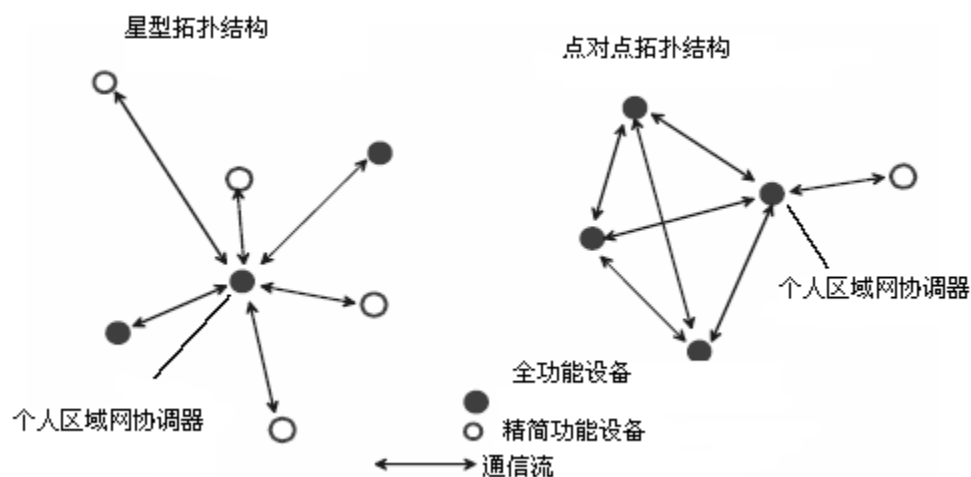


图1、星型和点对点拓扑结构实例

在对等拓扑网络结构中，同样也存在一个PAN主设备，但该网络不同于星型拓扑网络结构，该网络中的任何一个设备都可以与其通信范围内的其他设备进行通信。对等拓扑网络结构能够构成较为复杂的网络结构，例如网状拓扑网络结构。这种点对点拓扑网络结构在工业监测和控制，无线传感器网络、供应物资跟踪、农业智能化以及安全监控等方面都有广泛的应用。一个点对点网络路由协议可以是基于ad hoc技术、也可以是自组织式的和自恢复式的，并且，在网络中各个设备之间发送消息时，可通过多个中间设备中继的传输方式进行传输，即通常称为多跳的传输方式。这种功能可以在更高层中添加，但不是本标准的内容。

每个独立的PAN都有一个唯一的标识符，利用PAN标识符，可以使用短位地址进行网络设备间的通信，并且可激活PAN网络设备之间的通信。选择标识符的机制不属于本标准的范围。

组网操作是由高层执行的，不属于本标准的内容。5.3.1和 5.3.2给出了每种网络结构组网的简单概述。

5.3.1 星型网络的形成

图1描述了星型网络的基本结构。当一个具有完整功能的设备被激活之后，它就会建立一个自己的网络，将自身成为一个PAN主协调器。所有星型网络的操作独立于当前其他星型网络的操作，这就说明了在星型网络结构中只有一个唯一的PAN主协调器，通过选择一个PAN标识符确保网络的唯一性。一旦选定了PAN标识符，PAN主协调器就会允许其它设备加入到它的网络中，无论是具有完整功

能的设备还是简化功能的设备都可以加入到这个网络中。高层组网的详细过程将在7.5.2 和 7.5.3中给出。

5.3.2 对等网络拓扑结构的形成

在点对点拓扑结构中，每个设备都可以与在无线通信范围内的其他任何设备进行通信。任何一个设备都可以定义为PAN主协调器，例如，可将信道中第一个通信的设备定义为PAN主协调器。未来的网络结构可能不仅仅局限为点对点拓扑结构，对拓扑结构进行限制也是可能的。

例如，树簇拓扑结构是点对点网络拓扑结构的一种应用形式，在点对点网络中的设备可以为完整功能设备，也可以为简化功能设备。而在树簇中的大部分设备是FFD，RFD只能作为一个叶结点连接在树簇拓扑结构树枝的末尾处，这主要是由于RFD一次只能连接一个FFD。任何一个FFD都可以作为主协调器，并且，为其他从设备或主设备提供同步服务。在整个PAN中，只要该设备相对于PAN中的其他设备具有更丰富的计算资源，这样的设备都可以成为该PAN的主协调器。在建立一个PAN时，首先，PAN主协调器将自身设置为一个簇标识符（CID）为0的簇头，然后，选择一个没有使用的PAN标识符，并向邻近的其它设备以广播的方式发送信标帧，从而形成第一簇网络。如果两个或多个全功能设备同时尝试把自己设置为PAN主协调器，那么就需要一个竞争解决机制。但是这个机制不属于本标准的研究范围。接收到信标帧的候选设备可以在簇头中请求加入该网络，如果PAN主协调器允许该设备加入，那么主协调器会将该设备作为结点加入到邻近表中，成为该网络的一个从设备，同时，请求加入的设备将PAN协调器作为它的父结点加到邻近列表中，成为该网络的一个从设备，开始发送周期性的信标帧；其他的候选设备也可以在这台刚加入的设备上加入该网络。如果原始的候选不能加入到该网络中，那么它将寻找其它的父结点。7.5.2和7.5.3中将详细介绍如何形成一个网络以及如何让设备加入网络中。

最简单的网络结构是只有一个簇的网络，但是多数网络结构由多个相邻的网络构成。一旦第一簇满足预定的应用或网络需求时，PAN主协调器将会指定一个从设备为另一簇新网络的簇头，使得该从设备成为另一个PAN的主协调器，随后其他的从设备将逐个加入，形成一个多簇网络，如图2所示。图中的直线表示设备间的父子关系而不是通信流。多簇网络结构的优点在于增加网络的覆盖范围，但随之而来的缺点是会增加传输信息的延迟时间。

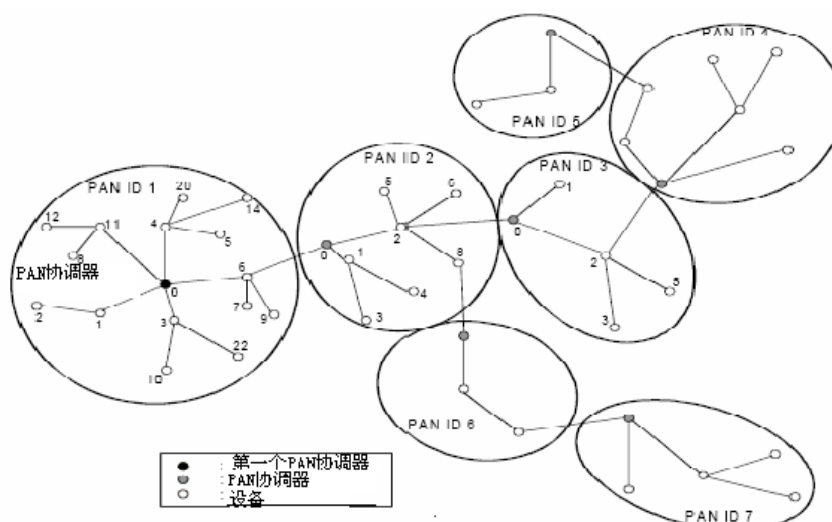


图 2 树簇拓扑结构网络

5.4 结构

为了简化标准，IEEE 802.15.4结构分成多个模块来定义，这些模块称为层。每层负责完成所规定的任务，并且向上层提供服务。模块的划分基于开放式系统互联七层模式(参看 ISO/IEC 7498-1:1994 [B1])。

各层之间的接口通过所定义的逻辑链路来提供服务。

LR-WPAN设备包含物理层和MAC层，物理层包括伴随着低等控制机制的射频收发机，MAC层为各种传输提供到达物理通道的接口。图3给这些模块的图解，5.4.1和5.4.2对此作了更为详细的描述。

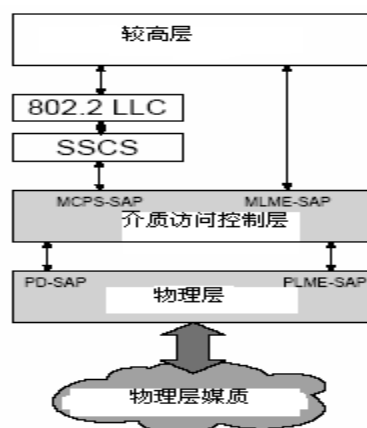


图 3—低速无线 PAN 设备结构

图3所示的高层，包括网络层和应用层，其中，网络层提供网络配置，操作，信息路由，应用层提供设备的既定功能。高层的定义不属于本标准的范围。IEEE 802.2 I类型逻辑链路控制层（LLC）能通过服务协议汇聚层（SSCS）访问MAC层，在附件A中定义。LR-PAN体系结构可以作为嵌入式设备或者要求外部设备（如个人计算机）支持的设备实现其功能。

5.4.1 物理层

物理层提供两种类型的服务：即通过物理层管理实体接口（PLME-SAP）对物理层数据和物理层管理提供服务。物理层数据服务可以通过无线物理信道发送和接收物理层协议数据单元来实现。

第六章包含了有关物理层的所有规范。

物理层的特征是启动和关闭无线收发器、能力检测、链路质量、信道选择、清除信道评估（CCA），以及通过物理媒体对数据包进行发送和接收。工作频率为下面不需申请的一个或多个频带上：

- 868–868.6 MHz (e.g., Europe)
- 868–868.6 MHz（欧洲）
- 902–928 MHz (e.g., North America)
- 902–928 MHz（北美）
- 2400–2483.5 MHz (worldwide)
- 2400–2483.5 MHz（全球）

限制需求的信息参照附件F。

5.4.2 介质访问控制层

MAC层提供两种类型的服务：MAC层管理实体服务接入点(MLME-SAP)向MAC层数据和MAC层管理提供服务。MAC层数据服务可以通过PHY数据服务发送和接收MAC协议数据单元。

介质访问控制层的特征是：信标管理，信道接入，时隙管理，帧确认，发送确认帧，联合与分裂。此外，MAC层为应用合适的安全机制提供一些方法。

第七章介绍了介质访问控制层的规范。

5.5 功能概述

5.5.1到5.5.6给出了低速无线个域网的功能的简单概括，包括超帧结构，数据传输模式，帧结构，鲁棒性，功耗以及安全性。

5.5.1 超帧结构

本标准允许有选择性地使用超帧结构。由网络中的主协调器来定义超帧结构的格式。超帧由网络信标来限定，并由主协调器发送，如图4a所示，它分为16个大小相等的时隙。超帧可以分为激活部分和非激活部分（见图4b）。在非激活部分，协调器进入低能耗的模式。信标帧在每个超帧中的第一个时隙发送。如果协调器不使用超帧结构，它将关闭信标的传输。信标主要用于使各从设备与主协调器同步，识别PAN以及描述超帧的结构。任何从设备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避免的载波检测多路访问机制与其他设备竞争进行通信。需要处理的所有事务将在下一个网络

信标时隙到前处理完成。

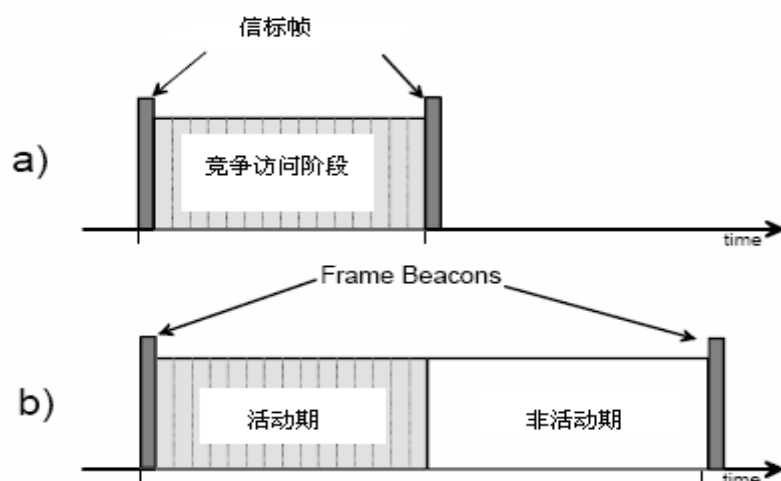


图4—没有确保服务的同步时隙超帧结构

在网络通信中，在一些特殊情况下（如通信延迟小、数据传输率高），可采用PAN主协调器的活动超帧中的一部分来完成这些特殊要求。该部分通常称为保护时隙（GTS）。多个保护时隙构成一个免竞争时期（CFP），通常在活动超帧中，在竞争接入时期（CAP）的时隙结束之后紧跟着CFP，如图5所示。PAN主协调器最多可以分批7个GTS，并且GTS至少占用一个时隙。但是，在活动超帧中必须要有足够的CAP空间，以保证为其他网络设备和希望加入网络的设备提供竞争接入的机会，但是所有基于竞争的事务必须在CFP之前执行完成。在一个GTS中，每个设备的信息传输必须保证在下一个GTS时隙或者CFP结束之前完成。7.5.11描述了关于超帧结构的更多信息。

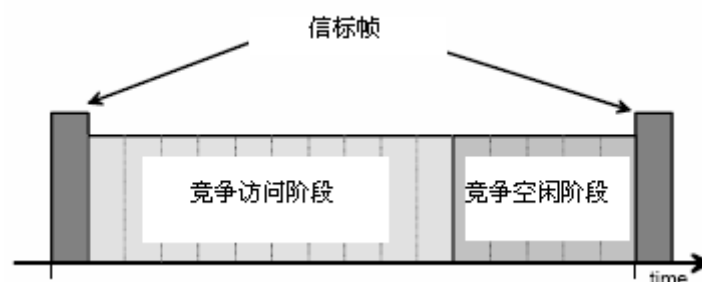


图5-带有确保时间同步时隙的超帧结构

5.5.2 数据传输模式

数据传输模式分为3种数据传输事务类型：第1种是从设备向主协调器发送数据；第2种是主协调器发送数据，从设备接收数据；第3种是在两个从设备之间进行数据传输。在星型拓扑结构的网络中，由于该网络结构只允许在主协调器和从设备之间交换数据，因此，只有两种数据传输事务类型。在对等拓扑结构中，允许网络中两个从设备之间进行交换数据，因此，在该结构中，可能包含这3种数据传输事务类型。

每种传输的传输机制还取决于该网络是否支持信标的传输。通常，在要求同步或者支持低延迟设备之间通信时，采用支持信标的传输网络，例如PC的外围

设备。如果网络不需要同步或者不支持低延迟设备，在数据传输中，可选择不使用信标方式传输。值得注意的是，在这种情况下，虽然数据传输不采用信标，但是在网络连接时，仍然需要信标，才能完成网络连接。数据传输中使用的帧结构具体在7.2作了详细的说明。

5.5.2.1 数据传送到主协调器

当从设备希望在信标网络中发送数据给主协调器时，首先，从设备要监听网络的信标。当监听到信标后，从设备需要与超帧结构进行同步；在适当的时间，从设备将使用有时隙的CSMA-CA向主协调器发送数据帧；当协调器接收到该数据帧后，将返回一个表明数据已经成功接收的确认帧，以此表明已经执行完成该数据传输事务，图6描述了该数据传输事务的执行顺序。

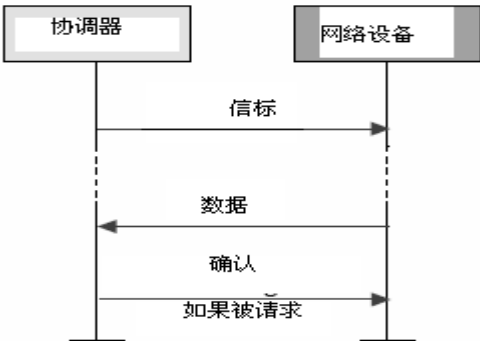


图 6—到信标使能 PAN 的协调器通信

当某个从设备要在非信标的网络发送数据时，仅需要使用非时隙的CSMA-CA向主协调器发送数据帧，协调器接收到数据帧后，返回一个表明数据已成功接收的确认帧，图7描述了该数据传输事务的执行顺序。

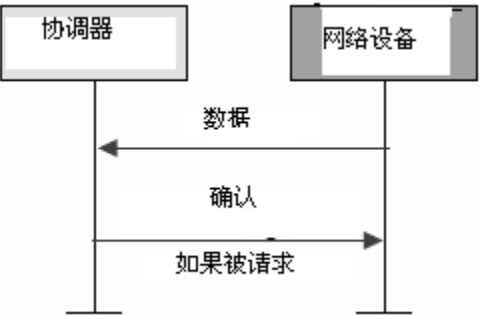


图7—到信标非使能PAN的协调器通信

5.5.2.2 主协调器发送数据

当协调器需要在信标网络中发送数据给从设备时，它会在网络信标中表明存在有要发送的数据信息。此时，从设备处于周期地监听网络信标状态，当从设备发现存在有主协调器要发送给它的的信息时，将使用有时隙的CSMA-CA机制，通过MAC层指令发送一个数据请求命令。主协调器收到数据请求命令后，返回

一个确认帧，并采用有时隙的CSMA-CA机制，发送要传输的数据信息帧。从设备收到该数据后，将返回一个确认帧（参看7.5.6.3），表示该数据传输事务已处理完成。主协调器收到确认帧后，将该数据信息从主协调器的信标未处理信息列表中删除。图8描述了该数据传输事务的执行顺序。

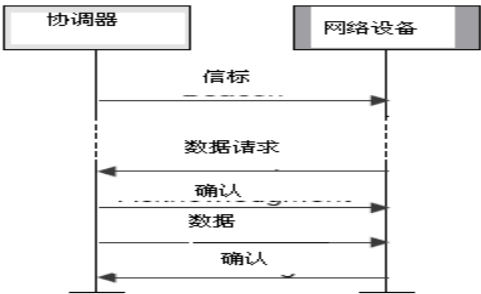


图8—来自信标使能PAN协调器的通信

协调器需要在非信标网络中传输数据给从设备时，主协调器存储着要传输的数据，将通过与从设备建立数据连接，由从设备先发送请求数据传输命令后，才能进行数据传输。其具体传输过程如下所述。

首先，使用非时隙CSMA-CA方式的从设备，以所定义的速率向主协调器发送一个请求发送数据的MAC层命令，从而在主-从设备之间建立起连接；主协调器收到数据请求发送命令后，返回一个确认帧。如果在主协调器中存在有要发送给该从设备的数据，主协调器将使用非时隙CSMA-CA机制向从设备发送数据帧。如果在主协调器中不存在有要发送给该从设备的数据，则主协调器将发送一个净荷长度为0的数据帧，以表明不存在有要发送给该设备的数据。从设备收到数据后，返回一个确认帧，以表示该数据传输事务已经处理完成。图9描述了该数据传输事务的执行顺序。

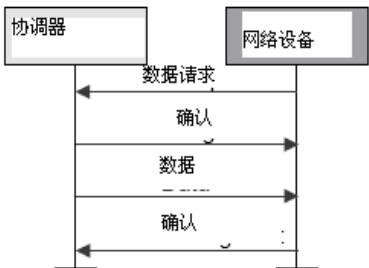


图9—来自信标非使能PAN协调器的通信

5. 5. 2. 3 对等网络的数据传输

在对等网络中，每个设备都可以与在其无线通信范围内的任何设备进行通信。由于设备与设备之间的通信随时都可能发生，为了有效地进行通信，因此，在点对点网络中，各通信设备之间必须处于随时可通信的状态，则需要设备必须处于以下两种状态中的任意一种：（1）设备始终处于接收状态；（2）设备间保持相互同步。在第1种状态下，设备使用非时隙的CSMA-CA传输简单的数据信息；在第2种状态下，需要采取一些其他措施，以确保通信设备之间相互同步。这些措施在本标准范围之外。

5.5.3 帧结构

在通信理论中，一种好的帧结构就是在保证其复杂性最小的同时，需要在噪声信道中具有很强的抗干扰能力。每个协议层都增加了各自的帧头和帧尾，此标准定义了4种帧结构：

- 信标帧，主协调器用来发送信标的帧
- 数据帧，用来所有数据传输的帧
- 确认帧，用来确认成功接收的帧
- MAC层命令帧，用来处理所有MAC层对等实体间的控制传输

5.5.3.1——5.5.3.4描述了4种帧类型的结构，并用图示的方式，说明各协议层中所对应的帧结构。

5.5.3.1 信标帧

在信标网络中，信标帧由MAC层产生，并向网络中的所有从设备发送，以保证各从设备与主协调器同步，其结构如图10所示。MAC层服务数据单元（MSDU）包括超帧格式、保护时隙字段、未处理事务地址字段以及信标载荷（参看7.2.2.1）。MAC的载荷附加项为在MSDU前面加上一个MAC层帧头（MHR），在MSDU结尾加上一个MAC层帧尾（MFR）。MAC层帧头包括MAC层帧控制字段，信标序列码（BSN），地址字段，可选的附加安全帧。MAC层帧尾包括16位的帧校验序列（FCS）。MHR，MAC层载荷以及MFR一起形成了MAC层信标帧（即MAC层协议数据单元——MPDU）。

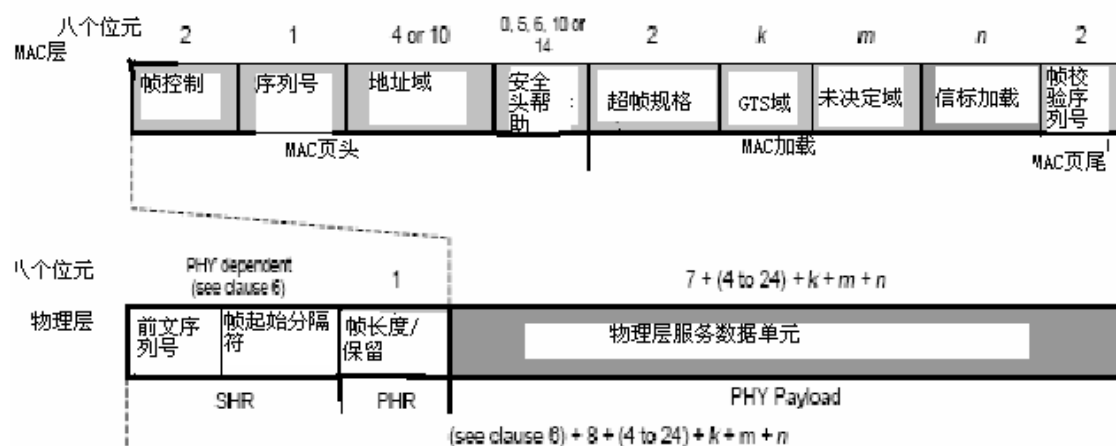


图10—信标帧与物理层包的示意图

MAC层信标帧作为物理层信标包的载荷（PSDU）发送到物理层。同样，在PSDU前面，需要加上一个同步帧头（SHR）和一个物理层帧头（PHR），其中SHR包括前同步帧序列和帧起始定界符（SFD），PHR包括物理层负载的长度的字节数。SHR、PHR和PSDU一起构成了物理层信标包（即PPDU）。

5.5.3.2 数据帧

数据帧由高层产生，图11表明了其结构。

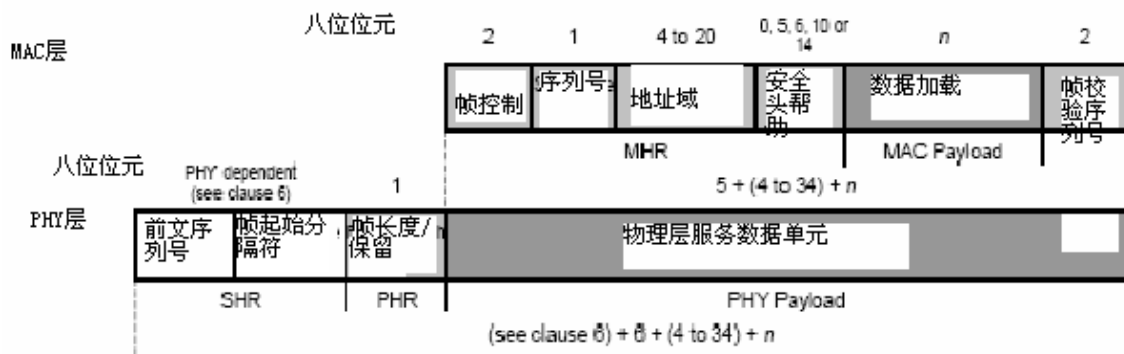


图11—数据帧与物理层包的示意图

数据载荷由高层发送到MAC层作为MAC层的数据载荷（MSDU），并在MSDU前面加上一个MAC帧头MHR，在其尾部加上一个MAC层帧尾MFR。其中MAC帧头包含帧控制字段，数据序列码，地址字段和可选的附加安全帧。MAC层帧尾MFR为16位的帧校验序列。MHR，MSDU以及MFR一起构成了MAC层数据帧（MPDU）。

MAC层数据帧作为物理层载荷（PSDU）被发送到物理层。在PSDU前面加上一个SHR和一个PHR。其中，SHR包括前同步码序列和SFD；PHR包含PSDU的长度的字节数。前同步码序列和SFD能够使接收设备与发送设备达到符号同步。SHR、PHR和PSDU一起形成了物理层的数据包（PPDU）。

5.5.3.3 确认帧

确认帧在MAC层内部产生，其结构如图12所示。MAC层的确认帧由一个MHR和一个MFR构成，没有MAC层载荷。MHR包括MAC层帧控制字段和数据序列码字段。MFR由16位的帧校验序列码构成。MHR和MFR共同构成了MAC层的确认帧（MPDU）。

MPDU作为物理层确认帧载荷（PSDU）发送到物理层。在PSDU前面加上SHR和PHR，其中SHR包括前同步码序列和SFD字段；PHR为PSDU长度的字节数。SHR、PHR以及PSDU一起构成了物理层的确认包（PPDU）

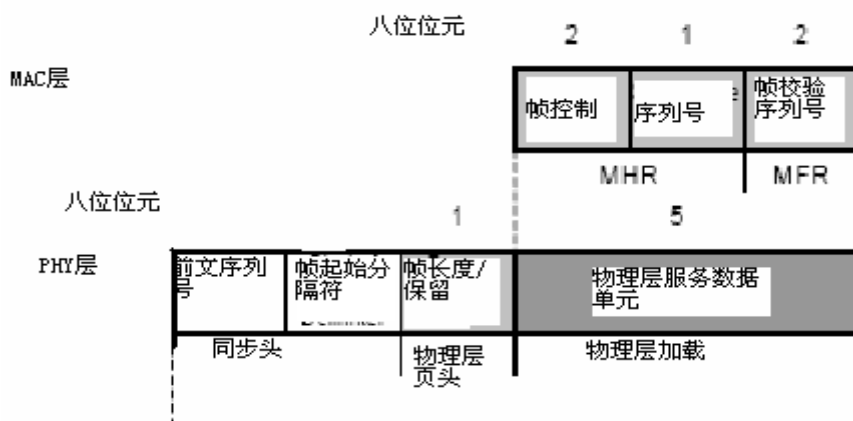


图12—确认帧与物理层包的示意图

5.5.3.4 MAC 层命令帧

命令帧在MAC层内部产生，其结构如图13所示。包含命令类型字段和命令数据的MSDU叫作命令载荷。同样，在MSDU前面加上一个MAC帧头MHR，在其尾部加上一个MAC层帧尾MFR。其中MAC帧头包含帧控制字段，数据序列码，地址字段和可选的附加安全帧。MAC层帧尾MFR为16位的帧校验序列。MHR，MSDU以及MFR一起构成了MAC层命令帧（MPDU）。

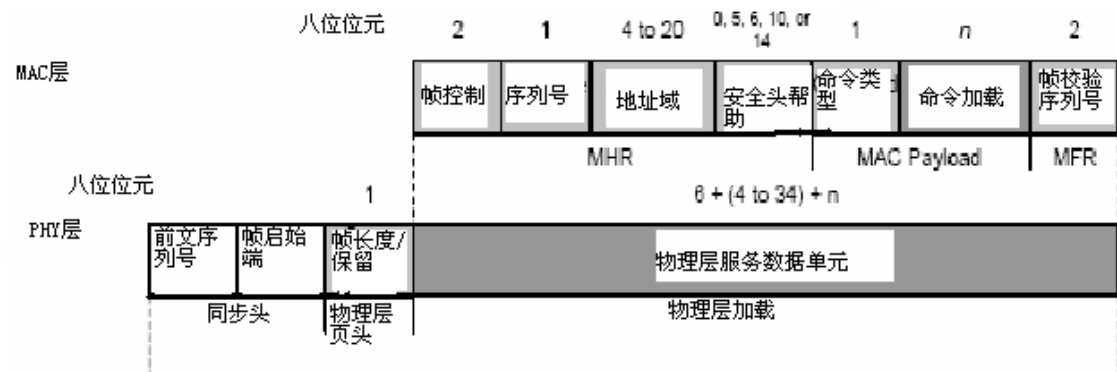


图13—MAC层命令帧与物理层包的示意图

MPDU帧作为物理层命令帧（PSDU）发送到物理层。在PSDU前面加上一个SHR和一个PHR。其中，SHR包括前同步码序列和SFD字段；PHR包含PSDU的长度的字节数。前同步码序列和SFD能够使接收设备与发送设备达到符号同步。SHR、PHR和PSDU一起形成了物理层的命令包（PPDU）。

5.5.4 鲁棒性

在IEEE 802.15.4 LR-PAN中，为了保证数据传输的可靠性，采用了多种机制。这些机制由CSMA-CA机制，帧确认以及数据校验，这些在5.5.4.1到5.5.4.3中作了简要介绍。

5.5.4.1 CSMA-CA 机制

IEEE802.15.4 LR-WPAN网络工作方式分为信标网络和非信标网络，对不同的网络工作方式将采用两种不同的信道接入机制。在非信标网络工作方式下，使用非时隙CSMA-CA信道接入机制，将在7.5.1节中描述。采用该机制的设备，在每次发送数据帧或者MAC命令时，要等待一段随机的时间。如果设备发现信道空闲，设备就会发送数据帧和MAC层命令；反之，如果设备发现信道正忙，将等待一段随机的时间之后，再次尝试接入信道。而对于确认帧，在发送时，不使用CSMA-CA机制，即在接收到数据帧后，接收设备直接发送确认帧，而不管当前信道是否存在冲突，发送设备根据是否收到正确的确认帧来判断数据是否发送成功。

在信标网络工作方式下，使用有时隙的CSMA-CA信道接入机制。在该网络中，退避时隙恰好与信标传输的起始时间对准。在CAP期间发送数据帧时，设备首先要锁定下一个退避时隙的边界，然后在等待随机数目的退避时隙后，如果检

测到信道忙，则设备还要再等待随机数目退避时隙，才能尝试再次接入信道。如果信道空闲，设备在下一个空闲的退避时隙边界开始发送数据。**确认帧和信标帧的发送不使用CSMA-CA机制。**

5.5.4.2 确认帧

如在7.5.6中描述的，在接受设备成功地接收和验证一个数据帧或者MAC命令帧后，**应根据发送设备是否需要返回确认帧的要求，确定是否向发送设备返回确认帧。**如果接收设备在接受到数据帧后，无论由于何种原因造成对接收到的数据信息不能进一步处理时，都不返回确认帧。

在有应答的发送消息方式中，发送设备在发出物理层数据包后，**要等待一段时间来接受确认帧**，如果没有收到确认帧信息，就认为发送信息失败，并且重新发送这个数据包。在重传几次之后，如果仍然没有收到确认帧，发送设备就将向应用层返回发送数据包的状态，由应用层决定发送终止或者重新再发送该数据包。在非应答的发送消息方式中，不论结果如何，发送设备都认为数据包已发送成功。

5.5.4.3 数据校验

为了发现数据包在传输过程产生的比特错误，采用了FCS机制——ITU-T的16位的循环冗余校验来保护每一个帧信息。7.2.1.9讨论了FCS机制。

5.5.5 功耗

在使用本标准的多种应用中，设备均采用电池供电的方式，频繁地更换电池或者给电池充电是不实际的。因此功耗是一个非常重要的因素。本标准考虑了限制功耗，但是标准的物理实现上要求考虑额外的电源管理，这就超出了本标准的考虑范围。

为了适应电池供电的设备，本标准做了一些改进。然而，在特定的应用中，这些设备中的一些有需要用大功率供电的可能。为了减少功耗，一些电池供电设备需要在较高的占空比（duty-cycling）条件下运行，这些设备大部分时间都处于休眠状态。但是，为了保证设备之间的通信能够正常工作，每个设备需要周期性地监听无线信道，判断是否有需要自己处理的数据信息。这一机制使得我们在实际应用中，必须在电池消耗与信息等待时间之间进行综合考虑，以获得它们之间的相对平衡。大电量供电设备可以选择持续地侦听无线信道。

5.5.6 安全性

从安全的角度来看，无线 ad hoc 网络跟任何其他的无线网络没有什么区别。因为不要求通信中有连接到有线的物理接口参与通信，所以，网络容易被动偷听袭击，甚至被潜在的主动干预。Ad hoc 网络和它们的组成对象的特性强加一些额外的安全限制，这些安全限制可能使得保护这些网络更加困难。低成本的设备在**运算能力**，可利用存储空间，以及能量消耗方面都有限制。也不能假定他们总

是有一个可信任的计算基础，从而也不一定有一个高质量的随机数发生器。通信不能依赖固定结构的在线获得，还可能包括跟以前从没有通过信的设备建立短期的关系。而设备间可信赖关系的建立和维护必须加倍小心，这些限制可能严重地限制了加密机制和协议并将影响安全体系结构的设计。此外，电池寿命以及成本限制给网络安全的承受力造成了严重局限，对于高频宽带网络来说，安全等级远远不够。大部分这些安全因素都由高层执行，因此不在本标准范围考虑之内。

本标准中的加密机制基于对称密钥，并且使用高层进程提供的密钥。密钥的设定与维护在本标准范围之外。这种机制假定加密操作是安全的，密钥资料的存储也是安全可信的。

- 加密机制提供以下安全服务：
- 数据机密性：确保发送的信息只是暴露给那些预先的信息的接受者。
 - 数据真实性：确定发送信息的来源（并且信息在传输过程中没有被修改）。
 - **重放保护**：确定副本信息被检测。

实际提供的帧保护能够适应帧-帧基础并允许设置数据真实性的不同等级（在要求的地方最小化安全等级）并且设置可选的数据机密性等级。如果要求特殊的保护，通常提供重传保护。

加密的帧保护可能使用一个两个对等设备之间共享的密钥（连接密钥）或者一组设备之间共享的密钥（组密钥），因此允许在密钥存储和密钥维护成本跟提供的加密保护之间有一些灵活性，并根据具体应用进行折中。如果一组密钥被用来对等通信，仅仅提供对于外来设备的保护，而不针对密钥共享组中有潜在危险的设备。

看更多本标准中有关保护MAC层帧的加密安全机制，看第7节。

5.6 原语的概念

本节提供了服务原语概念简单的描述。要想了解详细信息，请参看ISO/IEC 802.25。

每一层的服务主要完成两种功能：更加它的下层服务要求，为上层提供相应的服务；另一种是根据上层的服务要求，对它的下层提供相应的服务。各项服务是通过服务原语来实现的，图14描述了原语的概念，在图中，描述了一个具有N个用户的网络中，两个对等用户以及他们与M层（或子层）对等协议实体建立连接的服务原语。

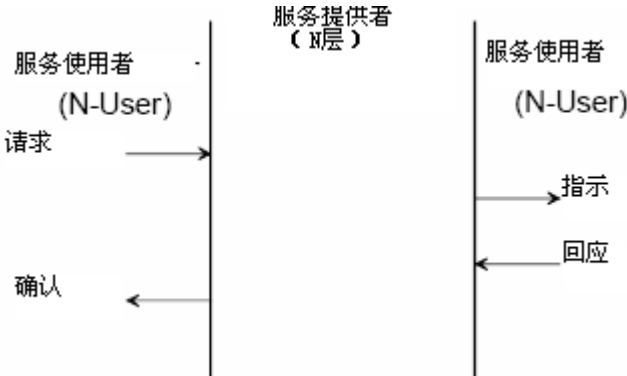


图14—服务原语

服务是由N用户和N层之间的信息流的描述来指定的。该信息流由离散的瞬态事件构成，以提供服务为特征。每个事件由服务原语组成，它将在一个用户的

某一层，通过该层的服务接入点（SAP）与建立对等连接的用户的相同层之间传送。服务原语通过提供一种特定的服务来传输必需的信息。这些服务原语是一个抽象的概念，它们仅仅指出提供的服务内容，而没有指出由谁来提供这些服务。它的定义与其他任何接口的实现无关。

由代表其特点的服务原语和参数的描述来制定一种服务。一种服务可能有一个或多个相关原语，这些原语构成了与具体服务相关的执行指令。每种服务原语提供服务时，可能不带有传输信息，也可能带有多个传输必须的信息参数。

原语通常分为如下面 4 种类型：

- **Request**：请求原语从第N用户发送到它的第N层，请求服务开始。
- **Indication**：指示原语是从第N层向第N用户发送，指示对于第N用户有重要意义的内部N层的事件。该事件也许与一个远程服务请求逻辑相关，或者可能是由N层的内部事件引起。
- **Response**：响应原语是从第N用户向它的第N层来表示对用户执行上一条原语调用过程的响应。。
- **Confirm**：确认原语是由第N层向第N用户发送，用来传送一个或多个前面服务请求原语的执行结果。

6. 物理层（PHY）详述

6.1 一般要求和定义

物理层负责以下工作：

- 无线收发器的激活与释放
- 当前信道的能量检测（ED）
- 接收链路服务质量指示（LQI）
- 冲突避免载波侦听多路接入（CSMA-CA）机制的清除信道评估（CCA）
- 信道频率选择
- 数据发送和接收

本节中由物理层描述和维护的常量和属性都用斜体标出。常量一般以字母“a”开头，例如，*aMaxPHYPacketSize*。所有的常量都在表 22（在 6.4.1 中）列出。属性一般以“phy”开头，例如，*phyCurrentChannel*。所有的属性都在表 23（在 6.4.2 中）中列出。

下面详细说明了所有遵循此标准的物理层的要求。

标准描述了下面的四个物理层：

- 868/915 MHz 直接序列扩频（DSSS）物理层，该物理层采用二进制移相键控（BPSK）调制方式
- 868/915 MHz DSSS 物理层，该物理层采用偏移四相移相键控（O-QPSK）调制方式
- 868/915 MHz 平行序列扩频（PSSS）物理层，该物理层采用二进制移相键控（BPSK）和振幅变换键控（ASK）两种调制方式
- 2450MHz 直接序列扩频（DSSS）物理层，该物理层采用偏移四相移相键（O-QPSK）调制方式

其中，868/915 MHz 二进制移相键控（BPSK）物理层曾在本标准 2003 年版

本中详细介绍。除此之外，868/915 MHz 中又规定了两个可选的高速率物理层，来提供复杂性和数据速率两者之间的权衡。868/915 MHz BPSK 物理层工作在 868MHz 的频带上时，其速率为 20kb/s；工作在 915MHz 频带上时，其速率为 40kb/s。两个可选的物理层提供的数据速率比 868/915 MHz BPSK 物理层的速率高得多。ASK 物理层在 868MHz 和 915MHz 的频带上都提供 250kb/s 的速率，等于 2.4G 频带物理层的速率。O-QPSK 物理层不仅提供跟 2.4GHz 频带一致的信号表，还在 915MHz 频段上提供相当于 2.4GHz 频带物理层的数据速率，在 868MHz 频带上提供 100kb/s 的数据速率。

6.1.1 工作频率范围

合适的设备使用表 1 中的调制方式和扩频方式在一个或者几个频段上运行。设备将以它们被设定的方式（物理层）启动。在 868/915MHz 频段上工作的设备，如果能够工作可选的物理层上面，那么它将能够在可选的物理层和强制的 BPSK 物理层之间进行自动转换。

表 1—频带和数据率

物理层 (MHz)	频带 (MHz)	扩频参数		数据参数		
		码率 (kchip/s)	调制方式	比特率 (kb/s)	符号率 (ksymbol/s)	符号
868/915	868—868.6	300	BPSK	20	20	二进制
	902—928	600	BPSK	20	20	二进制
868/915 (可选)	868—868.6	400	ASK	250	12.5	20-位 PSSS
	902—928	1600	ASK	250	50	5-位 PSSS
868/915 (可选)	868—868.6	400	O-QPSK	100	25	16 进制正交码
	902—928	1000	O-QPSK	250	62.5	16 进制正交码
2450	2400—2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16 进制正交码

本标准的目的是统一在欧洲，日本，加拿大和美国建立起来的规范。下面列出的限制规则文档仅仅作为信息，并随时可能改变和修订。跟本标准一致的设备也要遵循特定地方的立法。另外的限制信息在附件 F 中提供。

欧洲：

制定标准：欧洲通信标准协会（ETST）

文档：ETSI EN 300 328-1 [B26], ETSI EN 300 328-2 [B27], ETSI EN 300 220-1 [B25], ERC Recommendation 70-03 [B24]

版权所有：国家型

日本：

制定标准：无线工商业协会（ARIB）

文档：ARIB STD-T66 [B22]

版权所有：公共管理、国家事务和通信部门

美国：

制定标准：美国国家通信委员会（FCC）
文档：FCC CFR47, Section 15.247 [B29]

加拿大
制定标准：加拿大工业（IC）
文档：GL36 [B32]

6.1.2 信道分配

868/915MHz 频带（可选）ASK 物理层规范和 868/915MHz 频带（可选）偏移四相移向键控物理层规范的引入使得信道分配的总数超出了本标准在 2003 年版本中定义的 32 个信道的容量。

为了支持信道数目的增长，信道分配将通过**信道数**和**信道页**来的联合定义。

PhyChannelSupported 中 32 位信道位图 5 个最高位的值用于指定 32 个信道页。信道位图的 27 个低位将**被看作一位，任务就是**指定信道页中的信道数。

6.1.2.1 信道编码方式

总共 27 个信道被编为 0 到 26 号，每个信道表示一个信道页。

对于信道页 0，编号为 0 到 26 的 27 个信道在三个频率带上都是可用的。**2450MHz 频带上 16 个信道可用**，915MHz 频带上 **10 个**信道可用，868MHz 频带**上一条**可用。信道页 0 支持本标准 2003 年版定义的信道。这些信道的中心频率定义如下：

$$F_c = 868.3 \text{ in megahertz, for } k = 0$$

$$F_c = 906 + 2^{(k-1)} \text{ in megahertz, for } k = 1, 2, \dots, 10$$

$$\text{和 } F_c = 2405 + 5^{(k-11)} \text{ in megahertz, for } k = 11, 12, \dots, 26$$

其中， k 是信道编号。

对于信道页 1 和 2，编号为 0 到 10 的 11 个信道在两个频率带上是可用的，分别用于支持 868MHz ASK 和 O-QPSK 物理层。915MHz 频带上 10 个信道可用，868MHz 频带上 1 个信道可用。这些信道的中心频率是如下定义的：

$$F_c = 868.3 \text{ in megahertz, for } k = 0$$

$$\text{和 } F_c = 906 + 2^{(k-1)} \text{ in megahertz, for } k = 1, 2, \dots, 10$$

其中， k 是信道编号。

对于每一个物理层，只要地方法规允许，设备将支持所有信道。

6.1.2.2 信道页

总共 32 个信道页都是可用的，其中**信道页 3 到 31 被保留以备将来使用**。PHY 个域网信息库（PIB）属性 *PhyPagesSupported* 表明当前物理层支持哪一个信道页，而物理层 PIB 属性 *phyCurrentPage* 确认当前使用的信道页。物理层 PIB 属性在 6.4.2 中描述。

除非特殊指定，所有发送和接收的无线电能量测量，都由连接到天线的相应的收发器来完成。测量使用的仪器必须与天线的阻抗相匹配，或者已经被校正过。如果设备没有天线，用有效的各向同性辐射频率（EIRP）（比如，0dBi 增益 天线）来完成能量检测，使用这种方法时，要通过校正来补偿操作过程中的天线增益。

6.1.5 发射功率

最大发射功率遵循地方规定。在地方法规限制方面更多的信息参考附件 F。
服从的设备规定的发射功率水平在它的物理层参数 `phyTransmitPower` 中标明。
(看 6.4)

6.1.6 频带外伪发射

频带外伪发射遵循地方规定。在规定频带外伪发射地方法规限制方面更多的信息参考附件 F。

6.1.7 接收器灵敏度定义

本标准中使用的接收器灵敏度在表 4 中定义。

表 4——接收器灵敏度定义

项目	项目定义	条件
分组错误率（PER）	传送的分组中没有被正确接收的平均数	—在随机的 PSDU 数据上平均测量
接收灵敏度	保证一定的 PER 时 的输入信号能量阈值	—PSDU 长度=20 字节 —PER<1% —能量是在天线终端测量的 —不存在干扰

6.2 物理层服务细则

物理层通过射频固件和 RF 硬件提供了一个从 MAC 子层到物理层无线信道的接口。在物理层种，包含一个**物理层管理实体（PLME）**，该实体通过调用物理层管理功能函数，为物理层管理服务提供接口。同时，PLME 也负责维护由物理层所管理的目标数据库，该数据库包含有物理层个域网络的基本信息（PIB）。

物理层的结构和接口如图 15 所示。

物理层通过两个服务接入点（SAP）提供两种服务：通过物理层数据服务接入点（PD-SAP）为物理层数据提供服务；通过物理层管理实体（PLME）服务接入点（PLME-SAP）为物理层管理提供服务。

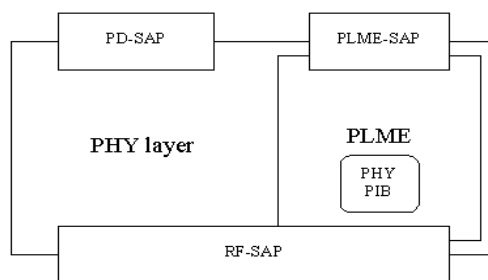


Figure 15—The PHY reference model

6.2.1 物理层数据服务

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 MAC 层协议数据单元（MPDU）。表 5 列出了物理层数据服务接入点所支持的原语。这些原语在表中提及的章节进行详细描述。

表 5——物理层数据服务接入点原语

物理层数据服务接入点原语	请求	确认	指示
物理层数据—数据	6.2.1.1	6.2.1.2	6.2.1.3

6.2.1.1 物理层数据请求原语 PD-DATA.Request

MAC 层用 PD-DATA.Request 原语请求向本地物理层实体发送一个 MAC 层协议数据单元（MPDU），即物理层服务数据单元 PSDU。

6.2.1.1.1 服务原语的语义

PD-DATA.request 原语的语义如下：

PD-DATA.request (

PsdLength,

Psd

)

表 6 列出了 PD-DATA.request 原语的参数

表 6——PD-DATA.request 参数

参数名	类型	取值范围	功能描述
PsdLength	无符号整型	≤aMaxPHYPacketSize(物理层最大数据包容量)	物理层实体发送物理层服务数据单元（PSDU）中字节个数
Psd	字节	—	物理层实体发送由字节构成的物理层数据单元（PSDU）

6.2.1.1.2 合适地使用

PD-DATA.request 原语是由 MAC 层实体产生，并将该原语发送到物理层实体，请求发送一个 MAC 层协议数据单元（MPDU）。

6.2.1.1.3 接收的影响

当物理层实体接收到 PD-DATA.request 原语后，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物理层协议数据单元（PPDU），该单元包含有要发送的物理层服务数据单元（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 原语。

当物理层收到 PD-DATA.request 原语时，设备的收发机如果正处于接收状态

(即 **RX_ON** 状态),物理层实体将忽略物理层服务数据单元 (PSDU), 并返回一个带有 **RX_ON** 状态的 PD-DATA.confirm 原语。当物理层收到 PD-DATA.request 原语时, 设备的收发机如果正处于关闭状态 (即 **TRX_OFF** 状态),物理层实体将忽略物理层服务数据单元(PSDU), 并返回一个带有 **TRX_OFF** 状态的 PD-DATA.confirm 原语。当物理层收到 PD-DATA.request 原语时, 设备的发射机如果正处于忙状态 (即 **BUSY_TX** 状态),物理层实体将忽略物理层服务数据单元 (PSDU), 并返回一个带有 **BUSY_TX** 状态的 PD-DATA.confirm 原语。

6.2.1.2 PD-DATA.confirm

物理层用 PD-DATA.confirm 原语向 MAC 报告向对等的 MAC 层实体发送 MAC 层协议数据单元 (即 PSDU) 的结果。

6.2.1.2.1 服务原语的语义

PD-DATA.Confirm 原语的语义如下:

PD-DATA.confirm (

Status

)

表 7 列出了 PD-DATA.confirm 原语的参数。

表 7—— PD-DATA.confirm 参数

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

6.2.1.2.2 产生时间

PD-DATA.confirm 原语由物理层实体产生, 并将发送给 MAC 层实体**作为 PD-DATA.request 原语的响应**。PD-DATA.confirm 原语将返回一个代表发送请求原语执行的状态,如果发送数据请求原语**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**。产生这些状态的原因都在 6.2.1.1.3 节中描述。

6.2.1.2.3 适当的用法

MAC 层实体收到 PD-DATA.Confirm 原语之后, 就能够知道发送请求原语的结果。如果发送成功, 那么它的状态参数就会设置为 **SUCCESS**; 否则, 状态参数会设置为错误状态。

6.2.1.3 PD-DATA.indication

物理层利用 PD-DATA.indication 原语向本地 MAC 层实体传送一个 MAC 层协议数据单元 (即 PSDU)。

6.2.1.3.1 服务原语的语义

PD-DATA.indication 原语的语义如下:

PD-DATA.indication (

psduLength,

psdu,

ppduLinkQuality

)

表 8 列出了 PD-DATA.indication 原语的参数。

表 8——PD-DATA.indication 参数

参数	类型	取值范围	功能描述
psduLength	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	从物理层协议数据单元 (PPDU) 的接收过程中测量的链路质量 (LQI)

6.2.1.3.2 产生时间

PD-DATA.indication 原语由物理层实体产生, 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, 就不产生该原语。

6.2.1.3.3 适当的用法

MAC 层收到 PD-DATA.indication 原语之后, 即可得到物理层所收到的数据信息。

6.2.2 物理层管理服务

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 9 列出了物理层管理实体服务接入点支持的原语。这些原语在表中所写的参考章节中提及。

表 9——物理层管理实体接入点原语

物理层管理实体接入点原语	请求	确认
物理层管理实体清除信道评估	6.2.2.1	6.2.2.2
物理层管理实体能量检测	6.2.2.3	6.2.2.4
物理层管理实体获取信息	6.2.2.5	6.2.2.6
物理层管理实体设置发射机状态	6.2.2.7	6.2.2.8
物理层管理实体设置	6.2.2.9	6.2.2.10

6.2.2.1 PLME-CCA.request

PLME-CCA.request 原语请求物理层管理实体执行 6.9.9 中定义的清除信道评估。

6.2.2.1.1 服务原语的语义

PLME-CCA.request 原语的语义如下:

PLME-CCA.request ()

PLME-CCA.request 原语没有相关参数。

6.2.2.1.2 适当的用法

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

6.2.2.1.3 接收反应

如果物理层管理实体收到 PLME-CCA.request 原语时, 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 原

语，其状态取决于清除信道评估的执行结果。

如果收到 PLME-CCA.request 原语时，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 原语。

6.2.2.2 PLME-CCA.confirm

PLME-CCA.confirm 原语报告 6.9.9 中定义的信道清除评估请求原语的执行结果。

6.2.2.2.1 6.2.2.2.1 服务原语的语义

PLME-CCA.confirm 原语的语义如下：

PLME-CCA.confirm (

Status

)

表 10 列出了 PLME-CCA.confirm 原语的参数。

表 10 ——PLME-CCA.confirm 参数

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

6.2.2.2.2 产生时间

PLME-CCA.confirm 原语由物理层管理实体产生，并作为对 PLME-CCA.request 原语的响应返回给 MAC 层管理实体。PLME-CCA.confirm 原语将返回一个 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。这些状态值的原语都在 6.2.2.1.3 中描述。

6.2.2.2.3 适当的用法

MAC 层管理实体收到 PLME-CCA.confirm 原语之后，得知请求清除信道评估原语执行的结果。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。

6.2.2.3 PLME-ED.request

PLME-ED.request 原语请求物理层管理实体执行能量检测。（看 6.9.7）

6.2.2.3.1 服务原语的语义

PLME-ED.request 原语的语义如下：

PLME-ED.request ()

PLME-ED.request 原语没有相关参数。

6.2.2.3.2 产生时间

PLME-ED.request 原语由 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测量。

6.2.2.3.3 接收反应

当物理层管理实体收到 PLME- ED.request 原语时，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 原语。

如果物理层收到 PLME-ED.request 原语时，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 原语。

6.2.2.4 PLME-ED.confirm

PLME-ED.confirm 原语向 MAC 层报告 6.9.7 节中定义的能量检测的结果。

6.2.2.4.1 6.2.2.4.1 服务原语的语义

PLME-ED.confirm 原语的语义如下:

PLME-ED.confirm (
status,
EnergyLevel
)

表 11 ——PLME-ED.confirm 参数

参数	类型	取值范围	功能描述
Status	枚举	SUCCESS, TRX_OFF, or TX_ON	执行能量检测测量请求的结果
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。

6.2.2.4.2 产生时间

PLME-ED.confirm 原语由物理层管理实体产生,作为对 PLME-ED.request 原语的响应发送给 MAC 层管理实体。PLME-ED.confirm 原语将返回一个 SUCCESS 状态,表明一次成功的能量检测测量;或者返回一个 TRX_OFF 或 TX_ON 错误代码。这些状态值的原因都在 6.2.2.3.3 节中描述。

6.2.2.4.3 合适的用途

MAC 层管理实体收到 PLME-ED.confirm 原语之后,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。

6.2.2.5 PLME-GET.request

PLME-GET.request 原语请求获得有关物理层个域网信息库 (PIB) 属性的信息。

6.2.2.5.1 服务原语语义

PLME-GET.request 原语的语义如下:

PLME-GET.request (
PIBAttribute
)

表 12 列出了 PLME-GET.request 原语的参数

表 12——PLME-GET.request 参数

参数	类型	取值范围	功能描述
PIBAttribute	枚举	见表 23(6.4.2 节)	物理层 PIB 属性标识符

6.2.2.5.2 产生时间

PLME-GET.request 原语由 MAC 层管理实体产生,并将该原语发送给物理层管理实体以获得物理层 PIB 信息。

6.2.2.5.3 适当的用法

当物理层管理实体收到 PLME-GET.request 原语之后,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 原语。

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 原语。

6.2.2.6 PLME-GET.confirm

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

6.2.2.6.1 服务原语的语义

PLME-GET.confirm 原语的语义如下：

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

表 13 列出了 PLME-GET.confirm 原语的参数。

表 13——PLME-GET.confirm 参数

参数	类型	取值范围	功能描述
status	枚举	SUCCESS 或者 UNSUPPORTED_ATTRIBUT E	请求得到物理层 PIB 属性信 息的结果状态
PIBAtribute	枚举	看表 23（在 6.4.2 节）	所指定的物理层 PIB 属性标 识符
PIBAtributeval ue	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_ATTRIBUT E 时，这个参数长度为 0.

6.2.2.6.2 产生时间

PLME-GET.confirm 原语由物理层管理实体产生，作为对 PLME-GET.request 原语的响应返回给 MAC 层管理实体。PLME-GET.confirm 原语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。产生这些状态值的原因在 6.2.2.5.3 节都有描述。

6.2.2.6.3 适当的用法

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

6.2.2.7 PLME-SET-TRX-STATE.request

PLME-SET-TRX-STATE.request 原语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：

- 收发机关闭状态（TRX_OFF）
- 发射机激活状态（TX_ON）
- 接收机激活状态（RX_ON）

6.2.2.7.1 服务原语的语义

PLME-SET-TRX-STATE.request 服务原语的语义如下：

PLME-SET-TRX-STATE.request (

state

)

表 14 列出了 PLME-SET-TRX-STATE.request 原语的参数

表 14——PLME-SET-TRX-STATE.request 参数

参数	类型	取值范围	功能描述
state	枚举	RX_ON,TRX_OFF,FORCE_TRX_OFF,或者 TX_ON	给收发机设置新的状态

6.2.2.7.2 产生时间

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

6.2.2.7.3 适当的用法

当物理层管理实体收到 PLME-SET-TRX-STATE.request 原语之后，根据原语的请求设置状态，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 原语；如果当前收发机的状态已经为原语所请求的工作状态，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 原语。如果该原语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物理层协议数据单元，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 原语。如果该原语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 原语。如果原语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 原语。如果原语被标为 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 原语。

6.2.2.8 PLME-SET-TRX-STATE.confirm

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

6.2.2.8.1 服务原语的语义

PLME-SET-TRX-STATE.confirm 原语的语义如下：

PLME-SET-TRX-STATE.confirm (

status

)

表 15 列出了 PLME-SET-TRX-STATE.confirm 原语的参数

表 15——PLME-SET-TRX-STATE.confirm 参数

参数	类型	取值范围	功能描述
status	枚举	SUCCESS,RX_ON,TRX_OFF,或者 TX_ON	设置收发机工作状态的请求结果

6.2.2.8.2 产生时间

PLME-SET-TRX-STATE.confirm 原语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 层管理实体返回该原语。

6.2.2.8.3 适当的用法

当 MAC 层管理实体收到 PLME-SET-TRX-STATE.confirm 原语之后，就可得知执行 PLME-SET-TRX-STATE.request 原语的结果。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 原语所请求的状态。

6.2.2.9 PLME-SET.request

PLME-SET.request 原语来将所指定的物理层的 PIB 属性设置为给定的值。

6.2.2.9.1 服务原语的语义

PLME-SET.request 原语的语义如下：

PLME-SET.request (
PIBAttribute,
PIBAttributeValue
)

表 16 列出了 PLME-SET.request 原语的参数。

表 16——PLME-SET.request 参数

参数	类型	取值范围	功能描述
PIBAttribute	枚举	看表 23（6.4.2 节）	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

6.2.2.9.2 产生时间

PLME-SET.request 原语由 MAC 层管理实体产生，并发送给物理层管理实体来，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。

6.2.2.9.3 适当的用法

物理层收到 PLME-SET.request 原语之后，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（看 6.4.2 节中的表 23），物理层管理实体将返回一个带有 UNSUPPORT_ATTRIBUTE 状态的 PLME-SET.confirm 原语。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 原语。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 原语。

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 原语。

6.2.2.10 PLME-SET.confirm

PLME-SET.confirm 原语报告设置 PIB 属性的执行结果。

6.2.2.10.1 服务原语的语义

PLME-SET.confirm 原语的语义如下：

PLME-SET.confirm (
status,

PIBAttribute

)

表 17 列出了 PLME-SET.confirm 原语的参数

表 17——PLME-SET.confirm 参数

参数	类型	取值范围	功能描述
status	枚举	SUCCESS, UNSUPPORTED_ATTRIBUTE, INVALID_PARAMETER,或者 READ_ONLY	请求设置 PIB 属性的结果 状态
PIBAttribute	枚举	看表 23 (6.4.2 节)	所确认 PIB 属 性标识符

6.2.2.10.2 产生时间

PLME-SET.confirm 原语由物理层管理实体产生，并作为对 PLME-SET.confirm 原语的响应返回给它的 MAC 层管理实体。PLME-SET.confirm 原语返回一个 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。这些错误状态值都在 6.2.2.9.3 节中描述。

6.2.2.10.3 适当的用法

MAC 层管理实体收到 PLME-SET.confirm 原语之后，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。

6.2.3 物理层枚举型数据的描述

表 18 列出了在物理层协议规范中所定义的枚举型数据值以及相应的功能。

表 18——物理层枚举型的功能描述

枚举型	值	功能描述
BUSY	0x00	清除信道评估检测到一个忙的信道
BUSY_RX	0x01	收发机处于接收状态时，要求改变其状态
BUSY_TX	0x02	收发机处于发射状态时，要求改变其状态
FORCE_TRX_OFF	0x03	强制将收发机关闭
IDLE	0x04	清除信道评估检测到一个空闲信道
INVALID_PARAMETER	0x05	SET/GET 原语的参数超出了取值范围
RX_ON	0x06	收发机处于或者将设置为接收状态
SUCCESS	0x07	设置或读取，能量检测操作，或者收发机状态改变成功执行
TRX_OFF	0x08	收发机处于或者将设置为关闭状态
TX_ON	0x09	收发机处于或者将设置为发射状态
UNSUPPORTED_ATTRIBUTE	0x0a	不支持设置/读取原语属性标识符
READ_ONLY	0x0b	设置/读取原语只读属性标识符

6.3 物理层协议数据单元的结构

这一节主要介绍物理层协议数据单元（PPDU）数据包的格式。

为了方便，物理层协议数据单元分组的结构就像在本标准中写的一样，**最左边的字段优先发送和接收。在多字节的字段中，优先发送或者接收最低有效字节，而在每一个字节中优先发送最低有效位（LSB）。**同样，在物理层与 MAC 层之间的数据字段的传送也遵循这一规则。

每个物理层协议数据单元数据包都由以下几个基本的部分组成：

——**同步包头（SHR）**：允许接收设备锁定在比特流上，并与比特流保持同步。

——物理层包头 **PHR**：包含帧长度的信息。

——物理层净荷：长度变化的净荷，携带 MAC 层的帧信息。

物理层协议数据单元结构将按照图 16 所描述的方式被格式化。

Octets				
1			variable	
Preamble	SFD	Frame length (7 bits)	Reserved (1 bit)	PSDU
SHR		PHR		PHY payload

Figure 16—Format of the PPDU

图 16——物理层协议数据单元的格式

6.3.1 前同步码

收发机根据前同步码引入的消息，获得**码同步**和**符号同步**的信息。不同物理层的前同步码的长度在表 19 中列出。

因为 **ASK** 是使用一个特殊的字符定义的，使用 **ASK** 调制方式的物理层的前同步码的长度使用一个相等的字节数表达。除了使用 **ASK** 调制方式的物理层，所有物理层的前同步码都是**二进制 0**。**ASK** 的序格式在 6.7.4.1 节中描述。

表 19——前同步码长度

物理层	长度		持续时长（微秒）
868/868.6 MHz BPSK	4 字节	32 字符	1600
902-928 MHz BPSK	4 字节	32 字符	800
868/868.6 MHz ASK	5 字节	2 字符	160
902-928 MHz ASK	3.75 字节	6 字符	120
868/868.6 MHz O-QPSK	4 字节	8 字符	320
902-928 MHz O-QPSK	4 字节	8 字符	128
2400-2483.5 MHz	4 字节	8 字符	128

O-QPSK			
--------	--	--	--

6.3.2 帧定界符 SFD

帧定界符是表明前同步码的结束和数据包数据开始的字段。不同物理层的帧定界符的长度在表 20 中列出。

表 20——帧定界符字段长度

物理层	长度	
868/868.6 MHz BPSK	1 字节	8 字符
902-928 MHz BPSK	1 字节	8 字符
868/868.6 MHz ASK	2.5 字节	1 字符
902-928 MHz ASK	0.625 字节	1 字符
868/868.6 MHz O-QPSK	1 字节	2 字符
902-928 MHz O-QPSK	1 字节	2 字符
2400-2483.5 MHz O-QPSK	1 字节	2 字符

除了使用 ASK 调制方式的物理层的所有物理层的帧定界符都是一个 8 位字段。因为使用 ASK 调制方式的物理层的帧定界符是使用一个特殊的字符定义的。使用 ASK 调制方式的物理层的帧定界符长度 equivalent octet times 表达。除了使用 ASK 调制方式的物理层之外的所有物理层的帧定界符的格式如图 17 所示。使用 ASK 调制方式的物理层的帧定界符在 6.7.4.2 节中定义。

位：0	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	1	0	1

图 17——帧定界符字段的格式（ASK 除外）

6.3.3 帧长度字段

帧长度占 7 个比特，它的值是 PSDU 中包含的字节数（如，物理层净荷）。该值在 0 到 aMaxPHYPacketSize 之间（见 6.4）。表 21 总结了不同帧长度所对应的净荷类型。

表 21——帧长度值

帧长度值	净荷类型
0-4	预留
5	MPDU（确认）
6-8	预留
9 到 aMaxPHYPacketSize	MPDU

6.3.4 物理层服务数据单元 PSDU

物理层服务数据单元的长度是可以变化的，并且该字段携带了物理层数据包的数据。

6.4 物理层参数和 PIB 属性

这一节将详细介绍物理层所必需的常量和属性。

6.4.1 物理层的常量

表 22 介绍了定义物理层特性的常量。这些常量有硬件决定，因此在操作过程中不能对其进行修改。

表 22——物理层的常量

常量	描述	值
<i>aMaxPHYPacketSize</i>	物理层能够接收的 PSDU 数据包的最大容量（以字节为单位）	127
<i>aTurnaroundTimes</i>	从 RX 到 TX 状态，或从 TX 到 RX 状态转变的最大时间（以符号周期为单位）（见 6.9.1 和 6.9.2）	12

6.4.2 物理层的 PIB 属性

物理层 PIB 由设备的物理层管理所必需的属性构成。表 23 详细介绍了物理层 PIB 包含的属性。标有 (↑) 这种符号的属性是只读的（例如，只能由物理层设置的属性），这个属性只能由上一层使用 PLME-GET.request 原语来读取。标有 (*) 这种符号的属性有些特定的位是只读的，这些位只能由上一层使用 PLME-GET.request 原语来读取，其他的位能由上一层分别使用 PLME-GET.request 原语或者 PLME-SET.request 原语来进行读和写的操作。其他的属性都能由上一层分别使用 PLME-GET.request 原语或者 PLME-SET.request 原语来进行读和写的操作。

属性	标识符	类型	范围	描述
<i>phyCurrentChannel</i>	0x00	整型	0-26	用于发送和接收的无线射频信道（见 6.1.2）
<i>phyChannelsSupported</i> ↑	0x01	矩阵	一个 $R \times 32$ 位矩阵， $R \in (1, 32)$	矩阵由 R 排组成，每一排是一个有如下特性的位串：5 个最高有效位 (b_{27}, \dots, b_{31}) 表明信道页，27 个最低有效位 (b_0, b_1, \dots, b_{26}) 表明该信道页的 27 个有效信道的状态（1 表示信道空闲，0 表示信道忙）（如 6.1.2 节所述 b_k 表明 k 信道的状态）。设备只需要加入它支持的物理层的排（信道页）。
<i>phyTransmitPower</i> *	0x02	位	0x00-0xbf	2 个最高有效位表示发射功率的误差： 00= ± 1 dB 01= ± 3 dB 10= ± 6 dB 这个误差是只读的。 6 个最低有效位是可写的，以两个补码的格式表示有符号的整型，与相对于 1mW 的分贝数表示的设备名义发射功率相一致， <i>phyTransmitPower</i> 的最小值被认为小于或等于 -32dBm
<i>phyCCAMode</i>	0x03	整型	1-3	CCA 的模式（见 6.9.9）

<i>phyCurrentPage</i>	0x04	整型	0-31	当前物理层信道页。与 <i>phyCurrentChannel</i> 一起唯一表明当前被使用的信道。
<i>phyMaxFrameDuration</i> ↑	0x05	整型	55 , 212 , 266 , 1064	一个帧所包含的符号的最大数目： $phySHRDuration + \text{ceiling}([aMaxPHYPacketSize + 1] \times phySymbolsPerOctet)$
<i>phySHRDuration</i> ↑	0x06	整型	3,7,10, 40	当前物理层字符中同步包头的持续时间
<i>phySymbolsPerOctet</i> ↑	0x07	浮点型	0.4,1.6 ,2.8	当前物理层的每个字节中字符的个数

6.5 2450 MHz 物理层功能描述

6.5.1 数据传输速率

在本标准协议中，2450MHz 物理层的数据传输速率为 250kb/s。

6.5.2 扩频调制

2450MHz 物理层采用 16 相位准正交调制技术。在每个符号数据周期，4 位信息比特被用来从 16 个几乎正交的伪随机序列（PN 序列）中选取其中一个序列作为传送序列。根据所发送连续的数据信息，将所选出的 PN 序列串连起来，并使用 O-QPSK 的调制方式，将这些集合在一起的序列调制到载波上。

6.5.2.1 调制器框图

图 18 中的各功能块为 2450MHz 物理层扩展调制功能的参考模块，每个模块中所设计数据的功能将在下面的小节中介绍。

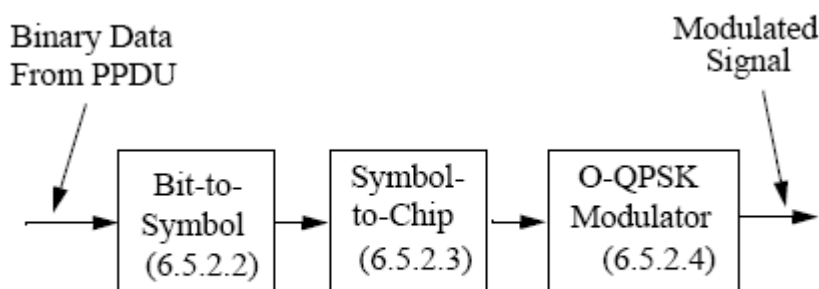


Figure 18—Modulation and spreading functions

6.5.2.2 比特-符号转换器

物理层协议数据单元中所有的二进制数据都必须使用图 18 所示的扩展调制功能进行转换处理。下面将描述二进制信息是如何被映射为符号数据的。

将每个字节的低 4 位(b_0, b_1, b_2, b_3)转换成一个符号数据，高 4 位(b_4, b_5, b_6, b_7)转换成一个符号数据。物理层协议数据单元的每个字节都要逐个进行处理，即从它的前同步码到它的最后一个字节。

6.5.2.3 符号-码片的映射

每个符号数据映射成一个 32 位的伪随机序列（PN 序列），如表 24 所示。这些 PN 序列通过循环移位或者相互结合（如，奇数位取反）等相互关联。

Table 24—Symbol-to-chip mapping

Data symbol (decimal)	Data symbol (binary) (b ₀ b ₁ b ₂ b ₃)	Chip values (c ₀ c ₁ ... c ₃₀ c ₃₁)
0	0000	11011001110000110101001000101110
1	1000	11101101100111000011010100100010
2	0100	00101110110110011100001101010010
3	1100	00100010111011011001110000110101
4	0010	01010010001011101101100111000011
5	1010	00110101001000101110110110011100
6	0110	11000011010100100010111011011001
7	1110	10011100001101010010001011101101
8	0001	10001100100101100000011101111011
9	1001	10111000110010010110000001110111
10	0101	01111011100011001001011000000111
11	1101	01110111101110001100100101100000
12	0011	00000111011110111000110010010110
13	1011	01100000011101111011100011001001
14	0111	10010110000001110111101110001100
15	1111	11001001011000000111011110111000

6.5.2.4 O-QPSK 调制

码片序列通过采用半正弦脉冲形式的 O-QPSK 调制方式，将符号数据调制到载波信号上。其中，编码为偶数的码元调制到 I 相位的载波上，编码为奇数的码元调制到 Q 相位的载波上。因为每个符号数据都由 32 码元序列来表示，所以，码元速率（一般为 2.0Mchip/s）是符号速率的 32 倍。为了使 I 相位和 Q 相位的码元调制存在偏移，Q 相位的码元相对于 I 相位的码元要延迟 T_c 秒发送，T_c 是码元速率的倒数，如图 19 所示。

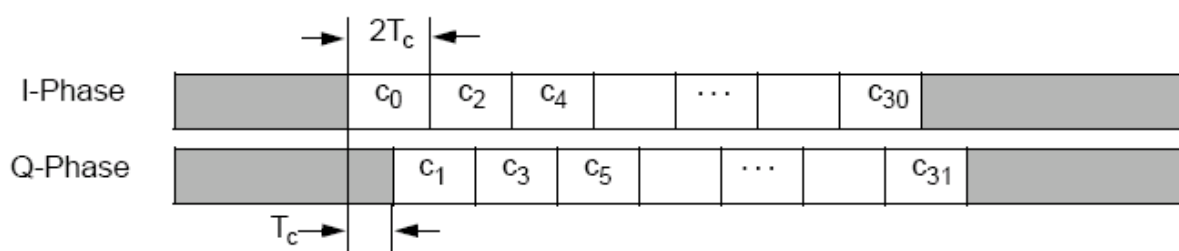


Figure 19—O-QPSK chip offsets

6.5.2.5 调制脉冲形状

每个基带码元用半正弦脉冲形式表示，其表达式如(1):

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

图 20 画出了半正弦脉冲形式的基带码元序列的样图。

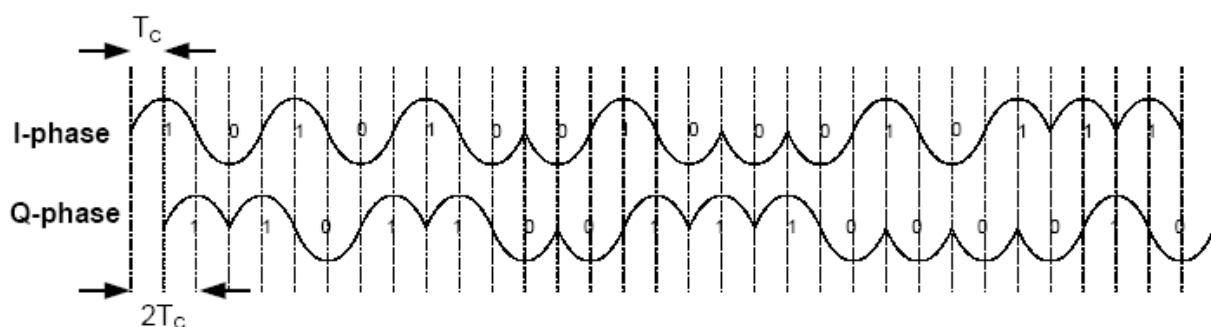


Figure 20—Sample baseband chip sequences with pulse shaping

6.5.2.6 码片传输规则

在每个符号周期，最低有效码片 c_0 优先发送，最高有效码片 c_{31} 最后发送。

6.5.3 2450MHz 频带的无线通信规范

6.5.3.1 发射功率谱密度（PSD）任务

发射的谱信号各参量应低于表 25 所列出的限度值。无论是相对限度，还是绝对限度，平均的功率谱必须用 100kHz 带宽的分辨率来测量。对于相对限度，它的参考电平是最高的平均频谱功率，它是在载波信号的 $\pm 1\text{MHz}$ 带宽内测得的。

表 25——发射功率谱密度的限度

频率	相对限度	绝对限度
$ f - f_c > 3.5\text{MHz}$	-20dB	-30dBm

6.5.3.2 符号速率

2450MHz 物理层的符号速率为 62.5 千符号/秒，并且要求其传送速率精度为 $\pm 40\text{ppm}$ 。

6.5.3.3 接收机灵敏度

在 6.1.7 节中描述的条件下，一个合适的设备必须能够达到 -85dB 或者更高的灵敏度。

6.5.3.4 接收机抗干扰性

最小的抗干扰水平在表 26 中给出。邻近信道是指在有用信道任何一边，并距离信道频率最近的信道；交替信道是指比邻近信道还远的信道。例如，信道 13 是有用信道，那么信道 12 和信道 14 就是邻近信道，信道 11 和信道 15 就是交替信道。

表 26——2450MHz 物理层要求的最小接收机抗干扰电平

邻近信道抗干扰电平	交替信道抗干扰电平
0dB	30dB

邻近信道的抗干扰电平按照以下方式测量：被测量的信号必须是一个适合 2450MHz IEEE 802.15.4 O-QPSK 物理层伪随机数据信号，就是 6.5.2 中定义的那种。被测量的信号以比 6.5.3.3 中给出的最高允许接收机灵敏度高 3dB 的水平输入接收机。

在邻近信道和交替信道中，一个 IEEE 802.15.4 信号以表 26 中指定的相对水平输入。测试每次只测试一个干扰信号。接收机必须满足 6.1.7 节中定义的在这些条件下的错误率标准。

6.6868 / 915MHz 频率带二进制相移键控 (BPSK) 物理层功能描述

6.6.1 868 / 915MHz 频率数据率

868 / 915MHz 物理层工作在 868MHz 的频带上时，其数据速率为 20kbps；工作在 915MHz 频带上时，其数据率为 40kbps。

6.6.2 扩展调制

868 / 915MHz 物理层的码片调制方式采用带有二进制移相键控(BPSK)的直接序列扩频(DSSS)技术，符号数据的编码采用微分编码方式。

6.6.2.1 调制器参考模型

868 / 915MHz 物理层的扩展调制功能的参考模型如图 21 所示。图中所涉及的功能将在下面的小节中予以介绍。物理层协议数据单元的每个比特位从前同步码开始直到物理层服务数据单元的最后一个字节结束，按照字节的顺序依次经过微分编码、比特-码片映射和调制模块。在每个字节中，最低有效比特位 b_0 最先处理，最高有效位 b_7 最后处理。

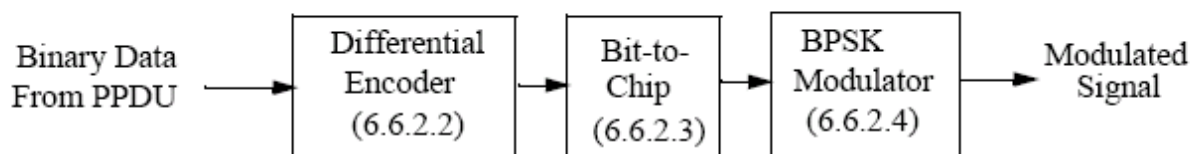


Figure 21—Modulation and spreading functions

6.6.2.2 微分编码

微分编码是指将原始数据比特位与前一微分编码比特进行模二加运算，这一过程由发射机来完成，用如下公式进行描述：

$$E_n = R_n \oplus E_{n-1} \quad (2)$$

其中，

R_n 为编码的原始数据；

E_n 为与 R_n 相对应的微分编码比特位；

E_{n-1} 是 R_n 的前一个微分编码比特位。

对每个数据包的发送， R_1 为第一位所编码的原始数据，同时，假设 E_0 为 0。

反之，译码过程由接收机来完成，用如下公式进行描述：

$$R_n = E_n \oplus E_{n-1} \quad (3)$$

对于每个接收的数据包， E_1 为第一位所译码的比特位， E_0 假设为 0。

6.6.2.3 比特-码片的映射

每个输入的比特位都映射成 15 位的 PN 序列，如表 27 所示。

表 27—— 比特-码片的映射

输入比特	码片 ($c_0 c_1 \dots c_{14}$)
0	111101011001000
1	000010100110111

6.6.2.4 BPSK 调制

码片序列通过采用升余弦脉冲形式(滚动系数 $\alpha = 1$)的二相键控(BPSK)调制方法，将其调制到载波信号上。码元为 1 时，对应一个正脉冲，码元为 0 时，对应一个负脉冲。其中，868MHz 频带的码片速率为 300kchip/s，915MHz 频带码片速率为 600kchip/s。

6.6.2.4.1 调制脉冲形状

每个基带码片用升余弦脉冲(滚动系数 $\alpha = 1$)来描述，表达式如下：

$$p(t)=\begin{cases} \frac{\sin(\pi/T_c)}{\pi/T_c} \frac{\cos(\pi/T_c)}{1-(4t^2/T_c^2)}, t \neq 0 \\ 1, t = 0 \end{cases} \quad (4)$$

6.6.2.4.2 码片传输命令

在一个符号周期之内，最低有效码片 c_0 最先发送，最高有效码片 c_{14} 最后发送。

6.6.3 868/915MHz 频带无线通信规范

6.6.3.1 工作频率范围

868MHz 使用 BPSK 调制方式的物理层的工作频带为 868.0~868.6MHz；915MHz 使用 BPSK 调制方式的物理层的工作频段为 902~928MHz。

6.6.3.2 915MHz 频带的发射功率谱密度

发射的谱信号各参量应低于表 28 中所列出的限度值。对于相对限度和绝对限度，平均的频谱功率用 100kHz 带宽的分辨率来测量。对于相对限度，它的参考电平为最大的平均频谱功率，它是在载波信号的 $\pm 600\text{kHz}$ 内所测得。

表 28——915MHz 频带 PSD 的限度

频率	相对限度	绝对限度
$ f - f_c > 1.2\text{MHz}$	-20dB	-20dBm

6.6.3.3 符号传输速率

在本标准中，868MHz 频带使用 BPSK 调制方式的物理层的符号速率为 20 千符号/秒；915MHz 频带使用 BPSK 调制方式的物理层的符号速率是 40 千符号/秒，并且要求其传送速率精度为 $\pm 40\text{ppm}$ 。

6.6.3.4 接收机灵敏度

在 6.1.7 节中描述的情况下，设备接收机的灵敏度最低为 -92dBm 或者更高的灵敏度。

6.6.3.5 接收机抗干扰水平

因为在 868.0~868.6MHz 频带上仅有一个信道可以利用，因此，下面只对 902~928MHz 频带上的接收机邻近信道干扰性进行了限定。

表 29 给出了接收机最小的抗干扰电平。其中，邻近信道是指在有用信道任何一边，并距离信道频率最近的信道；交替信道是指比邻近信道还远的信道。例如，信道 5 是有用信道，那么信道 4 和信道 6 就是邻近信道，信道 3 和信道 7 就是交替信道。

表 29——915MHz 物理层要求的接收机最小抗干扰电平

邻近信道抗干扰电平	交替信道抗干扰电平
0dB	30dB

邻近信道的抗干扰电平按照以下方式测量：被测量的信号必须是一个适合 915MHz IEEE 802.15.4 物理层伪随机数据信号，就是 6.6.2 中定义的那种。被测量的信号以比 6.6.3.4 中给出的最高允许接收机灵敏度高 3dB 的水平输入接收机。

在邻近信道和交替信道中，一个 IEEE 802.15.4 信号以表 29 中描述的相对水平输入。测试每次只测试一个干扰信号。接收机必须满足 6.1.7 节中定义的在

这些条件下的错误率标准。

6.7868 / 915MHz 频率带 (可选) 幅移键控 (ASK) 物理层功能描述

6.7.1 868/915MHz 频带数据率

使用 ASK 调制方式的物理层, 当在 868/915MHz 的频带上时, 其数据率为 250kbps; 在 868/915MHz 的频带上使用 ASK 调制方式不是必须的。如果 868/915MHz 的频带上使用 ASK 调制方式, 那么这个设备也必须能使用 BPSK 调制方式来调制信号。

6.7.2 扩展调制

使用 ASK 调制方式的物理层采用一种平行序列扩频多码调制技术(PSSS), 这项技术通常被叫做正交码分多路技术(OCDM)。在每个符号数据周期, 在 868MHz 频带上 20 信息比特和在 915MHz 频带上 5 比特信息被分别调制到 20 和 5 个几乎正交的 PN 序列上。868MHz 频带上的 20 个和 915MHz 频带上的 5 个 PN 序列被线性集合到一起形成一个多电平 32 码片符号, 相当于 868MHz 的 64 半码片符号和 915MHz 的多电平 32 位符号。每个符号被简单地预编码之后, 对于 868MHz 形成一个多电平 64 半位符号, 对于 915MHz 形成一个多电平 32 位符号, 使用 ASK 调制方式将这些码片符号调制到载波上。

6.7.2.1 调制器参考模型

平行序列扩展调制功能的参考模型如图 22 所示。图中所涉及的功能将在下面的小节中予以介绍。

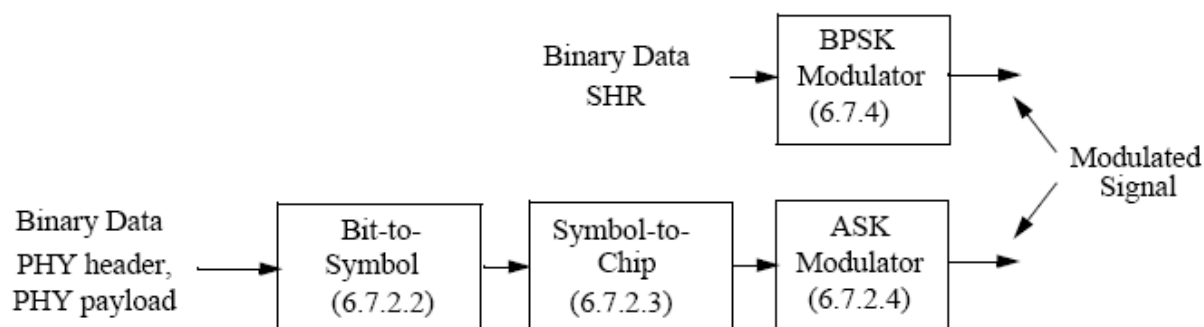


Figure 22—Modulation and spreading functions

如图 22 所示, 物理层协议数据单元的每个字节都要被扩展调制功能逐个处理。使用 BPSK 调制器把前同步码进行编码, 物理层帧头和物理层净荷依次经过比特-码片映射、符号-码片扩展和 ASK 调制模块。

6.7.2.2 比特-符号映射

从物理层帧头的第一个字节的最低有效位(b_0)开始, 紧接着物理层帧头的下一个字节, 868MHz 的前 20 比特和 915MHz 的前 5 比特, 映射为第一个符号数据。紧接着是 868MHz 下一个 20 比特和 915MHz 下一个 5 比特, 直到物理层

协议数据单元结束，相继被映射为后面的符号数据，直至物理层帧头和物理层载荷的所有字节都被映射为符号。通常每个字节的最低有效位首先被映射。每个符号的最低有效位首先被发送。最后输入的位后面填充一个“0”比特。为了保持控制信号是随机的，这些“0”比特也通过 PSSS 被编码传送。

6.7.2.3 符号-码片映射

在 868MHz 频带上，每个符号数据都被映射为一个多电平 64 半位符号，在 915MHz 频带上被映射为一个多电平 32 位符号。本节将详述映射过程。图 23 给出了符号-码片映射的总图。

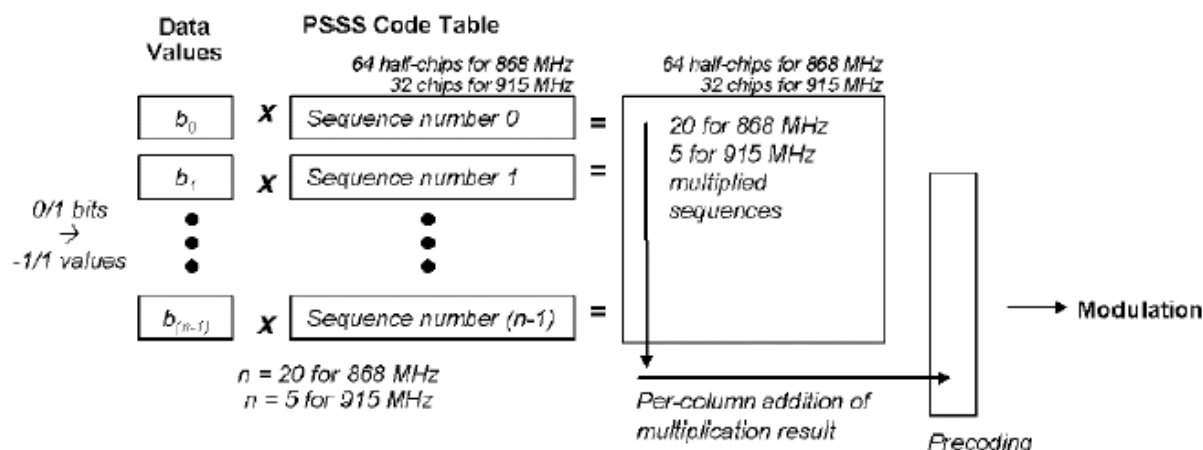


Figure 23—Symbol-to-chip mapping for PHY header and PHY payload

数据流的每一个比特都用为 868MHz 频带定义的编码表 30 和为 915MHz 频带定义的编码表 31 中相应的序列进行放大。通过分别为 868MHz 频带选择 20 个和为 915MHz 频带选择 5 个 31 位的周期移相基序列，然后在每个序列中加入一个 1 位的循环扩展，产生 PSSS 编码表。对于 868MHz 频带 PSSS，31 位基序列循环地移相 1.5 码片来产生表中的下一个序列。对于 915MHz 频带 PSSS，31 位基序列循环地移相 6 码片来产生表中的下一个序列。

由符号数据组成的比特向量被 PSSS 编码表放大。也就是说，数据符号的比特 b_0 由序列“0”来放大，比特 b_1 由序列“1”来放大，依此类推。在放大之前，数据比特被改为两极电平：数据比特“1”变为 +1，“0”变为 -1。放大的结果是一个调制编码表，跟表 30 和 31 类似，但是每一排既不是被反转也不是与数据比特相对应。

随后，调制编码表的所有序列都被线性地集合到一起，在 868MHz 频带上形成一个多电平 64 半码片符号和在 915MHz 频带上形成一个多电平 32 位符号。例如，多电平序列的码片 0 是通过线性地集合每个已调制序列的 0 码片而产生的。

在 915MHz 频带上结果是 32 码片 $c_0 \dots c_{31}$ ，在 868MHz 频带上结果是 64 半码片是 $c_0 \dots c_{63}$ 。

接下来，预编码操作应用到 915MHz 频带上的多电平 32 码片符号和 868MHz 频带上的多电平 64 半码片符号上。预编码分别对各个符号进行操作，通常分两

步执行。第一步，在每个 915MHz 频带上的 32 码片符号和 868MHz 频带上的 64 半码片符号中加入一个常量。选择的这个常量必须使形成的序列的最大值和最小值关于 0 对称。用 $p(m)$ 表示正交的多电平 32 位符号序列，那么经过预编码的第一步修改后的序列表达式为 (5)。

$$p'(m) = p(m) - \frac{(Max + Min)}{2} \quad (5)$$

第二步，一个比例常量被 915MHz 频带上和 868MHz 频带上 $p'(m)$ 中的每一个码片和半码片放大。这个常量使得序列最大幅值为 1。记第二步的输出为 $p''(m)$ ，那么

$$p''(m) = \frac{p'(m)}{Max'} \quad (6)$$

其中， Max' 是 $p'(m)$ 中的最大值。

915MHz 频带上的多电平 32 码片和 868MHz 频带上的多电平 64 半码片的预编码序列如 6.7.2.4 中所述被调制到载波上。

6.7.2.4 ASK 调制方式

每个符号数据映射成的码片序列被带有平方根升余弦脉冲形状的 ASK 调制方式调制到载波上。在 868MHz 频带上，码片速率是 400kchip/s，相当于的 800 khalf-chip/s。在 915MHz 频带上，码片速率是 1600kchip/s。

6.7.2.4.1 脉冲形状

用来表示每个基带码片的根升余弦脉冲形状由下式描述。

$$h(t) = \begin{cases} \frac{\left\{ \pi(r+1) \cdot \sin\left(\frac{\pi(r+1)}{4} \frac{r}{r}\right) + \pi(r-1) \cdot \cos\left(\frac{\pi(r-1)}{4} \frac{r}{r}\right) - 4r \cdot \sin\left(\frac{\pi(r-1)}{4} \frac{r}{r}\right) \right\}}{2\pi\sqrt{T_c}}, & t = (\pm T_c / (4r)) \\ \frac{4r}{\pi\sqrt{T_c}} - \frac{(r-1)}{\sqrt{T_c}}, & t = 0 \\ 4r \frac{\cos((1+r)\pi/T_c) + \sin((1-r)\pi/T_c)}{\pi\sqrt{T_c}(1 - (4\pi/T_c)^2)}, & t \neq 0 \text{ 和 } t = (\pm T_c / (4r)) \end{cases} \quad (7)$$

当在 868/915MHz 频带上工作时，滚动系数 $r = 0.2$ 。信号在发射之前必须被滤波以使发射功率谱密度在规定范围之内。激励脉冲形状滤波器以 915/868MHz 频带上的码片率/半码片率产生脉冲。表达式中的 T_c 是 868MHz 和 915MHz 频带上的码片（不是半码片）周期。

6.7.2.4.2 码片传输规则

在每个符号周期，最低有效位/半位 c_0/hc_0 ，被首先发送，最高有效位 c_{31}/hc_{63}

最后发送。

Table 30—PSSS code table used in symbol-to-chip mapping for 868 MHz

Sequence number	Chip number																															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
11	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
13	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
14	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
15	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
17	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
18	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
19	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
half-chip number																																
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
half-chip number																																

Table 31—PSSS code table used in symbol-to-chip mapping for 915 MHz

Sequence number	Chip number																															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1
2	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1
3	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
4	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1

6.7.3 868/915MHz 频带使用 ASK 调制方式的物理层规范

6.7.3.1 工作频率范围

采用 ASK 调制方式的 868/915MHz 物理层，868MHz 的工作频带为 868.0～868.6MHz；915MHz 的工作频段为 902～928MHz。

6.7.3.2 915MHz 频带发射功率谱密度

发射的谱信号各参量应低于表 32 所列出的限度值。无论是相对限度，还是绝对限度，平均的功率谱必须用 100kHz 带宽的分辨率来测量。对于相对限度，它的参考电平是最高的平均频谱功率，这是在载波信号频率 f_c 的 $\pm 600\text{kHz}$ 带宽内测得的。

表 32——915MHz 频率带 O-QPSK 发射功率谱密度的限度

频率	相对限度	绝对限度
$ f - f_c > 1.2\text{MHz}$	-20dB	-20dBm

6.7.3.3 符号速率

868MHz 频带的符号速率为 12.5 千符号/秒 $\pm 40\text{ppm}$ ；915MHz 频带的符号速率是 50 千符号/秒，并且要求其传送速率精度为 $\pm 40\text{ppm}$ 。

6.7.3.4 接收机灵敏度

在 6.1.7 节中描述的情况下，一个合适的设备接收机的灵敏度最低为 -85dBm 或者更高的灵敏度。

6.7.3.5 接收机抗干扰水平

因为在 868.0～868.6MHz 频带上仅有一个信道可以利用，因此，下面只对 902～928MHz 频带上的接收机邻近信道干扰性进行了限定。

表 33 给出了接收机最小的抗干扰电平。其中，邻近信道是指在有用信道任何一边，并距离信道频率最近的信道；交替信道是指比邻近信道还远的信道。例如，信道 5 是有用信道，那么信道 4 和信道 6 就是邻近信道，信道 3 和信道 7 就是交替信道。

表 33——915MHz 物理层要求的接收机最小抗干扰电平

邻近信道抗干扰电平	交替信道抗干扰电平
0dB	30dB

邻近信道的抗干扰电平按照以下方式测量：被测量的信号必须是一个适合 915MHz IEEE 802.15.4 物理层伪随机数据信号，就是 6.7.2 中定义的那种。被测量的信号以比 6.7.3.4 中给出的最高允许接收机灵敏度高 3dB 的水平输入接收机。

在邻近信道和交替信道中，一个 IEEE 802.15.4 信号以表 33 中描述的相对水平输入。测试每次只测试一个干扰信号。接收机必须满足 6.1.7 节中定义的在这些条件下的错误率标准。

6.7.4 使用 ASK 调制方式的物理层的同步包头

同步包头 SHR 使用为物理层帧头和物理层服务数据单元编码的平行序列扩频技术的一个子集。SHR 码片被使用跟物理层帧头和物理层服务数据单元相同的码片率和脉冲形状的 BPSK 调制方式发送。然而，同步帧头的符号-码片映射是不同的，将在 6.7.4.1 节和 6.7.4.2 节中描述。

6.7.4.1 使用 ASK 调制方式的前同步码

在 868MHz 频带上，前同步码是表 30 中的序列数字 0 重复 2 次产生的，而在 915MHz 频带上，前同步码是表 31 中的序列数字 0 重复 6 次产生的。在 868MHz 频带上产生前同步码的周期是 160 微秒，在 915 频带上是 120 微秒。表中最左边的值为“-1”的码片 “0”首先被发送。前同步码如图 22 中显示的由 BPSK 方式调制。脉冲形状跟表达式 7 中为物理层净荷定义的一样。

6.7.4.2 使用 ASK 调制方式的物理层帧起始定界符(SFD)

在 868MHz 频率带上，帧起始定界符是将表 30 中的 0 进行反转得到的，在 915MHz 频率带上，帧起始定界符是将表 31 中的 0 进行反转得到的。帧起始定界符如图 22 中显示的由 BPSK 方式调制。脉冲形状跟表达式 7 中为物理层净荷定义的一样。

6.7.4.3 平行序列扩频技术预编码的实例

表 34 显示了将用 915MHz 的编码表表 31 进行表明的 5 位示例符号。

表 34——5 位示例符号

数据位	
比特	比特值
b0	1
b1	-1
b2	1
b3	-1
b4	-1

通过衡量序列 0 的 b_0 ，序列 1 的 b_1 ...序列 4 的 b_4 ，衡量后的序列在表 35 中列出。PSSS 符号 $p^{(m)}$ 通过加入衡量后的序列的列计算出来。在 868MHz 频带上，半码片被加入到 column-wise。

对于表 35 中的 $p^{(m)}$ ，最大值=5，最小值=-5。一个符号的预编码独立于任何其他的符号。表达式 (5) 和 (6) 中列出预编码的两个步骤。 $p'(m)$ 和 $p''(m)$ 结果在表 36 中。

图 24 描述了将被应用到脉冲整形滤波器的示例 $p''(m)$ 码片 weights。

Table 35—Weighted sequences

Weighted sequence	Chip number																															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
2	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
3	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1
4	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1
$p(m)$	-5	-3	-1	-3	1	1	1	3	-3	1	-1	1	-1	-1	1	-3	3	-1	-1	-1	1	1	1	-3	3	3	5	-1	-1	3	1	-5

Table 36— $p'(m)$, aligned symmetric to zero PSSS symbol, and $p''(m)$, precoded PSSS symbol

$p'(m)$	-5	-3	-1	-3	1	1	1	3	-3	1	-1	1	-1	-1	1	-3	3	-1	-1	-1	1	1	1	-3	3	3	5	-1	-1	3	1	-5
$p''(m)$	-1.0	-0.6	-0.2	-0.6	0.2	0.2	0.2	0.6	-0.6	0.2	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.6	0.6	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0.2	-0.6	0.6	0.6	1.0	-0.2	-0.2	0.6	0.2	-1.0

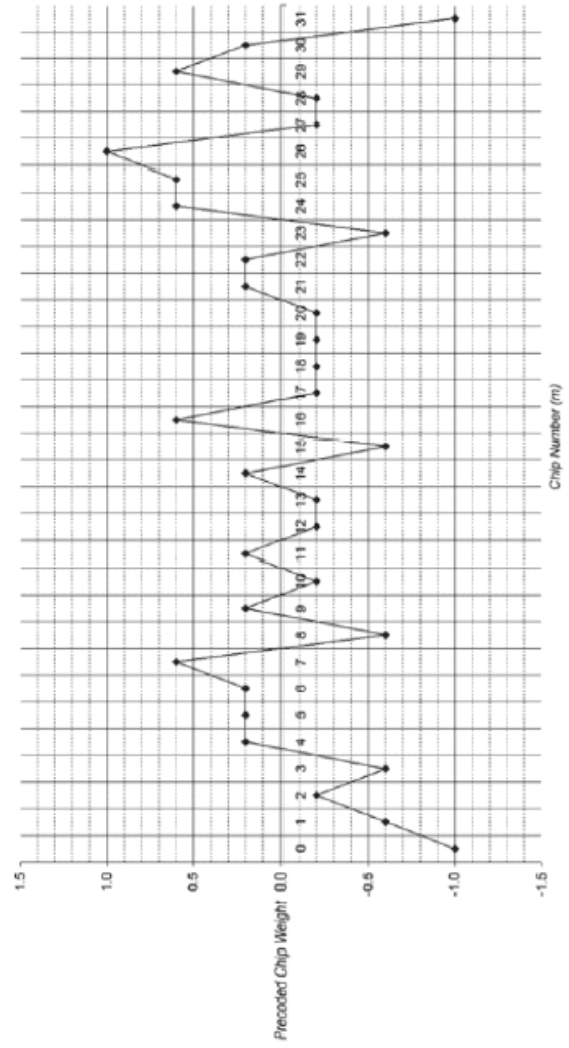


Figure 24—Precoded PSSS symbol $p''(m)$

6.8 868 / 915MHz 频率带 (可选) 使用 O-QPSK 调制方式的物理层

功能描述

6.8.1 868 / 915MHz 频率带数据速率

使用 O-QPSK 调制方式的物理层，当工作在 868MHz 的频带上时，其数据率为 100kbps；当工作在 915MHz 的频带上时，其数据率为 250kbps。在 868/915MHz 的频带上使用 O-QPSK 调制方式不是必须的。如果 868/915MHz 的频带上使用 O-QPSK 调制方式，那么这个设备也必须能使用 BPSK 调制方式来调制信号。

6.8.2 扩展调制

使用 O-QPSK 调制方式的物理层采用 16 相位准正交调制技术。在每个符号数据周期，4 位信息比特被用来从 16 个几乎正交的伪随机序列（PN 序列）中选取其中一个序列作为传送序列。根据所发送连续的数据信息，将所选出的 PN 序列串连起来，并使用 O-QPSK 的调制方式，将这些集合在一起的序列调制到载波上。

6.8.2.1 调制器参考模型

图 25 中的各功能块为 868/915MHz 频带物理层扩展调制功能的参考模块，每个模块中所设计数据的功能将在下面的小节中介绍。从帧头字符直到数据包的最后一个字节，数据包的每个比特都必须依次经过比特-码片映射、符号-码片映射和调制功能模块。在每个字节内，最低有效位 b_0 被最先处理，最高有效位 b_7 被最后处理。

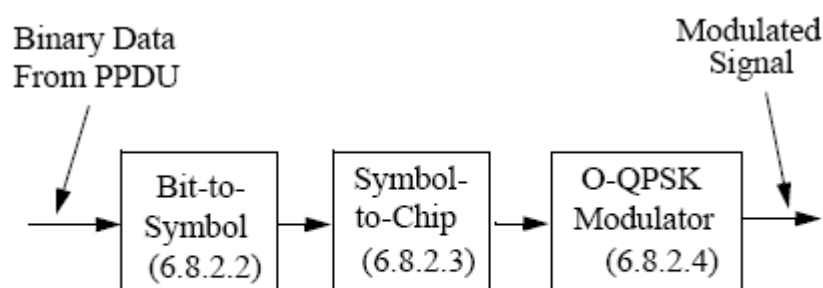


Figure 25—Modulation and spreading functions

6.8.2.2 比特-符号映射

物理层协议数据单元中所有的二进制数据都必须使用图 25 所示的扩展调制功能进行转换处理。下面描述二进制信息是如何被映射为符号数据的。

每个字节的低 4 位 (b_0, b_1, b_2, b_3) 都转换成一个符号数据，高 4 位 (b_4, b_5, b_6, b_7) 转换成下一个符号数据。物理层协议数据单元的每个字节都要逐个进行处理，即从它的前端到它的最后一个字节。在每个字节内，最低有效符号 (b_0, b_1, b_2, b_3) 被最先处理，最高有效符号 (b_4, b_5, b_6, b_7) 被最后处理。

6.8.2.3 符号-码片映射

每个符号数据都必须映射成一个 16 位的伪随机序列（PN 序列），如表 37 所示。

Table 37—Symbol-to-chip mapping for O-QPSK

Data symbol (decimal)	Data symbol (binary) (b ₀ b ₁ b ₂ b ₃)	Chip values (c ₀ c ₁ ... c ₁₄ c ₁₅)
0	0 0 0 0	0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1
1	1 0 0 0	0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1
2	0 1 0 0	0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0
3	1 1 0 0	1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0
4	0 0 1 0	0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0
5	1 0 1 0	1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1
6	0 1 1 0	1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 1
7	1 1 1 0	1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 0
8	0 0 0 1	0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0
9	1 0 0 1	0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0
10	0 1 0 1	0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 1
11	1 1 0 1	1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1
12	0 0 1 1	0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 1
13	1 0 1 1	1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0
14	0 1 1 1	1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0
15	1 1 1 1	1 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1

6.8.2.4 O-QPSK 调制方式

码片序列通过采用半正弦脉冲形成的 O-QPSK 调制方式，将每个符号数据调制到载波信号上。其中，编码为偶数的码元调制到 I 相位的载波上，编码为奇数的码元调制到 Q 相位的载波上。因为每个符号数据都由 16 码元序列来表示，所以，码元速率（一般，868MHz 和 915MHz 频带上分别为 400kchip/s 和 1.0Mchip/s）是符号速率的 16 倍。为了使 I 相位和 Q 相位的码元调制存在偏移，Q 相位的码元相对于 I 相位的码元要延迟 T_c 秒发送，T_c 是码元速率的倒数，如图 26 所示。

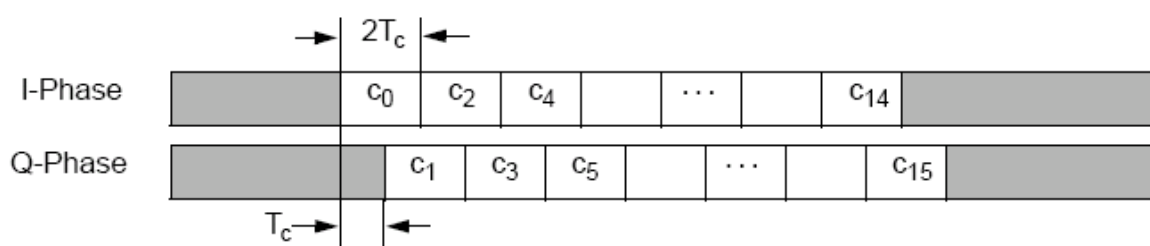


Figure 26—O-QPSK chip offsets

6.8.2.5 脉冲形状

每个基带码元用半正弦脉冲形式表示，其表达式如(8):

$$p(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{2T_c}\right) & 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

图 27 画出了半正弦脉冲形式的基带码元序列的样图。

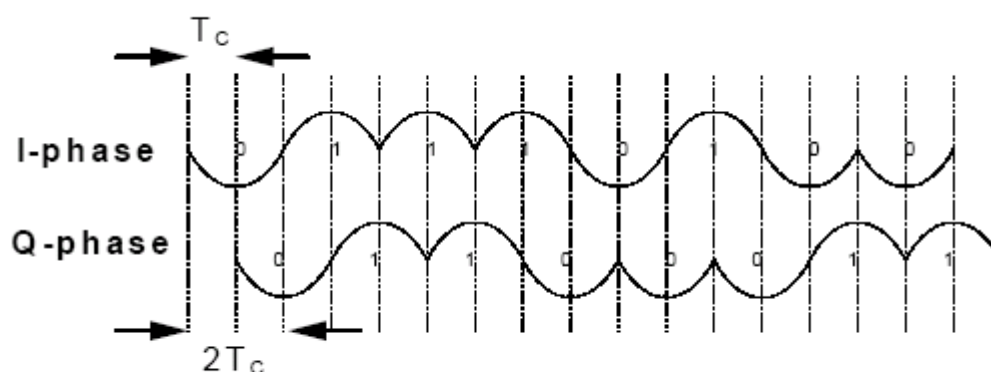


Figure 27—Sample baseband chip sequences with pulse shaping

6.8.2.6 码片传输规则

在每个符号周期，最低有效码片 c_0 优先发送，最高有效码片 c_{15} 最后发送。

6.8.3 868/915MHz 频带的无线通信规范

6.8.3.1 工作频率范围

采用 O-QPSK 调制方式的物理层，868MHz 的工作频段为 868.0~868.6MHz；915MHz 的工作频段为 902~928MHz。

6.8.3.2 发射功率谱密度

当在 868MHz 频带上工作时，信号在发射之前必须被滤波，以使发射功率谱密度在规定范围之内。滤波器是一个近似升余弦脉冲(滚动系数 $\alpha = 0.2$)，表达式如下：

$$p(t)=\begin{cases} \frac{\sin(\pi/T_c)}{\pi/T_c} \frac{\cos(r\pi/T_c)}{1-(4r^2t^2/T_c^2)}, & t \neq 0 \\ 1, & t = 0 \end{cases} \quad (9)$$

当工作在 915MHz 频带上时，发射的谱信号各参量应低于表 38 所列出的限度值。无论是相对限度，还是绝对限度，平均的功率谱必须用 100kHz 带宽的分辨率来测量。对于相对限度，它的参考电平是最高的平均功率谱，这是在载波信号频率 f_c 的 $\pm 600\text{kHz}$ 带宽内测得的。

表 38——915MHz 频率带 O-QPSK 发射功率谱密度的限度

频率	相对限度	绝对限度
$ f - f_c > 1.2\text{MHz}$	-20dB	-20dBm

6.8.3.3 符号速率

在 868MHz 频带上，符号速率为 25 千符号/秒；在 915MHz 频带上，符号速率是 62.5 千符号/秒，并且要求其传送速率精度为 $\pm 40\text{ppm}$ 。

6.8.3.4 接收机灵敏度

在 6.1.7 节中描述的情况下，一个合适的设备接收机的灵敏度最低为 -85dBm 或者更高的灵敏度。

6.8.3.5 接收机抗干扰水平

因为在 868.0~868.6MHz 频带上仅有一个信道可以利用，因此，下面只对 902~928MHz 频带上的接收机邻近信道干扰性进行了限定。

表 39 给出了接收机最小的抗干扰电平。其中，邻近信道是指在有用信道任何一边，并距离信道频率最近的信道；交替信道是指比邻近信道还远的信道。例如，信道 5 是有用信道，那么信道 4 和信道 6 就是邻近信道，信道 3 和信道 7 就是交替信道。

表 39——915MHz 物理层要求的接收机最小抗干扰电平

邻近信道抗干扰电平	交替信道抗干扰电平
0dB	30dB

邻近信道的抗干扰电平按照以下方式测量：被测量的信号必须是一个适合 915MHz IEEE 802.15.4 物理层伪随机数据信号，就是 6.8.2 中定义的那种。被测量的信号以比 6.8.3.4 中给出的最高允许接收机灵敏度高 3dB 的水平输入接收机。

在邻近信道和交替信道中，一个 IEEE 802.15.4 信号以表 39 中描述的相对水平输入。测试每次只测试一个干扰信号。接收机必须满足 6.1.7 节中定义的在这些条件下的错误率标准。

6.9 无线通信的通用规范

6.9.1 到 6.9.9 节中的规范适用于 2450MHz 物理层和 868/915MHz 物理层。但是，6.9.3 节能应用到所有物理层，包括交替的物理层。

6.9.1 发射状态到接收状态转换时间

从发射状态到接收状态转换时间应小于 aTurnaroundTime 值。

发射状态到接收状态转换时间是在空中接口进行测量，是从发送完数据包的

最后一个码元（或最后一个符号）到接收机已经准备好接收下一个数据包的第一个码元（或第一个符号）的最短可能时间。

发射状态到接收状态转换时间应小于或等于接收状态到发射状态转换时间。

6.9.2 接收状态到发射状态转换时间

从接收状态到发射状态转换时间应小于 aTurnaroundTime 值。

接收状态到发射状态转换时间是在空中接口进行测量，是从接收到数据包的最后一个码元（或最后一个符号）到发射机已经准备好发送下一个物理层协议数据包的第一个码元（或第一个符号）的最短可能时间。

6.9.3 差错向量的定义

发射机的调制精度由差错向量(EVM)来决定。为了测量差错向量，假设发射的N个复合码片向量为 (I_j, Q_j) ，在接收端接收到的N个复合码片的向量为 $(\tilde{I}_j, \tilde{Q}_j)$ 。对于每个接收到的复合码片，由发射的复合码片来决定其判决。即向量 (I_j, Q_j) 选择为复合码片的理想位置(即判决箱的中心位置)，差错向量 $(\delta I_j, \delta Q_j)$ 定义为理想接收点到实际接收点的距离。（见图 28）

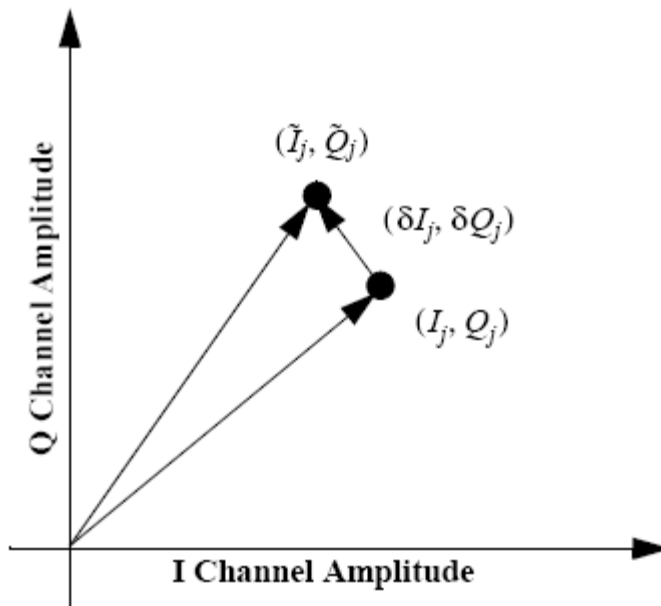


Figure 28—Error vector calculation

因此，接收到的向量是理想向量和差错向量之和，表达式如（10）所示：

$$(\tilde{I}_j, \tilde{Q}_j) = (I_j, Q_j) + (\delta I_j, \delta Q_j) \quad (10)$$

其差错向量值的定义如（11）：

$$EVM = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)}{S^2}} \times 100\% \quad (11)$$

其中, S 是向量到理想坐标点的距离(对于 915/868MHz 的平行序列扩频技术, S 是 ASK 阶大小, 测试时, 物理层帧头和物理层净荷应该被设置为 0)

$(\delta I_j, \delta Q_j)$ 为差错向量

当测量 1000 个码片时, 发射机差错向量值应小于 35% 的。在通过一个参考接收机系统修复以后, 差错向量测量在基带 I 和 Q 码片上进行。在进行差错向量测量时, 参考接收机将执行载波锁定, 符号计时恢复, 和幅值调整功能。

6.9.4 发射信号的中心频率误差

发射信号的中心频率误差最大为 $\pm 40\text{ppm}$ 。

6.9.5 发射功率

发射机的最小发射功率为 -3dBm。为了减少对其他设备和系统的干扰和影响, 在保证设备能够正常地工作条件下, 每个设备的发射功率应尽可能的小。

最大的发射功率由当地法规来限制。

6.9.6 接收机最大输入电平

接收机的最大输入电平就是有用信号的最大功率值, 接收机的错误率必须满足 6.1.7 节中的标准。要求接收机的最大输入电平应大于等于 -20dBm。

6.9.7 接收机的能量检测

接收机的能量检测作为信道选择算法中的一个组成部分, 为了对网络进行连接管理, 而提供的一种信道测量。它在信道带宽之内, 对所接收到的信号功率进行估计, 而不需要在信道上, 对信号进行鉴别和译码。通常, 能量检测的时间为 8 个符号周期。

能量检测的结果为从 0x00 到 0xFF 的 8 比特的整数, 并通过物理层原语 PLME-ED.confirm 向 MAC 层的管理实体报告所检测的结果。ED 的最小值(0)代表接受功率小于指定的接收机灵敏度的 10dB, 并用能量检测值来描述接收功率的范围至少为 40dB。在这个范围之内, 从接收功率的分贝值与能量检测值之间呈线性映射关系, 其精度为 $\pm 6\text{dB}$ 。

6.9.8 链路品质信息

链路品质信息(LQI)表示了所接收的数据包强度和品质的特性。该信息的检测通过利用接收机的能量检测结果、信噪比的估计或者将它们相结合的方法来实现。本标准中没有详述网络层和应用层是如何使用链路品质信息结果的。

对每个所收到的数据包都要进行链路品质信息测量, 其测量的结果为一个从 0x00 到 0xFF 的 8 比特的整数, 并通过物理层原语 PD-DATA.indication 向 MAC 层报告。链路品质信息的最小值(0x00)和最大值(0xFF)分别对应于可被接收机接收信号的最低和最高品质, 链路品质信息值均匀地分布在两个极限值之间。最少使用链路品质信息的 8 个唯一值。

6.9.9 清除信道评估

物理层通过如下所述的 3 种方法中的一种方法，进行清除信道评估(CCA):

- CCA 模式 1: 超出阈值的能量。当 CCA 检测到一个超出能量检测的阈值能量时，给出一个忙信息。
- CCA 模式 2: 载波判断。当 CCA 检测到一个具有本标准物理层同样的调制方式和扩展特性的信号正在使用信道时，给出一个忙的信息。
- CCA 模式 3: 带有超出阈值能量的载波判断。CCA 使用以下的逻辑组合来给出一个忙信号
 - 检测到一个具有 IEEE 802.15.4 标准特性的扩展调制信号，并且
 - 超出阈值能量的扩展调制信号，逻辑操作可能是“与”或“或”。

对于任何一种 CCA 模式，如果物理层正在接收一个物理层协议数据单元时，收到 PLME-CCA.request 原语，那么 CCA 也会报告一个忙的信息。在帧定界符检测后，才考虑接收物理层协议数据单元。对于帧定界符的检测时间为检测到物理层包头的 8 比特组数据为止。

当检测到信道忙时，物理层用具有状态 BUSY 的 PLME-CCA.confirm 原语向 MAC 层的管理实体报告。

当检测到信道空闲时，物理层用具有状态 IDLE 的 PLME-CCA.confirm 原语向 MAC 层的管理实体报告。

物理层的个人网络信息库(PIB)的属性 *phyCCAMode*（见 6.4）表示所选择的清除信道评估的工作模式。通常清除信道评估的参数应符合以下标准：

- (1) 能量检测阈值最多超出协议标准接收机灵敏度的 10dB。
- (2) 清除信道评估的检测时间等于 8 个符号周期。

7. MAC 层规范

本节介绍IEEE 802.15.4标准的MAC层协议规范。MAC层处理所有物理层无线信道的接入,其主要功能为:

- 网络协调器产生网络信标;
- 与信标同步;
- 支持个域网 (PAN) 链路的建立和断开;
- 为设备的安全提供支持;
- 采用冲突避免的载波检测多路访问 (CSMA-CA) 机制访问信道;
- 处理和维持保护时隙 (GTS) 机制;
- 在两个同等的MAC层实体之间提供一个可靠的通信链路。

本节中由MAC层描述和维护的常量和属性都用斜体标出。常量一般以字母“a”开头，例如，*aBaseSlotDuration*。所有的常量都在表85（在7.4.1中）列出。属性一般以“phy”开头，例如，*macAckWaitDuration*。所有的属性都在表86（在7.4.2中）中列出，安全属性在表(见7.6.1)88中列出。

7.1 MAC 层服务规范

MAC层在服务协议汇聚层和物理层之间提供了一个接口。从概念上说,MAC层包括一个管理实体,通常称为**MAC层管理实体 (MLME)**, 该实体提供一个服务接口, 通过此接口可调用MAC层管理功能。同时, 该管理实体还负责维护MAC固有的管理对象的数据库。该数据库包含了MAC层的个域网信息数据库 (PIB)。

图 29 描述了 MAC 层的结构和接口。

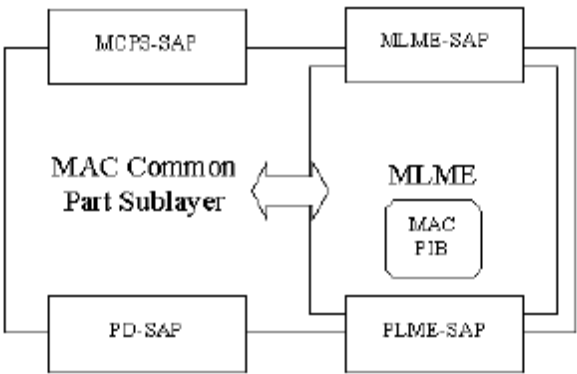


Figure 29—The MAC sublayer reference model

MAC层通过它的两个服务接入点提供两种不同的服务:

— MAC层数据服务,通过它的公共部分子层数据服务接入点 (MCPS-SAP) 接入;

— MAC层管理服务,通过MAC层管理实体服务接入点 (MLME-SAP) 接入。

这两种服务为服务协议汇聚层和物理层之间提供了一个接口, 这个接口通过物理层数据服务接入点 (PD-SAP) 和管理实体服务接入点 (PLME-SAP) 来实现。(见6.2)。除了这些外部接口之外,在MAC层管理实体和公共部分子层之间还存在一个隐含的接口, MAC层管理实体通过此接口使用MAC层数据服务。

7.1.1 MAC 数据服务

MAC 层公共子层-服务接入点 (MCPS-SAP) 支持在对等的服务协议汇聚层 (SSCS) 实体之间传输服务协议汇聚层的协议数据单元 (SPDU)。

表 40 列出了 MAC 层公共子层-服务接入点所支持的原语。标有符号(.)的原语对简化功能设备来说是可选的。这些原语在表中提及的章节进行详细描述。

Table 40—MCPS-SAP primitives

MCPS-SAP primitive	Request	Confirm	Indication
MCPS-DATA	7.1.1.1	7.1.1.2	7.1.1.3
MCPS-PURGE	7.1.1.4♦	7.1.1.5♦	—

7.1.1.1 MCPS-DATA.request 原语

MCPS-DATA.request 用来请求从本地 MCA 层公共子层实体向对等连接设备的 MAC 层公共子层实体发送一个 SSCS 协议数据单元 SPDU (即 MAC 层服务数据单元 MSDU)。

7.1.1.1.1 服务原语的语义

MCPS-DATA.request 原语的语义如下：

MCPS-DATA.request (
SrcAddrMode,
DstAddrMode,
DstPANId,
DstAddr,
msduLength,
msdu,
msduHandle,
TxOptions,
SecurityLevel,
KeyIdMode,
KeySource,
KeyIndex
)

表 41 描述了 MCPS-DATA.request 原语中的参数。

表41——MCPS-DATA.request原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
SrcAddrMode	整型	0x00—0x03	原语和后面的 MPDU 的源地址模式。取值的含义为： 0x00=空地址(地址字段被忽略,见 7.2.1.1.8) 0x01=保留地址 0x02=16 位短地址 0x03=64 位长地址
DstAddrMode	整型	0x00—0x03	原语和后面的 MPDU 的目的地址模式。取值的含义为： 0x00=空地址(地址字段被忽略,见 7.2.1.1.6) 0x01=保留地址 0x02=16 位短地址 0x03=64 位长地址
DstPINId	整型	0x0000—0xffff	目标 MSDU 实体的 16 位 PAN 标识符
DstAddr	设备	与 DstAddrMode 参数的描述相同	目标 MSDU 实体的独立设备地址

	地址		
msduLength	整型	≤aMaxMACPayloadSize	MAC 层实体发送 MSDU 中的字节数
msdu	字节	—	MAC 层实体要发送的 MAC 层服务数据单元
msduHandle	整型	0x00—0xff	与 MAC 层实体发送的 MSDU 相关的句柄
TxOptions	位	3 bit field	(b0,b1,b2)三位指出 MSDU 的传输选项: b0,1= 确认传输,0=不被确认; b1, 信标网络中 1=以 GTS 的方式进行传输,0=的 CAP 传输; b2,1= 间接传输,0=直接传输; 对于非信标网络,b1 位将始终设为 0
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	传输使用的安全等级 (见 7.6.2.2.1 节表 95)
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	表明使用的密钥模式 (见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	4 或 8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.1.1.2 适当的用法

当一个服务协议数据单元的数据信息(MSDU)要发送给一个对等连接的服务协议汇聚层 实体时,由本地的服务协议汇聚层实体产生 MCPS-DATA.request 原语。

7.1.1.1.3 接收反应

当 MAC 层管理实体收到 MCPS-DATA.request 开始发送已经准备就绪的 MSDU。

MAC 层建立一个 MPDU, 以备在已经准备就绪的竞争中发送。SrcAddrMode 和 DstAddrMode 参数中的标记要与控制字段 (见 7.2.1.1)中的地址字段相符, 它们用来构成 MAC 层帧头 (MHR) 的帧控制字段和地址字段。如果 SrcAddrMode 和 DstAddrMode 参数被设置为 0x00(即省略寻址), MAC 层将返回一个带有 INVALID_ADDRESS 状态的 MCPS-DATA.confirm 原语。

如果 msduLength 参数长度大于 aMaxMACSafePayloadSize, MAC 层将帧控制字段的帧版本号子字段设置为 1。

TxOptions 参数表示 MAC 层的数据服务选择何种发送模式来发送一个准备就绪的 MSDU。如果 TxOptions 参数指定要求有确认的传输, 帧控制字段的确认请求子字段将被设置为 1。(见 7.5.6.4)

如果 TxOptions 参数指定要求以 GTS 的方式进行传输, MAC 层将判定是否存在一个有效的保护时隙(GTS 用法规则见 7.5.7.3)。如果不存在有效的保护时隙, MAC 层将返回一个带有 INVALID_GTS 状态的 MCPS-DATA.confirm 原语。反之, 如果存在有效的保护时隙, MAC 层将根据实际情况, 产生一个延迟, 直到该设备的有效接收保护时隙到来。如果 TxOptions 参数为非保护时隙传输方式, MAC 层发送 MAC 层服务数据单元 (MSDU) 时采用如下两种方式: (1) 在信标支持的 PAN 中, 在竞争接入期间, 采用有时隙的 CSMA-CA 机制; (2) 在非信标支持的 PAN 中, 采用非时隙的 CSMA-CA 机制。在 TxOptions 参数中指定了保护时隙传输方式后, 将忽略间接传输请求。

如果 TxOptions 参数指定传输方式为间接传输方式, 并且, 该原语由协调器的 MAC 层所接收, 则原语中所包含的信息将会增加到协调器的未决事务列表中。这些未决事务将分别依照各从设备的判断, 从列表中取出, 并进行处理, 其相关的判断方法, 将在 7.5.6.3 节中进行介绍。带有广播目的地址的事务将使用 7.2.1.1.3 中描述的机制传输。带唯一目的地址的事务由相关设备使用 7.5.6.3 中描述的判断方法提取出来。如果存储事务的容量不够, 那么, MAC 层将会丢弃该 MAC 层服务数据单元, 并返回一个带 TRANSACTION_OVERFLOW 状态的 MCPS-DATA.confirm 原语。如果能够存储该事务, 那么, 协调器将把事务信息添加到该未决事务列表中。如果在 macTransactionPersistenceTime 内, 没有处理该事务, 则将丢弃该事务信息, 并且 MAC 层将返回一个带有 TRANSACTION_EXPIRED 状态的 MCPS-DATA.confirm 原语。事务的处理过程将在 7.5.5 中介绍。如果 TxOptions 参数指定指定传输方式为间接传输方式, 但接收该原语的设备不是一个协调器, 或者不存在目的地址, 或者 TxOptions 参数指定了以 GTS 方式传输, 那么该间接发送选项都将会被忽略。

如果 TxOptions 参数指定不需要使用间接传输方式, MAC 层发送 MAC 层服务数据单元 (MSDU) 时采用如下两种方式: (1) 在信标支持的 PAN 中, 在竞争接入期间, 采用 CSMA-CA 机制; (2) 在非信标支持的 PAN 中, 立即发送。在 TxOptions 参数中指定了直接传输方式后, 而 MAC 层在发送 macMaxFrameRetries 之后并没有收到来自接受者的确认, MAC 将忽略该 MAC 层服务数据单元, 并返回一个带有 NO_ACK 状态的 MCPS-DATA.confirm 原语。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值, 表明该帧需要安全机制, MAC 层将把帧控制字段的的安全性子字段设置为 1。那 MAC 层将会基于 DstAddr、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 参数执行输出处理过程, 此过程将 7.5.8.2.1 节介绍。在输出帧处理过程中发生任何错误, MAC 层都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MCPS-DATA.confirm 原语。

如果被请求的事务太大而无法在竞争接入期或者保护时隙内完成, 在适当的时间, MAC 层将丢弃该帧, 并返回一个带有 FRAME_TOO_LONG 状态的 MCPS-DATA.confirm 的原语。

如果传输使用 CSMA-CA 机制, 而由于信道的不利条件 CSMA-CA 算法失败, 并且 TxOptions 参数指示需要直接传输方式, MAC 层将丢弃该帧, 并返回一个带有 CHANNEL_ACCESS_FAILURE 状态的 MCPS-DATA.confirm 的原语。

如果 MPDU 成功地被传输并且也收到确认帧 (如果要求确认), MAC 层将返回一个带有 SUCCESS 状态的 MCPS-DATA.confirm 的原语。

如果在 MCPS-DATA.request 原语的任何的参数都不被支持或者超出取值范围, MAC

层将返回一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MCPS-DATA.confirm 的原语。

7.1.1.2 MCPS-DATA.confirm 原语

MCPS-DATA.confirm 原语用来报告从本地服务协议汇聚层尸体向对等连接的远端服务协议汇聚层尸体发送服务协议数据单元（SPDU）的传输结果。

7.1.1.2.1 服务原语的语义

MCPS-DATA.confirm 原语的语义如下所示:

MCPS-DATA.confirm (
msduHandle,
status,
Timestamp
)

表 42 描述了 MCPS-DATA.confirm 原语中的参数。

表 42——MCPS-DATA.confirm 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
msduHandle	整型	0x00—0xff	与 MSDU 确认相关的句柄
status	枚举型	SUCCESS, TRANSACTION_OVERFLOW, TRANSACTION_EXPIRED, CHANNEL_ACCESS_FAILURE, INVALID_GTS, NO_ACK, COUNTER_ERROR, UNAVAILABLE_KEY, UNSUPPORTED_SECURITY or INVALID_PARAMETER	最后一次传输 MSDU 的结果状态
Timestamp	整型	0x000000—0xffffffff	可选项。在符号中，表明数据传输时间（见 7.5.4.1） 仅当状态参数为 SUCCESS 时，该参数有效；否则，Timestamp 参数的值不作它用。符号分界由 macSyncSymbolOffset 描述（见 7.4.1 表 86）。 此参数的值有 24 位，这个值的精度最小 20 位，其中低四位为最低有效位。

7.1.1.2.2 产生时间

MCPS-DATA.confirm 原语由 MAC 层实体产生，该原语返回一个对 MCPS-DATA.confirm 的原语的响应状态，例如，请求发送成功，则返回状态为 SUCCESS；或者返回一个代表出错的相应代码。状态参数的含义已在 7.1.1.1.3 和与 7.1.1.1.3 相关的小节中进行了详细描述。

7.1.1.2.3 适当的用法

当发送数据设备的服务协议汇聚层收到 MCPS-DATA.confirm 原语后，就能够得知请求发送服务协议数据单元的结果。如果传输请求成功地执行,则 SSCS 的状态参数将会就置为 SUCCESS；否则，给出错误的状态参数。

7.1.1.3 MCPS-DATA.indication 原语

MCPS-DATA.indication 原语用来表明 MAC 层成功地接收到远方发送来的 SPDU 数据 (即 MSDU)。

7.1.1.3.1 服务原语的语义

MCPS-DATA.indication 原语的语义如下
MCPS-DATA.indication (
SrcAddrMode,
SrcPANId,
SrcAddr,
DstAddrMode,
DstPANId
DstAddr,
msduLength,
msdu,
mpduLinkQuality,
DSN,
Timestamp,
SecurityLevel,
KeyIdMode,
KeySource,
KeyIndex
)

表 43 描述了 MCPS-DATA.indication 原语中的参数。

表 43——MCPS-DATA.indication 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
SrcAddrMode	整型	0x00—0x03	源 MPDU 地址模式，其含义如下： 0x00=空地址(地址字段被忽略) 0x01=保留 0x02=16 位短地址 0x03=64 位长地址
SrcPANId	整型	0x0000—0xffff	源 MSDU 实体的 16 位 PAN 标识符
SrcAddr	设备地址	与 SrcAddrMode 参数的描述相对应	源 MSDU 实体的独立设备地址
DstAddrMode	整型	0x00—0x03	源 MPDU 的目的地址，其含义如下： 0x00=空地址(地址字段被忽略) 0x01=保留 0x02=16 位短地址 0x03=64 位长地址
DstPANId	整型	0x0000—0xffff	MSDU 目的实体的 16 位 PAN 标识符

DstAddr	设备地址	与 DstAddrMode 参数的描述相对应	MSDU 目的实体的独立设备地址
msduLength	整型	≤aMaxMACFramesize	MAC 层实体所指定的包含在 MSDU 中的字节数
Msdu	字节	—	MAC 层实体所指定的由字节构成的 MSDU
mpduLinkQuality	整型	0x00—0xff	接收 MPDU 时所测得的 LQI 值。值越小代表的链路质量 LQI 越差
DSN	整型	0x00—0xff	接收的数据帧的数据序列编号
Timestamp	整型	0x000000—0xffffffff	可选项。在符号中，表明数据传输时间（见 7.5.4.1） 仅当状态参数为 SUCCEs 时，该参数有效；否则，Timestamp 参数的值不作它用。符号分界由 <i>macSyncSymbolOffset</i> 描述(见 7.4.1 表 86)。 此参数的值有 24 位，这个值的精度最小 20 位，其中低四位为最低有效位。
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	接收到的帧使用的安全等级（见 7.6.2.2.1 节表 95）
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	帧的发送方使用的密钥模式（见 7.6.2.2.2 节表 96）。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	0, 4 或 8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	帧的发送方使用的密钥的 originator。（见 7.6.2.4.2 节）若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	帧的发送方使用的密钥的索引。（见 7.6.2.4.2）若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.1.3.2 产生时间

MCPS-DATA.indication 原语值由 MAC 层产生，在 MAC 层管理实体接收到远方传来的数据帧后，通过该原语 MAC 层将接收到的数据帧经过适当的信息过滤处理后，再发送至服务协议汇聚层（SSCS），过滤处理操作在 7.5.6.2 中描述。

7.1.1.3.3 适当的用法

当服务协议汇聚层收到 MCPS-DATA.indication 原语时，就能够得知所发送的数据已经到达设备。如果收到原语时设备处于杂乱模式，那么参数将会按照 7.5.6.5 中指定的来设置。

7.1.1.4 MCPS-PURGE.request 原语

MCPS-PURGE.request 原语允许上一层从事务列表中清除一个 MSDU。

此原语对简化功能设备来说是可选的。

7.1.1.4.1 服务原语的语义

MCPS-PURGE.request 原语的语义如下：

MCPS-PURGE.request (
msduHandle

)

表 44 描述了 MCPS-PURGE.request 原语中的参数。

表 44——MCPS-PURGE.request 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
msduHandle	整型	0x00—0xff	要清除的 MAC 层服务数据单元句柄

7.1.1.4.2 适当的用法

设备 MAC 层的上层要从事务列表中清除一个 MAC 服务数据单元时，它就会产生 MCPS-PURGE.request 原语。

7.1.1.4.3 接收效应

当 MAC 层收到 MCPS-PURGE.request 原语后，MAC 层将从它的事务处理列表中搜索 msduHandle 参数所指定的 MAC 层服务数据单元。如果 MSDU 已经离开传送事务列表，那么就不会找到该 MSDU 的句柄，从而该 MSDU 不再被清除。如果搜索到与所指定句柄相匹配的 MAC 层服务数据单元，该 MAC 层服务数据单元将从事务列表中清除，并且，MAC 层将返回一个带有 SUCCESS 状态 MCPSPURGE.confirm 原语。如果没有搜索到与所指定的句柄相匹配的 MAC 层服务数据单元，则 MAC 层将返回一个带有 INVALID_HANDLE 的状态的 MCPS-PURGE.confirm 原语。

7.1.1.5 MCPS-PURGE.confirm 原语

MCPS-PURGE.confirm 原语向其上层报告请求从事务处理列表中清除 MAC 层服务数据单元的结果。

此原语对简化功能设备来说是可选的。

7.1.1.5.1 服务原语的语义

MCPS-PURGE.confirm 原语的语义如下：

```
MCPS-PURGE.confirm (
    msduHandle,
    status
)
```

表 45 描述了 MCPS-PURGE.confirm 原语中的参数。

表 45——MCPS-PURGE.confirm 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
msduHandle	整型	0x00—0xff	从事务处理列表中要清除的 MSDU 句柄
status	枚举型	SUCCESS or INVALID_HANDLE	执行清除 MSDU 的结果状态

7.1.1.5.2 产生时间

MCPS-PURGE.confirm 原语由 MAC 层实体产生，并将该原语作为对 MCPSPURGE.request 原语的响应发送给它的上层。请求发送成功，则返回状态为 SUCCESS；或者返回一个 INVALID_HANDLE 状态代表出错。状态参数的含义已在 7.1.1.4.3 中进行了详细描述。

7.1.1.5.3 适当的用法

当 MAC 层的上层收到 MCPS-PURGE.confirm 原语后，就能够知道请求从事务列表中清除 MAC 层服务数据单元的结果。如果清除请求成功，那么它的状态参数就设置为 SUCCESS；否则，它的状态参数将显示为错误。

7.1.1.6 数据服务消息顺序表

图 30 给出了在两个连接设备之间成功交换一组数据，两个设备必须进行的数据服务消息顺序。图 84 和图 85(见 7.7) 也给出了这一过程的流程图以及物理层所采用的步骤。

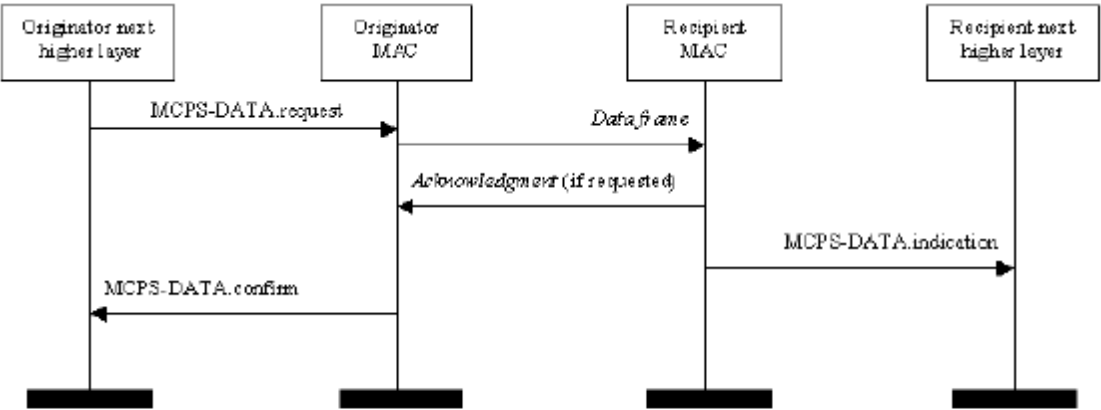


Figure 30—Message sequence chart describing the MAC data service

7.1.2 MAC 层管理服务

MAC 层管理实体的服务接入点 (MLME-SAP) 允许在上层和 MAC 层管理实体 (MLME) 之间传输管理命令。表 46 列出了 MLME 通过 MLME-SAP 所支持的原语。标有符号 (.) 的原语对简化功能设备来说是可选的。标有星号 (*) 的原语对两种设备类型 (RFD 和 FFD) 均是可选的。这些原语在表中提及的章节进行详细描述。

Table 46—Summary of the primitives accessed through the MLME-SAP

Name	Request	Indication	Response	Confirm
MLME-ASSOCIATE	7.1.3.1	7.1.3.2♦	7.1.3.3♦	7.1.3.4
MLME-DISASSOCIATE	7.1.4.1	7.1.4.2		7.1.4.3
MLME-BEACON-NOTIFY		7.1.5.1		
MLME-GET	7.1.6.1			7.1.6.2
MLME-GTS	7.1.7.1*	7.1.7.3*		7.1.7.2*
MLME-ORPHAN		7.1.8.1♦	7.1.8.2♦	
MLME-RESET	7.1.9.1			7.1.9.2
MLME-RX-ENABLE	7.1.10.1*			7.1.10.2*
MLME-SCAN	7.1.11.1			7.1.11.2
MLME-COMM-STATUS		7.1.12.1		
MLME-SET	7.1.13.1			7.1.13.2
MLME-START	7.1.14.1♦			7.1.14.2♦
MLME-SYNC	7.1.15.1*			
MLME-SYNC-LOSS		7.1.15.2		
MLME-POLL	7.1.16.1			7.1.16.2

7.1.3 连接原语

MLME-SAP 原语用来定义一个设备如何与个域网建立连接，成为网络设备。

所有的设备都为请求和确认连接原语提供一个接口。对于简化功能的设备来数，指示（indication）和响应（response）连接原语是可选项。

7.1.3.1 MLME-ASSOCIATE.request 原语

当一个设备请求与协调器建立连接时，就发出一个 MLME-ASSOCIATE.request 原语。

7.1.3.1.1 服务原语的语义

MLME-ASSOCIATE.request 原语的语义如下：

MLME-ASSOCIATE.request (
LogicalChannel,
ChannelPage,

CoordAddrMode,
 CoordPANId,
 CoordAddress,
 CapabilityInformation,
 SecurityLevel,
 KeyIdMode,
 KeySource,
 KeyIndex
)

表 47 描述了 MLME-ASSOCIATE.request 原语中的参数。

表 47——MLME-ASSOCIATE.request 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
LogicalChannel	整型	从物理层所支持的可用信道中选择	用于连接的逻辑信道
ChannelPage	整型	从物理层所支持的可用信道页中选择	用于连接的逻辑信道
CoordAddrMode	整型	0x02—0x03	被请求连接的协调器地址模式，取值的含义如下： 2=16 位短地址 3=64 位长地址
CoordPANId	整型	0x0000-0xffff	被请求连接的 PAN 标识符
CoordAddress	设备地址	与 CoordAddMode 参数的描述相对应	被请求连接的协调器地址
CapabilityInformation	位	见 7.3.1.2	描述已连接设备的操作性能
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	传输使用的安全等级（见 7.6.2.2.1 节表 95）
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	表明使用的密钥模式（见 7.6.2.2.2 节表 96）。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	4 或 8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	使用的密钥的 originator。（见 7.6.2.4.2）若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	使用的密钥的索引。（见 7.6.2.4.2）若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.3.1.2 适当的用法

MLME-ASSOCIATE.request 原语由非连接设备的上层生成，并且发送给

MAC 层管理实体请求与一个协调器建立连接。如果设备要与一个支持信标的 PAN 中的协调器建立连接,那么 MAC 层管理实体在发送该原语之前将先跟踪信标。

7.1.3.1.3 接收效应

未连接的设备 MAC 层管理实体收到其 MAC 层的上层发送来的 MLME-ASSOCIATE.request 的原语后,首先更新相应的物理层和 MAC 层 PIB 属性,然后再产生一个连接请求命令(见 7.3.1),其连接步骤将在 7.5.3.1 中介绍。

SecurityLevel 参数指定了连接请求命令使用的安全等级。通常在连接请求命令中不使用安全保护性措施。但是,如果请求连接的设备与协调者共用一个密钥,那么要采用安全性保护措施。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值,表明该帧需要安全机制,MAC 层将把帧控制领字段的安全性子字段设置为 1。那 MAC 层将会基于 CoordAddress、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 参数执行输出处理过程,此过程将 7.5.8.2.1 节介绍。在输出帧处理过程中发生任何错误,MAC 层管理实体都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语。

如果因为 CSMA-CA 算法指出信道忙,而不能向协调器发送该连接请求命令时,MAC 层管理实体将发送一个带有 CHANNEL_ACCESS_FAILURE 状态的 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语。

如果 MAC 层管理实体成功地发送了一个连接请求命令,它将期望收到一个返回的确认原语帧。如果没有收到确认原语帧,MAC 层管理实体将发送一个带有 NO_ACK 状态的 MLME-SSOCIATE.Confirm 原语。(见 7.5.6.4)

如果未连接设备的 MAC 层管理实体成功地收到连接请求命令的确认原语帧,它将等待接收连接响应(见 7.5.3.1)。如果设备的 MAC 层管理实体没有接收到来自协调器的连接响应命令帧,它将发送一个带有 NO_DATA 状态的 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语。

如果设备的 MAC 层管理实体接收到来自协调器的连接响应命令帧,MAC 层管理实体将发送一个与连接响应命令有相同连接状态的 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语(见 7.3.2.3)。

协调器的 MAC 层管理实体收到连接请求命令后,它的 MAC 层管理实体就发送一个 MLME-ASSOCIATE.indication 原语,表明有设备请求连接。

如果在 MLME-ASSOCIATE.request 原语中,有不符合语义的参数或者参数值超出其规定范围,MAC 层管理实体就会发送一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语。

7.1.3.2 MLME-ASSOCIATE.indication 原语

MLME-ASSOCIATE.indication 原语用来指示网络协调器设备已成功地接收到一个来自非连接设备的连接请求命令原语帧。

7.1.3.2.1 服务原语的语义

MLME-ASSOCIATE.indication 原语的语义如下：

MLME-ASSOCIATE.indication (
DeviceAddress,
CapabilityInformation,
SecurityLevel,
KeyIdMode,
KeySource,
KeyIndex
)

表 48 描述了 MLME-ASSOCIATE.indication 原语中的参数。

表 48——MLME-ASSOCIATE.indication 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
DeviceAddress	设备地址	扩展的 64 位 IEEE 地址	请求连接的设备地址
CapabilityInformation	位	见 7.3.1.2 节	设备请求连接的工作性能
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	接收的 MAC 层命令帧使用的安全等级（见 7.6.2.2.1 节表 95）
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	帧的发送方使用的密钥模式（见 7.6.2.2.2 节表 96）。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	4 或 8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	帧的发送方使用的密钥的 originator。（见 7.6.2.4.2）若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	帧的发送方使用的密钥的索引。（见 7.6.2.4.2）若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.3.2.2 产生时间

MLME-ASSOCIATE.indication 原语由协调器的 MAC 层管理实体生成，当接收到连接请求命令是，向其上层发送该原语。（见 7.3.1 节）

7.1.3.2.3 适当的用法

当协调器的上层收到 MLME-ASSOCIATE.indication 原语时,协调器确定是接受还是拒绝该未连接设备的连接请求，这由它所采用的算法来确定，对于该算法

的介绍已超出本标准的讨论范围,在此不做介绍。在做出是接受连接还是拒绝连接后,协调器的 MAC 层的上层发送 MLMEASSOCIATE. response 原语到它的 MAC 层管理实体。

在 macResponseWaitTime 内,协调器应对 MLME-ASSOCIATE.indication 原语做出连接的结果和连接响应(见 7.5.3.1 节)。在这之后,请求连接的设备将试图通过 7.5.6.3 节介绍的方法尝试提取来自协调器的连接响应命令帧,从而判定连接是否成功。

7.1.3.3 MLME-ASSOCIATE.response 原语

MLME-ASSOCIATE.response 原语是对 MLME-ASSOCIATE.indication 原语的响应。

7.1.3.3.1 服务原语的语义

MLME-ASSOCIATE.response 原语的语义如下:

MLME-ASSOCIATE.response (
DeviceAddress,
AssocShortAddress,
status,
SecurityLevel,
KeyIdMode,
KeySource,
KeyIndex
)

表 49 描述了 MLME-ASSOCIATE.response 原语中的参数。

表 49——MLME-ASSOCIATE.response 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
DeviceAddress	设备地址	扩展的 64 位 IEEE 地址	请求连接的设备地址
AssocShortAddress	整型	0x0000—0xffff	成功连接后协调器分配的短地址码。如果连接失败,此参数设置为 0xffff
Status	枚举型	见 7.3.2.3 节	请求连接的状态
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	传输使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	表明使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	4 或 8 字	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为

	节		0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.3.3.2 适当的用法

MLME-ASSOCIATE.response 原语由协调器的上层产生，并发送给它的 MAC 层管理实体，作为对 MLME-ASSOCIATE.indication 原语的响应。

7.1.3.3.3 接收效应

当协调器的 MAC 层管理实体接收到 MLME-ASSOCIATE.response 原语时，它产生一个连接响应命令（见 7.3.2 节）。此命令帧以直接传输方式发送给请求连接的设备。也就是说，此命令帧被加到存储在协调器的未决事务处理列表中，根据各从设备的判断，从该列表中取出，并进行相应的处理，相关判断方法将在 7.5.6.3 小节中介绍。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值，表明该帧需要安全机制，MAC 层将把帧控制领字段的安全性子字段设置为 1。那 MAC 层将会基于 DeviceAddress、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 参数执行输出处理过程，此过程将 7.5.8.2.1 节介绍。在输出帧处理过程中发生任何错误，MAC 层管理实体都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MLME-COMM-STATUS.indication 原语。

协调器的 MAC 层管理实体一旦收到 MLME-ASSOCIATE.response 原语，就试图把包含在原语中的信息添加到它的未决事务处理列表中。如果存储事务的容量不够，那么，MAC 层将会丢弃该 MAC 层服务数据单元，并返回一个带 TRANSACTION_OVERFLOW 状态的 MLME-COMM-STATUS.indication 原语。如果能够存储该事务，那么，协调者将把事务信息添加到该未决事务列表中。如果在 macTransactionPersistenceTime 内，没有处理该事务，则将丢弃该事务信息，并且 MAC 层将返回一个带有 TRANSACTION_EXPIRED 状态的 MLME-COMM-STATUS.indication 原语。事务的处理过程将在 7.5.5 节中介绍。

如果 MAC 层成功地传输了该 MAC 层协议数据单元，并且接收到应答帧（如果以应答方式传输），那么 MAC 将向它的上层发送一个带有 SUCCESS 状态的 MLME-COMM-STATUS.indication 原语

如果在 MLME-ASSOCIATE.response 原语中，有不符合语义的参数或者参数值超出其规定范围，MAC 层就会发送一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MLME-COMM-STATUS.indication 原语，表示响应参数错误。

7.1.3.4 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语

MLME-ASSOCIATE.confirm 原语是用来把连接成功与否的状态，通报给连接发起设备的上层。

7.1.3.4.1 服务原语的语义

MLME-ASSOCIATE.confirm 原语的语义如下：

MLME-ASSOCIATE.confirm (
AssocShortAddress,
status,
SecurityLevel,
KeyIdMode,
KeySource,
KeyIndex
)

表 50 描述了 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语中的参数。

表 50——MLME-ASSOCIATE.confirm 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
AssocShortAddress	整型	0x0000—0xffff	成功连接后协调器所分配的短地址。如果连接失败,此参数置为 0xffff
status	枚举型	连接响应命令状态的有效值(见 7.3.2.3 节) SUCCESS, CHANNEL_ACCESS_FAILURE NO_ACK NO_DATA, COUNTER_ERROR FRAME_TOO_LONG IMPROPER_SECURITY_LEVEL, SECURITY_ERROR, UNAVAILABLE_KEY UNSUPPORTED_LEGACY, UNSUPPORTED_SECURITY INVALID_PARAMETER	连接请求的状态
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	如果此原语是在一个输出处理过程失败的连接请求命令之后产生的,此参数表示传输使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)。 如果此原语是在接收到一个连接响应命令之后产生的,其安全等级应该为接收到的帧使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表

			95)
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	<p>如果此原语是在一个输出处理过程失败的连接请求命令之后产生的,此参数表示传输使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。</p> <p>如果此原语是在接收到一个连接响应命令之后产生的,其模式为接收到的帧的发送方使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数设置为 0x00,此参数被忽略。</p>
KeySource	4 或 8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	<p>如果此原语是在一个输出处理过程失败的连接请求命令之后产生的,此参数表示传输使用的密钥的发送方(见 7.6.2.4.1 节)。若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。</p> <p>如果此原语是在接收到一个连接响应命令之后产生的,其密钥发送方为收到的帧使用的密钥发送方(见 7.6.2.4.1 节)。如果 KeyIdMode 参数被忽略或设置为 0x00,此参数被忽略。</p>
KeyIndex	整型	0x01—0xff	<p>如果此原语是在一个输出处理过程失败的连接请求命令之后产生的,此参数表示传输使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2 节)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。</p> <p>如果此原语是在接收到一个连接响应命令之后产生的,其索引为收到的</p>

			<p>帧使用的密钥发送方使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2) 若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。</p>
--	--	--	--

7.1.3.4.2 产生时间

MLME-ASSOCIATE.confirm 原语是由连接发起设备的 MAC 层管理实体生成，并作为对 MLME-ASSOCIATE.request 原语的响应。如果连接请求成功，连接响应命令的状态字段将表示连接成功。否则，状态字段将为两种类型的代码，一种是来自接收到的连接响应命令的错误代码，另一种是返回表 50 中相应的错误代码。这些状态值都已经在 7.1.3.1.3 节中和与 7.1.3.1.3 节相关的章节作了介绍。

7.1.3.4.3 适当的用法

当连接发起设备的上层接收到 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语后,即可得知与协调器连接请求的结果。如果连接请求成功，那么其原语中的状态参数就指示为一个成功的连接，此状态参数如包含在连接响应命令的状态字段中。同时，该设备会得到一个短地址码(见 7.5.3.1 节表 87)。如果连接请求失败，短地址码为 0xffff，它的状态参数就会指示错误状态。

7.1.3.5 连接消息序列列表

图 31 给出了一个没有追踪协调器的信标帧（见 7.5.6.3 节）的设备要成功与个域网连接的消息序列列表。图 80 和图 81(见 7.节 7)分别为设备向协调器请求连接以及允许连接所必须的信息流程。这些图包括了物理层所采取的措施和步骤。

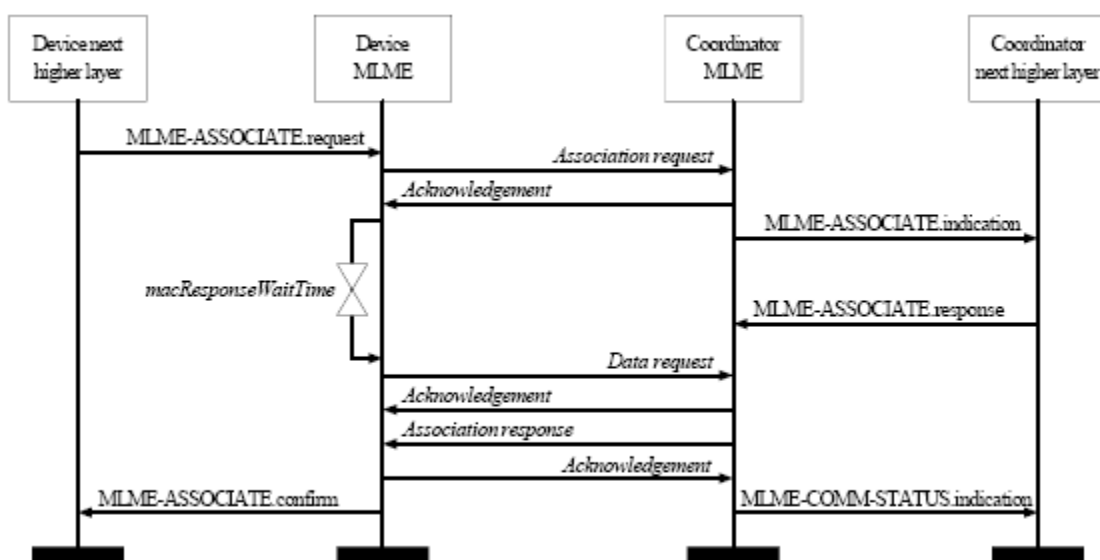


Figure 31—Message sequence chart for association

7.1.4 断开连接原语

MLME-SAP 断开连接原语定义了一个设备如何与 PAN 断开连接。
所有的设备均具有断开连接原语的接口。

7.1.4.1 MLME-DISASSOCIATE.request 原语

MLME-DISASSOCIATE.request 原语向协调器请求断开网络连接。该原语也可由协调器用来命令一个连接设备与 PAN 断开连接。

7.1.4.1.1 服务原语的语义

MLME-DISASSOCIATE.request 原语的语义如下：

```

MLME-DISASSOCIATE.request (
    DeviceAddrMode,
    DevicePANId,
    DeviceAddress,
    DisassociateReason,
    TxIndirect,
    SecurityLevel,
    KeyIdMode,
    KeySource,
    KeyIndex
)
  
```

表 51 描述了 MLME-DISASSOCIATE.request 原语中的参数。

表 51——MLME-DISASSOCIATE.request 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
DeviceAddrMode	整型	0x02—0x03	接收断开连接命令的设备地址模式
DevicePANId	整型	0x0000—0xffff	接收断开连接命令的 PAN 标识符
DeviceAddress	设备地址	与 DeviceAddrMode 参数的描述相对应	命令断开连接的设备地址
DisassociateReason	整型	0x00—0xff	断开连接的原因(见 7.3.3.2 节)
TxIndirect	布尔	True 或 False	断开连接命令采用间接传输, 则为 True
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	传输使用的安全等级 (见 7.6.2.2.1 节表 95)
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	表明使用的密钥模式 (见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	4 或 8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.4.1.2 适当的用法

MLME-DISASSOCIATE.request 原语生成有**两种情况**,一种是由已连接的设备的上层产生,发送给它的 MAC 层管理实体**请求与个域网断开连接**。另外一种是由协调器的上层产生,并发送给它的 MAC 层管理实体**命令一个已连接的设备离开该个域网**。

7.1.4.1.3接收效应

当 MAC 层管理实体收到 MLME-DISASSOCIATE.request 原语时,就会把参数 DevicePANId 与 macPANId 进行比较。如果参数 DevicePANId 与 macPANId 不相等,那么 MAC 层管理实体就返回一个带 INVALID_PARAMETER 的状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语。如果参数 DevicePANId 和 macPANId 相等,MAC 层管理实体便会对原语的地址字段进行评估。

如果参数 DeviceAddrMode 等于 0x02,并且参数 DeviceAddress 与 macCoordShortAddress 相等;或者参数 DeviceAddrMode 等于 0x03,并且参数 DeviceAddress 与 macCoordExtendedAddress 相等,将忽略参数 TxIndirect,MAC

层管理实体将采用如下两种方式向协调器发送一个断开连接命令：（1）在信标支持的 PAN 中的竞争接入期间；（2）在非信标支持的 PAN 中，立即发送。

如果参数 DeviceAddrMode 等于 0x02，并且参数 DeviceAddress 与 macCoordShortAddress 不相等，或者参数 DeviceAddrMode 等于 0x03，并且参数 DeviceAddress 与 macCoordExtendedAddress 不相等，并且协调器的 MAC 层管理实体收到的原语的参数 TxIndirect 为 TRUE，该断开连接命令将使用间接传输方式发送，也就是说，此命令帧将被添加到存储在协调器的未决事务列表中，并且将根据设备的判断力，用 7.5.6.3 节中所介绍的方法提取该命令帧。

如果参数 DeviceAddrMode 等于 0x02，并且参数 DeviceAddress 与 macCoordShortAddress 不相等或者参数 DeviceAddrMode 等于 0x03，并且参数 DeviceAddress 与 macCoordExtendedAddress 不相等，并且协调器的 MAC 层管理实体收到的原语的参数 TxIndirect 为 FALSE，MAC 层管理实体将采用如下两种方式向设备发送一个断开连接命令：（1）在信标支持的 PAN 中的竞争接入期间；（2）在非信标支持的 PAN 中，立即发送。

另外，MAC 层管理实体返回一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语，不产生断开连接命令。

如果协调器以间接传输的方式断开连接命令，则设备地址将添加至信标的地址列表字段，指示存在一个未处理的消息。在这种情况下，协调器试图把原语中所包含的信息添加到它的未决事务处理列表中。如果存储事务的容量不够，MAC 层管理实体将丢弃该帧，并发送一个带有 TRANSACTION_OVERFLOW 状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语。如果有能够存储事务的容量，则协调器将把该事务信息添加在未决事务处理列表中。如果在 macTransactionPersistenceTime 内，没有处理该事务，则将丢弃该事务信息，MAC 层管理实体将发送一个带有 TRANSACTION_EXPIRED 状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语。事务处理的过程和步骤将在 7.5.5 节中进行描述。

如果因为 CSMA-CA 算法而导致断开连接通告命令传输失败，并且协调器的 MAC 层管理实体收到的原语的 TxIndirect 参数设置为 FALSE，那么 MAC 层管理实体将发送一个带有 CHANNEL_ACCESS_FAILURE 状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值，表明该帧需要安全机制，MAC 层将把帧控制领字段的安全性子字段设置为 1。那 MAC 层将会基于 DeviceAddress、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 参数执行输出处理过程，此过程将 7.5.8.2.1 节介绍。在输出帧处理过程中发生任何错误，MAC 层管理实体都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语。

如果 MAC 层管理实体成功地发送了一个断开连接请求通告命令，MAC 层管理实体将期望接收到一个返回的确认帧。如果没有收到确认帧，并且该原语被 TxIndirect 参数设置为 FALSE 的的协调器接收，或者一个设备的 MAC 层管理实体接收，那么 MAC 层管理实体将发送一个带有 NO_ACK 状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语。（见 7.5.6.4）

如果 MAC 层管理实体成功地发送了断开连接通告命令，并收到相应的确认帧，那么 MAC 层管理实体将发送一个带有 SUCCESS 状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语。

接收方的 MAC 层管理实体收到断开连接通告命令后，就会发送 MLMEDISASSOCIATE.indication 原语。

如果在 MLME-DISASSOCIATE.request 原语中，有不符合语义的参数或者参数值超出其规定范围，MAC 层管理实体就会发送一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语。

7.1.4.2 MLME-DISASSOCIATE.indication 原语

MLME-DISASSOCIATE.indication 原语用来指示 MAC 层管理实体已接收到一个断开连接命令。

7.1.4.2.1 服务原语的语义

MLME-DISASSOCIATE.indication 原语的语义如下：
MLME-DISASSOCIATE.indication (
DeviceAddress,
DisassociateReason,
SecurityLevel,
KeyIdMode,
KeySource,
KeyIndex
)

表 52 描述了 MLME-DISASSOCIATE.indication 原语中的参数。

表 52——MLME-DISASSOCIATE.indication 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
DeviceAddress	设备地址	与 DeviceAddrMode 参数的描述相对应	命令断开连接的设备地址
DisassociateReason	整型	0x00—0xff	断开连接的原因(见 7.3.3.2 节)
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	接收的 MAC 层命令帧使用的安全等级（见 7.6.2.2.1 节表 95）
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	帧的发送方使用的密钥模式（见 7.6.2.2.2 节表 96）。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	4 或 8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	帧的发送方使用的密钥的 originator。（见 7.6.2.4.2）若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整	0x01—0xff	帧的发送方使用的密钥的索引。（见

	型		7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
--	---	--	---

7.1.4.2.2 产生时间

MLME-DISASSOCIATE.indication 原语由 MAC 层管理实体产生，并在收到断开连接通告命令后发送到它的上层。

7.1.4.2.3 适当的用法

MAC 层用此原语向上层通告断开连接的原因。

7.1.4.3 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语

MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语用来报告 MLME-DISASSOCIATE.request 原语的执行结果。

7.1.4.3.1 服务原语的语义

MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语的语义如下：

MLME-DISASSOCIATE.confirm (
status,
DeviceAddrMode,
DevicePANId,
DeviceAddress
)

表 53 描述了 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语中的参数。

表 53——MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
Status	枚举型	SUCCESS, TRANSACTION_OVERFLOW, TRANSACTION_EXPIRED, NO_ACK, CHANNEL_ACCESS_FAILURE, COUNTER_ERROR, FRAME_TOO_LONG, UNAVAILABLE_KEY, UNSUPPORTED_SECURITY or INVALID_PARAMETER	断开连接的状态或结果
DeviceAddrMode	整型	0x02—0x03	请求或者被命令断开连接的设备地址模式

DevicePANId	整型	0x0000—0xffff	请求或者被命令断开连接的设备 PAN 标识符
DeviceAddress	设备地址	与 DeviceAddrMode 参数的描述相对应	请求或者被命令断开连接的设备地址

7.1.4.3.2 产生时间

MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语由断开连接发起设备方的 MAC 层管理实体产生，并作为对 MLME-DISASSOCIATE.request 原语的响应发送到上层。该原语将返回一个代表请求发送成功的状态 SUCCESS，或者返回一个代表出错的代码。这些状态值在 7.1.4.1.3 节和在 7.1.4.1.3 节中提及的相关章节中进行了描述。

7.1.4.3.3 适当的用法

发起设备的上层收到 MLME-DISASSOCIATE.confirm 原语后，即可得知断开连接请求响应结果。如果此断开连接尝试成功，则原语的状态参数置为 SUCCESS；否则，其状态参数为错误状态。

7.1.4.4 断开连接消息顺序表

断开连接的请求可能由一个设备发起，也可由一个已连接设备的协调器发起。图 32 描述了一个设备成功地与个域网断开连接的消息序列。

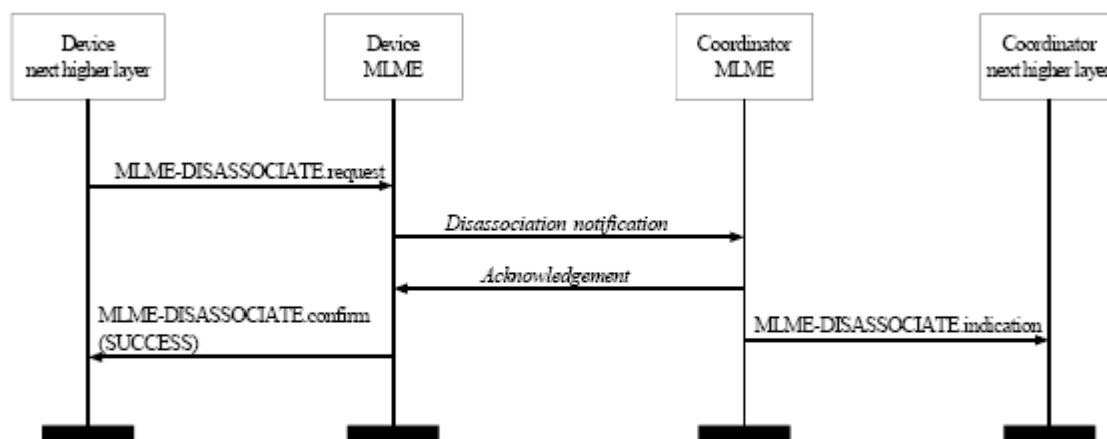


Figure 32—Message sequence chart for disassociation initiated by a device

图 33 描述了一个信标帧使能个域网的协调器成功地使用间接传输方式将一个设备与它断开连接的消息序列。

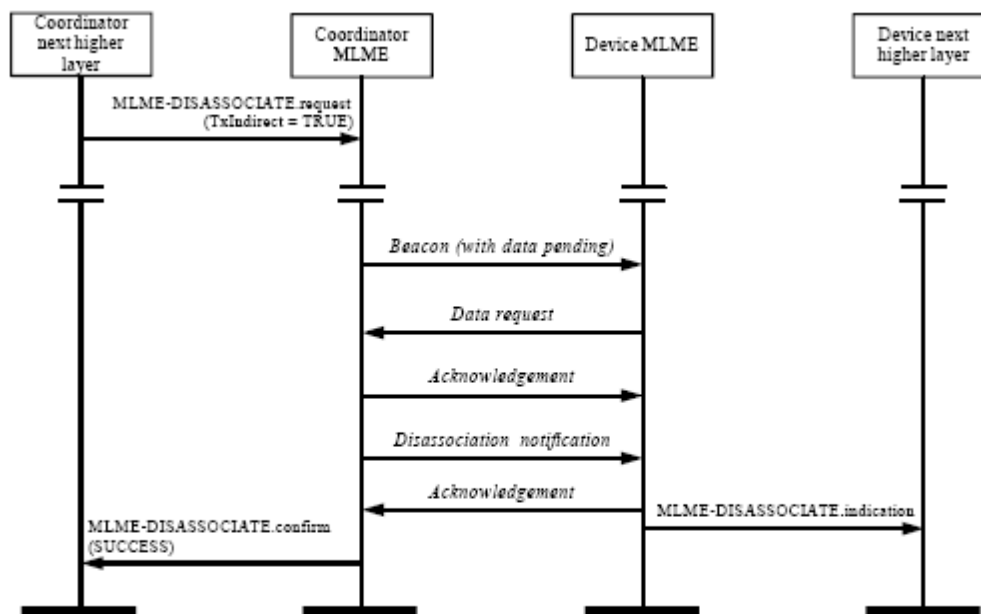


Figure 33—Message sequence chart for disassociation initiated by a coordinator, using indirect transmission, in a beacon-enabled PAN

7.1.5 信标通告原语

MAC 层管理实体服务接入点信标帧通告原语定义了，在正常工作条件下，当收到信标帧时，设备如何得到此通告信息。

所有的设备均提供此原语的接口。

7.1.5.1 MLME- BEACON-NOTIFY.indication 原语

MLME- BEACON-NOTIFY.indication 原语由设备的 MAC 层将接收到的信标帧中的参数发送给它上层，此外，还包含链路质量（LQI）值和信标帧接收时间。

7.1.5.1.1 服务原语的语义

MLME- BEACON-NOTIFY.indication 原语的语义如下：

MLME-BEACON-NOTIFY.indication (
BSN,
PANDescriptor,
PendAddrSpec,
AddrList,
sduLength,
sdu
)

Table 54 specifies the parameters for the MLME-BEACON-NOTIFY.indication primitive.

表 54 描述了 MLME-BEACON-NOTIFY.indication 原语中的参数。

表 54——MLME-BEACON-NOTIFY.indication 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
BSN	整型	0x00—0xff	信标帧序列号
PANDescriptor	PANDescriptor 的值	见表 55	所接收信标的 PANDescriptor
PendAddrSpec	位	见 7.2.2.1.6 节	信标的未决地址格式
AddrList	设备地址列表	—	具有信标源数据设备的地址列表
sduLength	整型	0-aMaxBeaconPayloadLength	MAC 层接收信标帧的信标载荷字段的字节长度
sdu	一组字节	—	由 MAC 层实体传输到上层的信标帧载荷

表 55 描述了 PANDescriptor 类型的组成。

表 55——PANDescriptor 参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
CoordAddrMode	整型	0x02—0x03	协调器地址模式。取值为： 2=16 位短地址码 3=64 位扩展地址码
CoordPANId	整型	0x0000—0xffff	接收到的信标帧所描述的协调器的 PAN 标识符
CoordAddress	设备地址	与 CoordAddrMode 参数的描述相应	信标帧中的协调器地址
LogicalChannel	整型	物理层所支持的逻辑信道	网络选用的逻辑信道
ChannelPage	整型	物理层所支持的信道页	网络选用的信道页
SuperframeSpec	位	见 7.2.2.1.2 节	信标帧中的超帧规范
GTSPermit	布尔	TRUE 或 FALSE	如果来自 PAN 协调器的信标接受 GTS 请求，则为 TRUE
LinkQuality	整型	0x00—0xff	信标传输的链路质量，值越小表示链路质量越低（见 6.9.8 节）
Timestamp	整型	0x000000—0xffffffff	此参数的值有 24 位，这个值的精度最小 20 位，其中低四位为最低有效位。
SecurityFailure	枚举型	SUCCESS, COUNTER_ERROR, IMPROPER_SECURITY_LE	如果在帧的安全处理过程中没有错误，则为 SUCCESS；否则是一个表明在安全处理过程中

		VEL,SECURITY_ERROR, UNSOPPORIED_LEGACY, UNSUPPORTED_SECURITY	出错的其他状态代码(见 7.5.8.2.3)
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	信标帧使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	帧发送方表明使用的密钥模式 (见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	4 或 8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相 对应	帧发送方使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设 置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	帧的发送方使用的密钥的索 引。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00, 此参数被忽略。

7.1.5.1.2 产生时间

MLME- BEACON-NOTIFY.indication 原语由 MAC 层管理实体产生, 当 macAutoRequest 置为 FALSE, 或者信标帧包含有一个或更多字节的载荷时, 一旦 MAC 层接收到信标帧, 就将此原语发送给它的上层。

7.1.5.1.3 适当的用法

当 MAC 层的上层收到 MLME- BEACON-NOTIFY.indication 原语时, 就得告 MAC 层已经接收到一个信标帧。

7.1.6 读取个域网信息库属性的原语

MAC 层管理实体服务接入点的读取原语定义了如何从个域网信息库中读取其属性值。

所有的设备均提供该原语的接口。

7.1.6.1 MLME-GET.request 原语

MLME-GET.request 原语用来请求一个给定的 PIB 属性的信息。

7.1.6.1.1 服务原语的语义

MLME-GET.request 原语的语义学如下：
MLME-GET.request (
 PIBAttribute,
 PIBAttributeIndex
)

表 56 描述了 MLME-GET.request 原语中的参数。

表 56——MLME-GET.request 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
PIBAttribute	整型	见表 86 和表 88	要读取的 PIB 属性的标识符
PIBAttributeIndex	整型	见表 88	指定的要读取的 PIB 属性表的索引。此参数仅对表格中的 MAC 层 PIB 属性有效；当要访问物理层 PIB 属性时忽略此参数

7.1.6.1 .2 适当的用法

MLME-GET.request 原语是由设备 MAC 层的上层生成，并发送给它的 MAC 层管理实体，以获取 MAC 层的个域网信息库的信息。

7.1.6.1 .3 接收效应

当 MAC 层管理实体接收到 MLME-GET.request 原语后，就检查所要读取的 PIB 属性是 MAC 层 PIB 属性还是物理层 PIB 属性。如果是 MAC 层属性，MAC 层管理实体就试图从个域网信息库中读取所请求的 MAC PIB 属性。如果在该数据库中没有找到 PIB 属性的标识符，则 MAC 层管理实体向其上层发送状态为 UNSUPPORTED_ATTRIBUTE 的 MLME-GET.confirm 原语。如果 PIBAttributeIndex 参数指向一个超出范围的表的索引，MAC 层管理实体将发送状态为 INVALID_INDEX 的 MLME-GET.confirm 原语。

如果 MAC 层管理实体成功被检索到所请求的 MAC PIB 属性，将向它的上层发送状态为 SUCCESS 的 MLME-GET.confirm 原语。

如果请求的属性是 PHY PIB 属性，通过发送 PLMEGET.request 原语将该请求传到物理层。一旦 MLME 收到 PLME-GET.confirm 原语，它将首先转换接受的状态值，因为 PHY 使用的状态价值不同于 MAC 层使用的状态值(在 MAC 和 PHY 枚举型列表中,SUCCESS 的状态值分别为 0x00 和 0x07)。转换状态值以后，MAC 层管理实体向它的上层发送 MLME-GET.confirm 原语，该原语带有转换的结果和 PIBAttribute 和 PIBAttributeValue 参数，这些参数与物理层管理实体原语返回的参数相等。

7.1.6.2 MLME-GET.confirm 原语

MLME-GET.confirm 原语报告对 MAC 层个域网信息库的信息请求的结果。

7.1.6.2.1 服务原语的语义

MLME-GET.confirm 原语的语义如下：

MLME-GET.confirm (
status,
PIBAttribute,
PIBAttributeIndex,
PIBAttributeValue
)

表 57 描述了 MLME-GET.confirm 原语中的参数。

表 57——MLME-GET.confirm 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
Status	枚举型	SUCCESS, UNSUPPORTED_ATTRIBUTE or INVALID_INDEX	PIB属性信息的请求结果
PIBAttribute	整型	见表86和表88	PIB属性的标识符
PIBAttributeIndex	整型	特征属性,见表88	指定的要读取的PIB属性的表或矩阵中的索引。这个参数只在读取MAC PIB属性的表或矩阵时有效；当要读取的是物理层PIB属性时，它将被忽略
PIBAttributevalue	多种	特征属性,见表86和表88	PIB属性的值 当状态参数被设置为 UNSUPPORTED _ATTRIBUTE，这个参数长度 为零

7.1.6.2.2 产生时间

MLME-GET.confirm 原语是由 MAC 层管理实体产生，并作为对 MLME-GET.request 原语的响应。此原语返回状态位 SUCCESS 时，表示成功读取了所指定的 MAC 层的 PIB 属性值；或者此原语返回一个状态为 UNSUPPORTED_ATTRIBUTE 的错误代码。当返回 UNSUPPORTED_ATTRIBUTE 错误代码时，PIBAttributevalue 参数将被设置为零长度。状态值已在 7.1.6.1.3 节中描述。

7.1.6.2 .3 适当的用法

当 MAC 层的上层接收到 MLME-GET.confirm 原语时，就得到了它所请求读取的 MAC 层的 PIB 属性的结果。如果成功读去所请求的 MAC 层的 PIB 属性，状态参数将置为 SUCCESS，否则，状态参数指示错误。

7.1.7 保护时隙管理原语

MAC 层管理实体服务接入点的保护时隙（GTS）管理原语定义了如何请求和维护保护时隙。通常，使用这些原语和保护时隙的设备总是跟踪个域网的协调器信标。

这些保护时隙管理原语是可选的。

7.1.7.1 MLME-GTS.request 原语

MLME-GTS.request 原语允许一个设备向 PAN 协调器发送一个请求，用于申请分配新的保护时隙或取消一个已经存在的保护时隙。PAN 协调器也使用该原语请求取消保护时隙。

7.1.7.1.1 服务原语的语义

MLME-GTS.request 原语的语义如下：

MLME-GTS.request (
GTSCharacteristics,
SecurityLevel,
KeyIdMode,
KeySource,
KeyIndex
)

表 58 描述了 MLME-GTS.request 原语中的参数。

表 58——MLME-GTS.request 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
GTSCharacteristics	GTS 特性	见 7.3.9.2 节	GTS 请求特性，包括该请求是为分配一个新的保护时隙还是取消一个已经存在的保护时隙
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	传输使用的安全等级（见 7.6.2.2.1 节表 95）
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	表明使用的密钥模式（见 7.6.2.2.2 节表 96）。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00，此参数被忽略。
KeySource	4 或 8	与 KeyIdMode 参	使用的密钥的 originator。（见 7.6.2.4.2）

	字节	数的描述相对应	若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.7.1.2 适当的用法

MLME-GTS.request 原语由 MAC 层的上层生成, 发送 MAC 层管理实体以请求分配一个新的保护时隙或取消一个已经存在的保护时隙。它也可由 PAN 协调器的上层生成, 发送到它的 MAC 层管理实体取消一个已经存在的保护时隙。

7.1.7.1.3 接收效应

当设备的 MAC 层管理实体收到 MLME-GTS.request 原语时, 试图生成一个保护时隙请求命令帧(见 7.3.9 节), 此命令帧包含该原语的信息, 如果成功地生产该命令帧, 则将该命令帧发送给 PAN 协调器。

如果设备的 macShortAddress 等于 0xfffe 或 0xffff, 这是设备与 PAN 之间只能采用扩展的 64 位设备地址码同 PAN 的协调器进行通信连接, 因此, 将禁止设备请求一个保护时隙。在这种情况下, MAC 层管理实体将返回一个状态为 NO_SHORT_ADDRESS 的 MLME-GTS.confirm 原语。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值, 表明该帧需要安全机制, MAC 层将把帧控制领字段的安全性子字段设置为 1。那 MAC 层将会基于 macCoordExtendedAddress、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 参数执行输出处理过程, 此过程将 7.5.8.2.1 节介绍。在输出帧处理过程中发生任何错误, MAC 层管理实体都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MLME-GTS.confirm 原语。

如果由于 CSMA-CA 算法失败不能传送 GTS 请求命令, MAC 层管理实体将返回一个带有 CHANNEL_ACCESS_FAILURE 状态的 MLME-GTS.confirm 原语。

如果 MAC 层管理实体成功地传送 GTS 请求命令, 它将等待一个返回的确认帧。如果没有确认帧, MAC 层管理实体将返回一个带有 NO_ACK 状态的 MLME-GTS.confirm 原语 (见 7.5.6.4 节)。

如果保护时隙正在分配(见 7.5.7.2 节), 并且该请求命令帧已经得到确认帧, MAC 层管理实体将通过来自 PAN 协调器的信标帧中所指定的一个保护时隙描述符来得到进一步证实。如果 PAN 协调器能够分配所请求的保护时隙, 它将向其上层发送带有已分配 GTSCharacteristics 参数的 MLME-GTS.indication 原语, 该描述符具有已分配的保护时隙特性和请求设备的短地址。如果 PAN 协调器的 MAC 层管理实体不能分配所请求的保护时隙, 它将生成一个包含零起始时隙和请求设备短地址的保护时隙描述符。

如果设备从 PAN 协调器接收到一个信标帧, 该信标帧的描述符包含与 macShortAddress 相匹配的短地址码, 则设备将对该描述符进行处理。如果设备没有收到上述的描述符, MAC 层管理实体将发送一个带有 NO_DATA 状态的

MLME-GTS.confirm 原语。

如果描述符与请求命令帧的参数相匹配(表明 PAN 协调器批准了 GTS 分配请求), MAC 层管理实体将发送状态为 SUCCESS 和 GTSTCharacteristics 参数为 1 的 MLME-GTS.confirm 原语, 来表明成功分配了一个保护时隙。

如果描述符为零起始时隙(表明 PAN 协调器否认了 GTS 分配请求), 请求保护时隙的设备将发送状态为 DENIED 的 MLME-GTS.confirm 原语, 忽略保护时隙参数。

如果保护时隙正在取消 (见 7.5.7.4 节), 并且该请求命令已经得到 PAN 协调器的确认, 设备发送状态为 SUCCESS 和 GTSTCharacteristics 参数为 1 的 MLME-GTS.confirm 原语, 表明取消一个保护时隙。收取消保护时隙的请求命令后, PAN 协调器将返回一个确认帧并且取消该保护时隙。之后, PAN 协调器的 MAC 层管理实体将发送具有适当的 GTS 特性的 MLME-GTS.indication 原语。如果 PAN 协调器没有收到取消保护时隙请求, PAN 协调器将采用相应的措施确保连接(见 7.5.7.6 节)。

如果 PAN 协调器的 MAC 层管理实体接收到一个取消保护时隙的 MLME-GTS.request 原语, PAN 协调器将取消该保护时隙并且发送一个状态为 SUCCESS 和 GTSTCharacteristics 参数为 0 的 MLME-GTS.confirm 原语。

如果设备收到一个来自 PAN 协调器的信标帧, 该信标帧包含一个与 macShortAddress 相匹配的短地址码和零起始时隙的描述符, 立刻停止使用保护时隙。

设备的 MAC 层管理实体发送 MLMEGTS.indication 原语通知上层取消保护时隙, 该原语的 GTSTCharacteristics 参数包含被取消的保护时隙的特性。

如果 MLME-GTS.request 原语中有不符合寓意的参数或者参数值超出范围, MAC 层管理实体就会发送一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MLME-GTS.confirm 原语。

7.1.7.2 MLME-GTS.confirm 原语

MLME-GTS.confirm 原语用来通报设备执行请求保护时隙原语的结果, 包括请求一个新的保护时隙或是取消一个已存在的保护时隙。

7.1.7.2.1 服务原语的语义

MLME-GTS.confirm 原语的语义如下:
MLME-GTS.confirm (
GTSTCharacteristics,
status
)

表 59 描述了 MLME-GTS.confirm 原语中的参数。

表59——MLME-GTS.confirm原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
----	----	------	------

GTSTCharacteristics	GTS 特性	见7.3.9.2节	GTS的特性
status	枚举型	SUCCESS,DENIED, NO_SHORT_ADDRESS, CHANNEL_ACCESS_FAILURE, NO_ACK,NO_DATA, COUNTER_ERROR, FRAME_TOO_LONG, UNAVAILABLE_KEY, UNSUPPORTED_SECURITY or INVALID-PARAMETER	GTS请求的状态

7.1.7.2 .2 产生时间

MLME-GTS.confirm 原语由 MAC 层管理实体产生，并作为对被 MLME-GTS.request 原语的响应发送给它的上层。

如果分配或取消一个 GTS 的请求成功，则该原语返回状态为 SUCCESS，并且 GTSTCharacteristics 参数的特征类型字段值分别为 1 或 0。否则，将返回状态表明相应的错误代码。产生这些状态值的原因在 7.1.7.1.3 节和 7.1.7.1 .3 提及的章节进行描述。

7.1.7.2 .3 适当的用法

当 MAC 层的上层接收到 MLME-GTS.confirm 原语时，可得到请求分配保护时隙或取消保护时隙请求命令的结果。如果请求命令是成功的，其状态参数指示成功的 GTS 操作。否则，状态参数将表明错误。

7.1.7.3 MLME-GTS.indication 原语

MLME-GTS.indication 原语表明已分配一个保护时隙或已取消以前所分配的保护时隙。

7.1.7.3.1 服务原语的语义

MLME-GTS.indication 原语的语义如下：

MLME-GTS.indication (
DeviceAddress,
GTSTCharacteristics,
SecurityLevel,
KeyIdMode,
KeySource,
KeyIndex

)
表 60 描述了 MLME-GTS.indication 原语中的参数。

表60——MLME-GTS.indication原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
DeviceAddress	设备地址	0x0000—0xfffd	已分配或取消GTS的设备短地址
GTSCharacteristics	GTS特性	见7.3.9.2节	GTS特性
SecurityLevel	整型	0x00—0x07	如果该原语是在PAN协调器自身取消一个保护时隙时产生的,安全等级将设置为0x00。 如果该原语是在接收到GTS请求命令之后产生的,则使用收到的MAC层命令帧的安全等级 (见7.6.2.2.1节表95)
KeyIdMode	整型	0x00—0x03	如果该原语是在PAN协调器自身取消一个保护时隙时产生的,忽略该参数。 如果该原语是在接收到 GTS 请求命令之后产生的,则使用发送该 MAC 层命令帧的设备使用的密钥模式 (见7.6.2.2.2节表96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,忽略该参数。
KeySource	0, 4或8字节	与KeyIdMode参数的描述相对应	如果该原语是在PAN协调器自身取消一个保护时隙时产生的,忽略该参数。 如果该原语是在接收到GTS请求命令之后产生的,则使用发送该MAC层命令帧的设备使用的密钥的originator(见7.6.2.4.1节)。如果KeyIdMode参数被设置为0x00,忽略该参数。
KeyIndex	整型	0x01—0xff	如果该原语是在PAN协调器自身取消一个保护时隙时产生的,忽略该参数。 如果该原语是在接收到GTS请求命令之后产生的,则使用发送该MAC层命令帧的设备使用的密钥索引 (见7.6.2.4.2节)。如果KeyIdMode参数被设置为0x00,忽略该参数。

7.1.7.3.2 产生时间

当 PAN 协调器的 MAC 层管理实体接收到一个保护时隙请求命令后,一旦分配或取消一个保护时隙(见 7.3.9 节),就生成 MLME-GTS.indication 原语,并发送给它的上层。当取消一个保护时隙是 PAN 协调器自身发起时,协调器的 MAC 层管理实体也生成该原语。分配一个保护时隙时, GTSCharacteristics 参数的特性类型子字段置 1, 如果取消一个已分配的保护时隙时,则该字段置 0。

当 PAN 协调器取消一个 GTS 时,设备的 MAC 层管理实体 MLME 也生成

此原语，并发送给设备的 MAC 层的上层。此时，GTSCharacteristics 参数的特性类型子字段为 0。

7.1.7.3.3 适当的用法

当设备的 MAC 层的上层收到 MLME-GTS.indication 原语后,就得知已分配或取消一个保护时隙。

7.1.7.4 保护时隙 (GTS) 管理消息序列表

图 34 和图 35 为成功地保护时隙管理的消息序列表。图 34 为设备发起分配保护时隙的消息序列表。图 35 为保护时隙的两种情况，一种是设备发起的(a)，另一种是 PAN 协调器发起的(b)。

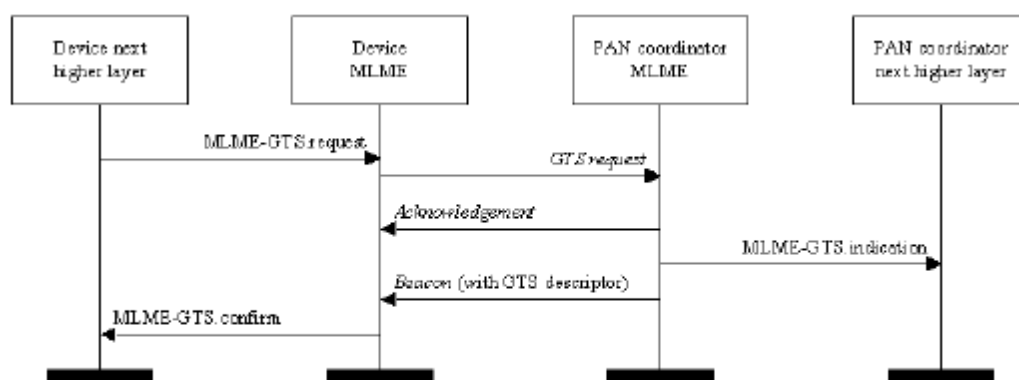


Figure 34—Message sequence chart for GTS allocation initiated by a device

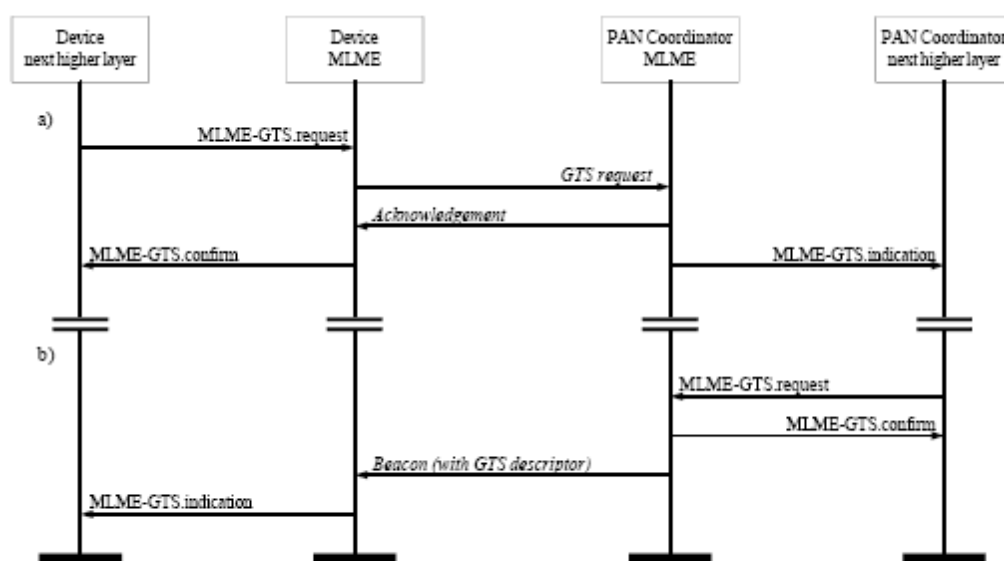


Figure 35—Message sequence chart for GTS deallocation initiated by a device (a) and the PAN coordinator (b)

7.1.8 孤点通告原语

MAC 层管理实体服务接入点的孤点通告原语定义了一个协调器如何发送一个孤点设备通告。

对于简化功能设备来说，孤点通告原语是可选的。

7.1.8.1 MLME-ORPHAN.indication 原语

MLME-ORPHAN.indication 原语允许协调器的 MAC 层管理实体通知上层存在一个孤点设备。

7.1.8.1.1 服务原语的语义

MLME-ORPHAN.indication 原语的语义如下：

MLME-ORPHAN.indication (

OrphanAddress,

SecurityLevel,

KeyIdMode,

KeySource,

KeyIndex

)

表 61 描述了 MLME-ORPHAN.indication 原语的参数

表 61——PLME-SET-TRX-STATE.request 原语的参数

名字	类型	有效范围	功能描述
OrphanAddress	设备地址	64位IEEE地址	孤点设备地址
SecurityLevel	整型	0x00–0x07	接收的 MAC 命令帧使用的安全等级 (见 7.6.2.2.1 节表 95)。
KeyIdMode	整型	0x00–0x03	帧的发送方使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	0, 4或8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	帧的发送方使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.2 节)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01–0xff	帧的发送方使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

			0xfffe 表示设备没有分配到短地址码；设备将使用 64 位长地址进行其所有的通信。如果设备没有与协调器连接，则此与值为 0xffff，并在接收时忽略。
AssociatedMember	布尔型	TRUE 或 FALSE	如果孤点设备与协调器已连接，则为 TRUE，否则为 FALSE。
SecurityLevel	整型	0x00–0x07	使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)。
KeyIdMode	整型	0x00–0x03	使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	0, 4或8 字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.2 节)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01–0xff	使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2) 若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.8.2.2 适当的用法。

当MAC层管理实体的上层根据MLME-ORPHAN.indication原语参数做出孤点设备是否与协调器连接的判断后，生成 MLME-ORPHAN.response原语，发送给它的MAC层管理实体，作为对MLME-ORPHAN.indication原语的响应。

7.1.8.2.3 接收效应

如果 AssociatedMember 参数为 TRUE，表明孤点设备已经同协调器连接。这种情况下，MAC 层管理实体将生成协调器重新分配命令，并发送给孤点设备(见 7.3.8 节)，其中包含短地址码。如果在支持信标的 PAN 中，此命令将在竞争接入期中传送，在非信标 PAN 中将立即传送该命令。如果 AssociatedMember 参数值为 FALSE，则孤点设备没有与协调器建立连接，将忽略此原语。在孤点通告后 macResponseWaitTime 个符号周期内，如没有收到协调器重新分配命令，设备将认为在它的有效范围内没有与任何协调器建立连接。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值，表明该帧需要安全机制，MAC 层将把帧控制领字段的安全性子字段设置为 1。那 MAC 层将会基于 OrphanAddress、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 参数执行输出处理过程，此过程将 7.5.8.2.1 节介绍。在输出帧处理过程中发生任何错误，MAC 层管理实体都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MLME-COMM-TATUS.indication 原语。

如果因为 CSMA-CA 算法指出信道忙，MAC 层管理实体将丢弃该帧，并且发送一个带有 CHANNEL_ACCESS_FAILURE 状态的 MLME-COMM-TATUS.indication 原语。

MAC 层在传输帧后，将立刻激活接收机，并且等待接收来自接收设备的确认帧。如果没有收到来自接收设备的确认帧，MAC 层管理实体将丢弃该帧并发送一个带有 NO_ACK 状态的 MLME-COMM-STATUS.indication 原语。（见 7.5.6.4）

如果成功地传送了该帧，并且接收到确认帧（如果以应答方式传输），那么 MAC 层将发送一个带有 SUCCESS 状态的 MLME-COMM-STATUS.indication 原语。

如果在 MLME-ORPHAN.response 原语中，有不符合语义的参数或者参数值超出其规定范围，MAC 层就会发送一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MLME-COMM-STATUS.indication 原语。

7.1.8.3 孤点通告消息序列表

图 36 为协调器给一个设备发送孤点通告的消息序列表。

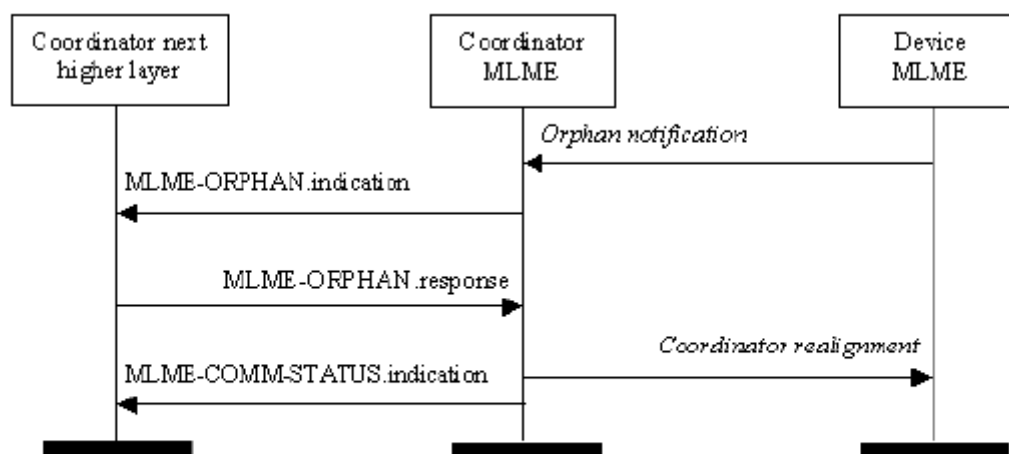


Figure 36—Message sequence chart for orphan notification

7.1.9 复位 MAC 层原语

MAC 层管理实体服务接入点的复位原语定义了如何复位 MAC 层为它的缺省值。

所有设备都提供复位原语接口。

7.1.9.1 MLME-RESET.request

MLME-RESET.request 原语允许 MAC 层的上层请求 MAC 层管理实体执行复位操作。

7.1.9.1.1 服务原语的语义

MLME-RESET.request 原语的语义如下：
MLME-RESET.request (SetDefaultPIB)

表 63 描述了 MLME-RESET.request 原语的参数。

表 63--MLME-RESET.request 原语的参数

名字	类型	有效范围	功能描述
SetDefaultPIB	布尔型	TRUE 或 FALSE	如果为 TRUE,MAC 层复位,并将所有 MAC 层 PIB 属性设置为缺省值。如果为 FALSE,MAC 层复位,但所有的 MAC 层 PIB 属性将保留在 MLME-RESET.request 原语之前的值

7.1.9.1.2 适当的用法

MLME-RESET.request 原语由 MAC 层管理实体上层生成,并发送给它的 MAC 层管理实体以请求复位 MAC 层,即将 MAC 层的相关参数设置为最初状态。在实际应用中,应在 MLME-START.request 原语或 MLME-ASSOCIATE.request 原语之前,使用 MLME-RESET.request 原语。

7.1.9.1 .3 接收效应

当 MAC 层管理实体接收到 MLME-RESET.request 原语时,向它的物理层发送状态为 FORCE_TRX_OFF 的 PLME-SET-TRX-STATE.request 原语,即首先关闭设备的收发机。只有当 MAC 层接收到 PLME-SET-TRXSTATE.confirm 原语时,才能将 MAC 层复位为缺省值。如果 SetDefaultPIB 参数设置为 TRUE,MAC 层的 PIB 属性值将复位为缺省值。
成功地执行完复位操作之后,发送一个带有 SUCCESS 状态的 MLME-RESET.confirm 原语。

7.1.9.2 MLME-RESET.confirm 原语

MLME-RESET.confirm 原语用来确认复位操作的结果。

7.1.9.2.1 服务原语的语义

MLME-RESET.confirm 原语的语义如下：

MLME-RESET.confirm (status)

表 64 描述了 MLME-RESET.confirm 原语的参数。

表64-- MLME-RESET.confirm原语的参数

名字	类型	有效范围	功能描述
status	枚举型	SUCCESS	复位操作的结果

7.1.9.2.2 生成时间

MLME-RESET.confirm 原语由MAC层管理实体生成，在MAC层接收到 PLME-SET-TRXSTATE.confirm 原语后，作为对MLME-RESET.request原语的响应发送给它的上层。

7.1.9.2.3 适当的用法

当 MAC 层上层接收到 MLME-RESET.confirm 原语后，就可得知它请求对 MAC 复位的结果。该原语返回状态为 SUCCESS 表明复位 MAC 层的请求成功。

7.1.10 指定接收机工作时间的原语

MAC 层管理实体服务接入点的接收机状态原语定义了一个设备如何能在给定的时间开启和关闭接收机。

这些接收机状态原语是可选的。

7.1.10.1 MLME-RX-ENABLE.request 原语

MLME-RX-ENABLE.request 原语允许 MAC 层上层请求接收机在一定的时间内处于激活接收工作状态还是关闭接收工作状态。

7.1.10.1.1 服务原语的语义

MLME-RX-ENABLE.request 原语的语义如下：

MLME-RX-ENABLE.request (
DeferPermit,
RxOnTime,
RxOnDuration
)

表 65 描述了 MLME-RX-ENABLE.request 原语的参数。

表65--MLME-RX-ENABLE.request 原语的参数

名字	类型	有效范围	功能描述
DeferPermit	布尔型	TRUE或FALSE	该值为 TRUE，则表示在请求时间超时情况下，可延迟到下一个超帧开启接收机。为 FALSE，则只允许在当前的超帧中开启接收机。在不支持信标的 PAN 中，忽略此参数。 如果发送的设备是 PAN 协调器，所说的“超帧”就是它自己的超帧。否则，“超帧”就是发送设备连接的协调器的超帧。
RxOnTime	整型	0x000000–0xffffffff	该值为从超帧起始符号到接收机开始接收前的符号数。这是一个 24 比特值，此值精度最小为 20 比特，最低 4 比特位为最低有效位。在不支持信标的 PAN 中，忽略此参数。 如果发送的设备是 PAN 协调器，所说的“超帧”就是它自己的超帧。否则，“超帧”就是发送设备连接的协调器的超帧。
RxOnDuration	整型	0x000000–0xffffffff	接收机开启的持续时间，以符号数表示。 如果该参数等于 0x000000，关闭接收机。

7.1.10.1 .2 适当的用法

MLME-RX-ENABLE.request 原语由 MAC 层的上层生成，并发送给 MAC 层管理实体使接收机持续固定的一段接收时间。其发送时间分为两种情况：在支持信标 PAN 中，时间与当前超帧或下一个超帧的起始有关；在不支持信标的 PAN 中，将立即发送此原语。此原语也可以是为了取消一个先前发送的开启接收机的请求而生成。 每一个原语都请求接收机开启一次。

7.1.10.1.3 接收效应

MAC 层管理实体在处理设备的请求时，相对于设备的其他功能来说，开启和关闭接收机的请求是次要的（比如，保护时隙，协调器信标帧跟踪，信标帧传输）。当发送的原语是开启接收机时，那么，只有在下面两种情况下，设备才会开启它的接收机：设备有一个冲突事件或者 RxOnDuration 指定的接收机开启的持续时间期满。在一个冲突事件情况下，设备将中断接收操作。在中断操作完成后，检查 RxOnDuration 以确定时间是否到期。如果时间到期，操作完成。如果时间没有到期，遇到下面两种情况之一，接收机将再次被开启：设备有另一个冲突事件或 RxOnDuration 指定的时间到期。当发送的原语是关闭接收机时，除非设备有一个冲突事件，否则设备将关闭接收机。

在不支持信标的 PAN 中，MAC 层管理实体将忽略 DeferPermit 和 RxOnTime 参数，并请求物理层立即开启或者关闭接收机。如果请求开启接收机，并将保持开启状态直到 RxOnDuration 符号数到期。

在支持信标的 PAN 中，MAC 层管理实体在试图开启接收机之前将首先决定 RxOnTime + RxOnDuration 是否小于信标帧间隔，该信标帧间隔由 macBeaconOrder 定义。如果不小于，MAC 层管理实体将返回一个状态为 ON_TIME_TOO_LONG 的 MLME-RX-ENABLE.confirm 原语。

然后，MAC 层管理实体将决定接收机能否在当前的超帧内开启。如果发送此原语的设备是 PAN 协调器，它将根据自己的超帧做出决定；如果该设备不是 PAN 协调器，那么它将根据所连接的协调器的超帧做出判断。如果从超帧开始，所测得的当前符号数小于 RxOnTime - aTurnaroundTime，则 MAC 层管理实体就试图在当前的超帧内开启接收机。如果从超帧开始，所测得的当前符号数小于 RxOnTime - aTurnaroundTime 并且 DeferPermit 值为 TRUE，则 MAC 层管理实体将延迟到下一个超帧时期，再试图开启接收机。否则，如果 MAC 层管理实体既不能在当前超帧开启接收机又不能延迟到下一个超帧开启接收机，那么它将返回一个状态为 PAST_TIME 的 MLME-RX-ENABLE.confirm 原语。

如果 RxOnDuration 参数为 0，那么，MAC 层管理实体请求物理层关闭接收机。

如果在 MLME-RX-ENABLE.request 原语中，有不符合语义的参数或者参数值超出其规定范围，MAC 层就会发送一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MLME-RX-ENABLE.confirm 原语。

如果成功地开启或关闭接收机，MAC 层管理实体将发送一个带有 SUCCESS 状态的 MLME-RX-ENABLE.confirm 原语。

7.1.10.2 MLME-RX-ENABLE.confirm 原语

MLME-RX-ENABLE.confirm 原语用来报告试图开启或关闭接收机请求原语的执行结果。

7.1.10.2.1 服务原语的语义

MLME-RX-ENABLE.confirm 原语的语义如下：

```
MLME-RX-ENABLE.confirm      (
                                status
                                )
```

表 66 描述了 MLME-RX-ENABLE.confirm 原语的参数。

表 66--MLME-RX-ENABLE.confirm 原语的参数

名字	类型	有效范围	功能描述
状态	枚举型	SUCCESS, PAST_TIME, ON_TIME_TOO_LONG or INVALID_PARAMETER	请求开启或关闭接收机的结果。

7.1.10.2.2 生成时间

MLME-RX-ENABLE.confirm 原语由 MAC 层管理实体生成，并作为对 MLME-RX-ENABLE.request 原语的响应发送给它的上层。

7.1.10.2.3 适当的用法

在 MAC 层上层 MLME-RX-ENABLE.confirm 原语时，就得到开启或关闭接收机请求原语的执行结果。如果请求原语成功地开启或关闭接收机，则原语返回状态为 SUCCESS，否则返回相应的错误代码。状态值都在 7.1.10.1.3 节中作了详细介绍。

7.1.10.3 消息序列表为改变接收机状态

图 37 的描述当设备没有任何冲突责任时，使接收机持续固定的一段接收时间所必需的消息序列表。a) 的情形为：在支持信标的 PAN 中，假定 MAC 层管理实体接收到 MLME-RX-ENABLE.request 原语，但在当前的超帧没有足够的可用时间来开启接收机，并且 DeferPermit 参数为 TRUE 的例子。b) 的情形为：在不支持信标的 PAN 中，接收机立即开启。

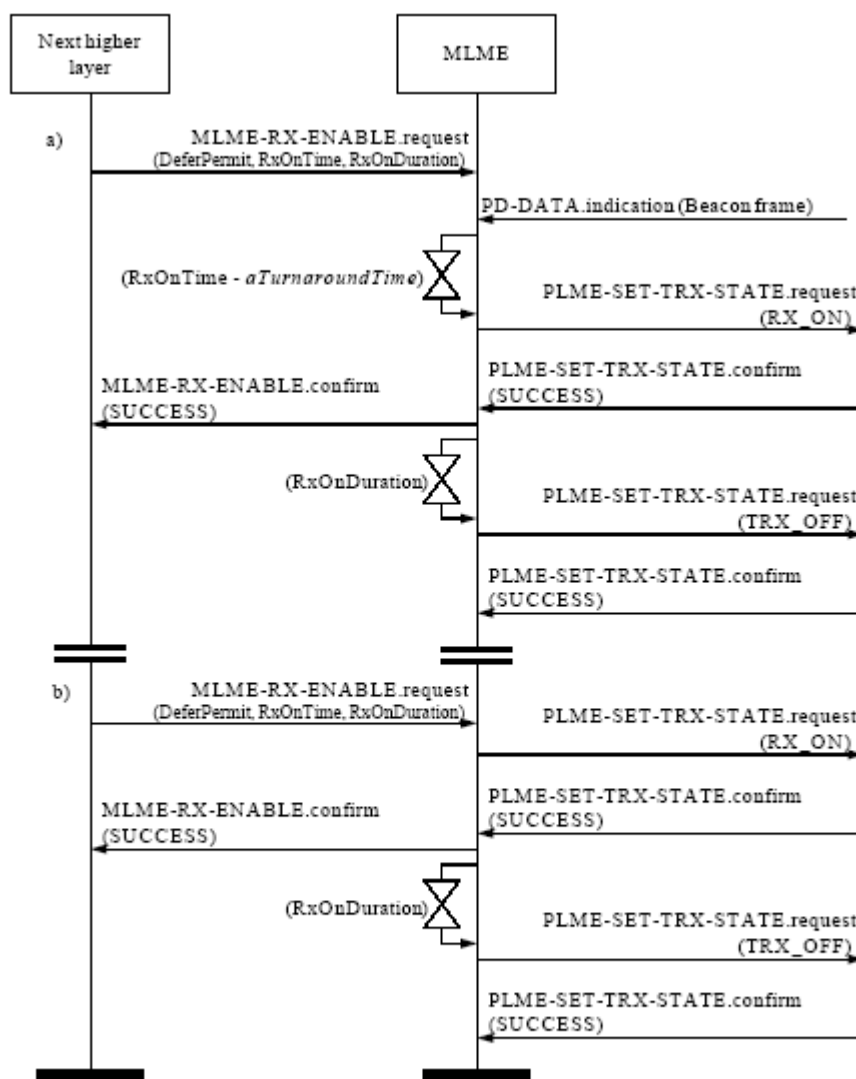


Figure 37—Message sequence chart for changing the state of the receiver

7.1.11 信道扫描原语

MAC 层管理实体服务接入点扫描原语定义了设备如何检测在通信信道中的能量，判断是否存在个域网。

所有的设备都为这些扫描原语提供接口。

7.1.11.1 MLME-SCAN.request

MLME-SCAN.request 原语用来对给定的通信信道列表进行信道扫描。设备能够使用信道扫描测量某个信道的能量，搜索与它建立连接的协调器，或者搜索在它的个域网工作范围（POS）内所有发送信标帧的协调器。

7.1.11.1.1 服务原语的语义

MLME-SCAN.request 原语的语义如下：

MLME-SCAN.request (

 ScanType,

 ScanChannels,

 ScanDuration,

 ChannelPage,

 SecurityLevel,

 KeyIdMode,

 KeySource,

 KeyIndex

表 67 描述了 MLME-SCAN.request 原语的参数。

表 67--MLME-SCAN.request 原语的参数

名字	类型	有效范围	功能描述
ScanType	整型	0x00-0x03	表明执行的扫描类型： 0x00 = ED 扫描(对简化功能设备是可选的)。 0x01 =主动扫描(对简化功能设备是可选的)。 0x02 =被动扫描。 0x03 =孤点扫描。
ScanChannels	位	27 位字段	这 27 位(b0, b1, ... b26) 表示 ChannelPage 参数支持的 27 个被扫描的信道(1 =扫描, 0=不扫描)。
ScanDuration	整型	0-14	此值用来计算在能力检测扫描、主动扫描和被动扫描上用的时间。孤点扫描时忽略此参数。每个信道扫描所用的时间为： $0[aBaseSuperframeDuration * (2n + 1)]$ 个符号, n 为参数 ScanDuration 的值。
ChannelPage	整型	0-31	执行扫描的信道页(见 6.1.2)。
SecurityLevel	整型	0x00–0x07	使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)。
KeyIdMode	整型	0x00–0x03	使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeySource	0, 4 或8字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.2 节) 若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

KeyIndex	整型	0x01–0xff	使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2 节)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00, 此参数被忽略。
----------	----	-----------	--

7.1.11.1.2 适当的用法

MLME-SCAN.request 原语由 MAC 层管理实体上层生成，并发送给 MAC 层管理实体以对在设备的个域网工作范围内的信道进行扫描，以便搜索出活跃的设备。此原语可用于执行下列类型的信道扫描：能量检测扫描来决定信道的用法；主动或被动扫描用来锁定任意一个协调器的信标帧；孤点扫描用来锁定设备已连接的 PAN。每一类型的扫描将在 7.5.2.1 节中进行详细描述。

所有的设备都能执行被动扫描和孤点扫描；对于简化功能设备，ED 扫描和主动扫描是可选的。然而，简化功能设备也许支持主动扫描参与一个不支持信标的网络。

7.1.11.1.3 接收效应

当 MAC 层管理实体收到 MLME-SCAN.request 原语时正在执行先前开始的扫描操作，它将返回状态为 SCAN_IN_PROGRESS 的 MLME-SCAN.confirm 原语。否则，MAC 层管理实体将对 ScanChannels 参数指定的所有信道开始扫描。

MAC 层管理实体通过重复向物理层发送 PLME-ED.request 原语，对每个信道进行能量检测扫描，扫描将持续 $[aBaseSuperframeDuration * (2n + 1)]$ 个符号， n 为参数 ScanDuration 的值。MAC 层管理实体记录下测量到的最大的能量值后，对指定信道列表中的下一个信道进行测量。更多关于能量检测信道扫描过程的详细信息见 7.5.2.1.1 节。

MAC 层管理实体首先通过发送一个信标帧请求命令，对每个信道进行主动扫描 (见 7.3.7 节)。然后，开启接收机，使接收机处于接收状态，并记录在每个接收到的信标帧中的信息，个域网的信息结构中。(见 7.1.5.1.1 节表 55)。主动扫描在某个特定的信道终止的条件为：当存储的个域网描述符的等于最大数或者当经过 $[aBaseSuperframeDuration * (2n + 1)]$ 个符号周期 (n 为参数 ScanDuration 的值)。更多关于主动信道扫描过程的详细信息见 7.5.2.1.2 节。

MAC 层管理实体首先通过发送一个信标帧请求命令，对每个信道进行被动扫描。然后，开启接收机，并记录在每个接收到的信标帧中的信息，个域网的信息结构中。(见 7.1.5.1.1 节表 55)。被动扫描在某个特定的信道终止的条件为：当存储的个域网描述符的等于最大数或者当经过 $[aBaseSuperframeDuration * (2n + 1)]$ 个符号周期 (n 为参数 ScanDuration 的值)。更多关于被动信道扫描过程的详细信息见 7.5.2.1.3 节。

MAC 层管理实体首先通过发送一个孤点通告命令来执行对每个信道的扫描。(见 7.3.6)。如果设备接收到一个协调器再连接命令，MAC 层管理实体将关闭其接收机。否则，设备将在信道列表的下一个信道上重复扫描过程。更多关于孤点信道扫描过程的详细信息见 7.5.2.1.4 节。

SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 参数仅在孤点扫描时使用。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值, 表明该帧需要安全机制, MAC 层管理实体将把帧控制领字段的安全性子字段设置为 1。那 MAC 层将会基于 macCoordExtendedAddress、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 参数执行输出处理过程, 此过程将 7.5.8.2.1 节介绍。在输出帧处理过程中发生任何错误, MAC 层管理实体都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MLME-SCAN.confirm 原语。

能量检测扫描的结果记录在能量检测的列表中, 并通过返回一个状态为 SUCCESS 的 MLME-SCAN.confirm 原语向 MAC 层上层报告。

主动或被动扫描的结果通过 MLME-SCAN.confirm 原语向其上层报告。如果扫描成功并且 macAutoRequest 为 TRUE, 原语结果将包含一系列 PAN 描述符的值。如果扫描成功并且 macAutoRequest 为 FALSE, 原语结果将包含 A null set of PAN 描述符的值; 每个 PAN 描述符的值将分别使用 MLME-BEACON-NOTIFY (见 7.1.5.1) 原语单独地发送到 MAC 层的上层。在两种情况下, MLME-SCAN.confirm 原语都包含未扫描信道的列表和 SUCCESS 状态。

如果在一个主动扫描期间, 由于信道接入失败, MAC 层管理实体在 ScanChannels 参数指定的信道上无法发送信标帧请求命令, 该信道将列入未扫描信道列表中, 该列表由 MLME-SCAN.confirm 原语返回。如果 MAC 层管理实体至少能在其中一个信道中传送信标帧请求命令, 但没有发现其他的帧, MLME-SCAN.confirm 原语将包含 A null set of PAN 描述符的值和 NO_BEACON 状态, 而不管 macAutoRequest 的值是 TRUE 还是 FALSE。

孤点扫描的结果通过 MLME-SCAN.confirm 原语向 MAC 层的上层报告。如果扫描成功, MLME-SCAN.confirm 原语将包含 SUCCESS 状态。如果由于信道接入失败, MAC 层管理实体在 ScanChannels 参数指定的信道上无法发送孤点通告命令, 该信道将列入未扫描信道列表中, 该列表由 MLME-SCAN.confirm 原语返回。MAC 层管理实体至少能在其中一个信道中传送孤点通告命令, 但设备没有接收到协调器再连接命令, MLME-SCAN.confirm 原语将包含 NO_BEACON 状态。这样, MLME-SCAN.confirm 原语的 PANDescriptorList 和 EnergyDetectList 参数为空。

如果在能量检测、主动或者被动扫描期间达到指定的执行的最大次数, 从而扫描终止, MAC 层将发送状态为 LIMIT_REACHED 的 MLME-SCAN.confirm 原语。

如果 MLME-SCAN.request 原语中有不符合语义的参数或者参数值超出范围, MAC 层管理实体将发送一个带有 INVALID_PARAMETER 状态的 MLME-SCAN.confirm 原语。

7.1.11.2 MLME-SCAN.confirm 原语

MLME-SCAN.confirm 原语报告信道扫描请求的结果。

7.1.11.2.1 服务原语的语义

MLME-SCAN.confirm 原语的语义如下：

```
MLME-SCAN.confirm (
    status,
    ScanType,
    ChannelPage,
    UnscannedChannels,
    ResultListSize,
    EnergyDetectList,
    PANDescriptorList
)
```

表 68 描述了 MLME-SCAN.confirm 原语的参数。

表 68--MLME-SCAN.confirm 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
status	枚举型	SUCCESS, LIMIT_REACHED, NO_BEACON, SCAN_IN_PROGRESS, COUNTER_ERROR, FRAME_TOO_LONG, UNAVAILABLE_KEY, UNSUPPORTED_SECURITY or INVALID_PARAMETER	扫描请求的结果
ScanType	整型	0x00-0x03	表明执行扫描的类型： 0x00 = 能量检测扫描(对 RFD 可选)。 0x01 =主动扫描(对 RFD 可选)。 0x02 =被动扫描。 0x03 =孤点扫描。
ChannelPage	整型	0-31	扫描执行的信道页
UnscannedChannels	位	27 位字段	表明请求扫描的信道是否被扫描(1 =未扫描, 0=扫描或未请求)。这个参数对能量检测扫描是无效的。
ResultListSize	整型	特定执行	返回到相应结果列表中元素的个数。孤点扫描时此值 是零。
EnergyDetectList	整型	每个整型都为 0x00-0xff	能量检测列表, 每个值为在

	列表		ED 扫描期间每个信道能量检测值。对于主动，被动和孤点扫描这个参数是无效的。
PANDescriptorList	PAN 描述符值列表	见表 55	在主动和被动扫描期间，如果 <i>macAutoRequest</i> 为 TRUE，则为发现的每个信标的 PAN 描述符列表。如果 <i>macAutoRequest</i> 为 FALSE，或者在能量检测和孤点扫描中该参数为空

7.1.11.2 .2 生成时间

MLME-SCAN.confirm 原语在 MLME-SCAN.request 原语信道扫描完成后，由 MAC 层管理实体生成，并发送给它上层。如果 MLME-SCAN.request 原语请求一个主动，被动，或孤点扫描，EnergyDetectList 参数为空。如果 MLME-SCAN.request 原语请求能量检测或孤点扫描，PANDescriptorList 参数为空；如果 MLME-SCAN.request 原语请求主动或被动扫描并且 *macAutoRequest* 参数设置为 FALSE，PANDescriptorList 参数也为空。如果 MLME-SCAN.request 原语请求孤点扫描，ResultListSize 参数为 0。

如果请求的扫描成功，则 MLME-SCAN.confirm 原语返回状态为 SUCCESS；否则，返回状态为相应的错误代码。状态值都在 7.1.11.1.3 节及其相关章节进行了详细描述。

7.1.11.2 .3 适当的用法

当 MAC 层上层接收到 MLME-SCAN.confirm 原语后，就得到扫描过程的结果。如果请求扫描成功，则状态参数为 SUCCESS。否则，状态参数为错误代码。

7.1.11.3 信道扫描消息顺序图

图 79，图 82，图 83 和图 86 图表(见 7.7)分别给出了执行能量检测扫描、被动扫描、主动扫描和孤点扫描所必须的消息序列。在流程图中还包括物理层所采取的相关步骤。

7.1.12 通信状态原语

MAC 层管理实体服务接入点通信状态原语定义了当请求原语不能激活传送，或者输入信息产生安全错误时，MAC 层管理实体如何与上层通信，通告其传输状态。

所有设备都为通信状态原语提供接口。

7.1.12.1 MLME-COMM-STATUS.indication 原语

MLME-COMM-STATUS.indication 原语允许 MAC 层管理实体向它的上层指示一个通信的状态。

7.1.12.1.1 服务原语的语义

MLME-COMM-STATUS.indication 原语的语义如下：

```
MLME-COMM-STATUS.indication      (
                                    PANId,
                                    SrcAddrMode,
                                    SrcAddr,
                                    DstAddrMode,
                                    DstAddr,
                                    status,
                                    SecurityLevel,
                                    KeyIdMode,
                                    KeySource,
                                    KeyIndex
                                    )
```

表 69 描述了 MLME-COMM-STATUS.indication 原语的参数。

表 69—MLME-COMM-STATUS.indication 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
PANId	整型	0x0000–0xffff	16 位 PAN 标识符，表示帧的目的设备或帧的源设备。
SrcAddrMode	整型	0x00–0x03	该原语的源地址模式。该值如下： 0=没有地址(地址字段省略)。 0x01=预留。 0x02=16 位短地址。 0x03=64 位扩展地址。
SrcAddr	设备地址	由参数 SrcAddrMode 指定	产生错误的源设备地址。
DstAddrMode	整型	0x00–0x03	原语的目的地址模式。该值如下： 0=没有地址(地址字段省略)。 0x01=预留。 0x02=16 位短地址。 0x03=64 位扩展地址。
DstAddr	设备地址	由 DstAddrMode	帧的目的设备地址。

		参数指定	
Status	枚举型	SUCCESS, TRANSACTION _OVERFLOW, TRANSACTION _EXPIRED, CHANNEL_ACC ESS_FAILURE, NO_ACK, COUNTER_ERR OR, FRAME_TOO_L ONG, IMPROPER_KE Y_TYPE, IMPROPER_SEC URITY_LEVEL, SECURITY_ERR OR, UNAVAILABLE _KEY, UNSUPPORTED _LEGACY, UNSUPPORTED _SECURITY or INVALID_PARA METER	通信状态
SecurityLevel	整型	0x00–0x07	如果该原语是在一个响应原语发送之后产生的，则为使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)。 如果该原语是在接收到一个数据帧之后生成的，并且该帧在安全处理过程中产生了错误，则使用接收到的帧使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)。
KeyIdMode	整型	0x00–0x03	如果该原语是在一个响应原语发送之后产生的，则为使用的密钥模式 (见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数为 0x00，忽略此参数。 如果该原语是在接收到一个数据帧之后生成的，并且该帧在安全处理过程中产生了错误，则使用接收到的帧使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。 如果 SecurityLevel 参数为 0x00，此参数无效。

KeySource	0, 4, 8 位字节设置	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	如果该原语是在一个响应原语发送之后产生的，则为使用的密钥的 originator(见 7.6.2.4.1 节)。如果 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00，忽略此参数被。 如果该原语是在接收到一个数据帧之后生成的，并且该帧在安全处理过程中产生了错误，则使用接收到的帧使用的密钥的 originator (见 7.6.2.4.1 节)。如果 KeyIdMode 参数无效或设置 0x00，此参数无效。
KeyIndex	整型	0x01–0xff	如果该原语是在一个响应原语发送之后产生的，则为使用的密钥的索引(见 7.6.2.4.2 节)。如果 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00，忽略此参数。 如果该原语是在接收到一个数据帧之后生成的，并且该帧在安全处理过程中产生了错误，则使用接收到的帧使用的密钥的索引(见 7.6.2.4.2 节)。如果 KeyIdMode 参数无效或设置 0x00，此参数无效。

7.1.12.1.2 生成时间

当由请求原语激活传输，或者接收到一个正在进行安全处理时所产生的错误帧时，MLME-COMM-STATUS.indication 原语由 MAC 层管理实体生成，并发送给它的上层。(见 7.5.8.2.3 节)。

MLME-COMM-STATUS.indication 原语由 MAC 层管理实体紧随 MLME-ASSOCIATE.response 原语或 MLME-ORPHAN.response 原语后生成。此原语返回状态 SUCCESS，表明请求传输成功，或返回代表错误的状态 TRANSACTION_OVERFLOW，TRANSACTION_EXPIRED，CHANNEL_ACCESS_FAILURE，NO_ACK 或者 INVALID_PARAMETER (这些状态值在 7.1.3.3.3 节和 7.1.8.2.3 节中进行了详细描述)，或者因于安全处理失败而产生的一个错误代码(这些状态值在 7.5.8.2.1 节和 7.5.8.2.3 节中进行了详细描述)。

7.1.12.1.3 适当的用法

当 MAC 层的上层接收到 MLME-COMM-STATUS.indication 原语之后，就得知传输的通信状态，或者被通告在对输入帧的安全处理过程中所产生的任何错误。

7.1.13 写 MAC 层 PIB 属性原语

MAC 层管理实体服务接入点设置原语定义了如何写 MAC 层 PIB 属性。
所有设备都为这些设置原语提供接口。

7.1.13.1 MLME-SET.request

MLME-SET.request 原语用来请求写入一个给定的 MAC 层 PIB 的属性值。

7.1.13.1 服务原语的语义

MLME-SET.request 原语的语义如下：

MLME-SET.request (
 PIBAttribute,
 PIBAttributeIndex,
 PIBAttributeValue
)

表 70 描述了 MLME-SET.request 原语的参数。

表 70--MLME-SET.request 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
PIBAttribute	整型	见表 86 和表 88	要写入的 MAC 层 PIB 属性的标识符。
PIBAttributeIndex	整型	特定属性；见表 88	指定的要写入 的 PIB 属性表的索引。此参数仅对表格中的 MAC 层 PIB 属性有效；当要访问物理层 PIB 属性时忽略此参数
PIBAttributeValue	变量	特定属性；见表 86 和表 88	要写入的 MAC 层 PIB 属性的值。

7.1.13.1.2 适当的用法

MLME-SET.request 原语由 MAC 层管理实体上层生成，并且发送给 MAC 层管理实体，请求写所指定的 MAC 层 PIB 属性。

7.1.13.1.3 接收效应

当 MAC 层管理实体接收到 MLME-SET.request 原语时，它将检查 PIB 属性是 MAC PIB 属性还是 PHY PIB 属性。 如果请求的属性是 MAC 属性，MAC 层管理实体将尝试将一个特定的 PIB 属性值写入到它的数据库中。如果参数

PIBAttribute 所指定的属性是只读的(见表 86 和表 88)，MAC 层管理实体将返回状态为 READ_ONLY 的 MLME-SET.confirm 原语。如果参数 PIBAttribute 所指定的属性在其数据库中没有找到，MAC 层管理实体将返回状态为 UNSUPPORTED_ATTRIBUTE 的 MLME-SET.confirm 原语。如果参数 PIBAttributeIndex 所指定的索引超出范围，MAC 层管理实体将返回为 INVALID_INDEX 的 MLME-SET.confirm 原语。如果参数 PIBAttributeValue 所指定的属性值超出了属性的有效范围，MAC 层管理实体将返回状态为 INVALID_PARAMETER 的 MLME-SET.confirm 原语。如果 MAC 层管理实体成功写入所请求的 MAC PIB 属性值，返回状态为 SUCCESS 的 MLME-SET.confirm 原语。

如果 PIBAttribute 参数要设置的属性是 *macBeaconPayloadLength*，并且生成的信标帧长度超出 *aMaxPHYPacketSize* (比如由于安全处理要求增加的帧头)，MAC 层不会更新 *macBeaconPayloadLength*，并返回状态为 INVALID_PARAMETER 的 MLME-GET.confirm 原语。

如果请求改写的属性是 PHY PIB 属性，通过发送 PLME-SET.request 原语将该请求传送到物理层。一旦物理层管理实体接收到 PLME-SET.confirm 原语，它将转化接收到的状态值，因为物理层使用的状态值与 MAC 层管理实体使用的状态值(比如，SUCCESS 状态在 MAC 层和物理层枚举型列表中分别为 0x00 和 0x07)。在状态值转换之后，MAC 层管理实体将向它的上层发送 MLME-SET.confirm 原语，原语中带有状态转换结果参数值，并且 PIBAttribute 参数与 PLME 原语返回的 PIBAttribute 参数值相等。

7.1.13.2 MLME-SET.confirm 原语

MLME-SET.confirm 原语用来报告执行写入 MAC 层 PIB 属性值的结果。

7.1.13.2.1 服务原语的语义

MLME-SET.confirm 原语的语义如下：

MLME-SET.confirm (status, PIBAttribute, PIBAttributeIndex)

表 71 描述了 MLME-SET.confirm 原语的参数。

表 71--MLME-SET.confirm 原语的参数。

名称	类型	有效范围	功能描述
status	枚举型	SUCCESS, READ_ONLY, UNSUPPORTED_ATTRIBUTE, INVALID_INDEX, 或 INVALID_PARAMETER,	写 PIB 属性请求的结果

PIBAttribute	整型	见表 86 和表 88	写入的 MAC 层 PIB 属性的标识符。
PIBAttributeIndex	整型	特定属性；见表 88	指定的要写入的 PIB 属性表的索引。此参数仅对表格中的 MAC 层 PIB 属性有效；当要访问物理层 PIB 属性时忽略此参数

7.1.13.2.2 生成时间

MLME-SET.confirm 原语时由 MAC 层管理实体生成，并作为对 MLME-SET.request 原语的响应返回它的上层。MLME-SET.confirm 原语返回状态为 SUCCESS，则表明请求的数据成功地写入了所指定的 MAC 层 PIB 属性，或者返回相应的错误代码。这些状态值都已在 7.1.13.1.3 节进行了详细介绍。

7.1.13.2.3 适当的用法

当 MAC 层管理实体的上层收到 MLME-SET.confirm 原语时，就得到请求写入 MAC 层 PIB 属性的结果。如果请求 MAC 层 PIB 属性成功地写入，状态参数置为 SUCCESS。否则，状态参数指示错误。

7.1.14 更新超帧配置原语

MAC 层管理实体服务接入点启动原语定义了一个完整功能设备如何开始使用一个新的超帧配置来激活一个 PAN，如何在一个已存在的 PAN 中开始传输信标帧，从而便于发现设备，或者停止信标帧的传输。

对于简化功能设备来书，此原语是可选的。

7.1.14.1 MLME-START.request 原语

MLME-START.request 原语允许 PAN 协调器构建一个新的 PAN 或开始使用新的超帧配置。此原语也可以由一个已经连接到一个已存 PAN 上的设备用来开始使用新的超帧配置。

7.1.14.1.1 服务原语的语义

MLME-START.request 原语的语义如下：

MLME-START.request (
PANId,
LogicalChannel,
ChannelPage,
StartTime,
BeaconOrder,
SuperframeOrder,
PANCoordinator,
BatteryLifeExtension,
CoordRealignment,
CoordRealignSecurityLevel,
CoordRealignKeyIdMode,
CoordRealignKeySource,
CoordRealignKeyIndex,
BeaconSecurityLevel,
BeaconKeyIdMode,
BeaconKeySource,
BeaconKeyIndex
)

表 72 描述了 MLME-START.request 原语的参数。

表 72-MLME-START.request 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
PANId	整型	0x0000–0xffff	设备使用的 PAN 标识符。
LogicalChannel	整型	从 ChannelPage 参数指定的可用的逻辑信道中选择。	开始使用新的超帧配置的逻辑信道。
ChannelPage	整型	从 PHY 支持的可用的信道页中选择。(见 6.1.2 节)	开始使用新的超帧配置的信道页。
StartTime	整型	0x000000–0xffffffff	开始传送信标帧的时间。如果这个参数等于 0x000000, 信标帧立即开始传输。否则, 与设备同步的协调器的信标帧指定的时间相关。 如果 BeaconOrder 参数值为 15 或 PANCoordinator 参数为 TRUE, 忽略此参数。 时间用符号周期表示, 并且与退避时隙边界一致。这是一个 24 位的值, 并且该值的精度最

			小 20 位，最低 4 位是最低有效位。
BeaconOrder	整型	0–15	传输信标帧的频率。值为 15 表明协调器不发送信标帧。7.5.1.1 节解释了信标帧命令和信标帧间隔之间的关系。
SuperframeOrder	整型	0– <i>BO</i> 或 15	超帧的活跃部分的长度，包括信标帧。如果 BeaconOrder 参数(<i>BO</i>)值为 15，忽略此参数。7.5.1.1 节解释了超帧命令和超帧持续时间之间的关系。
PANCoordinator	布尔型	TRUE or FALSE TRUE 或 FALSE	如果为 TRUE，设备将成为一个新的 PAN 的协调器。如果为 FALSE，设备将在与它相连的 PAN 中开始使用新的超帧配置。
BatteryLifeExtension	布尔型	TRUE 或 FALSE	如果值为 TRUE，则在信标帧间隔期(<i>IFS</i>) 后整个 <i>macBattLifeExtPeriods</i> 期内，不能接收信标帧。如果此值为 FALSE，则在整个 <i>CAP</i> 期间，信标接收保持接收状态。如果 BeaconOrder 参数值为 15，忽略此参数。
CoordRealign	布尔型	TRUE 或 FALSE	如果协调器重新分配命令的传送先于更改超帧配置，则为 TRUE，否则为 FALSE。
CoordRealignSecurityLevel	整型	0x00–0x07	协调器重新分配命令帧使用的安全等级（见 7.6.2.2.1 节表 95）
CoordRealignKeyIdMode	整型	0x00–0x03	表明使用的密钥的模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。 如 CoordRealignSecurityLevel 参数为 0x00，忽略此参数。
CoordRealignKeySource	0, 4, 8 字节	由 CoordRealignKeyIdMode 参数指定	使用的密钥的 originator。（见 7.6.2.4.1 节）。如果 CoordRealignKeyIdMode 参数被忽略或为 0x00，忽略此参数。
CoordRealignKeyIdIndex	整型	0x01–0xff	使用的密钥的索引(见 7.6.2.4.2 节)。如果 CoordRealignKeyIdMode 参数被忽略或为 0x00，忽略此参数。

BeaconSecurityLevel	整型	0x00–0x07	信标帧使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)。
BeaconKeyIdMode	整型	0x00–0x03	表明使用的密钥的模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 BeaconSecurityLevel 参数被为 0x00，忽略此参数。
BeaconKeySource	0, 4, 8 位字节设置	由BeaconKeyIdMod 参数指定	使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.1 节)。如 BeaconKeyIdMode 参数被忽略或为 0x00，忽略此参数。
BeaconKeyIndex	整型	0x01–0xff	使用的密钥的索引(见 7.6.2.4.2 节)。如 BeaconKeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00，忽略此参数。

7.1.14.1.2 适当的用法

MLME-START.request 原语由 MAC 层管理实体上层生成，并发送给它的 MAC 层管理实体以请求设备开始使用新的超帧配置。

7.1.14.1.3 接收效应

如果该原语的 macShortAddress 为 0xffff 时，即设备为非已连接的网络设备，则设备的 MAC 层管理实体接收到 MLME-START.request 原语后，将发送状态为 NO_SHORT_ADDRESS 的 MLME-START.confirm 原语。

当 CoordRealignment 参数为 TRUE 时，协调器试图按照 7.5.2.3.2 节所描述的方式传送协调器重新分配命令帧。如果由于通道访问失败使得协调器重新分配命令传输失败，MAC 层管理实体不会做对超帧配置作任何变动(即，不改变 PIB 属性)，并发送状态为 CHANNEL_ACCESS_FAILURE 的 MLME-START.confirm 原语。如果协调器重新分配命令传送成功，MAC 层管理实体更新相应的 PIB 参数为 BeaconOrder、SuperframeOrder、PANId、ChannelPage 和 LogicalChannel 参数的值，如 7.5.2.3.4 节所述，并发送状态为 SUCCESS 的 MLME-START.confirm 原语。

当 CoordRealignment 参数为 FALSE 时，MAC 层管理实体更新相应的 PIB 参数为 BeaconOrder、SuperframeOrder、PANId、ChannelPage 和 LogicalChannel 参数的值，如 7.5.2.3.4 节所述。

协调器的信标帧使用的地址取决于 macShortAddress 的当前值，该值由上层在发送此原语之前设置。如果 BeaconOrder 参数小于 15，MAC 层管理实体把设置 macBattLifeExt 的值为 BatteryLifeExtension 参数的值。如果 BeaconOrder 参数等于 15，BatteryLifeExtension 参数的值被忽略。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值，表明该帧需要安全机制，MAC 层管理实体将把帧控制领字段的安全性子字段设置为 1。MAC 层将执行输出处理过程，此过程将在 7.5.8.2.1 节介绍。如果设置 CoordRealignment 参数为 TRUE，CoordRealignSecurityLevel、CoordRealignKeyIdMode、

CoordRealignKey Source 和 CoordRealignKeyIndex 参数将用于处理 MAC 层命令帧。如果 BeaconOrder 参数表明网络支持信标， BeaconSecurityLevel、 BeaconKeyIdMode、BeaconKeySource 和 BeaconKeyIndex 参数将用于处理信标帧。在输出帧处理过程中发生任何错误，MAC 层管理实体都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MLME-START.confirm 原语。

如果信标帧的长度超出 *aMaxPHYPacketSize* (比如由于安全处理要求增加的帧头)，MAC 层将放弃该信标帧，并发送状态为 FRAME_TOO_LONG 的 MLME-START.confirm 原语。

如果 BeaconOrder 参数是等于 15，则表明该网络不支持信标帧，MAC 层管理实体将忽略 StartTime 参数。如果 BeaconOrder 参数小于 15，MAC 层管理实体检查 StartTime 参数以确定开始传输信标帧的时间;时间用符号周期表示，并且与退避时隙边界一致。如果设置 PAN 协调器参数为 TRUE，MAC 层管理实体将忽略 StartTime 参数并立即开始传输信标帧。把 StartTime 参数设置为 0x000000 也会造成 MAC 层管理实体立即开始传输信标帧。如果 PANCoordinator 参数设置为 FALSE，并且 StartTime 参数非零，当 MAC 层管理实体接收到它所连接的协调器的信标帧时，MAC 层管理实体通过把 StartTime 符号时间加到本地时钟的时间上计算得到信标帧传输时间。如果计算得到的时间造成输出帧与输入帧的重叠，MAC 层管理实体不会开始传输信标帧。在这种情况下，MAC 层管理实体发送状态为 SUPERFRAME_OVERLAP 的 MLME-START.confirm 原语。否则，当从本地时钟获得的当前时间等于计算得到的符号时间时，MAC 层管理实体开始传输信标帧。

如果 StartTime 参数是非零的，并且当前 MAC 层管理实体没有跟踪与它相连的协调器的信标帧，MAC 层管理实体将发送状态为 TRACKING_OFF 的 MLME-START.confirm 原语。

MAC 层管理实体完成此过程后，将以 MLME-START.confirm 原语作为对该原语的响应。如果开始使用新的超帧配置成功，状态参数置为 SUCCESS，如果存在无效参数或超出有效范围，状态参数置为 INVALID_PARAMETER。

7.1.14.2 MLME-START.confirm 原语

MLME-START.confirm 原语用于报告尝试开始使用更新的超帧配置的请求结果。

7.1.14.2.1 服务原语的语义

MLME-START.confirm 原语的语义如下：

MLME-START.confirm (status)

表 73 描述了 MLME-START.confirm 原语的参数。

表 73--MLME-START.confirm 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
status	枚举	SUCCESS,	开始使用更新的超帧配置的请

	型	NO_SHORT_ADDRESS, SUPERFRAME_OVERLAP, TRACKING_OFF, INVALID_PARAMETER, COUNTER_ERROR, FRAME_TOO_LONG, UNAVAILABLE_KEY, UNSUPPORTED_SECURITY or CHANNEL_ACCESS_FAILURE	求结果。
--	---	---	------

7.1.14.2.2 生成时间

MLME-START.confirm 原语由 MAC 层管理实体生成，并作为对 MLME-START.request 原语的响应向上层进行通报。MLME-START.confirm 原语返回状态 SUCCESS 表示 MAC 层已经开始使用新的超帧配置，或返回代表产生错误的状态。这些状态值都在 7.1.14.1.3 节及其相关章节中进行了详细描述。

7.1.14.2.3 适当的用法

当 MAC 层管理实体的上层接收到 MLME-START.confirm 原语时，就得到它请求开始使用新的超帧配置的结果。如果成功，则状态参数被设置为 SUCCESS，否则，状态参数指示错误。

7.1.14.3 更新超帧配置的消息序列表

图 38 为在完整功能设备中启动信标帧传输所必需的消息序列表。图 78 (见 7.7) 为 PAN 协调器开始在一个新的 PAN 发送信标所必需的消息序列表。此图包括在物理层所采取的步骤。

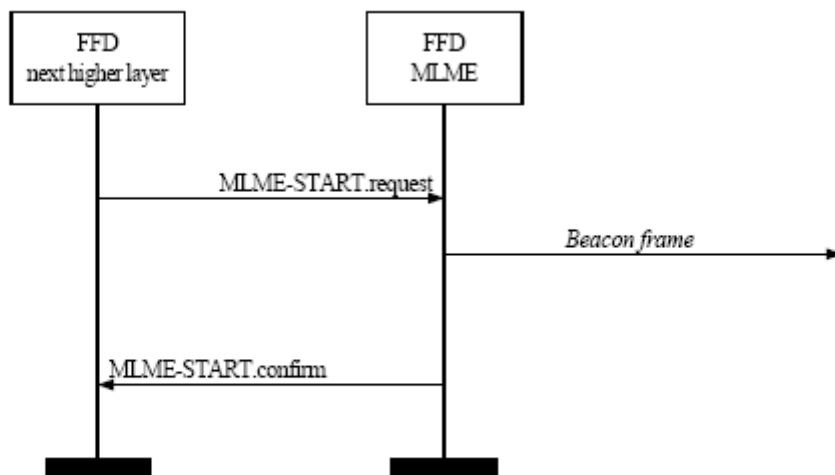


Figure 38—Message sequence chart for updating the superframe configuration

7.1.15 与协调器同步的原语

MAC 层管理实体服务接入点同步原语定义了如何与一个协调器取得同步, 以及如何将同步失去信息通告给它的上层。

所有的设备都为指示原语提供接口, 请求原语是可选的。

7.1.15.1 MLME-SYNC.request 原语

MLME-SYNC.request 原语用来请求通过获取、跟踪信标来达到与协调器同步。

7.1.15.1.1 服务原语的语义

MLME-SYNC.request 原语的语义如下:

MLME-SYNC.request (LogicalChannel, ChannelPage, TrackBeacon)

表 74 描述了 MLME-SYNC.request 原语的参数。

表 74-MLME-SYNC.request 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
LogicalChannel	整型	从物理层支持的可用的逻辑信道中选择	与协调器同步所用的逻辑信道。
ChannelPage	整型	从物理层支持的	与协调器同步所用的信道页。

		可用的逻辑信道 中选择（见 6.1.2 节）	
TrackBeacon	布尔型	TRUE 或 FALSE	如果 MLME 与下一个信标帧同步并跟踪所有后面的信标帧，则为 TRUE。如果 MLME 仅与下一个信标帧同步，则为 FALSE。

7.1.15.1.2 适当的用法

在支持信标的 PAN 中，MLME-SYNC.request 原语由设备的上层生成，并发送给它的 MAC 层管理实体，使它同 PAN 的协调器同步。

7.1.15.1.3 接收效应

在支持信标的 PAN 中，如果 MAC 层管理实体接收到 MLME-SYNC.request 原语，首先设置参数 *phyCurrentPage* 和 *phyCurrentChannel* 分别等于参数 *ChannelPage* 和 *LogicalChannel* 的值，并通过发送 PLME-SET.request 原语给物理层来更新两个属性值。如果参数 TrackBeacon 为 TRUE，MAC 层管理实体将跟踪信标帧，即仅在每个预期信标帧时间到来前，接收信标，以便能处理信标帧。如果参数 TrackBeacon 为 FALSE，MAC 层管理实体将锁定信标帧，但不继续跟踪信标。

如果 MAC 层管理实体正在跟踪当前的信标帧时，接收到此原语，它不会丢弃此原语，而是将它作为一个新的同步请求。

如果在最初的搜索或在跟踪时，没有锁定信标，MAC 层管理实体将发送状态参数为 BEACON_LOST 的 MLME-SYNC-LOSS.indication 原语。

7.1.15.2 MLME-SYNC-LOSS.indication 原语

MLMESYNCCLOSS.indication 原语表示同 PAN 协调器失去同步。

7.1.15.2.1 服务原语的语义

MLME-SYNC-LOSS.indication 原语的语义如下：

MLME-SYNC-LOSS.indication (

 LossReason,

 PANId,

 LogicalChannel,

 ChannelPage,

 SecurityLevel,

 KeyIdMode,

KeySource,
KeyIndex
)

表 75- MLME-SYNC-LOSS.indication 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
LossReason	枚举型	PAN_ID_CONFLICT, REALIGNMENT, or BEACON_LOST	失去同步的原因
PANId	整型	0x0000–0xffff	与设备失去同步的 PAN 标识符或者设备被编入的新的 PAN 的标识符。
LogicalChannel	整型	从物理层支持的可用的逻辑信道中选择（见 6.1.2 节）	设备失去同步的逻辑信道或者设备被编入的新的逻辑信道。
ChannelPage	整型	从物理层支持的可用的信道页中选择（见 6.1.2 节）	设备失去同步的信道页或者设备被编入的新的信道页。
SecurityLevel	整型	0x00-0x07	如果该原语是在下面两种情况下生成的，则该参数设置为 0x00。 1) 失去同步之后由设备生成。 2) PAN 协调器为了检测 PAN 标识符的冲突而生成。 如果该原语是在收到一个协调器重新分配命令或收到一个 PAN ID 冲突通告命令后生成的，则该参数设置为： 收到的 MAC 层帧使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)。
KeyIdMode	整型	0x00–0x03	如果该原语是在下面两种情况下生成的，则忽略此参数。 1) 失去同步之后由设备生成。 2) PAN 协调器为了检测 PAN 标识符的冲突而生成。 如果该原语是在收到一个协调器重新分配命令或收到一个 PAN ID 冲突通告命令后生成的，则该参数设置为： 收到的 MAC 层帧的发送方使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果参数 SecurityLevel 设置为 0x00，则此参数无效。

KeySource	0, 4, 8 位字节设置	由KeyIdMode参数指定	如果该原语是在下面两种情况下生成的，则忽略此参数。 1) 失去同步之后由设备生成。 2) PAN 协调器为了检测 PAN 标识符的冲突而生成。 如果该原语是在收到一个协调器重新分配命令或收到一个 PAN ID 冲突通告命令后生成的，则该参数设置为： 收到的 MAC 层帧的发送方使用的密钥的 originator(见 7.6.2.4.1 节)。如果参数 SecurityLevel 设置为 0x00，则此参数无效。
KeyIndex	整型	0x01–0xff	如果该原语是在下面两种情况下生成的，则忽略此参数。 1) 失去同步之后由设备生成。 2) PAN 协调器为了检测 PAN 标识符的冲突而生成。 如果该原语是在收到一个协调器重新分配命令或收到一个 PAN ID 冲突通告命令后生成的，则该参数设置为： 收到的 MAC 层帧的发送方使用的密钥索引 (见 7.6.2.4.2 节)。如果参数 SecurityLevel 设置为 0x00，则此参数无效。

7.1.15.2.2 生成时间

MLME-SYNC-LOSS.indication 原语时由设备的 MAC 层管理实体生成，同协调器失去同步事件产生时，向上层发送该原语。当 PAN 的标识符发生冲突事件时，也可由 PAN 协调器的 MAC 层管理实体生成，并发送给它的上层。

如果与 PAN 协调器相连的设备检测到 PAN 标识符冲突，并向协调器发送标识符冲突的信息，设备的 MAC 层管理实体将以参数 LossReason 为 PAN_ID_CONFLICT 的 MLME-SYNC-LOSS.indication 原语向它的上层通报。同样，如果 PAN 协调器接收到 PAN 标识符冲突通告命令(见 7.3.5 节)，MAC 层管理实体将向上层发送同样参数设置的此原语

如果设备接收到协调器发送的重新分配命令(见 7.3.8 节)，并且 MAC 层管理实体不是执行孤点扫描命令，则它发送向上层发送参数 LossReason 被设置为 REALIGNMENT 的 MLME-SYNC-LOSS.indication 原语，并且原语中的参数 PANId、LogicalChannel、ChannelPage 和安全相关参数都按照 7.5.2.3.3 节所述设置。

在发送 MLME-SYNC.request 原语后，如果设备连续在 aMaxLostBeacons 个超帧内没有侦测到或跟踪到信标帧，那么 MAC 层管理实体将发送参数 LossReason 设置为 BEACON_LOST 的 MLME-SYNC-LOSS.indication 原语，并且原语中的参数 PANId、LogicalChannel 和 ChannelPage 参数根据失去同步的协调器设置。参数 SecurityLevel 设置为 0，则参数 KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 将被忽略。如果正在跟踪信标帧，MAC 层管理实体将不再试图跟踪信标帧。

7.1.15.2.3 适当的用法

当 MAC 层管理实体的上层接收到 MLME-SYNC-LOSS.indication 原语时，就得知与协调器失去同步的信息。

7.1.15.3 协调器同步的消息序列表

图 39 为设备与协调器同步所必需的消息序列。在 a) 中，发送一个同步请求后，MAC 层管理实体开始搜索信标帧，若搜索到，将判断在 PAN 协调器中是否有此设备的未处理数据，如果有，按照 7.5.6.3 所述发送请求数据。在 b) 中，MAC 层管理实体发送跟踪同步请求后，搜寻信标帧，若搜索到，将试图使用一个定时器为预期下个信标帧到来的时间。

在 a) 和 b) 中都有，接收的信标帧不包含有效载荷，并且 *macAutoRequest* 设置为 TRUE。当接收到一个信标帧时，MAC 层管理实体也将检查协调器是否有设备的未处理的数据。

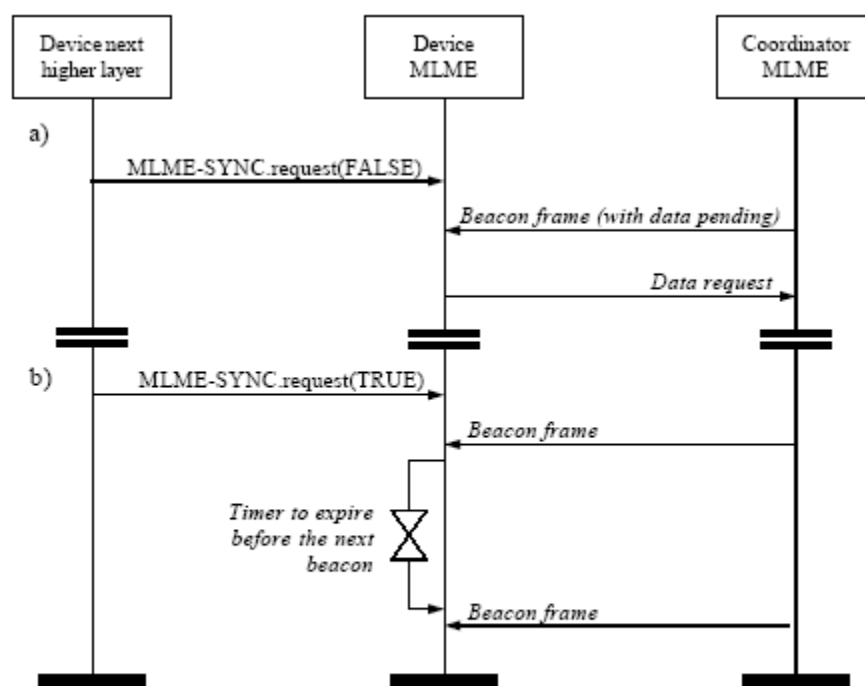


Figure 39—Message sequence chart for synchronizing to a coordinator in a beacon-enabled PAN

7.1.16 原语为协调器请求数据

MAC 层管理实体服务接入点轮询原语定义了如何向协调器请求数据。
所有的设备都为这些轮询原语提供接口。

7.1.16.1 MLME-POLL.request

MLME-POLL.request 原语用来由设备向协调器请求数据。

7.1.16.1.1 服务原语的语义

MLME-POLL.request 原语的语义如下：

MLME-POLL.request (CoordAddrMode, CoordPANId, CoordAddress, SecurityLevel, KeyIdMode, KeySource, KeyIndex)

表 76 描述了 MLME-POLL.request 原语的参数。

表 76-MLME-POLL.request 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
CoordAddrMode	整型	0x02–0x03	请求轮询的协调器的地址模式。此参数取以下值： 2=16 位短地址 3=64 位扩展地址。
CoordPANId	整型	0x0000–0xfffe	请求轮询的协调器 PAN 标识符。
CoordAddress	设备地址	由参数 CoordAddrMode指定	请求轮询的 协调器的地址
SecurityLevel	整型	0x00–0x07	使用的安全等级(见 7.6.2.2.1 节表 95)。
KeyIdMode	整型	0x00–0x03	使用的密钥模式(见 7.6.2.2.2 节表 96)。如果 SecurityLevel 参数被设置为 0x00,此参数被忽略。

KeySource	0, 4或8字节	与 KeyIdMode 参数的描述相对应	使用的密钥的 originator。(见 7.6.2.4.2 节)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。
KeyIndex	整型	0x01–0xff	使用的密钥的索引。(见 7.6.2.4.2 节)若 KeyIdMode 参数被忽略或被设置为 0x00,此参数被忽略。

7.1.16.1.2 适当的用法

MLME-POLL.request 原语由 MAC 层管理实体的上层生成，并向协调器请求数据时，发送给 MAC 层管理实体。

7.1.16.1.3 接收效应

当 MAC 层管理实体接收到 MLME-POLL.request 原语时，就生成并发送数据请求命令(见 7.3.4 节)。如果轮询直接指向 PAN 协调器，那么生成的数据请求命令将没有任何目的地址信息。否则，生成的数据请求命令将有目的地址信息，即参数 CoordPANId 和参数 CoordAddress。

如果 SecurityLevel 参数被设置为除 0x00 之外的一个有效值，表明该帧需要安全机制，MAC 层将把帧控制领字段的安全性子字段设置为 1。MAC 层将会基于参数 CoordAddress、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 执行输出处理过程，此过程将 7.5.8.2.1 节介绍。在输出帧处理过程中发生任何错误，MAC 层管理实体都将丢弃该帧并返回一个带有输出帧处理过程返回的错误状态的 MLME-POLL.confirm 原语。

如果由于 CSMA-CA 算法失败导致不能传送数据请求命令，则 MAC 层管理实体将发送状态为 CHANNEL_ACCESS_FAILURE 的 MLME-POLL.confirm 原语。

如果 MAC 层管理实体成功地发送了一个数据请求命令，那么将期望收到一个返回的确认帧。如果没有收到确认帧，那么将发送状态为 NO_ACK 的 MLME-POLL.confirm 原语(见 7.5.6.4 节)。

如果 MAC 层管理实体成功接收到确认帧，并且确认帧的 Frame Pending subfield 的值为 1 时，则 MAC 层管理实体请求物理层启动接收机。如果确认帧的 Frame Pending subfield 的值为 0 时，则 MAC 层管理实体将发送状态为 NO_DATA 的 MLME-POLL.confirm 原语。

如果从协调器接收到的帧的载荷长度为 0 或此帧为 MAC 命令帧，MAC 层管理实体将发送状态为 NO_DATA 的 MLME-POLL.confirm 原语。如果接收到的帧的载荷长度非零，则，MAC 层管理实体将发送状态为 SUCCESS 的 MLME-POLL.confirm 原语。在这种情况下，实际的数据将通过 MCPS-DATA.indication 原语发送给它的上层(见 7.1.1.3 节)。

在下面两种情况下将发送状态为 NO_DATA 的 MLME-POLL.confirm 原语。

(1) 在支持信标的 PAN 中，竞争接入期内经过 macMaxFrameTotalWaitTime 个符号仍没有接收到帧信息。(2) 在不支持信标的 PAN 中，尽管数据请求命令的确认帧的 Frame Pending subfield 值为 1，但在 macMaxFrameTotalWaitTime 个符号期内没有接收到帧信息。

如果在 MLME-POLL.request 原语中有不符合语义的参数或者参数值超出范围，MAC 层管理实体将发送状态为 INVALID_PARAMETER 的 MLME-POLL.confirm 原语。

7.1.16.2 MLME-POLL.confirm 原语

MLME-POLL.confirm 原语用来向上层通报向协调器轮询数据请求的结果。

7.1.16.2.1 服务原语的语义

MLME-POLL.confirm 原语的语义如下：

```
MLME-POLL.confirm      (
                        status
                        )
```

表 77 描述了 MLME-POLL.confirm 原语的参数。

表 77--MLME-POLL.confirm 原语的参数

名称	类型	有效范围	功能描述
status	整型	SUCCESS, CHANNEL_ACCESS_FAILURE, NO_ACK, NO_DATA, COUNTER_ERROR, FRAME_TOO_LONG, UNAVAILABLE_KEY, UNSUPPORTED_SECURITY or INVALID_PARAMETER	数据请求的状态

7.1.16.2.2 生成时间

MLME-POLL.confirm 原语由 MAC 层管理实体生成，并作为对 MLME-POLL.request 原语的响应发送给它的上层。如果请求成功，状态参数为 SUCCESS，表示成功地对数据进行了轮询。否则，返回代表产生错误的状态。这些状态值都在 7.1.16.1.3 节及其相关章节进行了详细介绍。

7.1.16.2.3 适当的用法

当 MAC 层管理实体的上层收到 MLME-POLL.confirm 原语时,就得知向协调器请求数据轮询的结果。

7.1.16.3 请求协调器数据的消息序列表

图 40 描述了设备请求协调器数据所必需的消息序列表,包括设备的各层和空中接口的行为。

在如下两种情况,轮询请求发送给 MAC 层管理实体,然后 MAC 层管理实体向协调器发数据请求命令。在图 40a 中,对应的确认的 FramePending (FP)子字段值为 0 时,MAC 层管理实体将立即发送 MLME-POLL.confirm 原语。在图 40b 中,对应的确认帧的 Frame Pending subfield 值为 1 时,MAC 层管理实体将启动接收机,以期望接收来自协调器的数据帧。当接收到数据帧时,MAC 层管理实体首先发送 MLME-POLL.confirm 原语,然后发送包含接收到的帧中数据的数据确认原语。

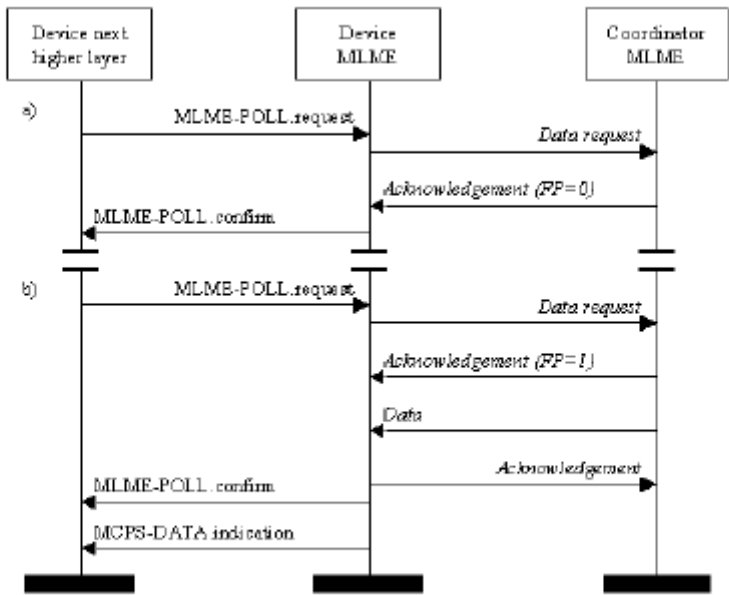


Figure 40—Message sequence chart for requesting data from the coordinator

7.1.17 MAC 枚举值描述

本节解释了 MAC 层中所涉及到的枚举型的取值的意义。表 78 给出了 MAC 枚举型值的功能描述。

表 78---MAC 枚举型值的功能描述

枚举型类型	值	功能描述
-------	---	------

SUCCESS	0x00	请求的操作成功地完成了。对于传输请求，此值表明成功传输
—	0x01–0xda	为 MAC 命令状态和原因代码预留
—	0x80–0xda, 0xfe–0xff	预留
BEACON_LOSS	0xe0	在同步请求后，信标帧丢失
CHANNEL_ACCESS_FAILURE	0xe1	由于信道占用导致不能传输，例如，CSMA-CA 机制失败
COUNTER_ERROR	0xdb	收到的帧的发送方使用的帧计数器是无效的。
DENIED	0xe2	保护时隙请求被 PAN 协调器拒绝
DISABLE_TRX_FAILURE	0xe3	关闭接收机失败
FRAME_TOO_LONG	0xe5	帧处理导致帧长度大于 <code>aMaxPHYPacketSize</code> 或请求的事务过大而不能在 CAP 或 GTS 内完成
IMPROPER_KEY_TYPE	0xdc	根据接收方的密钥使用原则，相应的帧类型不允许使用帧的发送方使用的密钥
IMPROPER_SECURITY_LEVEL	0xdd	帧的发送方使用的安全等级不能满足接收方要求/期望的最低安全等级
INVALID_ADDRESS	0xf5	由于源地址参数或者目的地址参数不存在导致发送数据请求不成功
INVALID_GTS	0xe6	因指定的 GTS 没有传输方向或没有定义而产生 GTS 传输错误
INVALID_HANDLE	0xe7	在事务列表中没有找到所请求清除的 MAC 层服务数据单元 (MSDU) 句柄
INVALID_INDEX	0xf9	因为指定表的索引超出范围导致在该表中写入一个 MAC PIB 属性的请求失败
INVALID_PARAMETER	0xe8	原语的参数超出有效范围。
LIMIT_REACHED	0xfa	因为存储的 PAN 描述符的数量达到了指定的执行的最大值，扫描操作被过早地终止了。
NO_ACK	0xe9	在重发 <code>macMaxFrameRetries</code> 次后，仍没有收到确认帧
NO_BEACON	0xea	扫描操作没有发现网络信标帧
NO_DATA	0xeb	数据请求之后，没有有效的响应数据

NO_SHORT_ADDRESS	0xec	由于没有分配短地址而导致操作失败
ON_TIME_TOO_LONG	0xf6	指定的符号周期的数目比信标帧间隔长，导致开启接收机请求失败
OUT_OF_CAP	0xed	接收机启动请求原语在 CAP 内未完成，而导致失败 本标准不使用枚举型描述，包括枚举型描述仅仅是为了满足与 IEEE Std 802.15.4-2003 的后向兼容性
PAN_ID_CONFLICT	0xee	检测 PAN 标识符冲突，并与 PAN 协调器通信
PAST_TIME	0xf7	不能在当前超帧内完成并不允许推迟到下一个超帧，导致开启接收机请求失败
READ_ONLY	0xfb	SET/GET 请求发送了只读属性的标识符
REALIGNMENT	0xef	接收到协调器重新分配命令
SCAN_IN_PROGRESS	0xfc	MLME 正在执行先前开始的扫描操作过程，从而导致执行扫描操作的请求失败
SECURITY_ERROR	0xe4	接收的被保护的帧的密码处理失败
SUPERFRAME_OVERLAP	0xfd	设备打算基于它的协调器的信标传输计时开始发送信标帧，但开始时间与它的协调器信标帧的传输时间重叠
TRACKING_OFF	0xf8	设备打算基于它的协调器的信标传输计时开始发送信标帧，但设备当前没有跟踪它的协调器信标帧。
TRANSACTION_EXPIRED	0xf0	事务过期，且丢弃其信息。
TRANSACTION_OVERFLOW	0xf1	无足够的容量存储事务
TX_ACTIVE	0xf2	接收机被请求开启时，接收机正处在传输激活状态。 本标准不使用枚举型描述，包括枚举型描述仅仅是为了满足与 IEEE Std 802.15.4-2003 的后向兼容性
UNAVAILABLE_KEY	0xf3	收到的帧的发送方使用的密钥是不可获取的，如果可获取，那个特定密钥不知道该源设备或者原设备被列入密钥的黑名单

UNSUPPORTED_ATTRIBUTE	0xf4	SET/GET 请求原语中含有不支持的 PIB 属性的标识符。
UNSUPPORTED_LEGACY	0xde	收到的帧使用的保护机制是基于 IEEE Std 802.15.4-2003，而且本标准不支持该保护机制
UNSUPPORTED_SECURITY	0xdf	不支持帧的发送方使用的安全（等级）

7.2 MAC 层帧结构

本节详细说明了通用 MAC 层帧结构，即 MAC 层协议数据单元（MPDU）。
每个 MAC 层帧由下列基本部分组成：

- a) **MAC 层帧头，包括帧控制，序列号和地址信息。**
- b) **可变长度的 MAC 层载荷，不同的帧类型有不同的载荷。确认帧没有载荷。**
- c) **MAC 层帧尾，应包含帧校验序列（FCS）。**

MAC 层的帧按特定的序列组成。本节所描述的 MAC 层帧的顺序与在物理层中传输的顺序相同，为从左到右，即首先传输最左边的数据位。帧字段中的位按从 0（最左边，最低有效位）到 $k-1$ （最右边，最高有效位）， k 为字段的比特位数。在传输多于 8 位的字段时，由最低位到最高位传输字节。

对每个 MAC 层帧，所有的保留位在发送时都置 0，并且在接收时忽略。

7.2.1 通用 MAC 层帧结构

MAC 层帧结构由 MAC 层帧头，MAC 层载荷和 MAC 层帧尾组成。MAC 层帧头的子字段顺序是固定的，然而，在所有的帧中，可以不应包含地址子字段。通用 MAC 层帧结构在图 41 中描述。

2 字节	1 字节	0/2 字节	0/2/8 字节	0/2 字节	0/2/8 字节	0/5/6/10/14 字节	可变	2 字节
帧控制	序列号	目的 PAN 标识符	目的地址	源 PAN 标识符	源地址	辅助安全头	帧载荷	帧校验序列
MAC 层帧头							MAC 层载荷	MAC 层帧尾

图 41 一通用 MAC 层帧结构

7.2.1.1 帧控制字段

帧控制字段位长为 16 比特，包括帧类型的定义，地址子字段和其他控制标

志。帧控制字段格式在图 42 中描述。

位 0—2	3	4	5	6	7—9	10—11	12—13	14—15
帧类型	安全使能	帧未处理	应答请求	PAN ID 密集	保留	目的寻址模式	帧版本	源寻址模式

图 42 一帧控制字段格式

7.2.1.1.1 帧类型子字段

帧类型子字段位长度为 3 个比特位，并应设置为表 79 中列出的一个非保留值。

表 79 一 帧类型子字段值

帧类型值 $b_2 b_1 b_0$	描述
000	信标帧
001	数据帧
010	确认帧
011	MAC 命令
100—111	保留

7.2.1.1.2 安全使能子字段

安全使能子字段位长度为1个比特位，如果帧被MAC层保护，安全使能子字段应设置为1，否则应设置为0。只有安全使能子字段应设置为1时，辅助安全头字段才生效。

7.2.1.1.3 帧未处理子字段

帧未处理子字段位长度为 1 个比特位，如果发送帧的设备有更多的数据要发送到接收方，该字段应设置为 1。否则，该字段应设置为 0。（见 7.5.6.3 节）

帧未处理子字段仅在下面两种情况下使用，（1）在支持信标的 PAN 中，设备传输帧的竞争接入期间，（2）在不支持信标的 PAN 中，设备传输帧的任何时期。

在其他的时间，在传输时此位为 0，在接收时忽略此位。

7.2.1.1.4 应答请求子字段

应答请求子字段位长度为1个比特位，表示当接收到数据帧或MAC层命令帧时，接收方是否需要发送确认信息。如果该字段应设置为1，则接收方在接收到有效帧后，将发送确认帧，除非该帧已经通过三级过滤（见7.5.6.2节）。如果该字段应设置为0，接收方不需向发送方发送确认帧。

7.2.1.1.5 PAN ID 密集子字段

PAN ID 密集子字段位长度为1个比特位，表示当目的地址和源地址两者都出现时，要发送的MAC层帧是否只应包含一个 PAN 标识符字段。当目的地址和源地址两者都出现时，如果该子字段应设置为1，那么该帧只应包含目的PAN标识符字段，并且假定源PAN标识符字段与目的PAN标识符字段；如果该子字段应设置为0，那么该帧将应包含目的PAN标识符字段和源PAN标识符字段。如果目的地址和源地址只有一个出现，该子字段应设置为0，并且该帧只应包含与地址相对应的PAN标识符。如果一个地址都不出现，该子字段应设置为0，并且不应包含PAN标识符字段。

7.2.1.1.6 目的寻址模式子字段

目的寻址模式子字段位长度为 2 个比特位，并应设置为表 80 中列出的一个非保留值。

表 80 — 目的/源寻址模式子字段可能的值

寻址模式值 $b_1 b_0$	描述
00	PAN 标识符和地址子字段不出现
01	保留
10	地址子字段应包含 16 位，短地址码
11	地址子字段应包含 64 位，扩展地址码

如果该子字段等于 0，而帧类型子字段又不指定该帧为确认帧还是信标帧，那么源寻址模式子字段必须为非 0 值，表明该帧指向在源 PAN 标识符字段中指定的 PAN 的协调器。

7.2.1.1.7 帧版本子字段

帧版本子字段位长度为 2 个比特位，指定帧相应的版本号。
该子字段应设置为 0x00 时，表明该帧与 IEEE Std 802.15.4_2003 版本兼容；该子字段应设置为 0x01 时，表明该帧为 IEEE Std 802.15.4_2006 版本。其它的值留作以后用，帧兼容性的详细资料见 7.2.3 节。

7.2.1.1.8 源寻址模式子字段

源寻址模式子字段位长度为 2 个比特位，并应设置为表 80 中列出的一个非保留值。
如果该子字段等于 0，而帧类型子字段又不指定该帧为确认帧，那么目的寻址模式子字段必须为非 0 值，表明该帧来自在目的 PAN 标识符字段中指定的 PAN 的协调器。

7.2.1.2 序列号字段

序列号字段长度为 8 个比特位，为 MAC 层帧的唯一的序列标识符。
对于信标帧，此字段应设置为信标帧序列号（BSN）值。对于数据帧，确认帧或 MAC 层命令帧，该字段指定了一个数据序列号（DSN），**用来使确认帧与数据帧或 MAC 层命令帧相匹配。**

7.2.1.3 目的 PAN 标识符字段

当目的 PAN 标识符字段出现时，它长度为 16 个比特位，指定接收该帧信息的唯一的 PAN 的标识符。PAN 的标识符值为 0xffff 代表以广播方式传播，这时，对当前监听该信道的所有设备都有效。
只有在帧控制字段的寻址模式子字段应设置为非 0 时，此字段才存在于 MAC 层帧中。

7.2.1.4 目的地址子字段

当目的地址子字段**出现时**，**它长度**为 16 个比特位或 64 个比特位，其长度由

帧控制字段的寻址模式子字段的值来限定，该地址为接收设备的地址（见 7.2.1.1.6 节）。该值为 0xffff 时，代表短的广播地址，此广播地址对所有当前监听该信道的设备都有效。

只有在帧控制字段的寻址模式字段应设置为非 0 时，此字段才存在于 MAC 层帧中。

7.2.1.5 源 PAN 标识符子字段

当源 PAN 标识符字段出现时，它长度为 16 个比特位，代表帧发送方的唯一的 PAN 标识符。只有在帧控制字段的源寻址模式字段应设置为非 0 和 PANID 密集子字段应设置为 0 时，此字段才存在于 MAC 层帧中。

设备的 PAN 标识符在个域网建立时确定，若在个域网中 PAN 标识符发生冲突后，可对它进行改变。（见 7.5.2.2 节）。

7.2.1.6 源地址子字段

当源地址子字段出现时，它长度为 16 个比特位或 64 个比特位，其长度由帧控制字段的源寻址模式子字段的值来限定，该地址为发送方的设备地址（见 7.2.1.1.8 节）。只有在帧控制字段的源寻址模式字段应设置为非 0 时，此字段才存在于 MAC 层帧中。

7.2.1.7 辅助安全头子字段

辅助安全头子字段的长度是可变的，表明安全处理所必需的信息，包括帧是如何被保护的（安全等级）和使用 MAC 安全个域网信息数据库中的何种密钥材料（见 7.6.1 节）。只有在安全使能子字段应设置为 1 时，此字段才存在于 MAC 层帧中。该字段格式的详细资料见 7.6.2 节。

7.2.1.8 帧载荷子字段

帧载荷子字段长度是可变的，不同的帧类型应包含不同的信息。如果帧控制字段的的安全使能子字段应设置为 1，则将采用相应的安全加密方案对帧载荷进行保护。

7.2.1.9 帧校验序列子字段

帧校验序列（FCS）子字段长度为 16 个比特位，应包含 16 位的 ITU-T 循环冗余码（CRC）。FCS 由 MAC 层帧头和 MAC 层帧的载荷部分计算得到。

FCS 由下面的 16 次多项式标准发生器生成：

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (12)$$

FCS 生成算法如下：

—令 $M(x) = b_0x^{k-1} + b_1x^{k-2} + \dots + b_{k-2}x + b_{k-1}$ 表示待计算校验和的序列；

— $M(x)$ 乘以 x^{16} ，得到多项式 $x^{16} \times M(x)$ ；

—对发生器多项式 $G_{16}(x)$ ，进行模 2 除以 $x^{16} \times M(x)$ 运算，得余式 $R(x) = r_0x^{15} + r_1x^{14} + \dots + r_{14}x + r_{15}$ ；

—余式 $R(x)$ 的系数即是 FCS 字段的值。

这里，把二进制多项式以位串形式表示，in highest polynomial degree first order。

例：一个没有载荷，MAC 层帧头为 3 字节的确认帧：

0100 0000 0000 0000 0101 0110

b_0 b_{23} 【最左边的位 (b_0) 最先发送】

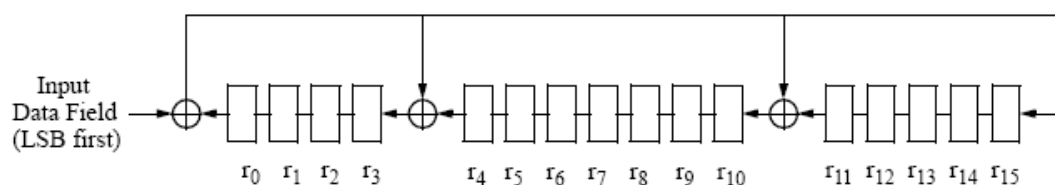
经计算得 FCS 为：

0010 0111 1001 1110

r_0 r_{15} 【最左边位 (r_0) 最先发送】

图 43 描述了一个典型的 FCS 生成框图。

CRC-16 发生器多项式： $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$



1. 初始化：(r_0 到 r_{15}) 寄存器应设置为 0；
2. 按低到高，将 MAC 层帧头和载荷依次移入 FCS 序列生成器(LSB 最先)；
3. 当数据的最后一位移入后，寄存器的值即为 FCS 码；
4. 得到的 FCS 码按 r_0 在前，附加在数据后。

图 43— 典型的 FCS 生成框图

7.2.2 不同类型帧的结构

本标准定义了 4 种帧类型：信标帧，数据帧，确认帧和 MAC 层命令帧。这 4 种帧分别在 7.2.2.1 至 7.2.2.4 中讨论。

7.2.2.1 信标帧结构

信标帧结构，如图 44。

字节 2	1	4/10	0/5/6/10/14	2	变量	变量	变量	2
帧控制	序列号	地址子字段	辅助安全头	超帧规范	GTS 字段	未处理地址子字段	信标帧载荷	帧校验序列
MAC 层帧头				MAC 层载荷				MAC 层帧尾

图 44 — 信标帧结构

GTS 字段格式，如图 45；

字节 1	0/1	变量
保护时隙描述	GTS 定向	GTS 列表

图 45 — GTS 信息字段结构

未处理地址子字段格式，如图 46。

字节 1	变量
未处理地址规范	地址列表

图 46 — 未处理地址信息字段结构

信标帧字段的结构次序和图 41 中的通用 MAC 层帧相一致。

7.2.2.1.1 信标帧 MAC 层帧头字段

信标帧的 MAC 层帧头字段应包含帧控制字段，序列号子字段，源 PAN 标识符子字段和源地址子字段。

在帧控制字段中，帧类型字段取表 79 所列的值，和源寻址模式子字段应设置为相应的发送信标帧的协调器地址。如果信标帧使用安全机制，安全使能子字段应设置为 1。如果安全使能子字段应设置为 1，帧版本子字段应设置为 1。如果有一个广播方式的数据帧或命令帧是未处理的，帧未处理子字段应设置为 1。所有其他子字段应设置为 0，在接收时忽略。

序列号字段应包含 macBSN 值，即为当前 MAC 层的信标序号。

地址子字段仅应包含源地址子字段。源 PAN 标识符和源地址子字段分别应包含发送信标帧设备的 PAN 标识符和地址。

如果辅助安全头字段出现，它将应包含 7.2.1.7 节中指定的信标帧安全处理的必需信息。

7.2.2.1.2 超帧描述字段

超帧规范子字段长度为 16 个比特位，格式如图 47 所示。

位 0-3	4-7	8-11	12	13	14	15
信标序列	超帧序列	最终的 CAP 时隙	电池受命扩展	保留	PAN 协调器	连接允许

图 47 — 超帧描述字段的结构

信标帧序列子字段长度为 4 个比特位，用来指定信标帧的传输间隔。信标帧序列和帧间间隔之间的关系在 7.5.1.1 节描述。

超帧序列子字段长度为 4 个比特位，指定了超帧为激活状态的时间段（如接收机接收期间），该时段包括信标帧的传输时间。超帧序列和帧间间隔之间的关系在 7.5.1.1 节描述。

最终的 CAP 时隙子字段长度为 4 个比特位，指定了竞争接入期（CAP）所使用的最终超帧时隙。此子字段所暗示的竞争接入期的持续时间，大于或等于 *aMinCAPLength* 所指定的值。在为了满足执行保护时隙维护需要的情况下，可适当地暂时增加信标帧的长度。（见 7.2.2.1.3 节）。

电池寿命扩展子字段长度为 1 个比特位，在信标的帧间隔期（IFS）后，如果要求在竞争接入期中传输的信标帧在第 *macBattLifeExtPeriods* 个完整退避期时活该时间之前开始传输的话，那么此子字段应设置为 1。否则，此子字段应设置为 0。

PAN 协调器子字段长度为 1 个比特位，如果信标帧由 PAN 协调器传输，则此职应设置为 1。否则，PAN 协调器子字段应设置为 0。

连接允许子字段长度为 1 个比特位，如果 *macAssocaitionOermit* 为 TRUE（即协调器接受 PAN 范围内设备的连接），则此子字段应设置为 1。如果协调器当前不接收自身网络内的连接请求，则此子字段应设置为 0。

7.2.2.1.3 保护时隙描述字段

保护时隙描述字段应设置为 8 比特，其格式如图 48 所示。

位 0-2	3-6	7
GTS 描述符计数	保留	GTS 许可

图 48 — 保护时隙描述字段的结构

GTS 描述符计数子字段长度为 3 个比特位，指定了应包含在信标帧内的 GTS 列表字段中 3 字节的 GTS 描述符的个数。如果该子字段的值大于 0，则允许竞争接入期的大小可临时调到低于 *aMinCAPLength* 值，以便适应信标帧的长度暂时地增大。如果该子字段值为 0，则 GTS 定向字段和 GTS 列表字段不存在。

GTS 允许子字段长度为 1 个比特位，如果 *macGTSPermit* 为 TRUE（PAN 协调器接收 GTS 请求），则此子字段应设置为 1，否则，应设置为 0。

7.2.2.1.4 GTS 定向字段

GTS 定向字段长度为 8 个比特位，其格式如图 49 所示。

GTS 定向掩码子字段长度为 7 个比特位，用来指定超帧中 GTS 的方向。掩码的最低位对应于信标帧 GTS 列表字段中的第一个 GTS 的方向，掩码其余位依次与列表其他 GTS 相对应。如果仅接收保护时隙，则相应的位置 1；或如果 GTS 仅发送保护时隙，则相应的位置 0。GTS 的定向与设备传输数据帧的方向有关。

位 0-6	7
GTS 定向掩码	保留

图 49 — GTS 定向字段的结构

7.2.2.1.5 GTS 列表字段

GTS 列表字段的大小由信标帧的保护时隙描述字段所给定的值来决定，它应包含了 GTS 描述符列表，该表说明了要维护的保护时隙，GTS 描述符的最大数为 7 个。

每个 GTS 描述符长度为 24 个比特位，其格式如图 50 所示。

位 0-15	16-19	20-23
设备短地址码	GTS 起始时隙	GTS 长度

图 50 — GTS 描述符的结构

设备短地址码子字段长度为 16 个比特位，为设备的短地址码，该短地址码为 GTS 描述符所使用的地址。

GTS 起始时隙子字段长度为 4 个比特位，指定了在超帧内 GTS 的起始时隙位置。

GTS 长度子字段长度为 4 个比特位，该子字段指定了连续超帧时隙的数目，在这期间，保护时隙处于激活状态。

7.2.2.1.6 未处理地址描述字段

未处理地址描述字段格式如图 51 所示。

位 0-2	3	4-6	7
未处理短地址码个数	保留	未处理扩展地址码数	保留

图 51 一未处理地址描述字段的结构

未处理短地址码个数子字段长度为 3 个比特位，指示应包含在信标帧的地址列表字段内的短地址码个数。

未处理扩展地址码子字段长度为 3 个比特位，指示应包含在信标帧的地址列表字段内的 64 位扩展地址码个数。

7.2.2.1.7 地址列表字段

地址列表字段的大小由信标帧内未处理地址描述字段的值指定。它应包含了当前那些需要与协调器传输未处理或等待消息的设备的地址列表。地址列表不包括广播短地址码 0xffff。

未处理地址的最大数量为 7 个，包括短地址码和扩展地址码。在地址列表中，所有的短地址码排在扩展地址码之前。如果协调器能存储多达 7 个事务，那么它将遵循先到先服务三原则，确保信标帧应包含最多 7 个地址。

7.2.2.1.8 信标帧载荷字段

信标帧载荷字段是一个可变序列，其最大长度为 aMaxBeaconPayloadLength 个字节，其内容来源于 MAC 层的上层。应包含 aMaxBeaconPayloadLength 中的一组字节信息存入该子字段。

7.2.2.2 数据帧结构

数据帧格式，如图 52。

字节 2	1	见 7.2.2.2.1 节	0/5/6/10/14	变量	2
帧控制	序列号	地址字段	辅助安全头	数据载荷	帧校验序列
MAC 层帧头				MAC 层载荷	MAC 层帧尾

图 52 一数据帧结构

数据帧的结构顺序与图 41 所示的通用 MAC 层帧结构一致。

7.2.2.2.1 数据帧 MAC 层帧头字段

数据帧的 MAC 层帧头字段包括帧控制字段，序列号子字段，目的 PAN 标识符/地址子字段和/或源 PAN 标识符/地址子字段。

在帧控制字段中，帧类型子字段取表 79 所列的值，用来表明该帧为数据帧。如果该数据帧使用安全机制，安全使能子字段应设置为 1。如果帧安全使能子字段应设置为 1 或 MAC 层载荷字段大于 aMaxMACSafePayloadSize，那么帧版本子字段将置 1。其他所有子字段应设置为与数据帧配置相对应的值。所有保留子字段应设置为 0，在接收时忽略。

序列号字段应包含当前 macDSN 的值。

地址子字段应包含目的地址子字段和/或源地址子字段，它们取决于帧控制字

段的设置。

如果辅助安全头字段出现，它将应包含 7.2.1.7 节中指定的数据帧安全处理的必需信息。

7.2.2.2.2 数据载荷字段

数据帧载荷字段应包含有上层要求 MAC 层传输的一组数据字节。

7.2.2.3 确认帧结构

确认帧结构如图 53 所示。

字节 2	1	2
帧控制	序列号	帧校验序列
MAC 层帧头		MAC 层帧尾

图 46 一确认帧结构

确认帧的结构顺序与图 41 所示的通用 MAC 层帧结构一致。

7.2.2.3.1 确认帧 MAC 层帧头字段

确认帧的 MAC 层帧头字段仅包括帧控制字段和序列号字段。

在帧控制字段中，帧类型子字段取表79所列的值，用来表明该帧为确认帧。如果设备为了一个接收到的数据请求命令而发送确认帧，则该设备便可确定是否有给接收设备的未处理数据。如果设备在发送确认帧之前能够确定是否有未处理数据（见7.5.6.4.2节），那么就可根据其结果设置帧未处理子字段。否则，将帧未处理子字段应设置为1。如果确认帧是为了响应数据帧或其他类型的MAC层命令帧，则未处理子字段应设置为0。所有其他子字段均应设置为0，在接收时忽略这些子字段。

序列号字段应设置为接收到的有确认要求的帧序列号。

7.2.2.4 MAC 层命令帧结构

MAC 层命令帧格式，如图 54。

字节 2	1	见 7.2.2.4.1 节	0/5/6/10/14	1	变量	2
帧控制	序列号	地址子字段	辅助安全头	命令帧标识符	命令帧载荷	帧校验序列
MAC 层帧头				MAC 层载荷		MAC 层帧尾

图 54 一MAC 层命令帧结构

MAC 层命令帧序列列表字段和通用 MAC 层帧序列一致，在图 41 给出。

7.2.2.4.1 MAC 层命令帧 MAC 层帧头字段

MAC 层命令帧的 MAC 层帧头字段应包含帧控制字段，序列号字段，目的 PAN 标识符/地址子字段和/或源 PAN 标识符/地址子字段。

在帧控制字段中，帧类型子字段取表79所列的值，用来表明该帧为命令帧。如果该帧要求使用安全机制，则帧控制字段的安全使能子字段应设置为1，并且

按照7.5.8.1.3节中描述的方法进行安全处理。否则，安全使能子字段应设置为0。其他所有的子字段应设置为与MAC层命令帧所使用的配置相应的值。所有保留子字段应设置为0，在接受时忽略这些子字段。

序列号字段应设置为当前 *macDSN* 的值。

地址子字段应包含目的地址子字段和/或源地址子字段，其取值由帧控制字段的配置所确定。

如果辅助安全头字段出现，它将应包含 7.2.1.7 节中指定的命令帧安全处理的必需信息。

7.2.2.4.2 命令帧标识符字段

命令帧标识符字段表示所用到的 MAC 命令。其值为表 82 中所示的一个非保留值。

7.2.2.4.3 命令载荷字段

命令载荷字段应包含 MAC 命令自身。单独的命令帧格式将在 7.3 节中详细描述。

7.2.3 帧的兼容性

在该标准里的所有没有使用安全机制的帧与 IEEE Std 802.05.4-2003 中没有使用安全机制的帧是兼容的，有两点例外：有信道页（Channel Page）字段出现的协调器重新配置命令帧（见 7.3.8 节）和 MAC 层载荷字段大于 *MaxMACSafePayloadSize* 个字节的所有帧。

安全帧的兼容性在表 81 中列出，表明了两个标准的安全操作模式。

表81—IEEE Std 802.05.4-2003和2006的帧兼容性

帧控制字段应设置为分配		功能性
安全使能位 b3	帧版本位 b13 b12	
0	00	不使用安全机制。IEEE Std 802.05.4-2003 和 2006 中的帧是兼容的
0	01	不使用安全机制。IEEE Std 802.05.4-2003和2006 中的帧是不兼容的
1	00	使用2003标准的安全机制。IEEE Std 802.05.4-2006不能支持此类帧
1	01	使用2006标准的安全机制。

7.3 MAC 层命令帧

MAC层定义的命令帧如表82所列。完整功能设备能够发送和接收所有类型的命令帧（GTS请求命令除外），而对于简化功能设备来说，所执行的命令帧将有所限制，在表82中给出了其相应的说明。对于支持信标的个域网，MAC命令

只能在竞争接入期间发送；而在不支持信标的个域网中，MAC层命令则可在任何时间发送。

下面的详细介绍了 MAC 层管理实体如何建立一个发送命令的过程。MAC 命令的接收将遵循 7.5.6.2 节描述的接收过程。

表 82 — MAC 层命令帧

命令帧标识符	命令名	RFD		小节
		Tx	Rx	
0x01	连接请求	X		7.3.1
0x02	连接响应		X	7.3.2
0x03	断开连接通告	X	X	7.3.3
0x04	数据请求	X		7.3.4
0x05	PAN ID 冲突通告	X		7.3.5
0x06	孤立通知	X		7.3.6
0x07	信标帧请求			7.3.7
0x08	协调器重新调整		X	7.3.8
0x09	GTS 请求			7.3.9
0x0a—0x0f	保留			——

7.3.1 连接请求命令

连接请求命令允许设备通过PAN协调器或协调器请求和PAN连接。

该命令只能由没有连接，但希望连接到个域网的设备发出。设备只能连接到所允许连接的个域网中，是否允许连接，将在扫描过程中决定。

尽管不需要简化功能设备能够接收这一命令，但所有的设备都应该能够发送该命令。

连接请求命令的格式如图 55 所示。

字节（见 7.2.2.4 节）	1	1
MAC 层帧头字段	命令帧标识符（见表 82）	性能信息

图 55 — 连接请求命令的格式

7.3.1.1 MAC 层帧头字段

帧控制字段的源寻址模式子字段应设置为 3（即为 64 位扩展寻址）。目的寻址模式子字段应设置为与连接请求命令中所指的信标帧中的寻址模式相同。

帧控制字段的帧未处理子字段应设置为 0，在接收帧时将忽略该子字段信息，应答请求子字段应设置为 1。

目的 PAN 标识符子字段应包含欲接入的 PAN 标识符。目的地址子字段应包含从协调器发送的信标帧中得到的地址，该协调器就是发送连接请求命令的目标协调器。源 PAN 标识符子字段应包含广播 PAN 标识符（0xffff）。源地址子字段应包含 *aExtendedAddress* 的值。

7.3.1.2 性能信息字段

性能信息字段的格式如图 56 所示。

位 0	1	2	3	4—5	6	7
备用 PAN 协调器	设备类型	电源	空闲时接收机开启	保留	安全性能	分配地址

图 56 一性能信息字段结构

备用 PAN 协调器子字段长度为 1 个比特位，如果设备有成为 PAN 协调器的能力，则该位应设置为 1；否则，该位应设置为 0。

设备类型子字段长度为 1 个比特位，如果该设备是完整功能设备，则该位应设置为 1。否则，该位应设置为 0，表示该设备为简化功能设备。

电源子字段长度为 1 个比特位，如果设备采用交流电源，则该位应设置为 1；否则，该位应设置为 0。

空闲时接收机开启子字段长度为 1 个比特位，如果设备不打算在空闲期间关闭接收机来节省能量，则该位应设置为 1；否则，该位应设置为 0。

安全性能子字段长度为 1 个比特位，如果该设备有能力采用如 7.5.8.2 节中所介绍的安全方案发送和接收 MAC 层帧，则该位应设置为 1；否则，该位应设置为 0。

分配地址子字段长度为 1 个比特位，如果该设备希望在接入过程中由协调器分配一个短地址码，则该位应设置为 1。否则，该位应设置为 0。

7.3.2 连接响应命令

作为对连接请求的应答，允许 PAN 协调器或协调器通过连接响应命令与发送连接请求命令的设备进行通信。

该命令只能由 PAN 协调器或协调器发送给当前试图连接的设备。

尽管简化功能设备不能发送这个命令，但所有的设备都应该能够接收该命令。

连接响应命令的格式如图 57 所示。

字节(见 7.2.2.4 节)	1	2	1
MAC 层帧头字段	命令帧标识符(见表 82)	短地址码	连接状态

图 57 一连接响应命令的格式

7.3.2.1 MAC 层帧头字段

帧控制字段中的目的寻址模式和源寻址模式子字段均应设置为 3(即 64 位扩展寻址)。

帧控制字段的帧未处理子字段应设置为 0，在接收时忽略该子字段；同时应答请求子字段应设置为 1。

帧控制字段的 PAN ID 密集子字段应设置为 1。与 PAN ID 密集子字段的值一致，目的 PAN 标识符字段应包含 *macPANId* 的值，而省略源地址 PAN 标识符字段。目的地址子字段应包含设备请求连接的扩展地址码。源地址子字段应包含 *aExtendedAddress* 的值。

7.3.2.2 短地址码子字段

如果协调器不能将发送请求的设备接入个域网，则该子字段应设置为 0xffff，并在连接状态子字段中应包含失败原因的信息。如果协调器能够将设备接入其个域网，则该子字段应包含该设备在个域网中通信所使用的短地址码，该设备将一直使用这个短地址码，直到该设备与所连接的个域网断连接。

如短地址码子字段值等于 0xfffe，则表示设备已经成功地接入了个域网；但是还没有给该设备分配一个短地址码。在这种情况下，该设备在个域网中的通信，需要使用 64 位扩展地址码。

7.3.2.3 连接状态字段

连接状态字段取值为表 83 中所示的非保留值之一。

表 83 — 连接状态字段的有效值

连接状态	描述
0x00	连接成功
0x01	PAN 正在接受
0x02	PAN 拒绝访问
0x03—0x7f	保留
0x80—0xff	为 MAC 原语枚举值保留

7.3.3 断开连接通告命令

PAN 协调器、协调器或连接设备都可发送断开连接通告命令。所有设备将执行该命令。

断开连接通告命令格式，在图 58 描述。

字节（见 7.2.2.4 节）	1	1
MAC 层帧头字段	命令帧标识符（见表 82）	断开连接的原因

图 58 — 断开连接通告命令的格式

7.3.3.1 MAC 层帧头字段

帧控制字段的寻址模式子字段按照相应的原语指定的寻址模式设置。源寻址模式子字段应设置为 3（即 64 位扩展寻址）。

帧控制字段的帧未处理子字段应设置为 0，在接收时忽略该子字段；应答请求子字段应设置为 1。

帧控制字段的 PAN ID 密集子字段应设置为 1。为了与 PAN ID 密集子字段相一致，目的 PAN 标识符子字段应包含 *macPANId* 的值，而忽略源 PAN 标识符子字段。如果协调器需要让已连接的设备与 PAN 断开，目的地址子字段应包含正在从 PAN 断开连接的设备的扩展地址码。如果已经连接的设备想要与 PAN 断开，若目的寻址模式子字段应设置为 2，则目的地址子字段应包含 *macCoordExtendedAddress* 的值；若目的寻址模式子字段应设置为 3，则目的地址子字段应包含 *macCoordExtendedAddress* 的值。两种情况下，源地址子字段都应包含 *aExtendedAddressd* 的值。

7.3.3.2 断开连接原因字段

断开连接原因字段应包含如表 84 中列出的非保留值之一。

表 84 — 断开连接原因的有效值

断开原因	描述
0x00	保留
0x01	协调器希望设备与 PAN 断开
0x02	设备希望与 PAN 断开
0x03—0x7f	保留
0x80—0xff	为 MAC 原语枚举值保留

7.3.4 数据请求命令

数据请求命令由设备发送，用于从 PAN 协调器或协调器请求数据。

数据请求命令的发送有三种情况。(1) 在一个支持信标帧的PAN中，当 `macAutoRequest` 为 `TRUE`，并且从PAN的协调器发出的信标帧中，设备收到表示协调器中有自己的未处理数据时，发出该请求命令。协调器通过在信标帧地址列表字段中加入接收此数据的设备的地址来表示该设备的未处理数据；(2) 当设备的MAC层接收到上层发送来的 `MLME-POLL.request` 原语时，设备的MAC层也发送该请求命令；(3) 设备对一个请求命令确认应答后，再等待 `aReponseWaitTime` 符号后，也可能向协调器发送该请求命令。

尽管简化功能设备不需要能够接收这个命令，但所有的设备都应该能够发送该命令。

数据请求命令格式如图 59 所示。

字节（见 7.2.2.4 节）	1
MAC 层帧头字段	命令帧标识符（见表 82）

图 59 一数据请求命令的格式

如果数据请求命令是用来响应接收的一个信标帧，在这个信标帧中表明有该设备的未处理的数据，那么帧控制字段的寻址模式子字段应设置为0（即目的地址信息不存在）。如果信标帧在其超帧描述字段（见7.2.2.1.2节）中指出信标帧来自PAN协调器（见7.2.1.1.6节），那么根据数据请求命令的目的协调器进行设置。如果目的地址信息应包含在内，目的寻址模式子字段将根据 `macCoordShortAddress` 的值设置：如果 `macCoordShortAddress` 的值等于 `0xffff`，则使用扩展地址码：目的寻址模式子字段应设置为3，并且目的地址子字段应包含 `macCoordExtendedAddress` 的值。否则，使用短地址码：目的寻址模式子字段应设置为2，并且目的地址子字段应包含 `macCoordShortAddress` 的值。

如果数据请求命令是用来响应接收的一个信标帧，在这个信标帧中表明有该设备的未处理的数据，那么源寻址模式子字段将根据未处理数据地址的寻址模式设置。如果源寻址模式子字段应设置为2，则使用短地址码：源地址字段应包含 `macShortAddress` 的值。否则，将使用扩展地址码：源寻址模式子字段应设置为3，源地址字段应包含 `aExtendedAddress` 的值。

如果由于接收到来自上层的 `MLME-POLL.request` 原语而发送数据请求命令，目的地址信息应与该原语中的地址信息相同。源寻址模式子字段根据 `macShortAddress` 的值设置，如果 `macShortAddress` 的值小于 `0xffff`，则使用短地址码；否则，将用扩展地址码。

如果在连接请求命令确认之后发送数据请求命令，帧控制字段的寻址模式子字段根据数据请求命令的目的协调器设置。如果 `macCoordShortAddress` 的值等于 `0xffff`，则使用扩展地址码，否则使用短地址码。源寻址模式子字段都将使用扩展地址码。

如果目的寻址模式子字段应设置为0（即目的地址信息不存在），帧控制字段的PAN ID密集子字段应设置为0，源PAN标识符应包含 `macPANId` 的值。否则，PAN密集子字段应设置为1。这种情况下，为了与PAN ID密集子字段相一致，目的PAN标识符字段应包含 `macPANId` 的值，而源PAN标识符字段省略。

帧控制字段的未处理子字段应设置为0，在接收时忽略此子字段，应答请求

子字段应设置为0。

7.3.5 PAN ID 冲突通告命令

当设备检测到 PAN 标识符冲突时，将向 PAN 协调器发送 PAN ID 冲突通告命令。

尽管简化功能设备不需要能够接收这个命令，但所有的设备都应该能够发送该命令。

PAN ID 冲突通告命令的格式如图 60 所示。

字节 23（见 7.2.2.4 节）	1
MAC 层帧头字段	命令帧标识符（见表 82）

图 60 — PAN ID 冲突通告命令的格式

帧控制字段的源寻址模式和源寻址模式子字段都应设置为 3（即 64 位扩展寻址）。

帧控制字段的帧未处理子字段应设置为 0，在接收时忽略该子字段，应答请求子字段应设置为 1。

帧控制字段的 PAN ID 密集子字段应设置为 1。为了与 PAN ID 密集子字段的值相一致，目的 PAN 标识符字段应包含 *macPANId* 的值，而源 PAN 标识符字段将省略。目的地址子字段应包含 *macCoordExtendedAddress* 值。源地址子字段应包含 *aExtendedAddress* 值。

7.3.6 孤立通告命令

当已经与 PAN 连接的设备发现与协调器失去同步时，将立即发送孤立通告命令。

尽管简化功能设备不需要能够接收这个命令，但所有的设备都应该能够发送该命令。

孤立通告命令的格式如图 61 所示。

字节（见 7.2.2.4 节）	1
MAC 层帧头字段	命令帧标识符（见表 82）

图 61 — 孤立通告命令的格式

帧控制字段的源寻址模式子字段应设置为 3（即 64 位扩展寻址）。目的寻址模式子字段应设置为 2（即 16 位短寻址）。

帧控制字段的帧未处理和应答请求子字段应设置为 0，在接收时将忽略它们。

帧控制字段的 PAN ID 密集子字段应设置为 1。为了与 PAN ID 密集子字段的值相一致，目的 PAN 标识符字段应包含广播 PAN 标识符的值（0xffff），而源 PAN 标识符字段将省略。目的地址子字段应包含广播短地址码（0xffff），源地址子字段应包含 *aExtendedAddress* 值。

7.3.7 信标帧请求命令

在主动扫描期间，设备用信标帧请求命令来**确定在它的个字段工作范围内的**

所有的协调器。

本命令对于简化功能设备是可选的。
信标帧请求命令的格式如图 62 所示。

字节 7	1
MAC 层帧头字段	命令帧标识符（见表 82）

图 62 — 信标帧请求命令的格式

帧控制字段的寻址模式子字段应设置为 2（即 16 位短寻址），源寻址模式子字段应设置为 0（即源地址信息不存在）。

帧控制字段的帧未处理子字段应设置为 0，在接收时忽略该帧；应答请求子字段和安全使能子字段也应设置为 0。

目的 PAN 标识符子字段应包含广播 PAN 标识符（0xffff）。目的地址子字段应包含广播短地址码（0xffff）。

7.3.8 协调器重新同步命令

在 PAN 协调器或协调器接收到来自设备发送的孤立通告命令，或者当收到 MLME-START.request 原语后这个协调器的配置属性发生任何改变时，协调器将发送重新同步命令。

如果协调器接收到一个孤立通告命令，它将直接发送重新同步命令给孤立设备。如果在 PAN 配置属性（如，PAN 标识符或逻辑信道）发生变化时，协调器将以广播方式向目前具有接收能力的所有设备发送该命令。

尽管简化功能设备不需要能够发送这个命令，但所有的设备都应该能够接收该命令。

协调器重新同步命令的格式如图 63 所示。

字节 17/18/23/24	1	2	2	1	2	0/1
MAC 层帧头 字段	命令帧标识 符（见表 82）	PAN 标识 符	协调器短地 址码	逻辑信道	短地址码	信道页

图 63 — 协调器重新同步命令的格式

7.3.8.1 MAC 层帧头字段

如果该命令是直接发送给孤立设备的，则目的寻址模式子字段应设置为 3（即 64 位扩展寻址）；如果以广播方式发送给 PAN 的所有设备，则此子字段应设置为 2（即 16 位短寻址）。帧控制字段的源寻址模式子字段应设置为 3（即 64 位扩展寻址）。

帧控制字段的帧未处理子字段应设置为 0，并在接收时忽略该子字段。

如果该命令是直接发送给孤立设备的，则帧控制字段的应答请求子字段应设置为 1；如果以广播方式发送给 PAN 的所有设备，则此子字段应设置为 0。

如果信道页子字段存在，则帧版本子字段应设置为 0x01。否则按 7.2.3 节中的描述设置。

目的 PAN 标识符字段应包含广播 PAN 标识符（0xffff）。如果该命令是直接发送给孤立设备的，则目的地址子字段应包含孤立设备的扩展地址码。否则，目的地址子字段应包含广播短地址码（0xffff）。源 PAN 标识符字段应包含 *macPANId*

值，同时源地址子字段应包含 *aExtendedAddress* 值。

7.3.8.2 PAN 标识符字段

PAN 标识符字段应包含协调器在未来通信中所使用的 PAN 标识符。

7.3.8.3 协调器短地址码子字段

协调器短地址码子字段应包含 *macShortAddress* 值。

7.3.8.4 逻辑信道字段

逻辑信道字段应包含协调器在未来通信中所使用的逻辑信道。

7.3.8.5 短地址码子字段

如果协调器以广播方式向 PAN 设备发送重新同步命令，则该子字段应设置为 0xffff 在接收时忽略该子字段。

如果协调器直接向孤立设备发送重新同步命令，则该子字段应包含该孤立设备在 PAN 中工作时所使用的短地址码。如果由于该设备总是使用 64 位扩展地址码，则该设备没有短地址码，则此子字段应包含值 0xfffe。

7.3.8.9 信道页字段

信道页字段应包含协调器在未来通信中所使用的的信道页。如果信道页与先前的信道页相同，则省略该字段。

7.3.9 GTS 请求命令

GTS 请求命令用来管理保护时隙。设备可以使用该命令请求分配一个新的保护时隙或者解除已经存在的保护时隙。只有使用小于 0xfffe 的 16 位短地址码的设备能够发送该命令。

此命令是可选的。

GTS 请求命令的格式如图 64 所示。

字节 7	1	1
MAC 层帧头字段	命令帧标识符（见表 82）	GTS 特性

图 64 — GTS 请求命令的格式

7.3.9.1 MAC 层帧头字段

帧控制字段的寻址模式子字段应设置为 0（即目的地址信息不存在），源寻址模式子字段应设置为 2（即 16 位短寻址）。

帧控制字段的帧未处理子字段应设置为 0 并在接收时忽略，应答请求子字段应设置为 1。

源 PAN 标识符应包含 *macPANId* 值，源地址子字段应包含 *macShortAddress* 值。

7.3.9.2 GTS 特征字段

GTS 特征字段的格式在图 65 给出。

位 0—3	4	5	6—7
GTS 长度	GTS 方向	特征类型	保留

图 58 — GTS 特征结构

GTS 长度子字段应包含正在为 GTS 请求的超帧时隙的数目。

如果 GTS 是一个只接收的 GTS，GTS 方向子字段应设置为 1。相反，如果 GTS 是一个只发送的 GTS，则此子字段应设置为 0。GTS 的方向与设备发送数据帧的方向有关。

如果特性涉及 GTS 分配，则特性类型字段应设置为 1；或如果特性涉及清除

GTS 分配，则设置为 0。

7.4 MAC 常量和 PIB 属性

本节详细描述了 MAC 层的常量和属性。

7.4.1 MAC 常量

所定义的 MAC 层特性的常量如表 85 所示。

表 85 MAC 常量

常量	描述	值
aBaseSlotDuration	当超帧序列为 0 时(见 7.5.1.1 节), 组成超帧的时隙符号数。	60
aBaseSuperframeDuration	当超帧序列为 0 时, 组成超帧的符号数	aBaseSlotDuration* aNumsuperframeSlots
aExtendedAddress	分配给设备的 64 位 (IEEE)地址	由设备确定
aGTSDescPersistenceTime	PAN 协调器的信标帧中存在的 GTS 标识符的超帧数	4
aMaxBeaconOverhead	MAC 层加到其信标帧有效载荷上的最大字节数	75
aMaxBeaconPayloadLength	信标有效载荷的最大字节数	<i>AMaxPHYPacketSize</i> aMaxBeaconOverhead
aMaxLastBeacons	导致接收设备的 MAC 层宣布失去同步所需要的连续丢失的信标数	4
aMaxMACSafePayloadSize	在保证不超出 aMaxPHYPacketSize 的情况下, 能够在不受保护的 MAC 帧的有效载荷字段传输的最大字节数	aMaxPHYPacketSize-aMaxMPDUUnsecuredOverhead
aMaxMACPayloadSize	能够在 MAC 有效载荷字段发送的最大字节数	aMaxPHYPacketSize-aMinMPDUOverhead
aMaxMPDUUnsecuredOverhead	不使用安全机制时, MAC 层加到 PSDU 的最大字节数	25
aMaxSIFSFrameSize	能够跟随短帧间空隙时间的 MPDU 最大长度, 以字节为单位	18
aMinCAPLength	组成 CAP 的最小符号数。	440

	当使用 GTS 时，这个最小符号数确保 MAC 层命令能够发送到设备。此外，该最小值能够满足维护 GTS 时，信标帧长度暂时增加（见 7.2.2.1.3 节）	
aMinMPDUOverhead	MAC 层加到 PSDU 的最小字节数	9
aNUMSuperframeSlots	任何超帧中包含的时隙数	16
aUnitBackoffPeriod	形成 CAMS—CA 算法所使用的基本时间段的符号数	20

7.4.2 MAC 层 PIB 属性

MAC PIB 包含管理设备的 MAC 层所需的各项属性。这些属性在表 86 中列出。标有 (▲) 的是只读属性（即只能由 MAC 层设置的属性），可由上层使用 MLME-GET.request 原语读取。其他属性可由上层使用 MLME-GET.request 原语或者使用 MLME-SET.request 原语分别进行读或写操作。标有 (◆) 的属性，对于简化功能设备是可选的。标有 (＊) 的属性对于两种设备（即简化功能设备和完整功能设备）都是可选的。

只读属性 *macAckWaitDuration* 由一组的常量和物理层 PIB 属性共同决定。等式 (13) 给出了相关常量和属性的公式。

$$\begin{aligned}
 & \text{macAckWaitDuration} = \\
 & aUnitBackoffPeriod + aTurnaroundTime + \text{phySHRDuration} + [6 \bullet \text{phySymbolsPerOctet}] \\
 & \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

其中：

6 代表确认帧中物理层头字节数和 PSDU 中字节数之和。

macMaxFrameTotalWaitTime 属性可由上层设置，并由一组的物理层和 MAC 层 PIB 属性和常量共同决定。等式 (14) 给出了相关属性和常量的公式。

$$\begin{aligned}
 & \text{macMaxFrameTotalWaitTime} = \\
 & \left[\left(\sum_{k=0}^{m-1} 2^{\text{macMinBE}+k} \right) + (2^{\text{macMaxBE}} - 1) \bullet (\text{macMaxCSMABackoffs} - m) \right] \bullet aUnitBackoffPeriod + \text{phyMaxFrameDuration} \\
 & \dots\dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

其中：

m 表示 min(macMaxBE-macMinBE,macMaxCSMABackoffs).

表 86 MAC 层 PIB 属性

属性	标识符	类型	范围	描述	默认值
----	-----	----	----	----	-----

macAckWaitDuration▲	0x40	整型	见式 (13)	发射数据帧之后, 得到应答帧之前等待的最大的符号数。此值取决于物理层, 因为物理层决定了所选择的逻辑信道和信道页。该值为开始传输 ACK 时间与 ACK 帧的长度之和。7.5.6.4.2 节中介绍了开始时间。	取决于当前所通 的 物 理 层 , phyCurrentPage 指明
macAssociatedPANCoord	0x56	布尔型	TRUE 或 FALSE	指示设备是否通过 PAN 协调器连接到 PAN, 是则为 TRUE; 否则, 为 FALSE。	FALSE
macAssociationPermit◆	0x41	布尔型	TRUE 或 FALSE	指示协调器当前是否允许连接。允许连接则为 TRUE。	FALSE
macAutoRequest	0x42	布尔型	TRUE 或 FALSE	如果地址被列在信标帧中, 指示设备是否自动发送数据请求命令。TRUE 表示自动发送数据请求命令。此属性也影响 MLME-BEACON-NOTIFY.Indication 原语的生成	TRUE
macBattLifeExt	0x43	布尔型	TRUE 或 FALSE	电池寿命扩展标志。电池寿命扩展是通过减少 CAP 期间协调器接收机工作时间实现的。TRUE 表示启用电池寿命扩展。7.5.1.4 节介绍了此属性如何影响 CSMA-CA 算法中的退避指数。	FALSE
macBattLifeExtPeriods	0x44	整型	6-41	BLE 模式下, 信标帧 IFS 之后启动接收机使用的退避周期。 该值取决于所支持的物理层, 是以下三值之和: 1. 值 $2^x - 1$, 其中 x 为 BLE 模式下 <i>macMinBE</i> 的最大值 (等于 2)。等于 3 个退避周期。 2. 初始竞争窗口长度 (见 7.5.1.4 节) 持续时间, 等于 2 个退避周期。 3. 物理层的 SFD 字段长度和前同步码长度之和 (第 6 节中表 19 和表 20), 为退避周期的整数倍 (如果需要)。	取决于当前物 层 , phyCurrentPage 指明
macBeaconPayload◆	0x45	字节设定	---	信标载荷内容	空
macBeaconPayloadLength◆	0x46	整型	0— <i>aMaxBeaconPayloadLength</i>	信标载荷长度, 以字节为单位	0
macBeaconOrder	0x47	整型	0-15	协调器发送信标的频率。如果	15

◆				BO=15, 协调器不发送周期信标。 7.5.1.1 节解释了信标序列和信标间隔之间的关系	
macBeaconTxTime▲◆	0x48	整型	0x000000-0xffffffff	设备发送最后一个信标帧的时间, 以符号周期为单位。此值在每一个发送的信标帧内相同的符号边界处进行测量得到, 其位置随应用而定。总长度为 24 位, 精确度最小为 20 位, 最低 4 位为最低有效位。	0x000000
macBSN◆	0x49	整型	0x00-0xff	加到发送信标帧上的序列号	取值范围内的随机值
macCoordExtendedAddress	0x4a	IEEE 地址	扩展的 64 位 IEEE 地址	协调器的 64 位地址, 设备按照此地址连接	---
macCoordShortAddress	0x4b	整型	0x0000-0xffff	分配给协调器的 16 位短地址, 设备按照此地址同协调器连接。0xffffe 表示协调器只使用其 64 位扩展地址; 0xffff 表示此值未知。	0xffff
macDSN	0x4c	整型	0x00-0xff	加到发送数据或 MAC 命令帧上的序列号	取值范围内的随机值
macGTSPermit*	0x4d	布尔型	TRUE 或 FALSE	如果 PAN 协调器接受 GTS 请求, 则为 TRUE, 否则为 FALSE	TRUE
macMaxBE	0x57	整型	3-8	CSMA-CA 算法中退避指数的最大值 BE。7.5.1.4 节详细解释了退避指数。	5
macMaxCSMABackoffs	0x4e	整型	0-5	CSMA-CA 算法宣布信道访问失败之前试图访问信道的最大退避次数。	4
macMaxFrameTotalWaitTime	0x58	整型	见式 (14)	在支持信标 PAN 中, 等待数据请求帧的响应或者等待帧未决子字段设置为 1 的信标帧之后的广播帧的所用的最大 CAP 符号数, 在不支持信标 PAN 中, 等待的最大符号数。此属性只能由上层设置, 取决于 macMinBE, macMaxBE, macMaxCSMABackoffs 和每字节中的符号数。7.4.2 节给出了此属性的相关公式。	取决于当前物理层, phyCurrentPage 指明
macMaxFrameRetries	0x59	整型	0-7	发送失败后允许重传的最大次数	3
macMinBE	0x4f	整型	0-maxMaxBE	CSMA-CA 算法中退避指数的最小值 BE。7.5.1.4 节详细解释了退避指数。	3
macMinLIFSPeriod▲		整型	见条款 6 中表 3	形成一个 LIFS 周期的最少时间	取决于当前物理层,

					phyCurrentPage 指明
macMinSIFSPeriod▲		整型	见条款 6 中表 3	形成一个 SIFS 周期的最少时间	取决于当前物 层， phyCurrentPage 指明
macPANId	0x50	整型	0x0000-0x ffff	设备正在其上工作的 PAN 的 16 位标识符。若此值为 0xffff，则设备没有连接。	0xffff
macPromiscuous Mode◆	0x51	布尔 型	TRUE 或 FALSE	表示 MAC 层是否处于混杂模式（全部接收）。TRUE 表示 MAC 层接收来自 PHY 的所有帧	FALSE
macResponseWaitTime	0x5a	整型	2-64	设备在请求命令帧之后等待响应命令帧的最长时间，该时间是 aBaseSuperframeDuration 的整数倍	32
macRxOnWhenIdle	0x52	布尔 型	TRUE 或 FALSE	表示 MAC 层是否在空闲时间打开其接收机。对于支持信标的 PAN，此属性只在输入帧的 CAP 期间相关。对于不支持信标 PAN，此属性一直相关。	FALSE
macSecurityEnabled	0x5d	布尔 型	TRUE 或 FALSE	表示 MAC 层是否有安全使能功能。TRUE 表示有，FALSE 表示没有。	FALSE
macShortAddresses	0x53	整型	0x0000-0x ffff	设备在 PAN 中通信使用的 16 位地址。如果设备是 PAN 协调器，此值在 PAN 启动之前就选择好。否则此值在连接时由协调器分配。0xfffe 表示设备已经连接但还没有分配地址。0xffff 表示设备还没有短地址	0xffff
macSuperframe- Order▲◆	0x54	整型	0-15	输出超帧活动部分的长度。如果超帧序列 SO=15，则超帧在信标之后是不活动的。7.5.1.1 节解释了超帧序列和超帧持续期之间的关系	15
macSyncSymbol Offset▲	0x5b	整型	2.4GHz 物 理层 0x000-0x1 00; 868/915M Hz 物理层 0x000-0x4 00	MLME 捕捉每一个发送或接收帧时间戳的符号边界与 SFD 后开始发送第一个符号的时间（即长度字段的第一个符号）之间的偏移量，以符号为单位。	特定执行
macTimestamp- Supported▲	0x5d	布尔 型	TRUE 或 FALSE	指示 MAC 层是否支持输入和输出数据帧的可选时间戳特性	特定执行
macTransaction- PersistenceTime	0x55	整型	0x0000-0x ffff	协调器存储一次事务处理，并在信标中指示的最大时间（以单位周期为单	0x01f4

□◆				位)。 单位周期由 macBeaconOrder,BO 决定.当 $0 \leq BO \leq 14$ 时, 单位周期为 $aBaseSuperframeDuration * 2^{BO}$; 若 $BO=15$, 单位周期为 $aBaseSuperframeDuration$ 。	
----	--	--	--	---	--

7.5 MAC 功能描述

本节将给出具体的 MAC 功能描述。在 7.5.1 节中, 将介绍两种信道访问机制: 竞争机制和非竞争机制。基于竞争的访问机制存取允许设备采用 CSMA-CA 退避算法以分布式方式访问信道; 非竞争的访问机制完全由 PAN 协调器通过保护时隙来实现控制。

在 7.5.2 节中, 将描述开始和维持 PAN 的机制。设备通过信道扫描来评估信道当前的状态 (或信道), 定位它的 POS 内所有信标, 或定位已与之失去同步的信标。在形成一个新的 PAN 之前, 设备可以使用信道扫描的结果选择合适的逻辑信道和新的 PAN 标识符, 该 PAN 标识符没有被本地其他 PAN 使用。由于两个具有相同标识符的其 POS 可能相互重叠一起, 因此, 需采用一个过程来进行检测, 并解决这一问题。在信道扫描和选择适当的 PAN 标识符之后, 一个完整功能设备就可以作为 PAN 协调器, 并开始工作。本节还将介绍一个具有完整功能设备在正常工作中 (也就是没有扫描的时候) 发现其他协调器设备的方法。

在 7.5.3 节中定义允许设备加入和离开 PAN 的机制。连接过程描述了设备在什么样的条件下一个设备可加入 PAN 以及协调器允许该设备加入的必要条件。同时, 还将描述网络设备离开 PAN 的过程, 该过程可以由连接设备主动发起, 也可以由协调器主动发起。

在 7.5.4 节中, 描述设备获取并维持与协调器同步的机制。在介绍协调器如何产生信标帧之后, 描述了信标 PAN 如何维持信标同步; 同时, 介绍了在不支持信标的 PAN 中如何实现同步以及无论是在支持信标还是在不支持信标的 PAN 中的设备在失去同步后, 设备和协调器之间重新建立通信的过程。

此标准的设计保证了应用数据的传输是由设备的 PAN 设备控制而不是由协调器控制。在 7.5.5 中, 描述了协调器进行多任务处理的过程。

在 7.5.6 节中, 描述了包括间接发送在内的发送, 接收和确认帧。另外还描述了帧的重传方法。

在 7.5.7 节中, 描述了分配和释放保护时隙的机制。释放过程可能导致导致保护时隙空间的破碎, 即产生一个或多个未使用的时隙; 同时也介绍了解决这些破碎的机制。

对于所有的发送帧和接收帧, MAC 层都使用在 7.5.8 节中所定义的安全机制。

值得注意的是在本节中, 在物理层成功接收到帧信息后, 并且 MAC 层对该帧进行 FCS 验证确认后, 才定义为帧的接收, 将在 7.2.1.9 节描述。

7.5.1 信道访问

本节描述物理无线信道的访问机制。

7.5.1.1 超帧配置

PAN 上的协调器能够使用超帧配置随机的限制信道时间。通过发送信标帧实现对超帧限定，通常超帧分为活跃部分和不活跃部分。在不活跃部分期间，协调器进入低功率（睡眠）模式。

超帧的结构由 *macBeaconOrder* 和 *macSuperframeOrder* 的值来描述。MAC 层 PIB 属性 *macBeaconOrder* 描述了协调器发送信标帧的时间间隔。

macBeaconOrder (*BO*)，它与信标间隔 (*BI*) 的取值之间的关系为：当 $0 \leq BO \leq 14$

时， $BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO}$ 符号。若 *BO*=15，协调器不会发送信标帧除非被请求这样做，比如当收到信标请求命令的时候。当 *BO*=15 时，则忽略 *macSuperframeOrder* 的值。

MAC 层 PIB 属性 *macSuperframeOrder* 描述了超帧活跃部分的长度，信标帧包含在超帧的活跃部分。*macSuperframeOrder* 为 MAC 层超帧序号 (*SO*)，它与超帧持续时间 (*SD*) 的关系为：当

$0 \leq SO \leq BO \leq 14$ ， $SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}$ 符号。若 *SO*=15，超帧在信标之后将不保持在活跃状态。当 *BO*=15 时，则不存在超帧（将忽略 *macSuperframeOrder* 的值），并且 *macRxOnWhenIdle* 规定了收发机在不活跃期间是否能够接收信息。

每个超帧的活跃部分在 $2^{SO} * aBaseSlotDuration$ 的持续时间内，均匀地分成 *aNumSuperframeSlots* 个时隙，活跃部分由 3 部分组成：信标，竞争访问期 (*CAP*) 和非竞争期 (*CFP*)。在时隙 0 开始时，不使用 CSMA 机制发送信标。在信标结束之后，马上进入竞争期。如果存在非竞争周期，非竞争周期紧接在竞争周期之后，并持续到超帧活跃部分的结束。任何保护时隙均应分配在非竞争周期之内。

MAC 层必须确保超帧计时保持完整，比如补偿时钟漂移误差。

希望使用超帧配置的 PAN（参考支持信标的 PAN）应将 *macBeaconOrder* 的值设置在 0 至 14 之间；同时 *macSuperframeOrder* 的值应设置在 0 至 *macBeaconOrder* 之间。

不希望使用超帧配置的 PAN（参考不支持信标的 PAN）应将 *macBeaconOrder* 和 *macSuperframeOrder* 的值设置为 15。在这种情况下，协调器不能发送信标，除非收到信标请求命令；所有的发送，除了确认帧和紧跟在数据请求命令（见 7.5.6.3 节）确认之后的数据帧，都使用非时隙的 CSMA-CA 机制访问信道。除此之外，将不允许保护时隙。

图 66 给出了一个超帧配置的实例。此时，信标间隔 *BI* 是活跃超帧持续时间 *SD* 长度的 2 倍，同时 *CFP* 包含两个保护时隙。

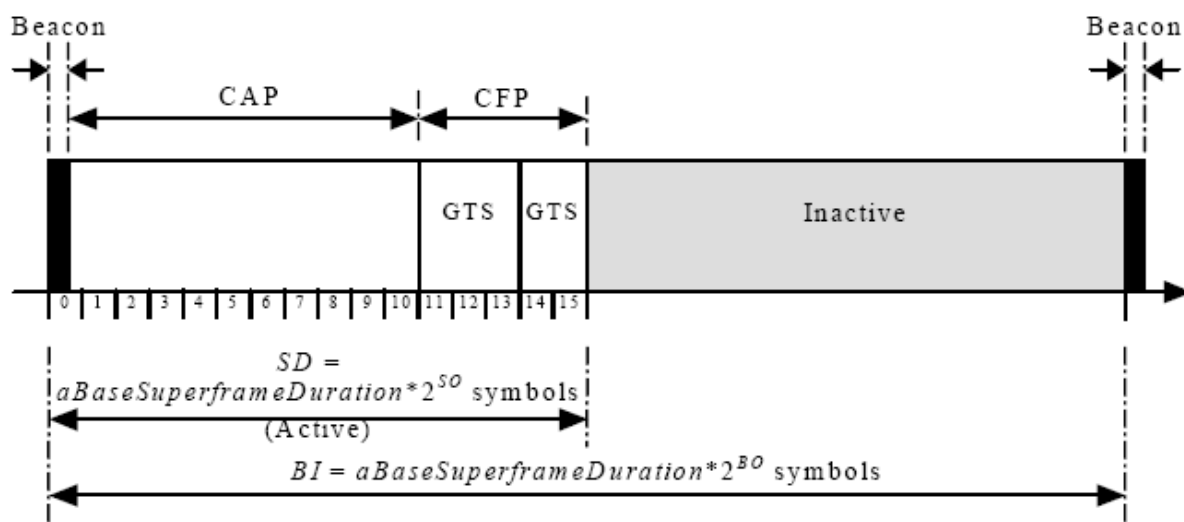


图 66 超帧配置的一个实例

7.5.1.1.1 竞争访问期（CAP）

在信标帧之后，紧接着就是竞争访问期，CAP 在超帧时隙边界，在非竞争访问期（CFP）开始之前结束。如果 CFP 长度为 0，CAP 应该在超帧活跃部分末尾处结束。CAP 至少有 $aMinCAPLength$ 个符号，除非需要暂时调整在信标帧中附加的空间，以满足维护保护时隙的需要（见 7.2.2.1.3 节），并且可动态地缩减或增加信标的长度以适应 CFP 的大小。

除了确认帧和紧跟在数据请求命令（见 7.5.6.3 节）确认帧之后的任何数据帧，在 CAP 中，发送的所有帧都使用时隙的 CSMA-CA 机制访问信道。在 CAP 内，发送的设备应确保其任务（包括任何确认帧的接收）在 CAP 结束前的一个帧间隔（见 7.5.1.3 节）时间内完成。如果不能实现这一点，设备将延时发送直到下一个超帧的 CAP。

MAC 命令帧总是在 CAP 之内发送。

7.5.1.1.2 非竞争期（CFP）

CFP 开始于紧接着 CAP 之后的时隙边界，并在该信标帧的活跃部分末尾之前结束。如果 PAN 协调器已经分配了保护时隙，则保护时隙应位于 CFP 内，并占用连续的时隙。因此，CFP 的长度将根据相组合的保护时隙的总长度来进行增加或减小。

在 CFP 内，数据的传输将不使用 CSMA-CA 机制访问信道。在 CFP 中，发送的设备应确保其传输在它的保护时隙结束前的一个帧间隔（见 7.5.1.2 节）内完成。

7.5.1.2 输入和输出超帧计时

在支持信标的 PAN 中，不是 PAN 主协调器的一个协调器将为两个超帧计时，

这两个超帧分别是它的局域网协调器传输信标的超帧（输入超帧）和它发送自身信标的超帧（输出超帧）。这些帧的相关计时在 **MLME-START.request** 原语中的 **StartTime** 参数中定义（见 7.1.14.1 和 7.5.2.4 节）。输入和输出信标帧之间的关系如图 67 所示。

对于一个 PAN 中的所有超帧来书，信标命令和超帧命令应该是一样的。所有的设备只在超帧的活跃部分跟 PAN 互相作用。

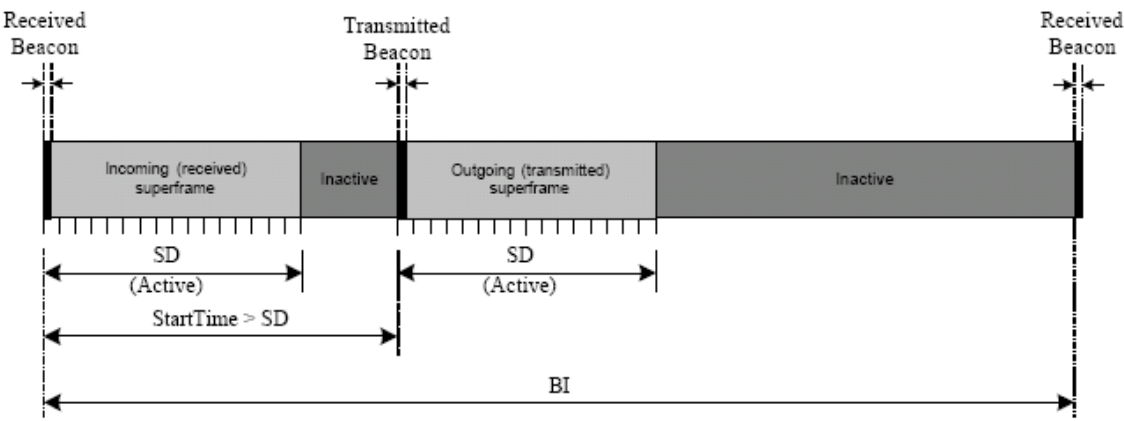


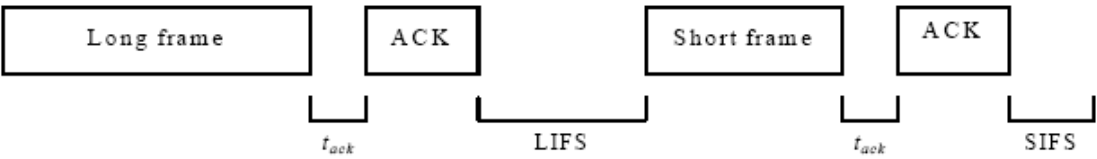
图 67 输入和输出信标帧之间的关系

7.5.1.3 内部帧间隔

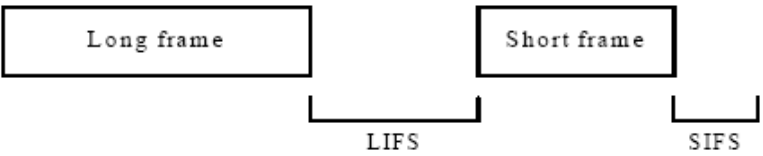
MAC 层需要一定的时间来处理由物理层接收到的数据。为实现此目的，设备发送的两个连续帧之间应该至少留有一个信标间隔期；如果第一个帧发送之后需要确认，确认帧信标间隔期应在确认帧之后。信标帧间隔期的长度决定于已发送帧的大小。长度为 *aMaxSIFSFrameSize* 的帧（即 MPDU）应该跟随一个持续至少 *aMinSIFPeriod* 符号的短帧间隔。长度大于 *aMaxSIFSFrameSize* 的帧（即 MPDU）应该跟随一个持续至少 *aMinLIFSPeriod* 符号的长帧间隔，如图 68 所示。

在 CAP 中，CSMA-CA 算法应该将这些传输的具体要求考虑在内。

Acknowledged transmission:



Unacknowledged transmission:



Where $aTurnaroundTime \leq t_{ack} \leq (aTurnaroundTime + aUnitBackoffPeriod)$

图 68 帧间隔

7.5.1.4 免冲突载波检测多路接入 (CSMA-CA) 算法

在竞争期 CAP 内发送数据或 MAC 命令帧之前，将使用 CSMA-CA 算法，除非在数据请求命令确认之后，立即发送数据帧（见 7.5.6.3 节）。在 CFP 内，信标帧，确认帧和数据帧都不需要用 CSMA-CA 算法。

如果 PAN 中使用信标，MAC 层在超帧的 CAP 中发送信息时将应用时隙的 CSMA-CA 算法。相反，若 PAN 中不使用信标或者在支持信标的 PAN 中不能定位信标，MAC 层将使用非时隙 CSMA-CA 算法来发送信息。在这两种情况下，都将使用被称作退避周期的时间段来实现算法，其中退避周期等于 $aUnitBackoffPeriod$ 符号。

在时隙的 CSMA-CA 算法中，PAN 内所有设备的退避周期边界都与 PAN 协调器的超帧时隙边界一致，即每个设备第一个退避周期的起始都与信标发送的起始时间一致。还有，MAC 层必须确保物理层在退避周期边界开始传输信息。在非时隙 CSMA-CA 算法中，设备的退避周期都与 PAN 内的所有其它设备的退避周期无关。

每个设备为每次发送保持三个变量：NB, CW 和 BE。NB 是执行当前发送任务时，执行 CSMA-CA 算法所需要进行的退避的次数；在每次执行新的发送任务之前，该值都初始化为零。CW 是竞争窗口长度，在传输开始之前确定实现信道活动空闲之前所需要的退避周期的个数；在每次发送之前，该值都初始化为 2，并且在每次信道访问为忙的时候复位为 2。CW 变量只适用于时隙 CSMA-CA。BE 为退避指数，它与设备在开始访问信道之前需要等待的退避周期的数目有关；在非时隙系统中，或者接收到的 BLE 子字段（见图 47）设置为零的时隙系统中，BE 的值都初始化为 macMinBE。在接收到的 BLE 子字段设置为零的时隙系统中，该值应初始化为 2 和 macMinBE 中的较小值。注意，如果 macMinBE 设为 0，在第一次执行本算法时不能实现冲突避免。

虽然在本算法的信道评估期间设备的接收机能正常工作，但设备将丢弃在此期间接收到的任何帧信息。

图 69 详细说明了 CSMA-CA 算法的流程。使用有时隙的 CSMA-CA 算法时，MAC 层先初始化 NB, CW 和 BE，然后，定位下一个退避周期的边界[步骤 (1)]。对于非时隙 CSMA-CA 算法，MAC 层先初始化 NB 和 BE，然后直接进行步骤 (2)。

MAC 层随机的延时几个完整的退避周期，其范围是 $2^{BE}-1$ [步骤 (2)]，然后请求物理层进行清除信道评估[步骤 (3)]。在有时隙的 CSMA-CA 系统中，信道清除评估应该在一个退避周期的边界开始。在非时隙的 CSMA-CA 系统中，清除信道评估立即开始。

在有时隙的 CSMA-CA 系统中，BLE 子字段设置为 0 时，MAC 层应确保在随机退避之后，剩余的 CSMA-CA 操作能够完成，并且整个发送能够在 CAP 结束之前完成。注意，所支持的物理层使用的每一填充位都必须这样考虑。如果退避周期次数大于 CAP 中剩余的退避周期次数，MAC 层将在 CAP 结束时暂停退避的倒计时，并在下一个超帧的 CAP 开始时重新启动倒计时。如果退避周期次数少于或等于 CAP 中剩余退避周期的次数，MAC 层则启用其退避延时，并评估是否继续延时。如果剩余的 CSMA-CA 算法步骤（即两个信道清除评估分析），

帧传输和确认能够在 CAP 结束之前完成，MAC 层将继续延时。如果 MAC 层继续延时，它将请求物理层在当前的超帧中执行 CCA。如果 MAC 层不继续延时，它将要一直等到下一个超帧 CAP 的开始，并且重复评估是否继续应用随机退避延时[步骤（2）]。

在有时隙的 CSMA-CA 系统中，BLE 字段设置为 1 时，MAC 层应确保在随机退避之后，剩余的 CSMA-CA 操作能够完成，并且整个发送能够在 CAP 结束之前完成。退避倒计时只在信标帧后的帧间隔周期结束之后的第 macBattLifeExtPeriods 个完整退避周期内进行。如果剩余的 CSMA-CA 算法步骤（即两个信道清除评估分析），帧传输和确认能够在 CAP 结束之前完成，并且帧传输能在信标帧的帧间隔周期之后的第 macBattLifeExtPeriods 个完整退避周期内开始，MAC 层将继续退避计数。如果 MAC 层继续，它将请求物理层在当前的超帧中执行 CCA。如果不继续，它将要一直等到下一个超帧 CAP 的开始，并且重复评估。

如果信道访问结果为忙[步骤（4）]，MAC 层将把 NB 和 BE 都加 1，确保 BE 不大于 macMaxBE。在有时隙的 CSMA-CA 系统中，MAC 层将把 CW 复位为 2。若 NB 的值小于等于 macMaxCSMABackoffs，CSMA-CA 算法返回[步骤（2）]。如果 NB 的值大于 macMaxCSMABackoffs，CSMA-CA 算法以信道访问失败状态结束。

如果信道访问为空闲[步骤（5）]，在有时隙的 CSMA-CA 系统中，MAC 层应确保在开始传输之前竞争窗口已经终止。为了实现此功能，MAC 层首先将 CW 减 1，然后判断它是否为 0。如果不为 0，CSMA-CA 算法返回[步骤（3）]。如果等于 0，MAC 层将在下一个退避周期的边界处开始帧传输。若在非时隙的 CSMA-CA 系统中信道访问为空闲，MAC 层应立即开始传输帧。

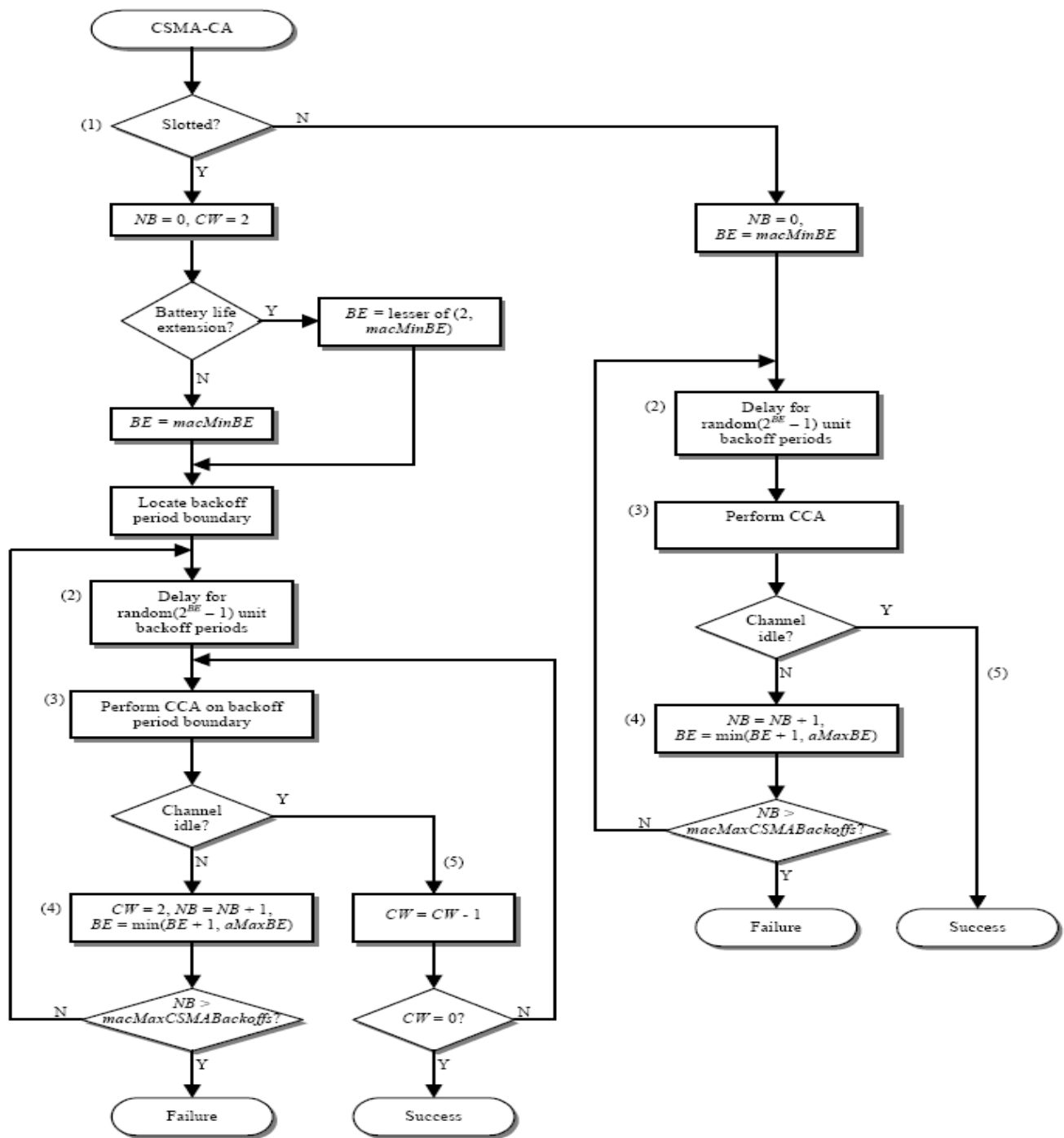


图 69 CSMA-CA 算法

7.5.2 启动和维护 PAN

本节介绍扫描信道，识别 PAN 标识符冲突和启动 PAN 的过程。

7.5.2.1 扫描信道

所有的设备都应该能够对所规定的一组信道进行被动的和孤点的扫描。另外，完整功能设备应该能够进行能量检测和主动扫描。由上层提出一个包含信道列表的扫描要求，这些信道从phyChannelsSupported指定的信道中选择出来。

设备通过MLME-SCAN.request原语开始对信道的扫描。以由低到高的顺序扫描信道。在扫描期间，设备停止信标传输，并且只接受物理层上与正在进行的扫描有关的数据服务的帧。扫描结束时，设备重新开始信标传输。扫描结果通过MLME-SCAN.confirm原语返回。

7.5.2.1.1 ED 信道扫描

能量检测扫描使设备能获得每一个所扫描信道的峰值能量。未来的PAN协调器可利用这个信息，在选择使用信道之后，来启动一个新的PAN协调器。在能量检测扫描期间，MAC层将丢弃所有物理层数据服务传来的帧信息。

用MLME-SCAN.request原语发送对指定的一组逻辑信道进行能量检测扫描的请求，原语中的ScanType参数指明能量检测扫描。对于每一个逻辑信道，MLME首先通过设置相应的phyCurrentChannel和phyCurrentPage切换到此信道，然后在 $(aBaseSuperframeDuration * (2^n + 1))$ 个符号期内重复对信道进行能量检测，其中n表示MLME-SCAN.request原语中ScanDuration参数的值。为确保返回一个能量检测结果，MLME发送PLME-ED.request（见6.2.2.3）对信道进行检测。标注在此期间所得到的最大能量检测值，然后开始下一个信道的扫描。设备应该能存储1到信道能量检测最大数目之间的数值。

当存储的信道能量检测数为最大时，或者每一个逻辑信道的能量都被测量后，能量检测扫描结束。

7.5.2.1.2 主动信道扫描

设备使用主动扫描，对于在它的个字段工作范围（POS）内任何协调器发射的信标帧进行锁定。在启动一个新的PAN或者设备在接入之前，未来的PAN协调器或者设备可以主动扫描，选择PAN标识符。

在主动扫描期间，MAC层将丢弃所有物理层数据服务发来的非信标帧信息。如果接收到的信标帧，在该帧的未处理地址列表中包含有扫描设备地址信息，该扫描设备不能获取未处理数据。

开始主动扫描之前，MAC层存储值macPANId，然后为信道扫描将其设置为0xffff。这样使接收滤波器能够接受所有信标，而不仅仅只接收来自当前PAN的信标（见7.5.6.2）。扫描完成之后，MAC层将macPANId的值重新设置为扫描开始之前的值。

用MLME-SCAN.request原语请求对一组指定逻辑信道进行主动扫描，原语中的ScanType参数表示主动扫描。对于每一个逻辑信道，设备首先通过设置相应的phyCurrentChannel和phyCurrentPage切换到信道，并发送信标请求命令（见

7.3.7) 。该命令成功传输后，设备的接收机处于工作状态，用于接收最多 $(aBaseSuperframeDuration * (2^n + 1))$ 个符号，其中n表示ScanDuration参数的值。

在此期间，设备将丢弃所有非信标帧，并记录包含在PAN描述符结构（见7.1.5.1.1节中表55）中所有唯一信标的信息。如果macAutoRequest设置为TRUE时接收到信标帧，PAN描述符结构列表将被存储在MAC层中直到扫描结束；此时，该列表随MLME-SCAN.confirm原语的PANDescriptorList参数被送到上层。设备应能存储1到PAN描述符最大数目之间的数值。如果它含有的PAN标识符和源地址在此次信道扫描前不存在，则认为该信标帧是唯一的。如果macAutoRequest设置为FALSE时接收到信标帧，每一个已记录的PAN描述符将分别以MLME-BEACON-NOTIFY.indication原语被送到上层。收到含有一个或多个字节的有效载荷的信标帧也会导致PAN描述符通过MLME-BEACON-NOTIFY.indication原语被送到上层。

如果接收到一个受保护的信标帧，即帧控制字段中的安全允许子字段设置为1，设备将对信标帧进行安全处理，其处理方法如7.5.8.2.3节中所述。

信标相应的PAN描述符的安全相关元素（见表55）应设置成由非安全处理过程返回的相应参数。若非安全处理的返回状态为SUCCESS，PAN描述符的SecurityFailure部分将设置为SUCCESS，否则设置为一个错误代码表示安全进程出错。

即使非安全处理过程的状态指示有错误，PAN描述符同样应该记录来自不安全帧的信息。

如果支持信标PAN的协调器接收到信标请求命令，它将忽略此命令并继续发送信标。如果不支持信标PAN的协调器接收到此信标请求命令，它将用非时隙CSMA-CA发送一个信标帧。

如果macAutoRequest为TRUE，当发现信标帧的数量等于指定的上限值或者信道扫描达到7.5.2.1.2节中描述的全部时间，在一个特定信道上的主动扫描结束。如果macAutoRequest为FALSE，当信道扫描时间满时在一个特定信道上的主动扫描结束。如果信道的扫描时间没有达到全部时间，该信道将被认为未扫描。

如果macAutoRequest为TRUE，当存储的PAN描述符的数目等于指定的最大值，或者每个可用信道都已被扫描时，整个扫描过程结束。如果macAutoRequest为FALSE，整个扫描过程只在当每个可用信道都已被扫描时结束。

7.5.2.1.3 被动信道扫描

被动扫描，与主动扫描类似，允许设备锁定在其个字段工作范围（POS）内任何发送信标的协调器。但是设备不发送信标请求命令。**设备在接入PAN之前使用这种扫描。**

在被动扫描期间，MAC层将丢弃所有物理层数据服务发来的非信标帧。如果接收到的信标帧，在其未处理地址列表中包含有扫描设备地址信息，该扫描设备不能获取未处理数据。

在开始被动扫描之前，MAC层存储macPANId的值，在扫描的持续时间内将其设置为0xFFFF。这使得接收滤波器接收所有信标，而不仅仅只接收来自当前PAN的信标帧（见7.5.6.2节）。扫描结束时，MAC层将macPANId的值恢复为扫

描开始之前的值。

用MLME-SCAN.request原语请求对一组指定逻辑信道进行被动扫描，原语中的ScanType参数表示被动扫描。对于每一个逻辑信道，设备首先通过设置相应的phyCurrentChannel和phyCurrentPage切换到信道，然后使接收机工作，工作时间最多为 $(aBaseSuperframeDuration * (2^n + 1))$ 个符号，其中n表示ScanDuration参数的值。在此期间，设备将丢弃所有非信标帧，并记录包含在PAN描述符结构（见7.1.5.1.1节中表55）中所有唯一信标的信息。如果macAutoRequest设置为TRUE时接收到信标帧，PAN描述符结构列表将被存储在MAC层中直到扫描结束；此时，该列表随MLME-SCAN.confirm原语的PANDescriptorList参数被送到上层。设备应能存储1到PAN描述符最大数目之间的数值。如果它含有的PAN标识符和源地址在此次信道扫描前不存在，则认为该信标帧是唯一的。如果macAutoRequest设置为FALSE时接收到信标帧，每一个已记录的PAN描述符将分别用MLME-BEACON-NOTIFY.indication原语送到上层。一旦扫描结束，将PANDescriptorList为空的MLME-SCAN.confirm原语送到上层。接收到含有一个或多个字节有效载荷的信标帧也会导致用MLME-BEACON-NOTIFY.indication原语将PAN描述符送到上层。

如果接收到一个受保护的信标帧，即帧控制字段中的安全允许子字段设置为1，设备将对信标帧进行安全处理，其处理方法如7.5.8.2.3节中所述。

信标相应的PAN描述符的安全相关元素（见表55）应设置成由非安全处理过程返回的相应参数。若非安全处理的返回状态为SUCCESS，PAN描述符的SecurityFailure部分将设置为SUCCESS，否则设置为一个错误代码表示安全进程出错。

即使非安全处理过程的状态指示有错误，PAN描述符同样应该记录来自不安全帧的信息。

如果macAutoRequest为TRUE，当发现信标帧的数量等于上限或者信道扫描达到像7.5.2.1.3中描述的全部时间，在一个特定信道上的被动扫描结束。如果macAutoRequest为FALSE，当信道扫描时间满时在一个特定信道上的被动扫描结束。如果信道的扫描时间没有达到全部时间，该信道将被认为未扫描。

如果macAutoRequest为TRUE，当存储的PAN描述符的数目等于规定的最大值，或者每一个可用信道都已被扫描时，整个扫描过程结束。如果macAutoRequest为FALSE，整个扫描过程只在每一个可用信道都已被扫描时结束。

7.5.2.1.4 孤立信道扫描

孤立扫描允许设备在失去同步后重新锁定协调器。在孤立扫描期间，MAC层将丢弃所有物理层数据服务发送的非协调器重新连接的MAC命令帧的帧。

用MLME-SCAN.request原语请求对一组指定逻辑信道进行孤立扫描，原语中的ScanType参数表示孤立扫描。对于每一个逻辑信道，设备首先通过设置相应的phyCurrentChannel和phyCurrentPage切换到该信道，然后发送一个孤立通告命令（见7.3.6节）。此命令发送成功后，设备使接收机工作，接受时间最多为macResponseWaitTime个符号。如果设备在此期间成功接收到协调器重新连接的命令（见7.3.8节），设备终止扫描。

如果协调器收到孤立通告命令，MLME将发送MLME-ORPHAN.indication原语到它的上层。上层将搜索其设备表看是否存在该原语指示的设备。如果上层搜索到该设备的记录，它将用MLME-ORPHAN.reponse原语发送一个协调器重新配置命令给该孤立设备。搜索设备和发送协调器重新配置命令的过程应该在macResponseWaitTime个符号内完成。协调器重新配置命令应该包含其当前的PAN标识符，macPANId,当前逻辑信道，信道页和孤立设备的16位短地址。如果协调器的上层没有发现设备纪录，它将忽略MLME-ORPHAN.indication原语，并且不发送MLME-ORPHAN.response原语。因此，MLME将不会发送协调器重新配置命令。

当设备接收到协调器重新配置命令或者已经扫描过指定的一组逻辑信道时，孤立扫描结束。

7.5.2.2 PAN 标识符冲突检测

在某些实例中，在同一个POS中的两个PAN可能会存在具有相同PAN标识符的情况。如果发生这种冲突，PAN协调器和它的设备执行PAN标识符冲突解决过程。

对于简化功能设备来说，该过程是可选的。

7.5.2.2.1 冲突检测

如果下列任一情况发生，PAN协调器将得出PAN标识符发生冲突的结论：

- PAN协调器接收到PAN协调器子字段（见7.2.2.1.2节）设置为1的信标帧，并且PAN标识符等于macPANId。

- PAN协调器收到从其PAN的设备发送来的PAN ID冲突通告命令（见7.3.5）。

如果发生下列情况，设备将得出PAN标识符发生冲突的结论：

- 设备接收到PAN协调器子字段设置为1的信标帧，PAN标识符等于macPANId，而其地址既不等于macCoordShortAddress，也不等于macCoordExtendedAddress。

连接到非PAN主协调器的协调器的设备不能进行PAN标识符冲突检测。

7.5.2.2.2 冲突解决方法

设备一旦检测到PAN标识符冲突后，产生一个PAN ID冲突通告命令（见7.3.5节）并发送给它的PAN协调器。因为PAN ID冲突通告命令含有一个确认请求（见7.3.3.1节），所以PAN协调器在收到该命令后将发送一个确认帧。一旦设备收到来自PAN协调器的确认帧，MLME将返回MLME-SYNC-LOSS.indication原语，该原语的参数LossReason设置为PAN_ID_CONFLICT。如果设备没有收到确认帧，MLME将不会告知上层发生PAN标识符冲突。

协调器一旦检测到PAN标识符冲突后，MLME将向上层发送MLME-SYNC-LOSS.indication原语，其参数LossReason设置为

PAN_ID_CONFLICT。PAN协调器的上层将进行主动扫描，并利用扫描得到的信息选择一个新的PAN标识符。选择一个新的PAN标识符的算法超出了本标准的范围，可参考相应资料。如果上层要选择新的PAN标识符，它将发送MLME-START.request原语，其参数CoordRealignement设置为TRUE，用来重新连接PAN，如7.5.2.3节所述。

7.5.2.3 启动网络和重新组网

本节介绍了PAN协调器启动PAN，协调器重新连接PAN和设备如何被重新连接到PAN的过程。

7.5.2.3.1 启动个域网

设备要执行MAC层，要发送MLME-RESET.request原语，并且其参数SetDefaultPIB设置为TRUE。只有在执行了MAC层复位，主动信道扫描并选择合适的PAN标识符之后，全功能设备才能启动PAN。从主动信道扫描过程返回的PAN描述符列表选择一个合适的PAN标识符的算法超出了本标准的范围，可参考相关资料。另外，完整功能设备应将macShortAddress设置为小于0xffff的值。

完整功能设备使用MLME-START.request原语命令（见7.1.14.1）来启动PAN，其中参数PANCoordinator设置为TRUE，参数CoordRealignement设置为FALSE。接收到此原语后，MAC层应该如7.5.2.3.4节中描述的那样，更新超帧配置和信道参数。这项工作完成后，MAC层将发送状态为SUCCESS的MLME-START.confirm原语命令，并作为PAN协调器开始工作。

7.5.2.3.2 重新组网

如果协调器接收到MLME-START.request原语命令（见7.1.14.1），其参数CoordRealignement设置为TRUE，协调器应发送包含新的PANId, LogicalChannel, ChannelPage等参数的协调器重新配置命令。

当协调器正在发送信标，并且参数CoordRealignement设置为TRUE时，下一个信标将在当前的信道使用当前的超帧配置发送，其中帧控制字段的帧预留子字段设置为1。应在信标发送之后在当前的信道上立即发送协调器重新配置命令，并且采用CSMA-CA机制。

当协调器没有发送信标，并且参数CoordRealignement设置为FALSE时，应立即在当前的信道上用CSMA-CA发送协调器重新配置命令。

如果因为信道访问失败而导致协调器重新配置命令发送失败，MLME将向上层发送状态为CHANNEL_ACCESS_FAILURE的MLME-START.confirm原语命令。上层可以选择再次发送MLME-START.request原语。

协调器重新配置命令发送成功后，将对后续帧进行如7.5.2.3.4节所述的操作，从而使用新的超帧配置和信道参数；如果协调器并没有要发送信标，则立即更新为新的超帧配置，并且MAC层将发送状态为SUCCESS的MLME-START.confirm原语。

7.5.2.3.3 个域网中的重新连接

如果设备收到了它所连接的协调器送来的协调器重新配置命令(见7.3.8节),并且MLME没有进行孤立扫描,MLME将发送MLME-SYNC-LOSS.indication原语命令,其LossReason参数设置为REALIGNMENT,并且PANId, LogicalChannel, ChannelPage和安全相关参数都分别在协调器重新配置命令中的各个字段进行设置。然后协调器上层会发送MLME-START.confirm原语命令,其CoordRealignment设置为TRUE。设备的上层将用MLME-SET.request原语命令修改超帧配置或信道参数。

7.5.2.3.4 更新超帧配置和信道 PIB 属性

为了更新超帧配置和信道属性,MLME将把MLME-START.request原语命令参数的值分配到合适的PIB属性。MLME将把macBeaconOrder设置为参数BeaconOrder的值。如果macBeaconOrder等于15,MLME将把macSuperframeOrder也设置为15。这样,该原语设定了一个不支持信标的PAN。如果macBeaconOrder小于15,MAC层将把macSuperframeOrder设置为参数SuperframeOrder的值。MAC层也将通过发送两次PLME-SET.request原语命令把macPANID更新为参数PANId的值,把phyCurrentPage和phyCurrentChannel分别更新为ChannelPage和LogicalChannel参数的值。

7.5.2.4 信标的产生

只有当macShortAddress不等于0xffff时,设备才能发送信标帧。

只有当参数BeaconOrder小于15时,完整功能设备才能用

MLME-START.request原语命令开始信标传输。完整功能设备既能够作为新的PAN协调器,也可以作为已建个域网的设备来发送信标帧,以哪种身份发送信标帧取决于参数PANCoordinator的设置(见7.1.14.1节)。完整功能设备只有在成功连接到该PAN后才能作为该已建个域网的设备来发送信标帧。

如果一个完整功能设备是一个PAN协调器(即参数PANCoordinator设置为TRUE),MAC层将忽略StartTime参数并立即开始发送信标。将StartTime参数设置为0也能使MAC层立即开始发送信标。如果一个完整功能设备不是一个PAN协调器,并且StartTime参数为非0,开始发送信标的时间应根据下列方法计算出来。当MAC层接收到它所连接的协调器的信标时,沿着退避时隙边界的StartTime参数将被添加到从本地时钟获得的时间里。然后当从本地时钟得到的当前时间等于计算的符号数时,MAC层开始发送信标。为了让MAC层计算出信标发送时间,MAC层应该先跟踪它所连接的协调器的信标。如果MLME-START.request原语命令中参数StartTime为非0,并且MAC层现时没有跟踪协调器的信标,MLME不会发送信标,但会发送状态为TRACKING_OFF的MLME-START.confirm原语命令。

如果设备错过了1到(aMaxLostBeacons-1)之间连续的协调器信标帧,该设备将根据macBeaconOrder(见7.5.2.3.4节)和它的本地时钟继续发送自己的信标。如果设备后来收到了协调器的信标并没有失去同步,设备将根据参数StartTime

和输入信标来继续发送自己的信标。如果设备与协调器失去同步，它的MLME将向上层发送MLME-SYNC-LOSS.indication原语命令并立即停止发送信标。上层在任何时间收到MLME-SYNC-LOSS.indication原语命令，都会通过发送新的MLME-START.request原语命令来恢复信标传输。

一旦接收到MLME-START.request原语命令，MAC层将设置macPANID中的PAN标识符并在信标帧的Source PAN Identifier字段中使用该值。信标帧的Source Address字段中用到的地址，在macShortAddress等于0xffff时应包含aExtendedAddress的值，否则应包含macShortAddress。

多数最近发送信标的时间都被记录在macBeaconTxTime中，并且经过计算使这些值位于每一个信标帧中相同的符号边界上，信标帧的位置取决于执行的具体情况。由属性macSyncSymbolOffset说明的符号边界应该与所接收信标帧的时间戳相同，如7.5.4.1中节所述。

所有的信标帧应该在每一个超帧开始的时候发送，间隔等于

$aBaseSuperframeDuration * 2^n$ 符号，其中n表示macBeaconOrder的值（信标帧的结构已在7.2.2.1中介绍）。

信标的发送应该比所有其他的发送和接收操作具有更高的优先级。

7.5.2.5 设备的发现

协调器通过发送信标帧来表示它的存在。这样使得其他设备能执行设备发现任务。

非PAN主协调器的协调器只有在它成功的连接到一个PAN之后才能开始发送信标帧。通过是用MLME-START.request原语命令对设备发送的信标帧进行初始化，原语的PANCoordinator参数设置为FALSE。接收到此原语命令后，MLME将使用设备所连接的PAN的标识符，macPANId及其地址(若macShortAddress等于0xffff则为扩展地址aExtendedAddress，否则为短地址macShortAddress)根据参数StartTime（见7.5.2.4节）来发送信标。信标帧的发送速率为每

$aBaseSuperframeDuration * 2^n$ 个符号发送一个信标，其中n为macBeaconOrder的值。

7.5.3 连接和断开连接

本小节介绍连接和断开连接的过程。

7.5.3.1 连接

设备要先发送MLME-RESET.request原语命令来对MAC层复位，其参数SetDefaultPIB设置为TRUE，然后完成主动信道扫描（见7.5.2.1.2节）或者被动信道扫描（见7.5.2.1.3节），此时才能进行连接。信道扫描的结果用来选择一个合适的PAN。从信道扫描过程返回的PAN描述符列表中选择合适的所连接的PAN的算法超出了本标准的介绍范围。

选择所连接的PAN之后，上层将通过MLME-ASSOCIATE.request原语命令请求MLME对有关物理层和MAC层PIB属性进行如下配置：

——phyCurrentChannel 设置为与 MLME-ASSOCIATE.request 原语命令中的 LogicalChannel 参数相等。

——phyCurrentPage 设置为与 MLME-ASSOCIATE.request 原语命令中的 ChannelPage 参数相等。

——macPANId 应设置为与 MLME-ASSOCIATE.request 原语命令中的 CoordPANId 参数相等。

——macCoordExtendedAddress 或 macCoordShortAddress，取决于要连接的协调器的信标帧，将其设置为与 MLME-ASSOCIATE.request 原语命令中的 CoordAddress 参数相等。

只有当 macAssociationPermit 设置为 TRUE 时协调器才允许连接。同样，设备只有在协调器当前允许连接时才能通过该协调器连接到 PAN,正如扫描结果指示的那样。如果协调器接收到设备的连接请求命令，但其 macAssociationPermit 设置为 FALSE，则将忽略此命令。

为了优化支持信标的 PAN 的连接过程，设备可以提前开始跟踪它所要连接的协调器的信标。上层通过发送 MLME-SYNC.request 原语命令来实现这个目的，其中 TrackBeacon 参数设置为 TRUE。

设备通过 MLME-ASSOCIATE.request 原语请求同一个已存在的 PAN 进行连接，而不是企图启动它自己的 PAN。

非连接设备的 MAC 层通过向已存在的 PAN 协调器发送连接请求命令（见 7.3.1 节）来初始化连接过程。如果因信道访问失败而不能发送连接请求命令，MAC 层将通报上层。因为连接请求命令含有一个确认请求（见 7.3.1），所以协调器应发送一个确认帧来确认接收。

连接请求命令的确认并不意味着设备已连接成功。协调器的上层需要时间来决定PAN的当前可用资源是否足够允许另一个设备的接入。上层将在 macResponseWaitTime符号时间内做出决定。如果协调器的上层发现此设备之前已经连接到本PAN上，则将删除所有之前所获得的设备信息。如果有足够的可用资源，上层将给设备分配一个16为短地址，并且MAC层将产生一个包含新的地址和表示成功连接状态的连接响应命令（见7.3.2）。如果资源不足，协调器的上层将通知MAC层，MLME将产生一个包含表示失败状态的连接响应命令（见表 83）。用间接发送的方式，将连接相应命令发送给请求连接的设备，即将连接响应命令帧添加到协调器的未决处理列表中，并由设备使用7.5.6.3节中描述的方法进行处理。

如果连接响应命令性能信息字段（见7.3.1.2节）的分配地址子字段为1，协调器的上层将分配一个16位的地址，其范围根据协调器所支持的寻址模式而定，如表87节所示。如果连接响应命令的分配地址子字段为0，该16位短地址等于 0xfffe。短地址0xfffe为特殊情况，表示设备已经连接，但还没有分配短地址。在这种情况下，设备只能用其64位扩展地址在网络内工作。

设备一旦收到连接响应命令的确认之后，最多等待macResponseWaitTime符号，以便让协调器作出连接决定。PIB属性macResponseWaitTime是随网络拓扑结构而定的参数，用来匹配该设备将要连接的网路的具体要求。如果设备跟踪信标，它将试图从协调器的信标帧中提取连接响应命令。如果设备没有跟踪信标，它将在macResponseWaitTime符号之后，试图从协调器中提取连接响应命令。如

果设备在macResponseWaitTime符号之内没有从协调器中提取到连接响应命令，MLME将发送带有NO_DATA状态的MLME-ASSOCIATE.confirm原语，表明**连接的尝试失败**。在这种情况下，上层将通过发送TrackBeacon参数设置为FALSE的MLME-SYNC.request原语命令来终止信标跟踪。

由于**连接响应命令含有一个确认请求**（见7.3.2.1），所以请求连接的设备应发送一个确认帧来确认接收。如果该命令的连接状态字段表明连接成功，设备将把包含在该命令的16为短地址字段中的地址存储在macShortAddress中。PAN中使用此短地址的通信将取决于表87所描述的范围。如果选来连接的原始信标紧接着包含在协调器短地址中的扫描，包含在连接响应命令帧的MHR中的协调器扩展地址将被存储在macCoordExtendedAddress中。

表87 16位短地址的使用

macShortAddress的值	描述
0x0000-0xffffd	对于信标帧和数据帧，设备将使用短源寻址模式；对于MAC命令帧，设备将使用7.3中节所述的适当源寻址模式
0xfffe	对于信标帧和数据帧，设备将使用扩展源寻址模式；对于MAC命令帧，设备将使用7.3中节所述的适当源寻址模式
0xffff	设备未连接，不能进行任何数据帧通信；对于MAC命令帧，设备将使用7.3中节所述的适当源寻址模式

如果命令的连接状态字段表明连接不成功，设备将把macPANId设置为缺省值（0xffff）。

7.5.3.2 断开连接

上层通过向MLME发送**MLME-DISASSOCIATE.request原语**命令启动断开连接过程。

当协调器希望它的一个连接设备脱离PAN时，它的MLME将以上层所发送的MLME-DISASSOCIATE.request原语命令中参数TxIndirect所描述的方式发送断开连接通告命令。如果参数**TxIndirect为TRUE**，协调器的MLME将以间接的传输方式向设备发送断开连接通告命令，即将断开连接通告命令帧加到未处理列表中，该列表存储在协调器中，并由相关设备使用如7.5.6.3节中所描述的方式进行处理。如果设备没有成功的提取该命令帧，协调器将认为设备已断开连接。或者，MLME将直接给设备发送一个断开连接通告命令。在这种情况下，如果由于信道访问失败而不能发送断开连接通告命令，MAC层将通报上层。

由于**断开连接命令含有一个确认请求**（见7.3.3.1节），所以接收设备应发送一个确认帧来确认接收。如果直接或间接传输失败，协调器将认为设备已断开连接。

如果连接的设备希望离开PAN，设备的MLME将向它的协调器发送断开连接通告命令。如果由于信道访问失败而不能发送断开连接通告命令，MAC层将通

报上层。由于断开连接命令含有一个确认请求（见7.3.3.1节），所以协调器应发送一个确认帧来确认接收。但是，就算没有收到确认帧，设备也将认为它已断开连接。

如果包含在断开连接通告命令中的源地址等于macCoordExtendedAddress，设备将认为它已断开连接。如果协调器收到该命令并且源地址不等于macCoordExtendedAddress，它将验证源地址是否为一个连接设备的地址。如果是一个连接设备的地址，协调器将认为该设备已经断开连接。如果上述条件都不满足，将忽略该命令。

连接的设备可通过删除所有有关PAN的信息来断开同PAN的连接；MLME将把macPANId，macShortAddress，macAssociatedPANCoord，macCoordShortAddress和macCoordExtendedAddress均设置为缺省值。协调器的上层可通过删除所有有关设备的信息使设备断开PAN。

设备通过MLME-DISASSOCIATE.confirm原语将断开连接过程的结果通知给发送请求的设备上层。

7.5.4 同步

本节介绍协调器产生信标帧和设备与协调器同步的过程。在支持信标的PAN中，同步是通过接收接收信标帧并对其进行解码来实现的。在不支持信标的PAN中，同步通过向协调器轮询数据实现。

7.5.4.1 由信标同步

所有工作在支持信标的PAN（即macBeaconOrder<15）中的设备为了检测任何未处理的消息或跟踪信标，必须能够获得信标同步。设备只允许从包含PAN标识符的信标中获取信标同步，标识符存在macPANId中指定。如果macPANId指定的是广播PAN标识符（0xffff），设备将不会试图获得信标同步。

设备通过MLME-SYNC.request原语命令来获取信标。如果MLME-SYNC.request原语中规定为跟踪状态，设备将通过有规律且适时的激活接收机来试图获得信标并对其进行跟踪。如果没有规定跟踪，设备将只试图获取信标一次或者如果在前一次请求中进行了跟踪，则在下一个信标之后结束跟踪。

为了获得信标同步，设备应该打开接收机，并搜索最多 ($aBaseSuper-$

$frameDuration * (2^n + 1)$) 个符号，其中n为macBeaconOrder的值。如果没有收到包含设备当前PAN标识符的信标帧，MLME将重复此搜索。一旦丢失的信标数达到aMaxLostBeacons，MLME将用MLME-SYNC-LOSS.indication原语通知上层，丢失原因参数为BEACON_LOST。

MLME将在每一个帧内相同的符号边界处对每一个所接收的信标帧进行时间定位，其位置由属性macSyncSymbolOffset描述。此符号边界与存储在macBeaconTxTime中的输出信标帧所使用的时间定位相同。时间定位的值应该是符号边界时设备的本地时钟的值。时间定位在执行时不一定是绝对的，只是一个相对的时间测量。

如果收到了受保护信标帧（即帧控制字段中的安全使能字段设置为1），设备将对信标帧进行如7.5.8.2.3节所述的非安全处理。

如果非安全处理过程的状态不是SUCCESS, MLME将发送MLME-COMM-STATUS.indication原语命令来指示错误，其中状态参数设置为非安全处理过程返回的状态。

信标相应的PAN描述符（见表55）的安全相关部分应设置为由非安全处理过程返回的相应参数。若非安全处理过程的状态为SUCCESS，PAN描述符的SecurityFailure部分将设置为SUCCESS，否则设置为非安全处理过程中指示有错误的其它状态码之一。

如果接收到信标帧，它的源地址和MHR中的源PAN标识符字段跟协调器源地址（macCoordShortAddress或macCoordExtendedAddress，根据寻址模式而定）和设备的PAN标识符（macPANId）不匹配，MLME将丢弃该信标帧。

如果收到有效信标帧，并且macAutoRequest设置为FALSE，MLME将通过发送MLME-BEACON-NOTIFY.indication原语命令把信标参数传递给上层。如果收到信标帧，macAutoRequest设置为TRUE，且信标包含有效载荷，MLME将首先发送MLME-BEACON-NOTIFY.indication原语，然后把它的地址同信标帧地址列表字段中的那些地址进行比较。如果地址列表字段中包含设备的16位短地址或者64位扩展地址，并且源PAN标识符和macPANId匹配，MLME将按照从协调器中提取未决数据的过程进行操作（见7.5.6.3节）。

如果信标跟踪被激活，MLME将在下一个期待的信标帧发送之前打开它的接收机，即在下一个超帧的已知开始时间之前打开接收机。如果MLME丢失的连续信标的数目达到aMaxLostBeacons，MLME将通过MLME-SYNC-LOSS.indication原语作出响应，丢失原因值为BEACON_LOST。

7.5.4.2 无信标同步

所有工作在**不支持信标的PAN（即macBeaconOrder=15）**中的设备应能够根据上层的判断，轮询处理协调器的数据。

MLME接收到**MLME-POLL.request原语**后，命令设备轮询协调器，并将按照从协调器中提取未决数据的过程进行操作（见7.5.6.3节）。

7.5.4.3 孤立设备重新调整

如果上层在请求发送数据之后接收到重复的通信失败信息，它将认为已经断开PAN。当设备事务未能到达协调器，即设备试图发送数据macMaxFrameRetries次后仍没有收到确认帧，则认为通信失败。**如果上层得出自己已成为孤立设备时，它将命令MLME执行孤立设备重新连接过程，或者复位MAC层执行连接过程。**

如果上层决定执行孤立设备重新连接过程，它将发送ScanType参数设置为孤立扫描的MLME-SCAN.request原语，其中参数ScanChannel包含扫描信道列表。收到此原语后，MAC层立即开始孤立扫描，如7.5.2.1.4节所述。

如果孤立扫描成功（即PAN已经锁定），设备将用包含在协调器重新配置命令中的PAN信息来更新它的MAC个域网信息数据库（见7.3.8节）。

7.5.5 事务处理

因为此标准使得设备成本非常低，如采用电池供电等，因此，事务处理通常由设备本身，而不是协调器，来发起。也就是说，协调器要在信标帧中表明有需要设备处理的信息，或者设备必须轮询协调器以确定是否有需要他们处理的信息，这种传输称为间接传输。

协调器在接收到间接传输请求后开始进行事务处理，该请求为上层发送的MCPS-DATA.request原语或者来自MLME上层发送的MAC命令请求，如MLME-ASSOCIATE.response原语(见7.1.3.3节)。处理完成后，MAC层将向上层表明其状态信息。如果请求原语开始间接发送，相应的确认原语将用来传递适当的状态值。相反地，如果响应原语开始间接发送，MLME-COMM-STATUS.indication原语将用来传递适当的状态值。通过检查目标地址字段可发现该原语与它的相应的响应原语相关。

包含在间接发送请求中的信息形成一个事务，协调器应该具有最少存储一个事务的能力。设备一旦接收到间接发送请求，但是没有存储另一个事务的容量，MAC层将用适当的相应原语把状态值TRANSACTION_OVERFLOW通报上层。

如果协调器能够存储多个事务，它应确保同一设备的所有事务按照它们到达MAC层的顺序发送。在发送的事务期间，如果有另一个该设备的事务存在，MAC层将把其帧未决子字段设置为1，表示还有另外的未决数据。

每一个设备最多在协调器中的持续时间为macTransactionPersistenceTime。如果在这段时间内事务没有被所对应的设备提取，协调器将丢弃事务信息，并且MAC层将向上层发送一个参数状态为TRANSACTION_EXPIRED的适当相应原语。为了被成功提取，协调器应收到确认帧。

如果事务处理成功，该事务信息将被丢弃，MAC层将向上层发送一个状态为SUCCESS的适当相应原语。

如果协调器发送信标，它将在地址列表字段中列出与每一个事务相关设备的地址，并在信标帧的未决地址规范字段中给出其地址的数量。如果协调器能够存储多于7个的未决事务，它将在其信标帧中以先进先服务的原则进行表明，以确保信标帧最多含有7个地址。对于需要保护时隙发送的事务来说，PAN协调器将不在其信标帧的未决地址列表中加接收者的地址，而是在分配给对应设备的保护时隙（见7.5.7.3节）中发送该事务。

在支持信标的PAN中，如果有一个广播地址未决的事务，信标帧中帧控制字段的帧未决子字段应该设置为1，并且应该在信标之后立即用CSMA-CS算法发送该未决消息。如果还有另外一个广播地址未决的事务，它的发送将被延时到下一个超帧。每一个超帧内只允许发送一个广播消息。

在支持信标的PAN中，当未决地址列表中所包含其地址的设备在接收到信标后，将试图从协调器提取数据。在不支持信标的PAN中，设备收到MLME-POLL.request原语之后将试图从协调器提取数据。在7.5.6.3节中描述了从协调器中提取未决数据的过程。如果设备收到帧未决子字段设置为1的信标，它将打开接收机，时间为macMaxFrameTotalWaitTime符号，以接收来自协调器的广播数据帧。

7.5.6 发送，接收和确认

本节介绍发送，接收和确认的基本过程。

7.5.6.1 发送

每个设备将把它当前的DSN值存储在MAC层PIB属性macDSN中，然后将其初始化为一个随机值。选择随机数的算法超出了本标准的范围。每次产生一个数据帧或者一个MAC命令帧，MAC层将把macDSN的值复制到输出帧MHR的序列号码字段中，然后将其加1。每一个设备都只产生一个DSN，不管它所希望与之通信的设备数是多少。macDSN的值允许循环。

每一个协调器应把它当前的BSN值存储在MAC层PIB属性macBSN中，然后将其初始化为一个随机值。选择随机数的算法超出了本标准的范围。每一次产生信标帧，MAC层将把macBSN的值复制到输出帧MHR的序列号码字段中，然后将其加1。macBSN的值允许循环。

值得注意的是，DSN和BSN都只有8位，因此对于上层来说其用途有限（例如在检测转发帧时的DSN）。

如果存在源地址字段，将包含发送帧的设备地址。当一个设备已经连接并且分配有一个16位的短地址（即macShortAddress的值不等于0xffff或者0xffff）时，它将尽可能的优先使用此短地址，而不是64位的扩展地址（即aExtendedAddress）。当设备没有连接到PAN或者其macShortAddress的值等于0xffff时，它将在所有需要源地址字段的通信中使用其64位的扩展地址。如果源地址字段不存在，则认为帧的发送设备为PAN协调器，目标地址字段中应包含接收者的设备地址。

如果存在目标地址字段，应包含帧的目标接收者的地址，该值可能为16位的短地址，也可能为64位的扩展地址。如果不存在目标地址字段，则认为帧的接收设备为PAN协调器，源地址字段中应包含发送者的地址。

如果目标和源寻址信息都存在，MAC层将对目标和源PAN标识符进行比较。如果二者的PAN标识符相同，帧控制字段中的PAN ID密集子字段将设置为1，在发送帧中将忽略源PAN标识符。如果二者的PAN标识符不相同，帧控制字段中的PAN ID密集子字段将设置为0，发送帧中将包含目标和源PAN标识符字段。如果只存在目标和源寻址信息这二者中的一个，帧控制字段中的PAN ID密集子字段将设置为0，发送帧中将包含该唯一地址的PAN标识符字段。

在支持信标的PAN中发送帧信息，发送设备在发送之前应尝试找到信标。如果没有跟踪到信标（见7.5.4.1节），设备不知道信标在何处出现，因此它将打开接收机并搜索信标，最多持续搜索时间为 $(aBaseSuper-frameDuration * (2^n + 1))$ 符号，其中n为macBeaconOrder的值。如果在这段时间后没有发现信标，设备将在成功执行非时隙CSMA-CA算法之后（见7.5.1.4）发送帧。无论是经过搜索还是跟踪之后发现了信标，设备将在超帧的适当部分发送帧。在竞争期发送帧时，应该在时隙CSMA-CA算法成功执行之后（见7.5.1.4）发送帧，在保护时隙中发送帧不使用CSMA-CA算法。

如果在不支持信标的PAN中发送帧信息，则应在成功执行非时隙CSMA-CA算法之后（见7.5.1.4）发送帧。

不管是支持信标的PAN还是不支持信标的PAN，如果传输是直接的，由上层发送的原语引发，并且CSMA-CA算法失败，上层将得到通知。如果传输是间接的并且CSMA-CA算法失败，帧将会一直保留在事务队列中直到再次请求并且被成功发送，或者直到该事务溢出。

设备将按照7.5.8.2.1节中所述使用输出帧安全过程处理帧信息。

如果输出帧安全过程的状态不是SUCCESS，MLME将发送相应确认原语或者MLME-COMM-STATUS.indication原语，状态参数设置为输出帧安全过程中指示的错误状态。

为了发送帧，MAC层将通过向物理层发送状态为TX_ON的PLME-SET-TRX-STATE.request原语来打开发射机。在接收到状态为SUCCESS或者TX_ON的PLME-SET-TRX-STATE.confirm原语后，将通过发送PD-DATA.request原语来发送帧。最后，在接收到PD-DATA.confirm原语后，MAC层将通过给物理层发送状态为RX_ON或者TRX_OFF的PLME-SET-TRX-STATE.request原语来关闭发射机，取决于接收机是否将在发送之后打开。当帧控制字段的请求确认子字段设置为1时，MAC层将立即在帧发送之后，通过向物理层发送状态为RX_ON的PLME-SET-TRX-STATE.request原语来打开接收机。

7.5.6.2 接收和拒绝

每一个设备都可以选择MAC层是否在空闲时间打开其接收机。在这段空闲时间里，MAC层仍然为来自上层的收发机任务请求提供服务。收发机任务定义为带有确认接收（如果需要）的收发请求。每次收发任务结束时，MAC层将根据macBeaconOrder和macRxOnWhenIdle的值来请求物理层打开或关闭它的接收机。如果macBeaconOrder少于15，只有在输入超帧的CAP空闲时间内才认为macRxOnWhenIdle的值与之相关。如果macBeaconOrder等于15，macRxOnWhenIdle的值将在所有时间里被认为与之相关。

由于无线通信的特性，设备接收机工作时，除接收和解调所有符合此标准，工作在同一信道，且在POS字段的设备所发送的信标外，同时也接收其他发射机对其所产生的干扰信标。因此，MAC层应具有对输入的帧信标进行滤波的能力，滤出上层需要的帧并将其发送给上层。

MAC层作为滤波的第一级，它将丢弃在帧的MFR（见7.2.1.9节）的FCS字段中不包含正确值的所有接收帧。在收到帧时，将通过在其MHR和MAC有效载荷上重新计算预期的FCS，然后将该FCS值与接收到的FCS字段进行比较来检验FCS字段。如果这两个值相同，则认为接收帧的FCS字段是正确的，否则不正确。

滤波的第二级取决于MAC层当前是否工作在混杂模式。在混杂模式下，MAC层在第一级滤波后，将所有的帧直接发送给上层而不进行更多的过滤。如果macPromiscuousMode设置为TRUE，MAC层将工作在混杂模式。

如果MAC层不工作在混杂模式（即macPromiscuousMode设置为FALSE），它将只接收满足下列所有第三滤波条件的帧：

- 帧类型子字段不包含保留帧类型
- 帧版本子字段不包含保留值
- 如果帧中包含目标PAN标识符，则应与macPANId匹配或者为广播PAN标识符（0xffff）

——如果帧中包含短目标地址，它应与macShortAddress匹配或者为广播地址（0xffff）。否则如果帧中包含扩展目标地址，它应与aExtendedAddress匹配。

——如果帧类型表明该帧为信标帧，源PAN标识符应与macPANId匹配，除非macPANId等于0xffff，在这种情况下，无论源PAN标识符为何值，都要接受该信标帧。

——如果在数据帧或者MAC命令帧中仅包含源地址字段，则只有当此设备为PAN协调器，并且源PAN标识符与macPANId匹配时，此帧才会被接收。

如果不满足上述任何一个条件，MAC将丢弃该输入帧，不再对它进行进一步处理。如果满足上述所有条件，才会认为该帧为有效帧并对其进行进一步处理。对于非广播类型的有效帧，如果帧类型子字段表示为数据帧或者MAC命令帧，并且帧控制字段中的确认请求子字段设置为1，MAC层将发送确认帧。在发送确认帧之前，接收到的数据帧或者MAC命令帧中的序列号将被复制到确认帧的序列号中。这样，使事务的发起者得知它已收到了相应的确认帧。

如果帧控制字段中的PAN ID密集子字段设置为1并且帧中包含目标和源寻址信息，MAC层将认为省略的源PAN标识符字段和目标PAN标识符字段相同。

设备将使用7.5.8.2.3节中所述的输入帧安全过程处理该帧。

如果输入帧安全过程的状态不是SUCCESS，MLME将发送相应确认原语或者MLME-COMM-STATUS.indication原语，状态参数设置为输入帧安全过程中指示的错误状态，安全相关参数设置为由非安全处理过程返回的相应参数。

如果有效帧为数据帧，MAC层将把该帧送到上层。该过程可通过发送包含帧信息的MCPS-DATA.indication原语来实现。MCPS-DATA.indication原语的安全相关参数应设置为由非安全处理过程返回的相应参数。

如果有效帧为MAC命令帧或者信标帧，它将被MAC层处理，相应的确认或指示原语将被送到上层。相应的确认或指示原语的安全相关参数将设置为由非安全处理过程返回的相应参数。

7.5.6.3 从协调器提取未决数据

在支持信标的PAN中，设备通过检测所接收到的信标帧内容就能判断PAN协调器是否存在有等待发送给它的信息帧，如7.5.4.1节所述。如果信标帧的地址列表字段中包含设备地址，并且macAutoRequest为TRUE，设备的MLME将在CAP期间给协调器发送一个数据请求命令（见7.3.4节），其中帧控制字段的确认请求子字段设置为1。当正在执行主动或被动扫描时收到信标帧是唯一的例外情况。在如下两种情况下，MLME将给协调器发送数据请求命令。第一种就是当MLME收到MLME-POLL.request原语时。第二种，设备可能在请求命令确认后的macRequestWaitTime符号之后发送数据请求命令，如在连接的过程中。如果数据请求命令将被发送给PAN协调器，则省略目标地址信息。

如果数据请求命令是由MLME-POLL.request原语引发的，MLME将根据该原语的SecurityLevel,KeyIdMode,KeySource和KeyIndex参数执行数据请求命令中的安全进程，如7.5.8.2.1节所述。否则，MLME将根据macAutoRequestSecurityLevel, macAutoRequestKeyIdMode, macAutoRequestKeySource和 macAutoRequestKeyIndex等PIB属性来执行数据请求命令中的安全进程。

协调器一旦成功的接收到数据请求命令，它将发送确认帧来确认接收。如果

协调器在发送确认帧(见7.5.6.4.2节)之前有足够的时间确定设备是否有未决帧,它将把该确认帧的帧控制字段中的帧未决子字段作相应设置,以表示有一个未决的设备帧。如果没有,协调器将把该确认帧的帧未决子字段设置为1。

当收到帧未决子字段设置为0的确认帧时,设备将认为在协调器中没有未决数据。

在支持信标的PAN中,当收到帧未决子字段设置为1的确认帧时,设备将开启它的接收机,其接收时间最多为 $\text{macMaxFrameTotalWaitTime}$ 个CAP符号时间。在不支持信标的PAN中,当收到帧未决子字段设置为1的确认帧时,设备打开接收机,接受协调器发来的相应数据帧。如果在协调器内存在有发送请求设备的未决数据帧时,协调器将使用下面介绍的机制之一给设备发送帧。如果不存在请求设备的未决数据帧,协调器将给设备发送不带请求确认的数据帧,帧中所包含的有效载荷长度为零,表示没有数据,其发送机制如下所述。

在数据请求命令确认之后发送数据帧,将使用下面所述的一个发送机制:

——如果在 $a\text{TurnaroundTime}$ 和 $(a\text{TurnaroundTime} + a\text{UnitBackoffPeriod})$ 符号之间,在退避时隙的边界,MAC层能够开始数据帧的发送,并且在竞争期中还有留给消息,适当的帧间隔和确认帧的剩余时间,则不使用CSMA-CA机制。如果在此数据帧之后没有收到请求的确认帧,则该过程将在收到新的数据请求命令之后重新开始。常量 $a\text{TurnaroundTime}$ 在6.4.1中定义。

——其它情况都采用CSMA-CA机制。

如果在支持信标的PAN中,在 $\text{macMaxFrameTotalWaitTime}$ 个CAP符号时间内,或者在不支持信标的PAN中,数个符号内,请求设备没有收到协调器发来的数据帧,或者收到一个数据帧有效载荷长度为零的数据帧,它将认为协调器中没有未决数据。如果请求设备收到来自协调器的数据帧,如果需要,它将发送一个确认帧来确认接收。

如果收到的协调器发来的数据帧的帧控制字段中的帧未决子字段设置为1,则表明在协调器中还有更多的未决数据。在这种情况下,设备可通过给协调器发送一个新的数据请求命令来提取数据。

7.5.6.4 确认和转发的使用

在帧控制字段的确认请求子字段设置适当时才能发送数据帧或者MAC命令帧。通常在确认请求子字段设置为0时发送信标帧和确认帧。同样地,在确认请求子字段设置为0时发送广播帧。

7.5.6.4.1 无确认

当所发送帧的确认请求子字段设置为0时,发送帧的设备不会得到目标接收设备的确认,因此,发送设备认为该帧发送成功。

表70所示的消息时序图,描述了发送设备发送一个不需要确认的数据帧给接收设备的情况。在这种情况下,发送设备所发送数据帧的确认请求子字段(AR)为0。

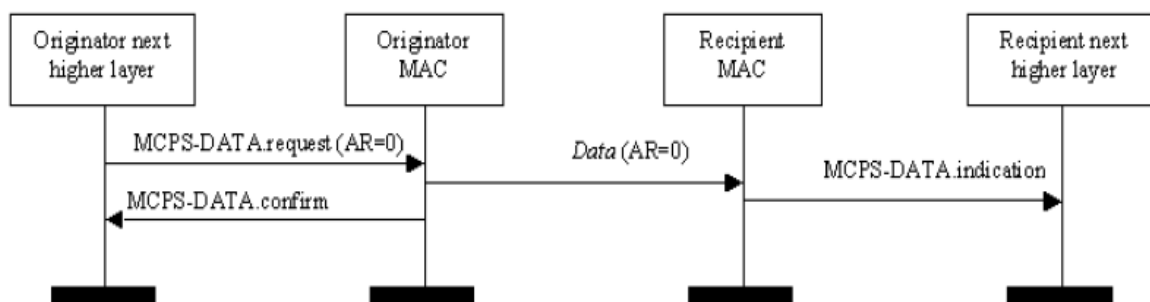


表70 无确认的成功数据发送

7.5.6.4.2 确认

帧控制字段的确认请求子字段设置为1时，接收设备将对发送帧进行确认。如果目标接收设备正确的接收到该帧，它将产生并发送一个确认帧，**该确认帧中的数据顺序编号（DSN）与所确认的数据帧或MAC命令帧相同。**

在不支持信标的PAN中或者在CFP中，将在接收到数据帧或MAC命令帧最后一个符号后的aTurnaroundTime符号时间之后开始发送确认帧。在CAP中，将在接收到数据帧或MAC命令帧最后一个符号后的aTurnaroundTime符号时间之后或者在退避时隙边界开始发送确认帧。在后一种情况下，将在接收到数据帧或MAC命令帧最后一个符号后，在aTurnaroundTime到

(aTurnaroundTime+aUnitBackoffPeriod)个符号之间开始发送确认帧。表22（见6.4.1节）中定义了常量aTurnaroundTime。

图71中的消息时序图描述了在具有确认的情况下，从发送设备向接收设备发送一个数据帧的流程图。这时，发送设备将把发送数据帧的帧控制字段中的确认请求（AR）子字段设置为1，向接收设备表明要求得到确认。

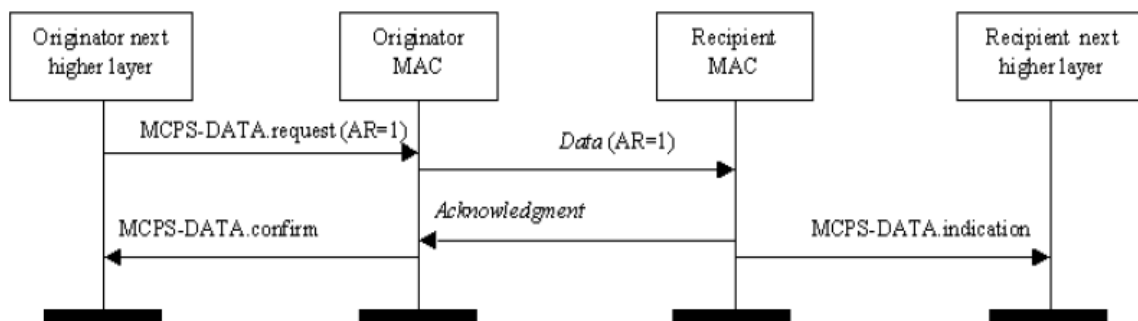


表71 带有确认的数据发送流程图

7.5.6.4.3 重传

发送帧控制字段中的确认请求（AR）子字段设置为0时，发送帧的设备将认为发送帧已经成功被接收，因此不对帧进行重传。

发送确认请求（AR）子字段设置为1的数据帧或MAC命令帧后，发送设备将等待最多macAckWaitDuration符号时间以获得相应的确认帧。如果在macAckWaitDuration符号时间内收到确认帧的DSN与原始发送帧的相同，则认为发送成功，设备不需采取进一步措施。**如果在macAckWaitDuration符号时间内没有收到确认帧，或者该确认帧的DSN与原始发送帧的不相同时，设备将认为发送失败。**

如果发送失败并且以间接的方式发送，协调器将不会重传该数据帧或MAC命令帧。该帧将保留在协调器的事务处理队列中，并只能在收到新的数据请求命

令后才能被提取。如果收到了新的数据请求命令，发送设备将使用与原始发送所用相同的DSN发送该帧。

如果发送失败并且以直接方式发送，设备将重复发送该数据帧或MAC命令帧，并等待确认，重传次数最多为macMaxFrameRetries次。被发送帧将包含与原始发送所使用的相同的DSN。如果重传能够在原始发送的竞争期或者保护间隙内完成时，才能进行重传，如果时间不够，重传将延时到下一次超帧的相同位置。如果在macMaxFrameRetries次重传之后仍然没有收到确认帧，MAC层将认为发送失败并通知上层。

7.5.6.5 混杂模式

设备可通过设置macPromiscuousMode来激活混杂模式。如果要求MLME将macPromiscuousMode设置为TRUE，MLME将发送状态为RX_ON的PLME-SET-TRX-STATE.request原语来请求物理层打开其接收机。

在混杂模式中，MAC层将按照7.5.6.2节所述处理接收帧，并使用MCPS-DATA.indication原语把正确接收到所有帧传给上层。源和目标寻址模式参数都将设置为0x00，MSDU参数应包含MAC有效载荷（见表41）和MHR。msduLength参数应包含与MAC有效载荷和MHR中的字节的个数。参数msduLinkQuality应有效。

如果要求MLME将macPromiscuousMode设置为FALSE，MLME将发送相应状态的PLME-SET-TRX-STATE.request原语（见6.2.2.7节）来请求物理层将其接收机设置为macRxOnWhenIdle所要求的状态。

7.5.6.6 发送情况

由于无线媒介的不完美性，发送的帧不可能总能到达目的地。图72描述了三种数据发送的情况：

（1）数据成功发送。发送设备的MAC层通过物理层数据服务将数据帧发送给接收设备。在等待确认时，发送设备的MAC层启动计时器，并且在等待macAckWaitDuration符号时间之后指出超时。接受设备的MAC层接收到数据帧之后将发送一个确认帧给发送设备，并将该数据帧发送给上层。发送设备的MAC层在计时器超时之前接收到来自接收设备的确认后，将关闭并复位计时器。此时数据发送结束，发送设备的MAC层向上层发送成功确认信息。

（2）数据帧丢失。发送设备的MAC层通过物理层数据服务将数据帧发送给接收设备。在等待确认时，发送设备的MAC层启动计时器，并且在等待macAckWaitDuration符号时间之后指出超时。如接受设备的MAC层没有接收到数据帧，则不进行确认响应。若发送设备的MAC层计时器在接收到确认之前超时，则数据发送失败。如果是直接发送，发送设备将重传数据，整个序列可最多重传macMaxFrameRetries次。如果该数据发送失败次数达到(1+macMaxFrameRetries)，则发送设备的MAC层将向上层发送失败确认信息。如果是间接发送，数据帧将留在事务处理队列中直到收到新的对该数据的请求并正确确认，或者直到macTransactionPersistenceTime时间到。如果该时间到，将丢弃该发送消息，MAC层将向上层发送失败确认信息。

(3) 确认帧丢失。发送设备的MAC层通过物理层数据服务将数据帧发送给接收设备。在等待确认时，发送设备的MAC层启动计时器，并且在等待macAckWaitDuration符号时间之后指出超时。接受设备的MAC层接收到数据帧之后将发送一个确认帧给发送设备，并将该数据帧发送给上层。发送设备的MAC层没有接收到确认帧，并且计时器超时，则数据发送失败。如果是直接发送，发送设备将重传数据，整个序列可最多重传macMaxFrameRetries次。如果该数据发送失败次数达到（1+macMaxFrameRetries），则发送设备的MAC层将向上层发送失败确认信息。如果是间接发送，数据帧将留在事务处理队列中直到收到新的对该数据的请求并正确确认，或者直到macTransactionPersistenceTime时间到。如果该时间到，将丢弃该发送消息，MAC层将向上层发送失败确认信息。

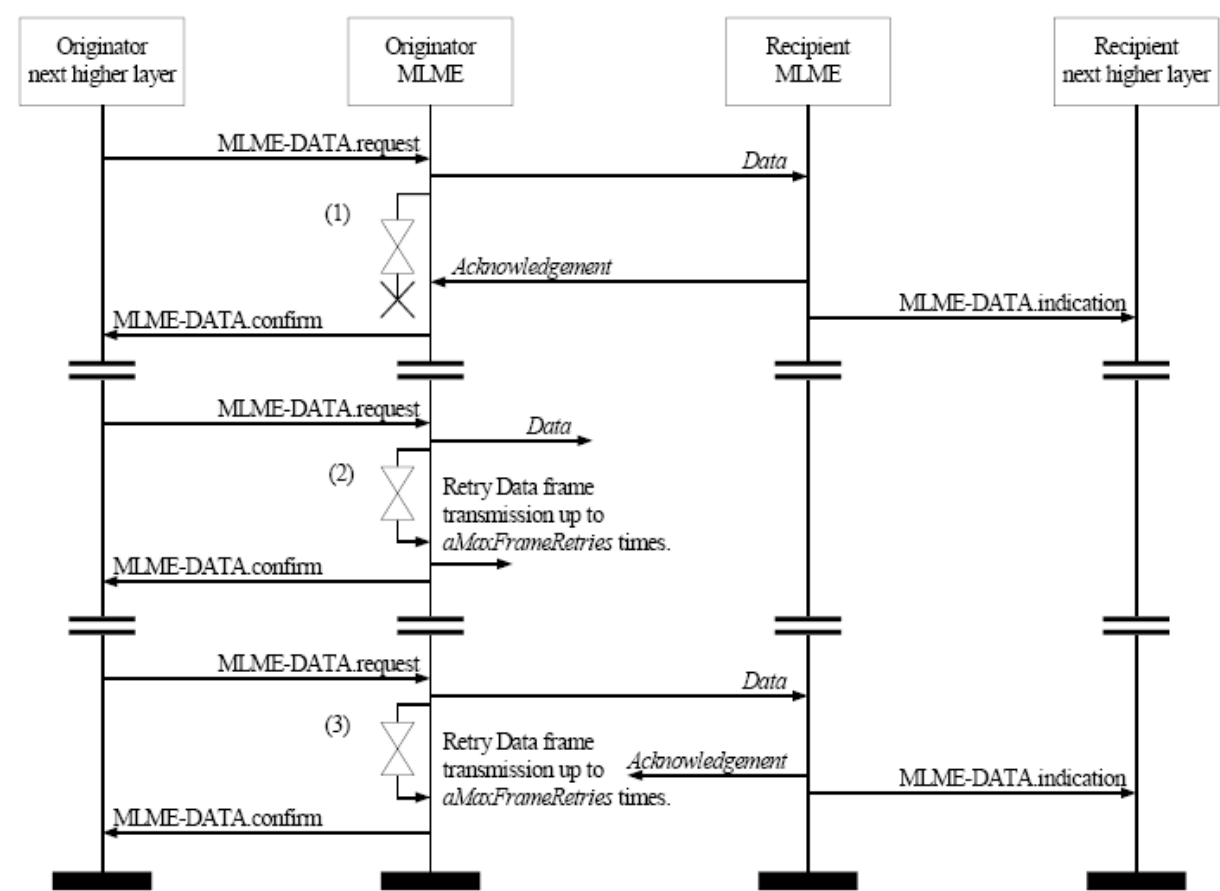


表72 发送情况

7.5.7 保护时隙（GTS）的分配与管理

在信道中，保护时隙允许设备在所指定的部分超帧内工作，该部分超帧指定给这个设备专用。保护时隙只能由PAN协调器分配，并且只能用于PAN协调器和设备之间的通信。单个的保护时隙可扩展一个或多个超帧时隙。只要超帧有足够的容量，PAN协调器可在同一时间分配7个保护时隙。

PAN协调器在使用保护时隙前应先分配保护时隙。是否分配保护时隙应根据保护时隙的请求和在超帧中当前可用容量的情况来决定，保护时隙的分配原则是先来先服务，所有的保护时隙应该连续的放置在超帧的结尾，并在竞争期之后。当不再需要保护时隙时，PAN协调器和最初请求该保护时隙的设备可随时释放该

保护时隙。分配了保护时隙的设备也可在竞争期内工作。

在分配的保护时隙中**发送数据帧**时，仅使用它的**短地址**。

PAN协调器负责保护时隙的管理。为了方便保护时隙的管理，PAN协调器应该能够存储管理**7个保护时隙**的所有必要信息。这些必要信息为保护时隙的起始时隙，长度，方向和连接设备地址。

保护时隙的方向，与拥有该保护时隙的设备的**数据流**有关，它以**发送**或者**接收**来定义，因此，设备地址和方向能唯一确定一个保护时隙。

每一个设备可请求一个**发送GTS**和/或者一个**接收GTS**。对于每一个所分配的GTS，设备将存储它的**起始时隙，长度和方向**。如果分配给设备一个**接收GTS**，则在整个保护时隙期间，设备将打开其接收机。同样的，如果分配给设备一个**发送GTS**，则在整个保护时隙期间，PAN协调器将打开它的接收机。**如果在接收保护时隙期间收到数据帧，并且要求确认，设备将像平常一样发送确认帧。类似的，设备应能够在发送保护时隙期间接收确认帧。**

设备只有在**当前跟踪信标**的时候，才会分配和使用保护时隙。MLME通过TrackBeacon参数设置为TRUE的MLME-SYNC.request原语来跟踪信标。**如果设备失去与PAN协调器的同步，则将丢失所有分配给它的保护时隙。**

保护时隙的使用是可选的。

7.5.7.1 竞争期 (CAP) 维护

PAN协调器将保持**最小竞争期长度为aMinCAPLength**，如果最小的竞争期不能满足时，应采取预防措施。然而，为了对保护时隙进行维护时，允许暂时增加信标帧长度。如果需要采取预防措施，则将实施这些措施，这些措施可能包括下述的一个或多个方法：

1. 限制在信标中未决地址的数量；
2. 在信标帧内不包含载荷字段；
3. 释放一个或多个时隙。

7.5.7.2 保护时隙 (GTS) 的分配

设备通过**MLME-GTS.request**原语命令**请求分配一个新的保护时隙**，并根据应用的**需要设置保护时隙的特性**。

为了请求分配一个新的保护时隙，MLME将给PAN协调器发送保护时隙请求命令（见7.3.9节）。请求命令的GTS特性字段中的特性类型子字段设置为1（GTS分配），并根据所需的GTS特性设置其长度和方向字段。因为GTS请求命令包含确认请求（见7.3.3.1节），PAN协调器应发送一个确认帧来确认接收。

PAN协调器一旦收到表明GTS分配请求的命令后，将首先根据竞争期中所剩余的**长度和请求的GTS长度**，检查在当前超帧中是否有足够的容量。如果没有达到保护时隙的最大数目，并且所需分配长度的GTS不会将竞争期的长度减少到小于aMinCAPLength,则超帧具有有效的容量。只要PAN协调器能有效地提供足够的宽度，就会根据**先来先服务**的原则**分配保护时隙**。PAN协调器应在aGTSDescPersistenceTime超帧时间内作出分配保护时隙的决定。

设备一旦接收到GTS请求命令的确认后，将继续跟踪信标，并最多等待

aGTSDescPersistenceTime超帧时间，如果在这段时间内，没有在信标中出现给该设备的GTS描述符，则MLME将发送状态为NO_DATA的MLME-GTS.confirm原语（见7.1.7.2节），通知上层GTS请求命令失败。

当PAN协调器确定有足够的容量满足GTS的请求时，将产生一个带有请求规范和请求设备16位短地址的GTS描述符。如果成功分配GTS，PAN协调器将把GTS描述符中的起始时隙设置为GTS起始的超帧时隙，把GTS描述符中的长度设置为GTS的长度。除此之外，PAN协调器通过MLME发送带有已分配的GTS特性的MLME-GTS.indication原语（见7.1.7.3节），通知上层有新的GTS分配。如果没有足够的容量分配所要求的GTS，起始时隙将设置为0，长度将设置为目前支持的最大的GTS长度。PAN协调器将在其信标帧中包含此GTS描述符，并对信标帧的GTS规范子字段作相应的更新。PAN协调器还将更新信标帧的超帧规范字段中的最终竞争期时隙子字段，表明减少的CAP所使用的最终超帧时隙。GTS描述符将在信标帧中保留aGTSDescPersistenceTime个超帧时间，此后，它将被自动删除。允许PAN协调器把竞争期降低至aMinCAPLength以下，以满足包含GTS描述符造成的信标帧长度的暂时增加。

设备收到相应macShortAddress所包含的GTS描述符的信标帧之后，将处理该描述符。设备通过MLME发送MLME-GTS.confirm原语通知上层是否成功分配GTS。如果GTS描述符中的起始时隙大于0，原语的状态为SUCCESS；如果起始时隙等于0或者长度与所请求的长度不相等，状态为DENIED。

7.5.7.3 GTS 的使用

当设备的MAC层收到的MCPS-DATA.request原语（见7.1.1.1节）时，其参数TxOptions表明GTS发送，设备将确认它是否为有效的GTS。如果MAC层发现有效的GTS，将在GTS期间（即在起始时隙到起始时隙加上其长度的时间之内）发送数据。此时，只要请求任务能够在GTS结束之前完成，MAC层将立即发送MPDU，而不使用CSMA-CA机制。如果请求任务不能在当前的GTS结束之前完成，则MAC层将把发送延时直到下一个超帧中所指定的GTS。值得注意的是，MAC层必须允许物理层（见6.7.2.2）作出此决定。

如果设备有任何接收GTS，MAC层将确保接收机在GTS启动之前和GTS期间都处于接收状态，起始时隙和长度决定GTS的持续时间。

当协调器的MAC层收到的MCPS-DATA.request原语（见7.1.1.1节）时，其参数TxOptions表明GTS发送，协调器将确定它是否有一个与请求目标地址设备相应的有效接收GTS。如果发现有效GTS，PAN协调器将延时发送直到接收GTS开始的时候。在这种情况下，带有要求GTS传输信息的设备的地址不加入信标帧未决地址列表中（见7.5.5节）。在接收GTS开始的时候，只要请求任务能够在GTS结束之前完成，MAC层将立即发送数据，而不使用CSMA-CA机制。如果请求任务不能在当前的GTS结束之前完成，则MAC层将把发送延时直到下一个超帧中所指定的GTS。

对于所有分配的发送GTS（设备相关），PAN协调器的MAC层应确保接收机在GTS启动之前和GTS期间都处于接收状态。

在GTS中开始发送之前，每一个设备都将确保数据发送，确认（如果需要）和IFS（与数据帧的大小相当）能够在GTS结束之前完成。

如果设备在超帧开始时丢失了信标，将不能使用GTS，只有正确的接收到了后续的信标后才能使用。如果由于丢失信标而造成失去同步，设备将认为所有的GTS都被释放。

7.5.7.4 GTS 的释放

设备通过MLME-GTS.request原语（见7.1.7.1节）请求释放已存在的保护时隙，在原语中使用所希望释放的GTS的特性。此后，设备将其存储的特性进行复位，因此，设备将不再使用所释放的保护时隙。

为了请求释放已存在的保护时隙，MLME将向PAN协调器发送保护时隙请求命令（见7.3.9节）。请求命令的GTS特性字段中的特性类型子字段设置为0（即GTS释放），并根据所释放的GTS特性设置其长度和方向字段。因为GTS请求命令包含确认请求（见7.3.3.1节），PAN协调器应发送一个确认帧来确认接收。收到GTS请求命令的确认之后，MLME将发送MLME-GTS.confirm原语（见7.1.7.2节）来通知上层，原语参数的状态为SUCCESS,并且GTSCharacteristics参数的特性类型子字段设置为0。如果PAN协调器没有正确接收到GTS请求命令，它将根据7.5.7.6节中所描述的过程来确定设备是否已经停止使用保护时隙。

PAN协调器接收到GTS特性字段中的特性类型子字段设置为0（GTS释放）的GTS请求命令后，将尝试释放GTS。如果GTS请求命令中包含的GTS特性与已知的GTS特性不匹配，PAN协调器将忽略该请求命令。如果GTS请求命令中包含的GTS特性与已知的GTS特性匹配，PAN协调器的MLME将释放所指定的GTS，并把此变化通知上层。MLME通过发送MLME-GTS.indication原语（见7.1.7.3节）来通知上层，原语的参数包含所释放的GTS特性参数GTSCharacteristics,并且原语的特性类型子字段设置为0。PAN协调器还要更新信标帧得超帧规范字段中的最终CAP时隙子字段值，表明增加的竞争期所使用的最终超帧时隙。它不会在信标帧中加一个描述符来描述该释放过程。

来自上层的释放请求，GTS的终止（见7.5.7.6节），或者要求维护最小CAP长度aMinCAPLength（见7.5.7.1节）的维护请求都能够引发PAN协调器执行GTS的释放。

当GTS的释放由PAN协调器的上层引起时，MLME将收到MLME-GTS.request原语，该请求命令的GTS特性字段设置为0（即GTS释放），其长度和方向字段根据所要释放的GTS进行设置。

当因为GTS终止或者CAP维护而使由PAN协调器开始GTS的释放时，MLME将通过发送MLME-GTS.indication原语（见7.1.7.3节）来把此变化通知上层，原语的参数包含所释放的GTS特性参数GTSCharacteristics,并且原语的特性类型子字段设置为0。

不管是哪一种情况引起了PAN协调器执行释放，PAN协调器将释放该GTS，并在信标帧中加入与所释放的GTS相对应的GTS描述符，但他的起始时隙设置为0。描述符将在信标帧中保留aGTSDescPersistenceTime个超帧时间。允许PAN协调器将其竞争期降低至aMinCAPLength以下，以便用来容纳由于包含GTS描述符所造成的信标帧长度的暂时增加。

设备一旦收到包含GTS描述符的信标帧，该描述符具有相应的macShortAddress，并且起始时隙等于0，将立即停止使用该GTS。设备的MLME

将通过发送MLME-GTS.indication原语来把此释放通知上层，原语的参数包含所释放的GTS特性参数GTSCaracteristics,并且原语的特性类型子字段设置为0。

7.5.7.5 GTS 的重新分配

保护时隙的释放可能导致超帧变得破碎。例如，图73所示描述了分配保护时隙的3个阶段。在第1阶段，分别在14，10和8时隙，分配3个保护时隙。在第2阶段，如果释放GTS2，则在超帧中存在一个时隙，不会进行任何事务的处理。为了解决这个问题，在第3阶段，必须移动GTS3来弥补这个间隙，因此，加了CAP的长度。

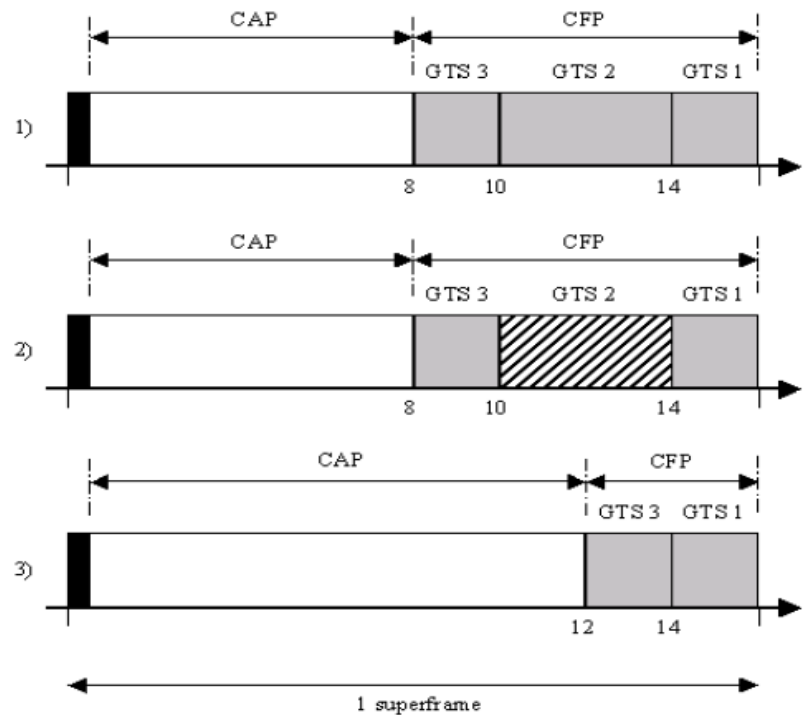


表73 GTS释放后CFP消除碎片

PAN协调器将确保删除由于释放GTS在CFP中所产生的间隙，以保持CAP长度最大。

当PAN协调器释放一个GTS时，它将在信标帧中加一个GTS描述符，表示已经释放GTS。如果设备执行了GTS的释放，PAN协调器将不会在信标帧中加GTS描述符来表明该GTS的释放。对于每一个所分配的GTS比起始时隙所释放的GTS的起始时隙更晚的设备来说，PAN协调器将用新的起始时隙来更新GTS，并在信标帧中加所调整的GTS对应的描述符。如果GTS出现在CFP的末端或者CFP中的下一个GTS的开始，将计算新的起始时隙，以便在该GTS和CFP的两个端点之间没有空余。

在同一时间内，如果发生多个重新分配GTS的情况，PAN协调器可能选择分步骤的方式来进行重新分配。PAN协调器将在它的信标中保留每一个描述符，时间为aGTSDescPersistenceTime个超帧。

一旦设备收到的信标帧包含有一个与macShortAddress相应的描述符，并且方向和长度与它的一个GTS相对应时，将根据该GTS描述符来调节GTS的起始时

隙，并立即开始使用该GTS。

对于PAN协调器，如果在信标中包括GTS描述符是必需的，它将允许PAN协调器将其竞争期降低至aMinCAPLength以下，以便用来容纳信标帧长度的暂时增加。在aGTSDescPersistenceTime个超帧时间之后，PAN协调器将从信标中删除GTS描述符。

7.5.7.6 GTS 的期限

PAN协调器的MLME将试图通过下面的规则检测设备什么时候停止使用GTS：

——对于发送GTS，如果PAN协调器至少在每个2*n个超帧的GTS中没有接收到来自设备的数据帧，协调器的MLME将认为设备不再使用该GTS。

——对于接收GTS，如果PAN协调器至少在每个2*n个超帧没有接收到来自设备的确认帧，协调器的MLME将认为设备不再使用该GTS。如果GTS发送的数据帧没有请求确认帧，PAN协调器的MLME将不能检测是否在使用它的接收GTS。但是，PAN协调器能够在任何时候释放GTS。

其中n的值为：

$$n = 2^{(8 - \text{macBeaconOrder})} \quad 0 \leq \text{macBeaconOrder} \leq 8$$

$$n = 1 \quad 9 \leq \text{macBeaconOrder} \leq 14$$

7.5.8 帧安全

当上层要求对帧进行安全处理时，MAC层负责为特定的输入输出帧提供安全服务。此标准支持下列安全服务（定义见5.5.6节）：

- 数据加密性
- 数据认证
- 重放保护

关于确定如何提供安全服务的信息见安全相关的PIB属性（见7.6.1节表88）。

7.5.8.1 安全相关的 MAC PIB 属性

安全相关的MAC PIB属性包括：

- 密钥表（macKeyTable, macKeyTableEntries）
- 设备表（macDeviceTable, macDeviceTableEntries）
- 最低安全级别表（macSecurityLevelTable, macSecurityLevelTableEntries）
- 帧计数器（macFrameCounter）
- 自动请求属性（macAutoRequestSecurityLevel, macAutoRequestKeyIdMode, macAutoRequestKeySource, macAutoRequestKeyIndex）
- 默认密钥源（macDefaultKeySource）
- PAN协调器地址（macPANCoordExtendedAddress,

macPANCoordShortAddress)

7.5.8.1.1 密钥表

密钥表保存着输入输出帧的安全处理所要求的密钥描述符(带有相关的指定密钥的信息)。密钥表中指定的密钥信息是根据请求原语或者接收帧所明确包含的信息来识别的。该原语在接收帧在输出帧密钥修复过程(见7.5.8.2.2节),或输入帧安全材料修复过程(见7.5.8.2.4节)和密钥描述符查找过程(见7.5.8.2.5节)中都有介绍。

7.5.8.1.2 设备表

设备表保存着设备描述符(指定的设备寻址信息和安全相关信息)。当和密钥表中指定的密钥信息结合时,设备描述符提供安全输出帧(见7.5.8.2.1节)和非安全输入帧(见7.5.8.2.3节)所需的所有密钥材料。设备表中指定的设备信息是根据设备描述符查找过程(见7.5.8.2.7节)所描述的帧发送设备和黑名单检查过程(见7.5.8.2.6节)中所介绍的指定的密钥信息来识别的。

7.5.8.1.3 最低安全级别表

最低安全级别表保存设备希望帧发送设备根据帧类型(如果是MAC命令帧则为命令帧标识符)所使用的最低安全级别的相关信息。如果帧没有被充分保护,该输入帧的安全处理将会失败,如输入帧安全过程(见7.5.8.2.3节)和输入帧安全级别检查过程(见7.5.8.2.8节)所述。

7.5.8.1.4 帧计数器

帧计数器为四字节,用来为安全输出帧提供重放保护和密码构件的语义安全。每个安全帧都包含帧计数器,并且帧计数器也是接收设备非安全操作所需要的基础之一。正如输出帧安全过程(见7.5.8.2.1节)所述,每次输出帧被保护时帧计数器都会增加。当帧计数器达到它的最大值 0xffffffff时,将不能再使用连接的密钥材料,因此所有与该设备连接的密钥都要求进行更新。这样就提供了一种机制,确保每一个帧的密钥材料都是唯一的,也保持了连续的更新。

7.5.8.1.5 自动请求属性

自动请求属性保存了对自动产生而不是由上层原语产生的输出帧进行保护所需要的所有信息,自动数据请求也是这种情况。

7.5.8.1.6 默认密钥源

默认密钥源是安全帧的发送者和接收者所共有的信息。当和包含在请求原语或者接收帧中的另外的信息结合时,允许发送设备或者接收设备分别决定保护该帧或者不保护该帧所需要的密钥。这样就提供了一种机制,有效减轻了特殊用途情况下保护帧中所包含的安全信息的过量(见7.5.8.2.2节和7.5.8.2.4节)。

7.5.8.1.7 PAN协调器地址

PAN协调器地址是PAN内所有设备共享的信息。当和包含在请求原语或者接收帧中的另外的信息结合时,允许PAN协调器定向帧的发送设备或者PAN协调器所产生帧的接收设备分别决定保护该帧或者不保护该帧所需要的密钥和相关安全信息(见7.5.8.2.2节和7.5.8.2.4节)。

7.5.8.2 功能描述

设备可选择地执行保护。不执行保护的设备既不能为MAC层执行输入和输出帧密码转换提供有效机制,也不能要求与安全连接的任何PIB属性。执行保护

的设备能够为MAC层执行输入和输出帧密码转换提供有效机制。当 macSecurityEnabled属性设置为TRUE时，使用与安全连接的PIB属性中的信息。

如果要求MAC层发送帧或者接收一个输入帧，MAC层将分别按照7.5.8.2.1节和 7.5.8.2.3节所述处理该帧。

7.5.8.2.1 输出帧安全处理过程

此过程的输入是要被保护的帧、SecurityLevel、KeyIdMode、KeySource 和 KeyIndex 等来自发送原语或者自动请求 PIB 属性的参数,输出是该过程的状态,如果状态为 SUCCESS, 则为已被保护的帧。

输出帧安全处理过程包含如下几个步骤:

- a) 如果将要被保护的帧的帧控制字段中的安全使能子字段设置为 0, 则安全级别将设置为 0。
- b) 如果将要被保护的帧的帧控制字段中的安全使能子字段设置为1, 则安全级别将设置为参数SecurityLevel。如果结果安全级别为0, 则该过程将返回状态 UNSUPPORTED_SECURITY。
- c) 如果macSecurityEnabled属性设置为FALSE并且安全级别不等于0, 则该过程将返回状态UNSUPPORTED_SECURITY。
- d) 该过程将检查将要被保护的帧是否满足MAC帧的最大长度要求, 具体如下:
 - 1) 如果安全级别等于0, 该过程将把字节为单位的鉴定字段的长度M设置为0, 并检查安全级别的值, 否则查表95。
 - 2) 该过程将使用KeyIdMode和安全级别检查字节为单位的辅助安全头的长度 AuxLen。
 - 3) 该过程将把数据长度扩展定义为AuxLen+M。
 - 4) 该过程将检查将要被保护的帧的长度, 包括数据扩展和FCS, 是否小于等于 aMaxPHYPacketSize。如果不是, 将返回状态FRAME_TOO_LONG。
- e) 如果安全级别等于0, 该过程将把已保护的帧设置给将要被保护的帧, 并返回这个已被保护的帧和状态SUCCESS。
- f) 该过程将把帧计数器设置为属性macFrameCounter。如果帧计数器的值为 0xffffffff, 将返回状态COUNTER_ERROR。
- g) 该过程将使用7.5.8.2.2中节所述的输出帧密钥修补过程获得密钥。如果失败, 将返回状态UNAVAILABLE_KEY。
- h) 该过程将在帧中插入辅助安全头, 字段设置如下:
 - 1) 安全控制字段的安全级别子字段设置为安全级别。
 - 2) 安全控制字段的密钥标识符模式子字段设置为参数KeyIdMode。
 - 3) 帧计数器字段设置为帧计数器。
 - 4) 如果参数KeyIdMode的值不等于0, 密钥标识符字段的密钥源子字段和密钥索引子字段分别设置为参数KeySource和参数KeyIndex。
- i) 该过程将使用aExtendedAddress, 帧计数器, 安全级别和密钥根据安全操作(见 7.6.3.4节)中所介绍的转换过程CCM*[CCM的扩展, 与CBC-MAC结合在一起的计数器(即密码块链消息鉴定码)]来产生受保护的帧。
 - 1) 如果参数SecurityLevel指定要加密(见7.6.2.2.1节表95), 则只能在MAC有效载荷中的TRUE实有效载荷字段[即信标有效载荷字段(见7.2.2.1.8节),

命令有效载荷字段（见7.2.2.4.3节）或者数据有效载荷字段（见7.2.2.2.2节），取决于帧类型]中应用加密操作。相应的有效载荷字段将和未保护有效载荷（见7.6.3.4.2节表97）一样被送到7.6.3.4节中所介绍的转换过程CCM*。已被加密的有效载荷将取代原始的有效载荷。

2) 帧的MAC有效载荷部分中的保留字段将和无有效载荷字段（见表97）一样被送到7.6.3.4所介绍的转换过程CCM*。

3) MAC有效载荷中，加密的顺序和精确方式，完整操作，已加密数据或完整码的放置等，都在7.6.3.4节中有定义。

j) 该过程将把帧计数器加1，并把属性macFrameCounter设置为已处理的值。

k) 该过程将返回已被保护的帧和状态SUCCESS。

7.5.8.2.2 输出帧密钥修补过程

此过程的输入是要被保护的帧、KeyIdMode、KeySource和KeyIndex等来自发送原语的参数，输出是通过或者失败的状态，如果通过，则返回密钥。

输出帧密钥修补过程包含如下几个步骤：

- a) 如果参数KeyIdMode设置为0x00(暗示密钥鉴定)，此过程将按照如下步骤检查密钥查找数据和密钥查找尺寸：
 - 1) 如果帧的帧控制字段中的目标地址模式子字段设置为0x00，并且属性macPANCoordShortAddress设置为0x00000到0xffffd字段（即短地址被使用）的值，密钥查找数据将设置为与2字节的macPANCoordShortAddress属性正确连接（见B.2.1节）的2字节源PAN标识符字段，macPANCoordShortAddress属性又与单字节0x00正确连接。密钥查找尺寸设置为5。
 - 2) 如果帧的帧控制字段中的目标地址模式子字段设置为0x00，并且属性macPANCoordShortAddress设置为0xfffe（即扩展地址被使用），密钥查找数据将设置为与单字节0x00正确连接的8字节的macPANCoordExtendedAddress属性。密钥查找尺寸设置为9。
 - 3) 如果帧的帧控制字段中的目标地址模式子字段设置为0x02，密钥查找数据将设置为与2字节的帧目标地址字段正确连接（见B.2.1节）的2字节源PAN标识符字段，帧目标地址字段又与单字节0x00正确连接。密钥查找尺寸设置为5。
 - 4) 如果帧的帧控制字段中的目标寻址模式子字段设置为0x03，密钥查找数据将设置为与单字节0x00正确连接的8字节的帧目标地址字段。密钥查找尺寸设置为9。
- b) 如果参数KeyIdMode不等于0x00(明显密钥鉴定)，此过程将按照如下步骤检查密钥查找数据和密钥查找尺寸：
 - 1) 如果参数KeyIdMode设置为0x01，密钥查找数据将设置为与单字节参数KeyIndex正确连接的8字节属性macDefaultKeySource。密钥查找尺寸设置为9。
 - 2) 如果参数KeyIdMode设置为0x02，密钥查找数据将设置为与单字节参数KeyIndex正确连接的4字节参数KeySource。密钥查找尺寸设置为5。
 - 3) 如果参数KeyIdMode设置为0x03，密钥查找数据将设置为与单字节参数

KeyIndex正确连接的8字节参数KeySource。密钥查找尺寸设置为9。

- c) 此过程将通过把密钥查找数据和密钥查找尺寸送到 7.5.8.2.5 节所述的密钥描述符查找过程来获得 KeyDescriptor。如果失败,此过程也将以失败状态返回。
- d) MAC 层应该把密钥设置为 KeyDescriptor 的关键部分。
- e) 如果获得密钥标识符和密钥,此过程将以通过状态返回。

注意:对于广播帧,如果用到暗示密钥鉴定,输出帧密钥修补过程将会失败。因此广播帧应该使用明显密钥鉴定。

7.5.8.2.3 输入帧保护过程

此过程的输入是将被解除保护的帧,输出为已被解除保护的帧,安全级别,密钥标识符模式,密钥源,密钥索引和该过程的状态。此过程的所有输出都认为是无效的,除非明确设置。上层确定 PIB 属性,这些 PIB 属性把 macKeyTable 中的 KeyDescriptors 与单一设备或者一组设备连接。

输入帧保护过程包含如下几个步骤:

- a) 如果该帧的帧控制字段中的安全使能子字段设置为 0,安全级别将设置为 0。
- b) 如果该帧的帧控制字段中的安全使能子字段设置为1,并且帧控制字段中的帧版本子字段设置为0,则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧,并返回该已被解除保护的帧,安全级别,密钥标识符模式,密钥源,密钥索引和状态UNSUPPORTED_LEGACY。
- c) 如果该帧的帧控制字段中的安全使能子字段设置为1,安全级别和密钥标识符模式将设置为该帧辅助安全头的安全控制字段中的相应子字段,密钥源和密钥索引将设置为该帧辅助安全头的密钥标识符字段中的相应子字段,如果存在。如果最后安全级别为0,则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧,并返回该已被解除保护的帧,安全级别,密钥标识符模式,密钥源,密钥索引和状态UNSUPPORTED_SECURITY。
- d) 如果属性macSecurityEnabled设置为FALSE,并且安全级别等于0,则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧,并返回该已被解除保护的帧,安全级别,密钥标识符模式,密钥源,密钥索引和状态SUCCESS。否则返回该已被解除保护的帧,安全级别,密钥标识符模式,密钥源,密钥索引和状态UNSUPPORTED_SECURITY。
- e) 此过程将检查该将被解除保护的帧是否达到最低安全级别,此检查过程通过将安全级别,帧类型,如果该帧为MAC命令帧还有MAC有效载荷的第一个字节(即MAC命令帧的命令帧标识符)送到7.5.8.2.8节中所介绍的输入安全级别检查过程来实现。如果失败,将把已解除保护的帧设置为将被解除保护的帧,并返回该已被解除保护的帧,安全级别,密钥标识符模式,密钥源,密钥索引和状态IMPROPER_SECURITY_LEVEL。
- f) 如果安全级别设置为0,则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧,并返回该已被解除保护的帧,安全级别,密钥标识符模式,密钥源,密钥索引和状态SUCCESS。
- g) 此过程将使用7.5.8.2.4节中所介绍的输入帧安全材料修补过程来获得 KeyDescriptor, DeviceDescriptor和KeyDeviceDescriptor。如果失败,则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧,并返回该已被解除保护的帧,安全

- 级别，密钥标识符模式，密钥源，密钥索引和状态UNAVAILABLE_KEY。
- h) 此过程将检查该将被解除保护的帧是否遵守密钥使用政策，此检查过程通过将KeyDescriptor，帧类型，如果该帧为MAC命令帧还有MAC有效载荷的第一个字节（即MAC命令帧的命令帧标识符）送到7.5.8.2.9节中所介绍的输入密钥使用政策检查过程来实现。如果失败，将把已解除保护的帧设置为将被解除保护的帧，并返回该已被解除保护的帧，安全级别，密钥标识符模式，密钥源，密钥索引和状态IMPROPER_KEY_TYPE。
 - i) 如果DeviceDescriptor的免除部分设置为FALSE，并且上述e步骤中的输入安全级别检查过程的输出为状态“有条件通过”，则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧，并返回该已被解除保护的帧，安全级别，密钥标识符模式，密钥源，密钥索引和状态IMPROPER_SECURITY_LEVEL。
 - j) 帧计数器将设置为该将被解除保护的帧的辅助安全头中的帧计数器字段。如果帧计数器的值为0xffffffff，则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧，并返回该已被解除保护的帧，安全级别，密钥标识符模式，密钥源，密钥索引和状态COUNTER_ERROR。
 - k) 此过程将检查帧计数器是否大于等于DeviceDescriptor的FrameCounter部分。如果不是，则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧，并返回该已被解除保护的帧，安全级别，密钥标识符模式，密钥源，密钥索引和状态COUNTER_ERROR。
 - l) 然后此过程将根据安全操作（见7.6.3.5节）中介绍的CCM*逆转换过程，使用DeviceDescriptor的ExtAddress部分，帧计数器，安全级别和KeyDescriptor的Key部分来产生已解除保护的帧。
 - 1) 如果安全级别要求使用加密（见7.6.2.2.1节表95），则只能在MAC有效载荷中的TRUE实有效载荷字段[即信标有效载荷字段（见7.2.2.1.8节），命令有效载荷字段（见7.2.2.4.3节）或者数据有效载荷字段（见7.2.2.2.2节），取决于帧类型]中应用加密操作。相应的有效载荷字段将和保护有效载荷（见7.6.3.4.2节表97）一样被送到7.6.3.4节所介绍的CCM*逆转换过程。
 - 2) 帧的MAC有效载荷部分中的保留字段将和非有效载荷字段一样被送到7.6.3.5所介绍的CCM*逆转换过程。
 - m) 如果CCM*逆转换过程失败，则已解除保护的帧将设置为将被解除保护的帧，并返回该已被解除保护的帧，安全级别，密钥标识符模式，密钥源，密钥索引和状态SECURITY_ERROR。
 - n) 该过程将把帧计数器加1，并把DeviceDescriptor的FrameCounter部分设置为结果值。
 - o) 如果FrameCounter等于0xffffffff，KeyDeviceDescriptor的Blacklisted部分将作相应设置。
 - p) 返回该已被解除保护的帧，安全级别，密钥标识符模式，密钥源，密钥索引和状态SUCCESS。

7.5.8.2.4 输入帧安全材料修补过程

此过程的输入是将被解除保护的帧，输出为通过或者失败的状态，如果通过，则为一个KeyDescriptor，一个DeviceDescriptor和KeyDeviceDescriptor。

输入帧安全材料修补过程包含如下几个步骤:

- a) 如果帧的辅助安全头的安全控制字段中的密钥标识符模式子字段设置为0x00(暗示密钥鉴定), 则此过程将按照如下步骤检查密钥查找数据和密钥查找尺寸:
 - 1) 如果帧控制字段中的源地址模式设置为0x00, 并且属性macPANCoordShortAddress设置为0x0000到0xfffd范围(即短地址被使用)内的值时, 密钥查找数据将设置为与2字节的macPANCoordShortAddress属性正确连接(见B.2.1节)的2字节目标PAN标识符字段, macPANCoordShortAddress属性又与单字节0x00正确连接。密钥查找尺寸设置为5。
 - 2) 如果帧控制字段中的源地址模式设置为0x00, 并且属性macPANCoordShortAddress设置为0xfffe(即扩展地址被使用), 密钥查找数据将设置为与单字节0x00正确连接的8字节的macPANCoordExtendedAddress属性。密钥查找尺寸设置为9。
 - 3) 如果帧的帧控制字段中的源地址模式子字段设置为0x02, 密钥查找数据将设置为与2字节的源地址字段正确连接(见B.2.1节)的2字节源或者目标PAN标识符字段(帧控制字段中的PAN ID密集子字段设置为1), 地址字段又与单字节0x00正确连接。密钥查找尺寸设置为5。
 - 4) 如果帧的帧控制字段中的源地址模式子字段设置为0x03, 密钥查找数据将设置为与单字节0x00正确连接的8字节的源地址字段。密钥查找尺寸设置为9。
- b) 如果帧的辅助安全头的安全控制字段中的密钥标识符模式子字段不等于0x00(明确密钥鉴定), 则此过程将按照如下步骤检查密钥查找数据和密钥查找尺寸:
 - 1) 如果密钥标识符模式设置为0x01, 密钥查找数据将设置为与辅助安全头的密钥标识符字段中的1字节密钥索引子字段正确连接的8字节的macDefaultKeySource。密钥查找尺寸设置为9。
 - 2) 如果密钥标识符模式设置为0x02, 密钥查找数据将设置为正确连接的辅助安全头的密钥标识符字段中的4字节密钥源子字段和1字节的密钥索引子字段。密钥查找尺寸设置为5。
 - 3) 如果密钥标识符模式设置为0x03, 密钥查找数据将设置为正确连接的辅助安全头的密钥标识符字段中的8字节密钥源子字段和1字节的密钥索引子字段。密钥查找尺寸设置为9。
- c) 此过程将通过把密钥查找数据和密钥查找尺寸送到7.5.8.2.5节中介绍的密钥描述符查找过程来获得KeyDescriptor。如果失败, 将返回失败状态。
- d) 将按照如下步骤检查设备查找数据和设备查找尺寸:
 - 1) 如果帧控制字段中的源地址模式设置为0x00, 并且并且属性macPANCoordShortAddress设置为0x0000到0xfffd范围(即短地址被使用)内的值时, 设备查找数据将设置为与2字节的macPANCoordShortAddress属性正确连接(见B.2.1节)的2字节目标PAN标识符字段。设备查找尺寸设置为4。
 - 2) 如果帧控制字段中的源地址模式设置为0x00, 并且属性macPANCoordShortAddress设置为0xfffe(即扩展地址被使用), 设备查找数据将设置为8字节的macPANCoordExtendedAddress属性。设备查找尺寸

设置为8。

- 3) 如果帧的帧控制字段中的源地址模式子字段设置为0x02, 设备查找数据将设置为与2字节的源地址字段正确连接(见B.2.1节)的2字节源或者目标PAN标识符字段(帧控制字段中的PAN ID密集子字段设置为1), 地址字段又与单字节0x00正确连接。密钥查找尺寸设置为4。
- 4) 如果帧的帧控制字段中的源地址模式子字段设置为0x03, 设备查找数据将设置为8字节的源地址字段。设备查找尺寸设置为8。
- e) 此过程将通过把KeyDescriptor, 设备查找数据和设备查找尺寸送到7.5.8.2.6节中介绍的黑名单检查过程来获得DeviceDescriptor和KeyDeviceDescriptor。如果失败, 将返回失败状态。
- f) 返回已经获得KeyDescriptor, DeviceDescriptor和KeyDeviceDescriptor的通过状态。

7.5.8.2.5 密钥描述符查找过程

此过程的输入是密钥查找数据和密钥查找尺寸, 输出为通过或者失败的状态, 如果通过, 则为一个KeyDescriptor。

密钥描述符查找过程包含如下几个步骤:

- a) 对于macKeyTable属性中的每一个KeyDescriptor和KeyDescriptor的KeyIdLookupList中的每一个KeyIdLookupDescriptor, 此过程将检查KeyIdLookupDescriptor的LookupDataSize部分是否与密钥查找尺寸有着相同的整型值(见表94), 还有LookupData部分是否等于密钥查找数据。如果两个条件都满足(即匹配), 将返回此匹配KeyDescriptor和通过状态。
- b) 返回失败状态。

7.5.8.2.6 黑名单检查过程

此过程的输入是KeyDescriptor、设备查找数据和设备查找尺寸, 输出为通过或者失败的状态, 如果通过, 则为一个DeviceDescriptor和一个KeyDeviceDescriptor。

黑名单检查过程包含如下几个步骤:

- a) 对于KeyDescriptor的KeyDeviceList中的每一个KeyDeviceDescriptor:
 - 1) 此过程通过使用KeyDeviceDescriptor的DeviceDescriptorHandle来获得DeviceDescriptor。
 - 2) 如果KeyDeviceDescriptor的UniqueDevice部分设置为TRUE, BlackListed部分设置为FALSE, 将返回DeviceDescriptor, KeyDeviceDescriptor和通过状态。如果BlackListed部分设置为TRUE, 则返回失败状态。
 - 3) 如果KeyDeviceDescriptor的UniqueDevice部分设置为FALSE, 此过程将执行如7.5.8.2.7所介绍的DeviceDescriptor查找过程, 输入为设备查找数据和设备查找尺寸。如果相应的输出为通过状态, KeyDeviceDescriptor的BlackListed部分设置为FALSE, 将返回DeviceDescriptor, KeyDeviceDescriptor和通过状态。如果BlackListed部分设置为TRUE, 将返回失败状态。

b) 返回失败状态。

7.5.8.2.7 设备描述符查找过程

此过程的输入是DeviceDescriptor、设备查找数据和设备查找尺寸，输出为通过或者失败的状态。

设备描述符查找过程包含如下几个步骤：

- a) 如果设备查找尺寸为4，并且设备查找数据等于与DeviceDescriptor的ShortAddress部分正确连接的DeviceDescriptor的PAN ID部分（见B.2.1节）此过程返回一个通过状态。
- b) 如果设备查找尺寸为8，并且设备查找数据等于DeviceDescriptor的ExtAddress部分，此过程返回一个通过状态。
- c) 返回失败状态。

7.5.8.2.8 输入帧安全级别检查过程

此过程的输入是输入帧安全级别、帧类型和命令帧标识符，输出为通过或者“有条件通过”状态。

输入帧安全级别检查过程包含如下几个步骤

- a) 对于属性macSecurityLevelTable中的每一个SecurityLevelDescriptor:
 - 1) 如果帧类型不等于0x03,而等于SecurityLevelDescriptor中的FrameType部分时，将根据7.6.2.2.1节中介绍的算法把输入安全级别（SEC1）和SecurityLevelDescriptor（SEC2）中的SecurityMinimum部分进行比较。如果比较失败（即评估为FALSE），DeviceOverrideSecurityMinimum部分设置为TRUE，安全级别设置为0，将返回“有条件通过”状态。否则返回失败状态。
 - 2) 如果帧类型等于0x03,而等于SecurityLevelDescriptor中的FrameType部分，并且命令帧标识符等于CommandFrameIdentifier部分时，将根据7.6.2.2.1节中介绍的算法把输入安全级别（SEC1）和SecurityLevelDescriptor（SEC2）中的SecurityMinimum部分进行比较。如果比较失败（即评估为FALSE），DeviceOverrideSecurityMinimum部分设置为TRUE，安全级别设置为0，将返回“有条件通过”状态。否则返回失败状态。
- b) 返回失败状态。

7.5.8.2.9 输入密钥用法政策检查过程

此过程的输入是KeyDescriptor、帧类型和命令帧标识符，输出为通过或者失败的状态。

输入密钥用法政策检查过程包含如下几个步骤：

- a) 对于KeyDescriptor的KeyUsageList中的每一个KeyUsageDescriptor:
 - 1) 如果帧类型不等于0x03,而等于KeyUsageDescriptor中的FrameType部分时，将返回通过状态。

- 2) 如果帧类型等于0x03,而不等于KeyUsageDescriptor中的FrameType部分,并且命令帧标识符等于KeyUsageDescriptor中的CommandFrameIdentifier部分时,将返回通过状态。

b) 返回失败状态。

7.6 安全单元规范

7.6.1 PIB 安全材料

PIB 安全相关的属性在表 88, 表 89, 表 90, 表 91, 表 92, 表 93, 和表 94 中显示

表 88-安全相关的MAC PIB属性

属性	标识符	类型	范围	功能描述	缺省值
macKeytable	0x71	密钥描述符实体列表 (见表 89)	—	密钥描述符实体表, 每个实体包含密钥和要求安全通信的相关信息。	(空)
macKeyTableEntries	0x72	整型	特 定 执行	macKeytable中实体的个数	0
macDeviceTable	0x73	设备描述符实体列表 (见表93)	—	设备描述符实体表, 每个实体表明安全地与设备通信的中继设备	(空)
macDevicTableEntries	0x74	整型	特 定 执行	DeviceTable中实体的个数	0
macSecurityLevelTable	0x75	安全级别描述符实体表 (见表 92)	—	安全级别描述符实体表, 每个实体都带有关于所期望的最低安全级别的信息, 最低安全级别是根据输入帧类型来确定的。	(空)
macSecurityLevelTableEntries	0x76	整型	特 定 执行	macSecurityLevel中实体的个数	0

macFrameCounter	0x77	整数	0x00000000—0xfffffff	该设备的输出帧计数器。	0x000000
macAutoRequestSecurityLevel	0x78	整型	0x00—0x07	自动的数据请求的安全级别	0x06
macAutoRequestKeyIdMode	0x79	整型	0x00—0x03	自动的数据请求的密钥的标识符模式。如果macAutoRequestSecurityLevel属性设置为0x00，该属性无效	0x00
macAutoRequestKeySource	0x7a	由macAutoRequestKeyIdMode参数指定	—	用于自动的数据请求的密钥始发者。如果macAutoRequestKeyIdMode属性设置为0x00，该属性无效	所有 8 位0xff
macAutoRequestKeyIdIndex	0x7b	整型	0x01—0xff	用于自动的数据请求的密钥索引。如果macAutoRequestKeyIdMode属性设置为0x00，该属性无效。	所有 8 位0xff
macDefaultKeySource	0x7c	8字节集	—	用于密钥标识符模式0x01的默认密钥的始发者	所有 8 位0xff
macPANCoordExtendedAddress	0x7d	IEEE地址	扩展 64 位 IEEE 地址	PAN协调器的 64 位地址。	—
macPANCoordShortAddress	0x7e	整型	0x0000—0xffff	分配给PAN协调器的16位短地址。值0xfffe表明PAN协调器只能使用它的 64 位长地址。数值 0xffff 表明该值是未知的。	0x0000

表89—KeyDescriptor元素

名字	类型	范围	描述
KeyIdLookupList	KeyIdLookupDescriptor 实体列表 (见表 94)	—	用来表明KeyDescriptor的KeyIdLookupDescriptor实体的列表
KeyIdLookupListEntries	整型	特定执行	KeyIdLookupList中实体的个数。
KeyDeviceList	KeyDevice	—	KeyDeviceDescriptor 实体指出哪些设备现

	Descriptor 实体的列表 (见表91)		在正在使用这个密钥,包括他们的黑名单状态。
KeyDeviceList Entries	整型	特定 执行	在 KeyDeviceList 的实体个数。
KeyUsageList	KeyUsageD escriptor 实 体的列表 (见表90)	—	KeyUsageDescriptor 实体列表,表明这个密 钥适用的帧类型。
KeyUsageList Entries	整型	—	KeyUsageList 中实体的个数。
Key	16字节集	—	密钥的实际价值。

表90- KeyUsageDescriptor的元素

名字	类型	范围	描述
FrameType	整型	0x00–0x03	看7.2.1.1.1节
CommandFrameIdentifier	整型	0x00–0x09	看表82.

表91—KeyDeviceDescriptor的元素

名字	类型	范围	描述
DeviceDescriptorHandle	整型	特定执行	设备相应的 DeviceDescriptor句柄(见表 93)
UniqueDevice	布尔型	TRUE或 FALSE	DeviceDescriptorHandle描述的设备是否使用唯一的KeyDescriptor加入,即,它是一个连接密钥而不是组密钥。
Blacklisted	布尔型	TRUE或 FALSE	DeviceDescriptorHandle说明的设备是否先于帧计数器跳出使用该密钥进行通信。如果是TRUE,表明设备将不再继续使用这个密钥,因为这表明帧计数器也适用该密钥。

表92— SecurityLevelDescriptor的元素

名字	类型	范围	描述
FrameType	整型	0x00–0x03	看 7.2.1.1.1 节
CommandFrameIdentifier	整型	0x00–0x09	看表 82
SecurityMinimum	整型	0x00–0x07	表明帧类型,命令帧类型(如果存在)的输入MAC帧的安全级别的最低要求(7.6.2.2.1节见表 95)
DeviceOverrideSecurityMinimum	布尔型	TRUE或 FALSE	设置Exempt标志的发送设备是否超出了SecurityMinimum元素指出的最低安全级别。如果为TRUE,表明对于设置Exempt标志的原始设备输入帧的安全级别为0是可以

			接受的, 以使输入帧的安全级别满足SecurityMinimum元素指出的期望的最低安全级别
--	--	--	--

表93—DeviceDescriptor的元素

名字	类型	范围	功能描述
PANId	设备PAN ID	0x0000–0xffff	DeviceDescriptor中设备的16位PAN标识符
ShortAddress	设备短地址	0x0000–0xffff	DeviceDescriptor中设备的16位短地址。值0xfffe表明该设备只使用它的扩展地址。值0xffff表明该值是未知的。
ExtAddress	IEEE地址	任何有效的64位设备地址	DeviceDescriptor中设备的64位IEEE地址扩展地址。此参数也被用于对输入帧的非安全操作
FrameCounter	整型	0x00000000–0xffffffff	DeviceDescriptor中设备的输入帧计数器。该值用来确保帧的连续更新。
Exempt	布尔型	TRUE或FALSE	表明设备是否可能超出表92定义的最低安全级别。

表94—KeyIdLookupDescriptor的元素

名字	类型	范围	描述
LookupData	5或9个字节	—	被用来识别密钥的数据。
LookupDataSize	整型	0x00–0x01	数值0x00表明5个字节集；数值0x01表明9个字节集。

7.6.2 辅助安全头

辅助安全头有多种长度, 而且含有安全处理必需的信息, 包括一个安全控制字段, 一个帧计数器字段和一个密钥标识符字段。只有当帧控制字段的安全使能子字段设置为1, 辅助安全头才会出现。辅助安全头格式如图74所示。

字节 1	4	0/1/5/9
安全控制	帧	密钥标识符

Figure 74—辅助安全头格式

7.6.2.1 整型和字节表示法

辅助安全头是MAC层帧字段 (见 7.2.1.7节), 因此, 它使用7.2节指定的表示法惯例。

7.6.2.2 安全控制字段

安全控制字段长度为1字节, 被用来提供帧使用的保护措施的信息。安全控制字段格式如图75所示。

位0–2	3–4	5–7
安全级别	密钥标识符模式	保留

Figure 75—安全控制字段格式

7.6.2.2.1 安全级别子字段

安全级别子字段长度为3位, 表明实际提供的帧保护措施。该值能在帧-帧基

础上调整, 允许数据鉴别的多种级别 (在需要传送的帧中, 允许保证安全冗余的极小化)和可选择的数据机密性 (confidentiality)。表95中显示的多种安全级别提供密码保护。当要求非一般的保护时, 总是提供重放保护。

Table 95—MAC层可使用的安全级别

Security level identifier	Security Control field (Figure 75) b ₂ b ₁ b ₀	Security attributes	Data confidentiality	Data authenticity (including length <i>M</i> of authentication tag, in octets)
0x00	'000'	None	OFF	NO (<i>M</i> = 0)
0x01	'001'	MIC-32	OFF	YES (<i>M</i> = 4)
0x02	'010'	MIC-64	OFF	YES (<i>M</i> = 8)
0x03	'011'	MIC-128	OFF	YES (<i>M</i> = 16)
0x04	'100'	ENC	ON	NO (<i>M</i> = 0)
0x05	'101'	ENC-MIC-32	ON	YES (<i>M</i> = 4)
0x06	'110'	ENC-MIC-64	ON	YES (<i>M</i> = 8)
0x07	'111'	ENC-MIC-128	ON	YES (<i>M</i> = 16)

安全级别能根据提供的相应的密码保护指定。这里, 同时考虑数据机密性和数据鉴别, 只有当SEC1至少提供SEC2所提供的保护时, 第一个安全级别SEC1比第二个安全级别SEC2级别更高, 至少是一样的。如果适合下面两个条件, 则“SEC1比SEC2更高或者相等”将评价为TRUE:

- a) SEC1的b₂位比SEC2中的b₂位大或者相等.(加密OFF<加密ON)。
 - b) SEC1的b₁ b₀位的整数值比SEC2的b₁ b₀位大或者相等.(递增整数值表明提供的数据鉴别级别递增,即信息完整性码 (MIC)-0<MIC-32<MIC-64<MIC-128)。
- 否则, 状态将评估为FALSE。

例如, 因为ENC-MIC-64与MIC-64有相同的数据鉴别和机密性保护, 所以ENC-MIC-64≥MIC-64为TRUE。另一方面, 因为MIC-128提供比ENC-MIC-64更强的数据鉴别,但它不提供机密性保护, 所以MIC-128≥ENC-MIC-64 为FALSE。

7.6.2.2.2 密钥标识符模式子字段

密钥标识符模式子字段长2位, 表明用来保护帧的密钥是否能用可见的或不可见的方式获得; 此外,如果用可见的方式获得, 它用来表明密钥标识符字段的特定表示法 (见 7.6.2.4节)。密钥标识符模式子字段将设置为表96中的一个值。只有当该子字段不为0x00时, 辅助安全头的密钥标识符字段才出现。(见 7.6.2.4节)

表96—密钥标识符模式子字段的值

密钥标识符模式	密钥标识符模式子字段b ₁ ,b ₀	功能描述	密钥标识符模式字段长度 (字节)
0x00	'00'	密钥由帧表头所描述的帧的发起者和接收者以可见的方式决定。	0
0x01	'01'	密钥由辅助安全头的密钥标识符字段的1字节的密钥索引子字段和macDefaultKeySource一起决定。	1
0x02	'02'	密钥由辅助安全头的密钥标识符字段的4字节的密钥源子字段和1字节的密钥索引	5

		子字段以可见的方式决定	
0x03	'03'	密钥由辅助安全头的密钥标识符字段的8字节的密钥源子字段和1字节的密钥索引子字段以可见的方式决定	9

7.6.2.3 帧计数器字段

帧计数器字段长度为4个字节，显示被保护帧的发起方的macFrameCounter属性。它用来提供保护帧和提供重放保护的加密机制的语义安全。

7.6.2.4 密钥标识符字段

密钥标识符字段有多种长度，表明用于输出帧的加密保护的密钥,以可见方式或非可见方式定义边信息。只有当辅助安全头(见7.6.2.2.2节)的安全控制字段的密钥标识符模式子字段不为0x00时，密钥标识符字段才出现。密钥标识符字段格式如图 76 所示。

Octets: 0/4/8	1
Key Source	Key Index

Figure 76—Format for the Key Identifier field, if present

7.6.2.4.1 密钥源子字段

当密钥源子字段出现时,长度为4字节或 8字节,与安全控制字段 (见7.6.2.2.2节)的密钥标识符模式子字段的值相对应,表明组密钥始发者。

7.6.2.4.2 密钥索引子字段

密钥索引子字段长度为1字节，允许同一个密钥始发者生成的不同密钥使用唯一的标志符。

每个密钥始发者必须保证活跃的密钥有不同的索引，并且都不为0x00。

7.6.3 安全操作

该节描述B.3.2节所指定的CCM*安全操作参数,。

7.6.3.1 整数和字节表示法

整个7.6.3节中都使用B.2节指定的整数和字节表示法惯例。

7.6.3.2 CCM* Nonce CCM*临时值

The CCM* nonce is a 13-octet string and is used for the advanced encryption standard (AES)-CCM* mode of operation (see B.2.2). The nonce shall be formatted as shown in Figure 77, with the leftmost field in the figure defining the first (and leftmost) octets and the rightmost field defining the last (and rightmost) octet of the nonce.

CCM* 临时值是一个 13字节的字符串，用于高级加密标准 (AES) -CCM* 操作模式.(见B.2.2节)，临时值格式如图 77 所示。图中最左边的字段为第一个字节，最右边的字段为最后一个字节。

Octets: 8	4	1
Source address	Frame counter	Security level

Figure 77—CCM* nonce

源地址设置为生成帧的设备的扩展地址 `aExtendedAddress`, 帧计数器设置为辅助安全头 (见7.6.2节)中各个字段的数值,安全级别设置为与表95所定义的辅助安全头的安全控制字段的安全级别标识符一致。

源地址, 帧计数器, 和安全级别按照7.6.3.1节中所指定的方式出现。

7.6.3.3 CCM* prerequisites CCM* 先决条件

安全帧涉及CCM*的模式加密和鉴别转换的使用,如B.4.1节所述。非安全帧涉及CCM*的解密和鉴别检查处理,如 B.4.2节所述。CCM*的前向和反向转换的先决条件如下:

- 在下面的块密码使用B.3.1节指定的AES加密算法。
- 7.6.3.1节定义的位顺序
- 长度字段L的长度为2个字节。
- 鉴别字段的长度M根据要求分别为0个字节, 4个字节, 8个字节或 16个字节。

7.6.3.3.1 鉴别字段长度

鉴别字段的长度为CCM*前向转换和CCM*后向转换由表95决定,使用帧的辅助安全头的安全控制字段的安全级别子字段。

7.6.3.4 CCM* 转换数据表示法

本节描述CCM*期望转换的输入和输出如何构成,如B.4.1节所述,:

输入是

- 密钥
- 临时值
- a数据
- m数据

输出是c数据。

7.6.3.4.1 密钥和临时值数据输入

用于CCM*前向转换的密钥数据在7.5.8.2.1节中的输出帧安全程序中描述。CCM*转换的临时值数据的结构如7.6.3.2节所述。

7.6.3.4.2 a数据和m数据

在CCM*中转换过程中, 数据字段如表97被应用。

表97—所有安全级别的a数据和m数据

安全级别标识符	a数据	m数据
0x00	没有	没有
0x01	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 非安全的有效载荷字段	没有
0x02	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 非安全的有效载荷字段	没有
0x03	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 非安全的有效载荷字段	没有

0x04	没有	非安全的有效载荷 字段
0x05	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段	非安全的有效载荷 字段
0x06	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段	非安全的有效载荷 字段
0x07	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段	非安全的有效载荷 字段

7.6.3.4.3 C数据输出

在 CCM* 转换处理过程中，应用的数据字段，或正确连接且应用的数据字段，为字节字符串。

The secured payload fields right-concatenated with the authentication tag shall substitute the unsecured payload field in the original unsecured frame to form the secured frame (see Table 98).

初始的非安全的帧转化为安全的帧时，与鉴别标签正确连接的的安全的有效载荷字段将取代非安全的有效载荷字段（见表 98）。

表98—所有安全级别的C数据

安全级别	C数据
0x00	没有
0x01	MIC-32
0x02	MIC-64
0x03	MIC-128
0x04	安全的有效载荷字段
0x05	安全的有效载荷字段 MIC-32
0x06	安全的有效载荷字段 MIC-64
0x07	安全的有效载荷字段 MIC-128

7.6.3.5 CCM* 反向转换数据表示法

本节描述B.4.2节所描述的CCM*的反向转换的输入和输出如何形成。

输入是

- 密钥
- 临时值
- c数据
- a数据

输出是 m 数据。

7.6.3.5.1 密钥和临时值数据输入

用于CCM*反向转换的密钥数据由7.5.8.2.3节中描述的输入帧安全处理程序传送。CCM*转换的临时值数据结构在7.6.3.2节介绍。

7.6.3.5.2 c数据和a数据

在 CCM*反向转换处理过程中，按照表99应用数据字段。

表 99—所有安全级别的c数据和a数据

安全级别 标识符	数据	a数据
-------------	----	-----

0x00	没有	没有
0x01	MIC-32	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 安全的有效载荷字段
0x02	MIC-64	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 安全的有效载荷字段
0x03	MIC-128	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 安全的有效载荷字段
0x04	安全的有效载荷字段	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 安全的有效载荷字段
0x05	安全的有效载荷字段 MIC-32	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 安全的有效载荷字段
0x06	安全的有效载荷字段 MIC-64	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 安全的有效载荷字段
0x07	安全的有效载荷字段 MIC-128	MHR 辅助安全头 非有效载荷字段 安全的有效载荷字段

7.6.3.5.3 m数据输出

在初始的安全帧转化为非安全帧时，m数据将取代安全的有效载荷字段和鉴别标签。

7.7 MAC 层 - 物理层相互作用的消息序列表

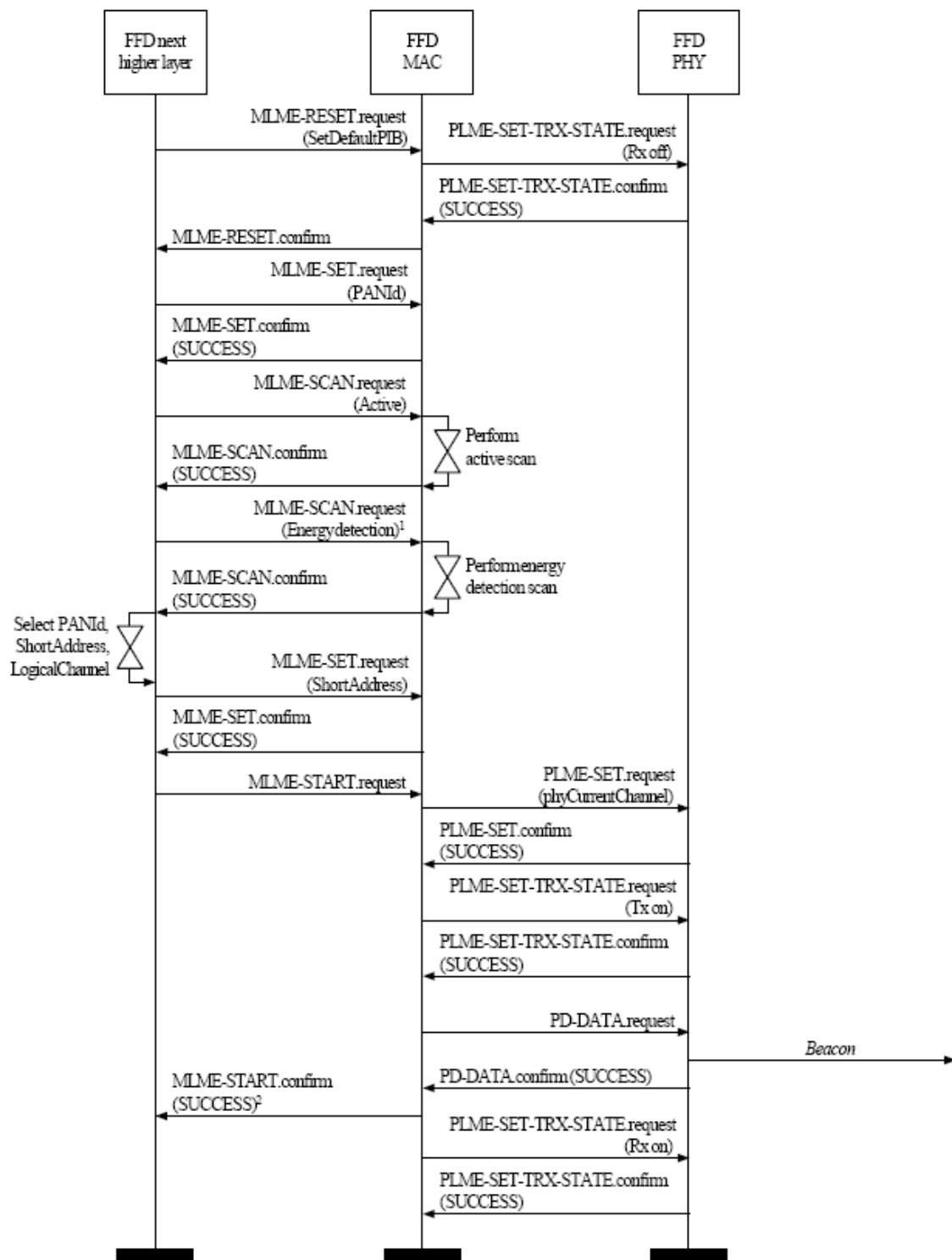
本节描述本标准指定的主要任务。每个任务使用一个消息序列表来描述命令出现的顺序，而不是描述每个原语请求的准确时间。

PAN协调器开始一个新的PAN所需的原语，在图78给出。在MAC层复位之后，上层任务的第一个动作就是初始化扫描来搜索本地区中其他的PAN。要求主动扫描，能量检测扫描可选择执行。执行主动扫描和能量检测扫描的步骤分别在图83和79中给出。

一旦一个新的PAN建立，PAN协调器准备接收来自其他设备加入PAN的请求。图80显示了设备发送请求连接的原语，同时在图81描述了协调器允许连接的步骤。在加入PAN的过程中，设备请求连接首先执行主动或被动扫描，决定网络内的哪些PANs允许连接；图82和图83分别详述了完成主动扫描和被动扫描所需的原语。

接下来给出了发送和接收一个数据包所需的原语。数据包发送者承担的动作在图84中给出，同时接收器承担的动作在图85中给出。

当一个设备不能再跟它的协调器通信的时候，设备能可以使用孤立扫描重新发现协调器。孤立设备重新组网所需的原语在图86中给出。



¹ The energy detection scan is optional.

² The MLME-START.confirm and PLME-SET-TRX-STATE.request primitives may not need to be in the order shown.

图 78 — PAN 开始消息序列表—PAN 协调器

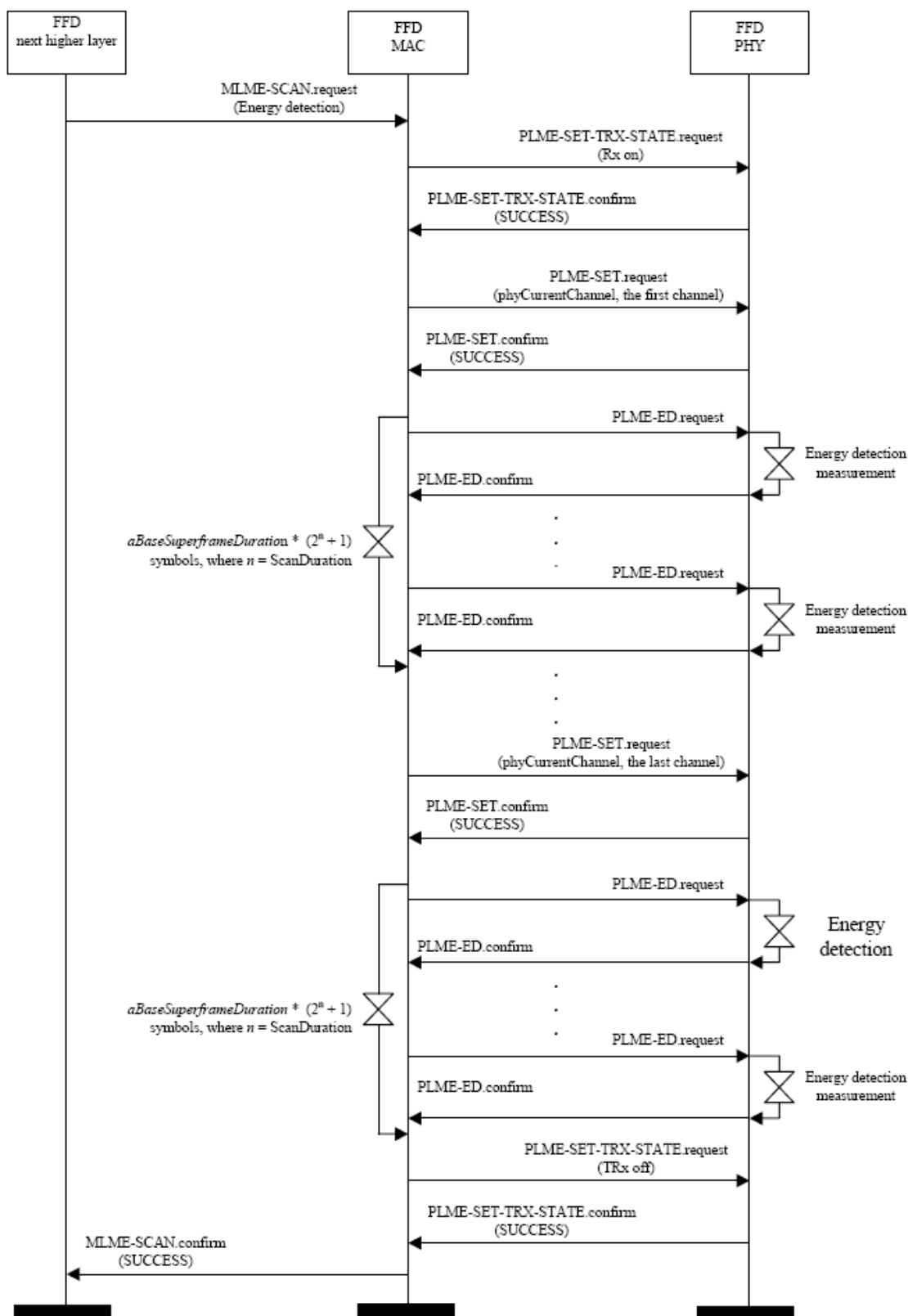


图 79 — 能量发现扫描消息序列表

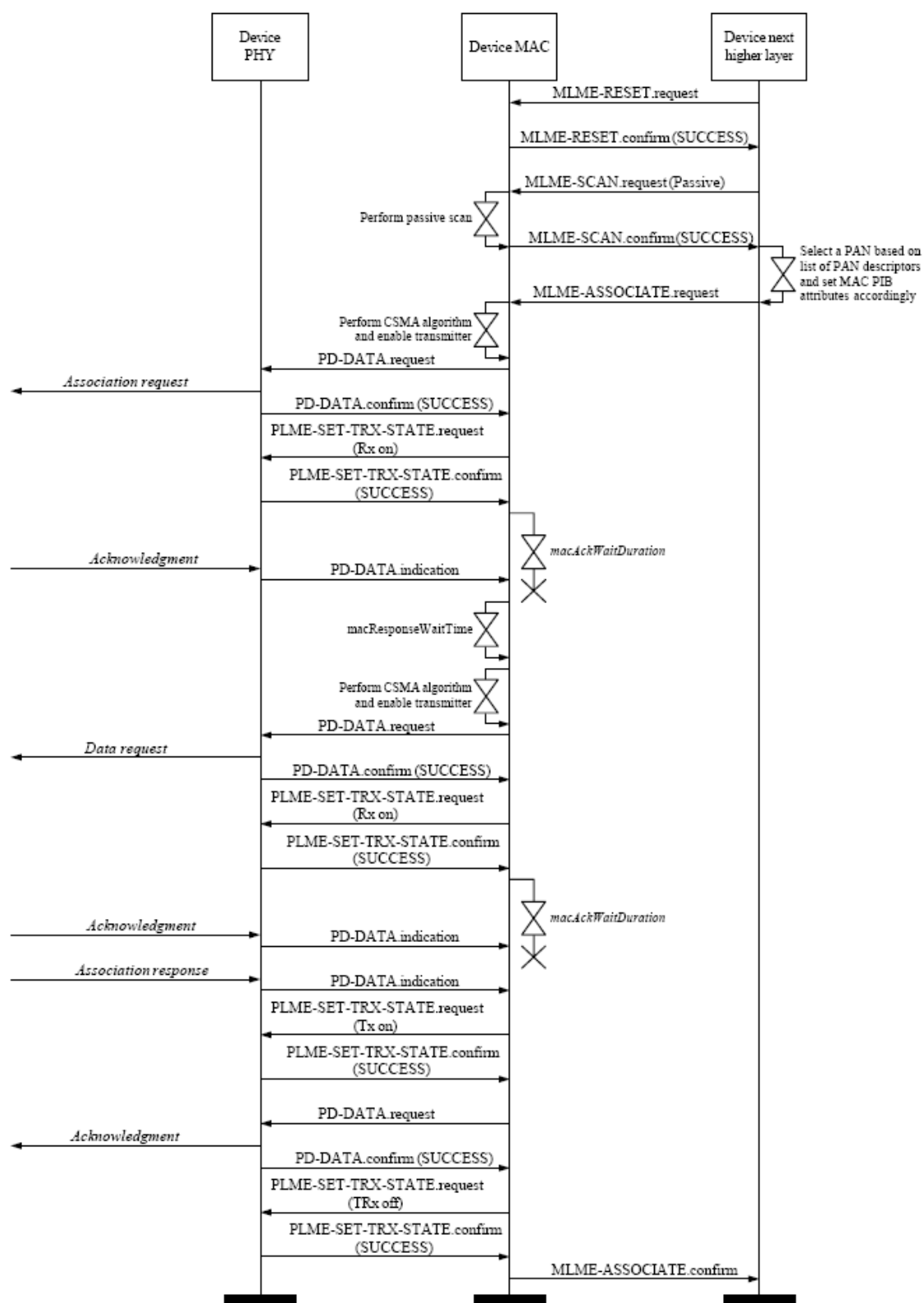


图 80 — 连接消息序列表—设备

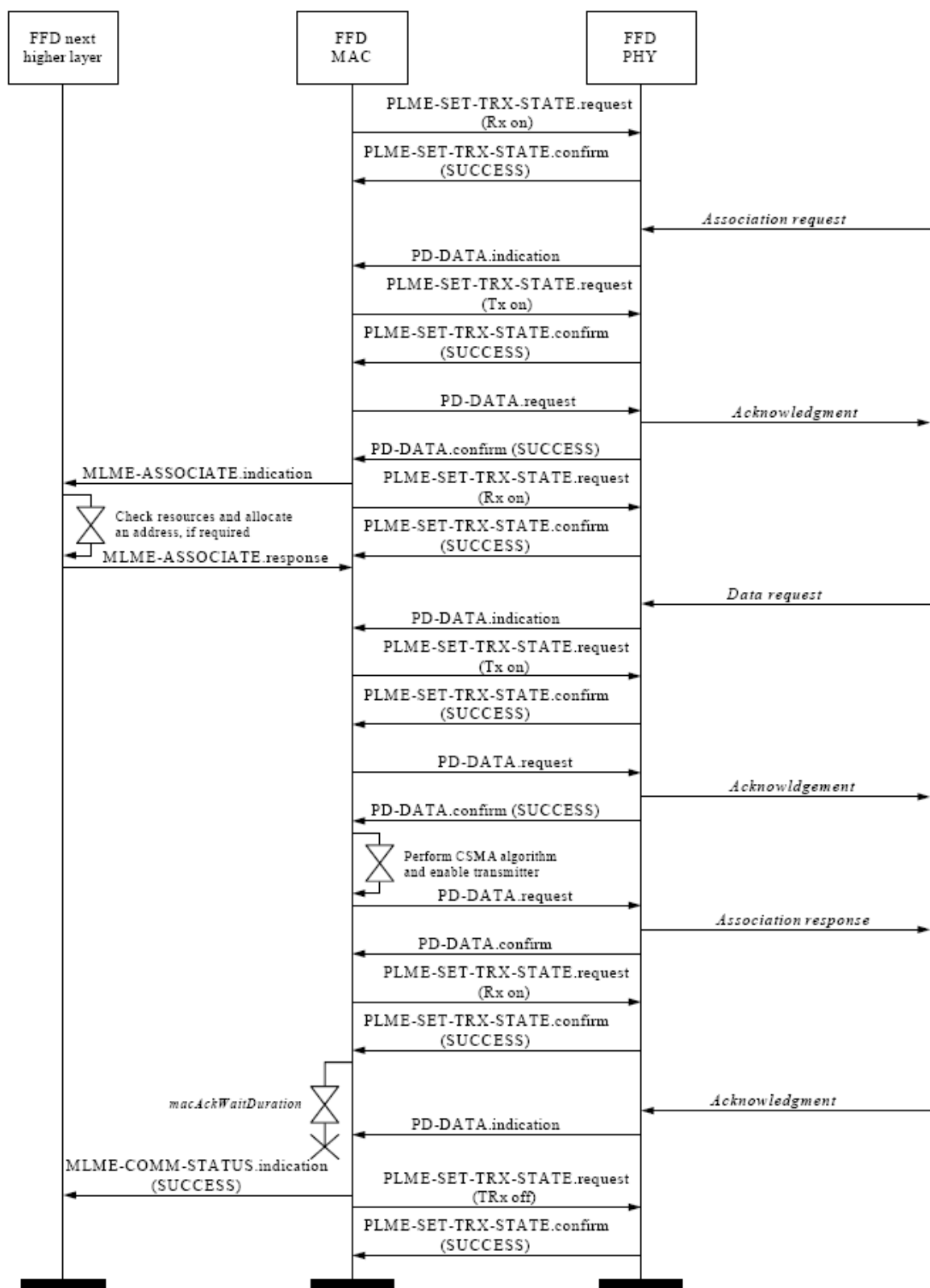


图 81 — 连接消息序列表—协调器

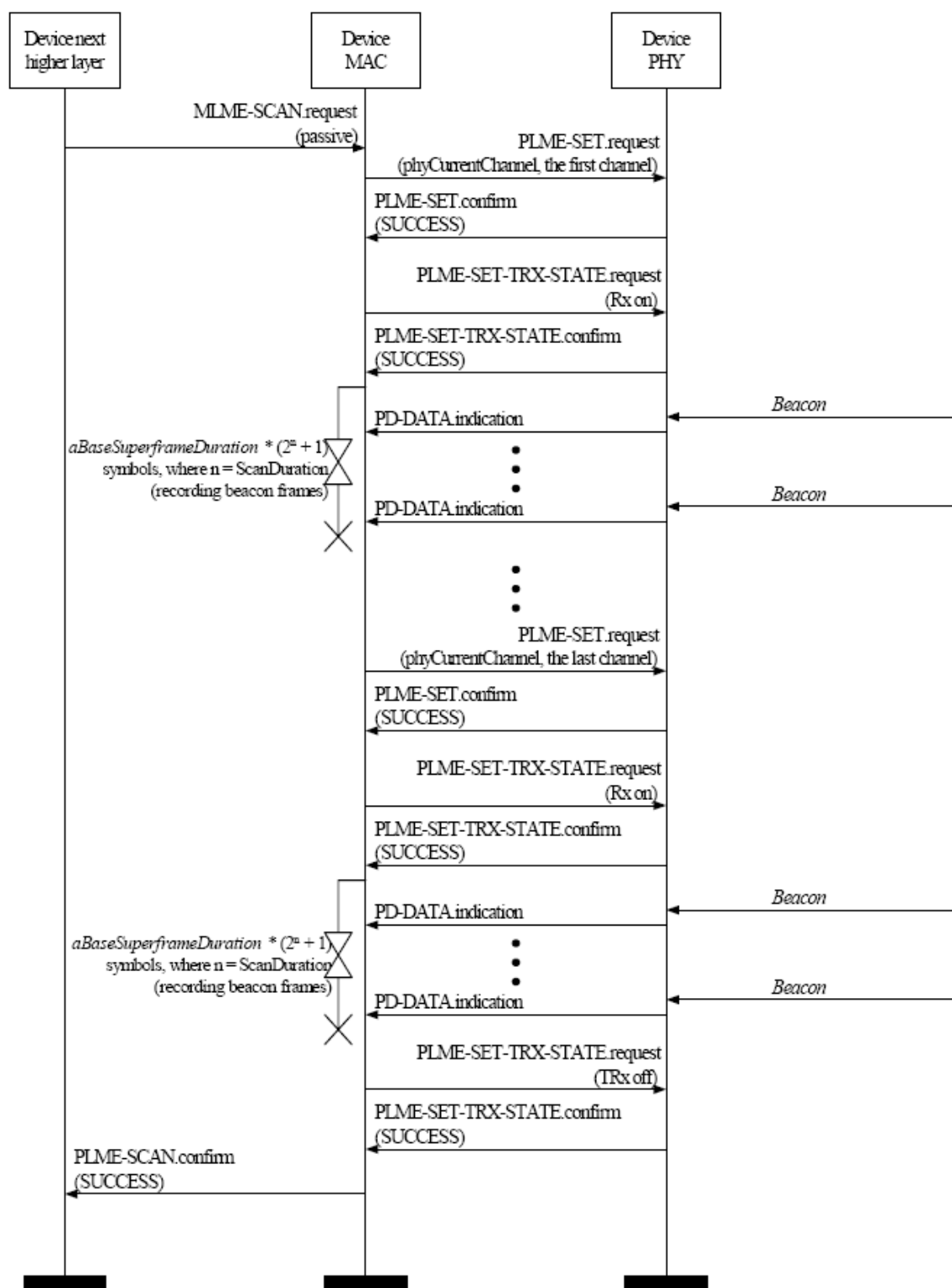


图 82 — 被动扫描消息序列表

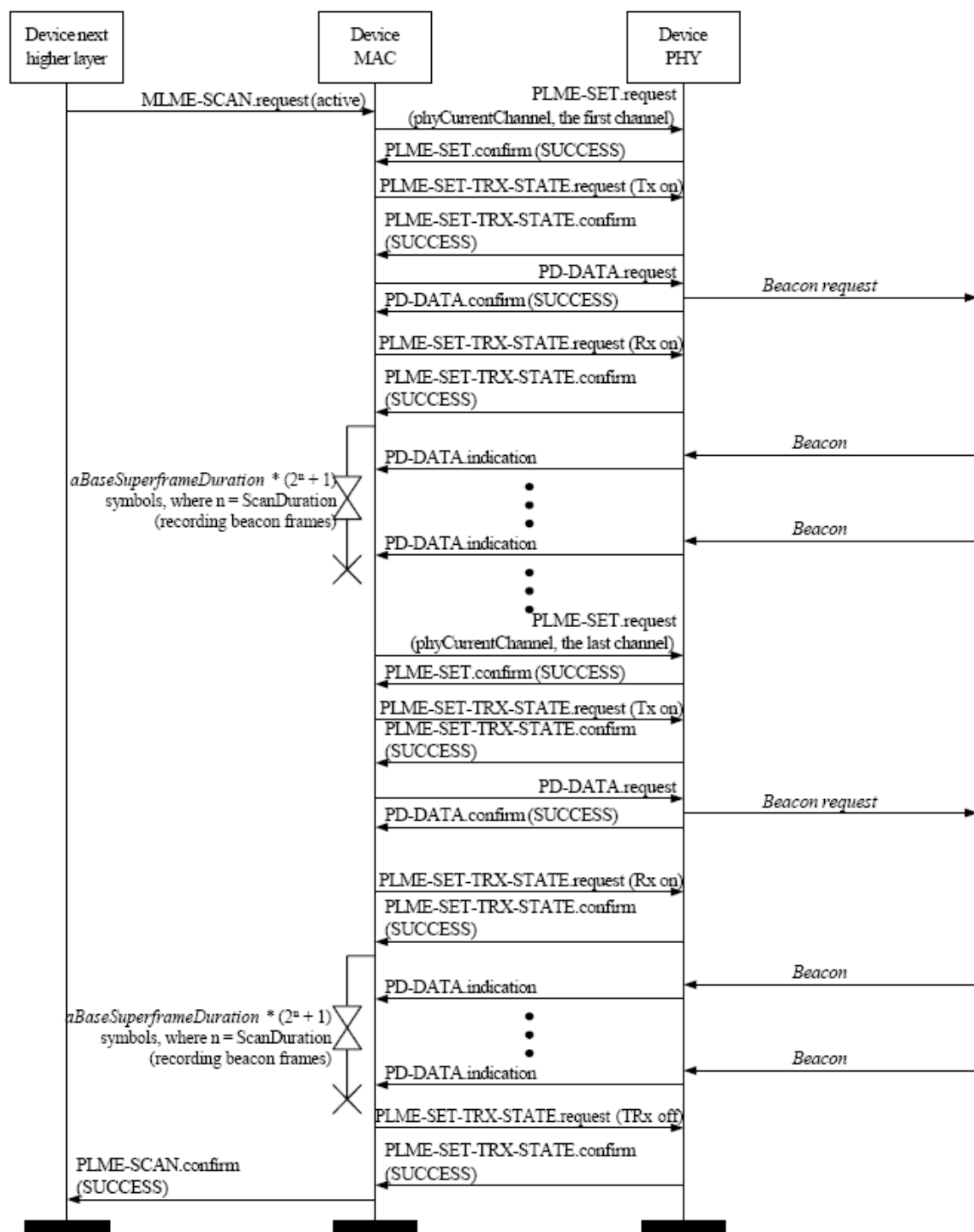


图 83 一主动扫描消息序列表

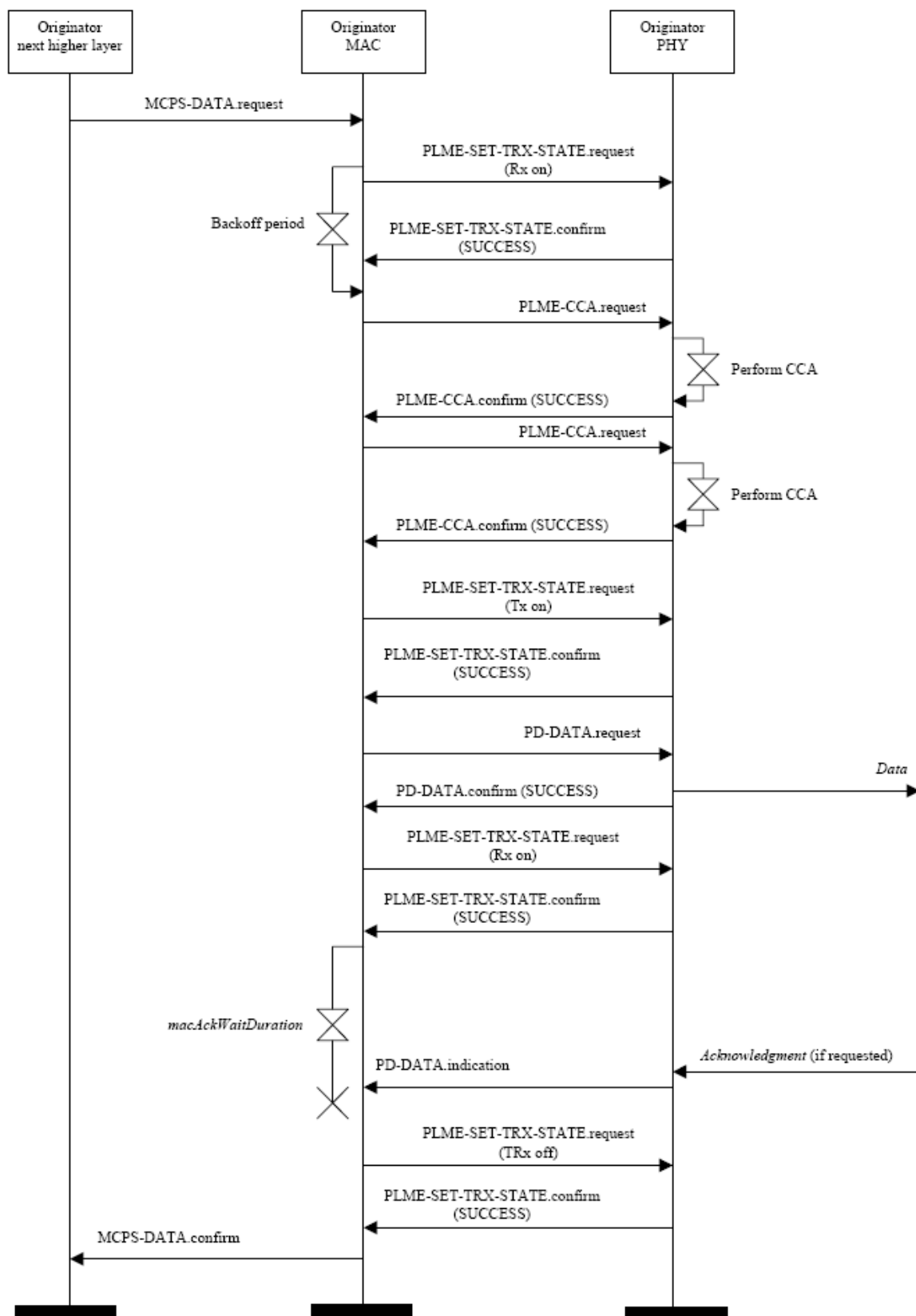


图 84 — 数据发送消息序列表—发送者

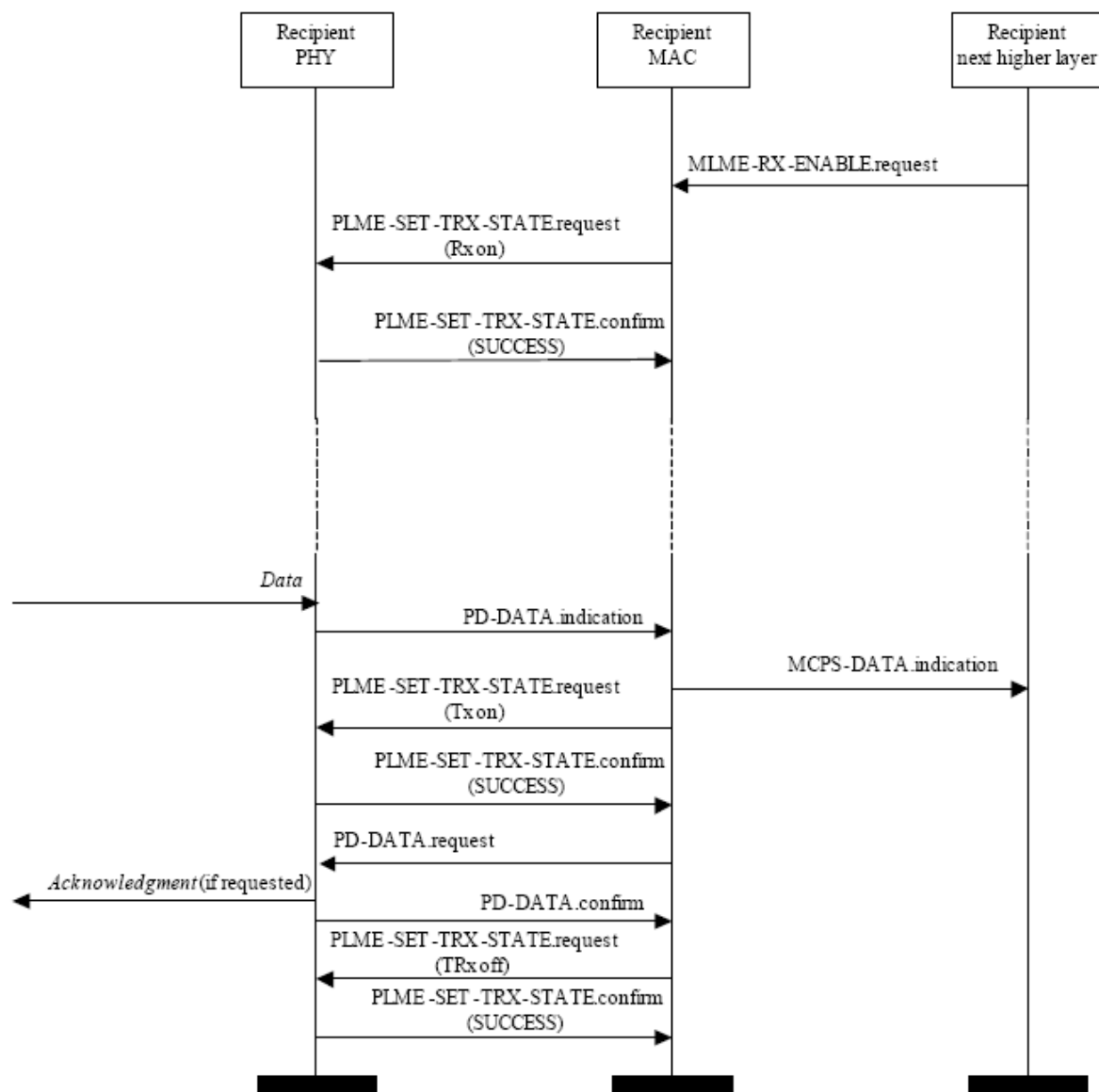


图 85 — 数据发送消息序列表—接收者

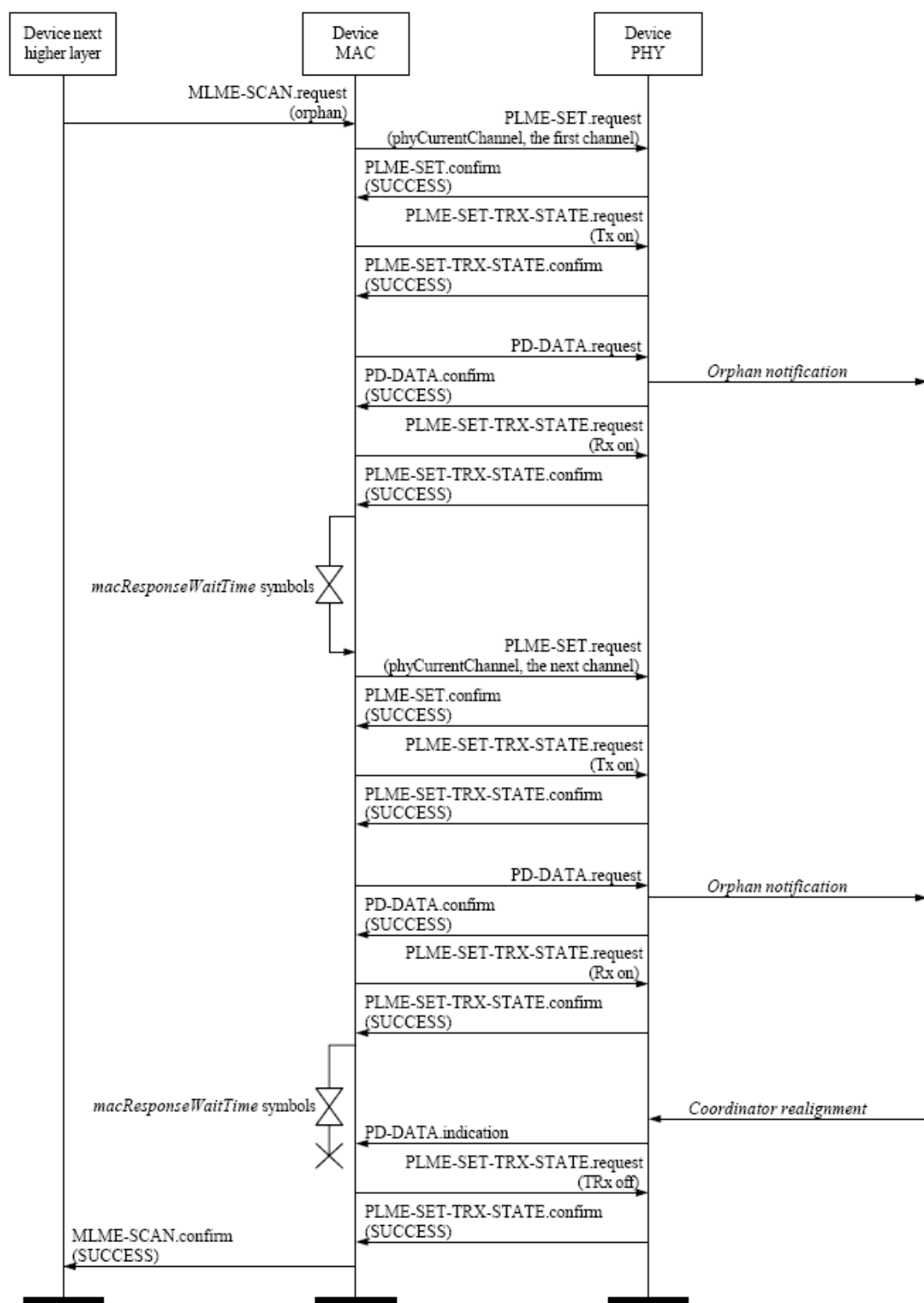


图 86 孤立设备重新连接消息序列表