

## 3.1 PON 技术

### 3.1.1 PON 网络架构

如图 3-1 所示, PON (Passive Optical Network, 无源光网络) 采用的是点到多点 (P2MP) 结构的网络架构。PON 网络是一个二层的网络架构, 网络中只有两端的 OLT 和 ONT 部件是有源部件, 中间的 ODN 网络都是无源部件, OLT 统一对所有的 ONT 进行管理。

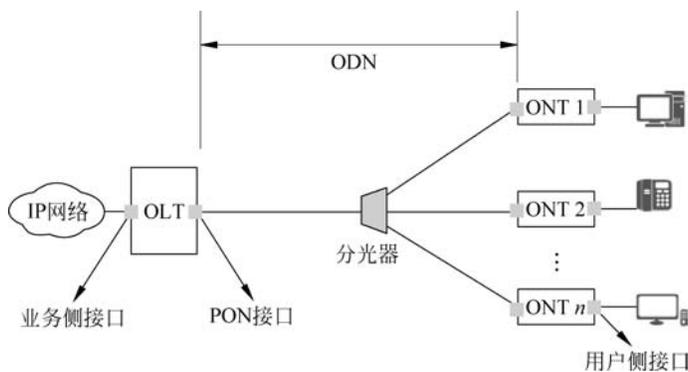


图 3-1 PON 网络架构

PON 网络主要由以下 3 个部件构成。

(1) OLT (Optical Line Terminal, 光线路终端): 一般放置在中心机房, 是终结 PON 协议的汇聚设备, 通过 PON 接口和 ODN 网络连接, 对 ONT 进行集中管理。

(2) ONT (Optical Network Terminal, 光网络终端): 放置在用户侧, 提供各种接

口连接用户设备(例如用户的 PC、打印机、话机等),将用户设备信号转换成 PON 协议,通过 PON 上行接口与 ODN 连接后传输给 OLT 进行处理。

(3) ODN(Optical Distribution Network,光分配网络): OLT 和 ONT 通过中间的无源光分配网络 ODN 连接起来进行互相通信。ODN 是由光纤、一个或多个无源分光器(Splitter,也叫无源光分路器)等无源光器件组成的无源网络。

### 3.1.2 PON 工作原理

PON 按照复用技术分为 3 种,分别是 TDM(Time Division Multiplexing,时分复用)PON、WDM(Wavelength Division Multiplexing,波分复用)PON 和 TWDM(Time and Wavelength Division Multiplexed,时分波分复用)PON。

当前在家庭网络中主要使用的是 TDM PON 技术,本章节主要针对 TDM PON 进行介绍(书中 TDM PON 简称为 PON)。

#### 1. 工作原理概述

PON 系统如图 3-2 所示,PON 系统上行/下行采用不同的波长进行数据承载,采用波分复用原理实现上行/下行不同波长在同一个 ODN 网络上传输,实现单纤双向传输。

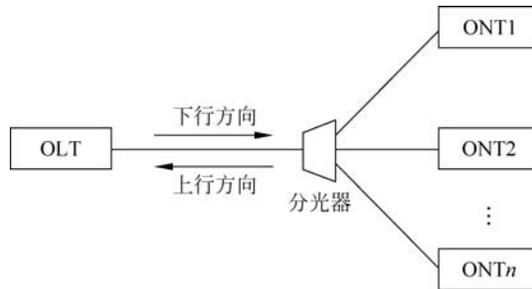


图 3-2 PON 系统传输原理

以 GPON 系统为例,系统工作原理如下。

(1) GPON 网络采用单根光纤将 OLT、分光器和 ONT 连接起来,上下行采用不同的波长进行数据承载。上行采用 1290~1330nm 范围的波长,下行采用 1480~1500nm 范围的波长。

(2) GPON 系统采用波分复用的原理通过上下行不同波长在同一个 ODN 网络上

进行数据传输,下行通过广播的方式发送数据,而上行通过 TDMA 的方式,按照时隙进行数据上传。

## 2. 上行工作原理

PON 上行方向的基本原理如图 3-3 所示。

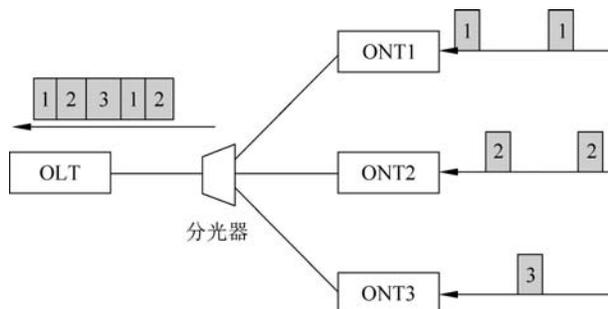


图 3-3 PON 上行方向工作原理

PON 上行方向采用的是时分复用 TDM 的方式,这样保证 ONT 的报文在上传到 OLT 的过程中不会产生冲突。

ONT 收到 UNI 侧的用户单元设备如 PC、AP 等发送的数据报文后,向 OLT 申请发送数据报文。OLT 根据各 ONT 的带宽申请情况,通过多点控制协议 MPCP 控制每个 ONT 在指定的时间起始点发送指定时间长度的数据,给不同的 ONT 分配不同的时隙,各个 ONT 就在分配给自己的时隙内有序发送数据报文。

通过 OLT 控制的时分复用方式,多个 ONT 可以共享整个上行带宽,而且 PON 还有光纤长度测距等关键技术,确保多个 ONT 在同一个光纤上不会出现多个 ONT 发送碰撞而退避等问题。

在 PON 的上行方向,受光分路器的实现原理和光信号的直线传输,光信号只会发往 OLT,而不会发到其他 ONT,所以上行方向相当于点对点的传输。从安全方面考虑,PON 的上行方向使用了安全加密等手段,保障了家庭业务的安全性。

## 3. 下行工作原理

PON 下行方向的基本原理如图 3-4 所示,PON 下行方向采用的是广播的方式。

在下行方向,OLT 发送的数据报文通过分光器(一个无源光分路器或几个光分路器的级联)广播到达各个 ONT,发往不同的 ONT 的报文携带不同 ONT 的标识,各

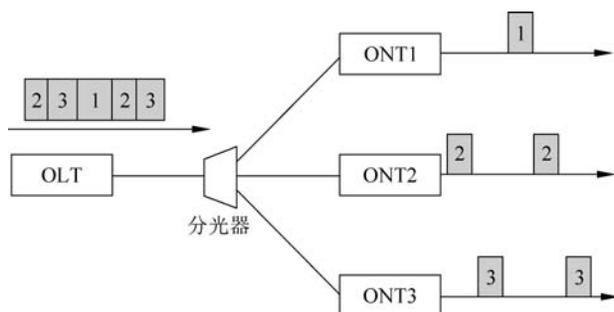


图 3-4 PON 下行方向工作原理

ONT 根据报文中的 ONT 标识选择取出发给自己的数据报文, 丢弃其他 ONT 的无效报文。

为了保证 PON 下行方向的报文安全, 每个 ONT 的 UNI 接口发往用户设备的报文只是这个用户设备所需要的报文, 其他非发往这个用户设备的报文已经在 ONT 的 PON 端口丢弃, 不会发往该 ONT 的 UNI 接口。

此外, OLT 和 ONT 之间还做了增强安全处理, OLT 和不同 ONT 之间采用不同的密钥来加密报文并进行发送, 若 ONT 收到其他 ONT 的报文, 没有密钥也无法识别, 从而保障了业务的安全性。

### 3.1.3 PON 带宽分配

PON 上行方向是多个 ONT 通过时分复用方式共享, 对数据通信这样的变速率业务不适合, 例如, 若按业务的峰值速率静态分配带宽, 则整个系统带宽很快就被耗尽, 而且带宽利用率很低, 所以需要采用 DBA (Dynamic Bandwidth Assignment, 动态带宽分配) 提升系统的带宽利用率。

对于从 ONT 到 OLT 的上行传输, 多个 ONT 采用时分复用的方式将数据传送给 OLT, 必须实现上行接入的带宽控制, 以避免上行窗口之间的冲突。

DBA 动态带宽分配技术在 OLT 系统中专用于带宽信息管理和处理, 是一种能在微秒或毫秒级的时间间隔内完成对上行带宽的动态分配的机制。在 OLT 系统中, 在上行方向可以基于各个 ONT 进行流量调度。

DBA 的实现过程如图 3-5 所示, ONT 如果有上行信息发送, 会向 OLT 发送报告申请带宽, OLT 内部的 DBA 模块不断收集 DBA 报告信息进行计算, 并将计算结果以 BW Map (Bandwidth Map, 带宽地图) 的形式下发给各 ONT。各 ONT 根据 OLT 下发

的 BW Map 信息在各自的时隙内发送上行突发数据,占用上行带宽。这样就能保证每个 ONT 都可以根据实际的发送数据流量动态调整上行带宽,从而提升了上行带宽的利用率。

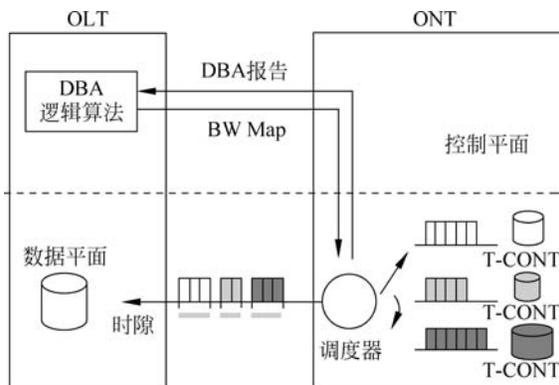


图 3-5 DBA 实现过程

DBA 对 PON 的带宽应用情况进行实时监控,OLT 根据带宽请求和当前带宽利用情况,以及配置情况进行动态的带宽调整。

DBA 可以带来以下好处:

- (1) 可以提高 PON 端口的上行线路带宽利用率。
- (2) 可以在 PON 口上增加更多的用户。
- (3) 用户可以享受到更高带宽的服务,特别适用于对带宽突变比较大的业务。

PON 的上行方向采用 DBA 进行带宽的分配,每个 ONT 的带宽是由 OLT 集中控制和分配,在带宽的分配上,可以支持独享+共享的方式,实现带宽利用的最大化。

(1) 每个 ONT 可以单独配置一个独享的带宽,例如,配置为 Fixed 固定带宽,或者 Assured 保证带宽(其他 Fixed 固定带宽的分配优先级要高于 Assured 保证带宽)。

(2) Fixed 固定带宽是不能共享的,如果 OLT 给某个 ONT 分配了 Fixed 固定带宽之后,如果本 ONT 没有报文需要发送,那么也会为这个 ONT 继续保留 Fixed 固定带宽。

(3) Assured 保证带宽指的是在某个 ONT 配置了 Assured 保证带宽之后,如果这个 ONT 需要发送报文,那么所配置的 Assured 带宽一定可以被该 ONT 使用,不会被其他 ONT 抢走;如果某个 ONT 配置了 Assured 带宽,但是该 ONT 又不使用,那么这部分的带宽会被分给其他 ONT 共享。

(4) 每个 ONT 可以在配置了独享带宽之后,再配置一个共享带宽(Non Assured 和 Best-Effort),在这种配置下,如果某个 ONT 突发需要一个大的带宽,而其他 ONT

暂没有大带宽发送的时候,那么该 ONT 可以把其他 ONT 不用的带宽拿过来使用。采用这种配置,某个 ONT 在某个时刻可以支持千兆以上的带宽,从统计复用的角度看,各个 ONT 都有能力达到千兆的带宽。例如,当前的上网业务,也只是在打开网页的瞬间下载流量会比较大,这时需要一个高带宽用于网页信息的下载。客户在浏览网页的时候,基本不需要下载流量,此时,这部分的流量就可以给其他客户使用。

带宽分配可以按照 ONT 为单位(也支持按照更细粒度的 T-CONT 为单位)进行分配,分配过程分四轮。按带宽类型的优先级对总带宽进行分配,每轮对于含特定带宽的 ONT(或者更细粒度的 T-CONT)进行遍历计算。如图 3-6 所示,DBA 带宽的分配顺序如下。

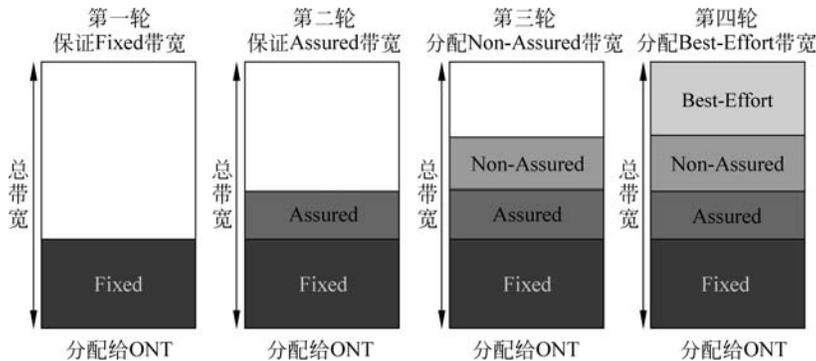


图 3-6 DBA 带宽的分配顺序

(1) 第一轮保证 Fixed 带宽: 无论 ONT 实际上行需求是多少,都按静态配置的值进行分配。

(2) 第二轮保证 Assured 带宽: 根据 ONT 实际上行需求进行分配,最大值为静态配置的 Assured 大小。

(3) 第三轮分配 Non-Assured 带宽: 当前两轮分配后有剩余时,对 Non-Assured 带宽有需求的 ONT 按策略进行分配。

(4) 第四轮分配 Best-Effort 带宽: 当前 3 轮分配后有剩余时,对 Best-Effort 带宽有需求的 ONT 均分剩余带宽。

### 3.1.4 PON 多 ONT 处理技术

#### 1. 测距

由于 PON 技术属于无源汇聚技术,所以在上行方向需要确保各个不同物理距离

下的 ONT 所发送的数据能按顺序到达 OLT,不能由于光纤传输时延导致不同 ONT 发送的数据报文到达 OLT 后产生冲突。

对 OLT 而言,各个不同的 ONT 到 OLT 的物理距离不相等,光信号在光纤上的传输时间不同,到达各 ONT 的时刻不同。此外,OLT 与 ONT 的 RTD(Round Trip Delay,环路时延)也会随着时间和环境的变化而变化。因此在 ONT 以 TDMA 方式(也就是在同一时刻,OLT 一个 PON 口下的所有 ONT 中只有一个 ONT 在发送数据)发送上行信元时可能会出现碰撞冲突,为了保证每一个 ONT 的上行数据在光纤汇合后,插入指定的时隙,彼此间不发生碰撞,且不要间隙太大,OLT 必须对每一个 ONT 与 OLT 之间的距离进行精确测定,以便控制每个 ONT 发送上行数据的时刻。

测距的过程:

(1) OLT 在 ONT 第一次注册时就会启动测距功能,获取 ONT 的往返延时 RTD,计算出每个 ONT 的物理距离。

(2) 根据 ONT 的物理距离指定合适的均衡延时参数(Equalization Delay,EqD)。

OLT 在测距的过程需要开窗,即 Quiet Zone,暂停其他 ONT 的上行发送通道。OLT 开窗通过将 BWmap 设置为空,不授权任何时隙来实现。

通过 RTD 和 EqD,使得各个 ONT 发送的数据帧同步,保证每个 ONT 发送数据时不会在分光器上产生冲突。相当于所有 ONT 都在同一逻辑距离上,在对应的时隙发送数据即可,从而避免上行信元发生碰撞冲突。

## 2. 突发光电技术

PON 上行方向采用时分复用的方式工作,每个 ONT 必须在许可的时隙才能发送数据,在不属于自己的时隙必须瞬间关闭光模块的发送信号,才不会影响其他 ONT 的正常工作。

如图 3-7 所示,ONT 侧需要支持突发发送功能,ONT 的激光器应能快速地打开和关闭,防止本 ONT 的发送信号干扰到其他的 ONT。测距保证不同 ONT 发送的信元在 OLT 端互不冲突,但测距精度有限,一般为 $\pm 1\text{b}$ ,不同 ONT 发送的信元之间会有几 burst 的防护时间(但不是比特的整数倍),如果 ONT 侧的光模块不具备突发发送功能,则会导致发送信号出现叠加,信号会失真。

如图 3-8 所示,对于 OLT 侧,必须根据时隙对每个 ONT 的上行数据进行突发接收,因此,为了保证 PON 系统的正常工作,OLT 侧的光模块必须支持突发接收功能。

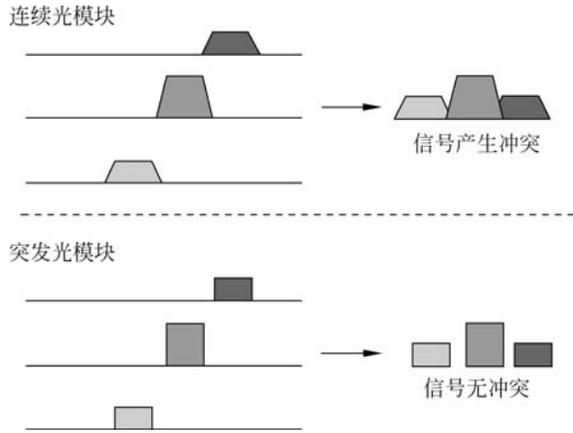


图 3-7 连续光模块和突发光模块发送信号对比

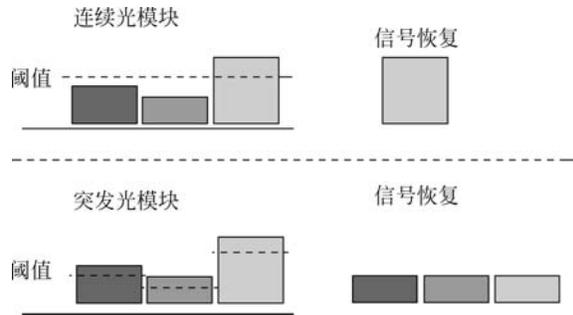


图 3-8 连续光模块和突发光模块接收信号对比

(1) 由于每个 ONT 到 OLT 的距离不同,所以光信号衰减对于每个 ONT 都是不同的,这可能导致 OLT 在不同时隙接收到的报文的功率电平是不同的。

(2) 如果 OLT 侧的光模块不具备光功率突变的快速处理能力,则会导致距离较远、光功率衰减较大的 ONT 光信号到达 OLT 的时候,由于光功率电平小于阈值而恢复出错误的信号(高于阈值电平才认为有效,低于阈值电平则无法正确恢复)。动态调整阈值功能可以在 OLT 按照接收光信号的强弱动态调整收光功率的阈值以保证所有 ONT 的信号可以完整恢复。

GPON 下行是按照广播的方式将所有数据发送到 ONT 侧,因此,要求 OLT 侧的光模块必须连续发光,ONT 侧的光模块也工作在连续接收方式,所以在 GPON 下行方向,OLT 光模块无须具有突发发送功能,ONT 光模块无须具有突发接收功能。

### 3.1.5 PON 安全保障技术

#### 1. 传输介质安全

PON 和 XG(S)-PON 采用光纤作为传输介质,需要采用支持光接口的设备才能对接,相比以太网电接口而言更安全。

光纤和传统的以太网线缆相比,天然具有防电磁干扰的能力,在恶劣环境的可靠性会更好。

#### 2. 帧结构复杂保证数据传输安全

如图 3-9 所示,PON 系统光纤中采用 PON 帧格式进行传输,而不是通用的以太网报文格式,采用通用的以太网抓包工具无法进行抓包分析,只能通过专业的昂贵的 PON 协议分析仪,才有可能进行抓包分析,保证了数据传输的安全性。

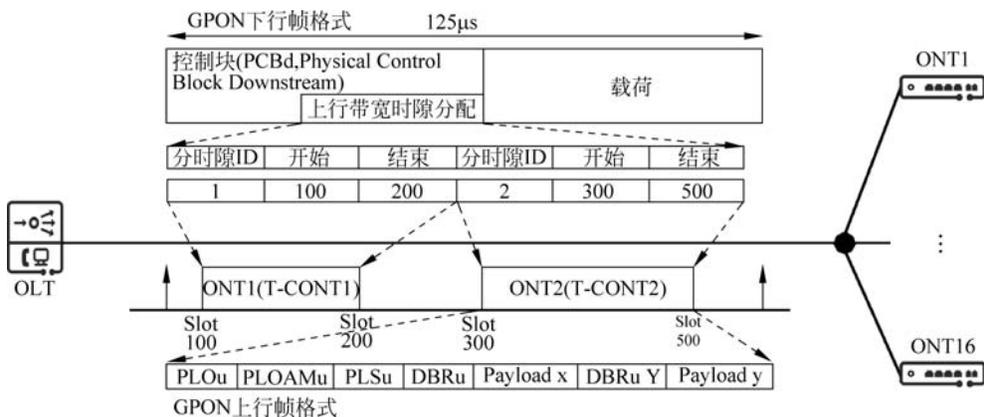


图 3-9 PON 上下行帧传输原理

#### 3. ONT 内部处理安全

PON 系统中下行数据采用广播的方式发送到所有的 ONT 上,通常情况下,每个 ONT 只处理发给自己的报文,丢弃非发给自己的报文。具体的处理过程如图 3-10 所示,非自己的 PON 报文在转换为以太网报文前被丢弃。

(1) ONT 上的 PON 协议处理模块,判断该 PON 格式的帧是不是发送给本 ONT,如果不是发送给本 ONT,则直接丢弃,以太网处理模块对该 GPON 帧不可见。

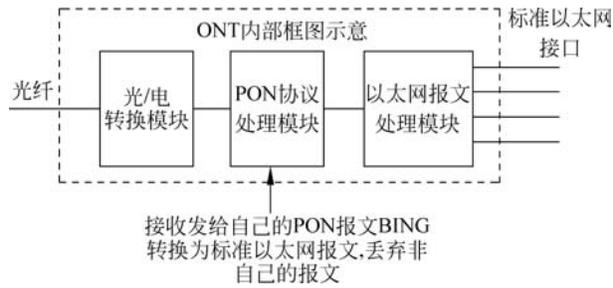


图 3-10 ONT 内部处理机制

如果是发给本 ONT 的，则转换为以太网报文送到以太网报文处理模块。

(2) ONT 的每个以太网端口，只会看到该用户相关的报文，ONT 类似以前的接入交换机。

(3) ONT 的多个以太网端口之间默认是互相隔离的，相互之间不能访问；但也可以通过下发命令的方式支持多个以太网端口之间的互通。

#### 4. 多 ONT 互相隔离安全

如图 3-11 所示，在 GPON 和对称 10G GPON 系统中，ONT 的上行信息是互相隔离的。

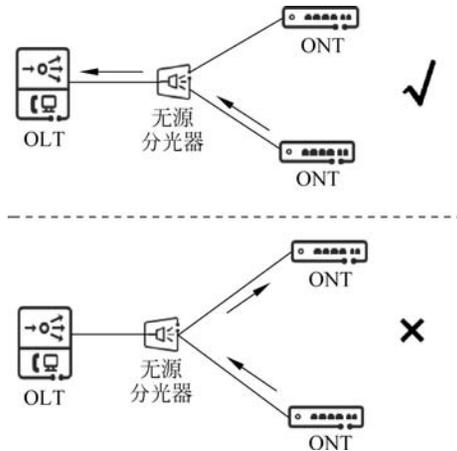


图 3-11 多 ONT 相互隔离原理

(1) 受限于光的直射性(光只能直线传输)，所以每个 ONT 发送的光信号只能发送给 OLT 设备，无法反射到其他 ONT。

(2) 所以 ONT 在上行方向是互相隔离的,无法接收到其他 ONT 发送的信息。

## 5. 数据加密技术

PON 技术在正常情况下可以通过上述方式保证安全,但是因为 PON 下行传输采用的是广播方式,ONT 可以接收到其他 ONT 的下行数据,也存在一些不安全的因素,所以需要针对每个 ONT 进行数据加密操作。采用加密操作,既可以保证在光纤线路上无法被侦听识别,也可以实现多个 ONT 之间的互相隔离。

PON 系统采用线路加密技术解决这一安全问题。PON 系统采用加密算法将明文传输的数据报文进行加密,以密文的方式进行传输,提高安全性。

如图 3-12 所示,OLT 和 ONT 之间采用密钥进行加密后在光纤中传输。

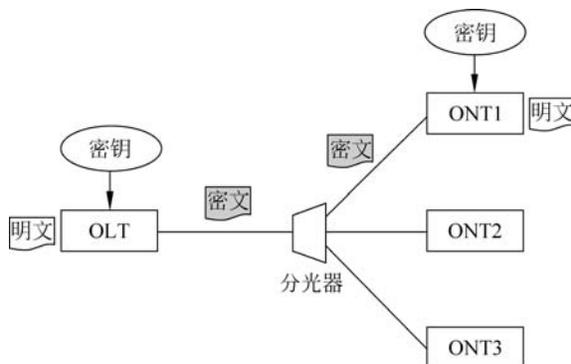


图 3-12 线路加密原理

(1) OLT 侧: OLT 将从上行以太网接口收到的以太网报文采用密钥加密之后,转换为 PON 协议帧,通过 PON 下行的光纤送往 ONT。

(2) ONT 侧: ONT 将从光纤中收到的 OLT 加密后的 PON 帧,采用同样的密钥解密并转换为以太网报文之后,从 ONT 的以太网接口发送到终端设备上。

PON 系统使用的密钥使用定期更新机制,以提高安全性。

GPON 和对称 10G GPON 的 OLT 和 ONT 之间采用 AES128 进行加密。密钥是由 ONT 生成,发给 OLT(避免了由 OLT 生成密钥,广播给 ONT,其他的 ONT 也会收到该密钥的风险),每个 ONT 加密的密钥会定期更新,减少密钥被捕获破解的可能性。

GPON 和对称 10G GPON 系统定期地进行 AES 密钥的交换和更新,提高了传输数据的可靠性。

- (1) OLT 发起密钥更换请求,ONT 响应并将生成的新的密钥发给 OLT。
  - (2) OLT 收到新的密钥后,进行密钥切换,使用新的密钥对数据进行加密。
  - (3) OLT 将使用新密钥的帧号通过相关的命令通知 ONT。
  - (4) ONT 收到使用新密钥的帧号后,在相应的数据帧上切换校验密钥。
- 多个 ONT 之间的加密处理如图 3-13 所示。

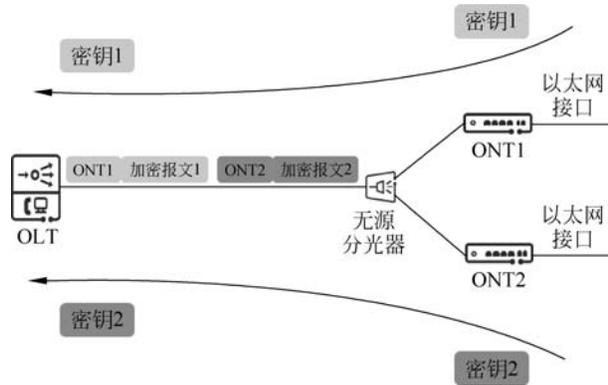


图 3-13 多个 ONT 之间的加密处理

## 6. ONT 认证技术

PON 系统的 P2MP 架构下行数据采用广播方式发送到所有的 ONT 上,这样会给非法接入的 ONT 提供接收数据报文的机会。

为了解决这个问题,如图 3-14 所示,PON 系统通过 ONT 认证确保接入的 ONT 的合法性,OLT 基于上报的认证信息(比如序列号 SN、密码 Password)对 ONT 合法性

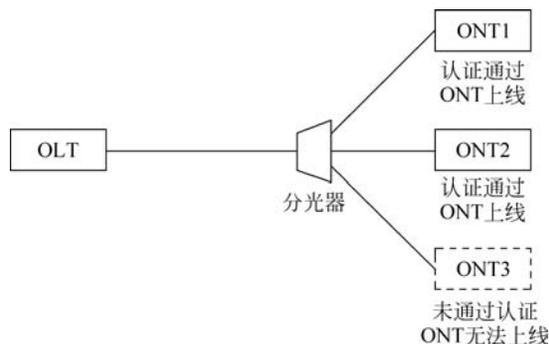


图 3-14 ONT 认证机制

进行校验,只有通过认证的合法 ONT 才能接入 PON 系统,ONT 经认证上线后才可以传输数据。即 ONT 上线后,向 OLT 发起认证请求,认证成功后 ONT 才能上线,只有 ONT 上线才能够被 OLT 管理和配置业务。

### 3.1.6 PON 技术演进

随着大带宽业务的推出,GPON 存在带宽不足,不能满足最终用户需要的情况,也需要开发下一代的 PON 技术,以提升 PON 线路上的带宽。

GPON 的下一代增强技术是 XG(S)-PON,又称 10G GPON,包括 XG-PON(10-Gigab-capable asymmetric PON,非对称 10G PON)和 XGS-PON(10-Gigab-capable symmetric PON,对称 10G PON)两种技术。

(1) XG-PON: 下行线路速率为 9.953Gb/s; 上行线路速率为 2.488Gb/s。

(2) XGS-PON: 下行线路速率为 9.953Gb/s; 上行线路速率为 9.953Gb/s。

#### 1. 演进思路

10G GPON 支持 XG-PON ONT、XGS-PON ONT 和 GPON ONT 在同一个 ODN 下共存,支持不同种类的 ONT 平滑演进。

如图 3-15 所示,XGS-PON 和 GPON 的上下行方向都是通过波分共存。

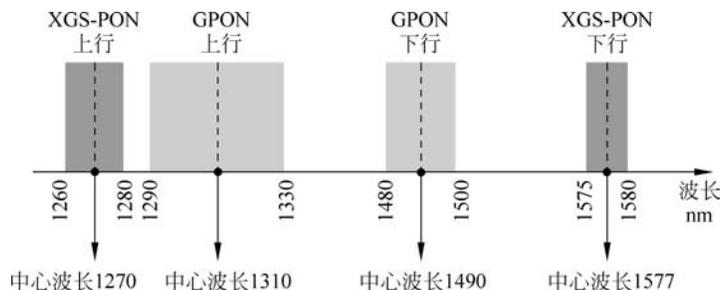


图 3-15 GPON 和 XGS-PON 技术波长分布

(1) XG-PON 和 XGS-PON 的下行方向都是 10Gb/s,下行方向采用 1577nm 波长窗口(使用 1575~1580nm 波长),与 GPON 的下行 1490nm 波长窗口(使用 1480~1500nm 波长)不冲突,通过波分方式共存。

(2) XG-PON ONT 的上行是 2.5Gb/s,XGS-PON ONT 的上行是 10Gb/s,两者都是采用 1270nm 波长窗口(使用 1260~1280nm 波长),和 GPON 的 1310nm 波长窗

口(使用 1290~1330nm 波长)波分共存。

(3) XG-PON 的 ONT 和 XGS-PON ONT 采用相同的波长窗口,采用时分共存,不同的 ONT 占用不同的时隙发送报文。

## 2. 演进方案

GPON 演进到 10G GPON,可采用 PON Combo 演进方案。

如图 3-16 所示,在 OLT 侧插入一块 XGS-PON 合一单板(XGS-PON Combo 板,包括 PON Combo 光模块),XGS-PON Combo 端口同时支持 XGS-PON 和 GPON,当需要 GPON 升级为 XGS-PON 的时候,只需要将 GPON ONT 更换为 XGS-PON ONT 即可完成演进。GPON ONT、XG-PON ONT 和 XGS-PON ONT 在同一个 ODN 下共存。

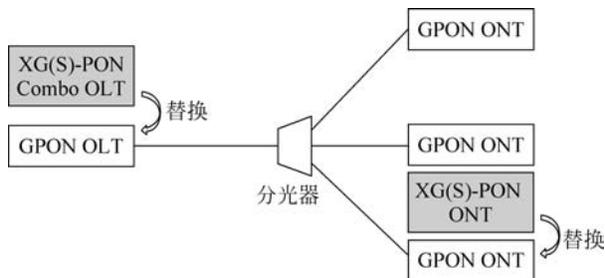


图 3-16 PON Combo 演进方案

GPON 演进到 XGS-PON,不需要变更 ODN 的连接关系,也就是说,ODN 网络可以继续使用。

XGS-PON 和 GPON 支持共存,复用相同的 ODN 网络,由于 XGS-PON 和 GPON 之间采用的波分共存技术,所以 GPON 和 XGS-PON 之间互相隔离,不会互相影响。

### 3.1.7 PON 技术标准

PON 标准制式主要分为两大类,分别对应两个标准组织:国际电信联盟-电信标准部 ITU-T (International Telecommunications Union-Telecommunication Standardization Sector) 和电气电子工程师协会 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers),ITU-T 和 IEEE 分别定义了一套 PON 的标准并进行演进。

在 ITU 和 IEEE 两个标准组织之间,存在着一定的协同,例如,在 PON 的物理层

上尽量共用波长和速率等,共享 PON 产业链。

ITU-T 制定的 GPON、10G GPON 等标准和技术,是业界的主流 PON 技术。

当前世界上使用绝大部分 PON 接入都是基于 ITU-T 标准体系制定的 GPON、10G GPON 标准和技术。

家庭网络采用的是 GPON 和 10G GPON 系列标准。

ITU-T 在原来的 APON、BPON 的基础上进行了技术增强,定义了 GPON 技术,并在市场和应用上取得了巨大成功。

在 ITU 组织中,除了工程师之外,还有很多运营商也作为客户和需求提出者加入,大家都非常关注现网已有业务或者将来可能使用的业务在 GPON 上的支持情况,所以在制定 GPON 的标准过程中,除了关注以太网业务在 PON 上的传输,也关注以前的语音、E1 专线等各种业务在 PON 上的承载,包括关注后续的视频业务传输,所以对 PON 上承载业务的 QoS 保证等提出较高的要求,GPON 标准也更适用于支持多业务承载。

GPON 是目前全球主流的 PON 网络建设技术。

ITU-T 定义的 GPON 标准如下:

(1) ITU-T G. 984. 1 Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): General characteristics,主要讲述 GPON 技术的基本特性和主要的保护方式。

(2) ITU-T G. 984. 2 Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification,主要讲述了 GPON 的物理层参数,如光模块的各种物理参数,包括发送光功率、接收灵敏度、过载光功率等。同时定义了不同等级的光功率预算。

(3) ITU-T G. 984. 3 Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification,主要讲述了 GPON 的 TC 层协议,包括上下行的帧结构及 GPON 的工作原理。

(4) ITU-T G. 984. 4 Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT management and control interface specification,主要讲述 GPON 的管理维护协议,包括 OAM、PLOAM 和 OMCI 协议。

(5) ITU-T G. 988 ONT management and control interface(OMCI) specification,主要讲述 OMCI 管理协议。

ITU-T 定义的 10G GPON 标准如下:

(1) ITU-T G. 987. 1 10-Gigab-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements, 主要讲述非对称的 10G GPON 技术的基本要求。

(2) ITU-T G. 987. 2 10-Gigab-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification, 主要讲述了非对称 10G GPON 的物理层参数, 如光模块的各种物理参数, 包括发送光功率、接收灵敏度、过载光功率等。同时定义了不同等级的光功率预算。

(3) ITU-T G. 987. 3 10-Gigab-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence layer (TC) specification, 主要讲述了非对称 10G GPON 的 TC 层协议, 包括上下行的帧结构及工作原理。

(4) ITU-T G. 9807. 1 10-Gigab-capable symmetric passive optical network (XGS-PON), 主要讲述了对称的 10G GPON 技术的要求。

ITU-T 定义的 40G GPON 标准如下:

(1) ITU-T G. 989. 1 40-Gigab-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements, 主要讲述了 40G GPON 技术的要求。

(2) ITU-T G. 989. 2 40-Gigab-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification, 主要讲述了 40G GPON 的物理层参数, 如光模块的各种物理参数, 包括发送光功率、接收灵敏度、过载光功率等。

ITU-T 定义的 50G GPON 标准已经发布, 相信不久的将来就会有更多应用。

---

## 3.2 WiFi 基础技术

---

WiFi 是一种基于 IEEE 802. 11 标准的无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN) 技术。

### 3.2.1 WiFi 系统介绍

如图 3-17 所示, WiFi 系统包括工作站、接入热点、无线介质以及分布式系统。

(1) 工作站: 指带 WiFi 功能的笔记本电脑、平板电脑、智能手机等。

(2) 接入热点 (Access Point, AP): 指带 WiFi 功能的 ONT、CPE、CM、路由器等。

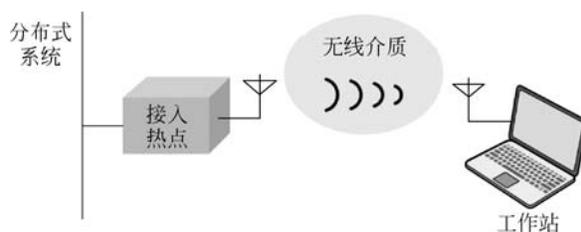


图 3-17 WiFi 系统组成

(3) 无线介质：采用射频和天线，通过空气传播信号。

(4) 分布式系统：由工作站、接入热点、无线介质组成的系统。

AP 提供无线接入服务时，需要配置服务集标识符 (Service Set Identifier, SSID)，STA 打开 WiFi 时，扫描到的 WiFi 热点名称，就是 SSID。

一个物理 AP 可以配置多个 SSID，相当于有多个虚拟 AP (VAP)，STA 打开 WiFi 时，可以扫描到多个热点。多个 VAP 只是用于区分业务，并没有增加空口资源。

### 3.2.2 WiFi 数据传输机制

AP 和 STA 发送数据时，需要错开时间，否则会相互干扰，对方收不到数据。为了成功发送数据，WiFi 有 3 种协调机制。

(1) DCF：分布式协调功能 (Distributed Coordination Function)，AP 和 STA 通过载波侦听多路访问、碰撞避免机制发送数据。

(2) PCF：点协调功能 (Point Coordination Function)，由 AP 统一协调每个设备发送数据的时间。

(3) HCF：混合协调功能 (Hybrid Coordination Function)，混合使用 DCF 和 PCF 方式。空中可能有多个 AP，PCF 的效率不高，实际广泛应用的是 DCF 方式。

通过 DCF 方式发送数据的过程如图 3-18 所示。

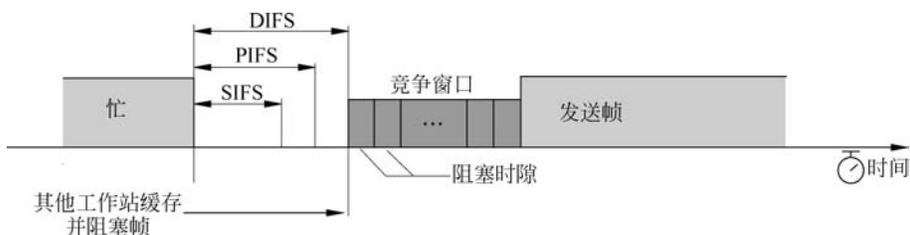


图 3-18 WiFi 网络的 DCF 发送数据的过程

- (1) 首先检测空口是否繁忙。
- (2) 如果空口空闲,则等待 DIFS+随机时间。
- (3) 等待之后,如果空口仍然空闲,则发送数据。

在图 3-18 中,SIFS(Short InterFrame Space)是一个连续过程的间隔,PIFS(PCF InterFrame Space)用于 PCF,DIFS(DCF InterFrame Space)用于 DCF 方式。

如果多个设备的随机时间刚好相同,那么仍然会存在冲突,需要重新等待发送机会重发数据。为了确保对方能够收到数据,发送数据时需要对方确认。帧和 ACK 是一个连续的过程,发送 ACK 时不需要检测空口,如图 3-19 所示。

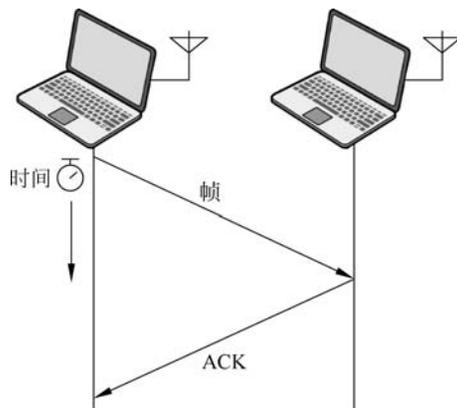


图 3-19 WiFi 数据传输机制

### 3.2.3 工作信道和工作频宽

WiFi 设备通过无线电波发送数据时,需要工作在一定的频率范围,这个频率范围称为信道。由 AP 选择工作信道,STA 跟随 AP 的工作信道。工作在不同信道的 WiFi 设备,可以同时发送数据。工作在相同信道的 WiFi 设备,不能同时发送数据。WiFi 工作的频率范围大小可以不同,称为工作频宽,包括 20MHz、40MHz、80MHz、160MHz 频宽。

2.4GHz 频段,中国内地开放 1~13 信道,这些信道相互重叠,如图 3-20 所示。802.11b/g/n 频宽为 22MHz,不重叠的只有 1、6、11 3 个信道。采用 40MHz 频宽时,不重叠的信道只有 1 个。

在 5GHz 频段,中国内地开放 36~64 信道以及 149~165 信道,其中 52~64 信道需要支持 DFS/TPC,进行雷达检测和功率控制,如图 3-21 所示。与 2.4GHz 频段

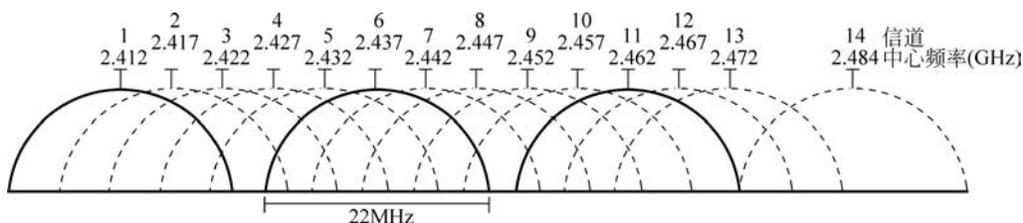


图 3-20 WiFi 2.4GHz 频段的信道

不同,5GHz 频段的 40MHz、80MHz、160MHz 频宽的信道由标准定义,不能随意组合。

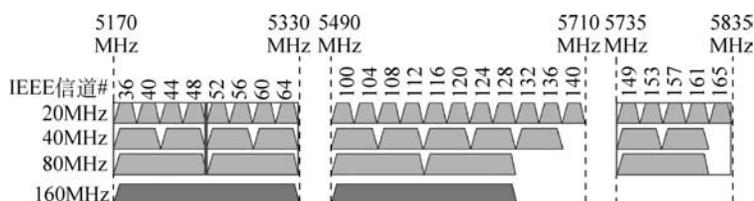


图 3-21 WiFi 5GHz 频段的信道

### 3.2.4 WiFi 速率

#### 1. 物理速率

IEEE 802.11 定义了多种物理层标准,不同标准可以支持不同的物理速率。

##### 1) IEEE 802.11b

IEEE 802.11b 工作在 2.4GHz 频段,支持的物理速率如下: 1Mb/s、2Mb/s、5.5Mb/s、11Mb/s。

##### 2) IEEE 802.11g 和 IEEE 802.11a

IEEE 802.11g 工作在 2.4GHz 频段,IEEE 802.11a 工作在 5GHz 频段,支持的物理速率如表 3-1 所示。

表 3-1 IEEE 802.11g 和 IEEE 802.11a 支持的物理速率

调制方式	编 码 率	物理速率/(Mb/s)
BPSK	1/2	6.0
BPSK	3/4	9.0
QPSK	1/2	12.0
QPSK	3/4	18.0

续表

调制方式	编 码 率	物理速率/(Mb/s)
16-QAM	1/2	24.0
16-QAM	3/4	36.0
64-QAM	2/3	48.0
64-QAM	3/4	54.0

WiFi 设备需要根据空口情况动态调整调制方式和编码率,工作在不同的空口速率。

### 3) IEEE 802.11n

IEEE 802.11n 工作在 2.4GHz 频段或 5GHz 频段。支持 MIMO,多空间流的物理速率在单空间流的物理速率基础上乘以空间流个数。支持 40MHz 频宽。支持的物理速率如表 3-2 所示。

表 3-2 IEEE 802.11n 支持的物理速率

MCS 索引	空间流个数 /MIMO	调制方式	码率	20MHz 空口速率 /(Mb/s)	40MHz 空口 速率/(Mb/s)
0	1	BPSK	1/2	7.2	15.0
1	1	QPSK	1/2	14.4	30.0
2	1	QPSK	3/4	21.7	45.0
3	1	16-QAM	1/2	28.9	60.0
4	1	16-QAM	3/4	43.3	90.0
5	1	64-QAM	2/3	57.8	120.0
6	1	64-QAM	3/4	65.0	135.0
7	1	64-QAM	5/6	72.2	150.0
...					
15	2	64-QAM	5/6	144.4	300.0
...					
23	3	64-QAM	5/6	216.7	450.0
...					
31	4	64-QAM	5/6	288.9	600.0

空间流个数取决于 AP 和 STA 共同的能力,如果 STA 支持的空间流个数较少,则无法达到较高的速率。2.4GHz 频段的信道比较少,往往无法工作在 40MHz 频宽。应用比较广泛的 IEEE 802.11n 设备,一般支持 2 条空间流,20MHz 频宽下可以达到 144.4Mb/s 物理速率。

## 4) IEEE 802.11ac

IEEE 802.11ac 工作在 2.4GHz 频段或 5GHz 频段。在 IEEE 802.11n 的基础上，提高调制方式，支持更多的空间流个数，更大的频宽。支持的物理速率如表 3-3 所示。

表 3-3 IEEE 802.11ac 支持的物理速率

MCS	空间流个数 /MIMO	调制方式	码率	20MHz 空口速率 /(Mb/s)	40MHz 空口速率 /(Mb/s)	80MHz 空口速率 /(Mb/s)	160MHz 空口速率 /(Mb/s)
0	1	BPSK	1/2	7.2	15.0	32.5	65.0
...							
7	1	64-QAM	5/6	72.2	150.0	325.0	650.0
8	1	256-QAM	3/4	86.7	180.0	390.0	780.0
9	1	256-QAM	5/6	—	200.0	433.3	866.7
...							
9	2	256-QAM	5/6	—	400.0	866.7	1733.3
...							
9	3	256-QAM	5/6	—	600.0	1300.0	2600.0
...							
9	4	256-QAM	5/6	—	800.0	1733.3	3466.7
...							
9	8	256-QAM	5/6	—	1600.0	3466.7	6933.4

应用比较广泛的 IEEE 802.11ac 设备，支持 80MHz 频宽，2 条空间流可以达到 866.7Mb/s 物理速率，3 条空间流可以达到 1300Mb/s 物理速率，4 条空间流可以达到 1733.3Mb/s 物理速率。

## 5) IEEE 802.11ax

IEEE 802.11ax 工作在 2.4GHz 频段或 5GHz 频段，在 IEEE 802.11ac 的基础上，进一步提高调制方式，改善编码方式。支持的物理速率如表 3-4 所示。

表 3-4 IEEE 802.11ax 支持的物理速率

MCS	空间流个数 /MIMO	调制方式	码率	20MHz 空口速率 /(Mb/s)	40MHz 空口速率 /(Mb/s)	80MHz 空口速率 /(Mb/s)
0	1	BPSK	1/2	8.6	17.2	36.0
...						
9	1	256-QAM	5/6	114.7	229.4	480.4
10	1	1024-QAM	3/4	129.0	258.1	540.4
11	1	1024-QAM	5/6	143.4	286.8	600.5

续表

MCS	空间流个数 /MIMO	调制方式	码率	20MHz 空口速率 /(Mb/s)	40MHz 空口速率 /(Mb/s)	80MHz 空口速率 /(Mb/s)
...						
11	2	1024-QAM	5/6	286.8	573.5	1201.0
...						
11	3	1024-QAM	5/6	430.1	860.3	1801.5
...						
11	4	1024-QAM	5/6	573.5	1147.1	2401.9
...						
11	8	1024-QAM	5/6	1147.1	2294.2	4803.9

主流 IEEE 802.11ax 设备支持 2 条空间流,160MHz 频宽,物理速率达到 2401.9Mb/s。如果支持 4 条空间流,160MHz 频宽,或 8 条空间流,80MHz 频宽,物理速率可以达到 4803.9Mb/s。

## 2. 承载速率

WiFi 实际承载以太网报文的速率,和物理速率有很大区别,原因如下:

- (1) IEEE 802.11 帧头部开销大。
- (2) 空口冲突避免机制需要消耗时间。
- (3) ACK 帧需要消耗时间。
- (4) 管理帧需要消耗时间。
- (5) 其他无线设备消耗时间。
- (6) 由于障碍物、空间衰减,达不到最大的物理速率。
- (7) STA 空间流个数较少,或不支持最近的技术标准,或没有工作在最大频宽。

评估空口承载速率时,需要确认当前工作的技术标准、频宽、空间流个数、信号强度、干扰情况等因素。排除这些因素以后,一般可以达到的承载速率如表 3-5 所示。

表 3-5 WiFi 各空口类型的实际感知速率

空口类型	工作频宽 /(Mb/s)	空口速率 /(Mb/s)	理想测试速率 /(Mb/s)	实际感知速率 /(Mb/s)
2×2 802.11n	20	144	80~95	60~75
3×3 802.11n	20	216	110~130	80~100
2×2 802.11ac	80	866	500~530	370~420
3×3 802.11ac	80	1300	650~750	580~650

续表

空口类型	工作频宽 (/Mb/s)	空口速率 (/Mb/s)	理想测试速率 (/Mb/s)	实际感知速率 (/Mb/s)
2×2 802.11ax	80	1200	900~960	700~750
4×4 802.11ax	80	2400	1800~1920	1400~1500
2×2 802.11ax	160	2400	1800~1920	1400~1500
4×4 802.11ax	160	4800	3600~3840	2800~3000

### 3.2.5 WMM(WiFi 多媒体标准)

通过 WiFi 承载视频,语音业务时,可以通过 WMM 机制,避免数据业务影响视频或语音业务的质量。前面说到,发送数据之前,需要等待“DIFS+随机时间”,支持 WMM 以后,DIFS 改为 AIFS。WMM 定义了 VO、VI、BE、BK 4 种业务类型,不同业务类型的 AIFS 不同,随机时间的窗口不同,通过 AIFS 和随机窗口的差异,确保语音和视频业务更容易获得发送机会。WMM 原理图如图 3-22 所示。

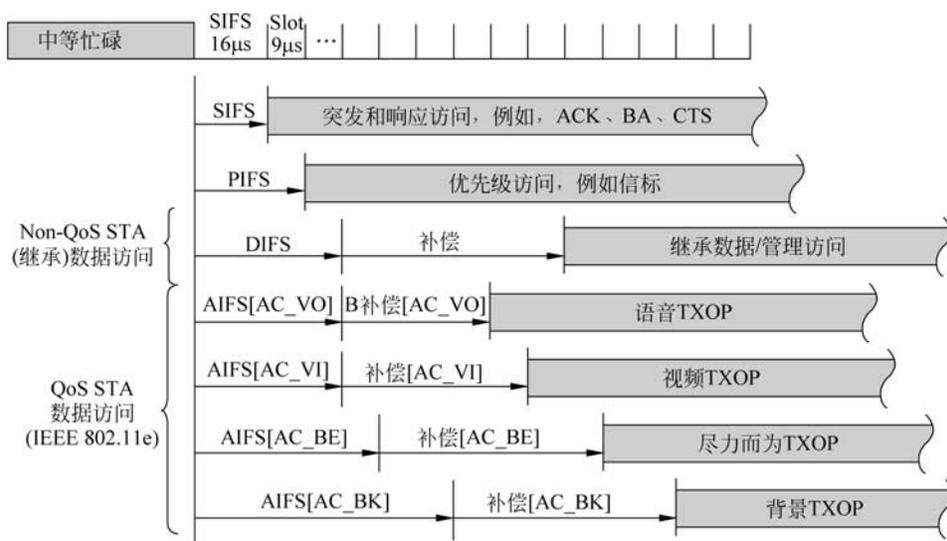


图 3-22 WMM 原理图

语音和视频报文需要在 IP 头或 VLAN tag 中填写正确的优先级,确保能够映射到 VO 或 VI 队列。以 VLAN tag 优先级为例,6 和 7 对应 VO,4 和 5 对应 VI,3 和 0 对应 BE,2 和 1 对应 BK。

### 3.2.6 WiFi 测试标准 TR-398

在 2019 年世界移动大会上, BBF (Broadband Forum) 携手华为、瑞士电信 (Swisscom)、土耳其移动 (Turkcell)、UNH 等产业伙伴发布业界首个 WiFi 性能测试标准——《TR-398 WiFi 室内性能测试标准》。

该标准系统规范了一整套 WiFi 性能测试的范围、条件、测试用例及标准阈值, 第一次完整地阐述了 WiFi 的测试标准, 为用户 WiFi 体验提供了一把刻度精确的测量标尺, 帮助电信运营商更高效地测试室内家庭网关的 WiFi 性能, 如图 3-23 所示。

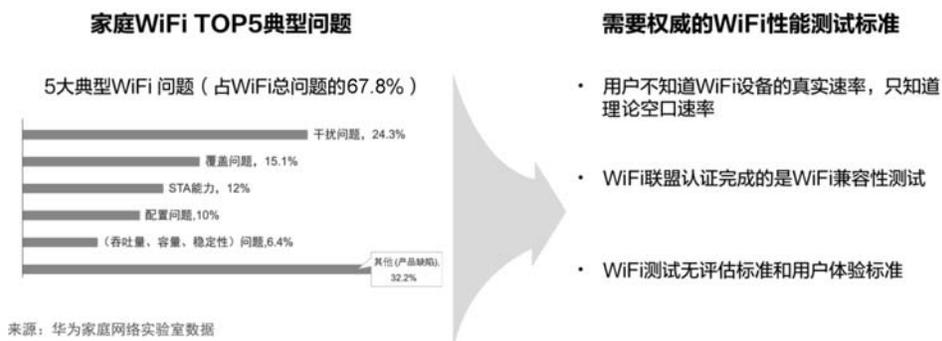


图 3-23 为什么需要 TR-398

针对 WiFi 速率低, 覆盖差, 干扰多, 质量不可视, 问题难定位、难解决等影响 WiFi 体验的问题都有了详细的标准和测试规则, 帮助运营商发展家庭网络和视频业务, 把更好的宽带体验带入每个家庭。

#### 1) TR-398 涵盖场景

TR-398 涵盖六大主要场景, 针对用户体验和业务承载的关键要素进行评估量化。

(1) RF 性能: 接收弱信号的能力, 如 64-QAM IEEE 802.11an, 其最小射频灵敏度  $>38\text{dB}$ ; 256-QAM IEEE 802.11ac, 其最小射频灵敏度  $>21\text{dB}$ 。

(2) 广覆盖: 通过墙壁和不同房间的性能为 IEEE 802.11ac, 短距离  $>560\text{m}$ ; 长距离  $>100\text{m}$ ; 吞吐量变化  $<40\%$ 。

(3) 大带宽: 最大吞吐量为 IEEE 802.11n  $2 \times 2 > 100\text{Mb/s}$ ; IEEE 802.11ac  $2 \times 2 > 560\text{Mb/s}$ 。

(4) 多用户: 支持 32 个 STA, 至少  $2\text{Mb/s}$  吞吐量。

(5) 抗干扰: 各种干扰下的性能损失为同频  $<60\%$ ; 叠频  $<60\%$ ; 邻频  $<5\%$ 。

(6) 稳定性: 24h 吞吐率偏差  $<20\%$ 。

## 2) TR-398 测试环境

WiFi 性能测试环境容易受到外界因素和环境的影响,使用屏蔽房测试环境就是为了测试过程中减少这些外部因素带来的影响。

TR-398 测试环境主要是在实验室通过模拟无干扰的环境下,验证网关与一个及多个终端设备间性能测试,以验证设备在理想环境下的极限性能和真实家居场景中的实际表现,如图 3-24 所示。

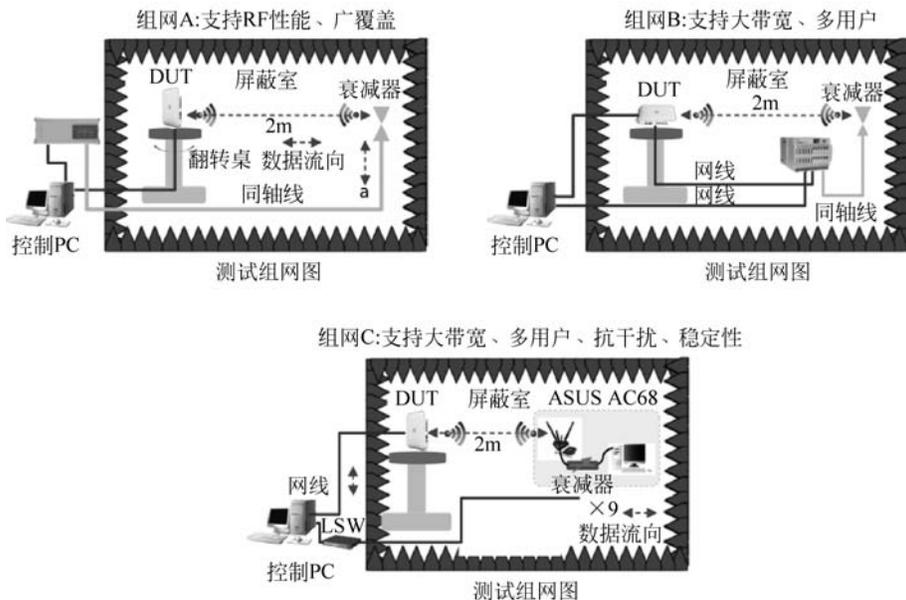


图 3-24 TR-398 TOP3 典型测试组网环境

TR-398 测试分类与测试项目如表 3-6 所示。

表 3-6 测试分类与测试项目

TR-398 测试类别	测试用例	测试目的	适用组网环境
RF 性能	接收灵敏度测试(可选测试)	测试网关接收和正确解调弱信号的能力	A
大带宽	最大链接数测试	验证网关最大接入数的能力,能否支持 32 个用户同时上线,且业务正常	B
	最大吞吐量测试	最大吞吐量测试目的是测量 DUT 的最大吞吐量性能 通过空口短距离连接测试(结合 WiFi 实际使用情况)	C

续表

TR-398 测试类别	测试用例	测试目的	适用组网环境
大带宽	空口公平测试	空口公平性测试旨在验证 WiFi 设备的能力	C
广覆盖	RVR 测试(拉锯测试)	RVR 测试: 测试 WiFi 性能随距离(信号强度)的变化测试	A
	空间一致性测试	为了验证空间域内 WiFi 信号的一致性	A
多用户	多终端性能测试	多终端性能测试的目的是测量多个 STA 同时连接的 WiFi 设备的性能	C
	频繁上下线测试	测试在频繁变化连接状态的动态环境下测量 WiFi 设备的稳定性	B
	下行 MU-MIMO 性能测试(可选测试)	测试网关下行 MU-MIMO 的性能	C
稳定性/健壮性	长期稳定性测试	长期稳定性测试是为了测量在压力下 WiFi 设备的稳定性。长时间(24h)持续监控吞吐量、连接可用性	C
抗干扰	同频邻频干扰测试	测试网关在干扰场景下的性能	C

TR-398 标准首次系统性地从 WiFi 的 RF 发射功率、吞吐量、覆盖、多用户、抗干扰、稳定性六大维度出发,通过客观量化最终用户的体验,定义了 WiFi 等效带宽(吞吐量)、不同距离下的速率和多用户在线的吞吐量等关键 KPI 指标,帮助电信运营商构建最佳视频体验的家庭网络。

虽然 TR-398 标准清晰明确,但普通用户在挑选 WiFi 网关时没有条件亲自测试,好在越来越多的机构已经认识到了 WiFi 用户体验的重要性,国内的测试机构百佳泰曾经发布了一份 WiFi 网关测试报告,其测试参考了 TR-398 的标准,给普通消费者提供了一把衡量 WiFi 质量的标尺。

### 3.3 WiFi 6 技术

随着视频会议、无线互动 VR、移动教学等业务应用越来越丰富,WiFi 接入终端越来越多以及 IoT 的发展,更多的移动终端接入了无线网络,家庭 WiFi 网络也随着众多智能家居设备的接入而变得拥挤。因此 WiFi 网络仍需不断提升速度,同时还要考虑是否能

接入更多终端,适应不断扩大的客户端设备数量,满足不同应用的用户体验需求。

WiFi 6 是 IEEE 802.11ax 标准的简称,随着 WiFi 标准演进,WFA 为了便于 WiFi 用户和设备厂商轻松了解其设备连接或支持的 WiFi 型号,选择使用数字序号来对 WiFi 重新命名。IEEE 802.11ax 标准于 2019 年正式推出,致力于解决因更多终端的接入导致整个 WiFi 网络效率降低的问题,引入了包括上行 MU-MIMO、OFDMA 频分复用、1024-QAM 高阶编码等技术,从频谱资源利用、多用户接入等方面解决网络容量和传输效率问题,目标是在密集用户环境中将用户的平均吞吐量相比 WiFi 5 提高至少 4 倍、并发用户数提升 3 倍以上,因此,WiFi 6(IEEE 802.11ax)也被称为高效率无线标准 High efficiency WLAN(HEW)技术。

### 3.3.1 OFDMA 频分复用技术

IEEE 802.11ax 之前,数据传输采用的是 OFDM 模式,用户是通过不同时间片段区分出来的。在每一个时间片段,一个用户完整占据所有的子载波,并且发送一个完整的数据包,如图 3-25 所示。

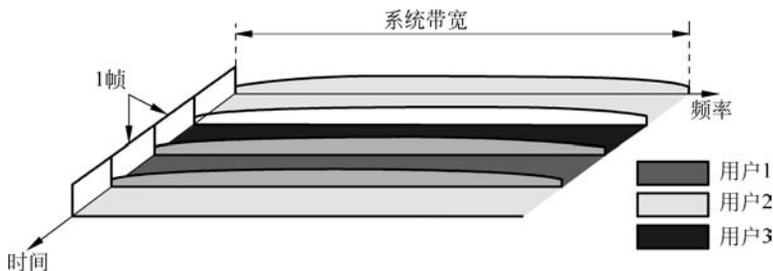


图 3-25 OFDM 模式

IEEE 802.11ax 中引入了一种更高效的数据传输模式,叫 OFDMA(因为 IEEE 802.11ax 支持上下行多用户模式,因此也可称为 MU-OFDMA),它通过将子载波分配给不同用户并在 OFDM 系统中添加多址的方法来实现多用户复用信道资源。迄今为止,它已被许多无线技术采用,例如 3GPP LTE。此外,IEEE 802.11ax 标准也仿效 LTE,将最小的子信道称为“资源单位”(Resource Unit, RU),每个 RU 中至少包含 26 个子载波,用户是根据时频资源块 RU 区分出来的。我们首先将整个信道的资源分成一个个小的固定大小的时频资源块 RU。在该模式下,用户的数据是承载在每一个 RU 上的,故从总的时频资源上来看,在每一个时间片上,有可能有多个用户同时发送,如图 3-26 所示。

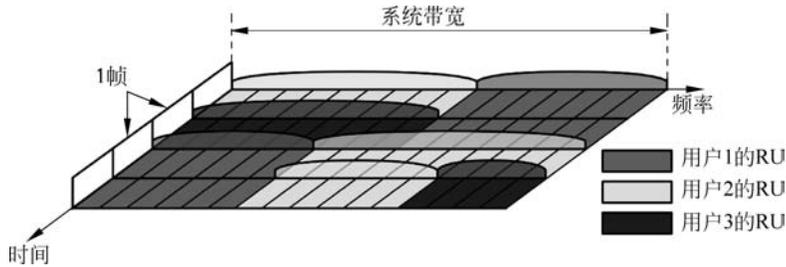


图 3-26 OFDMA 模式

OFDMA 相比 OFDM 有 3 点好处。

(1) 更细的信道资源分配：特别是在部分节点信道状态不太好的情况下，可以根据信道质量分配发送功率，来更精准地分配信道时频资源。不同子载波频域上的信道质量差异较大，IEEE 802.11ax 可根据信道质量选择最优 RU 资源来进行数据传输。

(2) 提供更好的 QoS：因为 IEEE 802.11ac 及之前的标准都是占据整个信道传输数据的，如果有一个 QoS 数据包需要发送，那么其一定要等之前的发送者释放完整个信道才行，所以会存在较长的时延。在 OFDMA 模式下，由于一个发送者只占据整个信道的部分资源，一次可以发送多个用户的数据，所以能够减少 QoS 节点接入的时延。

(3) 更多的用户并发及更高的用户带宽：OFDMA 是通过将整个信道资源划分成多个子载波（也可称为子信道），子载波又按不同 RU 类型被分成若干组，每个用户可以占用一组或多组 RU 以满足不同带宽需求的业务。IEEE 802.11ax 中最小 RU 尺寸为 2MHz，最小子载波带宽是 78.125kHz，因此最小 RU 类型为 26 子载波 RU。以此类推，还有 52 子载波 RU、106 子载波 RU、242 子载波 RU、484 子载波 RU 和 996 子载波 RU，表 3-7 显示了不同信道带宽下的最大 RU 数。

表 3-7 不同频宽下的 RU 数量

RU 类型	CBW20	CBW40	CBW80	CBW160 and CBW80+80
26 子载波 RU	9	18	37	74
52 子载波 RU	4	8	16	32
106 子载波 RU	2	4	8	16
242 子载波 RU	1-SU/MU-MIMO	2	4	8
484 子载波 RU	N/A	1-SU/MU-MIMO	2	4
996 子载波 RU	N/A	N/A	1-SU/MU-MIMO	2
2x996 子载波 RU	N/A	N/A	N/A	1-SU/MU-MIMO

RU 在 20MHz 中的位置示意图如图 3-27 所示。

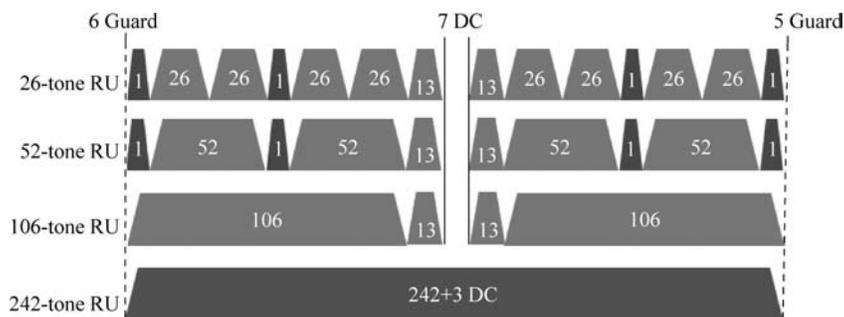


图 3-27 RU 在 20MHz 中的位置示意图

RU 数量越多,发送小包报文时多用户处理效率越高,吞吐量也越高,仿真收益如图 3-28 所示。

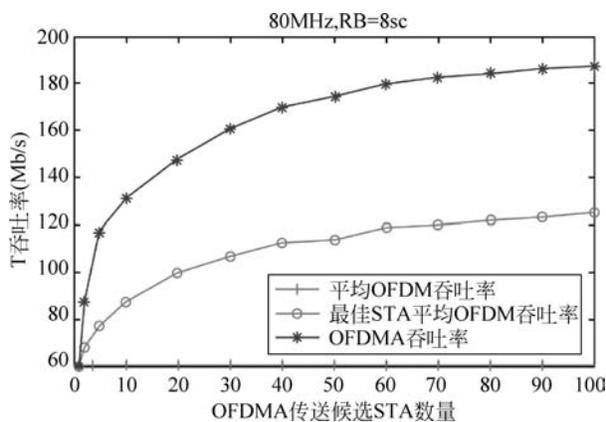


图 3-28 OFDMA 与 OFDM 模式下多用户吞吐量仿真

### 3.3.2 DL/UL MU-MIMO 技术

MU-MIMO 使用信道的空间分集在相同带宽上发送独立的数据流,与 OFDMA 不同,所有用户都使用全部带宽,从而带来多路复用增益。终端收天线数量受限于尺寸,一般来说只有 1 个或 2 个空间流(天线),比 AP 的空间流(天线)要少。因此,若在 AP 中引入 MU-MIMO 技术,则同一时刻可以实现 AP 与多个终端之间同时传输数据,大大提升了吞吐量。

SU-MIMO 与 MU-MIMO 吞吐量差异如图 3-29 所示。

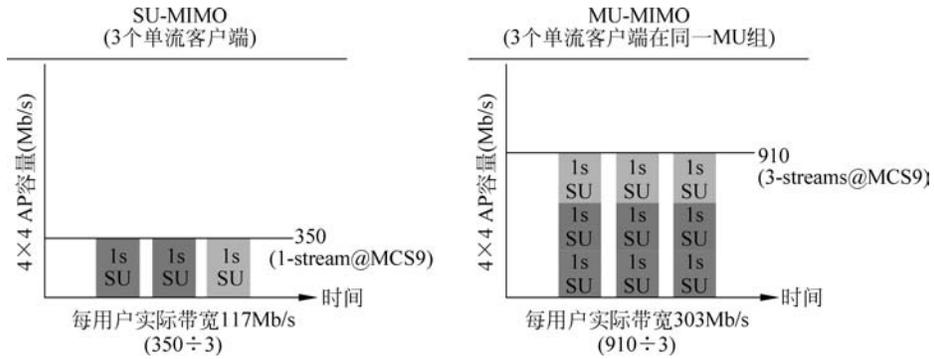


图 3-29 SU-MIMO 与 MU-MIMO 吞吐量差异

### 1. DL MU-MIMO 技术

MU-MIMO 在 IEEE 802.11ac 中就已经引入,但只支持 DL 4x4 MU-MIMO(下行)。在 IEEE 802.11ax 中进一步增加了 MU-MIMO 数量,可支持 DL 8x8 MU-MIMO,借助 DL OFDMA 技术(下行),可同时进行 MU-MIMO 传输和分配不同 RU 进行多用户多址传输,既增加了系统并发接入量,又均衡了吞吐量,如图 3-30 所示。

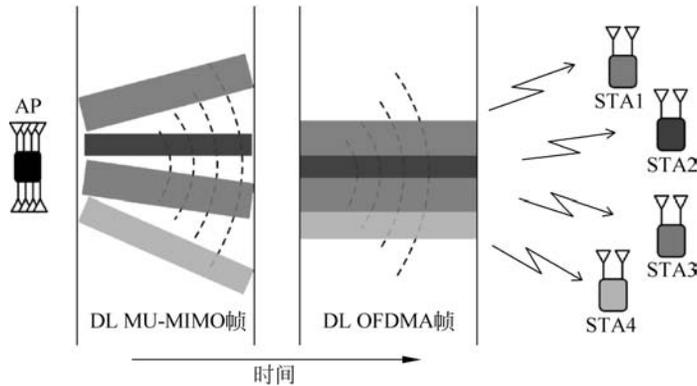


图 3-30 8x8 MU-MIMO AP 下行多用户模式调度顺序

### 2. UL MU-MIMO 技术

UL MU-MIMO(上行)是 IEEE 802.11ax 中引入的一个重要特性,UL MU-MIMO 的概念和 UL SU-MIMO 的概念类似,都是通过发射机和接收机多天线技术使用相同的信道资源在多个空间流上同时传输数据,唯一的差别在于 UL MU-MIMO 的多个数据流是

来自多个用户。IEEE 802.11ac 及之前的 IEEE 802.11 标准都是 UL SU-MIMO,即只能接收一个用户发来的数据,多用户并发场景效率较低,IEEE 802.11ax 支持 UL MU-MIMO 后,借助 UL OFDMA 技术(上行),可同时进行 MU-MIMO 传输和分配不同 RU 进行多用户多址传输,提升多用户并发场景效率,大大降低了应用时延,如图 3-31 所示。

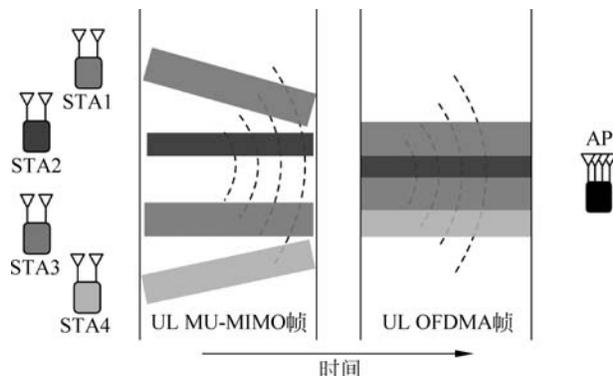


图 3-31 多用户模式上行调度顺序

虽然 IEEE 802.11ax 标准允许 OFDMA 与 MU-MIMO 同时使用,但不要把 OFDMA 与 MU-MIMO 混淆。OFDMA 支持多用户通过细分信道(子信道)来提高并发效率, MU-MIMO 支持多用户通过使用不同的空间流来提高吞吐量,如表 3-8 所示。

表 3-8 OFDMA 与 MU-MIMO 的对比

OFDMA	MU-MIMO
提升效率	提升容量
降低时延	每用户速率更高
最适合低带宽应用	最适合高带宽应用
最适合小包报文传输	最适合大包报文传输

### 3.3.3 更高阶的 1024-QAM 调制技术

IEEE 802.11ax 标准的主要目标是增加系统容量,降低时延,提高多用户高密度场景下的效率,但更高的效率与更快的速度并不互斥。IEEE 802.11ac 采用的 256-QAM 正交幅度调制,每个符号传输 8b 数据( $2^8 = 256$ ),IEEE 802.11ax 将采用 1024-QAM 正交幅度调制,每个符号位传输 10b 数据( $2^{10} = 1024$ ),从 8~10 的提升是 25%,也就是相对于 IEEE 802.11ac 来说,IEEE 802.11ax 的单条空间流数据吞吐量又提高了

25%，如图 3-32 所示。

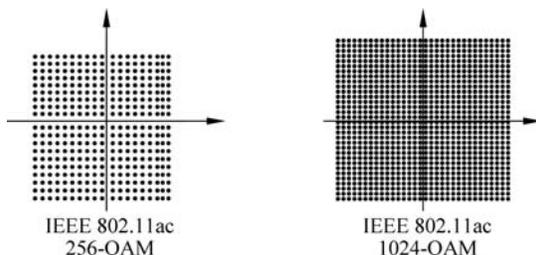


图 3-32 256-QAM 与 1024-QAM 的星座图对比

需要注意的是,IEEE 802.11ax 中成功使用 1024-QAM 调制取决于信道条件,更密的星座点距离需要更强大的 EVM(误差矢量幅度,用于量化无线电接收器或发射器在调制精度方面的性能)和接收灵敏度功能,并且信道质量要求高于其他调制类型。

WiFi 物理速率计算方法:

物理速率=空间流数量 $\times$ [1/(Symbol+GI)] $\times$ 编码方式 $\times$ 码率 $\times$ 有效子载波数量

(1) 空间流数量:空间流其实就是 AP 的天线,天线数越多,整机吞吐量也越大,就像高速公路的车道一样,8 车道一定会比 4 车道运输量更大。不同 IEEE 802.11 标准对应的空间流数量如表 3-9 所示。

表 3-9 不同 IEEE 802.11 标准对应的空间流数量

IEEE 802.11 标准	IEEE 802.11a/g	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11ax
单射频最大空间流	1	4	8	8

(2) Symbol 与 GI: Symbol 就是时域上的传输信号,相邻的两个 Symbol 之间需要有一定的空隙(GI),以避免 Symbol 之间的干扰。就像中国的高铁一样,每列车相当于一个 Symbol,同一个车站发出的两列车之间一定要有一个时间间隙,否则两列车就可能会发生碰撞。不同 WiFi 标准下的间隙也有不同,一般来说,传输速度较快时 GI 需要适当增大,就像同一车道上两列 350km/h 时速的高铁发车时间间隙要比时速 250km/h 时速的高铁发车间隙要大一些。IEEE 802.11 标准对应的 Symbol 与 GI 数据如表 3-10 所示。

表 3-10 IEEE 802.11 标准对应的 Symbol 与 GI 数据

IEEE 802.11 标准	IEEE 802.11ac 之前	IEEE 802.11ax
Symbol	3.2 $\mu$ s	12.8 $\mu$ s
Short GI	0.4 $\mu$ s	/

续表

IEEE 802.11 标准	IEEE 802.11ac 之前	IEEE 802.11ax
GI	0.8 $\mu$ s	0.8 $\mu$ s
2 $\times$ GI	—	1.6 $\mu$ s
4 $\times$ GI	—	3.2 $\mu$ s

(3) 编码方式：编码方式就是调制技术，即 1 个 Symbol 中能承载的比特数量。从 WiFi 1 到 WiFi 6，每次调制技术的提升，都能给每条空间流速率带来 20% 以上的提升。IEEE 802.11 标准对应的 QAM 如表 3-11 所示。

表 3-11 IEEE 802.11 标准对应的 QAM

IEEE 802.11 标准	IEEE 802.11a/g	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11ax
最高阶调制	64-QAM	64-QAM	256-QAM	1024-QAM
比特数/Symbol	6	6	8	10

(4) 码率：理论上应该是按照编码方式无损传输，但实际情况总有各种干扰和损耗。传输时需要加入一些用于纠错的信息码，用冗余换取高可靠度。码率就是排除纠错码之后实际真实传输的数据码占理论值的比例。IEEE 802.11 标准对应的码率如表 3-12 所示。

表 3-12 IEEE 802.11 标准对应的码率

调制方式	IEEE 802.11a/g	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11ax
BPSK	1/2	1/2	1/2	1/2
QPSK	1/2	1/2	1/2	1/2
QPSK	3/4	3/4	3/4	3/4
16-QAM	1/2	1/2	1/2	1/2
16-QAM	3/4	3/4	3/4	3/4
64-QAM	2/3	2/3	2/3	2/3
64-QAM	3/4	3/4	3/4	3/4
64-QAM	5/6	5/6	5/6	5/6
256-QAM	—	—	3/4	3/4
256-QAM	—	—	5/6	5/6
1024-QAM	—	—	—	3/4
1024-QAM	—	—	—	5/6

(5) 有效子载波数量：载波类似于频域上的 Symbol，一个子载波承载一个 Symbol，不同调制方式及不同频宽下的子载波数量不一样。IEEE 802.11 标准对应的子载波数量如表 3-13 所示。

表 3-13 IEEE 802.11 标准对应的子载波数量

IEEE 802.11 标准	频宽	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11ax
最小子载波带宽	—	312.5kHz	312.5kHz	78.125kHz
有效子载波数量	HT20	52	52	234
	HT40	108	108	468
	HT80	—	234	980
	HT160	—	2×234	2×980

至此,我们可以计算一下 IEEE 802.11ac 与 IEEE 802.11ax 在 HT80 频宽下的单条空间流最大速率,如表 3-14 所示。

表 3-14 IEEE 802.11ac 与 IEEE 802.11ax 单条空间流速率

PHY	1/(Symbol+GI)	比特数/Symbol	码率	有效子载波	速率
IEEE 802.11ac	1/(3.2 $\mu$ s+0.4 $\mu$ s)	8	5/6	234	433Mb/s
IEEE 802.11ax	1/(12.8 $\mu$ s+0.8 $\mu$ s)	10	5/6	980	600Mb/s

### 3.3.4 空分复用技术 SR 和 BSS 着色机制

WiFi 射频的传输原理是在任何指定时间内,一个信道上只允许一个用户传输数据,如果 WiFi AP 和客户端在同一信道上侦听到有其他 IEEE 802.11 无线电传输,则会自动进行冲突避免,推迟传输,因此每个用户都必须轮流使用。所以说信道是无线网络中非常宝贵的资源,特别在高密场景下,信道的合理划分和利用将对整个无线网络的容量和稳定性带来较大的影响。IEEE 802.11ax 可以在 2.4GHz 或 5GHz 频段运行(与 IEEE 802.11ac 不同,只能在 5GHz 频段运行),高密部署时同样可能会遇到可用信道太少的问题(特别是 2.4GHz 频段),如果能够提升信道的复用能力,则会提升系统的吞吐容量。

IEEE 802.11ac 及之前的标准,通常采用动态调整 CCA 门限的机制来改善同频信道间的干扰,通过识别同频干扰强度,动态调整 CCA 门限,忽略同频弱干扰信号实现同频并发传输,提升系统吞吐容量。

IEEE 802.11 默认 CCA 门限如图 3-33 所示。

如图 3-34 所示,AP1 上的 STA1 正在传输数据,此时,AP2 也想向 STA2 发送数据,根据 WiFi 射频传输原理,需要先侦听信道是否空闲,CCA 门限值默认为 -82dBm,发现信道已被 STA1 占用,那么 AP2 由于无法并行传输而推迟发送。实际上,所有的与 AP2 相关联的同信道客户端都将推迟发送。引入动态 CCA 门限调整机

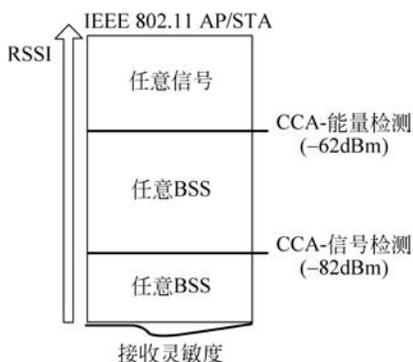


图 3-33 IEEE 802.11 默认 CCA 门限

制,在 AP2 侦听到同频信道被占用时,可根据干扰强度调整 CCA 门限侦听范围(比如从 $-82\text{dBm}$ 提升 $-72\text{dBm}$ ),规避干扰带来的影响,即可实现同频并发传输。

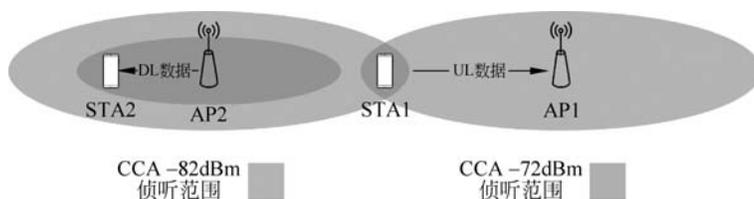


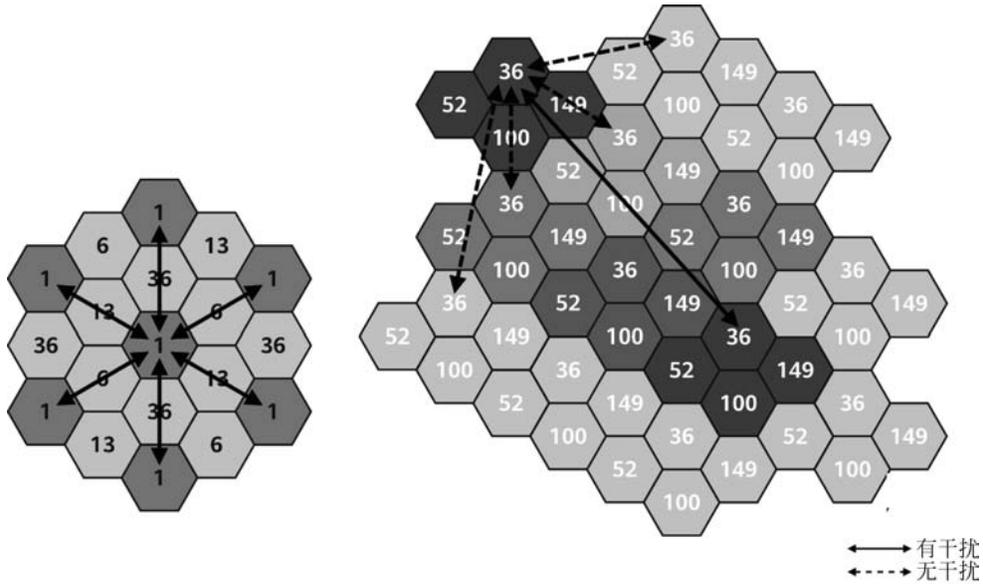
图 3-34 动态 CCA 门限调整

由于 WiFi 客户端设备的移动性,WiFi 网络中侦听到的同频干扰不是静态的,它会随着客户端设备的移动而改变,因此引入动态 CCA 机制是很有效的。

IEEE 802.11ax 中引入了一种新的同频传输识别机制,叫 BSS 着色机制,在 PHY 报头中添加 BSS color 字段对来自不同 BSS 的数据进行“染色”,为每个通道分配一种颜色,该颜色标识一组不应干扰基本服务集(BSS),接收端可以及早识别同频传输干扰信号并停止接收,避免浪费收发机的时间。如果颜色相同,则认为是同一 BSS 内的干扰信号,发送将推迟;如果颜色不同,则认为两者之间无干扰,两个 WiFi 设备可同信道同频并行传输,如图 3-35 所示。以这种方式设计的网络,那些具有相同颜色的信道彼此相距很远,此时再利用动态 CCA 机制将这种信号设置为不敏感,事实上它们之间也不太可能会相互干扰。

### 3.3.5 扩展覆盖范围 ER

由于 IEEE 802.11ax 标准采用的是 Long OFDM Symbol 发送机制,每次数据发



同信道BSS拥塞 同信道BSS仅在颜色相同时拥塞

图 3-35 无 BSS 着色机制与有 BSS 着色机制对比

送持续时间从原来的  $3.2\mu\text{s}$  提升到  $12.8\mu\text{s}$ ，更长的发送时间可降低终端丢包率，如图 3-36 所示；另外 IEEE 802.11ax 最小可仅使用 2MHz 频宽进行窄带传输，有效降低频段噪声干扰，提升了终端接收灵敏度，增加了覆盖距离。

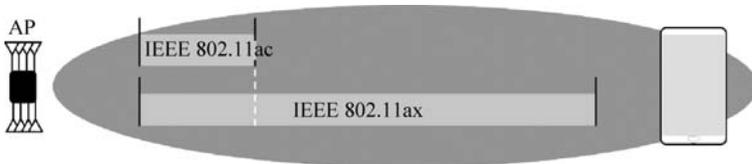


图 3-36 Long OFDM Symbol 与窄带传输带来覆盖距离提升

### 3.3.6 支持 2.4GHz 频段

我们都知道 2.4GHz 频宽窄，且仅有 3 个 20MHz 的互不干扰信道(1、6 和 11)，在 IEEE 802.11ac 标准中已经被抛弃，但是有一点不可否认的是 2.4GHz 仍然是一个可用的 WiFi 频段，在很多场景下依然被广泛使用，因此，IEEE 802.11ax 标准中选择继续支持 2.4GHz，目的就是要充分利用这一频段特有的优势。

(1) 覆盖范围。无线通信系统中，频率较高的信号比频率较低的信号更容易穿透



另外,支持 IEEE 802.11ax 标准的 STA 可以使用 TWT 来降低能量损耗,在自身的 TWT 来临之前进入睡眠状态。AP 还可另外设定 TWT 编排计划并将 TWT 值提供给 STA,这样双方就不需要存在个别的 TWT 协议,此操作称为“广播 TWT 操作”。

---

## 3.4 WiFi Mesh 组网技术

---

### 3.4.1 WiFi Mesh 组网概述

WiFi Mesh 组网是几个网元通过 Mesh 协议自动协商形成一个互联互通的网络,包括如下几个部分:

- (1) WiFi Mesh 组网模式包括树形组网、全网状组网。
- (2) WiFi Mesh 组网协议包括各种 Link 协议、EasyMesh 等。
- (3) WiFi Mesh 组网工作流程包括网络拓扑生成、配置同步、拓扑自愈、漫游等。

### 3.4.2 WiFi Mesh 组网模式

在实际组网中, WiFi Mesh 组网模式可以分为树形组网模式和全网状组网模式。

#### 1. 树形组网模式

在树形组网环境中,用户可以预先指定与其相连的邻居,如图 3-38 所示。



图 3-38 树形组网模式

通过光纤、网线、电力等有线连接, WiFi 回传都能正常传递。但对于 WiFi 回传,会存在以下限制。

(1) 理论上对于 WiFi, 如果采用相同 5GHz 信道组网, 每经过一级连接后性能将减半。

(2) 对于扩展 AP 组网, 采用 5GHz 高频和低频信道交叉组网, 可实现性能不衰减。

## 2. 全网状组网模式

网状拓扑组网可以检测到其他局域网设备, 并且形成链路。该网络拓扑会引起网络环路, 使用时可以结合 Mesh 路由选择性地阻塞冗余链路来消除环路, 在 Mesh 链路故障时还可以提供备链路备份的功能, 如图 3-39 所示。

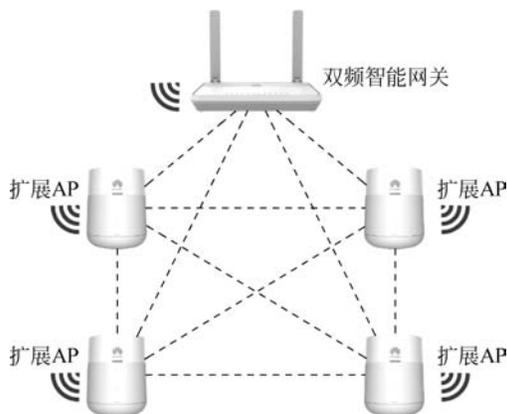


图 3-39 全网状组网模式

通过光纤、网线、电力等有线连接, WiFi 回传都能正常传递。但对于 WiFi 回传, 会存在以下限制。

(1) 进行 AP 节点全连接时, 一般节点间连接采用同一个 WiFi 信道, 多个节点连接后, 性能快速下降。理论上, 经过两级连接后性能将减半。

(2) AP 节点间进行全连接后, 保持信号弱的连接将直接带来开销, 即使不考虑实际流量, 但为了维持连接的管理报文一般采用低速连接, 也会带来明显开销。

### 3.4.3 WiFi Mesh 组网协议

WiFi Mesh 组网协议定义了网关和扩展 AP 之间互联互通的管理协议, Mesh 组网协议目前有 WFA 联盟推出的 EasyMesh 1.0/2.0, 运营商也定义了 e-Link/AndLink/WoLink 协议, 还有许多设备厂商也定义了一些私有协议, 比如华为

SmartLink、高通 SON 等协议。这些协议的目标都是为了提高家庭 WiFi Mesh 组网效率、性能和保障家庭设备 WiFi 接入的一致性体验。

如图 3-40 所示，WiFi Mesh 组网协议都是定义在链路层以上的管理协议。

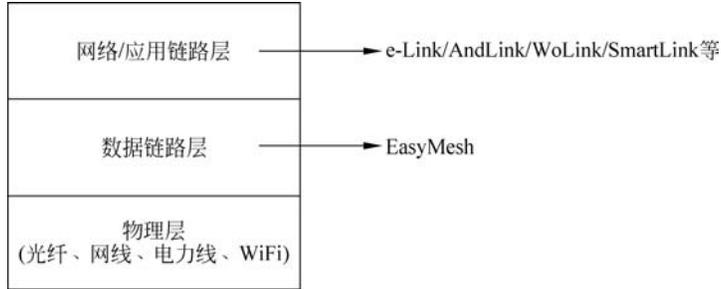
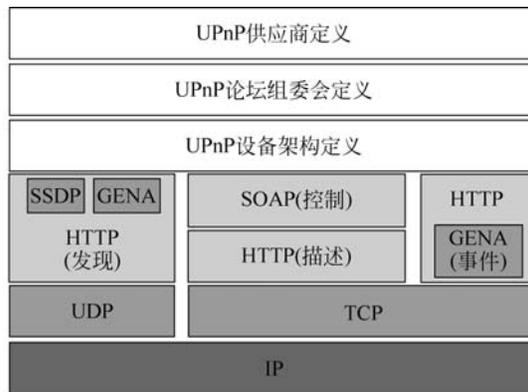


图 3-40 WiFi Mesh 组网协议

### 1. xLink 协议

xLink 协议基于 TCP/CoAP/UPnP 等协议扩展，主流的有 e-Link/AndLink/WoLink 和 SmartLink 等。SmartLink 是华为制定的双频智能网关与 AP 的组网协议，实现网关和 AP 间 WiFi 配置同步、漫游控制、拓扑调整、WiFi 信息采集等功能。这些协议基于 TCP/CoAP/UPnP 协议扩展，在中国运营商已经大量应用，其协议的完整性、互通性都非常成熟，如图 3-41 所示。通常采用点到点的 L3 协议。



注：SSDP(UDP)：设备发现；SOAP(TCP)：控制点对设备服务的调用；GENA(TCP)：设备事件上报。

图 3-41 xLink 协议

### 2. EasyMesh

EasyMesh 连接管理协议基于 IEEE 1905.1 协议扩展实现，目前是 WFA 联盟推

动的可选认证之一。

控制协议部分基于 IEEE P1905.1 协议扩展,属于 L2.5 协议,如图 3-42 所示。

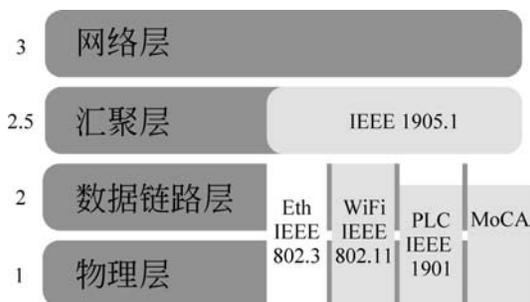


图 3-42 EasyMesh 协议

- (1) 单播(Unicast)。
- (2) 邻居组播(Neighbor Multicast)。
- (3) 转发组播(Relayed Multicast)。

EasyMesh 是 WiFi 联盟制定的网关与 AP 的组网协议,实现网关和 AP 间 WiFi 配置同步、漫游控制、拓扑调整、WiFi 信息采集等功能。

### 3.4.4 WiFi Mesh 工作流程

WiFi Mesh 工作流程如图 3-43 所示。首先生成拓扑,然后同步配置参数,接着拓扑自愈,最后进行漫游切换。

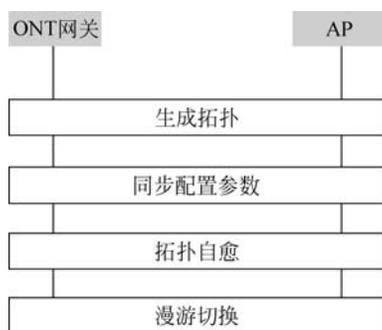


图 3-43 WiFi Mesh 工作流程图

#### 1. 拓扑生成流程

拓扑生成流程完成 WiFi Mesh 组网内网关与 AP 设备间的相互发现、连接建立。

以 EasyMesh 为例介绍整个 Mesh 建立的过程,如图 3-44 所示。

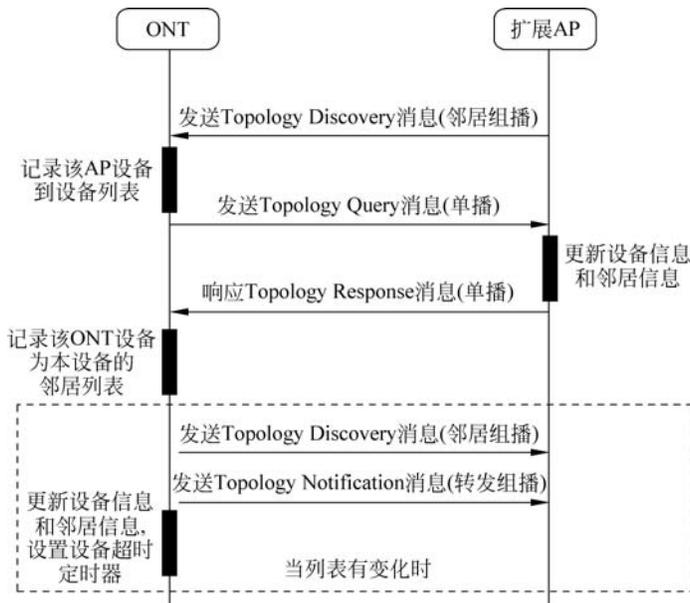


图 3-44 WiFi Mesh 邻居发现流程

(1) 设备上线完成初始化之后,发送 Topology Discovery 报文。Topology Discovery 为组播报文,所有该设备的直接邻居都会收到该报文。然后通过 Topology Query 和 Topology Response 的交互,来获取详细的设备信息,更新到自己的列表中。

(2) 更新邻居关系表,当列表有变化时,就会触发发送 Topology Notification 报文。Topology Notification 为转发组播报文,网络内所有设备都会收到该报文。收到 Topology Notification 报文的设备,又可以通过 Topology Query 和 Topology Response 的交互来获取到 Topology Notification 报文发送者的详细设备信息。

## 2. 参数配置同步流程

在 WiFi Mesh 连接建立之后,双频智能网关通过 Mesh 管理协议,将 WiFi 配置参数自动同步到扩展 AP 上,从而与扩展 AP 一起构成 WiFi 家庭覆盖网络。

下面仍以 EasyMesh 为例介绍 WiFi 参数配置同步流程。

(1) 当新的扩展 AP 接入 EasyMesh 网络时,网关通过 AP-AutoConfig 消息将当前 WiFi 接入参数下发给扩展 AP,如图 3-45 所示。

用户 STA 接入到各个扩展 AP 与双频智能网关 WiFi 时,都是采用相同的 SSID

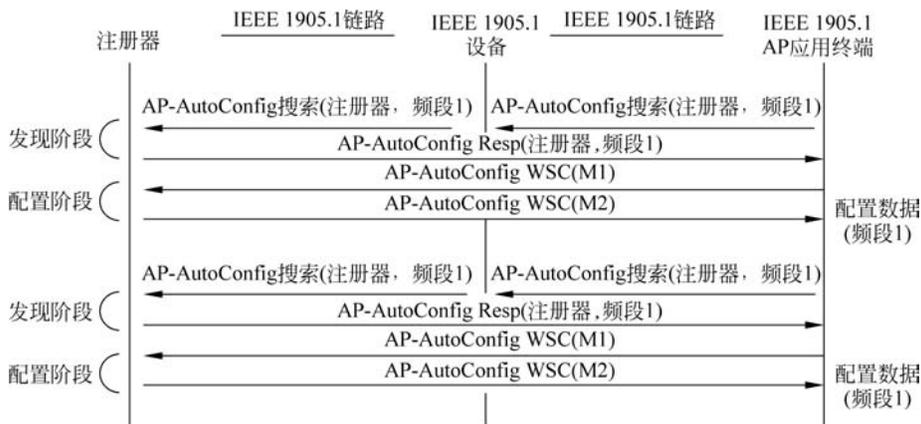


图 3-45 WiFi Mesh 参数配置同步 1

配置 (SSID 名称、认证加密方式、密码等), 因此不管当前是连接 Mesh 网络的哪个 WiFi 接入点, 用户设备都不用做任何配置修改。

(2) 当网关的 WiFi 接入参数发生变更时, 网关通过 AP-AutoConfig Renew 消息通知各扩展 AP 及时做同步刷新, 如图 3-46 所示。

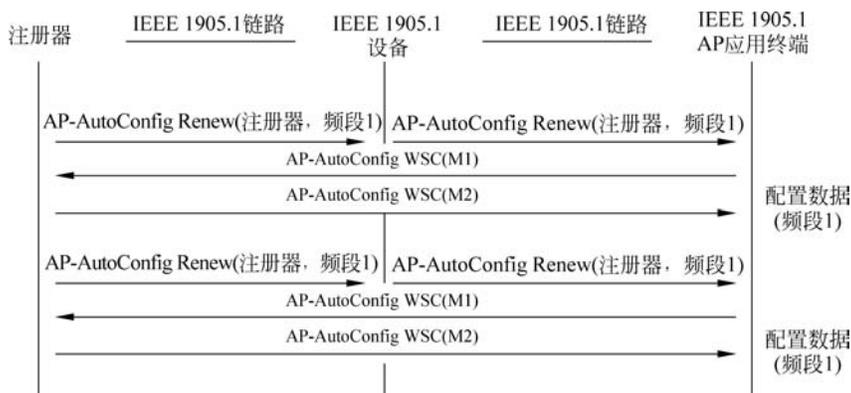


图 3-46 WiFi Mesh 配置同步 2

当双频智能网关侧的 WiFi 接入参数变更时, 双频智能网关也会通过 Mesh 协议将修改后的 WiFi 配置参数下发给各扩展 AP 实施更新, 从而使得整个 Mesh 网络始终保持统一的 WiFi 接入参数。

### 3. 拓扑自愈流程

在 AP 都通过有线介质 (比如以太网线、光纤) 连接网关的情况下, WiFi Mesh 组

网的拓扑是固定的,不会发生变化,因此不存在拓扑选路的问题。

当 AP 通过 WiFi 级联时,由于 WiFi 空口连接存在不确定性,且 WiFi 链路可以根据连接质量进行切换,因此就存在组网拓扑选路的问题,该问题的核心诉求是优化 Mesh 组网的整体性能。组网拓扑选路通常在下述情况下触发。

(1) 当 AP 上电启动时,该 AP 自动去选择一条性能最佳的级联路径,如图 3-47 所示。

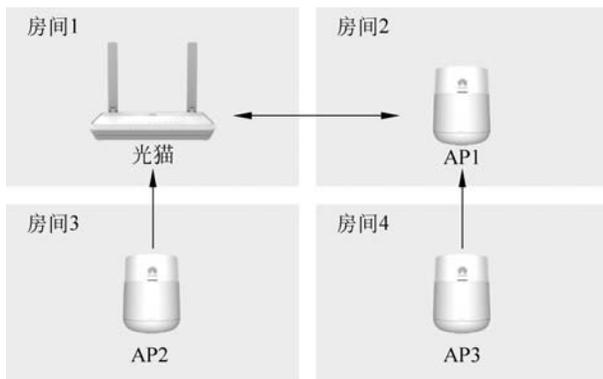


图 3-47 AP 启动时自动选择最佳级联路径示意图

(2) 当 WiFi 组网内的某个 AP 发生故障或者断电时,与之相连的扩展 AP 需要自动调整组网,如图 3-48 所示。

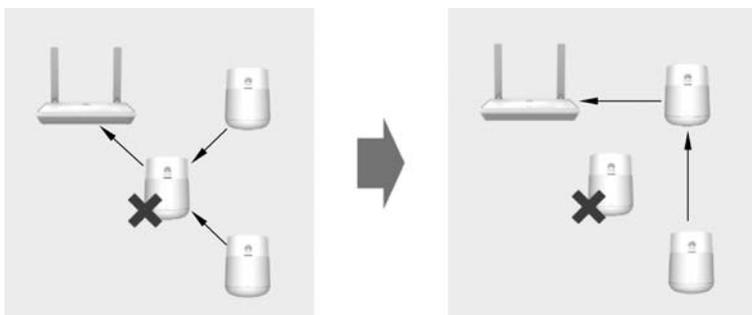


图 3-48 AP 故障时组网拓扑优化图

(3) 当某 AP 上线时,也可能会导致组网拓扑需要相应做优化调整,如图 3-49 所示。

通常组网拓扑选路会考虑以下因素:

(1) WiFi 回传通道的带宽。

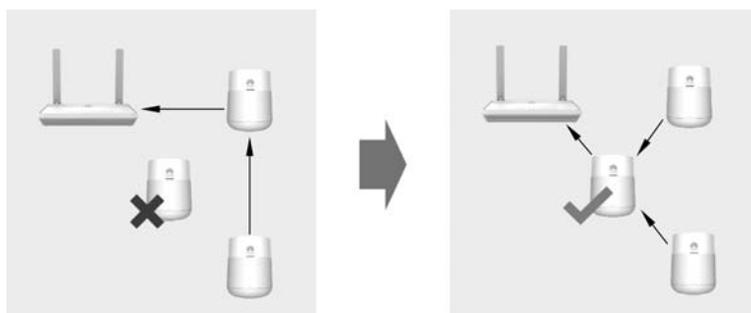


图 3-49 AP 重新上线时组网拓扑优化图

(2) WiFi 回传通道的链路质量,可通过 RSSI、丢包率、干扰等指标来衡量。

(3) WiFi 级联的层级。

网关也可根据 WiFi Mesh 整网状态主动要求其中某扩展 AP 进行重新选路。以 EasyMesh 规范为例,它定义了网关如何控制扩展 AP 去执行拓扑调整的消息交互,如图 3-50 所示。EasyMesh 规范当前还没有规定具体触发拓扑调整的条件以及如何选择出最合适的拓扑路径,不同厂商会根据自身理解去实现算法,最终所表现出来的拓扑调整时机、拓扑是否最优选路等方面也会有差异。

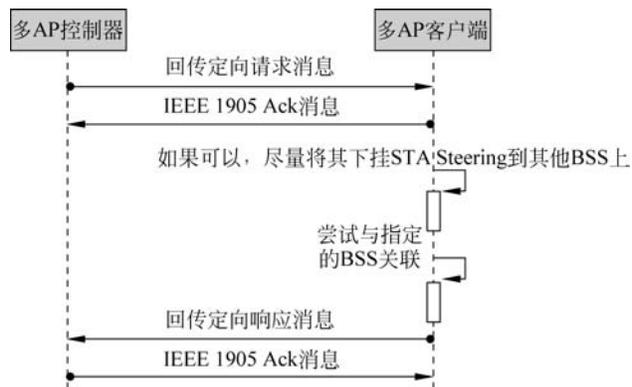


图 3-50 网关控制扩展 AP 执行拓扑调整

#### 4. 漫游切换

当家庭网络 WiFi Mesh 组网完成后,在使用诸如手机、平板等无线终端在家庭内部移动的过程中,如果无线终端逐渐远离了原先连接的 AP,那么其 WiFi 信号将越来越弱。这时候就要将无线终端切换其 WiFi 连接到一个距离更近的 AP,以保障 WiFi

接入服务的质量,这种切换过程就称为 WiFi 漫游,如图 3-51 所示。

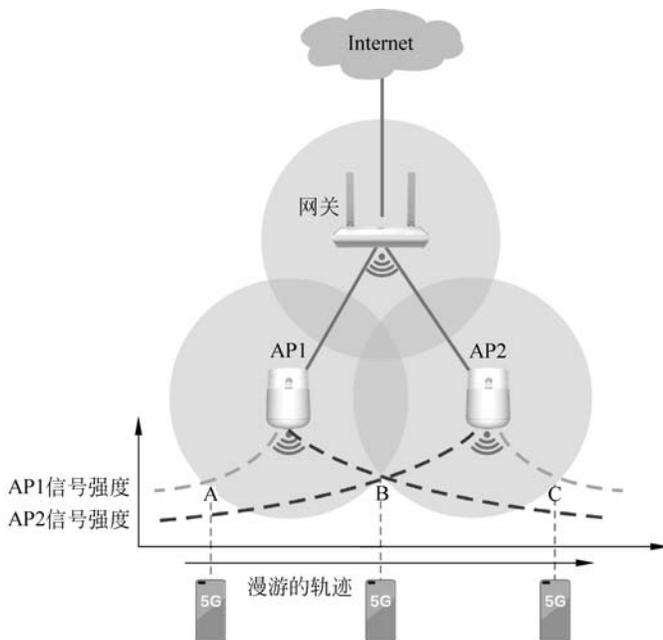


图 3-51 WiFi 漫游切换

WiFi 漫游具有如下特征:

(1) 用户 STA 可以在同一个 WiFi 网络中任意移动,对家庭网络而言,同一 WiFi 体现为 WiFi Mesh 组网各设备提供相同的 SSID 名称及密码。

(2) 用户 STA 的标识(IP 地址)不改变,客户端在连接网络初期获得了 IP 地址,在整个漫游过程中 IP 地址不改变。

(3) 保证用户当前业务不中断,在漫游的整个过程中,客户端的业务不中断。

用户 STA 在家里移动过程中,能否及时且成功地执行 WiFi 漫游切换、业务是否会中断,这些都是会影响用户体验的重要因素。

早期 WiFi 标准未针对 WiFi 漫游做明确规定,各厂商 STA 要么不支持 WiFi 漫游、要么根据各自算法来实施漫游,导致用户体验参差不齐。进入 WiFi 5 时代之后,IEEE 标准组织及时发布了 IEEE 802.11k/IEEE 802.11v 等协议规范,为在 WiFi 组网内如何实施漫游控制给出了标准指导。

家庭网络 WiFi Mesh 组网场景下,基于 IEEE 802.11k/IEEE 802.11v 协议实施 WiFi 漫游切换控制的参考流程如图 3-52 所示。

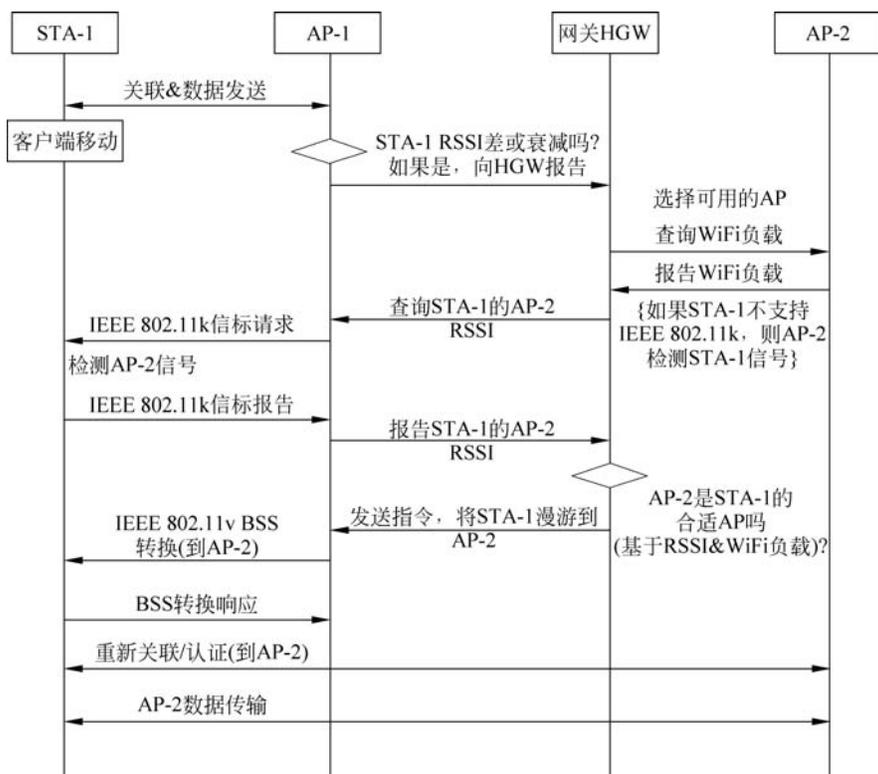


图 3-52 基于 IEEE 802.11k/IEEE 802.11v 协议实施 WiFi 漫游切换流程

(1) AP 不断对 STA 信号质量进行实时检测, 比如 RSSI、速率、丢包率等指标, 以 RSSI 为例, 当某 STA 的 RSSI 低于某阈值或者弱化趋势明显时, 则 AP 判断该 STA 可能需要漫游, AP(如图 3-52 中的 AP-1)将该 STA 信息上报给网关、触发后续的漫游判断。

(2) 网关根据 WiFi Mesh 组网信息及各 AP 当前工作状态, 筛选出可供备选的 AP(如图 3-52 中的 AP-2)。

(3) 网关给该 STA 当前接入 AP-1 下发 Mesh 控制指令, 让它通过 IEEE 802.11k 指示该 STA 去探测出备选 AP 的信号情况。

(4) AP-1 与 STA 直接进行 IEEE 802.11k beacon request/report 交互, 从 STA 获取到备选 AP 的信号强度, 将此结果上报给网关。

(5) 网关根据 WiFi 漫游算法对备选 AP 做判决, 选取出合适的作为最终要切换过去的目标 AP, 之后给 AP-1 下发 Mesh 控制指令、让它将该 STA 切换到目标 AP。

(6) AP-1 给该 STA 下发 IEEE 802.11v BSS Transition Management 切换指令、指示 STA 漫游到目标 AP。

(7) STA 根据指示,重关联到目标 AP,WiFi 信号变好,完成本次漫游切换过程。

网关与各 AP 之间控制消息的传递均是通过 WiFi Mesh 组网协议来完成,而 AP 与 STA 之间的指令交互则是通过标准的 IEEE 802.11k/IEEE 802.11v 消息来完成。