



Wi-Fi 7(802.11be)前瞻4: MLO (Multi-Link Operation)



徐方鑫



Wi-Fi话题下的优秀答主

已关注

31 人赞同了该文章

收起

序言

目前802.11be的协议版本已经跨过了draft 1.0，按照协议组的计划应该是先定PHY，然后再定MAC。在802.11be中，PHY一个比较重要的特性就是MLD，即Multi-link Device，这个技术其实我们之前在《无线新技术1：同步双频 RSDB (Real Simultaneous Dual Band)》已经提过，只

STR模式)

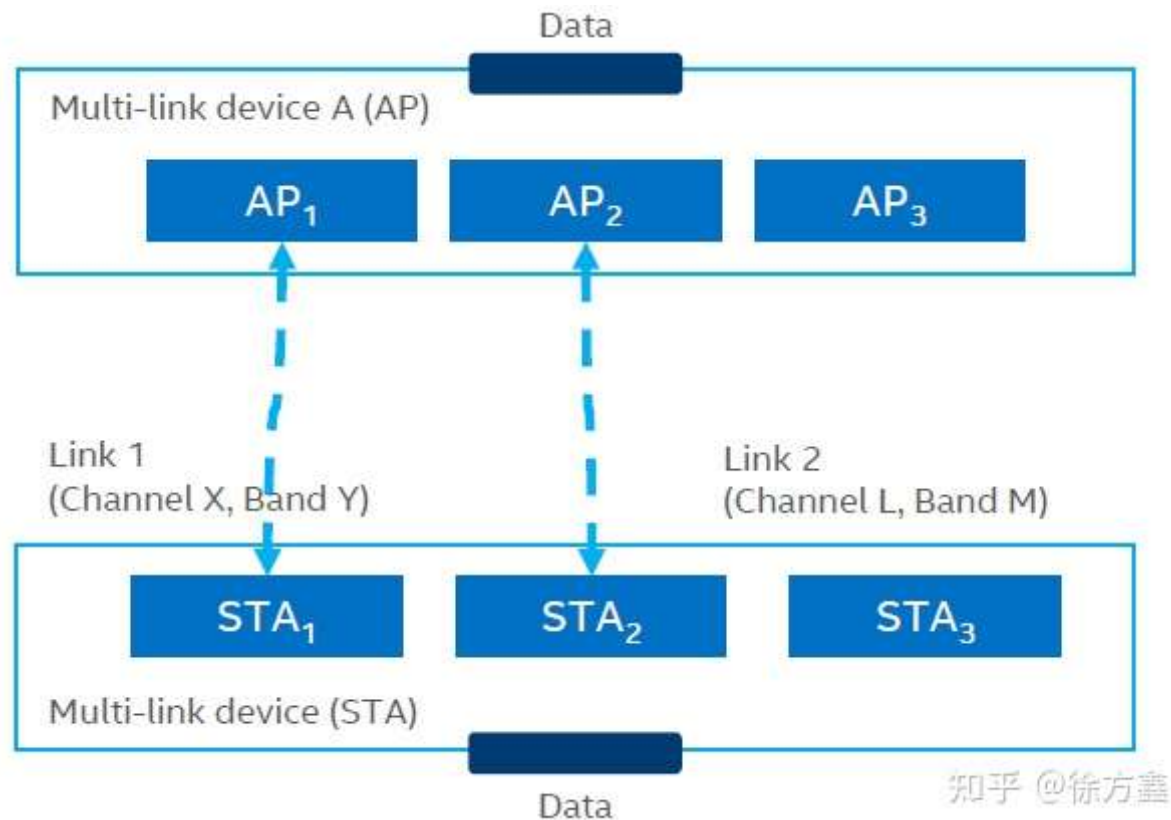
NSTR模式)

不过当时是企业单独做的，现在是拉到Wi-Fi 7的协议体系下面去专门研究。所以本文我们就前瞻一下MLD的大致的工作机理，即MLO (Multi-link Operation)。由于目前协议还是比较初期版本，所以目前内容都是个人对于协议的理解进行理解，如果有错误的地方还请见谅。另外，802.11协议的一个显著特点就是牵一发动全身，所以一个MLO实际上对于协议很多方面都有影响，所以本文仅仅可以算是简单的说一下关于MLO的channel access的部分。

MLD PHY

关于MLD的物理层 (PHY)，那么建议结合上次写的RSDB的文章理解。我们要把视角放到IC身上，在MLD以前的IC虽然支持多个频段的连接，但是每一次只能够选择一个频段进行连接。所以对于一个终端而言，一次只能够和AP建立单独一个Wi-Fi连接，这个连接要不是在2.4GHz上某个信道，要不是在5GHz上的某个信道。而AP可以多个频段同时工作，但是其实现方法是通过多IC的方式处理的，也就是不同频段使用不同的IC进行隔离，从而能够允许多频段的并行工作。曾经有一段时间，一些商业路由做广告的时候，就喜欢把多个频段叠加之后的速率之和作为最大速率标识出来，作为一种产品宣传。从AP（或者路由）的角度而言，这也许还能够解释的通，但是用户终端是无法达到这个物理层连接速率的。

之所以一块IC只能够提供一个频段的连接，很大程度上与IC内部只提供单个基带的设置有关。这点我们在RSDB一文中已经讨论过，这样设计自然有其的合理性，节约成本，降低设计难度，而且其中终端当时本身也没有多链路的需求，主要追求的是网络的连接性，而不是速率和质量。然而时至今日，网络的高速发展下，速率和质量的需求逐步扩大，从而多链路的需求也随之产生，因此才开始重新展望MLD这种结构。



Refer: Intel, Next-generation Wi-Fi

如上图所示大致就是一个MLD的基本框图。这里的D，即Device指的是一个链路的设备。粗略而言，我们可以理解图的上半部分是一个AP，这个AP包含一个IC，这个IC里面包含三个device，这里画三个主要是设想中分别对应2.4GHz，5GHz以及6GHz，也就是2.4+5+6的场景。该图的下半部分对应的是终端，该终端和AP一样，同样是一个IC，里面三个device。AP和终端间可以建立多个连接，按照图例上包含2个连接，即Link 1和Link 2。这里描述没有特别凸显一个IC内，而是仍然采用AP，STA这样的概念描述，是为了兼容协议当前框架的描述，换言之，最简单理解就是把原来两个独立的东西，塞到一个地方，然后讨论其协同工作的模式，但是其本身独立工作的机理并没有做改变，只是添加了新的协作功能而已。

MLD MAC

MLD的MAC部分，其实我个人觉得这一块应该就可以成为MLO， Multi-link Operation。前面我们硬件上的区别后，开始关注MAC层的工作理解。这里需要回顾下当时RSDB出来时候工作机理猜想。RSDB相当于是还没有做MLD之前，厂家已经做出了硬件层面上的MLD了，具体落到产品上，我们可以看到一个设备上可以连接上两个WiFi。

这是一种工作机理，应该就是在协议栈级别的协作，这里可以最简单的按照桥接的方式来工作，比如windows下也可以插两张无线网卡，然后桥接到一个网络下，在桥接模式下，最简单的工作模式就是负载均衡。或者采用MP-TCP的方式进行两个Wi-Fi的协作，比如LTE和Wi-Fi同时连接的方式，一种典型的连接方法就是MP-TCP。或者让APP进行隔离，不同APP的流量通过不同的WiFi传递出去，从而实现隔离的效果，这样也许对于实时性比较高的业务有一定好处。从移动终端这种时延和质量同时都有要求的场景而言，多连接应该大势所趋，不仅仅可以做流量或者业务的隔离，其实也可以避免单一信道的或者说单一连接的干扰。这种类似的需求在802.11be中也有所谈及。

前面说的其实是从RSDB当时写的并进而设想的一些MLD的工作模式，但是MLD毕竟是一个802.11机制，是一个MAC机制。所以以上的方法是一种多连接的使用方法，但是没有MAC特性。所以下面我们主要谈论的是802.11be中的MLO的工作机理，需要做一个区别。

在802.11be的MLO里面，主要分成两种模式，一种是**STR模式**，一种是**NSTR模式**，下面分开说明。

异步模式（STR模式）

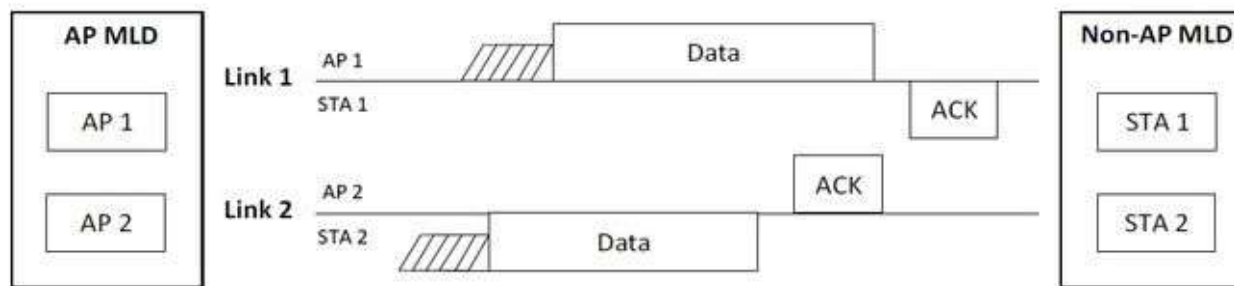


Figure 35-11—Channel access of two MLDs operating as STR over a pair of links

Ref. 802.11be draft 1.0

STR模式全称是Simultaneous Tx and Rx，同时的收发工作模式。这里看到STR模式很容易让读过全双工机制的童鞋歧义，以为Wi-Fi上全双工了。。。实则这是一种不同Link间允许同时工作，所产生全双工的工作机制。所以一般强调全双工的时候，最好加上IBFD或者同时同频全双工两种说法合适一些。本身STR这里即使翻译成全双工也是没什么问题的，如果看一些SDR参数之类的里面也是同样的用法。

其实STR模式个人理解应该就是之前设定的异步接入模式，这两个概念应该是等价的（目前个人这样理解）。换言之，图例上的两个Link是完全独立工作的，两者互不干扰。所以在传输过程中，就有可能会出现，link 1发送，link 2接收这样的情况，所以称为STR模式。

STR模式看起来工作机理很简单，也就是两个独立的802.11模块分别在不同的频段上跑。但是这里还是有几个难点或者说可以讨论的点：

共天线。目前从协议讨论上看，在MLD的PHY中，是多个Link需要同时使用一根天线的，而且根据先行的硬件设计，Wi-Fi的天线其实与蓝牙BLE也是共天线的。另外一个很重要的就是Wi-Fi片内片外的资源都是非常吃紧的，所以在这种情况下实现MLD还是有技术难度的。

Device间的干扰。虽说不同的Link（也就是对应到不同的Device）其是通过频段进行隔离的，但是由于其device的距离近，以及共天线等相关因素，所以Device间仍然有可能存在干扰。这种干

扰被称为In-Device Coexistence (IDC) Interference。

在异步的情况下挖掘Multi-Link的可能性，比如一种典型的想法就是重传，让link 2给link1进行重传，这可以有效避免某一个信道的干扰，或者说用一个link做控制信道之类的。

目前1和2基本是现在已经讨论的点，3应该还没明确下来，针对Device间的干扰，其实也就是终端什么时候工作在STR模式下。目前看起来协议的做法是设置一个保护间隔，频带上的保护间隔。换言之，如果两个device的工作频段间隔足够大，那么其干扰的泄露就比较小，直接被隔离了，从而就可以工作在STR模式。具体实行的机制是通过AP去设置信道，与传统802.11相同，在MLO的工作模式下，AP还是需要设置信道的，目前AP设置信道的规则是否改变还不是很清楚，但是当AP设置完信道后，节点在接入的时候就可以根据AP已经设置的信道，计算其信道间的间距是否满足保护频段的距离，如果满足的话，那么就工作在STR模式，如果不满足，那么就工作在下面说的NSTR模式。

同步模式（NSTR模式）

NSTR模式就是不允许同时进行收和发的操作，此时只能单一时间内，两个link都是收，或者两个link都是发。其实从机理上而言和复用技术差不多了（所以其接入机理的讨论中就包含了当时复用方式用过的机理）。那么NSTR模式个人认为就等同于同步模式。

先看传输流程，NSTR模式有个要求就是同时开始，同时结束（在协议里面称为PPDU end time alignment）。

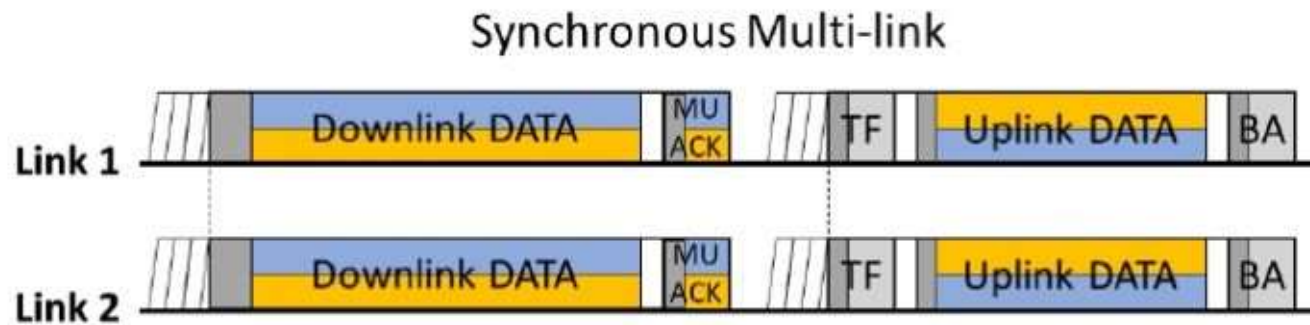


FIGURE 9. Asynchronous (top) vs. synchronous (bottom) multi-link operation.

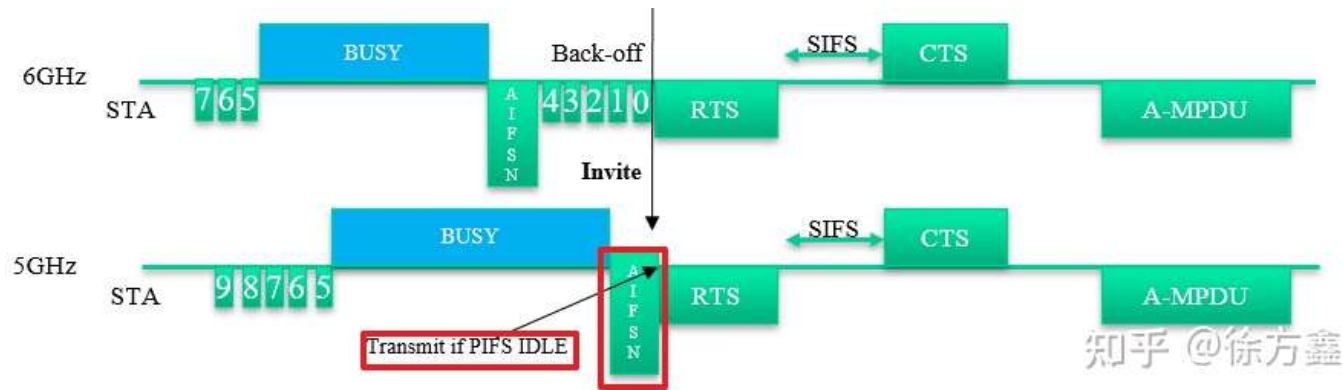
ref. Current Status and Directions of IEEE 802.11be,the Future Wi-Fi 7

传输过程同时开始，同时结束（或者说结束时间的差值是在一个很小的限定时间范围内），这个需求放出来就意味着MAC层协议的目标有了。为什么会有这样的规则，目前看起来有两个原因，1) NSTR最直接的同步传输的要求，同一时间只能够工作在一个状态下。2) ACK反馈机制采取的是直接反馈，而不是询问式的反馈（BAR,BA就是典型的询问式反馈）。ACK的反馈会有两种影响，一方面，如果不是同时结束，那么有可能一个链路在传，另外一个链路反馈ACK了，那么就与NSTR违背。另外一方面，ACK直接反馈，或者说实时反馈的机理对应ACK timeout，如果两个link不是同时结束，那么这个timeout的时间起始点不好定，从而整个机制就不好执行。所以综上，NSTR的传输有这样的基本要求。

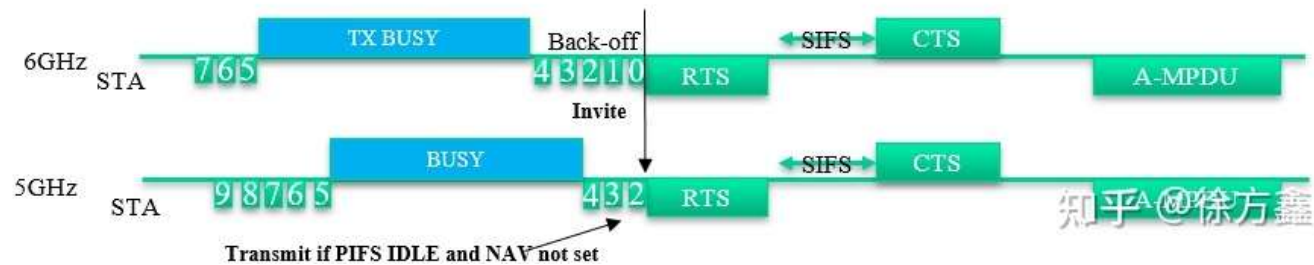
那么先看同时开始的部分，同时开始是对竞争协议的要求，这里我目前是参考《11-20-0993-07-00be-sync-ml-operations-of-non-str-device》，《11-20-0671-01-00be-multi-link-triggered-uplink-access-follow-up》和《11-20-1730-03-00be-ul-sync-channel-access-procedure》。

其实看第一份的思路其实挺顺，如果对802.11协议熟悉，那么同时开始这样的竞争最容易想到的手段就是channel bonding接入里面采用的PIFS机制（具体机理我写n的channel bonding里面后

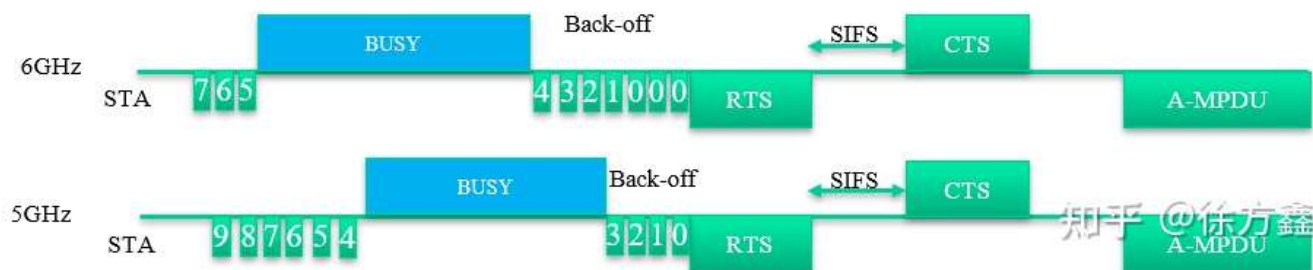
面会写)，这个机理就是说，主信道做竞争，次信道只要在主信道竞争胜利后，往前推PIFS时间，如果信道都是idle话，那么两个信道可以合并一起接入，那么到MLD里面就是两个Link同时上。



然后里面还有提一个ePIFS的机理（即第二种），这里主要是MLD是两个device，以为着有两个BO在那边倒数，而channel bonding里面BO仅仅对应到主信道的，次信道没有BO，所以存在这样的区别，所以这个PIFS里面还有BO能不能继续倒数的case。



第三种，也就wait的方式接入。换言之，由于有两个BO，那么其中一个倒数到0以后，自己hold住自己，不发送东西，等另外一个link的BO也倒数到0，两个都倒数到0以后才可以发送。其实这种从机理上最好实现，而且这样设置的话，工作机理上NSTR和STR很大部分是差不多的，复用的地方就能多一些。



第四种，基于Trigger的，按照协议里面的说法现在是基于TUA的一种接入方式。我们直接针对前面的第三种做比较，第三种强调的是hold住自己，第四种就是hold住信道，倒数到0以后，立刻发送trigger把信道hold住，然后等另外一个倒数到0，也发送了trigger，这样整个信道全部hold住以后再进行接入。



总体而言，第一种，第二种仅仅是这里写出来，当做是协议设计过程中的一个小过程，看样子不会进最后的结果，毕竟不是基于场景专门考虑的，而是将channel bonding里面的方式套过来。而第三种，第四种可能是协议目前的方向吧，至少我目前看的感觉上是。

那么无论哪一种方式，其实都可以实现同时发送的case了。下面同时结束的部分，这里的同时结束强调的是PPDU的同时结束，不过具体细节部分我还没有特别搞明白，只能大致说下现阶段的理解。首先PPDU级别的同时结束和MPDU级别的是有差别的，MPDU级别只需要控制待传的两个数据包大小相等即可，而PPDU级别的话，不能确保物理层的传输速率相同，所以即使两个MPDU大

小相等，但是物理层传输速率不同，那么PPDU是不是同时结束的。目前猜测这里可能还会上padding或者动态帧分片，毕竟协议已经给出了这样的机理能够搞定PPDU同时结束的。

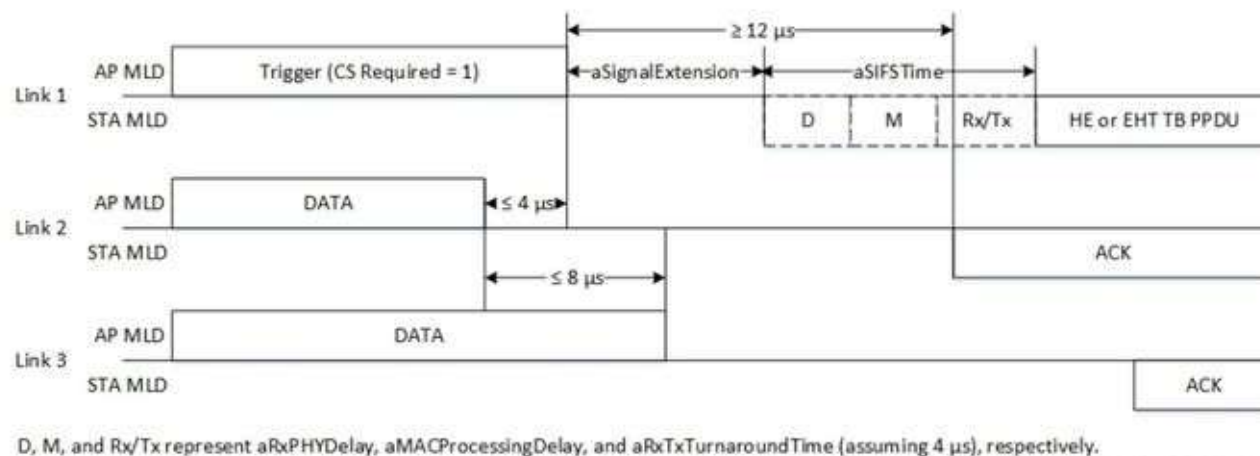


Figure 35-12—PPDU end time alignment timing relationships

另外在协议里面还有一个us级别的PPDU end time alignment，如上图所示。其实为什么存在这个机理，主要大场景还没有特别想通，其实是不知和NSTR里面怎么对应出来这个问题。关注其中的设计部分，包含了aSignalExtentsion之类，这个上次出现在协议里面是在讨论802.11b/g兼容里面用到的，b/g都是2.4GHz信道，但是其sifs, slot大小会存在区别，所以要统一，这个统一就是用到aSignalExtentsion，这算是非常小的细节了，具体可以看《802.11协议精读33：细考802.11b/g的兼容机制》。所以这里看起来也是做同步用的，不过具体场景现在我还没特别折腾清楚（因为按照MLD场景，不同link应该是同构的吧，如果是异构，以上机制的设置也好理解一些，现在不确定）。

以上大致就是笔者目前总结的MLO的状态，大致笔记一下。

本文为原创文章，如需转载须注明出处和原文链接。



欢迎大家关注我们的微信公众号：Wi-Fi研习者，请搜索公众号（Wi-Fi_Researcher）。