
验证参考设计



超高密度802.11ac网络

理论指南

版本1.0

Chuck Lukaszewski , CWNE #112

Liang Li

翻译：机器翻译

校对：杨正鑫 刘豪



Copyright

© Aruba Networks , Inc. All rights reserved. Aruba Networks ® , Aruba Networks TM (stylized) , People Move Networks Must Follow ® , Mobile Edge Architecture ® , RFProtect ® , Green Island ® , ClientMatch ® , Aruba Central ® , Aruba Mobility Management System™ , ETips™ , Virtual Intranet Access™ , Aruba Instant™ , ArubaOS™ , xSec™ , ServiceEdge™ , Aruba ClearPass Access Management System™ , AirMesh™ , AirWave™ , Aruba@Work™ , Cloud Wi-Fi™ , Aruba Cloud™ , Adaptive Radio Management™ , Mobility-Defined Networks™ , Meridian™ and ArubaCare SM are trademarks of Aruba Networks , Inc. registered in the United States and foreign countries. Aruba Networks , Inc. reserves the right to change , modify , transfer or otherwise revise this publication and the product specifications without notice. While Aruba Networks uses commercially reasonable efforts to ensure the accuracy of the specifications contained in this document , Aruba Networks will assume no responsibility for any errors or inaccuracies that may appear in this document.

Open Source Code

Certain Aruba products include Open Source software code developed by third parties , including software code **subject** to the GNU General Public License (“GPL”) , GNU Lesser General Public License (“LGPL”) , or other Open Source Licenses. The Open Source code used can be found at this site :

[http : //www.arubanetworks.com/open_source](http://www.arubanetworks.com/open_source)

Legal Notice

ARUBA DISCLAIMS ANY AND ALL OTHER REPRESENTATIONS AND WARRANTIES , WEATHER EXPRESS , IMPLIED , OR STATUTORY , INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY , FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE , TITLE , NONINFRINGEMENT , ACCURACY AND QUET ENJOYMENT. IN NO EVENT SHALL THE AGGREGATE LIABILITY OF ARUBA EXCEED THE AMOUNTS ACUTALLY PAID TO ARUBA UNDER ANY APPLICABLE WRITTEN AGREEMENT OR FOR ARUBA PRODUCTS OR SERVICES PURSHASED DIRECTLY FROM ARUBA , WHICHEVER IS LESS.

Warning and Disclaimer

This guide is designed to provide information about wireless networking , which includes Aruba Network products. Though Aruba uses commercially reasonable efforts to ensure the accuracy of the specifications contained in this document , this guide and the information in it is provided on an “as is” basis. Aruba assumes no liability or responsibility for any errors or omissions.

ARUBA DISCLAIMS ANY AND ALL OTHER REPRESENTATIONS AND WARRANTIES , WHETHER EXPRESSED , IMPLIED , OR STATUTORY , INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY , FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE , TITLE , NONINFRINGEMENT , ACCURACY , AND QUIET ENJOYMENT. IN NO EVENT SHALL THE AGGREGATE LIABILITY OF ARUBA EXCEED THE AMOUNTS ACTUALLY PAID TO ARUBA UNDER ANY APPLICABLE WRITTEN AGREEMENT OR FOR ARUBA PRODUCTS OR SERVICES PURCHASED DIRECTLY FROM ARUBA , WHICHEVER IS LESS.

Aruba Networks reserves the right to change , modify , transfer , or otherwise revise this publication and the product specifications without notice.

目录

第1章：引言	5
第2章：什么是“信道 (The Channel) ”?	6
意识到“信道”的不同含义	6
信道实体的定义	7
冲突域属性.....	8
更全面的冲突域模型	9
将使用的模型	11
了解速率效率 (Rate Efficiency)	11
了解有效载荷域 (Payload Domain) 与冲突域	12
了解时间效率和利用率	12
没有汤勺 (There is no spoon) —翻译注：黑客帝国台词	13
多冲突域 Multiple Collision Domains.....	13
重叠冲突域 Overlapping Collision Domains.....	14
终端站点的冲突域 Collision Domains of Stations	14
服用红色药丸 Take the Red Pill—翻译注：黑客帝国.....	15
第3章：了解空口时间	16
什么是空口时间?	16
空口时间结构 Airtime Structure.....	16
802.11 MPDUs 的数据速率.....	20
802.11 控制帧的数据速率	23
有效 TXOP 数据速率 Effective TXOP Data Rate	25
构建帧时间计算器 Building a Frame Time Calculator	25
执行假设分析	26
仲裁的影响 Effects of Arbitration.....	27
实际环境中的平均帧大小测量值.....	30
Aruba 行政大楼	30
足球场	31
空口时间和带宽有什么关系?	33
为什么有线带宽固定但无线带宽存在变化?	33
总结.....	34
参考书目	35
第4章：Wi-Fi 信道如何在高负载下工作	36
信道容量与客户端数量成反比	36
定义竞争开销 (Contention Premium)	38

竞争开销的解释	38
冲突和重传不是原因	39
下行速率的自适应不是原因	39
排除 TCP 窗口	40
控制帧增长是关键因素	41
平均帧大小随负载而减小	42
控制帧增长的原因	44
MIMO 工作!	45
每客户端吞吐量	47
第 5 章：了解 RF 射频冲突域	49
如何完成 802.11 空闲信道的评估.....	49
同频干扰如何降低 WLAN 性能.....	50
邻频干扰如何降低 WLAN 性能.....	52
ACI 干扰示例.....	52
测量 ACI 的影响.....	54
能量检测和前导检测的干扰半径.....	55
802.11 无线电功率的真实世界示例	57
通过裁剪低数据速率来控制 CCI 是一个神话	58
实现空间复用的最低要求.....	58
控制 ACI.....	59
附录：Aruba 超高密度测试平台	59
搭建测试平台的理由	59
测试平台的设计	59
拓扑结构	60
信道	61
SSID 配置.....	61
自动化	62
什么是客户端扩展测试（Client Scaling Test）？	62
为什么这次没有高吞吐量或传统客户端？	63
与其他已发布的结果进行比较	63

第 1 章：引言

欢迎使用 Aruba 超高密度 (VHD) 验证参考设计 (VRD) 理论指南 (Theory Guide)。规划指南 (Planning Guide) 解释了什么是 VHD 网络，提出了确定端到端系统规模的结构化方法，解释了如何选择 AP 和天线，并介绍了可以使用的三种基本无线电覆盖策略。上一份指南 (网络工程和配置 Engineering and Configuration) 涵盖了容量规划、配置、信道规划和安全体系结构。该指南适用于负责部署 802.11 网络的无线工程师。

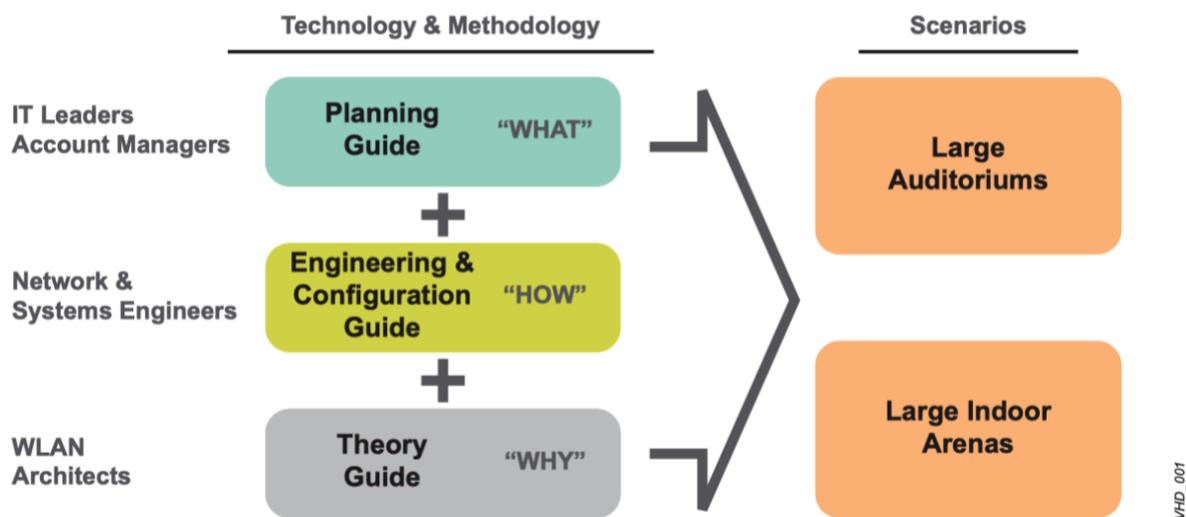


图 T1-1 超高密度 VRD 的组织

本指南是该系列中**最具技术性的**。它面向我们客户和合作伙伴的架构师级技术人员，或持有无线和网络领域专家级技术认证的人员。读完本指南的四章，你应该能够：

- 理解和可视化什么是 802.11 信道
- 理解、解释和测量 802.11 传输所消耗的实际空口时间
- 理解、解释和预测 VHD 802.11 信道运行在各种负载情况下的行为
- 理解、解释并补偿你的设计中的 802.11 冲突域干扰半径

前两本指南的重点是解释了 VHD 网络“是什么”和“如何配置”，而本理论指南解决了“为什么”的话题。在您完全理解本文档中的内容后，您应该能够理解和解释先前指南中提出的每个工程和配置建议。

对于特定的高密度使用场景，所有读者也应阅读相应的方案设计文档。

第 2 章：什么是“信道 (The Channel) ”？

“You're here because you know something. What you know you can't explain, but you feel it. You've felt it your entire life, that there's something wrong with the world. You don't know what it is, but it's there, like a splinter in your mind.”

Morpheus to Neo, The Matrix (1999)

作为一个无线架构师，很长一段时间你一直在向别人解释无线电系统。你已经画了许多中心有 AP 的圆图来解释无线蜂窝。你无需考虑就知道使用“信道”这个短语。你一直都知道那些圆圈和那个短语，然而忽略了一些重要的东西，一些至关重要的东西。那些东西是你不能解释的，你曾经读过的教科书或供应商指南都没有帮助。

对于大多数常规部署而言，缺少的信息似乎无关紧要，因此很容易忽略。但是关于你所研究高密度环境性能的一些事情提醒你，在表面下发生的比在眼前发生的更多。

你头脑中的这个碎片 (splinter) 就是时间本身 (time itself) 在 802.11 信道中扮演的角色。

时间比频谱更稀缺的资源，可以确定的是从来没有足够的频谱。但是时间不能倒转 (rewound)，低效使用的空口时间 (airtime) 是浪费无法恢复的容量，浪费的空口时间可能是 VHD 设计成功或失败之间的区别，或者至少是平均性能和出色性能之间的区别。

您作为无线架构师的经验教会了您“看见”无线电。您可以查看任何环境，并立即知道无线电放置在哪里以及所产生的天线方向图将如何传播。但是无线电覆盖仅仅是一个平面的一维视图。你也必须学会“看见”时间来获得 802.11 系统的真实多维图像。有了这种增强的视野，您将构建更快、更健壮的 WLAN。更重要的是，当第三方想要将您设计的 VHD 系统引向您知道对所有相关人员都有害的方向时，您将能够提出全新的论据。

本理论指南涵盖了一系列主题，这些主题对于将您的架构知识提升到一个新的水平至关重要。但是这些主题最终归结为空口时间 (airtime)，尤其是在同一信道或同一中心频率 (center frequency) 上的无线蜂窝之间的空口时间冲突的影响。

意识到“信道”的不同含义

“信道”在这些 VRDs 中出现了 708 次 (原文次数, 中文版本更多)。“信道”用于分配给 Wi-Fi 用途的特定频谱片段，如信道 6 或 149，每个网络工程师都熟悉这种用法，并且本能地理解它。

当提到频谱块 (blocks of spectrum) 时, 这本书使用短语例如“9 信道”, “21 信道”或“5 GHz 频段”, “信道捆绑”属于同一类别。当我们讨论适用于特定频谱的监管规则时, 我们使用短语“DFS 信道”和“非 DFS 信道。”同样, 很明显地, 这些参考是针对在 2 GHz 至 6 GHz 之间的特定频率范围内。

然而, 在这个 VRD 的指南中同样经常出现“信道”被用来描述具有特定属性和性能特征的确定实体。一些示例包括:

- 这是因为信道容量 (capacity of the channel) 实际上随着客户端数量的增加而减少;
- 任何高密度网络的基准假设是信道非常拥挤 (the channel is very congested);
- 术语“平均信道吞吐量 (average channel throughput)”在公式 (1) 中, 旨在捕获对于给定环境中所有这些影响
- 在常规部署中, 当检测到新的干扰源会降低信道质量 (channel quality);

被叫做“信道”的实体, 确切的讲是什么呢? 显然, 我们不是指频谱, 至少不是直接意义上的。信道实体是一个真实的、物理的东西还是一个抽象的概念? 它的界限在哪里? 它们是固定的还是流动的? 为什么信道在带宽之外根本没有任何属性? 如何测量这些属性?

整个指南的目的是帮助您对信道实体和这些问题的答案有一个直观的理解。VHD WLAN 性能背后的理论的几乎每个方面最终都归结为这种被称为“信道”的构造, 因此, 我们首先仔细定义当这个术语以这种方式使用时的确切含义。

信道实体的定义

简单地说, 信道实体是一个 802.11 冲突域 (collision domain)。

什么是冲突域? 一如既往, 细节对于理解至关重要:

- 冲突域是 802.11 系统中独立的容量块 (independent block of capacity)。
- 冲突域是一个物理区域, 在同一信道上发送的 802.11 设备可以在该物理区域中解码彼此的前导码 (frame preambles)。
- 冲突域也是时间上的同一个时刻。如果他们在不同的时间发送, 同一信道的两个接近的终端站点 (stations) 是不会冲突的。
- 最后, 冲突域是基于设备正在传输的, 空间和时间上不断移动的动态区域。

冲突域的概念特定于 802.11 MAC 层。如果两个终端试图以相同的频率同时发送, 所有无线电系统都会相互干扰。然而, 基于 802.11 的技术是独特的, 因为它们应用了具有冲突避免的载波侦听多路访问 (CSMA/CA)。你可能知道, 冲突避免机制使用虚拟载波传感机制和物理能量检测机制。你可能没有意识到的是前导码在虚拟载波意义上的作用, 因此是冲突域在空间和时间上的真实形状。

不要将“蜂窝（cell）”一词作为冲突域的同义词，蜂窝通常是 SINR 或 RSSI 超过特定目标值的工程区域。所谓的“蜂窝边缘（cell edge）”是从 AP 到达此值的径向距离。但是，冲突域会一直扩展到 SINR 降至前导码检测（PD-preamble detection）阈值以下。蜂窝边缘的面积远小于冲突域的面积。

SINR：信号与干扰加噪声比（Signal to Interference plus Noise Ratio）是指接收到的有用信号的强度与接收到的干扰信号（噪声和干扰）的强度的比值；可以简单的理解为“信噪比”。

按照惯例，冲突域通常被绘制为一个围绕包含许多客户端的 AP 的圆圈，例如图 T2-1，我们在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量：

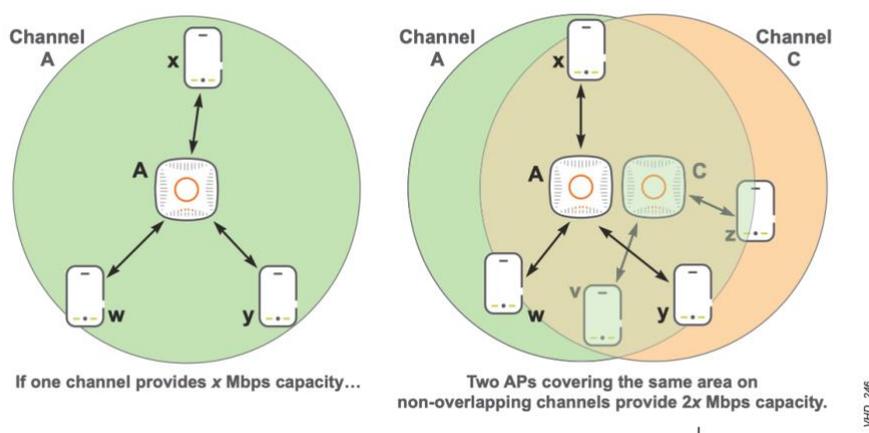


图 T2-1 简化冲突域

当然，这样的图被大大简化，忽略了真正的无线电蜂窝的许多复杂性。虽然这个图对于大多数关于 Wi-Fi 的讨论来说是足够的，但是对于我们的理论对话来说是完全不够的。特别是，该图仅显示了一个维度：AP 的距离。在本指南中，我们主要关注两个更重要的因素：空口时间（airtime）和数据速率（data rate），因此，我们需要一个更丰富的冲突域模型。

冲突域属性

为了构建 802.11 冲突域的更完整视图，我们开始定义三个关键属性：

- 时间
- 数据速率
- 范围

时间是冲突域覆盖的物理区域内的线性时间流。同一无线信道上真正独立的冲突域也具有独立的时间流。每个域中的发送和接收终端站点（receiving station）对可以用完全相同的纳秒传输，而不会被另一站对阻塞。因此，他们的空口时间是独立的。

数据速率是在特定时隙内特定传输的速度。数据速率直接取决于在接收器测量的信号和干扰加噪声比 (SINR)。在 802.11ac 中，数据速率表示为从 0 到 9 的调制和编码方案 (MCS) 值。

范围是发送和接收终端站点之间的物理距离，它也用 SINR 来表示。在这种情况下，冲突域的“边缘”是解码传统前导码 LP 的信号字段 (L-SIG) 所需的 SINR 值，必须使用二进制相移键控 (BPSK) 调制发送，范围也称为 PD 距离。BPSK 需要 4 dB 的 SINR，低于该值的前导码会成为噪声。

因此，任何冲突域的物理边缘总是被确定为 SINR 等于 4 dB 的距离（即空旷距离大概约在 250 米左右），如果有像墙壁、建筑或人体这样的障碍，距离会更小。

冲突域具有许多其他属性，包括信道带宽和信道模型，我们暂时忽略这些属性。

更全面的冲突域模型

图 T2-2 是使用这些属性的 802.11 冲突域的新示意图。

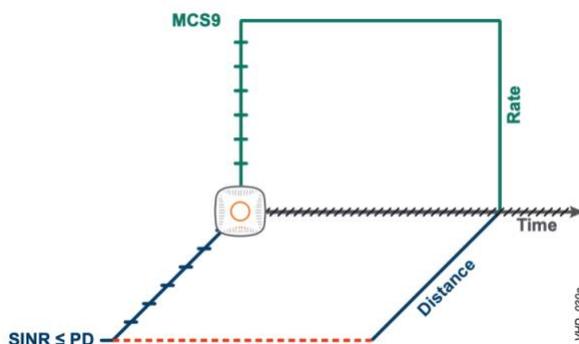


图 T2-2 冲突域多维模型

在图 T2-2，这些属性分布在三个不同的轴上。假设 AP 在交叉点。时间从左到右移动，并永久持续。数据速率表示在从 MCS0 到 MCS9 的垂直轴上。（我们现在忽略了空间流。）最后，距离显示在后向前轴上，距离用 SINR 表示，它在 SINR 降到 PD 最小值以下的地方停止。

SINR 和 MCS 值之间的关系是很好理解的，这种关系可以从任何 AP 供应商的数据表中计算出来，并且由于无线电信号衰减的 r^2 本质，它典型的是具有指数形状。在图 T2-3 中，重新绘制该图以显示在距离 AP 的整个范围内的数据速率上限。

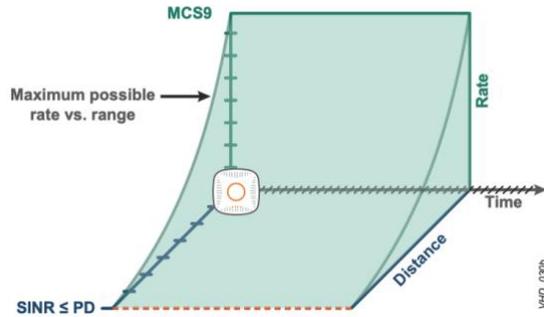


图 T2-3 冲突域模型显示最大数据速率

有了基本概念后，我们就可以向模型中添加细节，如所示图 T2-4，如果我们假设 AP 在三个轴的交叉点，那么我们只显示了 AP 覆盖范围的一半。因此，距离和数据速率上限必须在另一个方向上绘制。(当然，蜂窝向所有方向辐射，但在这种方法中只显示了两个。)两个蜂窝边缘之间的距离是冲突域，它与前面给出的基于区域 (area-based) 的定义相一致。

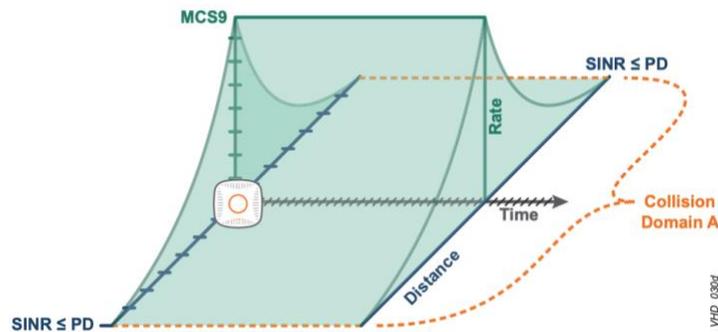


图 T2-4 在冲突域模型中加入全向覆盖

最后，我们必须将客户端添加到“蜂窝”。既然时间是模型的一部分，客户端应该如何定位？答案是显示客户端在距离轴上的位置，因为它们随着时间的推移获得对信道的控制。图 T2-5 增加了这些复杂性。

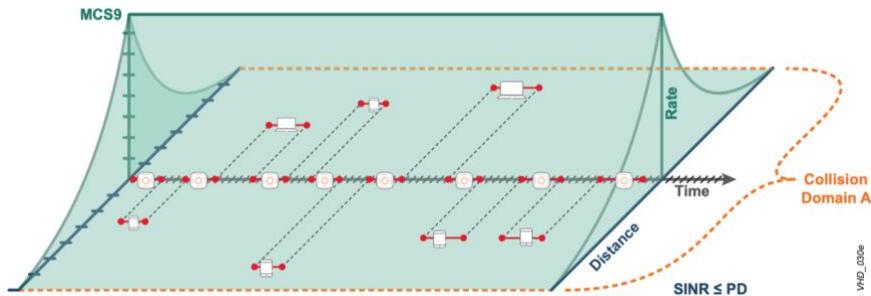


图 T2-5 拥有客户端的完整冲突域模型

为了让事情暂时保持合理的简单，我们故意忽略了冲突域实际上是动态的这一事实。它会根据传输的设备在空间和时间上不断变化。

在这一点上，尽管有很多简化，您可能会认为圆形模型要容易得多。但是如果你想了解 VHD 环境中实际发生的情况，我们必须找到一种方法来增加空口时间和数据速率。

将使用的模型

这种冲突域的多维模型是一种可用于各种实际目的的工具。

了解速率效率 (Rate Efficiency)

一般来说，VHD 冲突域中的每次传输都应使用所有三种 802.11 帧类型 (数据帧、控制帧和管理帧) 的最大可能速率。

图 T2-6 是模型的 2D 切片，其重点是数据速率和距离轴。垂直轴是 802.11 传统和 MCS 速率，根据它们共有的调制方式来分组。水平轴显示距 AP 的距离。

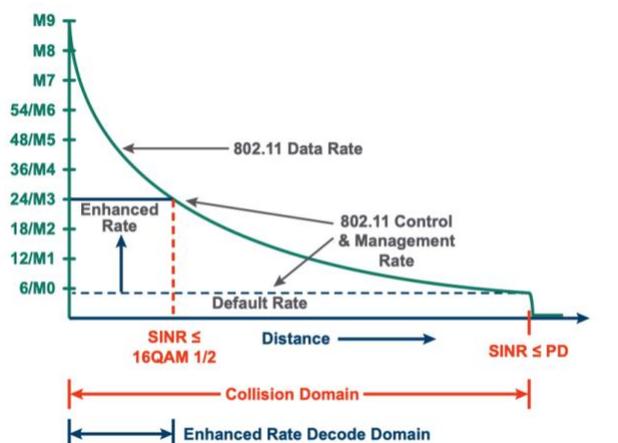


图 T2-6 使用冲突域模型了解数据速率效率

这张图表显示了几个要点：

- 用于任何终端站点 STA 和 AP 之间的数据帧的平均 PHY 数据速率应该按照绿色显示的速率曲线。如果在空口看到的速率低于预期，这表示运行问题或系统设计问题。
- 用于控制帧的平均 PHY 数据速率应尽可能高。在 VHD 环境中不接受默认值。图 T2-6 显示默认设置 6 Mbps 的蓝虚线和设置 24 Mbps 的蓝实线 (带 $\frac{1}{2}$ 编码的 16-QAM 调制)。
- 出于相同的原因，用于管理帧的平均 PHY 数据速率同样应被推到比默认值高得多的水平。

当您考虑 SSID 速率配置时，您总是希望将使用的速率尽可能推向曲线上允许的极限。在《超高密度 802.11ac 网络工程和配置指南》中第 EC-3 章：空口时间的管理，在许多不同类型的 802.11 传输中深入讨论了这个问题。

了解有效载荷域 (Payload Domain) 与冲突域

图 T2-6 还纠正了 WLAN 工程师和架构师之间的一个常见误解。传统观点认为，随着控制帧和管理帧的数据速率增加，蜂窝大小“收缩”，需要更高的 SINR 来解码更快的速率，使得有效载荷在特定点之外不可解码。

这种相同想法的背后共同做法是“裁剪”低的 OFDM 数据速率。

然而，图表清楚地表明，如果有效载荷速率改变了，那**不能**改变传统前导码检测 PD 的干扰范围。这些前导码必须使用 BPSK 的 6Mbps 速率发送，并且不能更改，所以冲突域大小**不受影响**。即使有效载荷无法恢复，解码前导码的远程 STAs 仍然在帧的整个持续时间内将信道标记为忙碌。

顺便说一下，消减低控制速率 (basic rate) 和低数据速率 (transmit rate) 确实有许多实际好处，这些好处将在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-3 章：空口时间管理中详细描述，但是修剪这些低速率不会改变冲突域的大小。

了解时间效率和利用率

速率效率直接影响空口时间效率和信道利用率。为了可视化这个概念，图 T2-7 采用我们模型的不同 2D 切片，重点关注速率和时间轴。

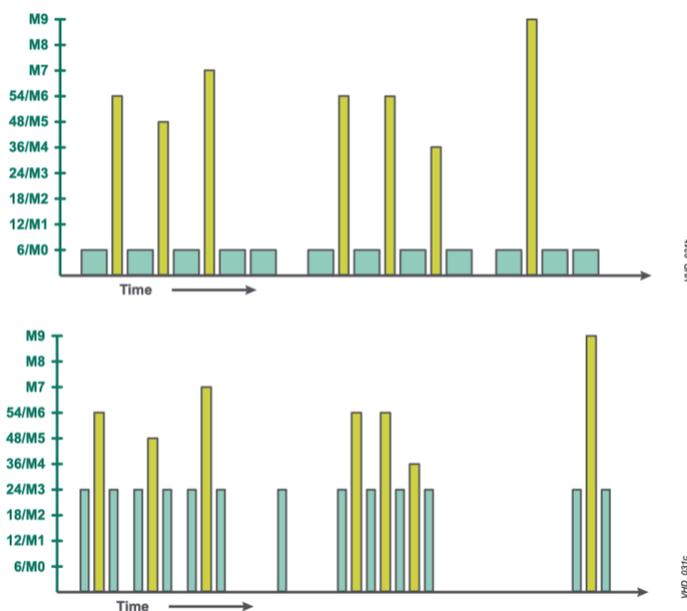


图 T2-7 通过使用更高的速率来提高空口时间效率来创造容量

这种高度简化的视图旨在显示具有两种不同控制帧速率的相同数据包序列所消耗的相对时间。顶部是默认的 6 Mbps 速率，底部显示了相同的序列，但使用了 24 Mbps 速率。

第 3 章：了解空口时间章节详细解释数据速率。目前，您只需要知道给定大小的控制帧以默认速率发送比以 24 Mbps 速率发送要长 4 倍。这个概念体现在时间轴视图中，它有效地显示了信道利用

率。当你提高控制帧速率时，每个无线电都更快地传输。通过增加空闲时间来创造容量，在空闲时间期间，该信道可供其他用户使用。

没有汤勺 (There is no spoon) — 翻译注: 黑客帝国台词

必须强调的是，这个多维冲突域模型正是如此。像圆形蜂窝图一样，这个模型在物理意义上并不存在，尽管每个 802.11 无线蜂窝确实根据这些原理运行的。像所有模型一样，它有意简化了更复杂的现实。该模型的目的是给你一个心理框架，让你开始理解时间、数据速率和范围的相互依赖性，并开始“看见”时间维度。

多冲突域 Multiple Collision Domains

我们将 802.11 冲突域定义为两个 802.11 终端站点可以相互解码对方的传统前导码的物理区域。次要定义是在同一信道上的每个冲突域中独立的时间流。我们的多维模型可以通过在第一个冲突域旁边添加第二个冲突域来扩展以显示这一点。

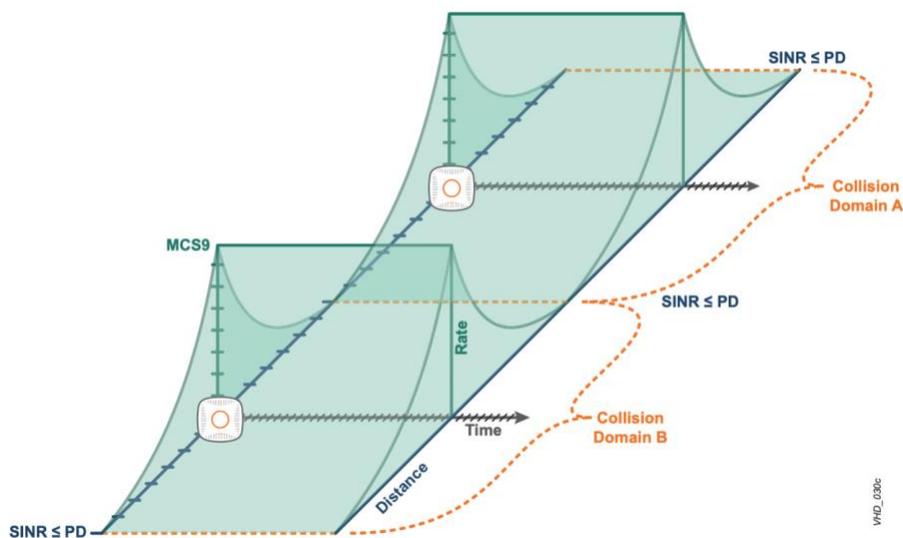


图 T2-8 两个不重叠的 802.11 冲突域

想象一下，在新轴交点的同一信道上有第二个 AP，其自身具有 PLCP PD 干扰半径。在这个例子中，蜂窝被不切实际的假设隔开，即该点正好在 AP 之间。AP 必须在自由空间中相隔几百米，这样它们的 PD 距离才能完全不重叠，如果有墙壁或其他结构材料阻隔，则 PD 距离会稍微小一些。在这种情况下，每个 AP 都有一个真正独立的冲突域。可以说，“信道”从容量的角度来看是独立的 (即使它们处于相同的中心频率)，这种情况当然是每个高密网络设计的理想选择。

重叠冲突域 Overlapping Collision Domains

然而，如果这些 AP 在距离轴上有任何程度重叠，那么它们在该区域的时间上不再独立。图 T2-9 显示了企业部署具有 -65 dBm 蜂窝边缘和大约 20 m (65 ft) AP 到 AP 间距的常见情况。2.4-GHz 的三信道规划就是这种情况。

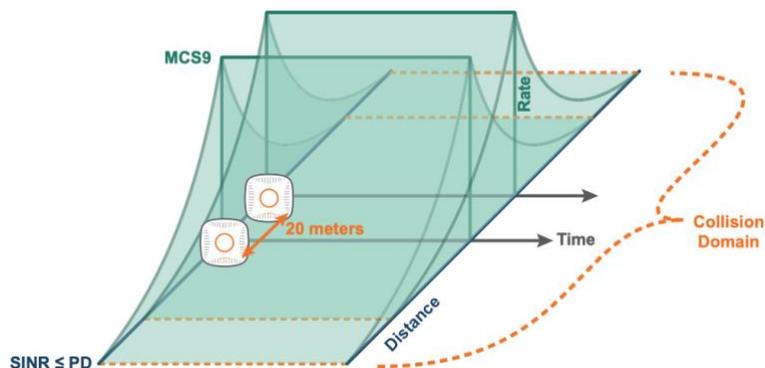


图 T2-9 重叠冲突域是一个信道

在这里，模型再次显示了它的价值，因为它清楚地显示了这两个蜂窝实际上是一个单一的冲突域。即使根据此 VRD 的最佳实践，我们提升了数据帧和控制帧的有效载荷速率（也就是裁剪掉了低速率），但是这两个蜂窝也还是在一个冲突域中。无线电信号功率呈指数级衰减，因此起初它会迅速下降，但随后会持续很长的距离。

Aruba 知道许多客户认为他们的网络行为更像图 T2-8，但事实上它更像是图 T2-9。无线架构师在设计任何 WLAN，尤其是 VHD 系统时，必须与客户设定适当的期望。

在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量中，指导您学习了使用总系统吞吐量 (TST) 方法执行容量规划。TST 公式中的“重用因子”项是冲突域重叠的度量。数值 1 表示所有相同信道 AP 都存在于同一冲突域中，因此从容量角度来看是单个信道，更高的值意味着期望有某种程度的独立性。正如本指南多次所述，在 10,000 个或更少座位的 VHD 环境中几乎不可能获得冲突域的独立性，即使你使用了专用天线和安装策略，效果也是如此。

终端站点的冲突域 Collision Domains of Stations

该模型的一个明显简化是它只考虑了 AP 的冲突域，我们没有考虑两个 AP 之间的 STA 问题。STA 必须遵循与 AP 相同的规则，因此它们的冲突域也相对较大。(例外情况是，一些 STA 使用减小的发射功率来延长电池寿命。)

事实是，如果我们在现代高密度无线局域网中查看给定信道频率上的所有 AP 和 STA，完全不可能画出明确的边界。冲突域是相对在特定的时刻，在特定的中心频率上进行传输。为了可视化这一

点，让我们修改一下图 T2-4，根据当前控制该信道的设备，显示具有时空冲突域的相对瞬时形状的一个冲突域。

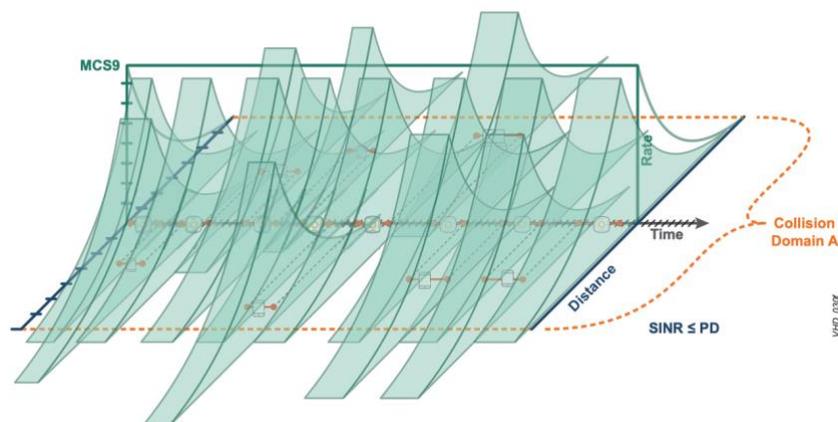


图 T2-10 STA 和 AP 的动态冲突域模型

同样，时间起着重要的作用。冲突域有时会根据仲裁过程（arbitration process）中哪个 AP 或 STA 赢得了信道而分裂或合并在一起。

图 T2-10 可能看起来令人困惑或过于复杂，但这正是该信道上冲突域不时发生的事情。冲突域在空间和时间上都在不断地变化。请记住，前面练习的目的仅仅是扩展你对这些环境机制的视野和理解。当你能在空间和时间上看到无线电时，将这种意识应用于特定的物理设施就很简单了。

服用红色药丸 Take the Red Pill—翻译注：黑客帝国

本指南的其余部分将详细地描述冲突域模型的三个轴中的每一个轴。

第 3 章：了解空口时间 — 探索空口时间的概念和现实。第 4 章：Wi-Fi 信道如何在高负载下工作 — 着眼于数据速率的效率，尤其是控制帧和管理帧流量在 VHD 领域的影响。第 5 章：了解 RF 射频冲突域 — 除了我们刚刚探讨的简化模型之外，还考虑了冲突域的物理边界。

即使是最有经验的 WLAN 无线架构师也会对这些章节中介绍的一些内容感到惊讶。在你阅读了整个指南后，你将永远不会再以同样的旧方式来看待 802.11。

“This is your last chance. After this, there is no turning back. You take the blue pill - the story ends, you wake up in your bed and believe whatever you want to believe. You take the red pill - you stay in Wonderland and I show you how deep the rabbit-hole goes.”

Morpheus to Neo, The Matrix (1999)

第 3 章：了解空口时间

本章建立在上一章的基础上，通过学习空口时间和技术，你可以用它来控制你的网络优势。在《超高密度 802.11ac 网络规划指南》的第 P-3 章：射频设计中，我们指出，在超高密度 (VHD) 的网络中，无线架构师的四项首要无线电设计职责之一是保护每个可用信道上的每微秒空口时间，以避免不必要或低效的使用。到本章结束时，你会明白为什么保护空口时间是如此重要。

本章试图回答的关键问题是：要发送任意数量的数据有效负载，在空口时间上必须支付的真正价格是多少？每个人都知道发送数据需要时间，这是毋庸置疑的。但是你可能会对价格之高感到惊讶，当你知道真正的成本时，你想要学习空口时间管理技术来降低成本。

如果您在射频设计方面取得成功，而在空口时间管理方面失败，您的 VHD 网络可能无法满足容量预期。相反，通过良好的空口时间管理，即使是次优的射频设计，也能承载大量的通信流量。

什么是空口时间？

掌握空口时间，首先要清楚地知道什么是空口时间。

在最高级别上，802.11 空口时间可以被认为是在给定信道 (或冲突域) 上连续的一系列交替的空闲和繁忙周期。每个周期的长度以一个时间单位来度量，如毫秒 (ms) 或微秒 (us)。从较高的角度来看，每个周期所需的时间总是变化的。

图 T3-1 显示在三个相邻的，不重叠的信道上交替的空闲和繁忙时间段。

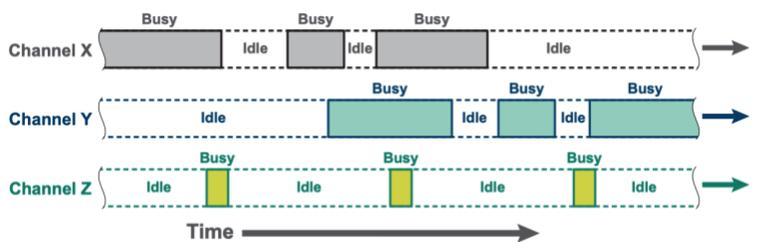


图 T3-1 在三个信道上交替的空闲和繁忙时间段

在图中所覆盖的时间段内，信道 X 在左侧的传输过程中，然后以空闲状态结束。信道 Y 以空闲开始，以繁忙结束。除了周期性地重复传输 (例如接入点 (AP) 信标) 之外，信道 Z 是空闲的。

空口时间结构 Airtime Structure

现在我们放大并关注单个 802.11 无线信道，在 MAC 层上如何以更细粒度的级别被组织起来的。PHY 层具有与本讨论无关的更精细的结构。

Wi-Fi 采用一种被称为具有冲突避免的载波侦听多路访问 (CSMA/CA 或仅 CSMA) 的技术来管理信道。在 CSMA 中，空口时间被分割为称为传输机会 (TXOPs-Transmit Opportunities) 的繁忙单元和空闲时

间。空闲时间进一步被分解为仲裁周期和真正的空闲时间(当没有设备要发送任何东西时)。在一个被称为仲裁的过程中，终端站点相互竞争以获得对信道的控制权。没有中央调度程序，赢得仲裁过程的终端站点成为 TXOP 持有者，并在 TXOP 限制内独家使用该信道。



图 T3-2 802.11 两种空闲时间

这个过程与许多基于某种形式的时分多路复用 (TDM) 的中央调度无线电技术有很大的不同。使用时分多路复用技术 TDM，空口时间被严格地分解成非常短的块，并由使用精确同步时钟的主调度器在用户之间分配。时分多路复用 TDM 在运营商蜂窝网络中很常见，蜂窝网络拥有特定频谱的独家使用和对基站和移动终端的控制。时分多路复用 TDM 也存在于长途无线网桥中。相比之下，Wi-Fi 使用了对任何人开放的未经许可的频带，这就需要一个标准化的媒介访问协商过程。

本章有意聚焦于数据传输，也就是 TXOPs。802.11 有许多其他的控制和管理传输，仍然需要仲裁和确认，但不使用 TXOP 格式。当你清楚 TXOPs 的空口时间消耗时，这些其他帧类型对空口时间的巨大影响将是不言而喻的。

仲裁(Arbitration)

仲裁是必要的，因为在任何给定的信道上，在同一 802.11 冲突域内，在同一时间仅只有一个终端站点能够传输数据。此外，并非所有的终端站点都是平等的。Wi-Fi 包括服务质量 (QoS) 功能，允许多达四个不同的传输优先级队列 (语音、视频、背景和最大努力)，这些队列是通过仲裁机制强制执行的。

对于刚刚接触仲裁概念的读者来说，这是一种在 TXOP 之前的帧间间隔的形式，在这种情况下，终端站点之间相互竞争成为 TXOP 持有者。这个时期有两个部分：

- **仲裁帧间间隔 (AIFS- Arbitration interframe space)**: 变量，但固定在服务类别 (CoS) 内(从 34 到 79 us)
- **竞争窗口 (CW- Contention window)**: 基于 CWmin/CWmax 和 CoS 的变量(从 0 到 9, 207 us)

如果没有终端站点有数据要发送，那么计时器就不会减少，并且信道确实是空闲的。当一个有数据要发送的终端站点开始倒计时其 AIFS 计时器时，仲裁实际上就开始了。准备传输的每个终端站点都要根据它要发送的数据选择适合的 AIFS 持续时间。如果是语音数据，则使用 [VO] CoS。绝大多数在 VHD 区域中发送的数据都使用非优先级的 [BE] CoS。

在 AIFS 计时器到期后，CW 计时器开始。每个终端站点在它开始发送数据之前要选择一个“时隙时间-slot times”的随机数来消逝时间。如果有其他的计时器首先到期，并且信道变得繁忙，那么终端站点将停止计数，直到下一个仲裁期间。如果终端站点计数为零，并且 802.11 空闲信道评估 (CCA-clear channel assessment) 报告了媒介此时是空闲的，那么终端站点会打开其无线电并开始发送。当信道再次空闲时，有要发送数据的其余终端站点可以从它们中断的地方恢复其 CW 计时器来开始计数。

图 T3-3 显示同一信道上的三个不同设备，每个设备都有要发送的数据。

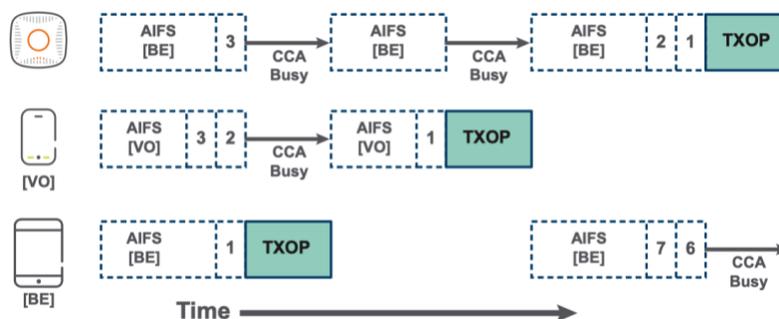


图 T3-3 802.11 三个 QoS 站间仲裁

虚线框表示在 Wi-Fi 中每次传输之前的 CSMA 仲裁期。在本例中，平板电脑赢得仲裁，并能够首先发送（即使它在 [BE] 队列中）。然后，一个新的仲裁期开始了，这次是由智能手机赢得的，最后 AP 获胜。对于冲突域中的所有客户端，此过程将无限期地持续下去，这里的 TXOP 持续时间并没有按照比例绘制。

关于仲裁的更完整的讨论，见本章末尾参考书目中列出的教科书。

TXOP 结构-TXOP Structure

一个 802.11 TXOP（传输机会），技术上是从该信道上的任何终端站点赢得仲裁的那一刻开始。WLAN 架构师必须了解 TXOP 的结构。在 802.11ac 中，所有数据有效载荷都必须使用此格式发送。802.11ac TXOP 的基本配置如图 T3-4 所示，它由以下组件组成：

- 在仲裁期之前准备发送 (RTS-Ready to Send) 帧
- 在 SIFS 之前明确发送 (CTS-Clear to Send) 帧
- 在 SIFS 之前，包含一个或多个 MPDU 的聚合 MAC 协议数据单元 (A-MPDU) 数据帧
- 在 SIFS 之前的块确认帧

您可以看到 TXOP 基本上是两个终端站点之间的限时对话。利用 802.11ac wave2 和多用户多输入、多输出 (MU-MIMO)，TXOP 可以扩展到包括多达四个终端站点加上 AP 来实现下行数据传输的。在

802.11ac 中，几乎所有的 TXOPs 都是从 RTS/CTS 交换开始，以允许动态信道带宽功能来检测有多少子信道是空闲的。

图 T3-4 还显示了在 TXOP 期间发送的四个连续帧类型中的每一个，是如何更新网络分配矢量 (NAV-Network Allocation Vector)。NAV 是 CCA 进程用来将虚拟载波侦听设置为忙碌的机制。在接下来的第 4 章：Wi-Fi 信道如何在高负载下工作，会对 CCA 过程进行了深入的描述。

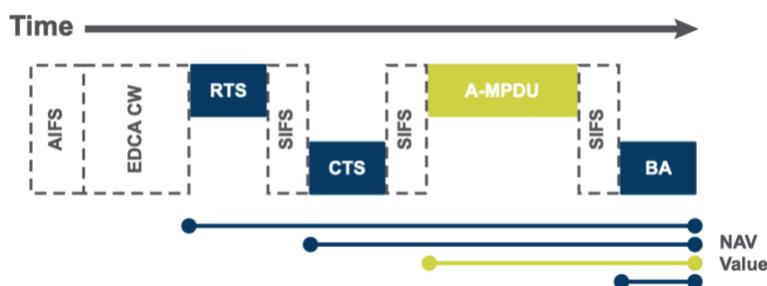


图 T3-4 TXOP 的时域结构

本指南没有更深入地解释 802.11 协议操作。帧间间隔、QoS 访问类别、帧聚合、MU-MIMO 和其他核心方面的 MAC 操作都不在本 VRD 的范围之内。众多优秀的教科书都对这些话题进行了深入的讨论。本章末尾提供了参考书目。Aruba 强烈建议 WLAN 架构师熟悉这个级别的 802.11 协议。

帧前导码 Frame Preambles

为了深入细节，我们必须进一步放大空口时间结构，以辨别每个 802.11 帧实际上由两个或更多部分组成，这些部分是前导码和有效载荷。图 T3-5 显示此细分，并显示有多种类型的前导码。

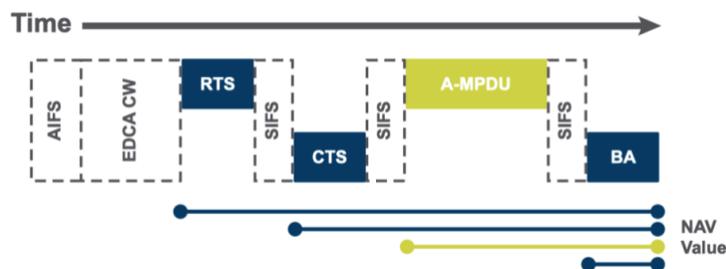


图 T3-5 包含前导码的 TXOP 结构

前导码是无线电用来引导每一帧的工具，前导码包含无线电用来锁定传输的各种元素，以及描述如何处理有效载荷的一些数据字段。有几种类型的前导码，本指南描述的两类型是传统前导码(LP-legacy preamble) 和非常高吞吐量前导码 (VHTP)。VHTPs 之前有 LPs，以确保与传统终端站点的兼容性。正如你将很快了解到的，前导码消耗了大量的空口时间。

从前导码的角度来看，甚至控制帧或管理帧也可以被视为是数据帧的一种形式，因为根本上 RTS 或 CTS 或信标只是一种有效载荷类型，它由以特定速率发送的固定字节序列组成。

优化 TXOPs

如果不深入 TXOPs，您应该会看到在具有多个终端站点的 VHD 区域中，性能的关键是最大限度地减少繁忙时间和最大限度地增加空闲时间，空闲时间在以下情况下最大化：

- 避免不必要的 TXOPs
- 必要的 TXOPs 尽可能在几微秒内完成
- 失败的 TXOPs 的重传被最小化或完全避免

你可以把整个 VRD 归结为这三个原则。无论您是为数百个或者数千个终端服务，每个繁忙的时期都会夺走别人的容量。作为无线架构师，您必须对所有的空口时间消耗采取无情的批评态度。

您能否成功部署 VHD 网络取决于您对这些原则的理解程度和执行程度。

802.11 MPDUs 的数据速率

了解 TXOP 的结构并不能告诉我们它消耗了多少空口时间，为此，我们必须把注意力转向 PHY 物理层和数据速率。

802.11ac 数据速率表

802.11ac 为数据速率表引入了显著的额外复杂性，这种复杂性有些是显而易见的，有些是隐藏的。请参阅《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的附录 EC-B：802.11ac 数据速率表，获取多达四个空间流的完整速率列表。

最明显的变化来自新的 256-QAM 调制和更宽的信道增加，802.11n 对每个空间流有八个调制和编码方案 (MCS0-7) 值，但是 802.11ac 最多可以有 10 个 (MCS0-9)。然而，在少数情况下 802.11ac 只有九个。对于 VHD 领域，MCS9 不适用于 VHT20 信道中的 1SS 或 2SS 设备。

每个新的信道宽度需要为每个 MCS 提供一整套数据速率，每个信道宽度内有 400 纳秒和 800 纳秒保护间隔。结果是，对于三个空间流，802.11n 中定义的 84 个数据速率已经增长到 802.11ac 下的 208 个数据速率！

正如在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-3 章：空口时间管理中解释的那样，Aruba 建议仅使用 20 MHz 信道宽度来提高整体性能。这个决定的一个有用的副产品是，它将速率表 (表 T3-1) 简化为更容易记住的东西。

表 T3-1 802.11ac 在 20 MHz VHT 下运行的数据速率

MCS	Modulation	Bits per Symbol	Coding Ratio	1 Spatial Stream		2 Spatial Streams		3 Spatial Streams		4 Spatial Streams	
				SGI	No SGI	SGI	No SGI	SGI	No SGI	SGI	No SGI
MCS 0	BPSK	1	1/2	6.5	7.2	13.0	14.4	19.5	21.7	26.0	28.9
MCS 1	QPSK	2	1/2	13.0	14.4	26.0	28.9	39.0	43.3	52.0	57.8
MCS 2	QPSK	2	3/4	19.5	21.7	39.0	43.3	58.5	65.0	78.0	86.7
MCS 3	16-QAM	4	1/2	26.0	28.9	52.0	57.8	78.0	86.7	104.0	115.6
MCS 4	16-QAM	4	3/4	39.0	43.3	78.0	86.7	117.0	130.0	156.0	173.3
MCS 5	64-QAM	6	2/3	52.0	57.8	104.0	115.6	156.0	173.3	208.0	231.1
MCS 6	64-QAM	6	3/4	58.5	65.0	117.0	130.0	175.5	195.0	234.0	260.0
MCS 7	64-QAM	6	5/6	65.0	72.2	130.0	144.4	195.0	216.7	260.0	288.9
MCS 8	256-QAM	8	3/4	78.0	86.7	156.0	173.3	234.0	260.0	312.0	346.7
MCS 9	256-QAM	8	5/6	N/A	N/A	N/A	N/A	260.0	288.9	N/A	N/A

一如既往，在 AP 和 STA 之间可以使用的最大数据速率取决于信号和干扰加噪声比 (SINR)。数据速率越快，成功解调该速率所需的 SINR 就越大。新的 256-QAM 速率通常需要至少 30 dB 到 35 dB 的 SINR。在自由空间中，这个值只可能在无线电几米之内。在挤满人的 VHD 区域，这个距离可以下降到 1-2 米。因此在实践中，我们并不针对 MCS8 或 MCS9 进行设计，我们很高兴在可能的时候得到它，但正如你在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中第 EC-2 章：估算系统吞吐量，我们为所有用户设计一个低得多的值，如果信道负载较轻或者用户靠近 AP，这种方法就有可能在某些时候更快地暴发。

前导码速率与有效载荷速率

然而，一个 802.11 帧仅仅使用一个数据速率发送是不正确的。事实上，Wi-Fi 无线电传输的每一帧都以两种不同的数据速率发送，如所示图 T3-6。

- 传统前导码和 VHT 前导码——要求以 BPSK 的 6 Mbps 速率发送
- PHY 服务数据单元 (PSDU) 有效载荷部分——以选定的数据有效载荷速率发送

现在我们使用 TXOP 结构来更新图 T3-5，以反映所有组件部分和数据速率。现在，我们假设控制数据速率 (RTS, CTS, BA) 与前导码速率相同：6 Mbps。让我们暂时忽略 AIFS 和竞争窗口。图 T3-6 显示这些变化。请注意，我们还为每个独立传输元素和帧间间隔添加了所需的微秒数。

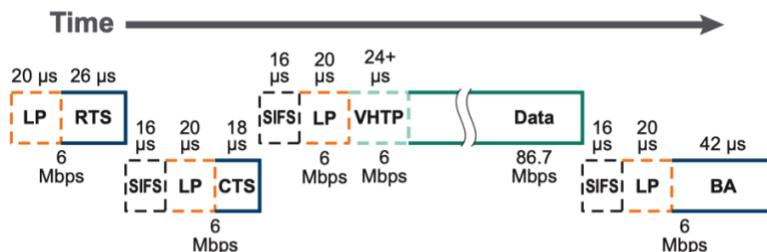


图 T3-6 具有前导码数据速率的详细 TXOP 结构

仔细研究这个数字，特别是每个部分所需的空口时间。因为我们的 SINR 足够高，即使我们的有效载荷速率达到了 MCS8 或 MCS9，但每一帧的前 20 us 或更多都被传统前导码消耗掉，它以最慢的 6 Mbps 速率发送，这个数据速率是 802.11 协议中固定的，是不能更改的。

前导码空口时间与有效载荷空口时间

20us 听起来可能不是很多时间，但是随着数据速率越来越快，传统前导码实际上会比有效载荷传输，要花费更多的时间。特别是因为在大多数 WLAN 的平均帧大小是不超过 500-600 字节，这个数字可能会让你大吃一惊。

传统前导码需要 20 us，VHT 前导码至少需要 24 us，如果需要额外的长训练字段 (LTFs)，则可能会更长。在 802.11ac 中，每个空间流通常需要一个 LTF。VHT 帧需要 LP 前导码和 VHTP 前导码，最小前导码的总空口时间至少为 44 us。

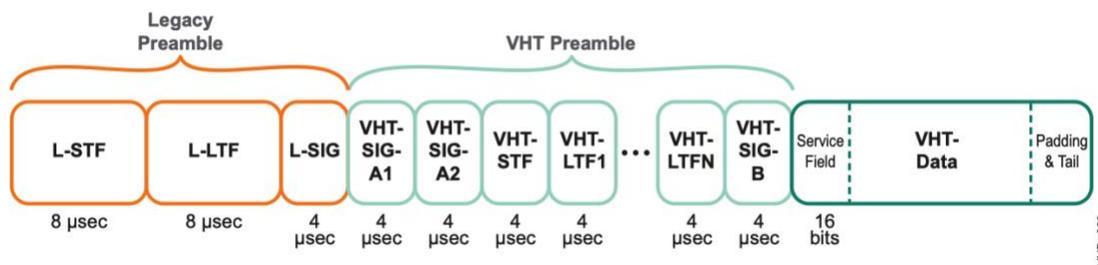


图 T3-7 带符号持续时间的前导码格式

这个时间与发送有效载荷数据所需的时间相比如何？计算起来非常简单：

$$Payload\ Airtime\ (\mu s) = \frac{Payload\ Size\ (bytes) * 8\ bits/byte}{Data\ Rate\ (Mbps)}$$

考虑在任何有线或无线网络上传送的最常见的 MPDU 帧----90 字节的 TCP ACK 确认。假设它由 1SS VHT20 设备以最大速率 MCS8 发送，所消耗的空口时间为 $90B * 8bit / 86.7Mbps = 8.3\ us$ 。与 44 us VHTP 相比，前导码比 TCP ACK 确认有效载荷需要 5.3 倍的更多空口时间！而这一次不包括仲裁或者 TXOP 结构的其余部分。从图形上看，这种对比甚至更加明显。为了突出前导码和有效载荷空口时间之

间的潜在差异大小，我们计算了五个常见 MPDU 有效载荷大小范围所需的空口时间，并将其绘制在图 T3-8 中。从左到右的 MPDU 大小分别为 64、512、1024、1514 和 3028 字节。

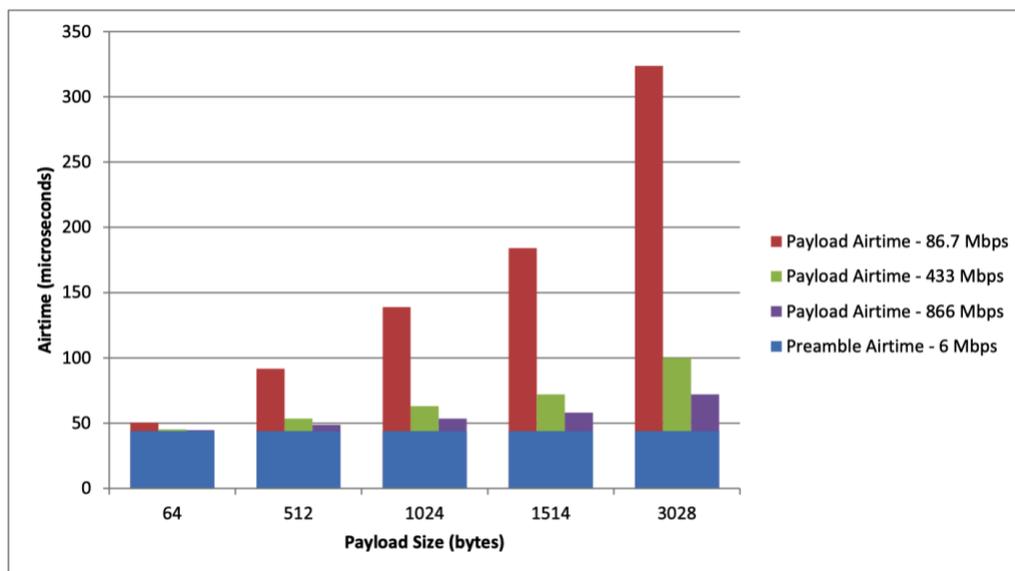


图 T3-8 各种有效载荷和速率的前导与有效载荷空口时间对比

对于每个有效载荷大小，该图表显示了有效载荷空口时间如何随着三种不同的和一个通用的数据速率而变化：

- 蓝色：传统前导码+VHT 前导码 (6 Mbps)---前导码大小不变，速率不变，空口时间始终不变
- 红色：有效载荷速率 1SS VHT20 MCS8 (86.7 Mbps)
- 绿色：有效载荷速率 1SS VHT80 MCS9 (433.3 Mbps)
- 紫色：有效载荷速率 2SS VHT80 MCS9 (866.6 Mbps)

前导码时间恒定在 44 us，有效载荷的空口时间因帧大小和所选数据速率不同而变化。令人惊讶的是，相比较于在 866Mbps 的速率下发送 3028 字节的帧，前导码需要接近 57% 的更多空口时间。对于非常小的 64 字节帧（在 WLANs 上非常常见），在 86.7 Mbps 速率下，前导码相对于有效载荷的空口时间，高出了 7 倍，在 866 Mbps 速率下，前导码相对于有效载荷的空口时间超过 70 倍！

802.11 控制帧的数据速率

除了数据 MPDU 之外，TXOP 由三个 802.11 控制帧组成，包括 RTS、CTS 和 Block ACK(BA)。我们将在本节中计算这些控制帧所需的空口时间。

这些控制帧的有效载荷部分以 6 Mbps 的默认速率发送（Basic RRate）。在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-3 章：空口时间管理，在某些情况下，我们强烈主张将此控制帧速率

提高到 24 Mbps 甚至 36 Mbps (basic rate)。每个控制帧前面都有一个固定 6 Mbps 的 LP 传统前导码，这需要固定的 20us，我们可以仅为这些帧创建类似类型的空口时间图表。

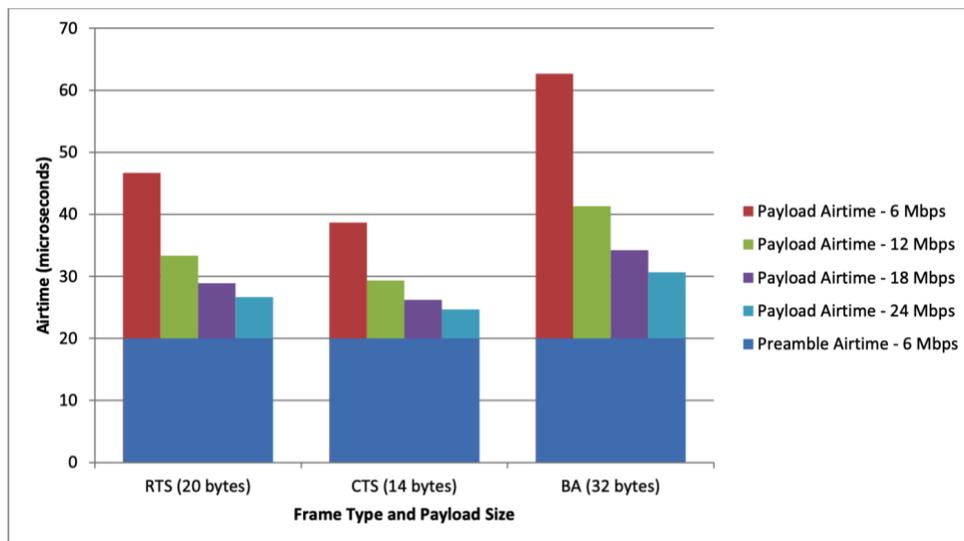


图 T3-9 各种控制帧中的前导码与有效载荷的空口时间对比

一个 802.11 的 RTS 总是 20 个字节，一个 CTS 是 14 个字节，一个 BA 是 32 个字节。这些控制帧必须使用传统的 802.11 OFDM 速率 (1 2 5 6 9 11 12 18 24 36 48 54 Mbps) 以实现向后兼容性。图 T3-9 采用与数据帧图表相同的格式，但在本例中，我们绘制了四种不同的传统速率。默认的 6 Mbps 速率在左侧为红色，24Mbps 速率在右侧为浅蓝色。

前导码与有效载荷增量的绝对幅度并不像数据帧那样可怕，这种差异完全是因为控制帧有效载荷的小字节。然而，当人们意识到每个 MPDU 中，这些帧中的至少一个是需要发送的，对于小的有效载荷，整个 TXOP 的总开销百分比显然是惊人的，同样的效果也适用于信标帧速率 (beacon rate)。我们主张将信标帧速率 (beacon rate) 提高到 24 Mbps 或更高。回想下《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 48 页表 EC3-11 的彩色输出，通过进行此项的更改，显示空口时间消耗减少了 75%。

你应该从图 T3-9 中获得的最关键信息是通过提高控制帧速率 (即裁剪掉 basic rate 中的低速率，保留高速率)，您可以恢复多少空口时间！相同的 RTS + CTS + BA，在默认控制帧速率下需要 88 us，而使用了 24Mbps 控制帧速率，则下降至到仅 22us，这种变化为每一次 TXOP 节省 66 us！

当我们引用“通过恢复空口时间来增加更多系统容量时 (即减少控制帧对空口时间的消耗)”，这个例子讲的就是这个意思。数百万 TXOPs 成倍增加，这种节省可以将大量额外的空口时间变成可用，从而来服务更多的用户。

有效 TXOP 数据速率 Effective TXOP Data Rate

TXOP 由多种不同类型的帧和前导码组成，它们都以不同的速率运行，那么什么是 TXOP 的实际有效数据速率 (EDR)? 它必须明显低于大多数工程师用来谈论网络性能的数据有效载荷 MCS 速率。

构建帧时间计算器 Building a Frame Time Calculator

从图 T3-6 和前面的讨论，我们有足够的信息来构建一个帧时间计算器。首先，将 TXOP 的每个组件按照其出现的顺序放在左列中，然后填充固定持续的时间元素，包括 SIFS (16 us)、LP (20 us)、VHTP (24 us)。

然后添加行以计算这四个有效载荷的每一个的空口时间。为 RTS (20 byte)、CTS (14 byte) 和 BA (32 byte) 添加固定字节总计，为 MPDU 添加一个动态字段，在这里，我们将改变有效载荷大小，以进行“假设”分析。现在，假设数据有效载荷为 512 字节。在 802.11ac 中，每个 MPDU 之前都有一个 4 字节的 MPDU 分隔符。将字节数 byte 乘以 8 得到 bit 比特位，然后再除以数据速率，得到空口时间，单位是微秒。

最后一步是为具有有效载荷的五种帧类型添加数据速率列，我们将控制帧设置为默认值 6 Mbps，数据 MPDU 部分设置为 86.7 Mbps。如果你在电子表格中构建所有这些，它应该看起来就像表 T3-2。

表 T3-2 TXOP 空口时间计算器 (512-B 有效负载，6 Mbps 控制帧速率)

MAC Unit	Payload Bytes	Payload Bits	Data Rate	µsec	% Airtime
Legacy Preamble			6 Mbps	20.00	7.0%
RTS	20	160	6 Mbps	26.67	9.3%
SIFS				16.00	5.6%
Legacy Preamble			6 Mbps	20.00	7.0%
CTS	14	112	6 Mbps	18.67	6.5%
SIFS				16.00	5.6%
Legacy + VHT Preambles			6 Mbps	44.00	15.3%
A-MPDU Delimiter	4	32	86.7 Mbps	0.37	0.1%
Data Frame Payload	512	4096	86.7 Mbps	47.24	16.4%
SIFS				16.00	5.6%
Legacy Preamble			6 Mbps	20.00	7.0%
BA	32	256	6 Mbps	42.67	14.8%
Airtime for TXOP only (excluding arbitration)				287.61	100.0%
Effective TXOP rate for TXOP only (excluding arbitration)				16.2	

在本例中，整个 TXOP 需要 287.61 us 发送，不包括仲裁。在此期间，512 字节的数据有效载荷占用了刚刚超过 16% 的空口时间来发送，其余 84% 的空口时间由 MAC 协议头和其他帧消耗掉。

然后，我们可以通过将总有效载荷大小除以总空口时间，来计算整个 TXOP 的 EDR(有效数据速率)，如下所示：

$$\text{Effective TXOP Data Rate (Mbps)} = \frac{\text{MPDU Payload Size (bits)}}{\text{TXOP Airtime } (\mu\text{s})}$$

总有效载荷大小=RTS payload + CTS payload+ A-MPDU Delimiter+Data Frame payload + BA payload

因此，此 TXOP 的 EDR 仅为 16.2 Mbps (TXOP 的有效速率)！大多数无线工程师认为“MCS 数据速率”是他们在传输任何类型的有效载荷时，应该在媒介上获得的速度。查看数据包捕获往往会加强这一观点，因为数据 MPDU 始终以其实际 TX 数据速率（也叫物理速率）来显示的。但事实是，除了文件传输和流媒体应用程序之外，MAC 协议头的开销极大地减少了大多数常见空中流量的 EDR。

此计算模式还假定这儿没有重传，在重传的情况下，前一个或全部 TXOP 部分将成为额外的开销，作为结果，重传帧的 EDR 会进一步降低。

执行假设分析

现在我们已经构建了计算器，我们可以对场景执行各种“假设”分析。让我们将控制帧（RTS, CTS, BA）速率从 6 Mbps 更改为 24 Mbps。这些更改用红色框突出显示在表 T3-3。我们看到，虽然有效的 TXOP 数据速率仅增加了 5 Mbps，但通过恢复 66 us，我们将空口时间减少了 23%。正如前面所解释的，回收的空口时间将增加巨大的收益，因为它是为每个 TXOP 都节省了。

表 T3-3 TXOP 空口时间计算器 (512-B 有效负载，24MbpsM 控制帧速率)

MAC Unit	Payload Bytes	Payload Bits	Data Rate	μsec	% Airtime
Legacy Preamble			6 Mbps	20.00	9.0%
RTS	20	160	24 Mbps	6.67	3.0%
SIFS				16.00	7.2%
Legacy Preamble			6 Mbps	20.00	9.0%
CTS	14	112	24 Mbps	4.67	2.1%
SIFS				16.00	7.2%
Legacy + VHT Preambles			6 Mbps	44.00	19.9%
A-MPDU Delimiter	4	32	86.7 Mbps	0.37	0.2%
Data Frame Payload	512	4096	86.7 Mbps	47.24	21.3%
SIFS				16.00	7.2%
Legacy Preamble			6 Mbps	20.00	9.0%
BA	32	256	24 Mbps	10.67	4.8%
Airtime for TXOP only (excluding arbitration)				221.61	100.0%
Effective TXOP rate for TXOP only (excluding arbitration)				21.0	

您还可以更改要发送的数据量，以研究小型和大型 MPDU 的相对效率。如果你想看到一个 TCP ack，只需插入 90 字节而不是 512。如果您想看到全缓冲区流量的 A-MSDU 为 2，请改为插入 3000 字节。

对于更倾向于视觉的读者来说，将计算器变成堆叠的条形图可能更有吸引力。这给了我们一种方法来真正看到整个 TXOP 所花费的时间。在图 T3-10 中，我们使用计算器来比较 90 字节与 3000 字节的 MPDU 大小所需的空口时间。这种方法很容易可视化两次传输的相对效率，以及感知信道有多少时间是安静的，而不是处于发送状态。

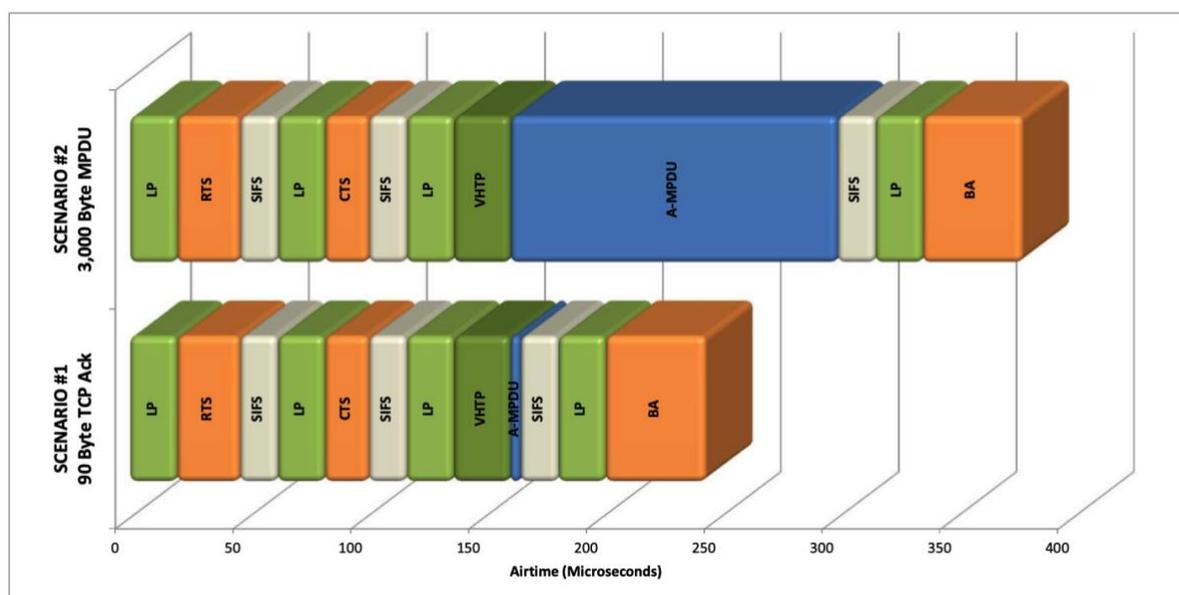


图 T3-10 90B 和 3,000B MPDUs (不包括仲裁) 的空口时间的视觉比较

你可以从假设的角度做其他事情。您可以在 A-MPDU 突发中添加更多 MPDU 的其他行。(请记住，每个 MPDU 都有一个 4 字节分隔符)。最后，您可以更改 MPDU 本身的数据速率。如果您想查看 2SS VHT80 终端站点需要多长时间，请插入 866.7 Mbps 速率，可能性是无限的！

Aruba 提供了一个空口时间计算器作为这个 VRD 的一部分。可从 [Aruba Networks 网站的 VRD 页面](#) 下载。

仲裁的影响 Effects of Arbitration

到目前为止，我们的分析已经排除了仲裁过程所需的空口时间。这个仲裁过程为每个 TXOP 增加了额外的时间开销，并显著地改变了结果，值得自己研究。让我们更新第 22 页图 T3-6 的显示：

- [BE] 队列的 TXOP 开始时的固定 AIFS 周期

- 可变长度竞争窗口
- 使用增强的 24Mbps 控制帧速率

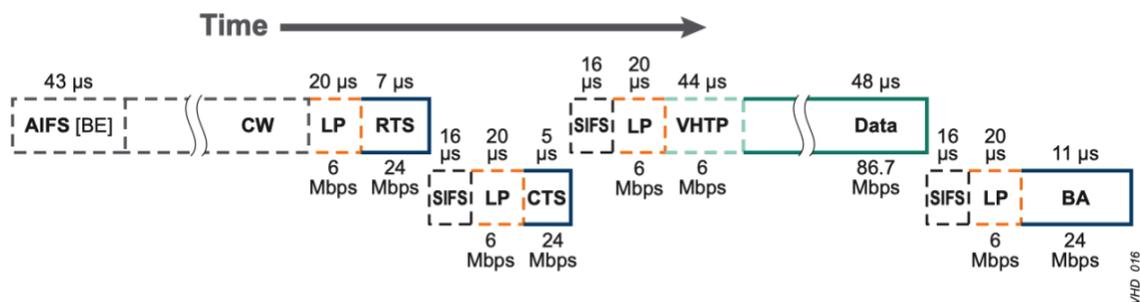


图 T3-11 包括仲裁期间的完整 TXOP 结构

我们还必须在帧时间计算器的顶部添加两行：一行用于 AIFS 值，一行用于竞争窗口。两者都应该根据所使用的 CoS 进行调整。表 T3-4 将这些行添加到计算器中，计算器被进一步调整，数据有效负载为 90 字节，以模拟 TCP ACK 确认。

表 T3-4 使用仲裁的 TXOP 空口时间计算器

MAC Unit	Payload Bytes	Payload Bits	Data Rate	μsec	% Airtime with CSMA	% Airtime TXOP Only
AIFS[BE]				43.0	14.5%	
Contention Window [BE]				72.0	23.9%	
Legacy Preamble			6 Mbps	20.0	6.7%	10.9%
RTS	20	160	24 Mbps	6.7	2.2%	3.6%
SIFS				16.0	5.4%	8.8%
Legacy Preamble			6 Mbps	20.0	6.7%	10.9%
CTS	14	112	24 Mbps	4.7	1.6%	2.6%
SIFS				16.0	5.4%	8.8%
Legacy Preamble			6 Mbps	20.0	6.7%	10.9%
VHT Preamble			6 Mbps	24.0	8.1%	13.1%
A-MPDU	94	752	86.7 Mbps	8.7	2.9%	4.7%
SIFS				16.0	5.4%	8.8%
Legacy Preamble			6 Mbps	20.0	6.7%	10.9%
Block Ack	32	256	24 Mbps	10.7	3.6%	5.8%
Total Airtime including CSMA		1,280		297.7	100.0%	100.0%
Effective TXOP rate including CSMA				4.3		
Total Airtime for TXOP only				182.7		
Effective TXOP data rate for TXOP only				7.0		

在本例中，[BE] 的 AIFS 固定为 43 us。这个安静期几乎与 CTS (40.7 us) 或 BA (46.7 us) 一样长，包括 SIFS 和传统前导码。对于 CW 值，对于第一次传输尝试，随机计时器可以在 0 us 到 279us 之间的任何位置开始。我们选择 72 us (或 8 个时隙时间) 作为计算器的任意固定值。总的来说，AIFS 加上 CW 总计为 115us，以百分比为基础，大约占总 TXOP 的 40%！仲裁周期加上三个 SIFS 等于 TXOP 的 55%，在此期间信道上实际没有发生任何事情。

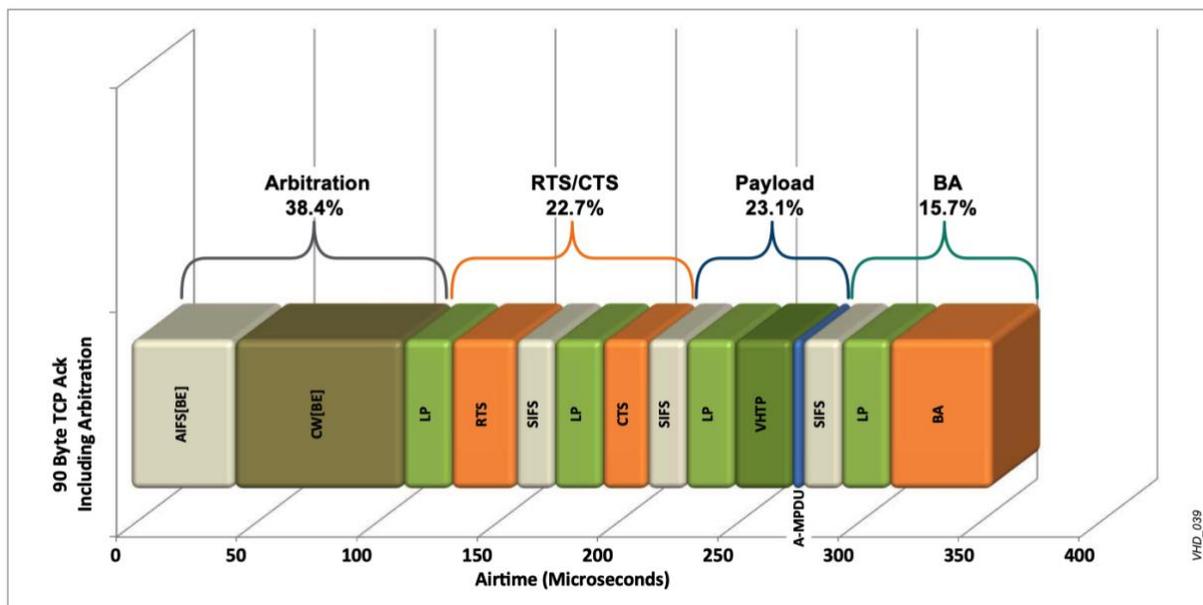


图 T3-12 TXOP 空口时间的可视化分析 (包括仲裁)

当看到这张图表时，我头脑中想到的比喻是发射火箭进入到太空。火箭设计的一个经验法则是，根据运载火箭的最终目的地，最大有效载荷可以占总发射质量的 1% 到 4% 之间。剩余的发射质量由燃料和运载工具本身组成，没有这些，有效载荷就无法运载，就像火箭顶部的太空舱一样，图 T3-12 中所示的 90 字节 MPDU 基本上是货物。从表 T3-4 中，我们看到 A-MPDU 在 MCS8 上发送需要大约 3% 的空口时间。TXOP 所需的总空口时间的另外 97% 类似于火箭运载工具和它的燃料。和火箭一样，TXOP 空口时间在传输期间被丢弃，不能重复使用。

诚然，这是一个保守的例子。CW 实际上是一个随机值，可能少于八个时隙时间 (并且很可能是多个 STAs 竞争)。但是 CW 时间也可能是多得多。我们使用这个值来强调仲裁的空口时间影响，以及常见帧大小的非常差的空口时间效率。

在本例中，当考虑到整个 TXOP 持续时间时，EDR 从 7 Mbps 下降到 4.3 Mbps，即使 TCP ack 的数据有效负载以 86.7 Mbps 的完整 MCS8 速率发送。

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Payload_fraction
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Saturn_V

如你所见，每次传输都有空口时间成本。最“昂贵”的部分是重复的控制帧。传统的非 VHD 区域不需要担心这种开销，因为它们的总占空比通常很低。然而，在 VHD 区域，情况正好相反。因此，您应该仔细检查每一次传输，以确定是否有必要，是否可以以更快的速度发送，以及如何最大限度地减少可能发生的重传。

实际环境中的平均帧大小测量值

本指南多次断言，VHD 区域的平均帧大小相当小，大约为 500 字节或更小。事实上，在大多数情况下，绝大多数 WLANs 的平均帧大小都很小。只有那些主要由文件传输、视频流或速度测试的流量组成的网络才会显示更大的值，通常，在大多数 WLANs 下，这些流量类型不是有效的负载量。

Aruba 行政大楼

为了量化实际网络上帧大小的真实范围，我们在 Aruba 主行政大楼的繁忙时段进行了超过 30 分钟的多信道数据包捕获。在 5GHz 频段的 36+、44+、132+ 和 157+ 信道以及 2.4GHz 频段的 1 和 11 信道上捕获流量，选择这些信道是为了在每个主要频段上获得一些覆盖。

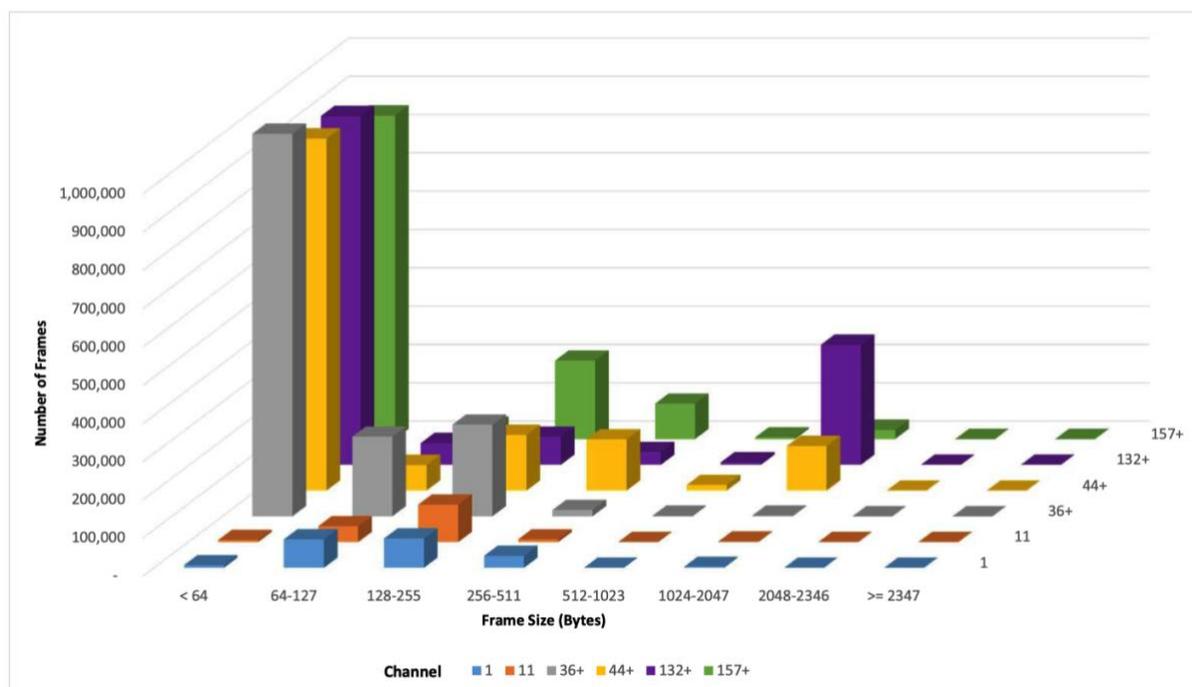


图 T3-13 办公室环境中的帧大小分布 (6 个信道, 30 分钟)

图 T3-13 显示六个信道中每个的直方图。在 5GHz 时，总体平均帧大小为 201 字节，在 2.4GHz 时为 191 字节。两个频段中超过 80% 的帧都在 256 字节以下。图 T3-14 以饼图的形式展示了基于频段的汇总结果。

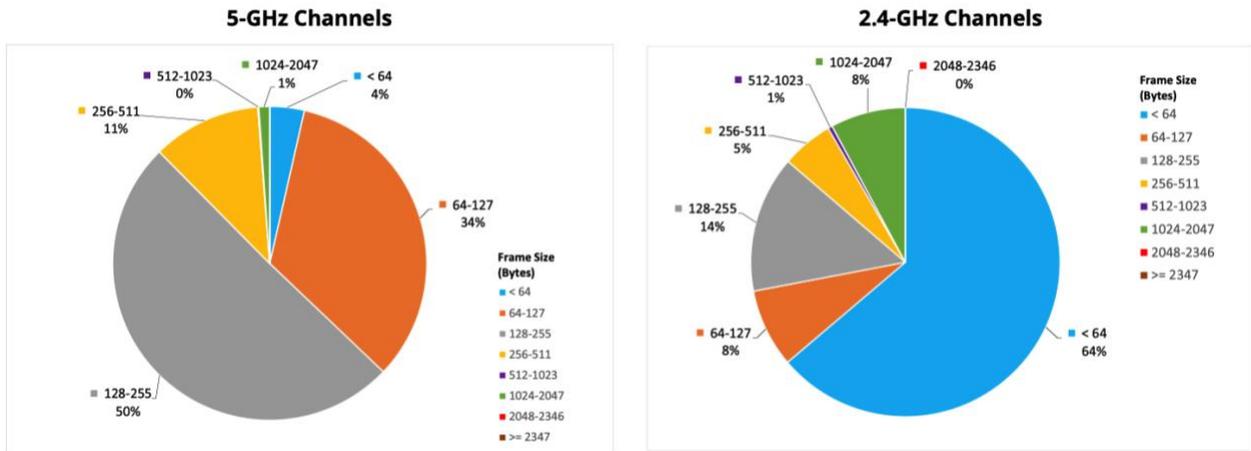


图 T3-14 在办公室按频段区分的帧大小

足球场

Aruba 还在一系列 VHD 环境中进行了测量。图 T3-15 中的数据是在一场足球比赛的第三节，在一个有 70000 个座位的体育场里，花了 10 分钟时间，在八个信道上的流量被捕获。

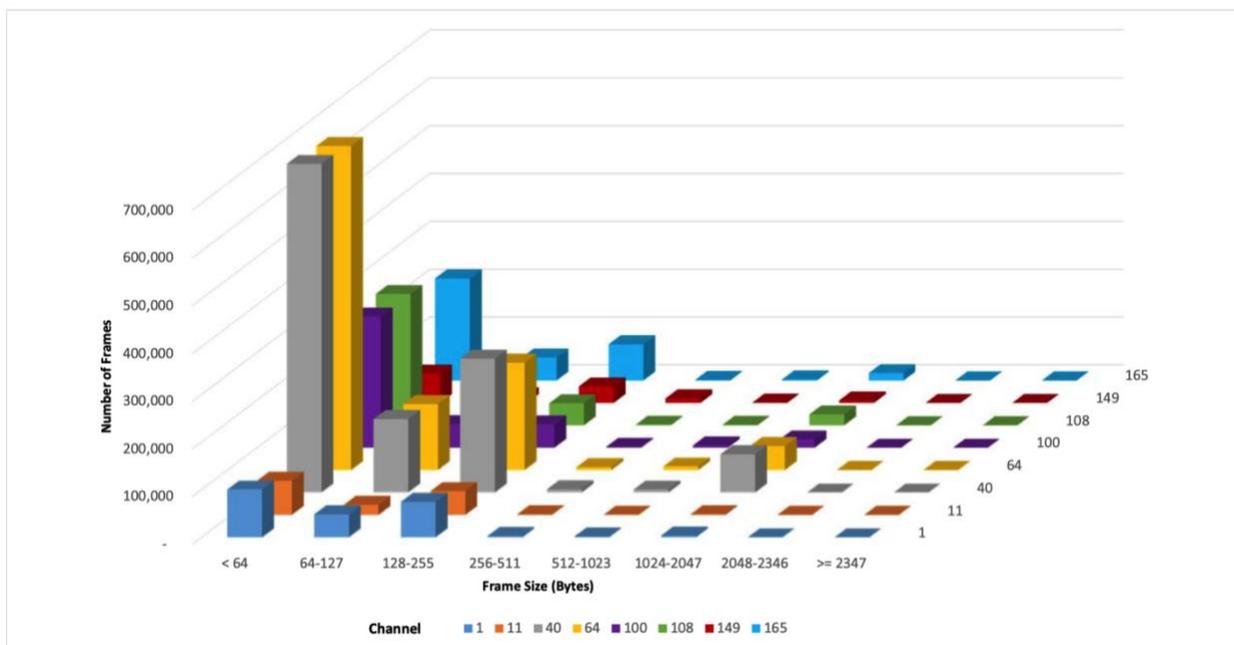


图 T3-15 足球比赛期间的帧大小分布 (8 个信道，10 分钟)

与 office 示例一样，很明显，绝大多数流量都在 256 字节以下。总体平均帧大小在 5GHz 中仅为 160 字节，在 2.4GHz 中仅为 125 字节。两个频段中超过 80%的帧都在 256 字节以下。图 T3-16 以饼图格式按频段显示汇总结果。

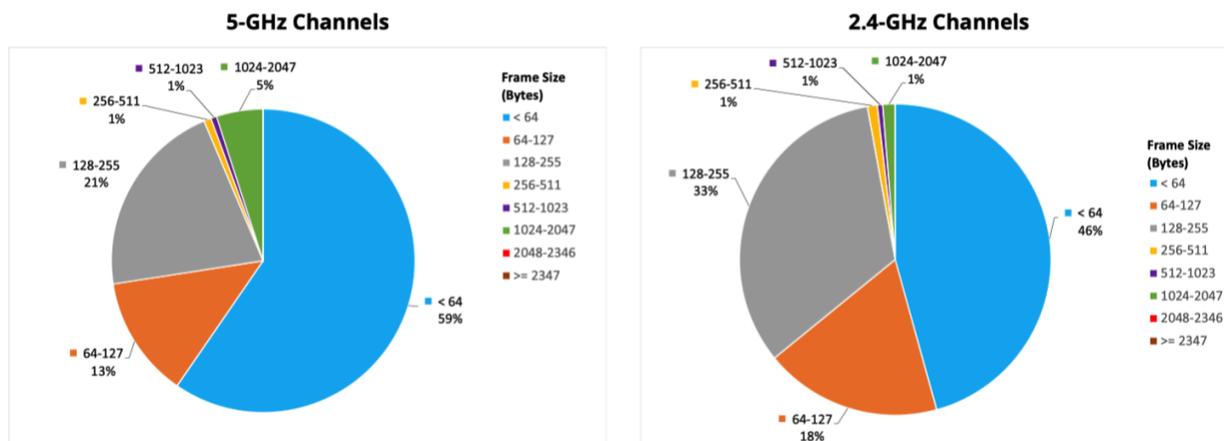


图 T3-16 足球比赛期间按频段划分的帧大小

大量的 64 字节以下的帧，表明这些是 802.11 个控制帧。我们可以用数据包捕获工具中的帧类型分解来验证这一点，看看这是否是真的。事实上，我们发现在测量期间，整个帧中的 58% 是控制帧。您可能会惊讶地发现，数据帧占总流量的比例不到 25% (参见图 T3-17)。

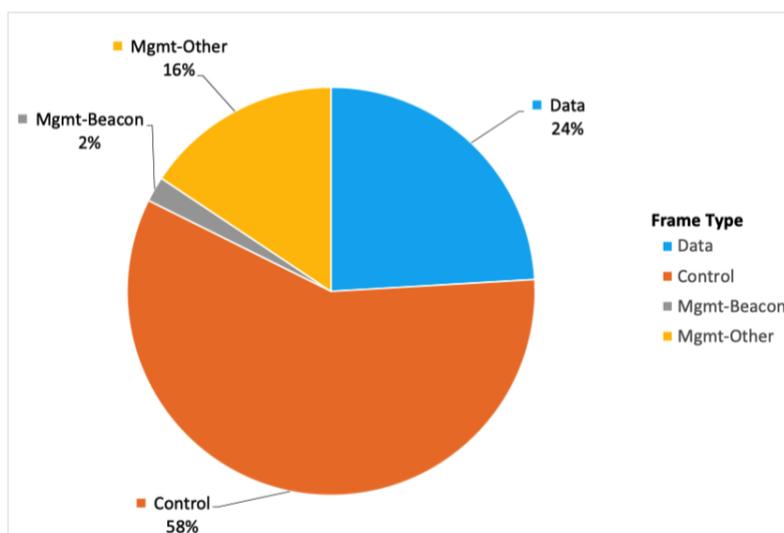


图 T3-17 足球比赛场景下的帧类型分布

从帧的类型分布中可以看到，控制帧占到整个 802.11 帧的 58%，管理帧占了 18%，数据帧只占了 24%。

这些结果结合前面对 TXOP 结构的分析，描绘了一幅清晰的画面，巨大的潜在用户容量是损失给 802.11 系统的管理帧和控制帧的流量开销。数据显示空口非常繁忙，但不一定携带有用的数据有效载荷。当没有多少用户在场，或者占空比很低时，这可能很好。然而，当某一事件导致流量出现一个较大的峰值时，系统需要它所能得到的所有潜在能力来吸收峰值。此示例显示了为什么您必须学会对空口时间恢复并执行良好的空口时间管理实践。

空口时间和带宽有什么关系？

在本章中，我们使用术语“带宽 Bandwidth”来表示在给定时间内传输的数据量。带宽通常以比特/秒 (bps) 单位来表示。例如，Wi-Fi 速度测试可能会产生 60 Mbps 的上行带宽和 80 Mbps 的下行带宽。

TXOP EDR 分析的一个推论是，发送数据时数据带宽不能超过 TXOPs 的 EDR。实际上，上层协议开销以及第二层重传进一步减少了低于 EDR 的可用带宽。

此外，速度测试往往会高估信道的可用带宽。这样的测试涉及发送连续的全缓冲区流量，这允许网络驱动程序使用帧聚合来降低一定比例的 TXOP 开销，并提高特定流量的 EDR。

但在 VHD 网络中，速度测试只是一种特殊且不常见的负载类型。VHD 无线网络中的大多数正常流量由较小的事务性的、上层的数据包组成，他们的数据有效载荷很小，通常无法聚合。因此，对于这种类型的流量，信道的实际可用带宽更类似于刚才给出的足球比赛示例。

为什么有线带宽固定但无线带宽存在变化？

有线网络在带宽和时间之间有固定的关系。有线接口以众所周知的固定 PHY 速率发送：10 Gbps、1 Gbps、DS-3、T-1 等。此外，大多数有线网络拓扑是：

- 有效点对点 (例如，交换以太网和光纤链路)
- 全双工
- 由于缺乏竞争和直接的媒介感知 medium sensing，无冲突
- 不受外部干扰
- 通过在各层 (接入、汇聚或核心) 的设备聚合来提供服务，相比较于任何单个接口，使用非常高的背板带宽。

因此，不管测试是运行 1 秒还是 60 秒，任何给定速度测试的数据带宽基本上等于物理链路速度。在两台带有千兆以太网接口的笔记本电脑之间的 iPerf 测试中应该产生略低于 1 Gbps 的带宽。当然，限制因素是每台机器的 CPU 利用率。

相比之下，Wi-Fi 在以下几个重要方面与有线网络不同：

- 无线电信道是集线器，而不是交换机，在能听到/解码到另外一个无线传输的所有终端之间共享
- 在同一 RF 射频冲突域中，一次只能有一个用户发送数据，其他的用户只能等待
- 冲突是不能被直接检测和感知的，所以一定要使用一种先听后说的方式 (也就是具有冲突避免机制的做法)，这样会消耗更多的空口时间 (降低了系统容量)。
- 控制信道的协议开销减少了可用容量，此协议开销会随着负载和外部干扰而变化。

- 任何单个数据帧有效载荷的数据速率可以变化超过 2 个数量级，这个是基于令人眼花缭乱的标准数组 (例如，从 6 Mbps 到 1.3 Gbps)。
- 给定客户端的最大数据速率因其硬件能力而有很大差异。(主要是它的 Wi-Fi 协议标准和空间流的数量)。
- 所有的传输必须被确认，否则它们将被认定为失败。Ack 以非常低的数据速率发送，这降低了整个信道的效率。

结果是，从一个简单的速度测试结果中完全不可能知道测试的实际环境是什么。例如，这里有四种可能的场景，可以在 Wi-Fi 上产生 100 Mbps 的速度测试：

- **挺好的：** 1 空间流 802.11n 智能手机在 HT40 信道中 (最大 PHY 速率为 150Mbps)
- **平均：** 2 空间流 802.11ac 平板电脑在 VHT20 信道中(最大 PHY 速率为 173.3Mbps)
- **差：** 2 空间流 802.11n 笔记本电脑在 HT40 信道中(最大 PHY 速率为 300Mbps)，有来自附近 APs 的同信道干扰
- **糟透了：** 3 空间流 802.11ac 笔记本电脑在 VHT80 信道中 (最大 PHY 速率为 1.3Gbps)，有显著干扰

当您与其他人一起工作时，请使用这些示例来解释 Wi-Fi 性能的某些独特动态。

总结

本章有两个主要目标：

- 让你的眼睛看到大量进入无线电通讯的非生产性开销
- 关于如何将空口时间用于您负责的 VHD 环境，让你足够担心到完全的偏执

提高 VHD 容量的最重要策略是最大限度地利用每个信道上的空口时间。

此外，上述的讨论旨在创建或增强您对 VHD 区域中的 Wi-Fi 运维方面的认识：

- 802.11ac 空中传输的基本结构
- 在空口事务期间，时间是如何被消耗的？
- 发送基本数据包所需的大量开销
- 需要避免**所有**不必要的 TXOPs (比如使用帧聚合等) 和相关的开销
- 需要最大限度地提高数据帧有效载荷的数据速率
- 提高 802.11 控制帧的速率以减少繁忙时间的影响
- 空口时间与实际吞吐量之间的关系

这些例子有意忽略了帧聚合，MPDU 聚合（经过 MAC 层后的帧聚合，具有不同的 MAC 地址头）可以帮助以另一种方式提升效率。不幸的是，在 VHD 环境中，发送的绝大多数帧都是小的单一 TCP 数据包交换，只能在某些时候进行聚合。实际上，帧聚合技术只对视频会话和速度打流测试有效果。

参考书目

Westcott, David A., David D. Coleman, Ben Miller, and Peter Mackenzie. CWAP Official Study Guide. Sybex, 2011. Available online at <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd0470769033,miniSiteCd-SYBEX.html>.

Perahia, Eldad and Robert Stacey. Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac. Cambridge University Press, 2013.

Gast, Matthew. 802.11ac: A Survival Guide. O'Reilly Media, 2013. Available online at <http://shop.oreilly.com/product/0636920027768.do>.

第 4 章：Wi-Fi 信道如何在高负载下工作

现在您已经对单个传输机会 (TXOPs) 的空口时间有了深入的了解，请考虑当数百台设备尝试同时使用它时，整个信道的性能如何？

本章解决的关键问题是：为什么 802.11 信道的总容量会随着尝试使用它的终端站点数量的增加而减少？

在 2010 版的 VRD 中，Aruba 发表了一项研究，表明多达 50 台设备加入到测试时，802.11 信道的总吞吐量下降。从那时起，其他主要的 WLAN 供应商也报告了类似的发现。

对于这个版本，Aruba 开始将测试平台大小增加到 100 个并发设备。我们决定探索不同数量空间流的影响。我们还设定了一个目标来解释这种影响的潜在机制。

为了实现这些目标，我们建立了一个包含 300 个 802.11ac 设备的 VHD 测试实验室。测试实验室有三个池，每个池有 100 个设备。一个池是 1 个空间流的智能手机，另一个池是 2 个空间流的笔记本电脑，第三个池是 3 个空间流的笔记本电脑。有了这些测试设备，我们可以研究各种各样的设备组合，以回答有关 VHD 性能的重要问题。有关测试平台的详细信息，请参见附录：Aruba 极高密度测试平台。

在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量中提出的 TST 容量规划公式中的三个重要的变量之一是平均信道带宽。作为 WLAN 架构师，您在 VHD 设计中的职责之一是为该术语选择合适的值。但是如果您选择的带宽值本身取决于负载，您如何决定呢？我们进行研究和编写本章的目的是让您清楚地了解该信道中正在发生的事情，以便您能够成功地将该方法应用到自己的部署中。

信道容量与客户端数量成反比

在高密度环境中，控制 Wi-Fi 信道性能的最重要现象之一是容量随着终端负载的增加而降低的。

例如，图 T4-1 显示 VHT20 信道中，1SS 电话、2SS 笔记本电脑和 3SS 笔记本电脑的 100 台终端站点测试结果。在此图表中，横轴是测试中的终端站点 STAs 总数，请注意，随着终端站点 STAs 总数量从 1 增加到 100 时，总吞吐量从左到右在下降。你可能还记得在《超高密度 802.11ac 网络规划指南》中的第 P-3 章：射频设计和《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量和第 EC-3 章：空口时间管理中，看到类似的测试结果。

提醒一下，VHT20 信道中的 PHY 峰值速率对于 1SS 设备为 86.7 Mbps，对于 2SS 设

备为 173.3 Mbps，对于 3SS 设备为 288.9 Mbps。

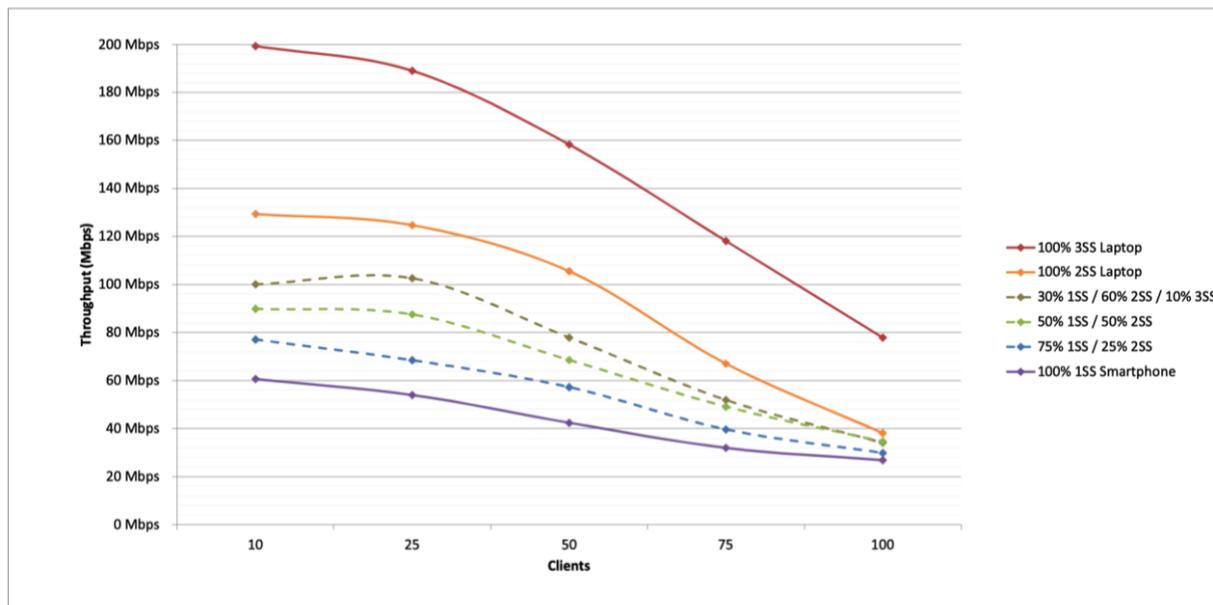


图 T4-1 信道总容量随着客户端数量的增加而减少 (AP-225、VHT20、TCP 双向)

此行为是 802.11 的基本特性，您将看到来自每个 WLAN 供应商、每个客户端供应商以及每个信道宽度的这种类型的曲线。该特性适用于 802.11a、802.11n 和 802.11ac。正如你从图 T4-1 中可以看出，对于多输入、多输出 (MU-MIMO)，不管空间流的数量如何，都是如此。如果你收集了 50 个或更多的终端站点进行测试，你可以在自己的实验室中复现这个结果。

这对你来说可能都并不奇怪 (尽管超过 50 个终端站点 STAs 的数量可能会引起人们的惊讶)。直觉上，我们知道 Wi-Fi 是一种容易发生冲突的共享媒介。更多的用户意味着每个终端站点获得更少的空口时间。因此，我们可以合理地预期，与 5 或 10 个终端站点相比，100 个终端站点的总吞吐量会更低。

或者是吗？冲突的假设经得起仔细推敲吗？

- 为什么简单地将“馅饼”切片成更多的部分，会使整个馅饼的大小尺寸收缩近 60%？
- 为什么在具有单个 BSS 和井然有序 (well-ordered) 的信道的干净测试环境中会有更高的冲突？
- 为什么 3SS 笔记本电脑的吞吐量下降和 1SS 智能手机如此相似，即使它可以在相同的空口时间内移动 3 倍的数据？

如果冲突不是这种情况的主要原因，那么又是什么其他原因呢？我们可以做些什么来措施或限制这种影响，以恢复一些损失的容量吗？这些问题都将在本章中得到解答。

定义竞争开销 (Contention Premium)

为了开始我们的分析，我们需要一种方法，将不同类型测试的结果来实现标准化。不同的信道带宽和不同的空间流计数产生非常不同的绝对吞吐量数据。不同年代的设备也是如此。

Aruba 发现一种很好的比较方法，是以百分比为基础重新绘制客户端扩展测试结果，并将测试的单终端站点吞吐量值为 100%。然后，测试运行中的每个其他数据点，竞争开销占单终端站点吞吐量的百分比。如果我们使用图 T4-1 中所示的三种不同类型客户端的结果来执行此操作，我们就可以了解下降的规模，图 T4-2 以百分比格式显示该竞争开销。

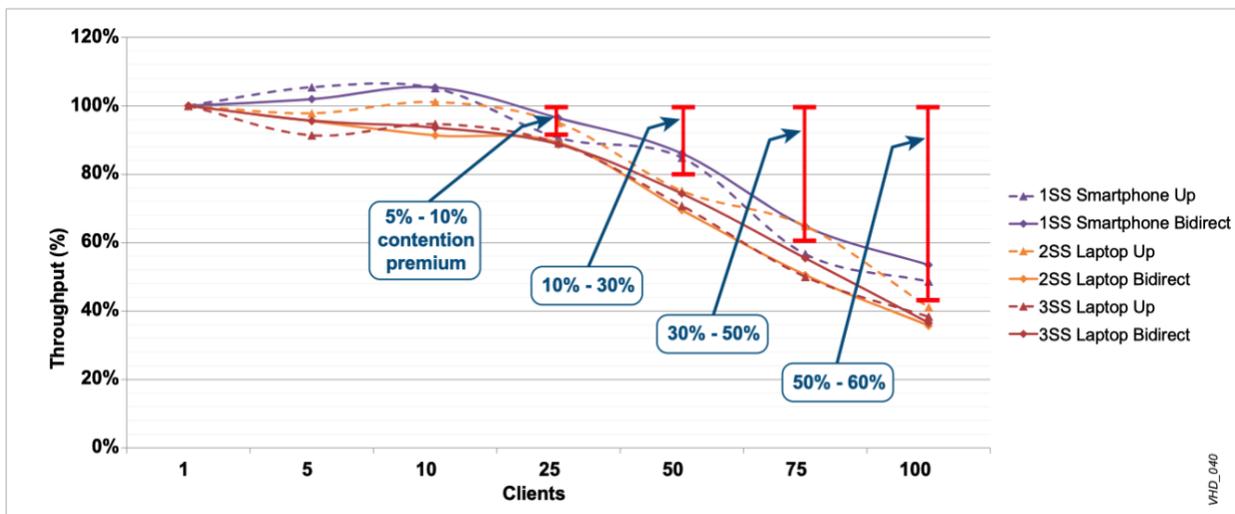


图 T4-2 竞争开销占一个终端站点吞吐量的百分比

Aruba 定义术语“竞争开销”表示一个终端站点的总吞吐量与多个终端站点的总吞吐量之间的差额。对于图 T4-2 中显示的测试，竞争开销从 25 个终端站点的平均约 10% 增加到了 100 个终端站点的约 60%。虽然我们看到了不同客户端之间的运行变化，但是总体趋势的一致性是非常明显的。

竞争开销的解释

对于竞争开销的现象，至少有四种可能的解释，它们是：

- 冲突和重传
- 下行速率自适应的增加
- TCP 窗口 (TCP windowing)
- MAC 层帧和空口时间的消耗

在任何无线局域网中这四种可能都存在，我们想确定其中的任何一个是否是主要原因。

为了弄清楚到底发生了什么，我们必须研究这些测试中的捕获数据包。Aruba VHD 测试平台是为无线和有线数据包捕获而设计的，请参见附录：Aruba 超高密度测试平台，了解如何做到这一点的更多信息。在研究捕获的数据包后，我们发现在信道中发生的事情与人们预期的大不相同。

冲突和重传不是原因

首先我们处理冲突假说，捕获的数据包证明了损坏和冲突不是竞争开销的重要因素。它们当然会出现，但数量不足以在实验室环境中产生效果。（在现实世界的网络中，冲突和重传是一个主要因素，且会加剧实验室记录的结果。）

我们处理了来自具有相似客户端数量的测试数据，并分析了重传量。表明重传是由 802.11 MAC 标头中的一块（a bit）。图 T4-3 显示，来自 2SS 笔记本电脑的上行测试的数据包的重试状态的分解，类似于图 T4-1 所示。

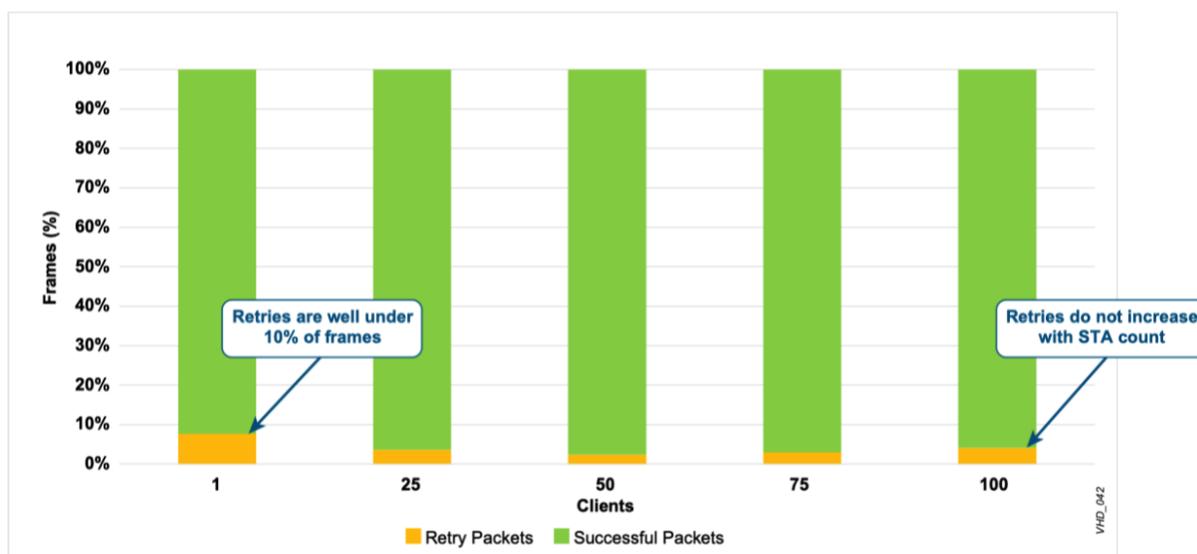


图 T4-3 使用 100 终端扩展测试的重传率比较 (AP-225, 20-MHz 信道, TCP Up)

此测试是用 100 个 2SS MacBook Airs (MBAs) 来完成的，它在 20 MHz 信道中向 Aruba AP-225 3SS 802.11 接入点上行发送全缓冲 TCP 流量。在所有 100 个终端一起测试中，我们看到重传次数仍然是低于 10%。特别重要的是，当终端站点 STAs 被添加到测试中时，重传率不会增加。图 T4-3 是我们在所有流量方向和信道宽度上发现的典型代表。对于 1SS 和 3SS 终端站点，我们也看到了相同的结果。

下行速率的自适应不是原因

当帧发送后未收到确认帧时，大多数 Wi-Fi 速率自适应算法会降低用于后续重试的调制和编码方案 (MCS)。如果数据包在 MCS7 出现故障，无线电 Radio 会在 MCS6 再次尝试，然后是 MCS5 等，相信客户端可能需要较低的 SNR 或更稳健的调制来恢复数据包。大多数无线电驱动程序在仅一次或两次重传后进行速率自适应。

在速率下降后，通常会在一段时间内保持下来，以便与该客户端进行通信。无线电会周期性地尝试以更高的速率来探测条件是否有所改善。与此同时，所有与该终端站点 STA 的通讯都变慢了，就像在高速公路上有一个慢车司机把车开到你前面一样。

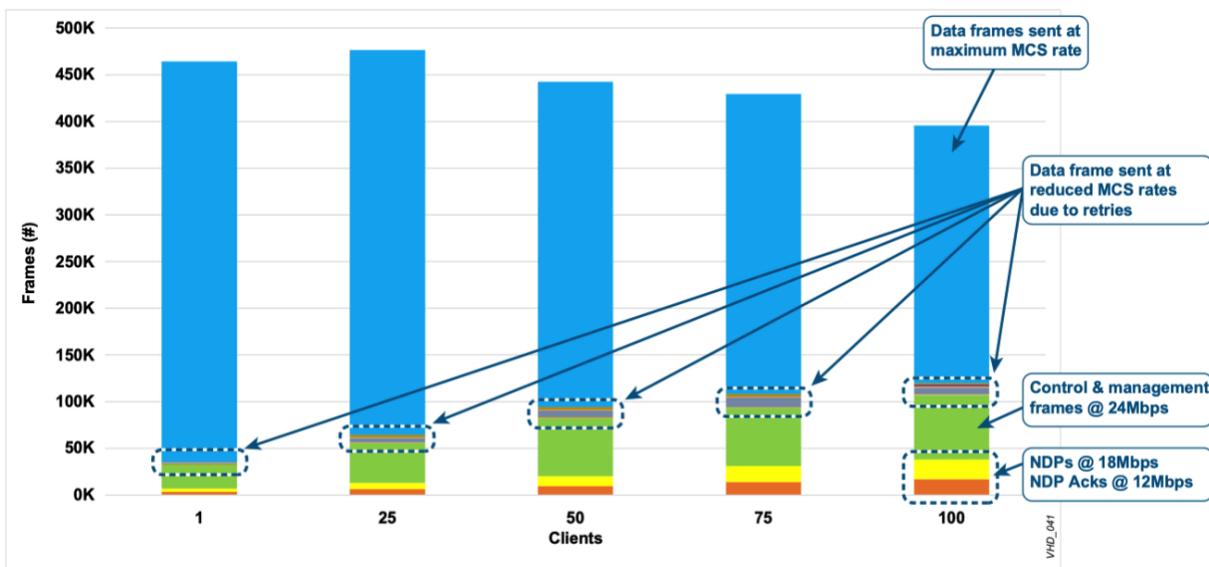


图 T4-4 扩展测试中的数据速率分布 (AP-225, 20-MHz 信道, TCP Up)

我们已经确定，重传的的总体水平非常低，并且不会随着终端站点的增加而增长。因此，你不会期望看到不寻常的重传水平。图 T4-4 基本上证实了这一预期。

该图是通过使用抓包软件来计算测试期间发送的所有帧的数据速率分布而生成。在每次测试中都有一定数量的下行速率自适应，这被认为是正常的，即发送帧的百分比。然而，绝大多数数据帧以测试中的 2SS 客户端可用的最大 MCS 速率而运行。

回想一下，我们的服务集标识符 (SSID) 配置使用了 24 Mbps 的控制帧速率 (basic rate)。图 T4-4 中显示了 18 Mbps 和 12 Mbps 速率下的大量流量，此流量没有降低控制帧，相反，它是携带省电状态信令的 NDP 帧，以 18 Mbps 的速率发送，并以下一个最低速率来发送最终的 NDP ACK 确认。

排除 TCP 窗口

具有深厚 TCP 协议经验的精明工程师可能会立即怀疑某种类型的窗口限制。特别是因为最大 TCP 窗口大小是由操作系统控制的，即使在 2015 年，它们仍然是不合理的低！截至撰写之日，Windows 默认 TCP 窗口仍保持 65 KB，而 MacOS 仅仅为 128 KB。

然而，第 4 层协议与竞争开销无关。您可以轻松通过运行 UDP 测试来验证这个结论，并查看吞吐量下降的程度是否与此大致相同。

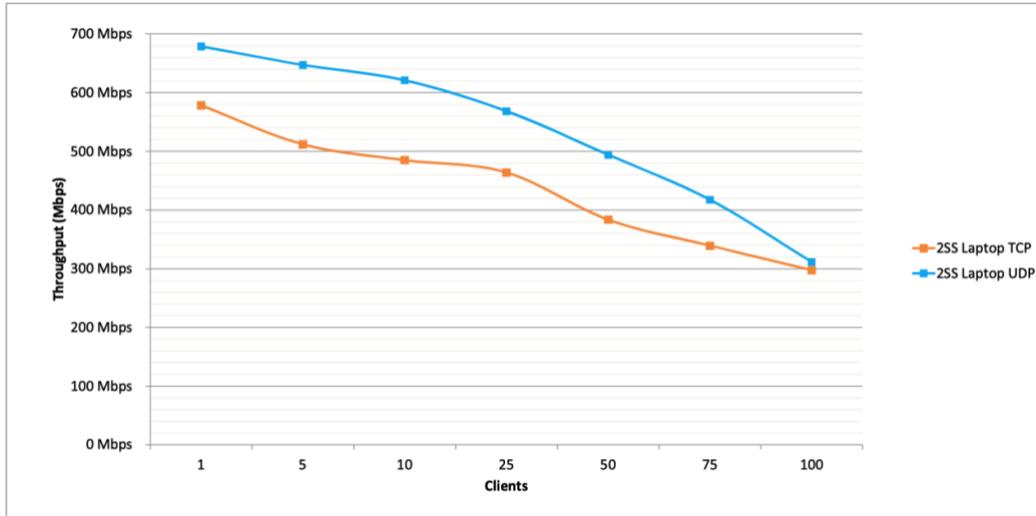


图 T4-5 VHT80 信道下 UDP 与 TCP 吞吐量测试 (最大关联速率 866Mbps)

图 T4-5 显示了使用相同 100 个 MBAs (苹果的 Macbook 笔记本) 的 80MHz 频宽下的测试。TCP 运行显示为橙色，UDP 运行显示为蓝色。如您所见，在大部分范围内，UDP 比 TCP 快 10-20%，但它仍然受到竞争开销的影响 (但较小)。在 100 个终端站点 STAs 下，TCP 和 UDP 线路收敛，这也意味着使用 UDP 流量时，竞争开销效应可能会随着更多的终端站点数量而加速。

控制帧增长是关键因素

排除了前面列出的四种可能的解释中的三种，让我们来分析一下 802.11 MAC 层在这些测试中的表现。我们的测试表明，竞争开销的最直接的原因就是 802.11 控制帧数量的显著增加。图 T4-6 中显示相同系列 AP-225 测试的帧类型分布，该测试在图 T4-1 中所示。

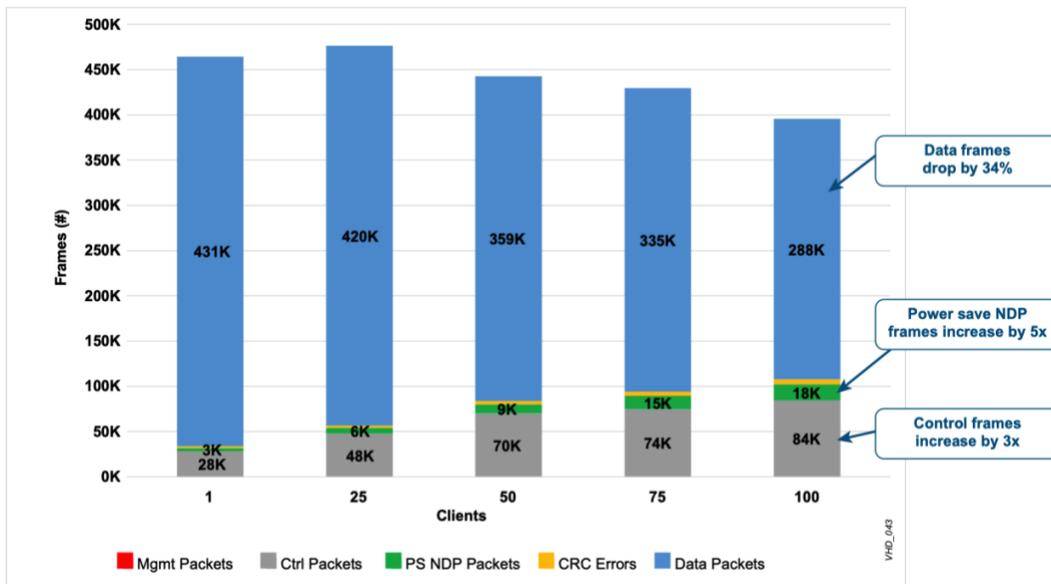


图 T4-6 802.11 控制帧的增加 (AP-225, 20 MHz 信道, TCP Up)

在 100 个 MBA 和 802.11ac AP-225 的情况下，我们观察到数据帧的总量减少了 33%，即从一个终端下的 431000 到 100 个终端下的 288000。同时，802.11 控制帧数量从 28000（1 个终端下）增加到 84000（100 个终端下）以上，增加了 3 倍。

我们还观察到，空数据包 (NDP-null data packet) 的省电 (PS) 信令流量增加了 5 倍，从 3000 增加到 18000 以上。NDPs 在技术上是 802.11 数据帧（采用的协商速率 speed 来传输，抓包类型看仍然是数据帧，并不是控制帧），然而在功能上它们却扮演了 802.11 控制帧来告知 AP，以通知当前的终端站点 STA 正在进入或退出省电状态，该信令进而调节 PS STA 的业务流。

分析

这些帧类型分布直接解释了客户端扩展测试中，随着终端站点 STA 计数的增加而造成的整体吞吐量损失。高速率的数据帧数量在减少，同时低速率的控制帧数量在增加，只能有一个结果：相对吞吐量显著下降。

Aruba 在 802.11n 和 802.11ac 以及三种信道宽度中都测量到了相同现象。我们也使用完全不同制造商的 AP 和客户端无线电进行了相关测量，结果仍然是一样的，这一事实有力地证明了竞争开销效应是 802.11 的基本特性。

但是，尽管帧类型分布解释了吞吐量损失，但它们并没有告诉我们底层机制是什么。它们也不足以证明因果关系。换句话说，数据帧是否由于控制帧增加，节电活动或其他原因而减少？为此，我们必须继续进一步爬下兔子洞。

平均帧大小随负载而减小

我们可以研究数据包的大小分布，并进一步按类型分解数据帧，数据帧数量的减少是吞吐量下降的直接原因，交叉检验这一结论。以两种方式分解表示：左边是帧的绝对数量，右边是帧总数的百分，两个视图都包含重要信息。

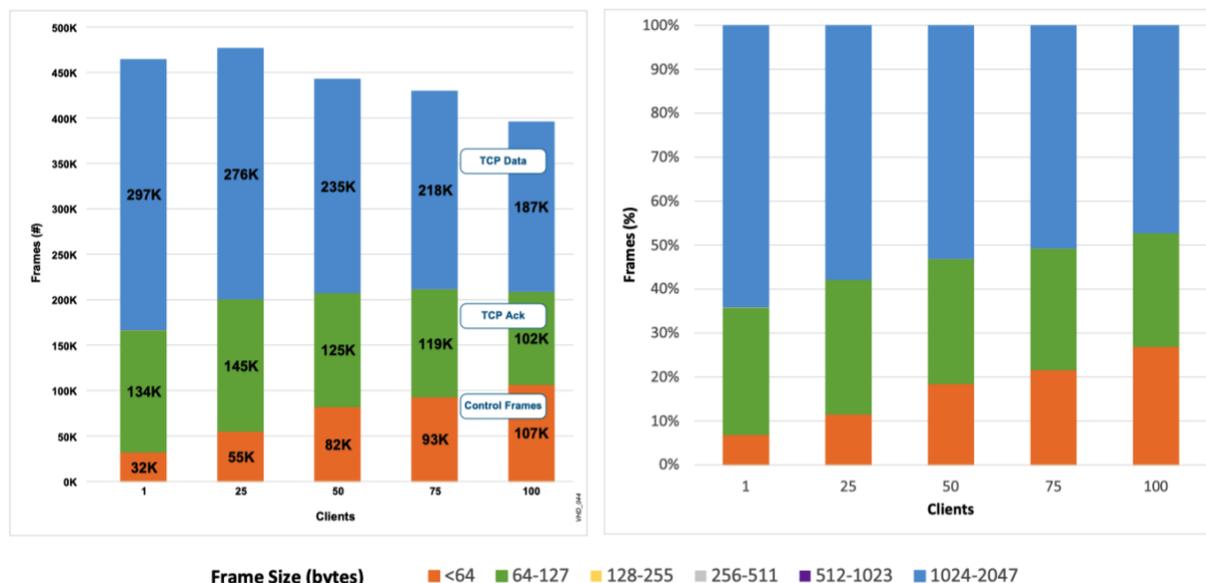


图 T4-7 平均帧大小的减少 (AP-225, 20-MHz 信道, TCP Up)

在本演示中，我们现在可以看到图 T4-6 中蓝色条显示的数据包可以进一步分解成非常大和非常小的帧。这些帧是 IxChariot 发送的 1500 字节全缓冲区 TCP MPDU，随后是对这些有效载荷的 90 字节 TCP 确认，通过检查跟踪中的实际数据包，证实了这一结论。

在左边，我们看到，在绝对的基础上，数据帧下降甚至比在图 T4-6 中看到的更具实质性。从新的图表中可以清楚地看出，尽管有效载荷和确认帧都在下降，但有效载荷帧下降得更快。有效载荷从 1 个 STA 到 100 个 STAs 下降了超过 40%，相比之下，所有数据帧总体下降 33%，确认帧仅仅只下降了 23%。

在右边，有趣的是看到有效载荷帧从 1 个 STA 的总数的大约 62% 下降到 100 个 STA 的 49%。但是从小数据帧中可以得出一个更重要的结论，在 100 个 STA 测试期间，小数据帧占有所有发送帧的 51% 以上。

在第 3 章：了解空口时间，您了解了发送小帧的巨大空口时间成本。既然您已经学会了“看”时间，请带着这个概念再看看图 T4-7。想想图中隐含的前导码和帧间间隔。小数据帧和小控制帧的相对空口时间效率极差。使用空口时间计算器工具，您可以计算出有效载荷帧占用的时间小于总空口时间的 4%。虽然从绝对帧数的角度来看，这张图表看起来很糟糕，但是如果你根据空口时间重新绘制它，它会看起来更糟。

分析

总而言之，帧大小的分布情况强化了一个结论，就是整体吞吐量的下降直接归因于网络上发送的数据有效载荷帧的总数量减少了，帧大小分布情况虽然不能证明因果关系，然而，图 T4-7 强烈暗示了整体吞吐量的下降是由于控制帧增长的副作用。

控制帧增长的原因

这儿有九种不同的 802.11 控制帧类型，所以必须深入研究图 T4-6 中的控制帧组成，就像我们对数据帧所做的一样。来自该测试的控制帧分布的情况显示在图 T4-8 中。如前所述，出于分析的目的，我们将 PS NDP 和 NDP ack 帧都视为 802.11 个控制帧（但是抓包实际看，是数据帧）。

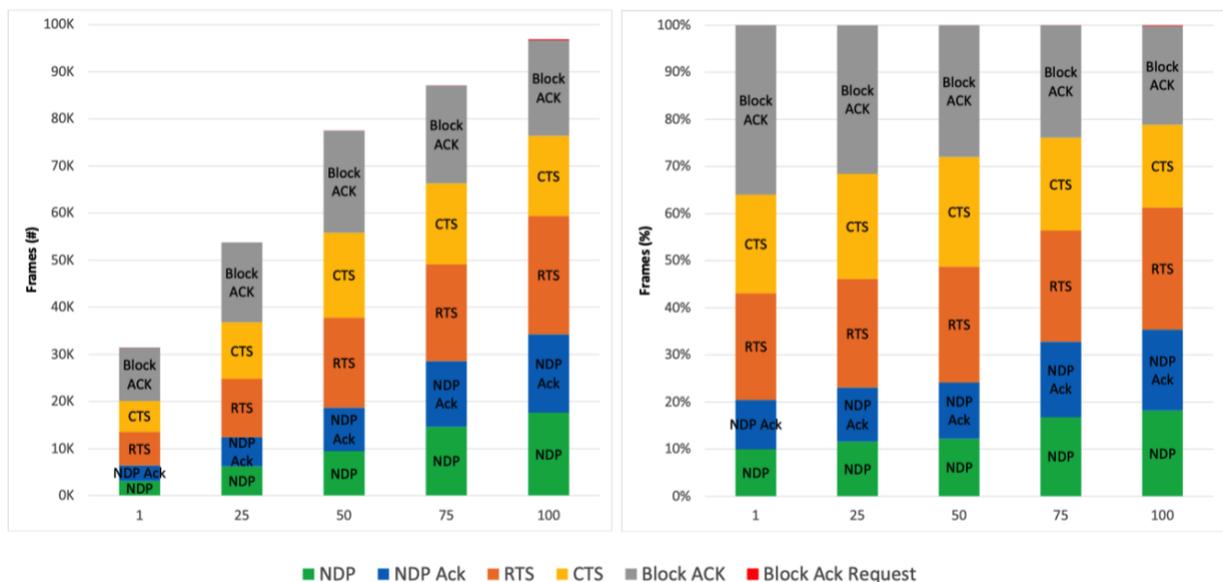


图 T4-8 802.11 控制帧类型的细分 (AP-225, 20-MHz 信道, TCP Up)

这张图表非常有趣。让我们查看详细信息：

- **仲裁增加 320%**：在所示的五种控制帧类型中，只有 RTS 和 NDP 需要完全仲裁，因为他们发起了传输。Clear-to-send (CTS)、Block ACK 和 ACK 之前都有一个 SIFS 时间。RTS + NDP 从 1 STA 的 10000 个组合帧，到 100 个 STA 的 42000 个组合帧，增加了 320%。
- **TXOP (单个传输机会) 增长**：RTS + CTS + BA 帧的总数量，从 1 个 STA 的 24000 帧到 100 个 STA 的 63000 帧，大约增加了 200%。你在第 2 章：“什么是“信道？””学过这些帧是 TXOP 的组件。它们的增长速度大致相同，这与将它们一起发送时的预期是一样的。这种增长意味着从左到右的 TXOPs 总数增加了 200%。在此测试中，考虑到 100 个不同的终端站点 STA 都试图发送全缓冲区的上行流量，此结果很有意义。
- **每个 TXOP 的数据帧比率降低 80%**：如果 RTS + CTS + BA 都是 TXOP 中的一部分，并且总数据帧的数量正在减少，那么这一定意味着每个 TXOP 中的平均数据帧数量 (例如，MPDU) 正

在减少。事实上，如果我们将 RTS 总数从这个图中除以图 T4-6 中的数据帧总数，我们就可以计算出它，在 1 个 STA 时，MPDU/TXOP 比率约为 60，在 100 个 STAs 时，比率约 11.5，整体下降了 80%。

- **NDP + Ack 增长**：PS-NDP (null data packet) 和 NDP ACK 帧是相关联的。NDP 是必须确认的一种数据帧形式。如果未收到 NDP ACK，将重新发送 NDP 帧。这些帧的总量从左到右，从 6400 到 34200，增长超过了 430%。
- **对于 TXOP，提高了节能传输 (Power Save Transitions) 的比率**：图 T4-8 的右侧显示 NDP 的增长率相对于 RTS 增长率的增加。从 1 个 STA 时 NDP + RTS 总量的 30% 增加到 100 个 STAs 时的 42% 以上。换句话说，PS 活动比 TXOPs 增长得更快。

分析

现在我们有足够的信息来理解因果关系。简单地说，这是我们认为正在发生的因果关系链：

- 在测试中随着终端数量的增加，A-MPDUs 的封装效率突然地下降 (例如，每个 STA 能够在每个 TXOP 中发送越来越少的 MPDU，即发送很少的数据帧)。
- 那么对于发送给定数量的有效载荷数据帧来说，此 drop 会增加所需的总体 TXOPs 数量。
- 每一个 TXOP 都需要一个完整的仲裁，因此获取信道而消耗的总空口时间就会线性地增加，正如 TXOP 总数的翻倍
- 每一个 TXOP 中的有效载荷帧所占用的空口时间部分也在下降，这也意味着每一个 TXOP 具有更少的传输效率。
- 同时，TXOP 的数量增加也驱动了 PS (Power Save) 数据帧活动数量的并行增加，因为每一个 STA 必须被更频繁地唤醒，从而发送越来越小的数据量。
- PS (Power Save) 数据帧 (这里也扮演了控制帧的功能) 的传输会损失额外的空口时间，因为每一个传输都需要完全仲裁，这个也进一步减少了 TXOP 的空口时间。

实际上，信道必须越来越努力地发送越来越少的数据。(译者注：可见信道虽然很繁忙，但是效率很低，不是在传输更多的数据帧，而是在传输更多的控制帧和 NDP 帧)，这些影响以非线性速率累积，它们解释了竞争开销。

MIMO 工作!

为了追求我们的目标，我们已经陷入了数据包捕获的细节，现在我们爬了回来，调查了整个场景的显著方面。

再看看图 T4-1，请注意，它展示了一些非常非凡的东西。也就是说，MIMO 工作并且工作得非常好。不仅如此，MIMO 工作与竞争媒体的终端站点数量无关。不同的信号确实可以在同一时间通过不同的路径来传输，并在接收器处成功地恢复。

为了帮助这一事实脱颖而出，我们使用了百分比技术来重新绘制数据。在这种情况下，我们将使用 3SS MacBook Pro (MBP) 进行标准化。对于下行、上行和双向，我们使用 MBP 测试结果作为 100% 参考值。然后我们划分 2SS 和 1SS 客户端，以获得 3SS 吞吐量的相对百分比。

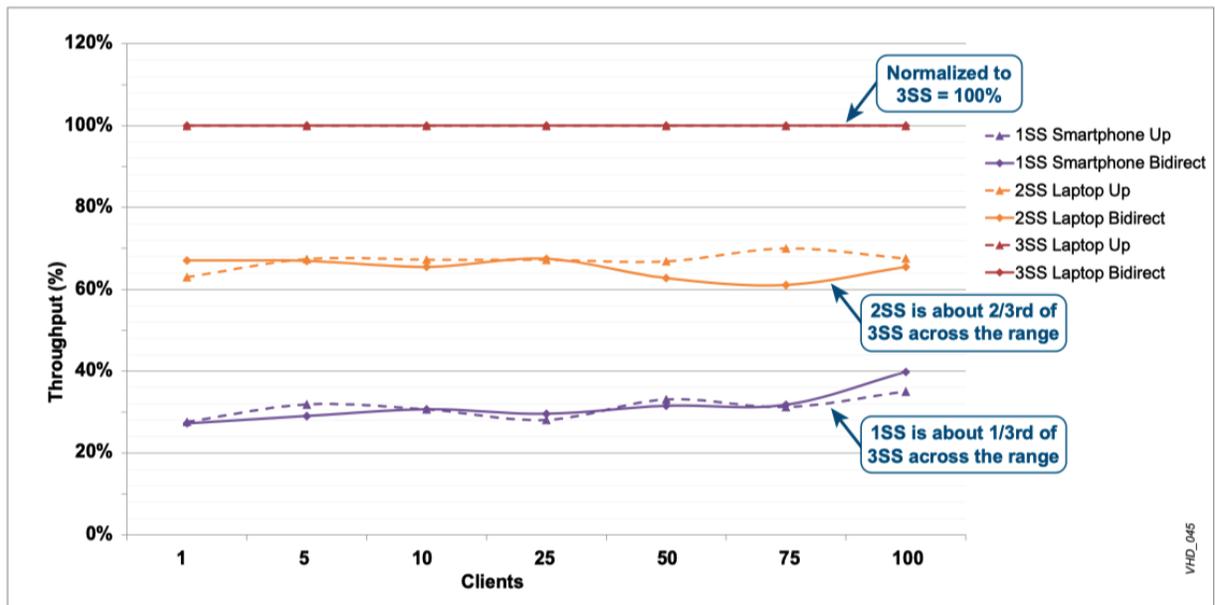


图 T4-9 1SS 和 2SS 对比 3SS 客户端的相对吞吐量

如果每个客户端完全达到其天线链数量的最大数据速率，那么 2SS 客户端应该获得 3SS 结果的约 3 分之 2。1SS 客户端应该获得 3SS 结果的约 3 分之 1，这些值正是我们发现的，意味着在繁重负载的信道中，跨越所有的终端数量，MIMO 是正常工作的。

看到广泛的负载范围内，MIMO 技术始终是持续的一致性，令人深感欣慰。这种一致性是特别重要的，因为 802.11ac wave2 和后代的许多最重要的利益规划都依赖于 MIMO 技术，即做它所宣传要做的的事情。

相反，这里也有一个警示故事，MIMO 是 VHD 环境下的一把双刃剑。MIMO 无线电专门设计用于恢复反射信号 (Bounced Signals)，如图 T4-9 所示，它们在这方面非常擅长。但是在 VHD 领域，我们通常不希望任何形式的反射，特别是在大型竞技场和室外体育场，需要精心选择外部天线。图 T4-9 有助于解释在这个 VRD 中反复提出的观点，即在大多数 VHD 环境中，射频空间复用即使不是不可能，但也是很难实现的。

每客户端吞吐量

我们以组为单位已经研究了大量设备的聚合信道吞吐量，那在单个设备级别上，吞吐量该如何转换呢？

如前所述，大多数购买 VHD 系统的客户是根据每个座位或每个设备的最小吞吐量来定义他们的需求。当需要视频或其他高比特率服务时，一些客户甚至试图根据合同来保证这些最小值。TST 方法试图提供一个可信的估计，该估计最终来源于《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量中的 Aruba VHD 测试平台数据，因此，本节简要回顾了这些数据。

图 T4-10 是图 T4-1 中聚合结果的另一个视图。从 10 个终端站点 STAs 开始，显示每种设备类型的平均每终端吞吐量。

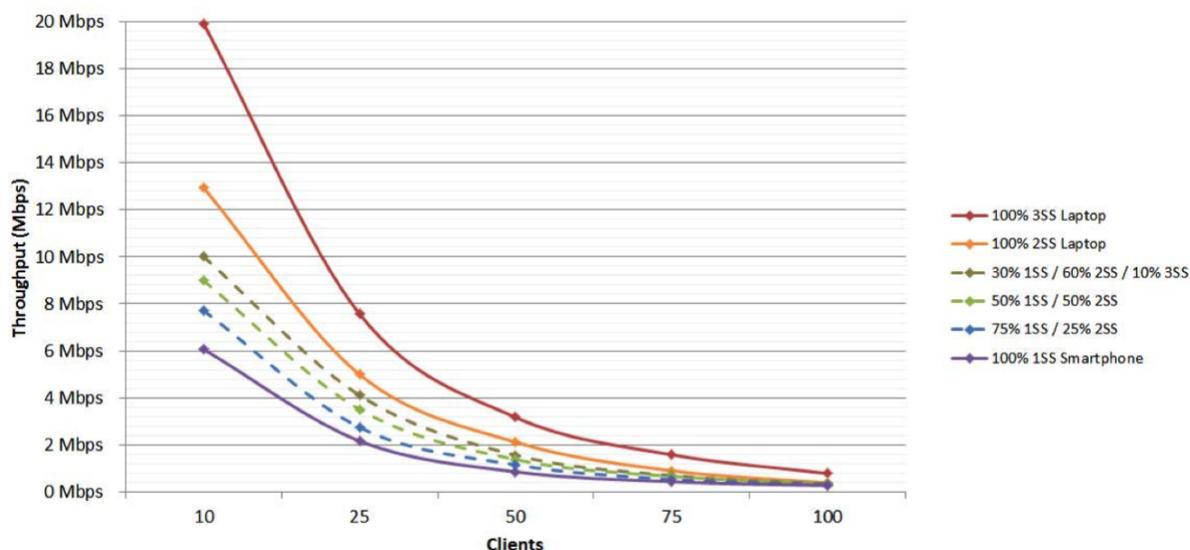


图 T4-10 平均每终端吞吐量 (AP-225、VHT20、TCP 双向)

该图表是通过获取每个数据点的总吞吐量并除以测试中的总设备数量来获得的。因此，曲线是平均值。有些设备实际上做得更好，有些做得更差。

以下是从图中可以得出的一些主要观点：

- 了解环境中预期的用户占比很重要。每设备的吞吐量随着负载的变化而变化很大，因此如果有 25 设备正在尝试使用信道，相比较于 100 个设备时，用户的体验是相当不同的。
- 设备的空间流能力非常重要。支持多流的客户端可以在良好的信道模型中体验到明显更高的吞吐量。
- 在 VHT20 信道中的同时并发 50 个设备时，大多数设备可实现平均 1 Mbps 乘以它们的空间流计数的吞吐量 (例如，1SS 为 1 Mbps，2SS 为 2 Mbps，3SS 为 3 Mbps，依此类推)。

- 当超过 50 个设备同时竞争时，是无法实现每个设备需要超过 1 Mbps 的 SLA（服务质量等级）。
- 在 VHT20 信道中同时并发 100 个设备时，测量的平均吞吐量级别为 kbps 每秒，1SS 的智能手机的速度不会超过 250 Kbps。
- Aruba AP 在高并发设备负载下是稳定的。在 100，200，甚至 255 个用户争夺同一个媒介时，你不应该担心可靠性问题。正如您在本章中所了解到的，在 AP 耗尽性能之前，信道资源已经先耗尽了容量。

同样，为了清晰起见，这些结果是在没有外部干扰和井然有序信道的实验室条件下获得的不受影响的值。在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量中的 TST 方法要求您根据预测的特定环境类型，对这些值应用一个减损因子。

第 5 章：了解 RF 射频冲突域

本理论指南以一种新的概念方法来思考 802.11 系统中的冲突域。我们将冲突域的物理边缘定义为接收到的信号 SINR(信号和干扰加噪声的比) 值低于解码 802.11 的二进制相移键控 (BPSK) 前导码所必需的 4 dB 阈值的点位 (也就是说冲突域的物理边缘远远大于信号蜂窝边缘, 空旷区域自由衰减下, 大概是 250m 左右)。第 3 章: 了解空口时间和第 4 章: Wi-Fi 信道如何在高负载下工作, 然后从空口时间和第 7 层吞吐量的角度来详细描述了冲突域内的结构和运行。我们回到冲突域来完成本指南, 特别是在物理意义上, 它们是如何在无线电水平上定义的。

在最大限度地提高空口时间使用效率后, 增加总空口时间的下一个最佳策略是实现空间复用。如果两个或三个设备可以同时使用相同信道的射频频谱, 您就可以将可用的空口时间增加两到三倍。这种增加反过来又产生了整个系统总容量的等效增加。

本章回答的基本问题是: 创建真正独立的冲突域的隔离要求是什么? 要实现射频空间复用, 冲突域必须在时间上独立, 在前导码检测 (preamble detection) 上独立, 在能量检测 (energy detection) 上独立。

我们已经反复声明, 由于同频干扰 (CCI: Co-Channel Interference), 在超高密度 (VHD) 区域的实践中, 射频空间复用是非常难以实现的。要理解如何降低同频干扰 CCI 和邻频干扰 ACI, 您必须首先了解它们降低性能的机制。

如何完成 802.11 空闲信道的评估

当 802.11 终端站点有数据要发送并开始进入仲裁过程时, 它首先使用空闲信道评估 (CCA- Clear Channel Assessment) 机制来确定信道当前是否空闲。

与以太网不同, 可以被物理检测到冲突, 当两个或更多帧在空中冲突时, 它们不会留下任何证据。802.11 采用由两部分组成的解决方案来解决这个问题。虚拟载波侦听和物理载波侦听必须在 802.11 终端发起增强分布式信道访问 (EDCA-Enhanced Distributed Channel Access) 竞争窗口进程之前报告空闲信道。

- **物理载波监听:** 对于空闲的信道, 无线电必须报告没有探测到高于已定义阈值的能量(ED)。不管任何无线电传输类型, Wi-Fi 的或非 Wi-Fi 的, 都可以被检测到。根据 802.11ac 标准, 对于 20 MHz 信道宽度, 能量检测 (ED) 阈值为 -62 dBm。对于信道宽度每加倍, 该阈值增加 3 dB (40Mhz: -59dBm, 80Mhz: -56dBm)。
- **虚拟载波侦听:** 对于空闲的信道, 网络分配向量 (NAV- Network Allocation Vector) 必须为零。NAV 本质上是一个计时器, 总是在倒计时的。只要 NAV 大于零, 虚拟载波侦听就知道

媒介是繁忙的。当任何 Wi-Fi 终端解码到具有有效的第 1 层或第 2 层持续时间字段的帧时，它会将 NAV 设置为该值。

第 1 层持续时间：每个 802.11 传统前导码中的 L-SIG 字段包括一个长度字段，告诉其他终端站点当前帧将在空中占用多长的空口时间。PD 前导码检测阈值比 ED 能量检测阈值低 20 dB。

第 2 层持续时间：准备发送/确认发送 (RTS/CTS) 帧都是开始于每一个 TXOPs，数据传输机会 (TXOP) 包括一个持续时间字段，它是标示包括所有子帧和确认帧的整个 TXOPs 的总预期长度。

不幸的是，通过设计，虚拟载波侦听适用于任何终端站点可以解码的每一帧。根据 802.11 标准，802.11ac 传输的检测下限如表 T5-1 所示。

表 T5-1 802.11 空闲信道评估的最低检测值

Channel Width	Preamble Detect Threshold (Primary Channel)	Preamble Detect Threshold (Secondary Channel)	Energy Detect Threshold
20 MHz	-82 dBm	-72 dBm	-62 dBm
40 MHz	-79 dBm	-72 dBm	-59 dBm
80 MHz	-76 dBm	-69 dBm	-56 dBm
160 MHz	-73 dBm	n/a	n/a

然而，在 PD 前导码检测的主要信道下，虽然标准只需要 -82 dBm，但在实践中，现代无线电在这方面有了很大的改进。例如，Aruba 经济型 802.11ac AP-205 具有 -93 dBm 的传统 OFDM BPSK 的接收灵敏度，考虑到每 6 dB 的功率对应于自由空间中的距离加倍，与标准要求的 -82dBm 相比，这 11dB 的改进相当于 PD 干扰半径增加了近 4 倍。

Aruba 建议仅在 VHD 区域使用 20 MHz 信道频宽，因此您不需要考虑 PD 或 ED 的辅助信道检测级别。

当 Wi-Fi 终端通过 EDCA 过程来计算用于仲裁的随机退避值时，他们不断地向 CCA 进行轮询，以检查改信道是否仍然空闲。如果 CCA 报告该信道已经忙碌，则终端站点被迫暂停其仲裁，直到 CCA 报告该信道再次空闲。

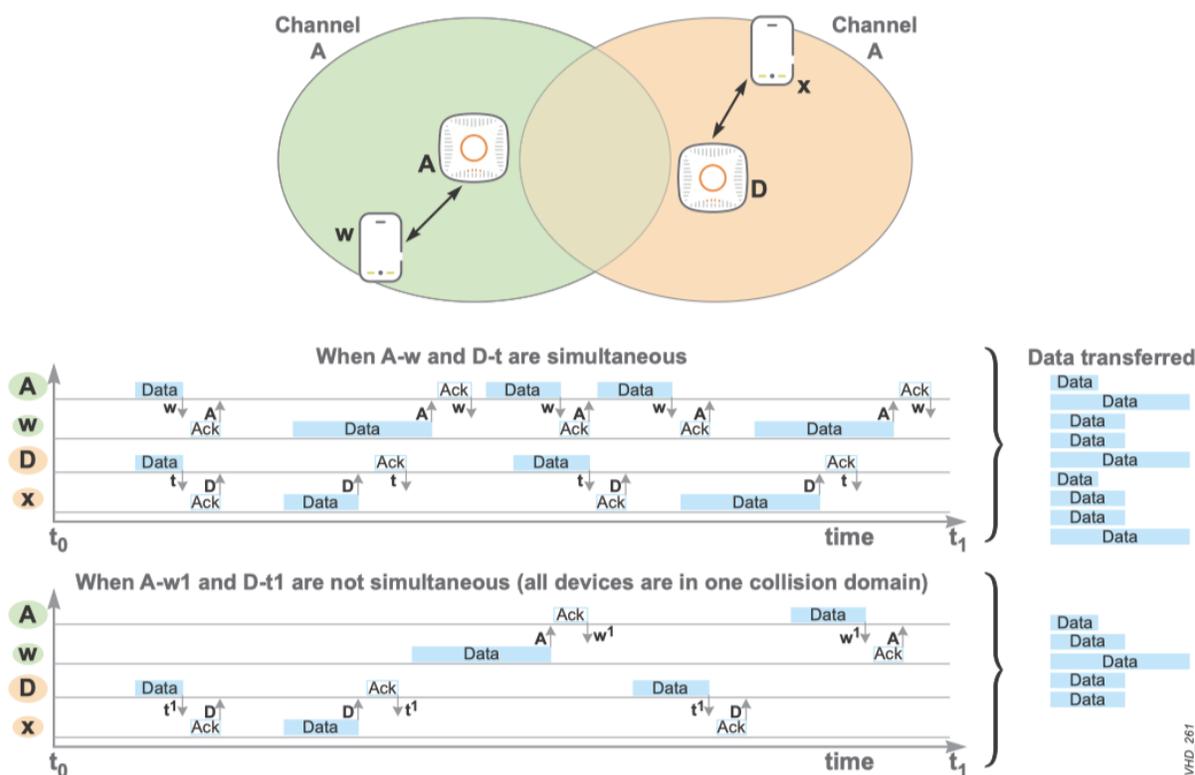
同频干扰如何降低 WLAN 性能

CCI（同频干扰）只是由于无线电检测到第 1 层或第 2 层持续时间字段的 NAV 而断言的。

CCI 对 VHD 领域的整体表现有巨大的负面影响，即使在 VHD 区域内部没有重复使用的信道时，影响也很大。因为这些相同的信道通常会被外部附近周边的 AP 重复使用。墙壁和地板可能会提供一些隔离，但即使是高度衰减的 802.11 传统前导码，也常常可以被现代网卡中日益敏感的无线电解码。

CCI 背后的重要概念是，在空中检测到 802.11 前导码的任何 Wi-Fi 设备都是被禁止发送或接收任何其他传输，直到该帧结束。发送和接收的终端是否是同一基本服务集 (BSS) 的一部分，这个并不重要。只要它们在同一个信道上，并且能够解码彼此帧之前的传统前导码，这种限制就存在。只要前导码中的 L-SIG 字段能够被成功恢复，帧的有效载荷部分是否被损坏也无关紧要。

如果两个设备想要在同一个时间同时传输数据，且它们是彼此充分隔离的，以至相互间对另外一个终端的传统前导码不能进行解码，那么他们是同时传输数据的。图 T5-1 显示了这两种情况以及其对总体容量的影响。



T5-1 有或没有 CCI 的两个无线蜂窝的行为

这种效果非常容易测量，对于任何 WLAN 架构师来说都是一个很棒的家庭实验室项目。在同一个信道上设置两颗 AP，每颗 AP 都有一个无线客户端。每次只在一颗 AP 上运行速度测试，然后一起运行两颗 APs。您会发现组合测试的总带宽与单独测试的带宽大致相同，但是已经在两颗 AP 上进行了分割。

邻频干扰如何降低 WLAN 性能

频谱波罩 (Spectral Mask) 可以让处于频谱域中的 802.11 传输在主信道带宽之外提供大量能量。在图 T5-2 中。虽然可以设计带有更精确滤波器的无线电，但对于典型的 Wi-Fi 产品来说，由此导致的成本和无线电物理尺寸的增加是无法接受的。

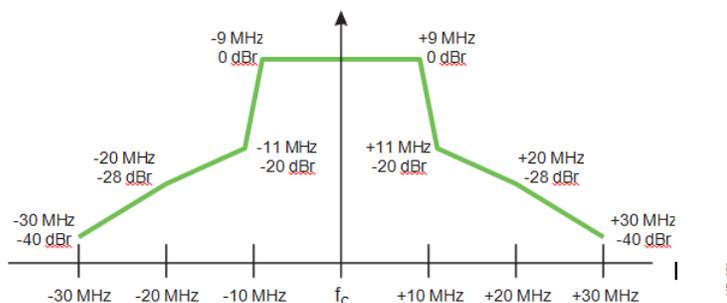


图 T5-2 20 MHz 频宽下的 802.11 频谱波罩

标称包络线 (Nominal Envelope) 外的能量如果足够强，可以直接阻塞两侧的信道，或者仅仅是引起噪声和增加误差。在大多数企业部署中，ACI (邻频干扰) 不是一个因素，因为相邻信道上的 APs 间隔至少 20 米 (65 英尺)，在 5 GHz 频段，该距离下的预期自由空间传播损耗至少为 80 dB，这提供了足够的隔离，以最大限度地减少或避免 ACI 的性能影响。

然而，在一个超高密度的 WLAN 中，多个相邻信道 AP 和用户设备之间的距离很近，Wi-Fi 信号以足够高的功率水平被接收到，从而导致 ED (能量检测) 机制断言 CCA (空闲信道评估) 繁忙。在这种情况下，相邻信道已有效地被认为同一冲突域的一部分。对于相邻的客户端，这个问题甚至更为严重，因为相邻的客户端比 AP 数量更多、分布更紧密。因此，在高密 WLAN 所需的密度下，所谓的“非重叠”5GHz 信道实际上可能是重叠的。

ACI 干扰示例

以图 T5-3 中的超高密 WLAN 为例，它有三对 AP 和客户端，每对 AP 和客户端都在相邻的 20 MHz 信道上。对 1 和对 3 传输重负荷循环流量，如视频流，所有六个站点都配置为使用最大等效全向辐射功率 (EIRP)。

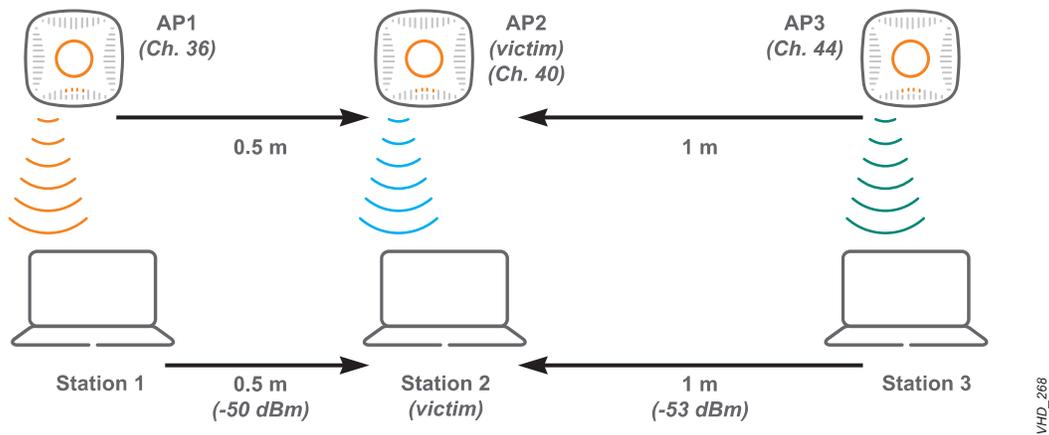


图 T5-3 APs 和客户端在短距离下的 ACI 示例

在信道 40 上的 AP2 和客户端 2 现在想要发送和执行 CCA，和对 1 的距离仅 0.5 米 (1.5 ft) 远，因此它们的传输被接收到的信号强度在 -50 dBm，但和来自对 3 的距离近 1 米 (3 ft) 并收到的信号强度在 -53 dBm，此时的 AP2 和客户端 2 都不允许发送数据，因为检测到的能量 ED 超过了 CCA 阈值，即使没有其他终端在使用信道 40，图 T5-4 显示传输波形的重叠。

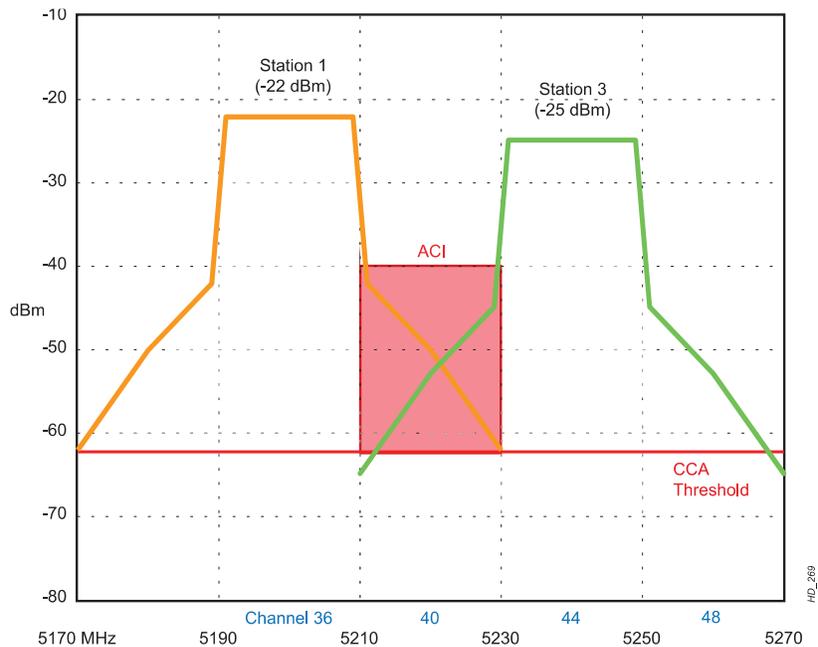


图 T5-4 短距离 ACI 的频域图示

特别是在具有多路径条件下的室内 VHD 区域，终端站点间自由空间传播损耗最小的区域，波形的边缘可以很容易达到 -70 dBm 或更高。

测量 ACI 的影响

为了量化这种影响，Aruba 在 VHD 实验室中测试了 ACI。我们将每组 100 个终端细分为每 25 个设备的象限，如图 T5-5 所示。在相邻信道 (100、104、108 和 112) 上配置了四颗 AP-225。AP 位于天花板上，相距约 3 米，每链上使用的最大 EIRP 为 +23 dBm。

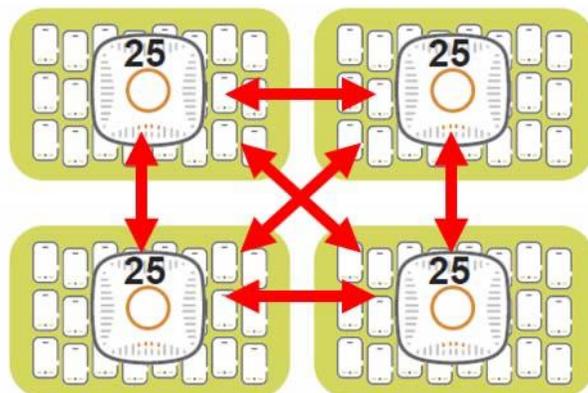


图 T5-5 ACI 测试平台布局

对于每种类型的客户端设备 (1SS 智能手机、2SS 笔记本电脑和 3SS 笔记本电脑)，我们分别测试了每个象限，并将结果相加。然后所有四个象限同时运行。图 T5-6 显示了智能手机的结果。

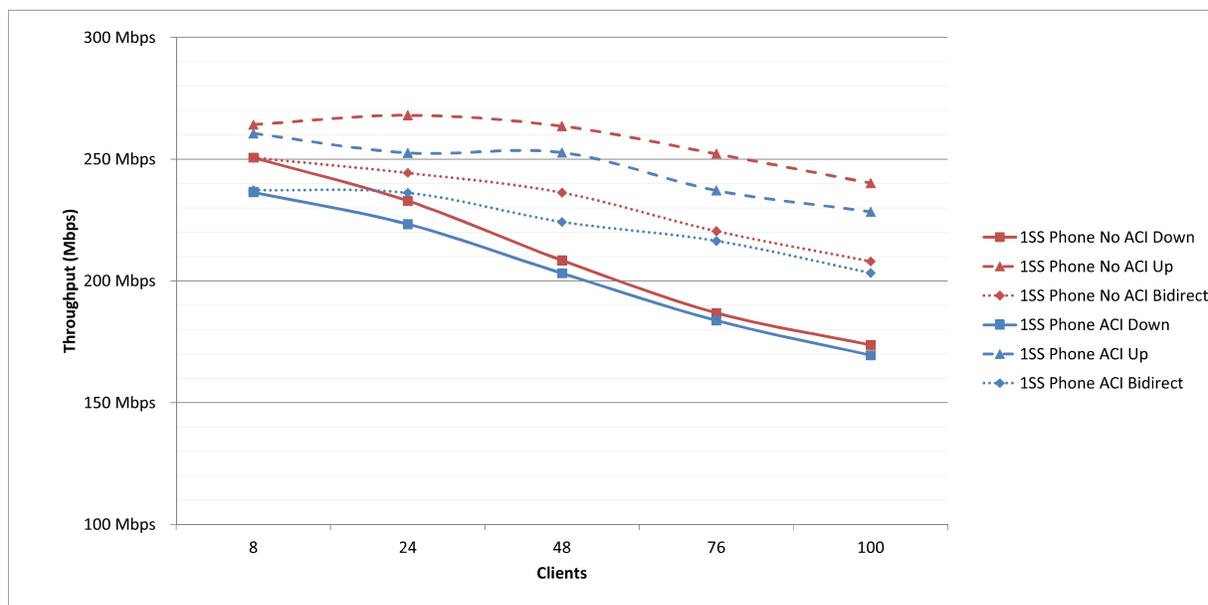


图 T5-6 1SS 802.11ac 智能手机的 ACI 测试结果 (AP-225, 80-MHz 信道)

对于 1SS 手机的 ACI 影响是相当真实的，在所有测试中都观察到衰减，范围为 2% 至 10%。上行的衰减是最明显的，表明各个象限在设备级别上的相互阻塞。这是有意义的，因为客户端设备要比 AP 紧凑的多。

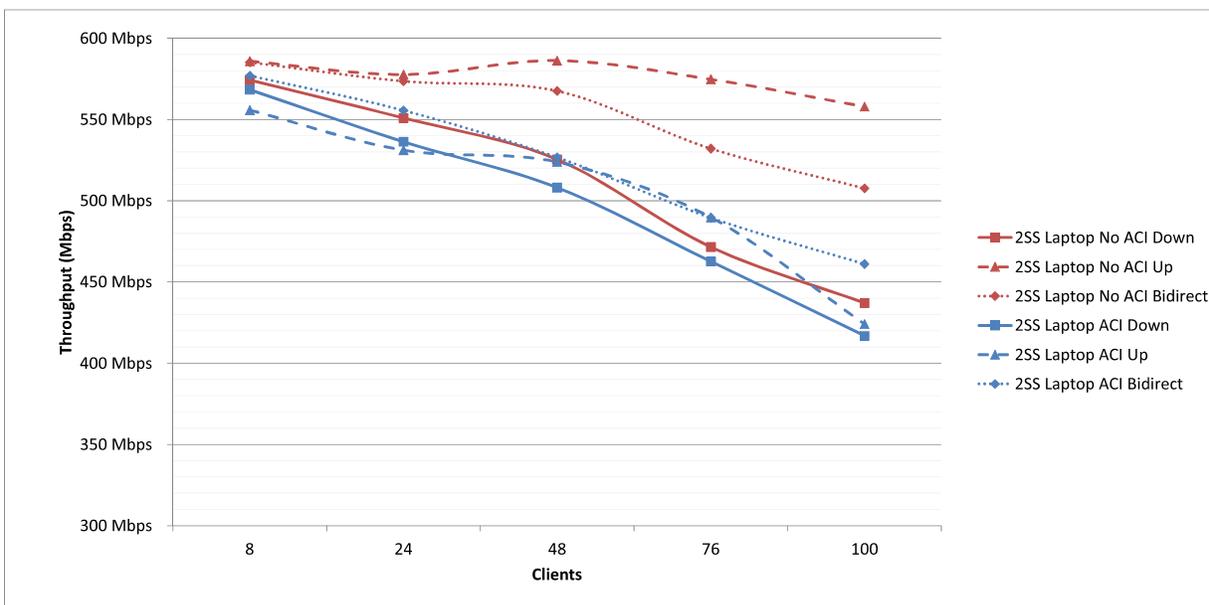


图 T5-7 2SS 802.11ac 笔记本电脑的 ACI 测试结果 (AP-225, 80-MHz 信道)

谈到苹果的 MacBook Airs (MBAs)，我们看到了由于多个接收器链而增强的灵敏度。同样，上行流量是受影响最严重，并且随着终端站点 STA 数量的增加，影响也在增加。下行受影响最小，表明 AP 在 3 米处的距离上(10 ft) 被充分隔离，以避免彼此阻塞。

附录中测试平台的照片让你了解空间的物理尺寸和可能的信道模型。我们的研究结果适用于任何中低高度的天花板下，具有混合的客户端群体的室内 VHD 环境。几乎所有的演讲厅和剧院都将遭受到相同类型的 ACI 影响。在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量的第 4 步提供的建议减损中，已经考虑了 ACI 影响。

能量检测和前导检测的干扰半径

能量检测阈值的最大干扰距离明显不同于 NAV 的最大干扰距离。在规划 VHD 区域时，当您在同一信道上有多个 AP 的，您必须理解这种区别。ED 本质上是一种短距离现象，但 PD 是一种非常远距离的现象。

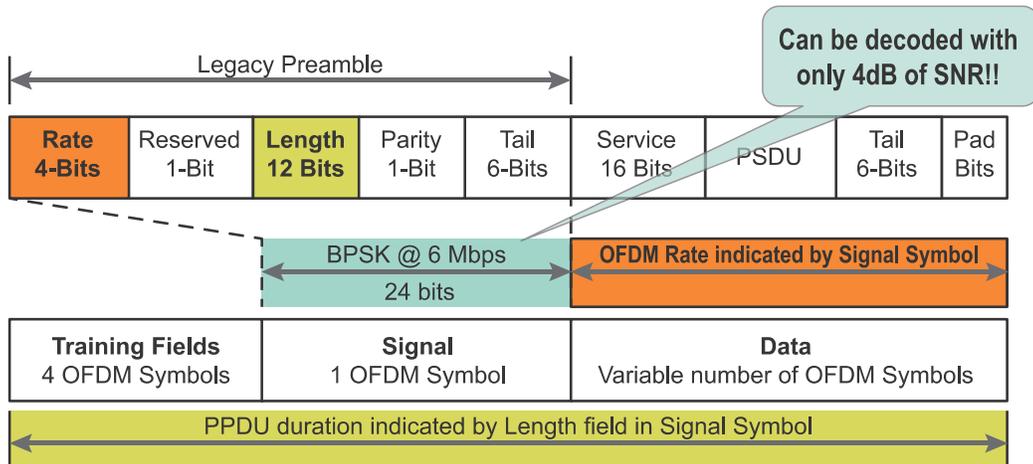


图 T5-8 在前导码和有效载荷中使用了不同的数据速率

我们已经看到，传统前导码使用 6 Mbps 的 BPSK 调制，它只需要 4 dB 的 SINR 就可以解码。在前导码中，第 1 层持续时间字段被包含在 L-SIG 字段中，因此它可以被解码到非常远的距离，甚至帧有效载荷的其余部分使用高得多的数据速率。例如，在 -90 dBm 的底噪下，信号强度达到 -86 dBm 的前导码会导致 CCA 断言该信道是繁忙的。

考虑基于 PD 检测的 CCI 干扰的一种更加具体和令人信服的方法是根据蜂窝边缘 RSSI 值来定义它。将 802.11 个蜂窝边缘设计为 -65 dBm 是一种广泛的最佳做法，这产生了 25 dB 的 SINR 和 -90 dBm 的底噪。

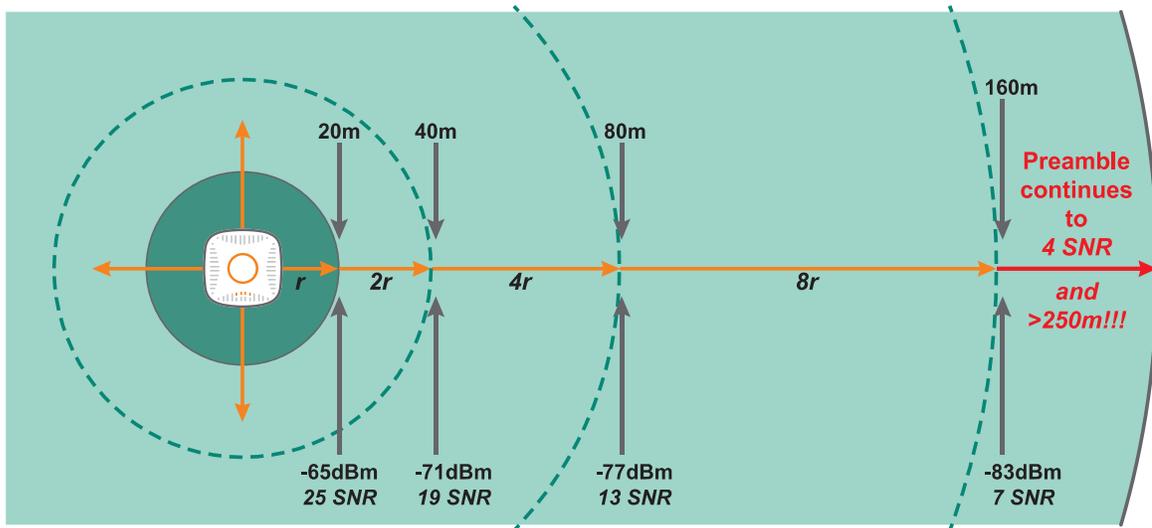


图 T5-9 相对于 AP 蜂窝边缘的 PD 干扰半径 (假设 -90 dB 底噪)

我们从 6 dB 规则中知道，每增加 6 dB 功率，距离就会翻倍。应用此规则，您可以在图 T5-9 中看到，任何按照 -65 dBm 蜂窝边缘标准设计的蜂窝，在自由空间中的 NAV 干扰半径将超过 250 m (820 ft)!

将 PD 检测干扰距离与 ED 阈值的干扰半径进行对比，从自由空间路径损耗公式中，我们可以计算出，在 5GHz 频段最大 ED 干扰范围约为 4 米(13 ft)，在 2.4GHz 频段最大 ED 干扰范围约为 8 米 (25 ft)，所以 ED 干扰距离远远小于 PD 干扰距离。

802.11 无线电功率的真实世界示例

作为一名无线架构师，你已经完成并审查了许多射频现场勘察的结果。然而你不经常有机会去调查像足球场这样的大型露天设施。无线电信号以光速传播 (大约每米 3 纳秒)，所以穿过一个足球场只需要大约 300 纳秒。图 T5-10 中显示了一个足球场的实际 802.11 热图，AP 被放置在中间区域的一个座位下面。在每条链 +23 dBm EIRP 的全功率下，AP 信标帧可以在最上层的最高行的最顶端可以检测到信号强度在 -75 dBm (即 +15 dB SINR)。



图 T5-10 足球场接收到的中场 AP 信号功率

此勘察软件正在测量以 6 Mbps 的 BPSK 调制速率发出的信标帧，因此它也有效地测量了传统前导码的信号强度！你可以看到 PD 干扰半径是非常真实和非常强大的。对于增强的多路径条件下，想象一下您在具有墙壁和屋顶的大型室内环境中的结果。

通过裁剪低数据速率来控制 CCI 是一个神话

Wi-Fi 行业的工程师重复的最伟大的神话之一是，无线蜂窝的大小是可以“收缩的---Shrunk”，即通过在 BSS 传输速率集中裁剪掉低数据速率。至少从 PD (preamble detect 前导码检测) 干扰的角度来看，这不是真的。第 T-2 章：什么是“信道”详细解释了这个神话。

从 BSS 中裁剪掉 6、12 甚至 18 Mbps 的数据速率对传统前导码速率没有任何影响，传统前导码速率必须始终使用 BPSK 调制下的 6Mbps。因此，去除低数据速率对 PD/NAV 干扰半径没有任何影响。

那移除低数据速率的真正目的是：

- 从速率自适应算法中来删除选型，强制移动客户端比其他情况下更平滑地漫游。
- 针对 802.11 控制帧，通过强制无线终端在 BSS 传输中使用更高的最低速率 (basic rate 中的最佳适配速率)，从而减少空口时间的消耗。

实现空间复用的最低要求

本章的主要目标之一是传达一个技术原因，就是为什么在 Wi-Fi 中实现空间复用是如此的困难。802.11 CCA 机制的设计有意地使用了 BPSK 稳健调制，以确保最大数量的终端站点可以解码每一个传输。然而，这个事实在标准中深藏不露，大多数 Wi-Fi 工程师从未接触过它。

也就是说，空间复用是真实存在的，可以在特定类型的设施和人群条件下来实现。我们第一步就是对现实的技术挑战有一个很好的理解。

第二步是良好的射频设计，遵循以下的原则：

- 使用尽可能多的信道，包括 DFS 信道，以减少所需的信道重复使用的次数，并在信道规划中增加同信道 AP 之间的距离。
- 选择一个最佳覆盖策略，从接近 VHD 区域的其他 AP 中来最小化 CCI，并同时考虑建筑的构造。
- 确保设施满足信道空间复用的最低要求：

大物理空间 (至少 10000 个座位)，

AP 通过外置天线的安装位置，控制每颗 AP 的覆盖范围

在人群在场的情况下进行现场勘察，以验证空间复用的可行性。

- 请具有训练有素的 Aruba 系统工程师或经验丰富的无线集成商来进行正确的设计。

第三步是使用 VHD 的最佳实践配置，结合 ArubaOS 中的蜂窝缩小功能，来限制 CCI 的影响。

控制 ACI

控制 ACI（邻频干扰）的主要方法是确保相邻信道 AP 的最大可能物理距离。此要求也是我们建议在整个覆盖区域中均匀分布 AP 的原因，正如在《超高密度 802.11ac 网络规划指南》中的第 P-3 章：射频设计中介绍的，并在《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-4 章：信道和发射功率规划计中来确保一个良好的分布式的信道规划。

第二个解决方案就是使用 VHD 区域所需的最小发射功率。然而，降低发射功率更有可能导致无线终端较低的 SINR 值，这反过来又会降低许多客户端的关联协商数据速率，这个结果比接受 ACI 的影响还要糟糕。此外，你运行的 5 GHz 无线电比 2.4GHz 频段高出 +6 dB 或 +9 dB，以提供终端站点的自身频道导引，这一点也是至关重要的。这一要求进一步限制了你在 AP 中使用发射功率的灵活性。

在客户端方面，可悲的事实是，今天市场上的大多数主流操作系统都不遵循 802.11h TPC 功率约束消息。这就是为什么 Aruba 默认系统配置不启用它的原因。除了射频规划中利用人体损耗和结构损耗之外，控制客户端侧的传输 EIRP 值几乎什么也做不了。

附录：Aruba 超高密度测试平台

来自 Aruba 超高密度 (VHD) 测试平台的结果已经在本 VRD 的三个主要指南中都有呈现，VHD 测试平台是专门为本 VRD 的编写而构建的，以验证我们的设计建议。这个附录为那些想要复制我们结果的人，解释了该测试平台的设计和测试规划。

搭建测试平台的理由

在规划 VHD 无线网络时，对真实世界的、开放空间的性能数据的需求是不能被夸大的。这样的数据需要大量的猜测工作，但是获取这些真实数据是既昂贵又耗时，因为它需要数百个设备、专用网络硬件、熟练的工程师、具有屏蔽功能的测试设施和专业的测量工具。

因为有许多新的功能，如数据速率、空间流、信道宽度、聚合和波束成形等，802.11ac 极大地扩大了对该数据的需求。

认识到这一挑战和广泛的市场需求，Aruba 开展了一项关于 VHD 环境下的客户端性能的研究项目，作为其行业领导能力的一部分。我们的目标是帮助我们的客户、合作伙伴和我们自己的工程师更好地理解超高密度的部署，并取得成功。

测试平台的设计

测试平台显示在图 T-A1 中，并由 300 个全新的、原生的 802.11ac 设备组成：

Make	Model	Radio	Spatial Streams	Quantity
Samsung	Galaxy S4	BRCM 4335	1SS	100
Apple	MacBook Air	BRCM 4360	2SS	100
Apple	MacBook Pro	BRCM 43460	3SS	100

将这些设备放置在八排，终端站点的间距为 15-30 厘米 (6-12 英寸)。所有三种设备类型都混合在一起，它们之间的间距保持一致。



图 T-A1 拥有 300 台终端站点的 Aruba VHD 测试平台

拓扑结构

网络的拓扑结构如图 T-A2 所示。我们采用两组并行的 AP，每组 AP 都有自己的 Aruba 7220 控制器。一组 AP 被用作承载测试流量的数据平面。另一组 AP 用于数据包捕获以执行分析。使用 Aruba S2500-48P 开关为 AP 供电，控制器通过 10G 以太网链路连接到交换机。

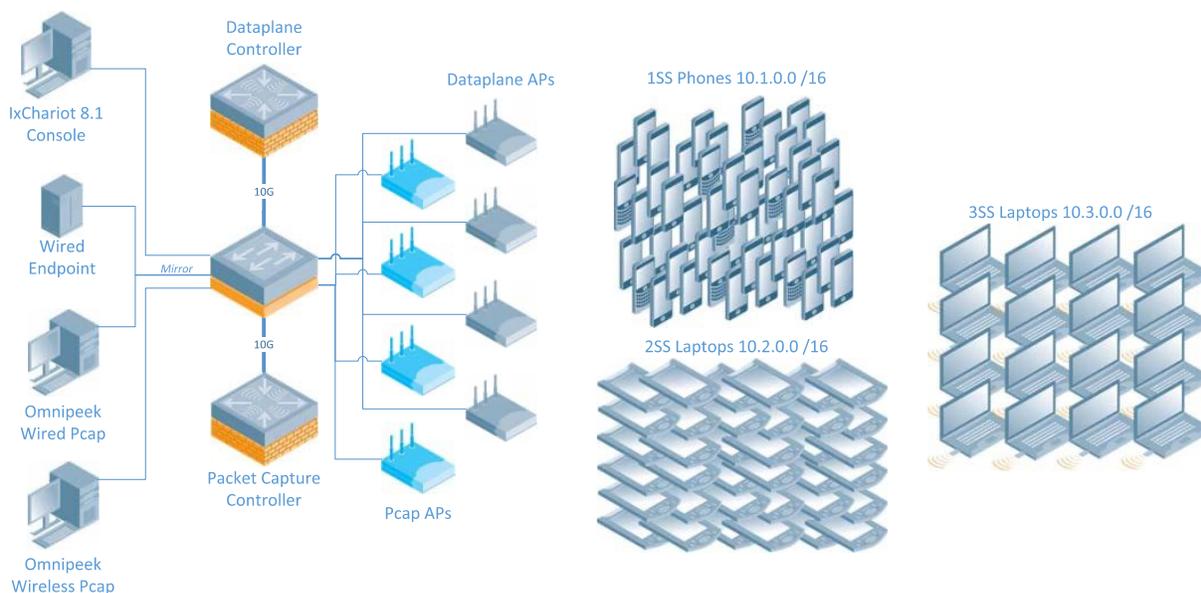


图 T-A2 Aruba VHD 测试平台拓扑

此 VRD 中显示的所有结果都是在启用 jumbo 巨型帧和帧聚合的情况下运行的。

信道

我们的测试平台专门使用了从 5490 - 5570 MHz 的 80 MHz 频谱，对应于这些信道如下：

- VHT20 / HT20 – 100, 104, 108, 112
- VHT40 / HT40 - 100 +, 108 +
- VHT80 - 100E

带有测试平台的建筑位于 Aruba 园区的一个偏远地区，附近几乎没有干扰，信道每天进行扫描，以确保干净。

SSID 配置

VRD 中显示的图表是根据《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量中推荐的 SSID 配置而来的，如下：

```
wlan ssid-profile "hdtest100-ssid"
  essid "HDTest-5"
  a-basic-rates 24 36
  a-tx-rates 18 24 36 48 54
  max-clients 255
  wmm
  wmm-vo-dscp "56"
  wmm-vi-dscp "40"
  a-beacon-rate 24
!
wlan ht-ssid-profile "HDtest-htssid-profile"
  max-tx-a-msdu-count-be 3
!
rf dot11a-radio-profile "hdtest100-11a-pf"
  channel 100
!
```

自动化

Ixia IxChariot 8.1 被用作测试的自动化平台，IxChariot 生成可重复的 IP 流量负载，并为测试提供控制平面。随着 8.X 版本的发布，Ixia 已经迁移到基于 OVA 的部署模型，控制软件在专用虚拟机上运行。一台专用笔记本电脑用作通过千兆以太网连接到交换机的有线端点。IxChariot 客户端安装在测试平台上的所有终端站点上。

对于 TCP 测试，使用了 throughput.scr 脚本。对于 UDP 测试，使用了 UDP_throughput.scr 脚本，使用了 30 秒的持续时间。每个客户端上使用的流或流的数量根据测试目标和测试中的站点数量而变化，Aruba 对大多数测试进行了上行、下行和双向测试用例。

什么是客户端扩展测试 (Client Scaling Test) ?

Aruba 称这种类型的测试为“客户端扩展测试”。“客户端扩展测试”是通过在开放空间不断增加真实客户端数量来测量性能，为无线工程师来描述其感兴趣的行为。

对于本 VRD，运行的测试通常包括 1、5、10、25、50、75 和 100 个客户端的扩展。

多个运行的测试组成一个测试用例，每个测试用例每次都会改变测试平台的一个方面，以研究这个特定的变量是如何影响性能的。

我们研究的一些主要变量包括：

- AP-205、AP-215、AP-225 和 AP-275 接入点模型
- 20 MHz、40 MHz 和 80 MHz 信道宽度
- 一个、两个和三个空间流的客户端
- 开放身份验证与 WPA2 加密
- TCP 与 UDP
- 64 字节、512 字节、1024 字节、1514 字节、3028 字节和 4500 字节的帧
- 启用和禁用空口时间的公平性 (Airtime Fairness)

“扩展客户端测试”中的每个变量都提供了对数据的内在一致性检查，因为偶尔糟糕的运行是非常明显的。

为什么这次没有高吞吐量或传统客户端？

这个 VRD 的 2010 版不仅研究了全新的 802.11n 高通量 (HT) 技术，而且还研究了更老的 802.11a/g 客户端。HT 和非 HT 客户的组合也被研究了，因为大多数环境都有两者的组合。

这些组合是必要的，因为 PHY 和 MAC 层在 802.11a/g 和 802.11n 之间存在根本的差异。HT 调制、多输入、多输出 (MIMO)、帧聚合和更宽的信道只是其中的几个例子。

相比之下，802.11ac 更多的是 802.11n 的增量扩展：

- 802.11n 的 PHY 数据速率与 802.11ac 相同。只有 256-QAM 是新的 (MCS8 和 9)。
- 当 256-QAM 不可用时，802.11ac 客户端退回到标准 802.11n 调制和编码方案 (MCS) 速率
- MIMO 已经从 802.11n 中的 4 个流增强到 8 个流的极限。
- 聚合的 MAC 协议数据单元 (A-MPDU)，是一种扩展的聚合，并且是强制性的。

802.11ac 和 802.11n 之间当然有重要的区别，然而，就本 VRD 而言，它们不会改变我们的总体结论或设计建议。

与其他已发布的结果进行比较

与本 VRD 一起发布的性能图表不能直接与 Aruba 或其他供应商的营销白皮书进行比较。

我们的目标是复制一个真实世界的高密度信道，以更好地描述它的性能以及如何最好地优化它。

因此，我们做出了某些特定的配置决策，这不利于我们的结果。我们还做出了有助于我们取得成果的改变。这些变化很少是典型营销绩效报告的一部分。

对我们的结果产生负面影响的关键差异包括：

- **在所有时间都有 250 个 STA (终端站点) 相关联：**通常，测试无线电都满载关联客户端，即使测试本身使用的终端站点数量要少得多。这些额外的相关终端站点产生了额外的低速率 802.11 节电、管理和控制流量。此数据流将是具有多个相同信道 AP 的 VHD 环境的典型。这种流量更现实，但它降低了我们的测试结果。
- **使用了窄信道：**在 VRD 中重复的大多数图表都是在 20MHz 信道宽度下载取的，符合《超高密度的 802.11ac 网络工程和配置指南》中的第 EC-2 章：估算系统吞吐量中的建议，AP 能够显著提高性能。

对我们的测试结果产生积极影响的关键配置包括：

- **增强的最低数据速率：**发布的所有测试均使用我们推荐的 24 Mbps 最小数据速率的 VHD SSID 的配置，这就抵消了额外关联终端站点的损失。
- **DFS 专用信道：**所有测试均在 100 - 112 信道上进行，这些信道受 DFS 规则约束，我们使用这些信道的主要原因是获得干净的空口资源和提高我们测试结果的可重复性。然而，客户端在 DFS 信道上的行为是不同的，特别是它们的探测次数减少，此行为也抵消了额外关联终端站点的损失。

总之，本指南中提供的性能图表和表格单纯是为了优化 VHD 环境中的性能。你不应将它们与使用不同条件或具有不同目标的测试报告进行比较。