建立超越110GHz的连接

Making Connections Beyond 110 GHz

作者：David J. Vondran OML 公司，加州摩根山

研究先驱们正在探索 110GHz 以上的广阔频谱资源，也就是跨度从 30GHz~1THz 俗称为毫米波（mm–wave）前沿。这些先驱们已经证明毫米波科技可能解决发展中的无线通信、天文学、成像、生物工程和国土安全领域所出现的问题。在下一阶段，这些先驱们将会用新的毫米波产品的发展来证明他们的观点。正是从研发到全球商业化可行性的毫米波趋势驱动着涵盖在本文中的技术。

本文从介绍为什么毫米波频谱吸引人们去探索的背景知识开始。接着介绍从 ALMA 项目（在智利的巨大天线阵列）中学到的实际经验教训，该项目是在毫米波前沿全球首个成功的案例。这些回顾将会保证我们不会重蹈前人的错误，通过揭示在接下来的篇幅中什么是最重要。最后，给毫米波的标准体系定下基准，用于解决在物理层面的计量问题。这一框架是工程师将如何通过竞争实现更快的上市和降低成本，而不是依赖制造业的进步。在本文的结尾，未来的先驱们和企业家也会通过开发新的激动人心的毫米波产品去加速毫米波解决方案的部署来证明他们自己的观点。

超越110GHz的频谱资源

激动人心的商业化毫米波产品激励着超越 110GHz 的研究，因为传输速率更快且有更多可用的频谱。这些应用包括固定无线连接、太赫兹的纳米电池、无线局域网 / 无线个人局域网、一体机下载、短距离设备连接和板对板的通信。有两个正在成形的探索组织要进一步研究这些应用。第一个组织是 IEEE 802.15WPANTM 太赫兹兴趣小组（1Gthz）[1]。第二个组织是 IWPC 移动数千兆位（MoGIG）的无线网络和终端[2]。1Gthz 主要致力于推动太赫兹通信和运行在从 275GHz 到 3THz 的太赫兹频段的相关网络应用。MoGIG 的目标是回答在未来几年当移动无线网络为满足大规模增长的数据需求而用光频谱时在它们身上会发生什么这一问题。

作为基准，WiGig™ 在 60GHz 频段使用 2.16GHz 的带宽可以传送达到 7Gbps 的数据传输率[3]。这种性能目前代表着比采用 80+MHz 带宽的射频无线局域网技术快 10 倍的提高。通过进一步探索超越 110GHz 的频段，工程师正在规划着今后十年的数据传输技术。此外，更小的天线尺寸和出现的射束控制技术使得研发工作朝着有更小更轻并具有更大商业吸引力的移动解决方案发展。工作在毫米波前沿同样能简化部署和有望降低成本。一般而言，在大量的未开发的毫米波频谱中，更多的宽带和更短的波长是达到数千兆位传输速率以上的两个关键组成部分。需要记住的一个调整障碍就是传输必须和已经在使用的频谱共存，包括无线电天文学、地球勘探

和太空研究这些应用。这些要调整的应用频谱跨度从275GHz~600GHz。这给证明干扰问题合格和风险规避的研发带来了负担。

大气吸收

在频谱分配中一个重要的设计考虑就是大气对毫米波信号的吸收特性。如图1所示，有自然的分子共振为最小或最大信号的传播特性创建运行窗口[4]。选择“波谷”相当于最小的衰减，有益于要求相对更长发送/接收路径的应用。一个明显的波谷例子就是在点对点的无线通信中E–Band是理想的安置频段。相反地，选择“波峰”将会缩短传输路径，这可能是在密集信号环境中干扰最小化所要求的特性。一个明显的波峰例子就是移动应用：WiGig（802.11ad）。

在整个毫米波频谱里，注意到水分含量（比如相对湿度，雾，雨）会降低传播特性非常重要。这些特性会影响到直线对传（LOS）的传输路径，并最终决定该应用是适合于固定还是移动。

ALMA项目的经验教训

阿塔卡玛大毫米波/亚毫米波阵列（ALMA）由66个高精度无线电天文望远镜组成，位于智利北部的阿塔卡玛沙漠。一个包含欧洲、北美、日本及智利共和国的国际合作组织成功的部署了此毫米波系统，其覆盖的频谱范围从30~950GHz[5]。图1和表1同时显示了10个频带的频谱分配情况。该天线系统的目的是允许来自世界各地的科学家去解开长时间悬而未决和重要的天文学谜团。现在有可能通过在以前没有利用的毫米波频率范围内收集数据得到这些发现。

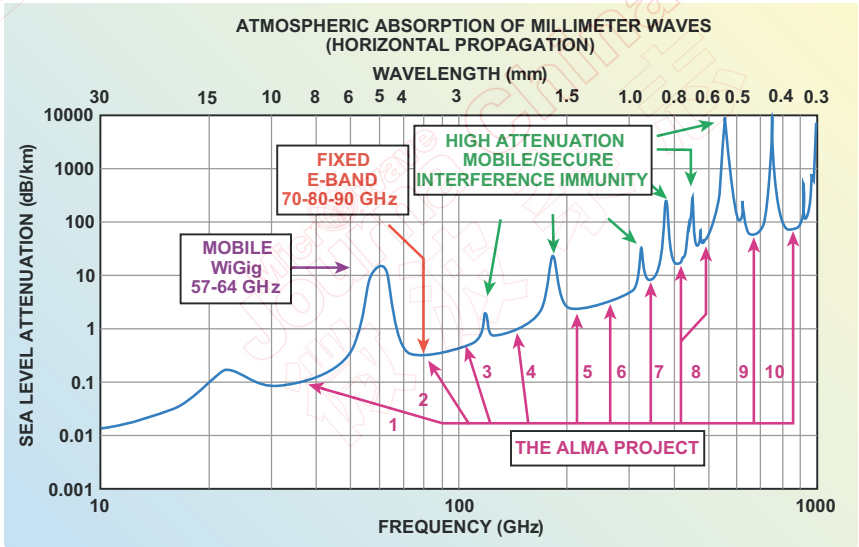

图1. 相对于频率和波长的毫米波信号的大气吸收特性。

在毫米波前沿，ALAM项目大概是首次国际上的成功案例。得益于这种成功，未来的毫米波事业能够借助这一最初的工业经验。除潜在的毫米波技术之外，缺少标准是部署混乱和延迟的主要原因。这些标准遍布了从频带标识符到波导接口应用的整个域。同样痛苦的是缺少用于独立验证关键系统性能准则的可描述的标准。因为缺少标准，我们很容易同意单一方面的认证，但是这样，产品的涓滴效应会开启一个在全世界范围内不兼容性问题的痛苦时代。按照电学性能，波导的不规则性会导致不希望的退化；随后，反歪斜和进一步的法兰对准特征被记录。这些是从ALAM项目中获得的最初的毫米波经验教训，需要在进一步探索和进行商业化之前吸收。

同轴/波导接口的背景介绍

从50~110GHz的重叠频谱，当今的设计者可以选择同轴或者波导接口；但是，在110GHz以上的频段几乎没有波导接口的领域（主要涉及到短波）。对于需要扫描宽频带的器件描述任务，设计者最熟悉的是流行的同轴接口，包括给有源器件做偏置的直流电。众所周知的同轴线（对于TE波导模拟）的截止频率是通过计算内径和外径尺寸差得到的。选择不支持波导模式的同轴线尺寸是非常重要的，因为同轴线传输依赖TEM模式。

可是超过110GHz后，工程师将会转而采用带边带的波导接口，其中没有中心导体的孔径传导传输信息。类似于同轴线的计算，窄边和宽边的尺寸确定了截止频率的上限和下限（对于TE_{10}计算）。对于任意给定的波导尺寸，占优势的TE_{10}模式被限

表1. ALMA天线阵列的10条频带

TABLE I
THE 10 FREQUENCY BANDS OF THE ALMA ANTENNAS

ALMA Band	Frequency Range (GHz)
1	31 to 45
2	67 to 90
3	84 to 116
4	125 to 163
5	162 to 211
6	211 to 275
7	275 to 373
8	385 to 500
9	602 to 720
10	787 to 950

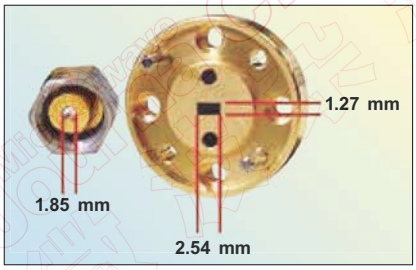

图 2. 1.85mm 同轴线接口和 WR–10 法兰的尺寸比较。

制在大约 50% 的带宽内。这通常不是障碍，因为传输应用频带相对狭窄。作为实例，图 2 显示了 1.85mm 的同轴线接口（最大 70GHz）和 WR–10 波导接口（75~110GHz）的并排比较。

波导法兰参考

表 2 显示了流行的矩形波导频带和它们各自的截止频率及孔径尺寸。为了做比较，该表同时包括了孔径的特写图。根据经验，工程师能快速地辨认 WR 编号，通过卡尺测量宽边的密耳（等于 0.001 英寸），再除以 10。比如，宽边的测量结果是 100 密耳，相当于 WR–10。

表 2. 流行的毫米波矩形 TE_{10} 波导接口。

TABLE II
POPULAR MILLIMETER-WAVE RECTANGULAR TE_{10} WAVEGUIDE INTERFACES

Waveguide Spectrum	*TE_{10} Cutoff Frequency (GHz)*	*Rectangular Waveguide Interface View*	*Internal Dimensions Width × Height (mils)*	*Internal Dimensions Width × Height (μm)*
50-75 GHz WR-15 WM-3760	39.9 GHz		148× 74	3760× 1880
60-90 GHz WR-12 WM-3099	48.4 GHz		122× 61	3099× 1550
75-110 GHz WR-10 WM-2540	59 GHz		100× 50	2540× 1270
90-140 GHz WR-08 WM-2032	73.8 GHz		80× 40	2032× 1016
110-170 GHz WR-06 WM-1651	90.8 GHz		65× 32.5	1651× 825.5
140-220 GHz WR-05 WM-1295	115.7 GHz		51× 25.5	1295× 647.5
170-260 GHz WR-04 WM-1092	137.2 GHz		43× 21.5	1092× 546
220-325 GHz WR-03 WM-864	173.5 GHz		34× 17.0	864× 432
325-500 GHz WR-02.2 WM-570	263 GHz		22× 11.0	570× 285

波导法兰术语

类似于同轴线连接，两个结合的法兰利用外面固定的波导定位销 / 孔来对齐孔径。定位销在结合处巧妙地交替销 / 孔。为了矢量网络分析仪的校准目的，用 15 in–0zd 力矩（±1.5 in–oz）拧紧 #4–40 法兰螺钉完成信号传递的连接。对部署的系统造成伤害的阈值，对 #4–40 螺钉而言，最大是 5.5 in–lb 力矩。注意到孔径的任何非对准非常重要，包括正常的波导线不规则，将会造成失配和恶化电学特性。

MIL–DTL–3922/67D

图 3 展示了波导连接的一个例子。外边的波导插销和圆形的波导尺寸可以追溯到 MIL–DTL–3922/67D（通常被称为 UG–387）标准，该标准制定于二十世纪六十年代，用来保证雷达的互操作性。在那时，法兰技术通过 110GHz（WR–10）定义。在物理层面意义上，该技术确实是一个了不起的工程和制造成就。考虑到现今还没有超过 110GHz 的正式标准，工业界已经在这些可敬的标准上做了些修改，并推广作为超过 110GHz 法兰的指导原则。

法兰对准的限制

在十年以前，毫米波的先驱们开始分享测试数据和遵守 MIL–DTL–3922/67D 标准的波导法兰中的基本限制 [6]。这些限制在今天从 WR–80

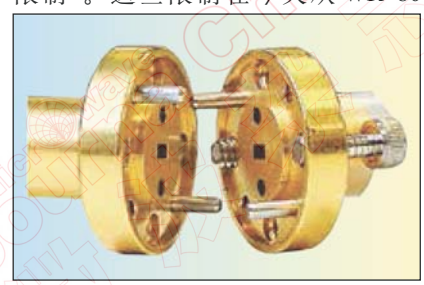
图 3. 典型的波导连接显示的定位销。

（90~140GHz）开始依然很明显。当我们着手处理太赫兹的应用时，需要一种更好的解决方案来加速对毫米波前沿的探索。

当法兰的两个平面连接时，连接的质量取决于连个孔径的精确对准。一般而言，理想的对准产生最小的失配和不希望的信号反射。对准质量的深入分析同时需要掌握二维和三维的精确位置和误差。

如图 4 所示，有四种主要的机制形式（假设平面对齐）可能导致非对准：宽边偏移，窄边偏移，旋转和倾斜。最显著的电特性恶化发生在宽边和窄边偏移时。此外，电特性恶化处的界面质量跟偏移量成比例：偏移越大，恶化越严重。

为了验证法兰的可塑性，工程师通常会使用最先进的机械和光学探测工具。这些可视化技术将揭示单个法兰的真实尺寸；然而，实际并排的两个法兰更难确定它们的真实尺寸。工程师可以从这些可视化测量结果中仿真可能的对准质量，但是电学特性只能通过 S 参数的测量得到，它揭示了真实的对准质量。这些对准验证技术在应用靠近太赫兹范围时会显得更加重要。

改进法兰对准技术

在频率超过 110GHz 后，波导法兰间的耦合是一项复杂的任务，要求在机械制造时前后的平行面之间有精确的尺寸。实际上，工程师要避免零件之间的绑定或者最坏情况及永久损伤。当公差太严格时绑定的情形就会发生。理想情况下，工程师想要最佳的电学性能；因此，和避免对对准带来不利影响的宽松公差的前提相冲突。在计量，机械加工和制造之间找到平衡点将会保证用于超过 110GHz 应用连接的可重复性和准确性。

反歪斜

当法兰初始耦合在一起时，两个接触面的紧密结合对防止间隙至关重要。歪斜是表示两个结合面的插销没有完全接触时的术语。在结合的过程中，外在波导螺钉是均等收紧的，但是不均匀或者过大的力矩会导致歪斜。为了抵消不均匀的收紧力，在法兰上增加了一个外环，作为反歪斜部分用来提高连接面的平行度。这一外环如图 3 所示。通过增加简单的反歪斜部分，优良的法兰到法兰的连接成为可能，特别是在不均匀收紧的两个平面对齐的情形中更是如此。

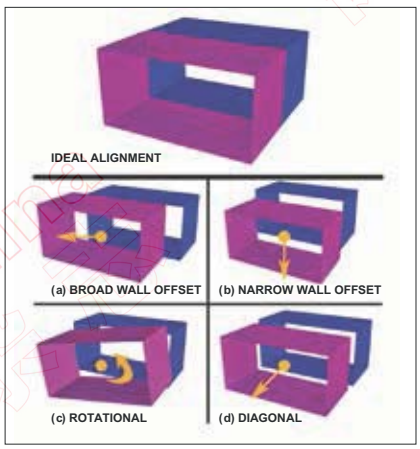

图 4. 法兰非对准机制。

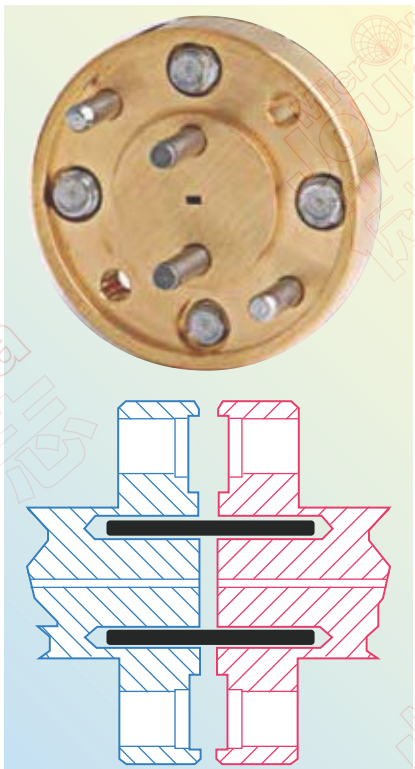
图 5. WR–03 法兰的精确定位销和孔径对准（侧视图）。

精确的定位销

随着在毫米波前沿的波长越来越短，非对准变得对制造法兰时存在的机械公差更敏感。因为这个原因，一种现代改进法兰的方式，如图 5 所示，通过在波导孔径的上下并排引入精确的定位固定销 / 孔。跟传统的法兰相比，通过增加固定插销和精确插孔改善了来自外部永久定位销 / 孔带来的粗略公差。制造商通常提升这种法兰作为 MIL–DTL–3922/67D 的改进版本，保证向后兼容原来的标准。这种补偿方式通过添加更严格的定位销 / 孔的公差来改善对准，但是这种方法从根本上有三种机械公差的积累：波导接口 #1，波导接口 #2 和定位固定销 / 孔（参见图 5）。这种方法的优点是和当前的 MIL–DTL–3922/67D 标准百分之百兼容。

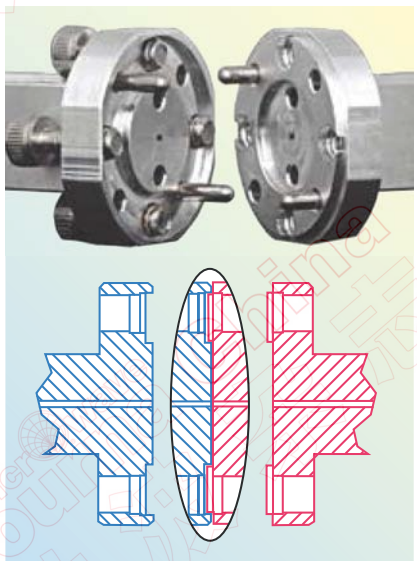
图 6. WR–03 创新的凸起和插孔接口改善了结合时的孔径对齐（侧视图）。

这种法兰变体的标准化涉及到对齐放置和公差的最终精度。

凸起和插孔法兰

也有其它的法兰变体接口，但通常而言它们从根本上都会有三种公差积累。来自 OML 已经获得专利的法兰设计采用创新的接口克服了这种公差积累限制[7]。与使用精确的定位销相比，这种波导接口使用了包括凸起和插孔接口的结合机制来改善对准（如图 6 所示）。这种设计通过不使用定位销简化到只有两种接口的公差积累。

采用凸起和插孔技术，通过使用外部永久定位销 / 孔来粗略对准，结合过程简化成法兰与法兰之间的连接，然后才是同心轴的最终对准。当使用凸起和插孔作为对准机制时没有必要采用精确的插销。类似于其它法兰变体的校准，用 15.5 in–oz 的力矩（±1.5 in–oz）来紧固法兰螺钉以完成信号传播的连接。为了兼容性这一首要目的，在凸起和插孔法兰中采用了精确的插销给其它法兰变体提供连接。外部的波导插销控制着旋转对准，这不是电气恶化的主要来源。凸起和插孔技术跟 MIL–DTL–3922/67D 标准百分之百兼容。

法兰设计比较

为了评估不同毫米波波导法兰之间的代表性差异，在 WR–03（220~325GHz）频段内于单个法兰上做了试验，该法兰包括三种主要设计元素：MIL–DTL–3922/67D，精确定位销及凸起和插孔变体[8]。在试验中，使用毫米波矢量网络分析仪系统给每一种类型都执行了单端短路，偏移短路，偏移负载（SSoLo）校准。为了揭示接口质量，使用了门限时域技术测量回波损耗。除了精确度外，通过比较 25 组连接和断开序列有可能评估其可重复性。

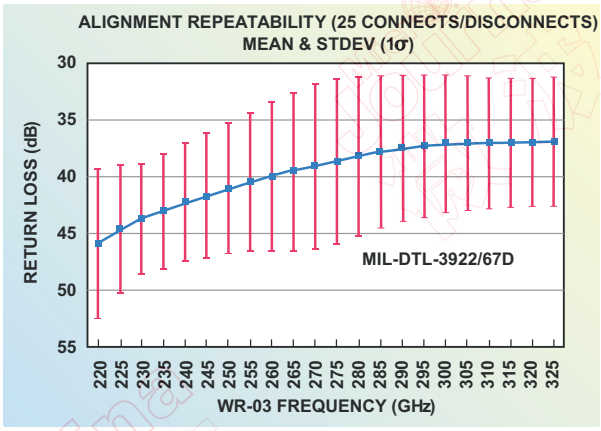

图 7. WR–03 中三种法兰变体的回波损耗比较。

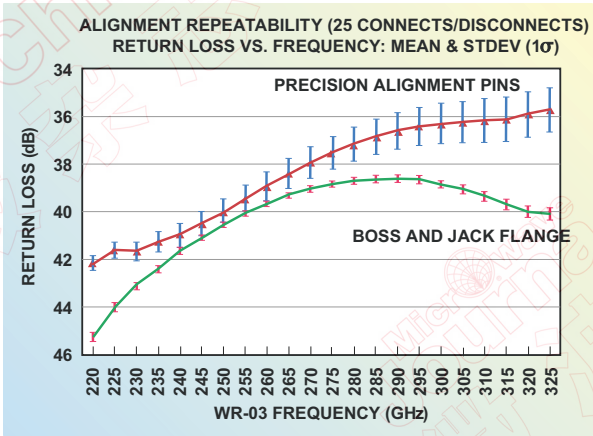

图 8. WR–03 中三种法兰变体的再次比较。

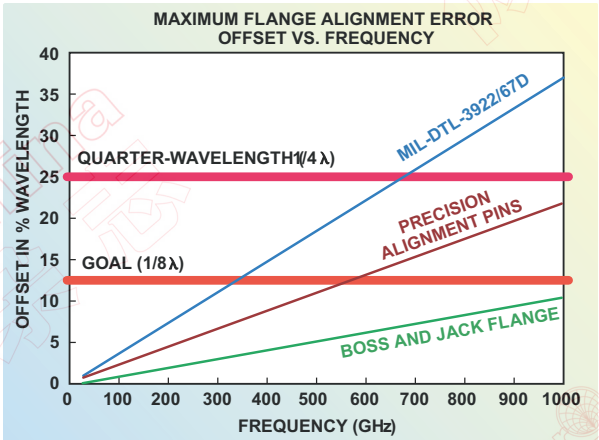

图 9. 三种法兰变体中相对于毫米波频谱的对齐比较。

如图 7 中的基线所示，MIL–DTL–3922/67D 法兰表现出很差的回波损耗和不希望的不一致性。与此相反，图 8 显示出另外两种法兰变体因对准改进所带来的性能提升的好处。这些结果证明精确的定位销法兰会提高性能和可重复性；然而，凸起和插孔法兰表现出最优的整体性能。总体而言，这些在毫米波频段的成果预示着在标准化进程中改进将很快成为现实。

在 WR–03 中，因为提高了对准性，凸起和插孔法兰在回波损耗特性方面展现出平均达 5dB 的改进。使用标准偏差作为指标，可重复性的比较有将近百分之七十的提升。试验中使用了有 ±0.5mil 公差的单个法兰机构，使得该对比能够从 WR–03 中抽取出对准好处有意义的并排对照结果。按比例放大这些法兰设计元素，即在低频处有更大的孔径尺寸，将会等比例的减小其作用。相似的，按比例缩小这些法兰设计元素，即在高频处有更小的孔径尺寸，将会等比例的提高对准性能。正如试验中所证明的，法兰技术的提高将会建立坚实的基础，使未来的测量更准确，可重复性更强。

110GHz 以上的波导标准 (IEEE P1785)

随着在流通中的所用毫米波法兰对准的改进，对于标准化的需要越来越明显。在 110GHz 以上，现在没有标准的互连接口。如前所述，工业界正在围绕这种情形开

展工作保证向后兼容现存的 110GHz 标准（比如 MIL–DTL–3922/67D）同时增加对准特性来解决精度和可重复性的问题（比如定位固定销）。工业界的标准化目标，类似于同轴线测量，就是建立一个鼓励竞争和众多供应商配置生产相关产品的体系。

从 2008 年开始，电气与电子工程师协会的微波理论和技术分会在 P1785 工作小组定义了新的矩阵波导接口标准[9]。这个标准主要由三个主要目标组成。第一个目标是定义波导尺寸（通过频带），包括和公制的转换。第二个目标，或许是最重要的任务，就是制定出法兰标准。第三个目标是定义用来概括接口性能和可预测不确定性的框架。这些目标和现存的 MIL–DTL–3922/67D 标准有相似的组织和交错。这个正在进行标准化的工作刚刚庆祝了它的第十五个周年纪念日。

法兰标准

法兰标准是 P1785 工作小组的关注重点。在劳动密集型的进程中，业界专家评估了兼容性标准和机械公差，对准机制及电学性能之间的联系。如前所述，在 WR–08（90~140GHz）以及更高频段，恶化通常会变得更加明显；特别是有多级波导接口级联在系统的信号路径上。作为一个实际的考虑，该评估需要分析现有的工艺水平和它的基本尺寸限制。

缩放到毫米波频率

这三种法兰变体要有更多的试验结果来做进一步的分析[10]。P1785 工作小组正在进行额外的试验和提取关于尺寸公差的整体性能来考虑法兰在更高频率时将会如何运作。如图 9 所示，同预测的一样，这三种法兰变体在频率增加时将有更大的对准误差[11]。这种不希望的行为是制定法兰标准的原始动机。

比如在 325~500GHz 的频带，WR–02.2（WM–570）波导的孔径尺寸为 22×11mils（570×285um）。在纵坐标，画出了百分之一波长的偏移。作为对照，1/4 波长（25%）是因为有 180° 相移（史密斯原图上短路和开路的阻抗差）而要防止的自然限制。考虑到这种限制，现实的目标是通过低于 1/8 波长（12.5%）的阈值来限制对准误差。这一目标预示着 MIL–DTL–3922/67D 不能胜任超过 325GHz 时的可重复和精确性测试。与此相反，凸缘和插孔变体代表着有可能是最好整体性能的法兰。

如前面试验结果所证实的那样，使用 ±0.5mil 的机械公差将在三种法兰变体中产生可测量到的差别。作为另一个实际的限制，现存的最先进的机械加工能力是 ±0.2mil，同时也是法兰标准要考虑的。对于 1THz 的法兰，孔径尺寸是 10×5mils，因此对于凸缘和插孔变体 ±0.5mil 的机械公差将会转化成 10% 的波长误差，这也许是考虑到适宜性，性能和成本的一个可以接受的平衡点。

这些例子说明在毫米波前沿关键的机械公差将会决定整体的电学性能。恶化的首要原因是因为孔径对准时宽边和窄边的偏移。提高测量精度和可重复性的动力激励着尽可能早一些发布标准用来解决这些问题。迄今为止，凸缘和插孔的方式，有最少的公差积累，已经在法兰接口中显示出最好的对准性能。这些优秀的对准技术和随后优异的电学性能将会缩放到其它的毫米波段或者亚毫米波段。

标准化过程中的更新

经过五年的投入，P1785 工作小组已经处于发布标准的边缘。作为更新，频带和波导尺寸的工作快要完成，包括公制系统的转换。另外，评估法兰的协议和标准也接近完成。这些工作是相当劳动密集型的，专家需要评估兼容性，机械公差，电学性能（都需要仿真和测试）和不确定性。最后，推荐的性能汇总和预期的不确定性还在复审。这三项主要的工作相互联系，因此标准的发布依赖于完整的分析。

工业界的标准化目标将会帮助建立一个鼓励竞争和通过众多供应商配置生产相关产品的体系。初看上去，这一进程可能很慢，但它证明了电气与电子工程师协会允许至关重要的工业界参与标准化制定过程的方法学。一旦完成，测量将不再依赖于单一供应商。相反的，可依照的测量计量学将会鼓励竞争并因此推动毫米波的发展。的确，当我们超越当今的水平时，毫米波创新的未来将变得更加光明。

总结

先驱们在探索毫米波前沿的过程中已经发现了一些重要的阻碍。本文尝试去回答三个问题：为什么，做什么和怎么做。作为第一步，商业化过程和体系的成长依赖于标准的发展和部署以保证测量精度和可重复性，而不考虑个体的供应商。在物理层面，坚实的基础从波导法兰开始。

虽然有许多艰难的工程挑战需要克服，但是 P1785 工作小组快要接近标准的发布。这些工作将解决因波导法兰对准而产生测量不一致性的问题，包括机械公差和波导接

口的自然不规则。有一个用于连接的物理层的标准，工程师能够集中精力于创新和探索，而不是在测试任务中寻找非一致性，不兼容和测量不精确的原因。这样，随着令人激动的新毫米波应用的部署，毫米波体系能够继续向前发展。■

参考文献：

1. www.ieee802.org/15/pub/IGthz.html.
2. www.iwpc.org/WorkingGroups.aspx, MoGIG.
3. WiGig Wireless Gigabit Allicance, "Wi–Gig White Paper: Defining the Future of Multi–Gigabit Wireless Communications," www.wigig.org, July 2010.
4. H. Liebe, "MPM—An Atmospheric Millimeter–Wave Propagation Model," International Journal of Infrared and Millimeter waves, Vol. 10, No. 6,pp. 631–650, 1989.
5. www.almaobservatory.org/en/technology/frontend.
6. C. Oleson and A. Denning, "Millimeter WaveVector Analysis Calibration and Measurement Problems Caused by Common Waveguide Irregularities," ARFTG Conference Digest（56th）,November 2000.
7. Y. Lau, A. Denning, "An Innovative Waveguide Interface for Millimeter Wave and Sub–millimeter Wave Applications," ARFTG Conference Digest（69th）, June 2007.
8. Y. Lau and D. Vondran, "An Innovative Waveguide Interface and Quarter–Wavelength Shim for the 220–325 GHz Band," ARFTG Conference Digest（80th）, December 2012.
9. IEEE P1785 Working Group: "Waveguides for Millimeter and Sub–millimeter Waveguides," http://grouper.ieee.org/groups/1785.
10. Y. Lau, "Understanding the Residual Waveguide Interface Variations on Millimeter Wave Calibration," ARFTG Conference Digest（76th）, November2010.
11. US Patent for Innovative Waveguide Interface（reference US2008/0303613A1）.