



白皮书

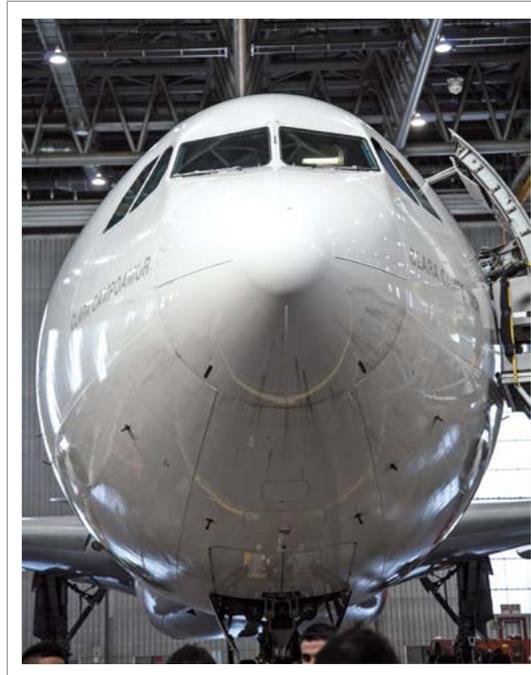
精度 | 空间 | 时间

应对挑战，依据RTCA-DO-213A标准测试商用飞机的雷达天线罩

目录:

- 第3页: 追求精度:
更高的标准和一系列新挑战
- 第5页: 常用测试方法的新局限
- 第7页: 接受挑战, 遵从新规范的多
探头技术
- 第10页: 结束语

应对挑战, 依据RTCA-DO-213A标准测试商用飞机的雷达天线罩



随着飞机雷达天线在精度和能力方面不断提升, 用于在飞机飞行时保护这些天线的机头雷达天线罩必须完美无缺, 这一点正变得越来越重要。为了确保天气、风切和湍流管理数据的最佳传输, 以及航线规划和安全航行, 天线罩的特性不得干扰飞机雷达系统的性能。天线罩的维修和测试规程传统上遵从RCFA制定的各项规定和标准化指南, 但技术进步 (无论是天线技术还是测试技术的进步) 促进了天线罩性能测试的进步, 并提升了测试精度。

近年来, RTC重新评估了其用于测试商用飞机雷达天线罩的指引标准, 对其中的判据进行了重大修改, 提高了维修后天线罩的测试精度要求。这些规定的变化受到了业界的欢迎, 但自从RTCA-DO-213A标准实施以来, 测试技术和设备面临如何遵从这些变化的挑战。与此同时, 像很多行业一样, 市场的物流需求倾向于提升时间效率和使用更少的空间。

本白皮书将探讨RTCA-DO-213A标准中的变化、现有测试方法以及它们如何受到这些变化的影响。最新的近场技术既能让维修厂满足市场对快速测试和维修流程日益增长的需求, 同时还满足新版RTCA标准中的测试精度要求。本文随后将对该技术进行介绍。

追求精度: 更高的标准和一系列新挑战

对于安装在机头上的雷达天线罩而言，为了在维修后验证其功能，我们需要依据RTCA-DO-213A标准对其特性进行精准测试。这些测试旨在可靠评估天线罩可能对穿过它的无线信号的干扰情况。尤其是：

- 评估信号吸收和反射所造成的损耗 (传输效率) ；
- 评估辐射方向图的畸变，如主波束偏斜、半功率波束宽度和副瓣电平等。
- 评估偏振偏斜。

RTCA-DO-213A标准的测试要求

RTCA (航空无线电技术委员会) 更新其质量标准并发布RTCA-DO-213A标准时，对商用飞机雷达天线罩提出了更为严格的测试要求。在维修和测试阶段，这意味着需要进行更为精准的测试，并获得质量更好的结果数据，才能符合未来的标准。

RTCA对DO-213标准进行了大幅更新，详细描述了各种测试方法的改进。我们在此将探讨RTCA-DO-213A中那些彻底改变天线罩测试及验证方法的重大变化。

夫琅和费判据得到强化

RTCA最初制定飞机机头雷达天线罩的测试标准时考虑了当时的技术水平。市场也开发出各种天线罩测试场，以符合这些标准。虽然推荐使用远场测试来实现最精准的天线特性分析，但针对天线罩的规定则没有那么严格。远场基于夫琅和费判据： $r = 2D^2/\lambda$ ，其中“r”是距离，“D”是天线（辐射体）的最大尺寸，“λ”是无线电波的波长。这是为平面波照射推荐的参考距离，可实现精准的天线特性分析。

RTCA-DO-213标准的早期版本允许测量距离在某些情况下比 $2D^2/\lambda$ 短4倍，从而在直径D上产生了一个90°的正交相位锥减。这种程度的相位畸变被认为会造成所测天线辐射方向图出现明显错误，尤其是在主波束上或靠近它的位置。

随着雷达天线系统的进步，以及天线罩透明度规范的日益严格，天线罩测试的精度要求注定会越来越高。因此，DO-213标准的修订版A中强制规定远场判据 $R \geq 2D^2/\lambda$ ，表示在直径D上的一个22.5°的正交相位锥减。²

自此以后，天线罩的测量精度要求与其所要保护的精密天线的测量精度要求趋于一致，但天线罩的维修和测试团队却发现他们的设施缺乏必要的测试空间。

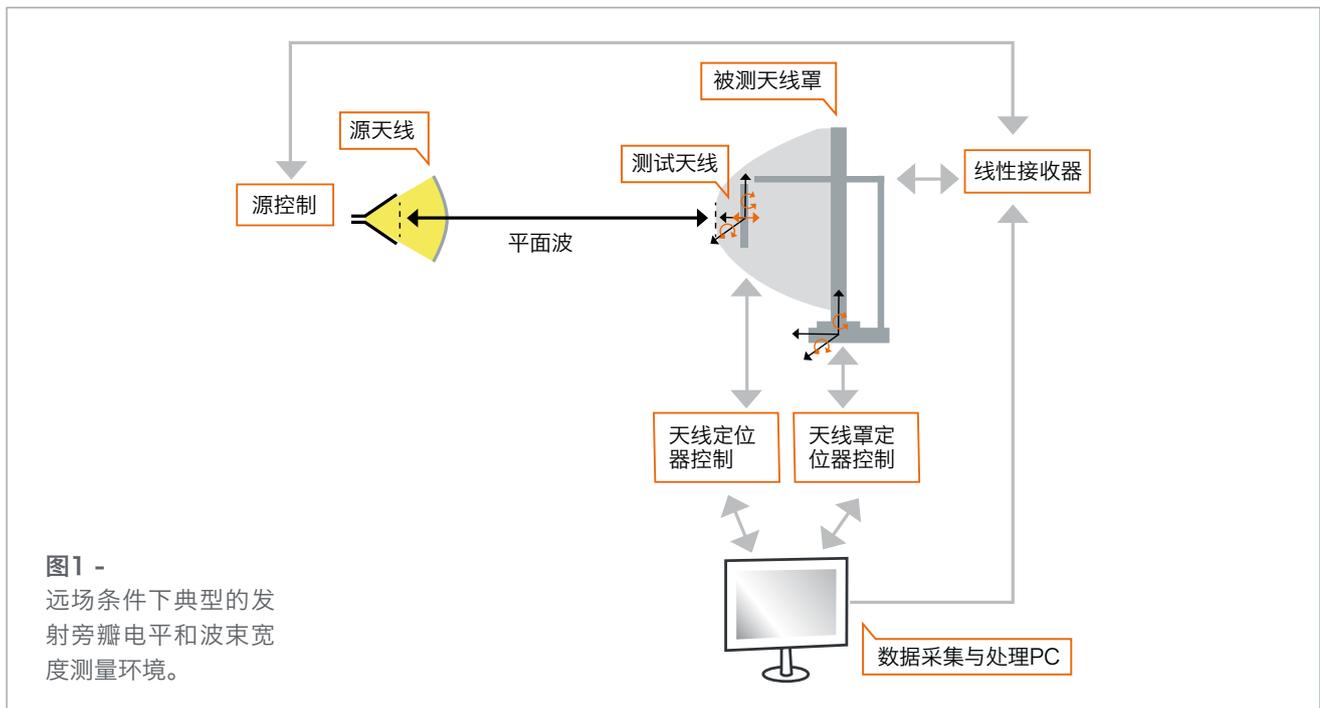


图1 - 远场条件下典型的发射旁瓣电平和波束宽度测量环境。

真实的测试环境

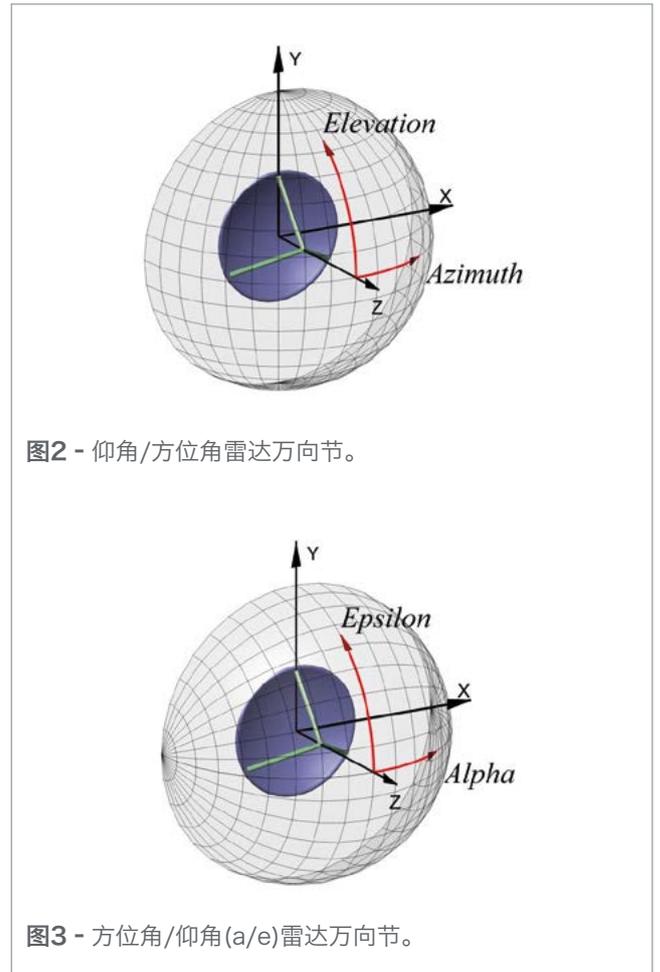
新规明确规定：必须在真实的雷达天线+天线罩条件下测试飞机雷达天线罩。所使用的天线罩/天线定位器系统应将测试天线定位在天线罩内部，而且其位置应与其在飞机上的位置相同。测试天线的孔径应匹配被测飞机雷达天线罩之下的典型雷达天线的孔径。系统天线应照射天线罩表面的预定区域，以便测量每一个“天线-天线罩面”。系统天线的中心因从被测天线罩所在点水平和垂直平移小于其直径的10%。在上述每个方向上，天线与天线罩的距离还应小于系统天线直径的20%。(1)

遵守这样的配置要求是为了确保传输效率和副瓣电平的测量精度。某些维修和测试厂将不得不更新他们的部分或所有测试环境，以便能在新规所规定的真实条件下进行测试。

飞机万向节旋转顺序仿真

除了创建“天线罩+天线”的测试环境之外，测试万向节旋转顺序还应考虑与天线罩一同被测的实际天线系统的万向节旋转顺序。

安装在飞机上的雷达天线扫描天线罩的不同区域。重要的是，天线罩上的对应点（以这些点为中心的天线罩表面的某个区域）是被测点。RTCA-DO-213标准规定：对于每一个指定的“天线-天线罩面”，当系统天线的指向是沿测试场轴时，测试场必须满足某些要求。图2和图3分别显示了两个典型的天线/天线罩层叠顺序的扫描网格。当方位角或仰角接近0时，这两个网格几乎相同，但在网格四角处变得大不相同。



新的标准要求：在任意情况下 (图 2 或图 3), 网格上的天线罩坐标应位于通过万向节点的测试场轴上。第二, 系统天线相对于天线罩的偏振方向应与其在飞机上的相同。第三, 测试天线应调整其偏振旋转, 以匹配系统天线的偏振旋转。(2)

并非所有的天线万向节装置都是仰角/方位角万向节,而且常规测试系统中的天线罩定位器的几何结构可能既不提供多轴协调运动,也不提供测试和系统天线偏振,无法实现所需的偏振旋转。因此,此次更新也给某些团队带来了新的挑战,这是因为,如果他们希望能够测量任何类型的天线罩,他们现在就必须找到更加灵活的定位解决方案。

这些更新所带来的制约因素开启了创新之门,不仅渴求更加精准的测试,而且渴求更快、更为灵活、更为紧凑的测试商用飞机维修后天线罩的解决方案。

⁽¹⁾ RTCA-DO-213A Minimum Operational Performance Standards for Nose-Mounted Radomes - Appendix C - Test Range Qualification - C.2.2 Location of System Antenna within Radome (机头雷达天线罩的最低运行性能标准-附录C - 测试场限制 - C.2.2节 天线在天线罩中的位置)

⁽²⁾ RTCA-DO-213A Minimum Operational Performance Standards for Nose-Mounted Radomes - Appendix C - Test Range Qualification - C.2.1 Emulation of Aircraft Gimbal Sequence (机头雷达天线罩的最低运行性能标准-附录C - 测试场限制 - C.2.1节 飞机万向节旋转顺序仿真)

常用测试方法的新局限

2016年的更新发布之前，天线罩测试场一直符合已有标准，小于远场条件下的测试结果也被接受。与此同时，紧缩场、近场龙门臂、使用喇叭天线的手动测试等新技术由于能够节省空间和/或成本，也被陆续采用，而且在测试维修后的飞机雷达天线罩时更为常用。但是，RTCA-DO-213A 标准中的更高要求改变了游戏规则。

虽然最新的指南中几乎删除了使用喇叭天线的手动测试，但紧缩场和龙门臂仍被认为适合用于测试维修后的雷达天线罩。尽管如此，这些技术以及传统的远场测试装置已不能满足这个不断发展的行业对物流空间和时间的限制要求。

让我们更为详细地阐述常用测试方法的局限性：

紧缩场: 在间接远场环境中进行测量

天线罩的性能要求-传输效率、旁瓣电平、波束宽度、波束偏斜-被定义为远场测量量，或者使用一个入射天线罩+系统天线组合的平面波进行定义。紧缩场借助一个平面波和反射器直接超射被测设备，即天线罩和系统天线。这种方法可以在间接远场环境中提供最新指南中所要求的所需质量的结果。

虽然紧缩场可以在小于直接远场环境的空间内使用平面波进行照射，但其反射器的有限尺寸会在测试区域内产生相位曲率，并在静区场中引发涟漪效应。对于这些变量的严格公差而言，这一局限会带来问题。此外，还需要对天线万向节和天线罩定位运动进行仿真。由于DO-213A标准现在要求精准再现真实环境，定位装置的复杂程度成倍增加，尤其是因为天线罩必须面向反射器垂直放置。

使用紧缩场测试维修后天线罩的第三个问题是天线罩尺寸的变化。一个紧缩场的尺寸不会超过最大静区尺寸。DUT（被测设备）越大，所需的静区越大。天线罩的尺寸随着飞机尺寸的增加而成比例增加，紧缩场也不得不适配不断增加的天线罩尺寸，同时遵从标准。这对于大多数维修和测试厂构成了挑战，因为他们面临空间和财务上的种种限制。

喇叭天线测量方法

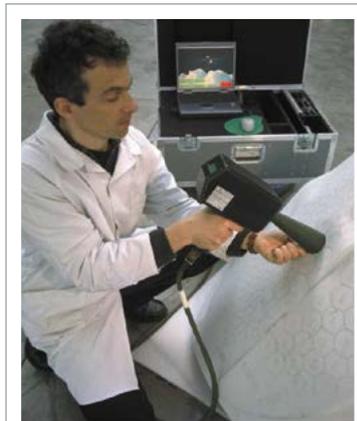


图4 - 在维修厂中使用一个便携设备分析天线罩。

RTCA有关测试维修后天线罩的最新标准中所定义的参数规定：虽然没有禁止使用手持喇叭天线，但也没有明确推荐它们。这项点对点测试技术使用天线罩上方的一个或多个喇叭天线以及天线罩下方的一个反射金属板。

典型的手持喇叭天线测试规程如图4所示。

这种方法对于某些维修厂而言既简单又节省成本，其结果对于某些维修后评估而言也曾足够好，但多个因素使得该技术在很大程度上不被 DO-213A标准接受。

首先，手动操作将不确定性引入测量结果。第二，由于不能真实再现天线罩和雷达天线，测试装置受到一定的限制。第三，如果要将这些测量结果转换成一次系统级综合分析和准确的参数提取，其复杂程度会生成不可靠的结果。因此，评估某个维修后天线罩的性能时，新版 RTCA-DO-213A标准虽然没有禁止使用手持点对点测量，但也没有明确推荐它们。

就这种方法而言，维修和测试厂需要另外考虑的一大问题是完成全面测量所需的时间。考虑到新的标准要求以及满足它们所需的额外时间，这种方法不足以让维修厂提升天线罩的维修量和测试量。

单探头近场龙门臂系统

近场测试场测量天线周围某个表面上的切向电磁场(典型距离为 $D^2/2\lambda < r < 2D^2/\lambda$ ，分别对应于菲涅耳区上下限之间的距离，其中“D”表示天线的最大直径，“r”是测量距离)，然后采用数学方法将所采集的数据转换成远场。

近场到远场的转换需要全面了解整个表面上的切向近场。必须保持相位测量精度，并确保定位系统的精度和校准度使得远场中的相应误差相对于待测的具体传输效率而言可以忽略不计。

在近场系统中，特性分析所需时间与天线罩物理尺寸有关。测量点的数量必须符合奈奎斯特判据，

该标准规定测量点之间的间距小于半个波长。此外，测量点的数量还与被测设备的频率和尺寸有关，它们决定了球面上待测点的最低数量。只有这样近场中的采样才能足够。

对于球面测量，所需扫描区域由以下公式计算得出：

D = 包围天线罩的球体的最小直径

$R_{\min} = D / 2$ (最小球体的半径)

R = 测量距离

$R > D^2 / 2\lambda \min$

近场中的天线罩测试最初进入商用飞机维修市场时采用的是一个单探头龙门臂系统。

它标志着雷达天线罩测试领域的一大进步，尽管如此，这种方法所耗费的时间依然较长；天线罩越大，测量点越多，全面评估所耗费的时间也越长。

例如，根据奈奎斯特判据，对于某些天线罩尺寸(如Airbus A400M的天线罩半径为1.312m)而言，为了实现准确评估，需要15小时或更长时间来采集足够的数据量。因此，使用单探头近场技术无法达到业界所呼吁的每日两次维修及测试的生产效率。



公约数 - 时间和空间

最终而言，这三个技术均为单探头测试法，采用点对点测量重构电磁场，用以精准评估天线罩和天线装置。

紧缩场 (CATR) 的优势在于：由于是在远场中直接评估，它能消减测量次数，但初期的消减无法实现对被测天线罩的全面评估，因此需要更多测量，而这又比较耗时。龙门臂技术的优势在于：能够以3D可视化形式呈现对天线罩表面的全面评估，但面对行业需求，其所耗费的大量时间令人望而却步。最后，手动喇叭天线测试法的优势在于空间和成本，但时间依然是个问题，此外，该方法还会产生较大的误差。

由于RTCA-DO-213A标准中制定了更加严格的精度要求，空间在这些技术中也成为了很大的问题。由于飞机的尺寸越来越大，雷达天线系统变得越来越复杂，而且由于新的天线罩测试要求旨在提高测量结果的精度，这些传统技术不得不去寻找更大空间，否则就会被取代。

至于天线万向节和天线罩定位层叠顺序，这些测试系统中的任何一个系统可能会因其定位装置而只局限于一个特定的测试顺序。这将导致传输效率等测试缺乏灵活性，因为逆转向和RF可重复性对于这些测试至关重要。在这方面，创新同样迫切。

接受挑战，遵从新规范的多探头技术

由于最新版RTCA-DO-213A标准中提出了更高的测试结果精度要求，企业也面临日益增高的以快于传统测试系统所能实现的速度维修和测试天线罩的压力，而且现代企业倾向于提出一些空间限制条件，因此，业界一直都需要一个快速、紧凑的解决方案。

借助他们在多探头天线测量解决方案领域积累的丰富经验，MVG的各个团队接受了这项挑战。他们着手创建了一个完全合规的多探头近场概念，专门用于测量商用飞机的机头雷达天线罩。其成果就是AeroLab。

AeroLab旨在使用一个更快、更灵活的紧凑系统取代单探头天线罩测试系统，以满足航空航天业的发展需求。AeroLab是一个近场多探头测量系统，专门用于在一个不大于4m x 4m x 5m的电波暗室内测试雷达天线罩。它包含一个四分之一拱桥，其上有一个由31个精密测量探头组成的探头阵列；它还内置过采样能力，能够创建无限数量的虚拟探头。定位子系统包含一个天线罩方位角定位器、一个垂直平移轴定位器和一个独特的测试雷达天线用多轴万向节。

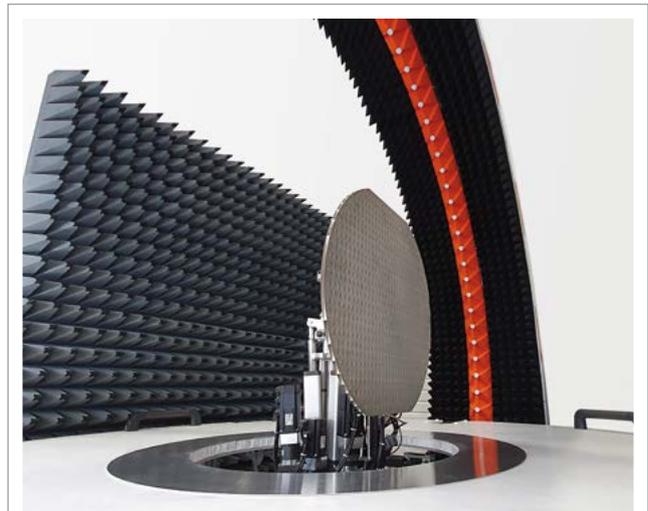


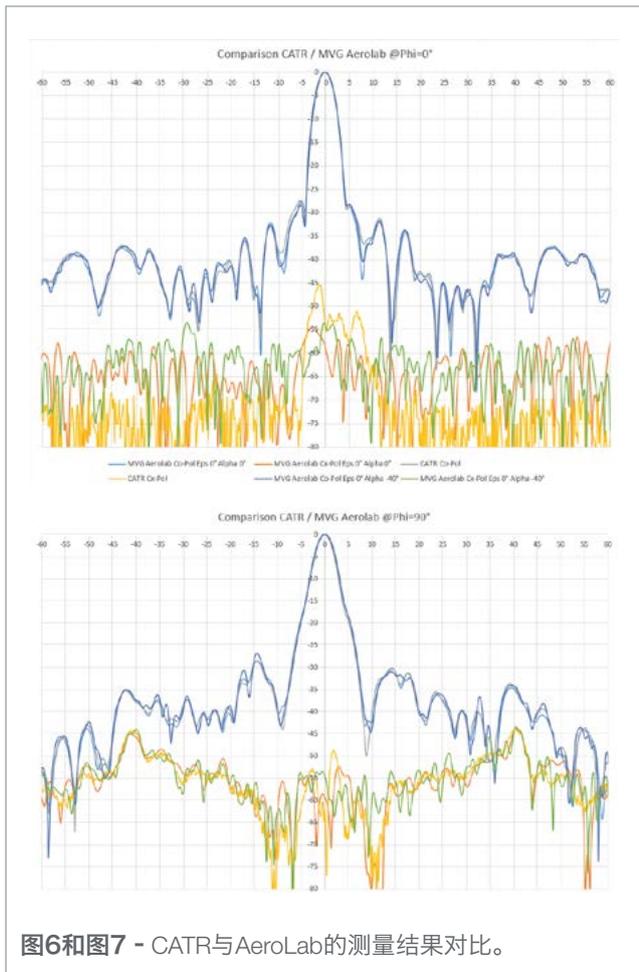
图5 - Aerolab的探头阵列和定位系统。

多探头技术将测量时间缩短了50%以上

如上所述，近场测量必须符合奈奎斯特判据，该判据要求有一定数量的测量点，以提供足够多的数据，才能获得全面准确的测试结果。雷达天线罩越大，所需测量点就越多。

例如，Airbus A400M的天线罩半径为1.312m，是目前最大的雷达天线罩之一。上述概念的运用将构建一个测量点圆环，其中包含258个频率为9.4 GHz的测量点。这需要4个多小时才能完成。

Aerolab能够容纳各类尺寸的天线罩，而且凭借其内置的过采样能力，能够在哪怕是最大的天线罩上构建所需数量的测量点。就Airbus A400M的雷达天线罩而言，配备一个16探头阵列、扫描95°角的Aerolab需要9个过采样位置，能够在2.3小时内完成一次测量，同时满足RTCA-DO-213A标准的精度要求。



测试环境的灵活性

根据新版DO-213A标准，被测雷达天线罩之下的雷达天线必须安装在一个典型的万向节上，这个万向节应能复制安装在飞机上的常见的“天线+万向节”环境。此外，知道飞机万向节的层叠顺序也很重要，目的是在天线罩定位器的配合下，模拟万向节的典型扫描运动。

但是，某些天线罩定位装置不具备必要的灵活性（即偏振轴能力）。Aerolab通过创新化解了层叠顺序困境。它为雷达天线配备了一个专用的多轴万向节和一个垂直平移轴（仰角）定位器，并配有一个用于旋转天线罩的方位角定位器。

垂直平移定位器用于设置天线罩下雷达天线和万向节的所需高度。创新型多轴万向节能够根据指定的球面坐标精准定位天线，将天线定位到任意角度，并全面支持任意层叠顺序。它不仅能够按照每个天线罩/天线配置的所需顺序进行方位角/仰角定位或者仰角/方位角定位，同时也不需要对接线罩进行偏振定位。这极大提升了灵活性，使其能够容纳各类天线罩+天线系统测试组合。



3D诊断

Aerolab用于测试维修后的雷达天线罩，并符合RTCA-DO-213A的最低运行性能标准。其测量传输效率、波束宽度和旁瓣电平的所需时间仅是单探头测试系统所需时间的零头而已。

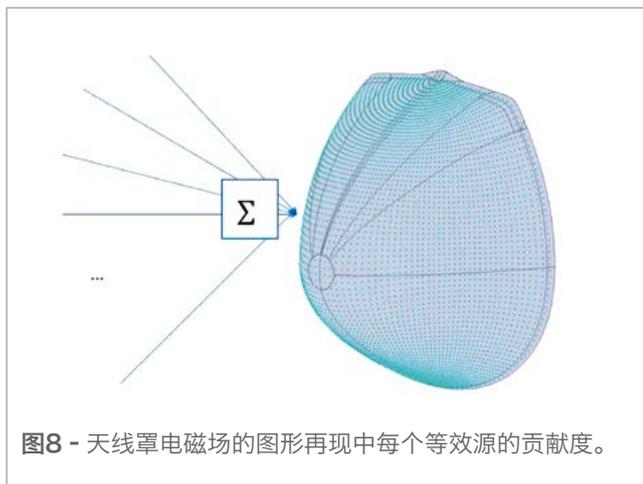
为了分析天线罩的特性，需要采集和绘制测量数据。可以使用各种不同的技术显示主要的截面图。最常见的技术有：

- 积分方程技术
- 球形反向传播技术
- 3D全息技术

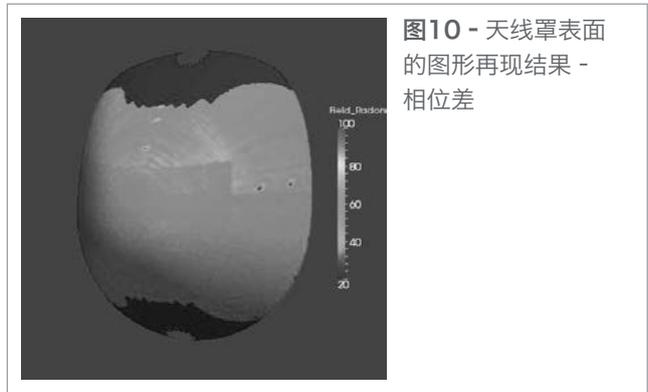
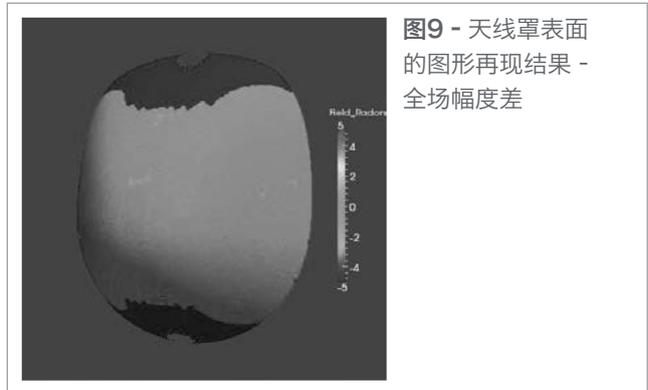
近场系统的测试点法采用了积分方程技术，正如我们所知，该技术的测量时间与测量点成正比，因此，可能非常耗时。

球形反向传播技术是一种近似技术，当天线罩的表面类似球面时，它能给出最佳结果；否则，测试结果不能产生准确的诊断。

3D全息技术解决了上述两种技术存在的问题。3D全息再现技术考虑了天线罩表面上每个等效源的贡献度，而且无论天线罩的形状如何，都能计算出其表面场强。



3D全息再现结果示例如图9和10所示，分别显示幅度差和相位差。这些结果是通过对比使用天线罩测量和不使用天线罩测量获得的。



Aerolab可让维修厂利用3D全息再现技术和近场测量结果，快速准确地计算出天线罩表面的场强，以便检测出最小 $\lambda \times \lambda \times 0.1\lambda$ 的介质贴片天线。

上述结果显示材料中存在一些不规则/缺陷，这些缺陷值在幅度图中不太明显，但在相位图中清晰可见。这种诊断能力提高了各种天线罩维修和测试方法的效率。除了能够更快地获得测试结果之外，3D全息诊断以深度可视化方式将各种异常呈现在用户眼前，从而提升了维修精度以及整个维修和测试流程的速度。

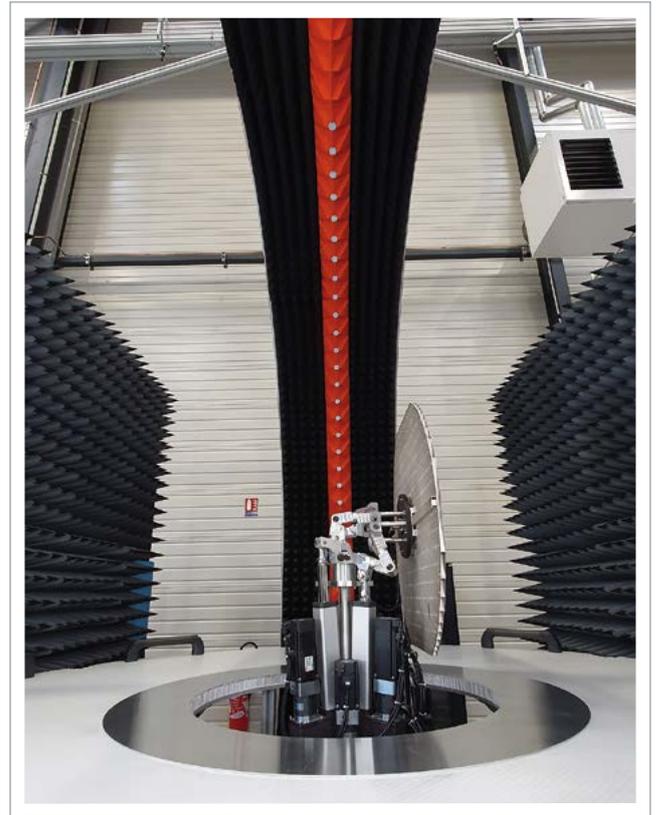
结束语

随着飞机雷达天线的性能不断增高，维持用于保护它们的机头天线罩的质量变得越来越重要。强化RTCA-DO-213A 标准中的要求没有遇到任何质疑。它们旨在改进飞机机头雷达天线罩维修工作的验证流程，以更好地确保雷达天线传输精度，从而最终确保飞机的飞行安全。

由于现在要求依据真实的远场（夫琅和费）判据绘制天线罩测试结果，天线罩的尺寸和测量时间给现有装置和测试方法带来了极大限制。我们已经阐述了远场技术为何需要更多空间才能符合这些强化后的判据；而且，我们也看到了现有近场技术需要更多时间才能依据奈奎斯特判据和新的要求完成全面测量。

尽管测量精度要求有其必要性，业界仍然呼吁资源的经济性。维修和测试厂一直都需要更快的维修和测试流程，而上述标准中的变化让他们后退了一步。

作为一种用于测试维修后天线罩的新型近场单探头测量技术，Aerolab满足RTCA-DO-213A中的测试结果精度要求，给测试装置增添了灵活性，将测试占用空间保持在最小水平，并极大缩短了维修和测试流程的时间。此外，3D诊断可视化技术为维修流程提供了一个新的维度。



要点

- 新版标准提高了雷达天线罩维修测试的精度，但也给最常用的测试方法带来了一系列新问题。
- 对于FF、紧缩场或近场单探头测试系统而言，空间、时间和灵活性成为难以克服的挑战。
- 诸如MVG的AeroLab等近场多探头技术可进行遵从RTCA标准的精准测量，并在极短的时间和紧凑的空间内完成维修后的测试。现在可以实现每日两次的测试速度。

使用多探头技术测试其他设备

AeroLab是MVG的多探头技术组合中的最新成员，旨在实现紧凑、快速和精准的天线性能测试。

尤其是在航空航天与国防领域，这些系统被推荐用于在各种尺寸和频率的飞机、卫星或汽车的子系统级或系统级测试中对天线进行优化。

敬请访问www.mvg-world.com,了解Aerolab、SG128、SG3000、SG64、SG24、StarLab和StarLab 50 GHz的更多信息。



图11 - Aerolab的3D设计视图。

© 图:

- 1) 加拿大航空公司波音787-9 C-FNOI-www.flickr.com/photos/bribri/27899403104
- 2) 机头- <https://www.flickr.com/photos/super-kas83/8458357711>
- 3) 图3 - RTCA-DO-213A机头雷达天线罩的最低运行性能标准
- 4) 手动喇叭天线测量 - 由Airbus提供
- 5) 362nd培训 - https://www.flickr.com/photos/my_public_domain_photos/32401111857

MVG - 测试无线世界中的连接

法国MVG集团 (Microwave Vision Group) 提供尖端的电磁波可视化技术。我们的各个系统能够提高无线连接测试的精度和速度, 并提升电波暗室和EMC技术的性能和可靠性, 以共同应对全互联世界中各项测试挑战。

全球足迹, 本地化支持

在我司遍及全球各地的办事处中, 我们的各个团队可为您提供从采购、设计、交货到安装的全程指导和支持。由于我们实现了本地化, 我们可以确保项目跟踪的速度和专注力, 其中包括系统就位后的客户支持和维护服务。欲获取各办事处的详细地址和最新联系信息, 请访问:
<https://www.mvg-world.com/contact>



更多详细信息, 敬请访问我们的网站:
www.mvg-world.com



或者, 向我们发送邮件:
salesteam@mvg-world.com