

地面感测与避测对无人机系统的支持

迈克尔·威尔逊

波音研究与技术 - 澳大利亚
michael.wilson@boeing.com

关键词:UAS, 雷达, ADS-B, 扫描鹰, RCS

摘要

在非隔离的空域中，能够定期和常规地飞行无人驾驶飞机用于商业或民用应用，需要具有感知和避免能力。

移动飞机跟踪系统(MATS)是一种基于地面的感知和避免(GBSAA)系统。MATS由初级雷达、ADS-B接收机和应答器询问器组成。“智能天空”项目提供了使用一架特别装备的塞斯纳 172R 测试 MATS 性能的机会。这架飞机还被用于校准雷达横截面(RCS)估计。

MATS 被部署在一个进行“扫描鹰”操作的无塔式机场。该系统展示了探测和跟踪当地空域用户的能力，从而支持常规和常规的无人机操作

1 介绍

无人驾驶飞机系统(UAS)在隔离空域被军方使用的历史很长。随着技术的成熟，人们正在考虑无人机系统的许多民用和商业应用。一般来说，“枯燥、肮脏或危险”的任务被认为非常适合无人机。

将无人机(UA)用于民用和商业目的，需要接入国家空域系统(NAS)。有人驾驶航空的一个基础是飞行员看到并避开其他飞机[1]的能力。因此，UA 需要具备感知和(Sense And)的能力

避免(SAA)其他飞机在 NAS 中常规飞行[2,3]。

已经考虑了许多针对 SAA 问题的机载解决方案[4,5]。一种替代方案是使用地基感知和避免(GBSAA)系统来支持 UAS 操作[6,7]。

本文介绍了测试移动飞机跟踪系统(MATS)的结果，这是一种 GBSAA 系统。MATS 是在智能天空项目期间使用一架专门装备的塞斯纳 172R 进行测试的。本文还介绍了在“扫描鹰”作战期间对 MATS 进行测试的结果。

2 材料和方法

2.1 智能天空项目

智能天空项目探索了支持有人驾驶和无人驾驶飞机[8]更好地利用国家空域系统(NAS)的技术。

“智能天空”项目的一个特点是使用一架特殊装备的塞斯纳 172R 飞机进行了一系列综合飞行试验。该飞机在飞行试验中准确记录了自己的位置和姿态。飞机还可以被赋予自主遵循预定飞行计划的任务。因此，塞斯纳是探索 MATS 性能的宝贵资产。

2.2 移动飞机跟踪系统

MATS 如图 1 所示。MATS 是一种具有成本效益的、网络支持的便携式空中交通监视系统。mats 的目的是

MATS 是提供探测和跟踪当地合作和非合作空域用户的能力，以支持无人机在非隔离民用空域的运行。合作性航空器具有正在运行的机载电子识别手段(例如应答器)[9]。非合作飞机没有机载电子识别手段。



图 1 所示。移动飞机跟踪系统(MATS)安装在拖车中，该拖车构成了 Insitu Pacific 公司 UAS 飞行演示系统的一部分。MATS 使用初级监视雷达和其他传感器来监控当地的空中交通。这张照片是在“扫描鹰”行动期间在瓦茨桥机场拍摄的。

MATS 的架构如图 2 所示。MATS 目前由一个主监视雷达(PSR)和一个自动相关监视-广播(ADS-B)接收机组成。最近还在系统中增加了应答器询问器。

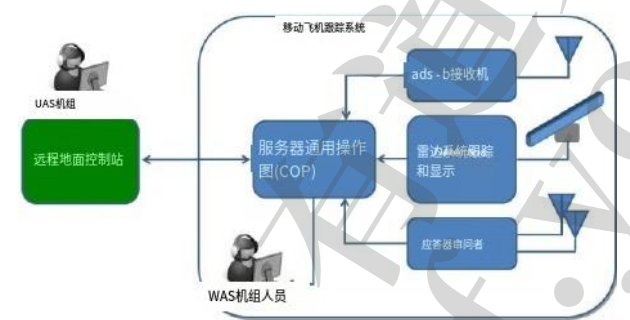


图 2 所示。MATS 的架构显示了主要子系统。与远程地面控制站的接口为 MATS 的部署方式提供了一定的灵活性。

MATS PSR 由商用现货(COTS)船用雷达和系统组成

它执行检测、跟踪和显示功能。

COTS 雷达为非相干古野 FAR-2127-BB x 波段雷达，峰值输出功率为 25kw。该雷达采用 8 英尺的开槽波导阵列天线。这种标准天线提供的水平波束宽度为 0.95°，垂直波束宽度为 20°。垂直波束宽度覆盖水平方向 ±10°。天线以每秒 24 转的速度旋转，可提供 2.5 秒的更新速率。

当选择长脉冲长度时，雷达提供 180 米的距离分辨率和 54 海里(NM)的仪器范围。该雷达的中脉冲提供 45 米的距离分辨率和 27 海里的仪表范围。

Accipiter®探测和跟踪系统是 MATS PSR 的“大脑”。Accipiter 系统用强大的、软件可定义的雷达处理器和跟踪器[10]取代了标准的船用雷达处理。

MATS 雷达显示的一个示例如图 3 所示。雷达显示器提供了来自当地空域用户的航迹实时图片。

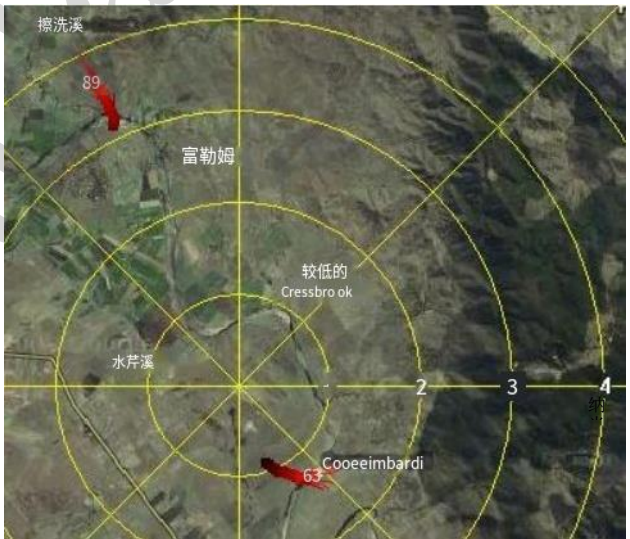


图 3 所示。MATS 实时雷达显示的一个例子，以瓦茨桥机场为中心。显示两架飞机的航迹。西北方向 3.5 NM 处的飞机正以 89 节的速度远离机场。东南方向 1.3 海里的飞机正以 63 节的速度向西飞行。显示距离环，以一海里为增量。

初级雷达是 MATS 的关键子系统，因为它是少数能够探测非合作飞机的技术之一。

MATS 使用的 ADS-B 接收机是动能航空电子产品有限公司的 SBS-1。SBS-1 是一款便携式、低成本的 ADS-B 1090 MHz 接收机。SBS-1 提供了跟踪和记录装备 ADS-B 飞机信息的能力。

ADS-B 接收机为装备的飞机提供纬度、经度、高度、速度、航向和身份信息。

ADS-B 接收机的一个目的是提供关于飞机的详细信息，这些信息也被 MATS 雷达探测到。接收机的另一个目的是提供有关超出雷达操作范围的装备飞机的信息。

最近，Avidyne TAS 620 应答器询问器被添加到 MATS 中。该系统通常在飞机上运行。然而，对于 MATS 来说，该系统已经配置为地面操作。Avidyne 系统提供有关当地配备应答器的飞机的信息。该传感器的目的是为图 2 所示的通用操作图(COP)提供额外的信息。对应答器询问系统的测试仍在继续。

与远程地面控制站(GCS)的接口如图 2 所示。该接口允许 MATS 的部署方式具有一定的灵活性。例如，MATS 的定位可以优化雷达的视场，雷达的视场可能位于距离 GCS 一定距离的地方。

MATS 的目的是为 UAS 飞行员提供有关当地空域用户的信息。MATS 和 UAS 飞行员形成了一个 SAA 系统:MATS 提供“感知”功能，而 UAS 飞行员通过操纵 UA 来执行“避免”功能。

2.3 机载系统实验室

机载系统实验室(ASL)是作为智能天空项目的一部分而开发的。如图 4 所示，ASL 是一架塞斯纳 172R。

ASL 配备了 Novatel SPAN 集成 GPS-INS 导航系统，可提供有关飞机状态的实时“真实”数据。这些数据包括飞机的位置、速度、姿态和高度 [11]。“真相”数据还提供了在飞行试验后分析期间对雷达跟踪测量的独立检查。



图 4 所示。机载系统实验室(ASL)是一架专门装备的塞斯纳 172R。

ASL 安装了一个经过认证的滚转转向转换器，为现有的自动驾驶仪提供数字接口。这个接口允许 ASL 的飞行管理系统直接指挥飞机的自动驾驶仪。这种能力允许在飞行巡航阶段自动遵循预定的飞行计划。因此，在雷达特性研究期间，ASL 能够重复地遵循各种飞行计划，包括圆形和菱形飞行计划。

ASL 还配备了 1090 MHz 扩展间隔(ES) ADS-B 传输系统。ADS-B 传输系统提供了在飞行试验期间独立监测 ASL 的绝佳手段。

ASL 是一种典型的通用航空(GA)¹ 飞机，这使其成为雷达特性研究的理想选择。ASL 还代表了在非隔离的 G 类空域中可能遇到的典型碰撞威胁。

¹ 通用航空通常用来描述除定期公共航空运输服务所涉及的所有民用航空活动。

ASL 的各种功能使其非常适合演示 MATS 如何支持 G 类空域的 UAS 操作。

2.4 瓦茨桥纪念机场

在澳大利亚昆士兰的瓦茨桥纪念机场(南纬 27° 05' 54”，东经 152° 27' 36”)进行了许多 MATS 特性飞行试验。该机场有三条草皮跑道:两条平行跑道和一条交叉跑道。布里斯班山(2244 英尺)位于机场以东约 4 海里处。密集的高空跳伞经常发生在机场西北 5 海里处。瓦茨桥位于昆士兰州首府布里斯班西北约 38 海里处。

Insitu Pacific Limited (IPL)目前使用沃茨桥机场进行“扫描鹰²”无人机的飞行训练和测试。因此，该机场代表了测试 MATS 的现实环境。

IPL 在危险区域 651 内操作扫描鹰，如图 5 所示。危险区域以瓦茨桥机场为中心，从地面延伸到平均海平面(AMSL)以上 3000 英尺(ft)。危险区域是指在该区域内或其上方可能存在对飞越该区域的飞机具有潜在危险的活动的特定尺寸的空域(航空信息包，澳大利亚)。

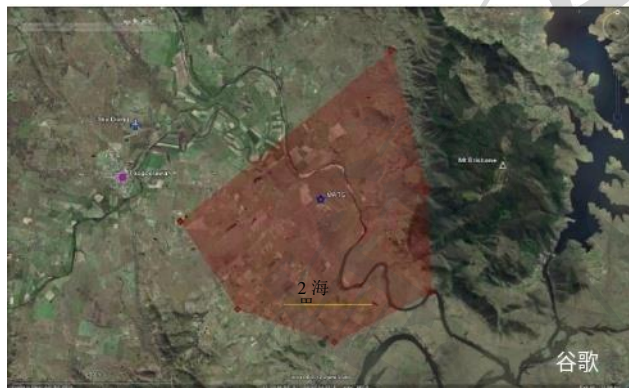


图 5 所示。扫描鹰在 651 危险区域内操作，即以瓦茨桥机场为中心的红色区域。

² <http://www.insitu.com/scaneagle>

2.4 扫描鹰无人机

扫描鹰®是一种小型无人机系统(UAS)，通常用于为各种应用提供图像。

“扫描鹰”的翼展为 3.11 米，长度为 1.37 米，起飞重量约为 20 公斤，续航时间大于 24 小时。“扫描鹰”使用弹射器进行发射，使用“天钩”进行捕获。因此，飞机不需要跑道，这为飞机可以在哪里操作提供了很大的灵活性。

3 的结果

3.1 MATS 雷达表征

MATS PSR 的性能在一系列飞行试验中进行了检验。在一系列实验中，ASL 从瓦茨桥机场出发，在多个范围内提供了圆形飞行路径。圆形飞行路径意味着 ASL 在远离雷达的固定距离飞行，并向雷达呈现恒定的雷达截面(RCS)。

这些实验的最初目的是为了了解操作环境对初级雷达的探测和跟踪性能的影响。结果表明，高地杂波区域可以在某些区域阻止飞机跟踪，即使距离雷达[12]，[13]很近。

结果还表明，塞斯纳 172 在 14 NM 处被跟踪的一致性较差。更大的飞机，雷达横截面更大，在更远的距离上被持续跟踪。

最近对 MATS 雷达[14]实施了 RCS 校准程序。该过程需要飞机的已知 RCS 值。

据注意，塞斯纳 150 L 的机头 RCS 中值略高于 5 dBsm，尾翼 RCS 中值略低于 5 dBsm³。波束或“侧面”方面的中位数 RCS 为 20 dBsm。

³ dBsm -相对于一平方米的分贝。

塞斯纳 150L 的长度为 7.34 米，翼展为 10.1 米。这些实验中使用的塞斯纳 172R 的总长度为 8 米，翼展为 11 米。虽然塞斯纳 172 更大，但塞斯纳 150 的 20 dBsm 波束 RCS 被用来设置 RCS 估计的处理参数。

一旦设置了处理参数，数据就被重新处理以提供 RCS 估计。对数据进行再处理，为每条航迹的每一次探测提供 RCS 估计——而不仅仅是圆形飞行路径航迹。

图 6 显示了 MATS PSR 跟踪 ASL 飞行圆形飞行路径的结果。飞行路径的半径分别为 2.7 (5 km)、6、10 和 14 NM。该雷达的长脉冲在这一系列飞行试验中进行了测试，提供了 180 米的距离分辨率。

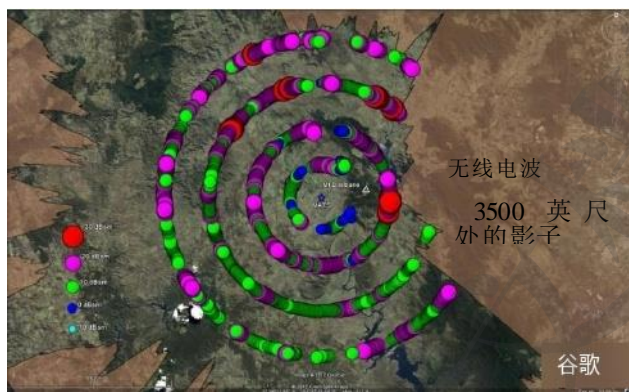


图 6 所示。2010 年 7 月 13 日，ASL 在瓦茨桥机场周围飞行时的 MATS 雷达轨迹。圆形飞行路径的半径分别为 2.7、6、10 和 14 海里。每个符号的颜色和大小表示估计的雷达横截面(RCS)。该键显示每个符号的最小 RCS。红色阴影区域表示 3500 英尺 AMSL 处的无线电波阴影区域。

图中的红色阴影区域显示了 3500 英尺 AMSL 处的无线电波阴影区域。正如预期的那样，ASL 在这些区域没有被检测和跟踪。

飞机探测还取决于信杂波比。在近距离观察到的跟踪间隙来自地面杂波阻止探测 ASL 的区域。由此可见，杂波环境对雷达的探测性能有一定影响。

图 6 显示，大于或等于 30 dBsm 的 RCS 估计值由红色符号表示，红色符号也是最大的符号。

洋红色、绿色、蓝色、青色和白色符号用于表示 RCS “箱”，以 10 dB 的增量表示，低于 30 dBsm。这些 RCS “箱”的符号大小也逐渐减小。

图 7、图 8 和图 9 显示了三个高度下 10 NM 的 RCS 估计。图 7 显示了在图 6 中也显示的 10 NM 时 RCS 估计的细节。

雷达性能测试可能涉及大量的变量。在这些实验中，飞机和飞机“呈现”给雷达的俯仰角保持不变。尽管如此，RCS 被观察到随方位角、距离和高度而变化。观测到的地杂波也随距离和方位角而变化，并影响雷达探测飞机的能力[12,13]。因此，RCS 估计中的一些变化也可能是由地杂波引起的。

3.2 MATS ADS-B 特征

在“智能天空”项目期间，ASL 安装了 1090 MHz ADS-B 传输系统。图 10 显示了 2010 年 7 月 13 日上午 8 点 24 分至下午 2 点 10 分 ASL 的 ADS-B 轨迹。半径分别为 6 NM、10 NM 和 14 NM 的圆形飞行路径很容易区分。10 NM 的圆形飞行路径飞行了三个高度，如图 7、图 8 和图 9 所示。

毫不奇怪，每当 ASL 飞到无线电波阴影区域时，ADS-B 信号就会丢失。最大的接收缺口可能出现在外围 14 NM 的圆形飞行路径上。低空 10 NM 航迹处 ADS-B 信号也丢失。

图 11 为 2010 年 7 月 13 日下午 2:10 - 4:51 ASL 的 ADS-B 航迹。在这一系列的飞行试验中，正在测试雷达介质脉冲的性能。

从图中可以看出，半径为 6 NM 和 10 NM 的圆形飞行路径很容易区分。10 NM 的圆形飞行路径飞行了两个高度。

每当 ASL 飞到无线电波阴影区域时，ADS-B 信号再次丢失。

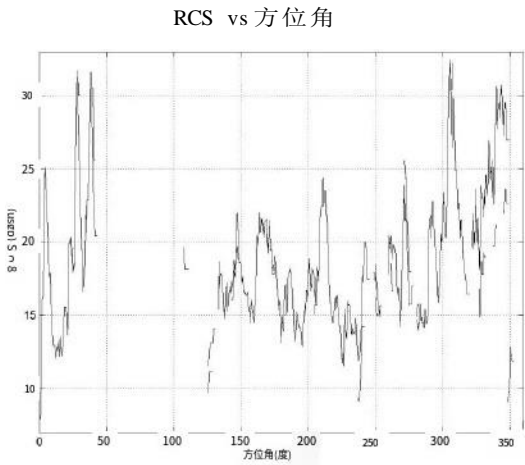


图 7 所示。在 3500 英尺 AMSL 下飞行的 10 NM 半径飞行路径的 RCS 估计。缺失的数据对应于图 6 所示的无线电波阴影。

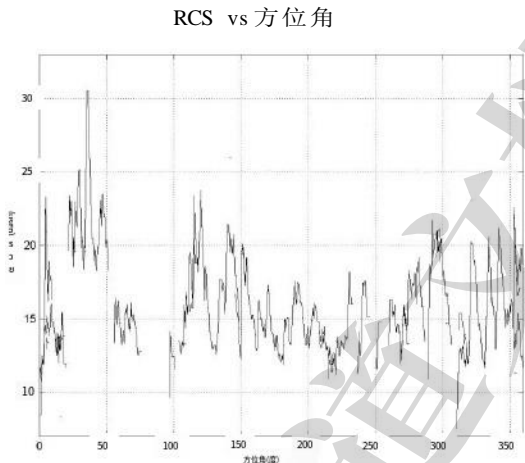


图 8 所示。在 4500 英尺 AMSL 飞行的 10 NM 半径飞行路径的 RCS 估计。

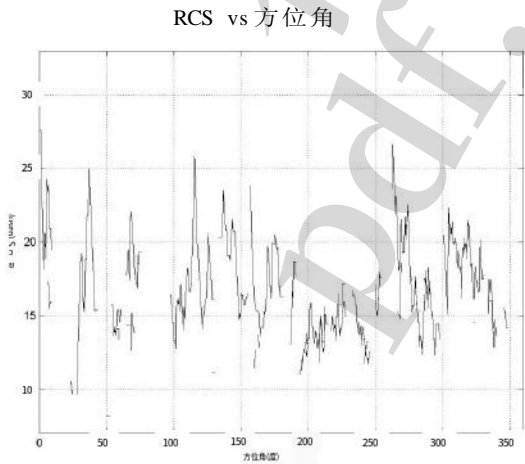


图 9 所示。在 4500 英尺 AMSL(30° 至 100°)和 2400 英尺 AMSL(170° 至 360° 至 30°)下飞行的 10 NM 半径飞行路径的 RCS 估计。在布里斯班山(Mt Brisbane)后面低于 4500 英尺飞行没有任何价值(见图 8)。



图 10 所示。2010 年 7 月 13 日上午 8 点 24 分至下午 2 点 10 分，ASL 的 ADS-B 轨迹。视野向西，朝向 MATS。从瓦茨桥开始，半径分别为 6 海里、10 海里和 14 海里的圆形飞行路径很容易区分。每当 ASL 飞到无线电波阴影区，ADS-B 信号就会丢失。



图 11 所示。2010 年 7 月 13 日下午 2 点 10 分至 4 点 51 分，ASL 的 ADS-B 轨迹。视野向西，朝向 MATS。半径为 6 海里和 10 海里的圆形飞行路径很容易区分。每当 ASL 飞到无线电波阴影区时，ADS-B 信号就会丢失。



图 12 所示。2010 年 7 月 13 日，瓦茨桥机场附近地区装备飞机的 ADS-B 轨迹。ASL 的 ADS-B 航迹也在图中。

ADS-B 接收机提供当地装备飞机的信息。图 12 显示了当天观测到的部分 ADS-B 飞机轨迹。

在上午 8 点 21 分至下午 5 点之间观察到 83 架不同的飞机。的

ADS-B 接收机能够提供 200 海里外装备飞机的信息，远远超出了大多数空中交通管制初级雷达的探测范围。

3.3 支持 “扫描鹰” 作战

Insitu Pacific 目前在瓦茨桥机场开展扫描鹰行动。目前的行动仅限于危险区域 651。其中一个目标是扩大 “扫描鹰” 可以操作的区域。为了扩大这一区域，有必要了解机场周围的交通模式和交通水平，特别是远离飞机可以被目视监控的地方。

图 13 显示了 MATS 在近两个小时的运行过程中检测到的飞机。一个符号被用来标记每条航迹的末端，相关的 “尾巴” 显示了航迹的历史。

雷达的中脉冲被用来捕捉这部分的飞机轨迹，它提供了 45 米的距离分辨率。

图中显示了多种飞机航迹。雷达东北方向 16 海里的航迹，正朝着东南方向飞行，出现在飞往布里斯班国际机场的飞机飞行路线上。

图 14 显示了 MATS 在接下来两个小时的操作中检测到的飞机。可能会再次看到沿着飞往布里斯班机场的飞行路径飞行的飞机，以及各种其他飞机航迹。

图 15 是图 14 的放大图。图中显示了机场附近飞机轨迹的细节。可以清楚地看到在环形区域飞行的飞机的轨迹。也可以看到飞机在机场附近接近、离开和飞行。

上述数字提供了 MATS PSR 提供的信息示例。MATS 能够提供有关目前无塔式机场周围的飞机交通模式和交通水平的信息。

MATS 通常在一个单一的平台提供有关当地空域用户的位置、速度和航向的实时信息

显示:如图 2 所示的 COP。如果有多架飞机需要监控，这种能力对于 UAS 作战尤其有价值。



图 13 所示。2010 年 7 月 6 日上午 10:57 至下午 12:45 从瓦茨桥机场观测到的初级雷达飞机轨迹。每条航迹的末端都有一个符号，相关的 “尾巴” 表示航迹的历史。

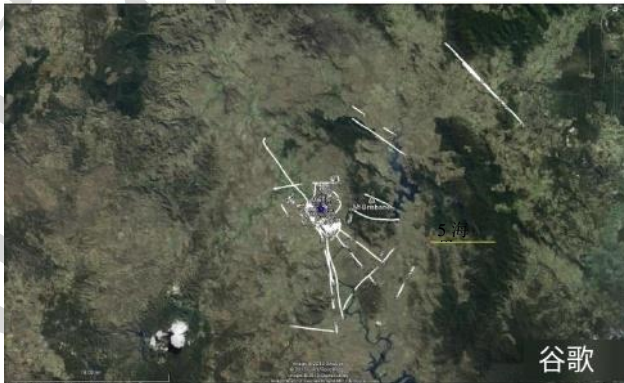


图 14 所示。2010 年 7 月 6 日中午 12 点 45 分至下午 2 点 56 分从瓦茨桥机场观测到的初级雷达飞机轨迹。用一个符号来标记每条航迹的末端，相关的 “尾巴” 表示航迹的历史。



图 15 所示。图 14 中的近程雷达航迹显示了电路(图样)区域内的飞机航迹。

3.4 区分鸟和飞机

除了飞机外，MATS PSR 还能够探测和跟踪鸟类[16,17]。鸟类相对较小的 RCS 意味着，一般来说，它们的探测范围比飞机更有限。

图 16 显示了 1 小时 19 分钟内的雷达轨迹。该图显示，一些较长的航迹来自在环路区域飞行的飞机。

带有橙色尾翼的航迹的平均速度低于 30 节。其中一些可能是鸟类留下的。图中显示，机场西面的轨迹与附近的河流对齐——这是另一个潜在的追踪鸟类的指标。



图 16 所示。2010 年 7 月 13 日下午 2:12 至 3:31 从瓦茨桥机场观测到的初级雷达轨迹。每条航迹的末端都有一个符号，相关的“尾巴”表示航迹的历史。带有橙色尾巴的航迹的平均速度低于 30 节。

图 15 还显示，机场西面的一些航迹位于河边附近，也有可能是鸟迹。

一些航迹特征可能被用来区分鸟和飞机。这些特征包括航迹的速度、位置、RCS 以及时间和空间行为。

区分飞机和鸟类的能力是任何 SAA 系统的重要特征。

3.5 跟踪扫描鹰

标准的 Furuno 雷达天线具有 20° 的垂直波束宽度，覆盖水平方向±10°。在标准天线上增加了天线倾斜系统，可以调节雷达系统的垂直覆盖范围。

图 17 显示了天线倾斜系统设置为提供从 18° 到 38° 的垂直覆盖时，扫描鹰的跟踪结果。在此期间，“扫描鹰”从东北方向顺时针向西北方向飞行。图中显示，“扫描鹰”在位于雷达以西时执行了许多圆形“轨道”。



图 17。2012 年 5 月 30 日上午 8:45 至 9:02，“扫描鹰”无人机在瓦茨桥机场作战期间的 MATS 雷达轨迹。

雷达的中脉冲被用来跟踪“扫描鹰”无人机，它提供了 45 米的距离分辨率。

图 18 显示了图 17 所示雷达航迹的估计 RCS 和其他跟踪信息。该图的数据被脱机重新处理以提取 RCS 估计值。

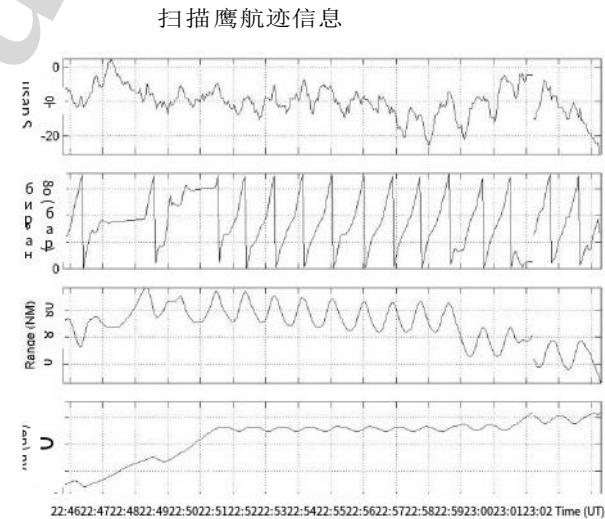


图 18 所示。2012 年 5 月 30 日上午 8:45 至 9:02，扫描鹰无人机在瓦茨桥机场飞行的初级雷达航迹信息。

图中显示，扫描鹰的 RCS 中值约为 -10 dBsm。该图还显示，扫描鹰的 RCS 随着飞机轨道的变化而变化。

随着到“扫描鹰”的距离减小，RCS 估计值在航迹结束时减小——可能是因为飞机接近远场边界。雷达目标的远场存在于距离 R_f 之外，其由：

$$R_f = 2D^2 / \lambda \tag{1}$$

式中 D 为横于视线的最大目标尺寸， λ 为照明无线电波[18]的波长。

对于 9.41 GHz 和 3.11 m 翼展的扫描鹰，远场距离为 0.33 NM。相比之下，8 米塞斯纳 172 的远场距离为 2.18 NM。

跟踪无人机的一个应用是，它们可以为地面传感器提供校准源。通常飞机会记录位置、速度和其他信息，这些信息可用于传感器系统的详细离线分析和调整。

4 讨论

MATS 的性能是用一架专门装备的 Cessna 172R 进行测试的。在一系列实验中，ASL 从瓦茨桥机场出发，在多个范围内飞行了圆形飞行路径。我们并不期望飞机总是绕圈飞行，然而，圆形飞行路径提供了一种控制许多变量的方法，并为 RCS 估计过程提供了校准信息。

估计的速度提供了关于被雷达跟踪的物体能力的重要信息。例如，GA 飞机和大型客机的巡航速度就有明显不同。RCS 估计提供了额外的目标尺寸信息，可用于帮助区分鸟类、车辆、飞机和船舶。

ASL 使 ADS-B 的优势得以展示。MATS 能够在整个过程中独立监测 ASL

飞行试验。ADS-B 接收机还提供了从机场观察到的装备飞机的运动情况。

大约 75% 的国际航班是由 ADS-B 认证的飞机飞行的。大约 35% 的国内航班是由 ADS-B 批准的飞机飞行的。随着澳大利亚多项 ADS-B 授权的生效，ADS-B 批准的国内航班比例预计将迅速上升。2013 年 12 月 13 日，所有在高度层 290 以上飞行的飞机都将要求安装 ADS-B。这对无人机社区的影响是明确的：ADS-B 设备，以及对其他法规的遵守，可能会导致更多的空域进入。

雷达和 ADS-B 航迹提供了 MATS 向 UAS 飞行员提供信息的例子。如果没有这些信息，UAS 飞行员可能无法了解所有的本地空域用户。

通常，使用当地公共交通咨询频率(CTAF)上的甚高频(VHF)无线电通信来协调与该地区其他空域用户的 UA 操作。然而，在 5000 英尺以下的 G 类空域，无线电传输目前并不是强制性的。因此，仅使用无线电通信很难保持飞机之间的“良好畅通”。

视距观察器已被提议提供避碰能力[9]。与观察员一起操作是非常严格的，因为他们的位置不能超过一海里的横向和 3000 英尺的垂直距离 UA。

MATS 提供了同时监视远超出目视观察员提供的范围的多架飞机的能力。MATS 还提供了一种监测传统非塔式机场的交通模式和交通水平的手段。例如，这些信息可以用来帮助证明一些无人机操作区域的扩张是合理的。在未来，此类信息还可用于评估与无人机在新区域运行相关的风险。

在其他地方也有使用 MATS 跟踪 UA 的报道[12,19,13]。跟踪 UA 是

而不是 MATS 的主要任务。GCS 通常提供 UA 位置的实时信息。然而，跟踪“扫描鹰”确实为测试 MATS 增加的一些新功能提供了机会。

跟踪扫描鹰提供了测试天线倾斜系统提供的额外垂直覆盖范围的机会。跟踪“扫描鹰”还提供了获得飞机 RCS 估计的机会。

5 的结论

MATS 是一种 GBSAA 系统，使用初级雷达、ADS-B 接收机和应答器询问器提供有关当地空域用户位置和意图的信息。该信息可由 UAS 飞行员使用，以使无人驾驶飞机与其他飞机保持良好的距离。保持无人机与其他飞机保持良好距离的能力，是在国家空域系统中实现无人机常规和常规化操作的重要一步。

参考文献

[1]澳大利亚运输安全局(ATSB), 《见而避之原则的局限性》, 1991 年研究报告。

[2]美国联邦航空管理局, “无人机系统(UAS)的感知和避免(SAA)”, 2009 年。

[3] D Brookes, “DOD UAS 空域集成计划”, AUVSI 北美无人系统展, 华盛顿特区, 2011 年。

[10] S .Hottman, K .Hansen, M .Berry, “无人飞机系统的探测、感知和避免技术的文献综述”, 2009。

[5] M. Contarino, “用于无人机系统的全天候感知和规避系统”, 2009 年。

[6] A Lacher 等人, “无人飞机的空域集成替代方案”, 载于 AUVSI 的《亚太地区无人系统》, 2010 年 2 月, 第 1-19 页。

[7]国防部副部长, “提交给国会的关于无人机进入国家空域的最终报告”, 国防部, 2010 年。

[8] R Clothier 等人, 《智能天空项目》, 《IEEE 航空航天与电子系统杂志》, 第 26 卷, 第 2 期。6, pp. 14-23, 2011。

[9]美国联邦航空管理局, 《美国国家空域系统中的无人机系统运行》, FAA 临时运行批准指南 08-01 FAA/AIR-160, 2008 年。

[10] P Weber, A Premji, T Nohara 和 C Krasnor, “用于国土安全应用的内河航道低成本雷达监视”, IEEE 雷达会议, 费城, PA, 2004 年, 第 134-139 页。

[11] D Greer, R Mudford, D Dusha 和 R Walker, “用于自动化研究的机载系统实验室”, 载于美国航空航天学会国际理事会《航空科学》(ICAS), 尼斯, 2010。

[12] M Wilson, “支持无人机操作的移动飞机跟踪系统”, 载于第27届 ICAS 大会论文集, 尼斯, 2010。

[13] M Wilson, “用于小型 UAS 的低成本移动雷达系统的感知和避免”, 载于《UAS 中的感知和避免: 研究与应用》, A 平面, Ed.: John Wiley & Sons, 2012, 第 11 章, 第 384 页。

[14] T J Nohara, R C Beason 和 P Weber, “使用雷达横截面增强机场鸟类雷达的态势感知工具”, 《人类与野生动物的相互作用》, 第 5 卷, 第 5 期。2, pp. 210-217, 2011。

[15] M V Patriarche, G O Venier 和 J R Lewis, “轻型飞机的雷达可探测性”, 加拿大通信部通信研究中心, CRC 报告 1291,1976。

[16] T Nohara 等人, “用于自然资源管理和 BASH 应用的可负担得起的鸟类雷达监视系统”, IEEE 国际雷达会议论文集, 2005 年第 10-15 页。

[17] T J Nohara, “减少鸟击——新型雷达网络可以帮助使天空更安全”, 《空中交通管制杂志》, 第 51 卷, 第 5 期。第 3 期, pp. 25-32, 2009。

[10] M Skolnik, 雷达手册, 第三版, McGraw Hill, 2008。

[19] M Wilson, “他们来了!移动飞机跟踪系统如何协助无人机操作,” AUVSI 的北美无人系统, 华盛顿特区, 2011 年。

致谢

非常感谢 Insitu Pacific Limited 在提供 MATS 方面的支持。

“智能天空”项目在一定程度上得到了昆士兰州政府“智能国家资助计划”的支持。

版权声明

作者确认，他们和/或他们的公司或组织拥有本文中所有原始材料的版权。作者还确认，他们已获得本文中包含的任何第三方材料的版权所有者的许可，将其作为其论文的一部分发表。作者确认，他们已授权或已获得本文版权所有者的许可，将本文作为 ICAS2012 会刊的一部分或作为会刊的个别印本出版和分发。

有道文档翻译
pdf.youdao.com