

低空中小型无人机机载导航传感器选型报告

——孙沁璇, 2022.12.27

一. 概述

1. 调研背景

近几十年来,无人机(UAV)相关产业发展迅速,广泛应用于军事和民用领域,如搜索和救援、无线传感器网络和物联网(IoT)、遥感、监视和监控、3D 测绘、物体抓取和空中操纵、地下矿山勘探和隧道检查等。随着无人机任务的复杂性不断增加,特别是为了实现完全自主操作,开发无人机的挑战不断增加。此外,许多应用要求无人机在未知和动态环境中自主操作,它们需要完全依赖机载传感器来了解其所在的环境,并有效地完成任务。自主导航问题通常可以定义为无人机在没有人干预的前提下,到达目标位置,同时避免与周围环境的碰撞的能力。这是一个非常具有挑战性的问题,而实现安全航行以避免造成损害或伤害非常重要。与无人地面车(UGV)和无人水下车(AUV)相比,为了确保可靠性和鲁棒性,现有无人机相关技术的局限为自主导航方法的开发增加了更多的复杂性。这方面的例子包括对传感能力、允许的有效载荷能力、飞行时间、能量消耗、通信、驱动和控制努力的限制。开发高效和先进的智能导航方法对最小化这些因素的影响起着至关重要的作用。

之江实验室北京研究中心智能导航研究团队重点开展无人机智能组合导航技术的研究,在充分了解国内外先进无人机导航系统与算法的基础上,进行无人机智能导航算法的研究与开发,承接国家重大项目及课题。目前,智能导航团队

已承担并参与了多个相关项目，具体项目信息如下表所示。

	姓名	项目名称	项目性质及来源	总经费	国拨	参与角色	进展情况
1	施航	组件化弹性集成导航与控制关键技术及应用验证	科技部 2022 年国家重点研发计划“地球观测与导航”重点专项	1794 万	477 万	课题负责人	已批复立项
2	施航	基于大阵列传感器的仿生嗅觉导航技术研究	ZF 快速扶持项目（第二阶段）	300 万	50 万	课题负责人	已批复立项
3	施航	XXX 组合导航 XXX 系统	ZF2022 年度共用信息系统预研（基础类项目）	950 万	100 万	课题负责人	已提交材料
4	缪锐	面向 XXX 的 XXX 导航技术	KGJ 国防基础科研计划（基础前沿寻宝）	400 万	200 万	项目负责人	已批复立项
5	朱琦	基于因子图的 XXX 导航系统	ZF 快速扶持项目（第一阶段）	50 万	50 万	项目负责人	已批复立项

在项目筹备阶段，基于项目需求和团队发展需要，调研并总结了目前低空中小型无人机平台以及机载导航传感器的国内外厂商与型号，进行了详尽的功能描述和性能对比，形成“低空中小型无人机机载导航传感器选型报告”。本报告旨在为智能导航研究团队后续平台搭建与设备选型提供必要的依据和参考，为多种组合导航算法的功能验证准备必要的硬件平台，进一步支持课题组在无人机组合导航技术方面的研究工作，也为相关项目的算法开发工作奠定基础。

2. 调研内容

本报告主要涉及低空中小型无人机平台以及各种机载导航传感器的可选型号调研，主要包含以下内容：

- 无人机平台：目前的无人机平台有多种类型，可以适应不同的无人机作业任务，本报告主要关注无人机平台的各项基础性能指标，以最大程度满足后续算法开发与试验需求；
- 相机传感器：视觉传感器通常可以提供最丰富的纹理和语义信息，是智能导航系统的重要传感器配置之一，本报告列出多种型号的高性能以及

高紧凑性相机传感器，主要关注成像质量以及集成度等指标；

- 惯性传感器：惯性测量单元(IMU)是无人机导航系统的基础必备传感器之一，因其测量值不依赖于外部环境，具有相对较强的稳定性和鲁棒性，本报告调研工业级与战术级的高精度 IMU/AHRS/INS 传感单元，并重点筛选集成度较高的 MEMS 测量单元，以最大化无人机负载的利用率；
- 激光雷达传感器：激光雷达传感器可以通过稠密点云的形式对环境的几何结构信息进行恢复，可以直接完成三维环境的重构，在低空无人机应用中有着重要的应用，本报告对目前常用的激光雷达传感器进行总结；
- 卫星导航传感器：全球卫星定位系统是消除无人机导航中累计误差的重要途径，可以实现全球范围内的绝对定位，在支持 RTK 时甚至可以达到厘米级定位精度。本报告对高精度、高集成度的 GNSS 接收机进行调研，并分析可选型号的相关性能；
- 磁强计传感器：磁强计传感器是一种用来测量地磁场强度和方向的装置，通过对地磁信号分布的分析来实现定位和导航的功能；
- 气压计传感器：气压计是一种测量大气压力进而获得飞行器高度信息的设备，在通用航空飞行上有着广泛应用；
- 无线电高度表：无线电高度表，也称雷达高度表，是通过计算无线反射时间来测量飞行器高度信息的仪器。

二. 无人机平台

1. 无人机平台概述

无人驾驶飞行器(UAV), 或称无人机, 是在没有人类飞行员的情况下远程或自主操作的飞行器。无人机被广泛应用于民用和军事领域, 降低了传统有人驾驶飞机中固有的风险, 并在不受人类飞行员限制的情况下提供更高的性能。一个常见的应用场景是远程观测或监视, 如自然资源勘探、救灾、野生动物保护、考古调查和其他科学研究。无人机也被用于军事行动的后勤、侦察和战斗攻击。

无人机有许多定义其性能的关键属性, 包括:

- 重量-包括所有车载系统, 以及燃料或电池;
- 最大上升速度-飞行器在大气中上升的最高速度;
- 最大下降速度-飞行器在大气中向下移动的最高速度;
- 最大速度-最高水平速度可达到的级别;
- 最大高度-高于海平面最大高度上限;
- 最大飞行时间-飞行器能够飞行的持续时间, 由动力消耗和可用燃料或动力储备决定;
- 工作温度-飞行器可以工作的环境温度范围;
- 悬停精度-垂直高度和水平距离内, 车辆可以保持其位置相对于目标位置的精度;
- 尺寸——飞行器的长度、宽度和高度的空间尺寸, 除了具体的测量如翼展、对角线尺寸、螺旋桨直径等。

无人机有各种各样的设备, 它们一起工作以完成无人机操作员所要求的任务。

大型无人机通常由传统飞机发动机提供动力，而小型无人机通常由锂离子电池提供动力。板载计算硬件可包括片上系统(SOC)集成电路或单板计算机(SBS)。无人机传感器用于捕捉外部环境和自身系统内部运行状态的数据。这些信息被自主控制系统用来执行飞行程序或转发给远程操作员操作飞行器。通信系统在飞行器和地面控制站之间传输数据。射频系统发送和接收诸如系统状态、位置和视频等信息。无人机软件控制无人机的各种功能，包括固件、中间件和整体操作系统。固件由处理器处理机器指令的低级执行，中间件负责导航和飞行控制等功能，而操作系统执行处理器密集型功能，如避障和决策。

许多无人机具有人工智能的自主导航与控制能力。无人机通过接受传感器数据，通过多个控制回路发起行动，提供了不同程度的自主权。底层控制算法包括管理飞行稳定性和机动性、数据通信和功率分配。第二层规划算法包括系统管理、导航和路径规划。最复杂的自主控制包括任务规划和认知自主，允许无人机在几乎没有外界指导的情况下制定和改变战术和战略目标。

无人机的应用非常广泛，包括军事、商业和娱乐功能。军事应用包括侦察、攻击、防御和训练目标。民用应用包括娱乐和业余用途、商业或专业空中监视、电影拍摄、新闻、执法、搜索和救援、研究、保护、污染监测、石油和天然气测量、救灾、农业、考古和货物运输。

2. 无人机选型

如今无人机的应用非常广泛，从空中监视和艺术拍摄到工业设施的检查 and 测绘。除此之外，无人机还经常用于一些重要的任务，如监测野生动物的自然栖息地，研究火山或冰川，搜索和救援行动等。无人机的分类取决于它们的设计，这

反过来影响它们的性能特征。当选择最合适的无人机类型，决定将使用无人机承担什么任务是必要的。根据购买无人机的工作类型，可以考虑几个基本特征。

1) 飞行时间

这是无人机的关键特性之一，决定了在一次飞行中能够覆盖的范围，从而决定了工作的经济效率。通常情况下，飞行时间是指在最有利的条件下(无风，温度+20°C)的最大飞行时间。飞行时间应与运载能力和起飞重量一起考虑，负载能力影响安装不同有效载荷和附加设备的能力，飞行器重量影响无人机在空中的稳定性，因此飞行器重量越大，其轨迹越稳定，图像质量越高。

2) 有效载荷

无人机可以配备不同类型的有效载荷，如相机、热成像仪、磁强计、气体分析仪或激光扫描仪等。根据任务和所需数据类型，选择有效载荷类型和无人机类型。许多无人机可以提供不同的有效载荷，但不是所有有效载荷都可以由操作员更改。如果选择可互换有效载荷的无人机，需要确保替换时不需要额外的工具，并且电子设备可以自动检测有效载荷的类型，并且可以在没有任何额外设置或刷新的情况下进行控制。

3) 可靠性和可移植性

可靠性首先取决于所使用的材料。它们应该足够轻和坚固。复合材料提供了必要的刚度和强度，但可能没有足够的灵活性和鲁棒性来承受沉重的冲击载荷。高分子材料能够承受冲击，在变形的情况下不断裂，并保持其形状，但不能提供结构刚性。因此，聚合物与复合材料的结合使用是最好的解决方案。

无人机可移植性是通过诸如折叠框架或模块化设计等解决方案实现的。无人机可以放置在一个坚固的手提箱和汽车后备箱运输是最方便的。

4) 易于使用和安全

在选择无人机时，应考虑到操作人员和执行飞行任务的人员和财产的安全。最好选择具有智能控制的应用程序和内置安全功能的无人机。这些功能包括电池水平和无线电通信质量的预警系统，自动飞行任务可行性测试，当连接断开或电池电量极低时自动返回起点。另一个重要的功能是设置与起点的最大距离的能力，方便创建一个无人机不能离开的虚拟边界，这将确保工地附近地区的财产和人员的安全。这些安全特性大大降低了与无人机操作相关的风险。

5) 操作条件

无人机的另一个重要特征是它可以飞行的天气条件，以及它在飞行时的性能质量。如果购买的无人机只设计在接近理想的条件下飞行，风速、降水和气温会极大地限制工作性能。如果需要在恶劣的环境中使用无人机，如在山区或在非常低或高温，很可能你将需要专门适应这些条件的无人机平台。

6) 地面控制站

地面控制站(GCS)是无人机非常重要的部分，它的功能在很大程度上决定了无人机的特点。首先，GCS 应该为创建飞行任务提供简单的工具。在用户指定的拍摄区域，航拍的飞行路径应该自动生成。除此之外，它应该可以设置所需的分辨率，图像重叠的百分比，飞行速度和着落点。

同时，地面控制站不仅需要创建飞行任务，还需要对飞行中的无人机进行控制。在 GCS 的帮助下，操作员可以监视飞行任务的执行，按给定点规划飞行或控制有效载荷，并在必要时取消任务。除此之外，许多无人机用于空中监视广播他们的相机图像到 GCS 屏幕在线。

7) 无人机的成本

价格是选择无人机的一个重要因素，但不要把无人机的成本与上面列出的特点分开考虑。从操作和维护成本的角度来看，购买模块化单元更划算，因为更换或修理一个单独的部件更为便捷。在比较无人机价格时，应注意无人机的可维护性、备件的可获得性和部件的使用寿命。如果不能在现场自行进行一些小的维修，一个小的故障就可能破坏一次飞行任务，这意味着未完成的工作和由于设备停机造成的金钱损失。

3. 可选无人机平台

model	type	max. velocity	max. altitude	max. duration
DJI Matrice M30	quadrotor	23 m/s	7000 m	41min
DJI Matrice M300 RTK	quadrotor	23 m/s	7000 m	55 min
CHC Navigation P330 PRO	fixed wing	21 m/s	6000 m	160 min
CHC Navigation BB4	quadrotor	14 m/s	5000 m	55 min
普宙科技 S400	quadrotor	23m/s	7000m	63min
Geoscan 401	quadrotor	50 km/h	500 m	60min
Geoscan Gemini	quadrotor	54 km/h	4000 m	40 min
Skydio 2+ (for Enterprise)	quadrotor	36 mph	4500m	27 min
Skydio X2™	quadrotor	25 mph	3600m	35 min

表中所列型号的具体性能对比、报价及网址信息, 详见“附件 1.xlsx”中的“UAV”
表单。

1) DJI Matrice M30 系列



特性:

- 最长飞行时间 41 分钟
- 抗风能力 15 米/秒
- 最大飞行高度 7000 米

➤ 最大飞行速度 23 米/秒

无人机具备 IP55 防护等级, 工作环境温度范围达 -20°C ~ 50°C, 可轻松应对极端恶劣环境。机身 6 向都具备双目视觉及近红外传感器, 全方位避障, 保障飞行安全。内置 ADS-B 信号接收器, 可及时预警周边载人飞机信息。机身高度集成, 收纳体积小, 方便携行。可随时出发, 快速部署。

导航传感器方面, 高度集成了广角、变焦、热成像 (仅 M30T 含) 及激光测距传感器。

➤ 广角相机

- 等效焦距: 24 毫米, 视角 (DFOV) :84°
- 1/2" CMOS 传感器 1200 万有效像素
- 4K/30 fps 视频分辨率

➤ 变焦相机

- 1/2" CMOS 传感器 4800 万有效像素
- 5 倍~16 倍 光学变焦 最大 200 倍混合变焦
- 8k 照片 4K/30 fps 视频分辨率

➤ 热成像相机

- 等效焦距: 40 毫米
- 分辨率: 640×512@30Hz
- 测温精度: ±2°C 或 ±2%

➤ 激光测距仪

- 测量范围: 3 ~ 1200 米
- 精度: $\pm(0.2m+D\times 0.15\%)^7$

2) DJI Matrice M300 RTK



特性：

- 15 公里图传距离
- 55 分钟最长飞行时间
- 六向定位避障
- IP45 等级防护
- -20°C ~ 50°C 工作温度
- 55 分钟 最长飞行时间
- 7 米/秒 最大倾斜下降速度
- 7000 米 最大飞行高度
- 15 米/秒 抗风能力
- 23 米/秒 最大飞行速度

全新 OcuSync 行业版图传系统，远达 15 公里的控制距离，可实现三通道 31080p 图传。支持 2.4/5.8 GHz 双频通信，作业过程中自动实时切换至最佳信道，复杂环境下依然能有效抵抗干扰。配备 AES-256 图传加密技术，始终保障数据传输安全。支持 LTE 备份链路，进一步提高了图传可靠性。

经纬 M300 RTK 提供下置双云台、上置单云台和 Onboard SDK 开放接口。

最多可同时支持三个负载，最大载重达 2.7 公斤。

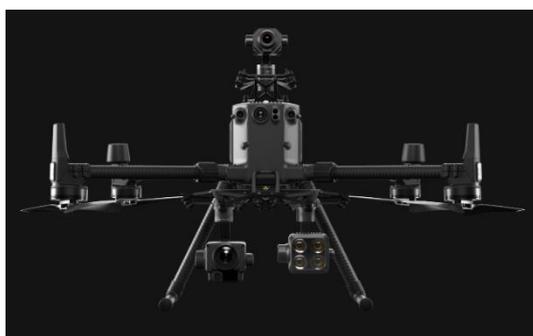
下置单云台：



上置单云台 x 下置单云台：



上置单云台 x 下置双云台：



(a) 智能巡检

通过在线任务录制，可实时录制飞行器运动、云台俯仰、照片拍摄、变焦等多种动作，并可将其存储为航线文件，在未来的自动巡检任务中随时调用。AI 加持的精准复拍功能，大幅提升了自动化任务的准确性。完成在线任务录制后，从样片中框选出目标区域，在随后的自动化任务中，AI 算法会自主比对目标区域

和当前的实时画面，据此纠正相机的拍摄角度，从而每次作业都能拍到同一目标区域。通过航点飞行 2.0 智能航线规划模式，可设定多达 65,535 个航点，并支持单个负载或多个负载（包括第三方负载）在每个航点执行多个动作。此外，航点飞行 2.0 的飞行路径设定方式更加灵活，大幅提升自动化任务效率。

(b) 智能定位跟踪

在相机画面或地图上 一键标记静态目标，即可自动解算出其精确的位置信息，并以 AR 图标的形式投射到所有图传画面中。位置信息将自动分享至另一个遥控器，并可通过大疆司空 8 等在线平台共享给团队其他成员。

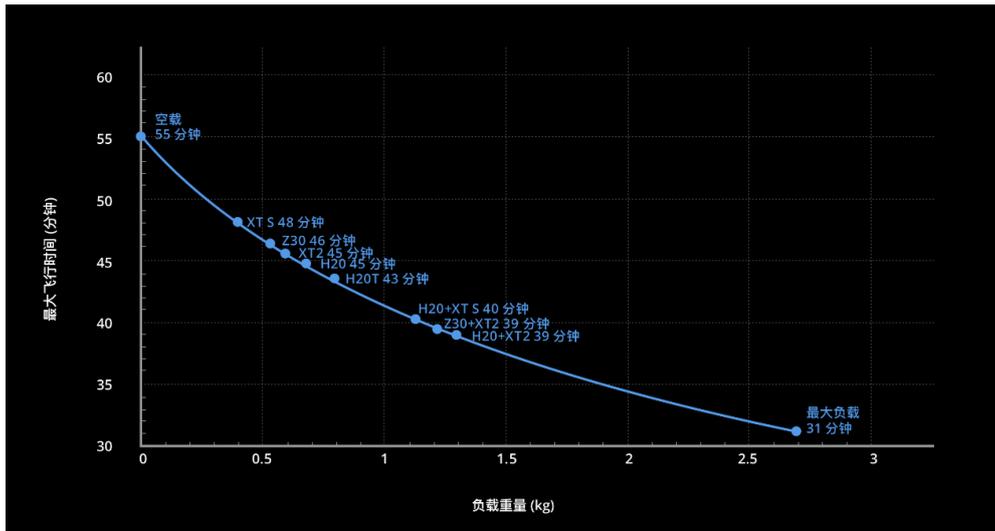
针对人、车辆和船只等移动中的目标，可实现自主识别、定位并持续跟踪。辅以自动变焦功能，目标将始终处于画面中心位置，并保持合适比例以便查看。同时可通过另一个遥控器或大疆司空 8 将目标信息共享给团队其他成员。经纬 M300 RTK 引入全新的飞行辅助界面，将飞行参数、导航、障碍物地图等多维度的关键信息整合至同一界面，赋予作业人员强大的态势感知能力。

(c) 强大的视觉系统

为提升飞行安全性及稳定性，大疆行业级无人机首次将双目视觉和红外传感器同时引入到机身的六个面上，带来全六向环境感知及定位、避障能力。系统最大探测范围达 40 米，并支持通过 DJI Pilot App 自定义避障距离。即使在桥底水面等复杂作业环境下，也可保证稳定飞行和避障。

(d) 飞行时间

配置不同的负载，预估经纬 M300 RTK 的飞行时间



3) 普宙科技 S400



S400 无人机拥有行业领先的中继组网技术，支持“一控二”、“二控一”、“星型组网”等多种模式。面对长距跨越、障碍跨越，如隔山头，建筑绕飞，甚至是无网络区域，仅需通过一台 S400 无人机做信号接力，即可突破常规无人机的作业边界，从容应对复杂地形。

视觉避障+毫米波雷达双避障融合技术，赋予 S400 昼夜间全向环境感知及避障能力，实现夜间避障和高压线避障最大有效探测距离高达 80m, 安全高效、行稳致远。

普宙 S400 63min 超长续航带来更强劲的作业实力。相比传统机型，在执行等量任务时，可显著减少换电次数，有效提升任务执行效率。拥有三公斤的超级载重能力，可以同时搭载多重载荷以满足电力、消防、环保、执法、社会综合治理等不同行业的专业化作业需求。



双光云台中的红外分辨率达 1280*1024, 可见光支持 4K@30fps 超高清录像, 4800 万像素高清拍照, 细节毕现。“可见光+红外”双通道一次性叠加成像, 边际及轮廓细节更加清晰。57.5°×47.4°宽视场角, 同等距离下拥有更丰富捕捉角, 可以拍摄到更宽阔的画面, 杜绝拍摄“死角”。



S400 搭载的四光云台, 自带 21TOPS 算力, 对目标识别、运动分析、图像处理的运算速度及准确性有极大提升, 可用于电力缺陷识别、人脸识别、移动侦测等。

4) CHC Navigation P330 Pro



P330 Pro 是一款高性能垂直起降固定翼无人机系统(UAS)，专为航空测绘应用而设计。它具有高精度、长寿命和多重载荷的概念，满足了测绘和航测专业人员多种不同应用的需求。P330 Pro 具有高效的气动设计，可以在单次飞行中覆盖更大的区域。它的飞行时间长达 150 分钟，可以在 1:2000 的比例尺上精确绘制 20 平方公里的区域。

P330 Pro 无人机可以用于进行小型和大规模的空中巡航，数据质量极高，并在显著时间内节省成本。在测绘、采矿、建筑和基础设施、环境监测、农业等方面，它是有人驾驶飞机的替代品。

P330 Pro 配备了最新的航空技术。双 GNSS 系统、三 IMU 系统、双天线定位定向、5 种安全返回基地策略、9 种安全监测检查，确保飞行安全运行和可靠的航测结果。

P330 Pro 集成了高精度 GNSS RTK / PPK 模块，具有高达 100hz 的差分数据更新速率。凭借先进的 GNSS PPK 数据处理和摄影测量软件，最终测绘结果精确到厘米级。避免建立地面控制点也可以节省多达一半的项目所需时间。用更少的实地工作人员进行更快的数据采集大大增加了任务的投资回报。

P330 Pro 不仅可以使使用正射影像相机制作正射影像图，还可以使用可选传感器，如用于 3D 建模应用的斜相机，以解决最苛刻的测绘和地形调查。负载舱

设计支持广泛的传感器，包括正射影像相机、半帧和全帧倾斜相机、中帧相机、多光谱相机或轻型激光扫描仪，并能够在它们之间快速切换。



PAYLOADS

	α7RII	α7RIV
Number of CMOS	1	1
Sensor size	Full frame (35.9 x 24 mm)	Full frame (35.9 x 24 mm)
Pixel	42 MP	61 MP
Storage	64 GB	64 GB
Operating Temperature	0°C ~ +40°C	0°C ~ +40°C
Power Supply	Independent or flight control power supply	Independent or flight control power supply
Weight	582 g (Host only)	580 g (Host only)
	DG3	DG4 Pro
Number of CMOS	5	5
Sensor Size	APS-C, 23.5 x 15.6 mm	Full frame (35.9 x 24 mm)
Pixel	120 MP (in total)	210 MP (in total)
Exposure Interval	≥ 0.8 s	≥ 0.6 s
Storage	640 GB	640 GB /1280 GB
Power Supply	Powered by drone	Powered by drone
Weight	870 g	960 g

5) CHC Navigation BB4



BB4 是一款高端无人驾驶飞机系统，由两家各自领域的行业领导者联合而成。其科学的设计和高度集成的生产技术来自 CHCNAV——一家专门从事高效地理空间测量技术的全球制造商——其全自动飞行控制系统来自商用无人机制造的

先驱大疆。

BB4 是垂直起降四旋翼无人机系统(UAS)，用于专业和工业成像应用。无人机可以携带该厂商 CHCNAV 激光雷达扫描仪和 DSRL 相机，用于高精度 3D 点云生成，用于 3D 摄影测量的斜向相机，或用于工业和农业应用的多光谱成像仪。安装时间仅为两分钟，多用途 BB4 提供长达 55 分钟的飞行时间与 1 公斤有效载荷，和高达 40 分钟与 5 公斤有效载荷。该机由大疆 Lightbridge 2 飞行控制器控制，具有 5 公里的工作范围和低延迟、高可靠性的无线高清图像传输。

激光雷达的重量对任何无人机都是一个限制。BB4 可以携带同厂商生产的 CHCNAV 扫描仪与不同的 DSRL 相机。三维摄影测量是可能的斜相机系统。用户还可以安装多光谱相机。



BB4 配备了双大疆 A3 IMU 和 GNSS 单元，配合 CHCNAV 先进的定位解决方案，包括一个高端的 GNSS 接收器和一个行业领先的 IMU，以满足测绘行业的高精度要求。

Supported payload	
RGB camera	CHC AS-C420 (calibrated Sony A7 RII) 7952 x 5304, 42.4 MP, 5 fps
	CHC AS-C240 (calibrated Sony A6000) 6000 x 4000, 24.3 MP, 11 fps
	Other sensors, but request factory customisation and calibration
LiDAR	CHC AlphaUniXXX series Riegl miniVUX and VUX-1 based scanners
	CHC ASXXXseries
	3rd party LiDARS ≤7 kg weight

6) Geoscan 401 Lidar



Geoscan 401 Lidar 系统是为激光扫描和即将开发的数字地形模型或特定对象的模型而设计的。无人机(UAV)可以从半径 5 米的地点起飞，在有限的空间内作业，并精确重构地形。它携带一个内置 GNSS 接收器的 AGM-MS 激光扫描仪，并可选择连接到索尼 A6000 相机。这种结合提供了同时进行航空摄影测量和激光扫描的机会。为了提高三维物体的精度和细节，可以对基于两种测量方法创建的稠密点云进行复合。

无人机能够在空中飞行 40 分钟，并达到 50 公里/小时的速度，每一次飞行可以进行了 1.7 平方公里的航拍测绘。

激光雷达能有效生成密集的点云，即使是在林区，也能保证精确的地形重建。摄影相机和激光雷达的同时工作提供了创建高度详细的 3D 模型。Geoscan 401 激光雷达系统可有效地对垂直表面(建筑面)、森林、高大树木或高海拔差地区(铸矿、山区)进行空中测量，按照指定的路线自动进行激光扫描。测绘数据可用于开发带有地理标记的正射影像图、三维和数字地形模型。

根据客户的具体要求，可配备 AGM-MS1 或 AGM-MS3 激光扫描仪。

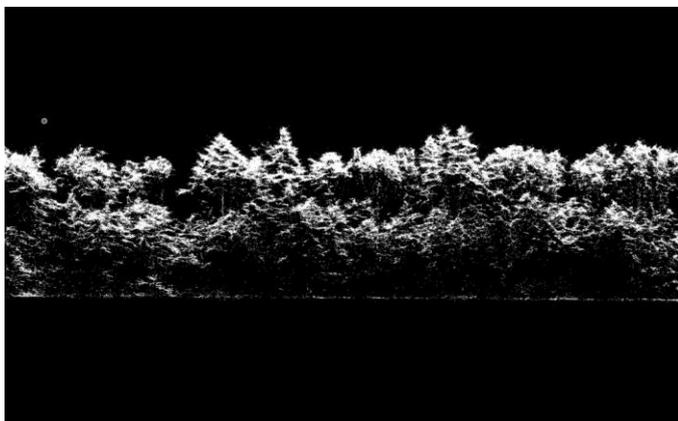
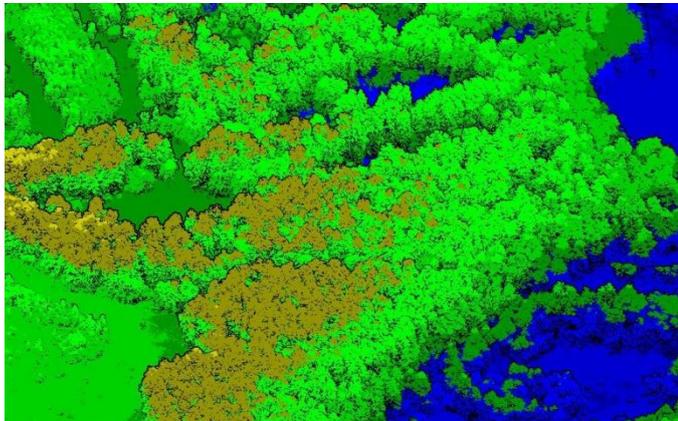
AGM-MS1 激光扫描仪：用于无人机的高性价比高精度激光扫描仪可与外部摄影相机或热成像相机配合使用。

➤ 数据采集速率:高达 600khz;

- 射程:可达 200 米;
- 射程精度:3 厘米;
- 空间精度:3-5 cm;
- 工作温度:-10…+ 55°C。

AGM-MS3 激光扫描仪：用于无人机的高精度激光扫描仪可与外置照相照相机或热成像照相机配合使用。

- 数据采集速率:高达 600khz;
- 射程:可达 200 米;
- 射程精度:3 厘米;
- 空间精度:3-5 cm;
- 工作温度:-10…+ 60°C。



7) Geoscan Gemini



无人机性能：

- 低至 5 厘米的水平精度
- 最多 40 分钟飞行时间
- 每次飞行测量范围为 150 公顷，GSD 为 3 厘米/像素
- 20.1 万像素摄像头与 APS-C 图像传感器
- 飞行距离可达 30 公里
- Geoscan 规划器

航空摄影地图输出形式：

- 三维点云
- 数字地面和地形模型(DSM, DTM)
- Orthomosaic 地图
- 被测区域物体三维纹理多边形模型

Geoscan Gemini 内置高精度 GNSS 接收器可与 GPS/GLONASS 系统在 L1/L2 频率下运行。它允许使用 PPK/PPP 方法实现 1.5cm 的投影中心坐标精度。

Gemini 的 2000 万像素 APS-C 图像传感器保证了最佳的图像质量。索尼

UMC-R10C 可以拍摄高质量的照片，噪音更小，动态范围更高，即使在低光条件下，每天获得更多的飞行小时。

在 Geoscan Planner 规划器中管理飞行任务，用于测量区域和线性对象，使用各种飞行模式(按点、基于地形等)。导入 kml 和 kmz 文件，使用不同的制图基地，控制飞行，并在与无人机工作时调整任务。飞行完成后，该软件会创建一个带有照片瞬间时间戳的 rinex 文件。

8) Skydio 2+ for Enterprise



特性：

- 主相机 4k 60 HDR / 12 MP
- 主处理器 NVIDIA Tegra X2 SOC
- 人工智能 9 个深度网络，360°避障
- 速度 36 英里每小时
- 电池 27 分钟
- 范围(至) 6 公里

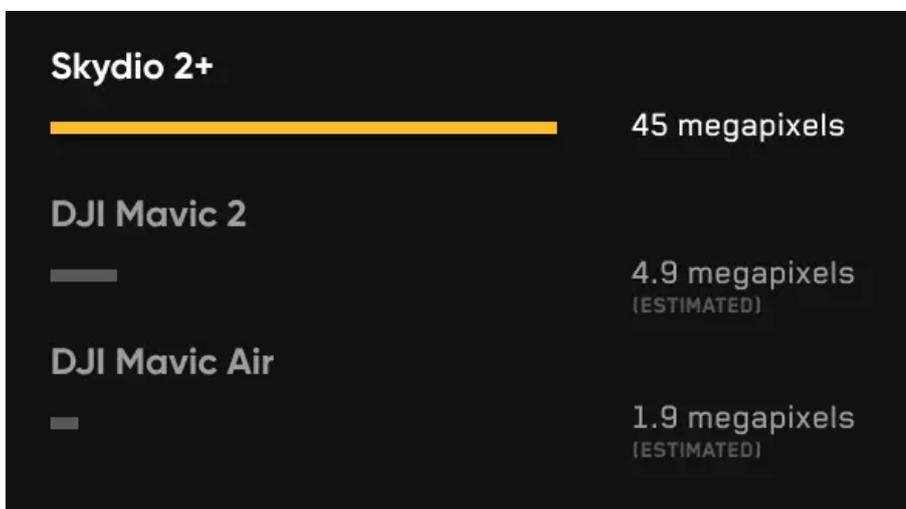
Skydio 2+使用 6 个 4k 200°导航摄像头可以看到各个方向，使用机载 AI 了解周围的世界，并做出智能决策，自主飞行 360°障碍物规避，即使在没有 gps 的环境中也正常运行。

Skydio 2+ 搭载了索尼 IMX577 1/2.3 英寸 CMOS 传感器和高通

RedDragon™QCS605 的专业相机, 通过细致的色彩调整, 提供 12MP 照片和 4K60 HDR 视频。结合飞近自信的能力, Skydio 2+ 产生卓越的图像和镜头不需要后期处理。



利用来自 6 个 200 度彩色相机的 4500 万像素的视觉数据, Skydio 2+ 可以以前所未有的分辨率和清晰度看到各个方向。这是值得信赖的自主飞行的基础。



Skydio 2+ 的核心是 NVIDIA Tegra TX2, 这是目前最快、最节能的嵌入式 AI 计算设备, 每秒可执行 1.3 万亿次操作。Skydio 2+ 是市场上最先进的飞行超级计算机。

9) Skydio X2™



特性:

- 自主 360°避障
- 相机 4K60P HDR 彩色+ FLIR®320p 热成像
- 晚上操作 GPS 飞行+闪光灯照明
- 无线范围 6 公里(5GHz)*或 10 公里(1.8GHz)

Skydio X2 使用 6 个 4k 200°导航摄像头观察各个方向，使用运行在 NVIDIA TX2 上的机载人工智能了解周围的世界，并做出 360°避障飞行的智能决定。

便捷性:

- 可折叠手臂，便于携带
- 快速部署的天线
- 整个系统在 75 秒内从装载到起飞

坚固性:

- 机身结构基于镁和碳纤维复合材料
- 利用 Arris 复合材料添加剂成型™技术的机身元素，导致更轻的重量，更坚固的结构

负载选项: .

- 相机/热成像仪

- 4K60P HDR 彩色相机，16 倍数字变焦
- 彩色镜头与~46°HFOV，适合与较长的对峙距离的态势感知
- FLIR®玻色子 320 x 256 红外相机，8 倍数字变焦

➤ 相机

- 4K60P HDR 彩色相机，16 倍数字变焦
- 广角彩色镜头与~80°HFOV，理想的详细近距离检查。

10) 卓翼智能 TS-X4/X6

TS-X4 轻型双模式四旋翼无人机，采用碳纤维一体成型工艺，机臂可折叠设计，小巧轻便，快速更换。



TS-X6 天枢中型双模式六旋翼无人机，采用碳纤维一体成型工艺，机臂快速插拔设计，抗风能力 6 级以上，对极端天气均能应对自如，适合执行复合飞行任务。



两种机型均可进行系留飞行和自由飞行双模式工作，可随需灵活更换，满足客户不同需求。系留飞行时间 $\geq 12\text{h}$ ，自由飞行时间 $\geq 75\text{min}$ 。可挂载光电吊舱、照明灯、喊话、有害气体监测等载荷模块，支持现场快拆更换。

应用场景：

(a) 搜救

结合系留无人机地面持续供电，长时滞空飞行的优势，通过挂载光电设备，可对地面进行居高临下的长时间、多角度、大范围监控，获取目标区域更为全面的图像信息，快速进行搜索救援。



(b) 气体检测

结合系留无人机地面持续供电，长时滞空飞行的优势，通过挂载有毒有害气体检测仪，进行突发性事件毒气危险识别和浓度监测，对监测区域进行有效管控。



(c) 物资抛投

结合系留无人机地面持续供电，长时滞空飞行的优势，通过挂载抛投装置，能远距离运送物品，高空负载重物运输，在地形复杂，交通通讯不畅的情况下，通过无人机抛投器输送医疗物资救援物资投放到受灾地区。



三. 相机传感器

1. 无人机视觉系统

无人机上使用的摄像头面临着一系列行业特有的应用需求。传统上，机载数码相机被细分为三个特定的类别：

- 小画幅——相机配备 1600 万像素及以下的传感器；
- 中画幅——传感器在 1600 万到 5000 万像素之间的相机；
- 大画幅——相机部署了 5000 万像素以上的大型传感器。

随着时间的推移，小型、中型和大型传感器之间的界限已经发生了变化，并将继续发生变化，甚至变得模糊。例如，有些产品宣传中画幅相机比他们以前的大画幅相机有更大的空间。最初的定义是基于传感器的大小，例如，小尺寸(35mm)的相机传感器尺寸为 24 x 36mm，达到 60 x 90mm 的被认为是中等尺寸，而更大的都是大尺寸。不同类别的成本点也非常灵活，随着原本被认为是入门级的小画幅相机功能的增加，开辟了新的可能性。更让人困惑的是，35 毫米的传感器在航空相机行业被认为很小，但在消费和机器视觉行业被认为很大。

当涉及到无人机应用中使用的数码相机时，有一些性能特征需要进行考虑。

1) 卓越的图像质量

航空成像界使用国家图像可解释性评级量表 (National Imagery Interpretability Rating Scale, NIIRS) 来定义和测量图像质量和成像系统的性能。通过一个称为“评级”图像的过程，图像分析师使用 NIIRS 分配一个数字，表明给定图像的可解释性。NIIRS 的概念提供了一种方法，可以将图像的质量与它可能用于的判读任务直接联系起来。尽管 NIIRS 主要应用于航空图像的评价，但它提供

了一种系统的方法来测量摄影或数字图像的质量、图像捕获设备的性能和图像处理算法的效果。

在数码相机中，图像质量是多种设计选择的结果。一个更大的传感器由于有更大尺寸的像素，因此可以捕捉更多的光线。传感器上的像素尺寸越大，图像质量越好。CCD 传感器比 CMOS 传感器性能更好，因为后者噪音更大，提供的动态范围更低。35mm 基于 CCD 的数字传感器可以提供小尺寸航空相机所期望的图像质量水平。相比之下，消费相机或手机相机使用非常小的传感器，像素非常小，基于 CMOS 技术，无法达到无人机应用所需的质量水平。

2) 高分辨率

需要高分辨率传感器提供航空图像所需的成像细节。高分辨率相机不需要将多个低分辨率图像拼接在一起覆盖相同的地理位置。图像拼接需要多次图像操作，以解决所有图像之间的适当色彩平衡，这是由每个相机的光灵敏度的变化造成的。相比于只用一个高分辨率 CCD 进行成像，图像拼接最终的结果可能是一个较差的图像质量。分辨率提高的好处之一是，过去需要更多的飞机来覆盖目标区域，而现在需要更少的飞机。这转化为更低的成本和更高的运营效益。此外，任务可以在更高的高度飞行，同时仍然捕捉战术评估所需的相同级别的细节，这对秘密行动是一个好处。

3) 可靠的相机快门

电子快门比机械快门更适用，因为后者使用的机制容易早期故障。在无人机应用中，可靠性是至关重要的，因为失败的军事任务可能会对战场上的部队产生重大的成本影响或可怕的后果。全局快门是必要的，因为它可以避免图像倾斜。这是由相机传感器上的像素阵列矩阵的第一行和最后一行之间的曝光时间的差

异引起的。如果快门的不透光度不够高，无法阻挡所有光线，会产生模糊现象。当传感器的快门不佳时，明亮的光线会在图像集成开始前渗入像素，从而用电子填满像素井，在图像的明亮部分上方产生一条条纹。如果同样的明亮区域饱和了像素，当图像被打卡时，可以在图像中看到向下的模糊，因为这些像素溢出到传感器的移位寄存器。最终的结果是明亮区域下面有一条条纹。当结合使用时，这两种人工制品可以导致整个像素列变成白色。

4) 图像格式

图像必须以原始格式获取。原始图像文件包含数码相机图像传感器最少处理的输出。这可以让你准确地看到相机正在看到的東西，而不会在处理过程中丢失任何信息。原始图像提供了很大的灵活性，允许用户在图像分析过程中精确控制亮度、对比度、清晰度和其他变量，而不是在图像捕获过程中。原始图像文件每像素有 12 或 14 位的亮度信息，而 JPEG 压缩图像每像素有 8 位，由于每个像素位包含额外的信息，因此可以渲染更精细的细节。

5) Blur-Free 图片

系统需要保证在每个特定的飞行条件下图像无模糊。不同任务的周围环境可能有很大差异，特别是光线水平，是不可预测的。较低的光照条件需要较长的曝光时间从相机捕捉高质量的图像，导致图像模糊，因为无人机是在不断的运动。高灵敏度相机允许快速曝光时间捕捉相同强度的图像，即使在低光照条件下，也能保证图像无模糊。

6) 低噪声

相机的灵敏度是由传感器检测所需的最小光信号决定的。这个参数受到图像中产生和出现的噪声量的强烈影响。对于在低光照环境下工作的相机(如无人机

应用)来说, 具有最小的噪声以最大限度地提高传感器的光探测能力是很重要的。相机的噪声对相机的灵敏度有一个最终的限制。因此, 数码相机经常比较使用其不同的噪声规格, 因为噪声来自多个来源。低噪声, 高灵敏度的相机将在无人机应用中表现最好。

7) 快速帧速率

高级相机应该提供最高的帧率, 以达到所需的分辨率。创建一个场景的图像包括拍摄多个图像, 然后将它们拼接在一起。较高的帧率图像捕获提供了更大的灵活性, 以确定相邻图像之间可以有多少重叠, 因为在给定的飞行速度下可以捕获更多的图像。该参数必须与飞行计划计算机相匹配, 因为无人机速度必须等价于相机捕捉图像的速度。对于类似的高度和视场, 具有更快帧率的相机允许更高的无人机飞行速度, 提供更短的飞行时间和增加遮盖性的好处。在数码相机中, 大分辨率和高帧率必须经常相互权衡。为了实现高帧率和大分辨率, 需要专门的图像传感器, 其性能远远超过可比消费型产品的能力。最后, 相机的数据接口也可以限制无人机应用的分辨率和帧率, 因为来自相机的数据量必须及时传输到其他任务关键组件。

8) 灵活性

系统灵活性对于调整无人机的性能和保持成本在控制之下特别重要。这转化为根据各种任务标准提供可替换相机和镜头的能力。如前所述, 可以通过使用标准数据接口来实现灵活性, 该接口可以与支持一系列相机的公共软件体系结构结合使用。这样可对相机传感器进行替换, 而不必在每次改进或需要不同的相机架构时重写控制软件。这对于正在处理广泛应用程序, 同时试图降低运营成本的中小型组织来说非常有价值。

9) 标准数据接口

为了实现图像数据的快速传输，相机必须配备高速数据接口。一个工业标准的数据接口将允许模块的混合和匹配，每个模块都有特定的功能，例如飞行计算机、图像存储、与地面控制人员的通信等等。无人机需要高效的方法来提取、处理、分析、存储和分发最新一代高分辨率相机生成的海量数据。千兆以太网是一种非常适合无人机应用的数据网络技术，目前普遍使用。未来的系统可能会依赖于更快的版本，如 10 千兆以太网，因为朝着更高的相机分辨率和更大的系统能力的竞争在不断进行。小型无人机应用程序可能满足单机载计算机使用 USB 总线与包括相机在内的外围设备通信，特别是随着 USB 3.0 规范的出现，其数据吞吐量超过千兆以太网。

10) 鲁棒结构

无人机为数字相机传感器提供了一个具有挑战性的操作环境。它们需要足够鲁棒，以承受系统运行期间的冲击和振动。它们还必须足够轻和紧凑，以减少飞机的有效载荷。这些严格的要求可能被推到极致，并可能导致在某些应用中使用军用级组件。

军用无人机的成本比民用无人机的成本要高几个数量级。对于民用应用，商用级相机设计在一个鲁棒和紧凑的软件包通常是足够的。即使是在军事装备方面，也有一个明确的趋势，即尽可能使用商用现货(Commercial Off The Shelf, COTS)组件，因为世界各地的军队面临更严格的预算限制，因此为一些军用无人机打开了制作精良的商用相机的大门。

11) 镜头选择

相机分辨率的提高对制造商提出了一个挑战，即提供支持更高分辨率和正确

性能水平的镜头。相机技术的改进促使镜头光学技术的相应改进。随着相机分辨率的增加，在质量较差的镜头中，玻璃中的畸变或像差变得更加明显。由于这个原因，作为镜头制造商使用更高质量的玻璃在镜头指定用于高分辨率相机是很重要的。镜头安装在相机上应该有正确的安装和控制功能，以支持丰富的质量镜头家族。对焦、虹膜和变焦设置的镜头控制应该内置到相机中，这样就可以根据整个任务中的场景条件的变化自动或远程调整设置。

2. 可选相机型号

manufacturer	model	weight	resolution	frame rate
DJI	ZENMUSE P1	800g	1920×1080	60fps
	ZENMUSE L1	930	3840×2160	30fps
	ZENMUSE H20	678	3840x2160, 1920x1080	30fps
GoPro	HERO10 Black	153g	5.3K, 4K; 2.7K	240, 120, 60, 30, 24 fps
Ricoh	GR2	251g	1920×1080, 1280×720 640×480	60fps/50fps/30fps /25fps/24fps
Sony	A7	650 g	1920x1080 , 1440x1080 640 x 480	60fps, 30fps
Hasselblad	X1D-50c	650 g	2720 x 1530 1920 x 1080	29.97fps
Phase One	iXM-100	630g;	3840x2160 1920 x 1080	30, 60fps
FLIR	Vue Pro R	113.4g	1280×720	50, 60fps
Teledyne Lumenera	Lt-C3840	88 g	3840x2160	44fps
Allied Vision	Mako G-419	80 g	2048×2048	26 fps
大恒图像	MER-131-210U3M/C	57 g	1280×1024	210fps
普宙科技	PDL-1K	1.2kg	3840x2160, 1920x1080	30, 60fps
	PDL-300	388g	3840x2160, 1920x1080	30, 60fps
	PQL01	930g	4000x3000, 3840x2160	25fps
	PVL-8K	290g	3840x2160, 1920x1080	30, 60fps

表中型号的具体性能对比、报价及网址信息，详见“附件 1.xlsx”中的“Camera”表单。

1) DJI ZENMUSE P1 (DJI Matrice 300 RTK 配件)



DJI P1 集成全画幅图像传感器与三轴云台, 支持多款定焦镜头, 成就高性能、多用途航测负载。搭配经纬 M300 RTK 和大疆智图软件, 带来高精度、高效率、一体化的航测解决方案。

搭载全画幅图像传感器, 最短连续拍照间隔 0.7 秒, 单架次作业面积可达 3 平方公里。配备机械全局快门, 应用全新 TimeSync 2.0 输出准确曝光中间时刻, 结合新一代实时位姿补偿技术, 实现微秒级时间同步, 为用户呈现厘米级精准数据。

集成三轴云台, 可选多款定焦镜头, 配合智能摆动拍摄功能, 应对二维、三维和贴近摄影测量数据采集作业都能游刃有余。

全画幅相机:

- 4500 万像素全画幅传感器
- 单像素尺寸 4.4 μm , 低噪高感成像, 延长单日有效作业时长
- 最短连续拍照间隔 0.7 秒
- TimeSync 2.0 相机与飞控、RTK、云台系统微秒级时间同步

多款定焦镜头

- 机械全局快门, 快门速度 1/2000 秒

- 输出微秒级曝光中间时刻
- 支持 24/35/50mm 三种焦距 DJI 专用 DL 卡口镜头

2) DJI ZENMUSE L1 (DJI Matrice 300 RTK 配件)

激光可见光融合解决方案

DJI L1 集成 Livox 激光雷达模块、高精度惯导、测绘相机、三轴云台等模块，搭配经纬 M300 RTK 和大疆智图，形成一体化解决方案，轻松实现全天候、高效率实时三维数据获取以及复杂场景下的高精度后处理重建。

集成激光雷达模块、测绘相机、高精度惯导于一身，实时生成真彩点云，单架次飞行可快速获取 2 km² 的点云数据。融合 GNSS、高精度惯导与视觉数据，带来厘米级精度成果。具备 IP54 防护等级，无惧雨雾，基于激光雷达主动测量特性，黑夜也可从容作业。

Livox 激光雷达模块：

- 框幅式设计，有效点云比例高达 100%
- 测量距离 450 m (反射率 80%, 0 klx) / 190 m (反射率 10%, 100 klx)
- 有效点云数据率 240,000 点/秒
- 支持 3 次回波
- 支持重复扫描模式与非重复扫描模式



测绘相机：

- 2000 万像素
- 1 英寸传感器
- 机械快门



高精度惯导：

- 辅助定位相机
- GNSS、惯导、视觉数据三方融合



3) DJI ZENMUSE H20 系列 (DJI Matrice 300 RTK 配件)

大疆首个混合传感器解决方案，集变焦相机、广角相机、热成像相机、激光测距仪四传感器系统于一身，实现真正的效率革命。辅以先进的智能算法，为行

业级无人机带来前所未有的传感与成像能力。

变焦相机：

- 23× 混合光学变焦，200× 最大变焦
- 2000 万像素 1/1.7"CMOS 传感器
- 视频分辨率：4K/30fps

广角相机：

- 等效焦距：24 毫米，DFOV：82.9°
- 1200 万像素 1/2.3"CMOS 传感器

激光测距仪：

- 测量范围：3 ~ 1200 米
- 精度：±(0.2m+D×0.15%)

热成像相机

- DFOV：40.6°
- 分辨率：640×512，帧帧率：30 fps
- 灵敏度：≤ 50mk@f1.0 (NEDT)，全局测温

两个具体的集成型号：

型号一：禅思 H20（三传感器）

- 2000 万像素变焦相机
- 1200 万像素广角相机
- 1200 米激光测距仪



型号二：H20T（四传感器）

- 2000 万像素变焦相机
- 1200 万像素广角相机
- 1200 米激光测距仪
- 640×512 热成像相机



4) GoPro HERO10 Black



在过去几年里，GoPro 的“小尺寸”轻量级相机非常受欢迎——这种相机以耐用著称。它们最好的特点之一就是非常轻，重量远低于 100 克。考虑到许多现代航空摄影测量可以使用消费级无人机进行，GoPro 对于那些需要覆盖大量地面或在偏远地区进行测量的人来说是一个有吸引力的选择，因为它的重量可以显著增加飞行时间。

GoPro 一直是许多消费级无人机制造商的相机选择(例如 3D Robotics, www.3dr.com)。此外，非常受欢迎的大疆幻影系列内置摄像头的规格与 GoPro 非常相似(尽管有效焦距为 20 毫米)。

然而，这些吸引人的属性的取舍涉及到拥有如此小的传感器的限制，当在最高分辨率拍摄时，衍射效应变得非常明显。再加上较大的镜头失真，可能会使摄影测量任务的规划变得棘手。

5) Ricoh GR2



理光 GR2 对于想要进行高质量测绘的爱好者来说是一个很好的选择，并且已经成功地集成到一些公司的无人机软件包中。重量较轻，仅超过 200 克，考虑到大型 APS-C 画幅传感器，这是一个很好的权衡。

内置的固定焦距镜头在基准测试中显示出良好的锐度，在大光圈(有效光圈 $f/4.5$)下的最佳性能值得注意。因此，它适用于低光的场景，因为大光圈将允许更多的光入射到镜头上，而不会由于衍射而降低性能。这也简化了潜在的衍射效应，因为较宽的孔径意味着入射光的波前比较窄的孔径更少地分布在传感器上；在 $f/2.8$ 时，将没有显著的衍射效应。

一个缺点是固定镜头，因为 28mm 的有效焦距可能无法为某些技术应用提供足够宽的视场。虽然总是可以飞得更高，但飞行高度限制和电池限制总是有利于更短的焦距(以及镜头的重量)。因此，这没有提供多样性的其他相机在这个名单，尽管它的价格代表了一个非常好的选择。

6) Sony A7



索尼的 A7 系列无反光镜可更换镜头相机(mirrorless interchangeable lens camera, MILC)代表了技术进步，因为全画幅传感器变得更加实惠。第一个版本非常轻，机身只有 417 克(769 克与 28-70mm f/3.5-5.6 套件镜头)，是市场上最紧凑的全画幅相机之一。ProDrone 已经宣布支持一系列紧凑型相机和 MILC，包括 Ricoh-GR2 和索尼 A7 系列。因此，索尼 A7 系列相机对于希望为客户提供高质量调查的公司/顾问来说是一个很好的起点。

A7 系列相机已经成为徕卡 M 系列相机的有力竞争对手，M 系列相机多年来一直占据着紧凑型全画幅相机市场份额。这与广泛选择的镜头相结合，意味着相机系统是高度通用的。高分辨率、全画幅传感器和镜头选择范围可能会使重量权衡值得长期研究或那些视野重要的研究。

7) Hasselblad X1D



哈苏的中格式紧凑型 MILC 代表了成像技术的进步。中等格式的传感器提供了一个没有其他紧凑型相机可以与之竞争视野，而且价格——虽然明显高于这里列出的其他相机——将为高端无人机从业者提供潜在的物有所值。

目前只有两种镜片可用。然而，由于有效焦距为 35mm 和 70mm，中分辨率传感器提供的额外视场可能会弥补这种选择的不足。重量仅超过 1 公斤加上一个镜头，这仍然是实用的放在许多低负载无人机。

此外，精灵无人机(Phantom UAV)系列制造商大疆(DJI)已宣布与哈苏(Hasselblad)建立合作关系，提供包括 Matrice-600 无人机与哈苏(Hasselblad)使用 Ronin-MX 底座的 A5D 中画幅相机相结合的套件。虽然用于 A5D(哈苏 H-mount)的镜头设置与 X1D 不同，但这个包提供了一个“开箱即用”的中画幅无人机系统，这可能对用户更方便。

自中国无人机制造商 DJI 大疆战略投资 Hasselblad 之后，两者结盟的第一款产品终于问世，两强联手将会推出一款新款长程无人机，搭载了 Hasselblad A5D 航拍相机，内建 5000 万画素 CMOS 传感器，此项规格也常见于 Hasselblad 的其他中画幅产品，例如新近推出的 Hasselblad X1D 中画幅无反单眼相机。



简单地说，新的航拍机产品是整合了大疆经纬 M600 专业航拍机、Hasselblad A5D 航拍中画幅相机，以及如影 Ronin-MX 云台，大疆称此是「高度集成的航拍平台」。组合中，A5D 航拍相机预设搭载的是 HC 50mm F3.5 镜头，其成像近似于 42mm 镜头在 35mm 相机的成像。

大疆经纬 M600 专业航拍机可以提供最多 6 公斤的负载重量，因此对应这个新推出的组合是轻而易举；上述型号包括 HC50mm 镜头、A5D 中画幅相机、Ronin-MX 云台等等组件的重量约是 4 公斤左右。

8) Phase One iXM-100



Phase One iXM 系列无人机航拍相机采用独创性设计，极具颠覆性，重新定义了技术创新的边界。尖端的中画幅技术专为无人机航拍任务研发。iXM 一亿像

素和 5000 万像素相机采用背照式 (BSI) 的中画幅传感器，具备更高的感光度和更宽动态范围。

Phase One iXM 相机拍摄高效、响应迅速且坚固耐用，配有 35 毫米至 300 毫米的高分辨率镜头。iXM 相机可以轻松与无人机进行集成，用于各类检测和测绘任务。

XM 一亿像素和 5000 万像素均为高效航测相机，配有一系列专门开发的 RSM 镜头。iXM 系列相机易于与多种无人机平台集成，可满足不同应用的需求，提供高质量的航拍并且操作自如。传感器的像素高达 5000 万，可拍摄高精度图像，满足小规模测绘和检测任务的需求。

Phase One P3 载荷方案是一个多功能的解决方案，用于无人机对关键基础设施进行快速、高效和安全的检测,无论您是使用已有的还是计划购入的无人机，P3 载荷方案都能与大疆 M300 和支持 MAVLink 协议的无人机快速集成。



9) Teledyne Lumenera Lt Camera Series



由于光照的变化，高光和阴影在室外条件下很难成像，并可能导致重要的图像数据丢失。确保图像在这种条件下保持清晰度的关键是高动态范围。Teledyne Lumenera 相机具有高动态范围，在不损失图像质量的情况下保留图像数据，有较大的户外成像优势。这使得它非常适合于诸如收费管理、速度和红灯执行、HOT 车道执行和停车验证访问控制等应用程序。

特性：

- 彩色或单色 Sony®Starvis™IMX334 卷帘 CMOS 传感器，1/1.8"光学格式
- 830 万像素的摄像头，全分辨率下的帧率为 44 FPS (3840 x 2160)
- 高速 USB 3.1 Gen 1 接口，快速图像传输和简化连接
- 紧凑的外形尺寸为 45 毫米× 45 毫米× 36.1 毫米
- 锁定工业微型 USB 在旁边的电源和控制
- 感兴趣区域(ROI)选项，以提供更高的帧率
- 可选择 8 位或 12 位像素数据
- 支持多种数据速率，每个速率都优化为最低的噪声性能

USB3 ENCLOSED CAMERAS - COMPACT

Camera Model	MP	Resolution	Frame Rate c	Optical Format	Sensor	Color/ Mono
Lt-C/M1610	1.7	1608 x 1104	96	1.1"	IMX432	Color or Mono
Lt-C/M1630	2.0	1632 x 1248	86	1/1.7"	IMX430	Color or Mono
Lt-C1900	2.1	1944 x 1096	60	1/2.8"	IMX327	Color
Lt-C/M1950	2.3	1936 X 1216	162	1/2.3"	IMX392	Color or Mono
Lt-C/M2020	3.2	2064 X 1544	55	1/1.8"	IMX265	Color or Mono
Lt-C/M2420	5.1	2464 x 2056	35	2/3"	IMX264	Color or Mono
Lt-C/M3200	7.1	3216 x 2208	50	1.1"	IMX428	Color or Mono
Lt-C/M3840	8.3	3840 x 2160	44	1/1.8"	IMX334	Color or Mono
Lt-C/M4030	8.9	4112 x 2176	31	1"	IMX267	Color or Mono
Lt-C/M4020	12	4112 X 3008	22	1.1"	IMX304	Color or Mono
Lt-C/M5470	16.9	5472 x 3084	32	4/3"	IMX387	Color or Mono
Lt-C/M4430	19.7	4432 x 4436	28	4/3"	IMX367	Color or Mono
Lt-C/M5500	20	5472 x 3692	19.6	1"	IMX183	Color or Mono
Lt-C/M6480	31	6480 x 4860	17	APS-C	IMX342	Color or Mono

10) Allied Vision Mako G-419



Mako G-419 是一款小巧、紧凑的工业相机，具有高性价比优势。它搭载 CMOSIS/ams CMV4000 传感器，在 4.2 MP 分辨率下速度可达 26.0 帧/秒。Mako 相机兼容千兆网接口，且配备紧凑、坚固的工业级外壳。其中多款机型配备各种高级功能，如精准时间控制协议 (PTP)、以太网触发 (ToE) 动作指令和以太网供电 (PoE)。RJ45 螺纹接口连接器和多路输入/输出便于系统直接集成。Mako G 相机提供近红外版 (NIR) 和偏光版两种版本供客户选择。

功能特性：

- 分辨率: 高达 1240 万像素
- 传感器: Sony, CMOSIS/ams, ON Semi, 和 Teledyne e2v 的 CCD 和 CMOS 全局、卷帘和全局重置传感器

- 帧率: 高达 309 帧/秒
- 外壳选项: 超紧凑型工业级金属外壳
- 镜头接口选项: C-Mount、CS-Mount 和 M12/S-Mount (含适配器)
- 成像色彩: 黑白、彩色和近红外 (NIR)

11) 大恒图像 水星系列 MER-131-210U3M/C



水星 (MER-U3) 系列数字相机是大恒图像自主研发的成熟的面阵工业数字相机, 外形尺寸仅为 29mm×29mm×29mm, 对于相机尺寸要求苛刻的用户将会是一个不错的选择。MER-131-210U3C 采用全局曝光的 Onsemi PYTHON 1300 CMOS 感光芯片, 通过 USB3.0 数据接口进行图像数据的传输, 并集成 I/O (GPIO) 接口, 提供线缆锁紧装置, 能稳定工作在各种恶劣环境下, 是高可靠性、高性价比的工业数字相机产品。MER-131-210U3C 具有高清晰度、低噪音、设计小巧、安装及使用方便等特点, 适用于工业检测、医疗、科研、教育以及安防等领域。

12) PDL-1K 双光云台相机（普宙科技 S400 配件）



PDL-1K 采用全新自研红外探测器，其 1K 高分辨率是业内常规红外分辨率的 4 倍，真正做到“视无巨细”，方便特殊环境条件下的红外缺陷探测和识别，有效提升高压交直流输电线路的红外巡检水平和 AI 算法缺陷识别精度，能广泛应用于电力巡检、石油管道巡检、光伏巡检、城市消防、森林消防等行业，助力用户开启高效昼夜作业模式。

红外云台分辨率达 1280×1024 ，具有行业内领先性能指标，为用户提供高灵敏度的洞察力。



13) PDL-300 双光云台相机（普宙科技 S400 配件）



PDL-300 双光云台相机可轻松拍摄 4800 万像素照片，拍摄目标细节毕现，支持双光通道，不管是白天还是黑夜都能清晰观察，完美满足工业应用高标准画质以及双光轻量化的诉求。小巧便携，随需出行，广泛应用于电力巡检、石油管道巡检、光伏巡检、城市消防、森林消防等行业。

具备红外及可见光双通道，受天气和光照影响小，各司其职，昼夜互补，白天黑夜都能清晰观察。

14) PQL01 四光云台相机（普宙科技 S400 配件）



将广角可见光相机、变焦可见光相机、红外热成像相机和远距离精准激光测

距仪完美结合在一起，多类传感器之间智能联动、优势互补，为行业无人机提供更强大的触角，突破视觉局限，兼顾全局与细节，一机适用多行业场景。

自带 21TOPS 算力，云边端协同，满足多传感器融合计算，提供多场景 AI 算法，满足自动化任务需求。

激光测距距离高达 1500m，可借助激光定位的智能打点功能，快速定位探测中心点的经纬度坐标及距离。

15) PVL-8K 云台相机（普宙科技 S400 配件）



PVL-8K 云台相机能够轻松拍摄出 4800 万像素照片，及 4K@30fps 视频，成像细腻清晰，为林业、电力等作业场景，提供超越视觉的洞察力。同时采用了全新的姿态融合控制算法，打造出高精度三轴增稳云台，即使在高速飞行和剧烈运动中，也能拍摄出清晰稳定的画面。

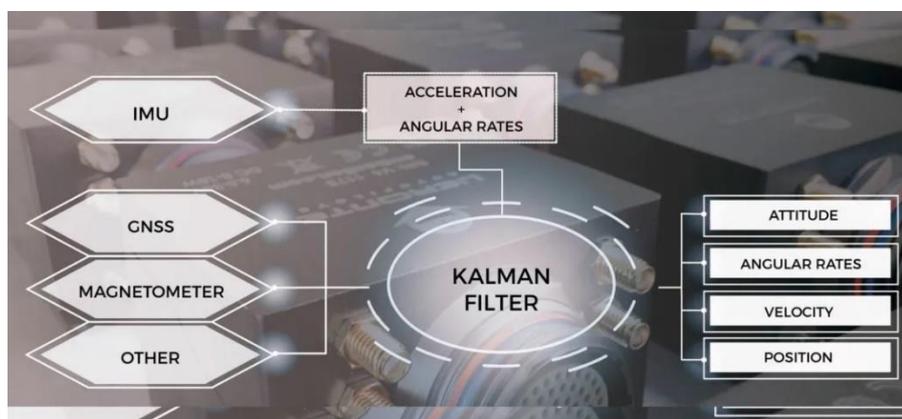
体积小，重量轻，方便收纳与携带，满足各作业场景中装备轻量化诉求。

四. IMU传感器

1. 无人机惯性测量单元

惯性测量单元(IMU)是一种利用加速度计和陀螺仪测量加速度和旋转的电子设备。在无人机中, IMU 与 GNSS 等传感器协同工作, 精确估计无人飞行器的位置和姿态, 在 GNSS 信号不可用或有干扰的情况下, IMU 作为主要定位传感器。

在无人机自动驾驶系统中, IMU 包括惯性导航系统(INS)中使用的传感器组件。IMU 测量和输出方向、速度和重力, 以帮助导航和控制使用原始 IMU 测量。它是无人机飞行控制系统的重要组成部分, 允许无人机以最大限度的控制和稳定运行和飞行。当 IMU 原始数据与来自其他传感器的测量数据合并到卡尔曼滤波器中时, 输出导航数据, 例如姿态、位置、角速率、线速度等。



在选择 IMU 时, 必须考虑的一些方面是性能、底层技术、SWaP(尺寸、重量和功率)和成本。此外, 无人机的另一个重要因素是 IMU 的坚固性。在恶劣的无人机应用中, 振动可以达到很高的水平和不同的温度。因此, 无人机的 IMU 需要非常坚固, 以承受苛刻的环境。复杂的应用, 如无人机, 需要非常稳定和高性能的 imu。具有良好性能、振动鲁棒性和温度稳定性的 IMU 将改善无人机的飞行操作。使准确的转向更容易, 即使在高振动的情况下。

IMU 有很多种类型，其中一些集成了磁强计来测量磁场强度，但无人机应用的四个主要技术类别是：

- 硅 MEMS (Silicon Micro-Electro-Mechanical Systems)
- 石英 MEMS (Quartz MEMS)
- FOG(光纤陀螺) (Fiber Optic Gyro)
- RLG(环形激光陀螺) (Ring Laser Gyro)

硅 MEMS IMU 是基于微型传感器的，可以测量物体因运动而产生的偏转，也可以测量物体固定所需的力。它们通常比 FOG IMU 具有更高的噪声、振动灵敏度和不稳定性参数，但随着技术的不断发展，基于 MEMS 的 IMU 正变得更加精确。MEMS IMU 是小型无人机平台和大容量生产单元的理想选择，因为它们通常可以用更小的尺寸和重量制造，而且成本更低。

石英 MEMS IMU 使用由石英微加工而成的一体式惯性传感元件，由振荡器驱动以精确的振幅振动。然后，振动的石英可以用来感知角速率，产生一个可以放大的信号，并转换成与速率成正比的直流信号。石英 MEMS 技术具有高可靠性和高温度稳定性，战术级石英 MEMS IMU 在 SWaP-C(尺寸、重量、功率和成本)指标方面可与 FOG 和 RLG 技术相媲美。这些因素使其成为为无人机空间和功率受限环境设计的惯性系统的理想选择。

FOG IMU 使用一种基于光束通过盘绕光纤传播的固态技术。它们对冲击和振动不太敏感，并提供良好的热稳定性，但易受磁干扰。它们还在角度随机游走、偏置偏移误差和偏置不稳定性等重要参数上提供高性能，使它们成为任务关键型无人机应用的理想选择，如极其精确的导航。更高的带宽也使 FOG IMU 适用于高速平台稳定。它们通常比基于 MEMS 的 IMU 更大、更昂贵，通常用于大型无

人机平台。

RLG IMU 采用了与 FOG IMU 类似的技术原理，但采用了密封的环形腔来代替光纤。它们通常被认为是最精确的选择，但也是 IMU 技术中最昂贵的，通常比替代技术大得多。

IMU 的性能和精度受到多种因素的综合影响，包括传感器技术、封装的热特性和所使用的软件。在比较特定 IMU 的性能和精度时，可以使用以下参数，以帮助确定特定无人机应用的适用性：

- 偏置——当输入为零时，IMU 输出读出什么？
- 偏置重复性——当测量之间的条件发生变化时(例如, IMU 的每次上电), IMU 的偏差有多相似？
- 偏置稳定性-偏差随时间的变化有多少？
- 随机游走-有多少随机噪声存在？
- 振动灵敏度-在环境中，每单位振动所产生的角速率的输出变化是多少？

这些因素取决于 IMU 中使用的技术以及加速度计、陀螺仪和磁强计的物理特性。如果 IMU 的制造带有温度补偿，这将提高测量的稳定性。对于高精度应用，如无人机测量和测绘，高数据输出率也很重要，因为这将减少由于读数之间的插值造成的误差。

一般来说，惯性传感器可以根据偏置稳定性规范分为性能类别，这有助于对模块的性能进行分类。传感器的等级越高，往往越准确。通常情况下，战术级和工业级 IMU 是无人机导航等苛刻应用的首选，因为它们提供了高水平的性能和准确性。

战术级 IMU 具有极低运行偏差稳定性的陀螺仪，这意味着偏移误差随着时

间的推移更加稳定。这是关键任务和高精度应用的必要品质，如无人机导航、天线和武器平台稳定。

工业级 IMU 提供的精度低于战术级 IMU，但性能和可靠性比用于消费者应用的系统更好。它们对冲击和振动具有良好的耐受性，并且随着时间和温度的变化表现出良好的重复性。许多工业级 IMU 是工厂校准，以提高温度性能。

基于 MEMS 的 IMU 通常用于工业级应用，如无人机平台需要较小的外形因素组件，而非其他性能参数，用于稳定、控制和导航。

无人机的 IMU 通常需要非常坚固，以承受苛刻的环境，如高水平的冲击和振动，以及宽温度范围。外壳可以用精密加工的阳极氧化铝等材料制成，并按各种入口保护(环境密封)标准额定值，如 IP67，以防止由于恶劣环境条件造成的板应力 and 危害。具有低振动灵敏度的 IMU 可以在振动水平高的苛刻无人机应用中提供更高精度的导航解决方案。

不受 ITAR(国际武器贩运条例, International Traffic in Arms Regulations)限制的 IMU 不受出口管制的限制，出口管制要求在全球范围内转让包含 ITAR 管制技术的任何系统都需要许可证。在无人系统设计中使用 ITAR-free IMU 将简化最终产品的国际销售。被指定为重要军事装备(SME)并因此受 ITAR 法规控制的 IMU 包括那些专门为 ITAR 控制的无人驾驶飞机设计的 IMU，以及那些为武器或武器系统设计的 IMU。

尺寸、重量和功率要求(SWaP)是无人机平台设计和开发的关键考虑因素，许多制造商旨在减少其系统的总体尺寸和重量，以飞行更远的距离，延长飞行时间，或增加有效载荷能力。这导致许多 IMU 供应商开发了极低重量和小尺寸的微型 IMU，以满足无人机的 SWaP 要求。

2. 可选 IMU 型号

manufacturer	model	type	weight	accelerometers bias stability	gyroscopes bias stability
SBG Systems	Ellipse 2 Micro Series	IMU/AHR S/INS	10 g	14 μ g	7°/h
	Ellipse Series A	AHRS	8g	14 μ g	7°/h
	Ellipse Series E	INS	8g		
	Ellipse Series N		17g		
	Ellipse Series D		17g		
	Pulse-40	IMU	12 g	6 μ g	0.8°/h
Inertial Labs	IMU-NAV-100	IMU	155g	0.003 / 0.01 / 0.015 mg	0.5 deg/hr
	IMU-P	IMU	70g	0.01 0.03 0.05 1 mg	3 deg/hr
	Kernel-210	IMU	15g	0.01 / 0.03 / 0.05mg	3 deg/hr
	miniAHRS	AHRS	20g	0.01, 0.03, 0.05mg	2 deg/hr
Advanced Navigation	Orientus	AHRS	25g	20 ug	3 °/hr
	Motus	IMU/AHR S/INS	26g	8 ug	0.2 °/hr
	Spatial	INS	26g	20 ug	3 °/hr
Xsens	Mti-610 IMU	IMU	8.9 g	10 μ g	8 deg/h
	Mti-630 AHRS	AHRS	8.9 g	10 μ g	8 deg/h
	Mti-670 GNSS/INS	INS	8.9 g	10 μ g	8 deg/h
	Mti-680 RTK GNSS/INS	INS	8.9 g	10 μ g	8 deg/h
	Mti-1 IMU	IMU	0.6g	40 μ g	6 deg/h
	Mti-3 AHRS	AHRS	0.6g	40 μ g	6 deg/h

	MTi7 GNSS/INS	INS	0.6g	40 µg	6 deg/h
	Mti-8 RTK GNSS/INS	INS	0.6g	40 µg	6 deg/h
NovAtel	EG320N	IMU	10 g	0.1 mg	3.5 deg/hr
	EG370N	IMU	10 g	0.012 mg	0.8 deg/hr

表中型号的具体性能对比、报价及网址信息，详见“附件 1.xlsx”中的“IMU”表单。

1) SBG Systems - Ellipse 2 Micro Series – IMU, AHRS, INS

SBG Systems 是一家基于 MEMS 的 ITAR-free 惯性传感器供应商，该传感器能够平衡无人系统应用的成本、尺寸和性能。

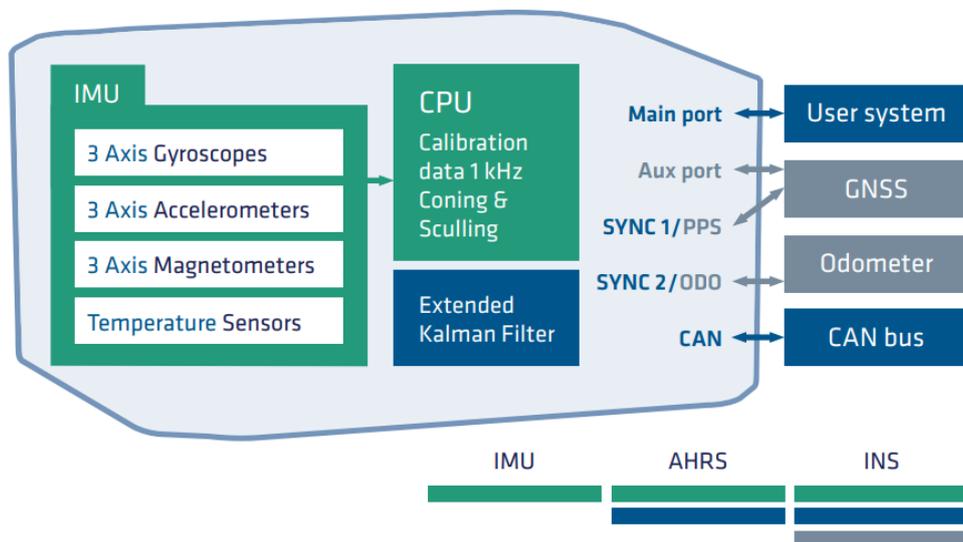
Ellipse 2 微系列是 SBG 最小的高性能工业级微惯性传感器，重 10 克，外形小巧，专为 SWaP 无人系统（SWaP-conscious unmanned systems）设计。IMU 可以与 GNSS 接收器连接，以提高位置、升沉和航向输出的精度。

- 重量极轻，只有 10 克
- 工业级高端陀螺仪和加速度计
- 扩展校准，从 -40 到 +85°C，在广泛的环境中恒定的行为
- 融合与 GNSS 接收器，为稳健和准确的位置，升沉和航向输出
- 针对地面系统(如 ugv 和自动驾驶)微调的特定运动算法
- 具有成本效益-为批量项目设计。



根据项目需求可选 3 个模型：

- Ellipse 2 Micro IMU 是一种惯性测量单元。它嵌入了 3 个陀螺仪，3 个加速度计，3 个磁强计和一个温度传感器。
- Ellipse 2 Micro AHRS 还运行一个扩展卡尔曼滤波器，以提供滚转，俯仰，航向，和升沉。
- Ellipse 2 Micro INS 还连接到一个 GNSS 接收器和一个用于导航的里程表。



Model	Ellipse2 Micro IMU	Ellipse2 Micro AHRS	Ellipse2 Micro INS
Calibrated IMU data	✓	✓	✓
Roll, Pitch, Heading	✗	✓	✓
Heave	✗	✓	✓
Navigation	✗	✗	✓ Connection to external GNSS & Odometer

2) SBG Systems - Ellipse Series



工业级 itar-free 微型惯性传感器，具有极其坚固的设计、前沿传感器和先进

算法:

- 0.05°RMS 的准确性
- 极低噪声陀螺仪
- 嵌入式 64 位微处理器
- 集成 GPS + GLONASS/北斗接收机
- 接受 DGPS 校正和里程表输入
- 振动和磁干扰处理的高级算法。



	Ellipse-A	Ellipse-E	Ellipse-N	Ellipse-D
Model	Orientation + Heave Motion Sensor	INS with your own external GNSS receiver	Single Antenna RTK INS with integrated GNSS receiver	Dual Antenna RTK INS with integrated GNSS receiver
Roll and Pitch	0.1° over 360°	0.05° RTK	0.05° RTK	0.05° RTK
Heading	0.8° Heading (Internal Magnetometers)	Magnetic or GNSS Heading	0.2° Heading (RTK high dynamics)	0.2° Heading (Dual Antenna RTK GNSS)
Heave	5 cm Real-time Heave	5 cm Real-time Heave	5 cm Real-time Heave	5 cm Real-time Heave
Navigation	✘	Navigation with external GNSS receiver	L1/L2 GNSS receiver 1 cm RTK GNSS Accuracy	L1/L2 GNSS receiver 1 cm RTK GNSS Accuracy
Post-Processing	✘	✓	✓	✓

3) SBG Systems - Pulse-40



Pulse-40 是一种战术级惯性测量单元, 设计用于在最恶劣的条件下提供鲁棒的高精度稳定导航。它采用了最先进的 MEMS 三轴加速度计和独特的冗余设计陀螺仪, 具有极低的 VRE(振动校正误差, Vibration Rectification Error), 是高频动态和高振动环境的理想选择。

Pulse-40 的重量仅为 12 克, 功耗 0.3 瓦, 极低的 SWaP 占用率使其成为各种无人机和机器人平台的理想选择。该装置具有冗余传感器集成和嵌入式连续内置测试功能, 为关键应用提供了最大的数据可靠性。

4) Inertial Labs - IMU-NAV-100

Inertial Labs 开发高性能的基于 MEMS 的惯性解决方案, 体积小, 功耗低。Inertial Labs 是无人驾驶车辆位置和方向跟踪系统的领先设计师和制造商, 其高精度解决方案基于惯性导航传感器与一系列其他前沿传感技术的融合, 包括 MEMS-IMU、加速度计、陀螺仪和 AHRS。



IMU- NAV -100 是一种轻量级、紧凑的高精度 IMU，基于最先进的 MEMS 传感器技术，提供三轴线性加速度和角速率，非常低的噪声和高可靠性。完全校准，温度补偿，并数学对准正交坐标系，IMU- NAV -100 在静态和动态条件下都是高度精确的 MEMS IMU。该单元具有连续内置测试(BIT, Built-in Test)、可配置通信协议、电磁干扰(EMI, electromagnetic interference)保护和灵活的输入功率要求，是无人机、AUV 和 ROV 导航和控制、平台定向和稳定等的理想选择。它有两种性能变体。

5) Inertial Labs - IMU-P



IMU-P 是一种重量轻、结构紧凑的高性能惯性测量单元, 设计用于多种应用, 包括无人机和 AUV/ROV 导航和控制。MEMS IMU 包含三个高精度的先进 MEMS 陀螺仪和三个超高性能加速度计，用于精确的线性加速度和角速率测量。IMU-P

是一种 ITAR-free 惯性解决方案，在其工作温度范围内完全校准和补偿。工业和战术级单位都是可用的。小巧的尺寸(39 x 45 x 22 毫米)和低重量(70 克)-理想的集成系统应用。

IMU-P 应用场景:

- 天线和视线稳定系统
- 运动参考组(MRU)
- 运动控制传感器(MCS)
- 框架, EOC/IR, 平台定位和稳定
- 无人机和 AUV/ROV 导航和控制

6) Inertial Labs - Kernel IMU



Kernel 系列捷联式三轴 IMU 具有最新的 MEMS IMU 传感器技术，提供了许多选项，以适应工业和战术级的要求。通过三轴 MEMS 加速度计和陀螺仪提供线性加速度和角速率输出，全集成 IMU 结构紧凑、重量轻，经过全面测试，可以承受温度的大变化、高振动和冲击。完全校准的战术和工业 IMU 可以集成到 MRU、AHRS 和 GNSS-INS 中，也适用于各种无人机和机器人应用，如自动驾驶汽车、天线和视线稳定系统和船舶运动监测。

7) Inertial Labs - miniAHRS



miniAHRS 是一种轻型、紧凑的 AHRS，非常适合集成到小型无人机和无人系统中。该设备结合了三轴加速度计、磁强计和陀螺仪，可提供绝对俯仰和横摇数据，实时三轴旋转测量，并进行陀螺仪校正。

miniAHRS 具有先进的基于卡尔曼滤波的传感器融合技术，以及用于不同无人驾驶车辆和机器人平台在陆地、海洋和空中领域的动态运动的最先进算法。

8) Advanced Navigation - Orientus Miniature AHRS

Advanced Navigation 为商业和军事无人机应用提供基于 MEMS 和 FOG 的导航解决方案。Motus 是一种微型超高精度 MEMS IMU，其惯性性能甚至超过了一些 FOG IMU。它的重量只有 26 克，具有 0.4°/小时的偏置稳定性。



Orientus 是一款坚固的微型定位传感器和 AHRS(姿态和航向参考系统)，结合了温度校准的 MEMS 加速度计、陀螺仪和磁力计，使用最先进的融合算法，即使在最苛刻的环境中也能提供准确可靠的定位。

Orientus 具有先进的滤波检测和调整磁干扰。其复杂的算法补偿了短期线性

加速度，使传感器保持精确的横摇和纵摇测量。长期线性加速度也可以通过增加一个外部 GNSS 接收器进行完全线性加速度补偿来处理。

Orientus 被封装在精密加工的船用级铝外壳中。防水防污 IP68 标准，防震 2000g，系统在最极端的条件下保持高可靠性。最小的尺寸、重量和功率要求使它成为无人车辆应用的理想选择，如平台和相机稳定，以及无人地面车辆的航向参考源。

Orientus 包含高性能的 MEMS 传感器，经过 Advanced Navigation 的密集 8 小时温度校准过程。这提供了这类传感器的最高精度，在 -40°C 到 85°C 的整个温度范围内输出一致的精度。

Orientus 具有全自动磁校准，每次单位移动更新，消除了所有手动校准过程的要求。这在不断变化的环境中提供了可靠的准确航向。

Orientus 使用一种创新的算法来补偿线性加速度。这使得 Orientus 能够通过短期线性加速保持精确的滚转和俯仰，而这通常会导致竞争对手系统的重大误差。对于长期线性加速度，Orientus 支持添加一个外部 GNSS 接收器，以实现完全加速度补偿。

Orientus 的内部滤波器运行在 1000Hz，数据也可以在高速 RS232 上以这个速率输出。这允许控制动态不稳定的平台。

Orientus 已经为可靠性非常重要的任务关键控制应用程序从头开始设计。它建立在一个面向安全的实时操作系统之上，所有软件的设计和测试都符合安全标准，并考虑到容错性。硬件是设计和制造的军事标准。

性能:

- 0.2°滚转和俯仰精度

- 0.5°航向精度
- 3°/h MEMS 陀螺仪
- 1000hz 更新速率
- 2000g 冲击极限

主要特点:

- 线性加速度补偿
- 减轻磁干扰
- 轻重量:25 克
- 小尺寸:30 × 30 × 24 毫米
- 低功耗:65ma @ 5V

9) Advanced Navigation - Motus Miniature MEMS IMU

Motus 是一种微型超高精度 MEMS IMU(惯性测量单元), 它将超高精度加速度计和陀螺仪与磁强计结合在一起, 提供的惯性性能甚至超过了一些 FOG IMU。

Motus 的体积仅超过 1 立方英寸, 重量只有 26 克, 是 SWAP 意识应用的理想选择, 如地理定位和垂直降落无人机的激光雷达任务。该系统可采用 OEM 包装, 适合集成到更大的产品, 或一个封闭的包装, 用于外部和独立使用。



Motus 可以通过简单的软件许可证升级到完全的 AHRS 或 INS 能力。有了 INS 功能, 它可以与许多领先品牌的 GNSS 接收器接口, 创建一个完整的 OEM

GNSS/INS 解决方案。

Motus 具有目前可用的一些最高精度的 MEMS 加速度计和陀螺仪。Motus 的惯性性能超过了一些 FOG IMU，体积小 100 倍，价格便宜 10 倍。Motus 经过 Advanced Navigation 的密集校准过程，在 -40°C 到 85°C 的扩展温度范围内提供始终如一的准确数据。

Motus 通过 6 个独立的 24 位差分 adc 以 1000Hz 同步采样其传感器，这将噪声降至最低，并提供最佳的热校准和性能特性。14 个独立的经过大量过滤的稳压电源，确保每个传感器和 ADC 在尽可能干净的电源下运行。

Motus 已经从地面开始设计，用于可靠性非常重要的任务关键控制应用。它建立在一个面向安全的实时操作系统之上，所有软件的设计和测试都符合安全标准，并考虑到容错性。硬件是设计和制造的军事标准。

Motus 输出 1000Hz 的温度校准传感器数据以及相同速率的滤波姿态。这允许控制动态不稳定的平台。

性能:

- 0.03° 滚转和俯仰精度
- 0.1° 航向精度
- 0.2°/h 陀螺偏置不稳定性
- 1000hz 更新速率
- 2000g 冲击极限

主要特点:

- Hot Start Time: 2 秒
- IMU, AHRS 和 INS 选项

- 2 个版本:OEM 或 Rugged

10) Advanced Navigation - Spatial Miniature GPS-Aided INS/AHRS



Spatial 是一种微型 GPS 辅助惯性导航系统(INS)和 AHRS，可提供精确的位置、速度、加速度和方向输出。它将高性能 MEMS 惯性传感器和压力传感器与先进的 GNSS 接收器结合，使用人工智能驱动融合算法，提供精确可靠的导航和定位。Spatial 的 GNSS 接收器支持所有当前和未来的卫星导航系统，包括 GPS、GLONASS、GALILEO 和北斗。它的 L1 RTK 可以提供 2cm 的定位精度，也支持 1cm 的运动学后处理精度。

由于 SWaP 需求较低，Spatial 是无人机测量和地理参考任务的理想选择，以及广泛的机器人系统的跟踪、安全和平台稳定。

Spatial 结合了温度校准加速度计、陀螺仪、磁强计和带有先进 GNSS 接收器的压力传感器。这些数据在基于人工智能的融合算法中耦合，以提供同类中最可靠和准确的导航数据。Spatial 可用于 OEM 和坚固包。Spatial 与同厂商的后处理运动学(PPK)软件 Kinematica 兼容。

Spatial 融合了 Advanced Navigation 革命性的 AI 神经网络传感器融合算法。这提供了高达 10 倍的精度是传统卡尔曼滤波器。它设计用于控制应用，并具有高水平的健康监测和不稳定预防，以确保稳定和可靠的数据。

Spatial 包含高性能 MEMS 传感器，经过 Advanced Navigation 的密集 8 小

时温度校准过程。这提供了这类传感器的最高精度，在-40°C 到 85°C 的整个温度范围内输出一致的精度。

空间已经从地面上设计的任务关键控制应用，可靠性是非常重要的。它建立在一个面向安全的实时操作系统之上，所有软件的设计和测试都符合安全标准，并考虑到容错性。硬件是设计和制造的军事标准。

Spatial 的内部滤波器运行在 1000Hz，数据也可以通过高速 RS232 以这个速率输出。这允许控制动态不稳定的平台。空间也高度容忍动态运动和振动与先进的过滤器设计这些应用。

性能:

- 0.1°滚转和俯仰精度
- 0.2°航向(GNSS)精度
- 20mm RTK 定位
- 3°/h MEMS 陀螺仪
- 1000hz 更新速率
- 2000 冲击极限

主要特点:

- Multi-Constellation RTK
- 热启动时间:500 毫秒
- 轻重量:30 克
- 小尺寸:30 × 30 × 24 毫米
- 低功耗:65ma @ 5V

11) Xsens - MTi 600-series

Xsens 生产高可靠性的基于 MEMS 的 IMU，用于专业的 UAS 应用，包括导航，控制和稳定。Xsens 是惯性传感技术的领先创新者。使用最先进的传感器融合技术，IMU、VRU、AHRS 和 GPS/INS 产品为固定翼和旋转翼无人机(UAS)、自主水下航行器(auv, uuv)以及其他机器人航行器提供高度准确和可靠的结果。



MTi 600 系列具有工业级惯性测量的完整集成级别(IMU, VRU, AHRS 和 GNSS/INS)，具有本机 CAN 支持和外部 GNSS 接收器支持。MTi 600 系列具有小的外形系数和最先进的扩展卡尔曼滤波，是测量应用的理想选择，涉及各种尺寸的机器人和无人系统，在任何领域-海底，水面，陆地和空中。

MTi 600 系列完全由免费的 2019 MT 软件套件支持，传感器可以提供一個开发工具包，允许用户轻松配置和集成在他们自己的应用程序中的单元。MT-610, 620, 630 和 670 可作为高度紧凑的模块，而 MTi-680G 具有坚固的 IP68 额定外壳，内部 RTK GNSS 接收器。

MTi 600 系列是我们最灵活的工业级 MEMS 定位传感器。这个价格实惠的系列产品重量轻，坚固耐用，性价比高，易于集成。该系列高度灵活，具有本地 CAN 支持，外部或内部全球导航卫星系统(GNSS)接收器支持和实时运动学(RTK)定位。

通过该系列，可以访问多个集成级别，包括惯性测量单元(IMU)、垂直参考单

元(VRU)、姿态和航向参考系统(AHRS)和全球卫星导航系统/惯性导航系统(GNSS/INS)。MTi 600 系列提供全功能传感器融合算法和易于使用的开放软件开发工具包(SDK)。

亮点:

- CAN 接口, 用于总线通信
- 外部 GNSS 接收器支持(MTi-670, MTi-680)
- 支持协议:Xbus, NMEA, CAN
- 工业级精度, 所有传感器 100%校准和测试
- 可与内部 RTK GNSS 接收器
- 扩展卡尔曼滤波
- 解决小型和大型机器人和无人系统的创新, 在任何领域:海底, 海洋, 陆地和空中

Product	Gyro bias stability	Roll/Pitch	Yaw	Position/Velocity
MTi-610 IMU	8°/h			
MTi-620 VRU	8°/h	0.2°	unref.	
MTi-630 AHRS	8°/h	0.2°	1°	
MTi-670(G) GNSS/INS	8°/h	0.2°	0.8°	yes
MTi-680(G) RTK-GNSS/INS	8°/h	0.2°	0.5°	yes

MTi-610 IMU

MTi-610 是惯性测量单元(IMU)的最高标准。MTi-610 提供了三维角速度、三维加速度和三维磁场的校准数据。作为 MTi 600 系列的一部分, 该模块重量轻,

健壮，成本高，易于集成。您可以通过两种方式将其无缝集成到您的应用程序中：一种是头部朝下，直接安装在 PCB 上，另一种是独立使用扁平电缆进行通信。它还非常灵活，具有本机 CAN 支持。MTi-610 IMU 是一款工业级、价格低廉的基于 MEMS 的运动传感器，配有易于使用的开发工具包。

MTi-630 AHRS

MTi-630 是姿态和航向参考系统(AHRS)的最高标准。它的传感器和传感器融合算法提供无漂移横摇、俯仰和真北参考偏航的数据。作为 MTi 600 系列的一部分，该模块是轻量级和健壮的，并且具有成本效益和易于集成。您可以在您的应用程序中以两种方式无缝集成 MTi-630:头朝下，直接安装在 PCB 上，或作为一个独立的，使用扁平电缆进行通信。它还非常灵活，具有本机 CAN 支持。MTi-630 AHRS 是一款工业级、价格非常合理的基于 MEMS 的方向传感器，具有集成的传感器融合算法和易于使用的开发工具包。

MTi-670 GNSS/INS

MTi-670 是 GNSS/INS(全球卫星导航系统/惯性导航系统)的最高标准，结合了来自外部 GNSS 接收器的方向估计与速度和亚米位置数据。作为 MTi 600 系列的一部分，这一一体化导航解决方案重量轻、健壮、成本高、易于集成。您可以在您的应用程序中以两种方式无缝集成 MTi-670:要么将头部朝下，直接安装在 PCB 上，要么作为一个独立的，使用扁平电缆进行通信。它还非常灵活，具有本机 CAN 支持。MTi-670 GNSS/INS 是一种工业级、价格非常合理的 MEMS 导向传感器，具有集成的传感器融合算法和易于使用的开发工具包。

MTi-680 RTK GNSS/INS

当连接到外部实时动态(RTK)GNSS 接收器时，MTi-680 代表了 GNSS/INS(全

球卫星导航系统/惯性导航系统)的最高标准。MTi-680 支持 RTK 精度, 这意味着您可以在位置上获得平滑的高频(400Hz)厘米级精度, 即使在拒绝 gnss 的环境中。作为 MTi 600 系列的一部分, 该模块重量轻, 坚固, 性价比高。您可以在您的应用程序中无缝地集成 MTi-680, 头部朝下, 直接安装在 PCB 上, 或作为一个独立的单元, 使用扁平电缆进行通信。它还非常灵活, 具有本机 CAN 支持。MTi-680 RTK GNSS/INS 是一种工业级的、价格非常合理的基于 MEMS 的方向传感器, 具有集成的传感器融合算法和易于使用的开发工具包。

12) Xsens - MTi 1-series



MTi 1 系列模块具有安装在独立 PCB 上的 3D 姿态和航向参考系统(AHRS)、垂直参考单元(VRU)和惯性测量单元(IMU)。

MTi 1 系列是无人机和其他无人驾驶车辆控制和稳定的理想解决方案。该模块集成了经过验证的 XKF3 传感器融合算法, 可实现高精度和传感器自动校准, 以及优化的 Attitude Engine 捷联算法, 该算法在 1khz 下执行高速航迹推算计算, 可精确捕获高频运动。

MTi 1 系列包括一个惯性测量单元(IMU)、一个垂直参考单元(VRU)和一个全功能、低成本的姿态和航向参考系统(AHRS), 可选的全球卫星导航系统/惯性导航系统(GNSS/INS)接收器支持。它是市场上最小的工业级解决方案, 是需要可靠性和健壮性的大量应用程序的绝佳选择。

- 横滚/俯仰精度:动态 0.8 度, 静态 0.5 度
- 偏航精度:静态/动态 2.0 度
- 陀螺仪偏置稳定性:10 度/小时
- 加速度计偏置稳定性:0.1 毫克
- PCB 尺寸:12.1 x 12.1 mm
- 重量:1 克

MTi-1 IMU

MTi-1 是一个独立的惯性测量单元(IMU)。它提供了关于转弯速度、加速度和磁场的校准数据——所有这些都是 3D 的。经过测试和温度偏差校准, 它是一个健壮、可靠的传感器模块。其设计是为了在大容量应用中易于集成, 也是表面可挂装器件(SMD)集成的最具成本效益的产品。它的信号处理管道和输出选项套件使您能够在任何输出数据速率下获得最高的精确度, 同时限制应用程序处理器的负载。

MTi-1 是 MTi 1 系列的一部分。这是 Xsens 最小的系列产品, 感谢我们使用了最新的微型 MEMS 技术。MTi 1 系列为您提供了市场上最小的工业级外形因子, 每个模块测量只有 12.1mm x 12.1mm。

MTi-3 AHRS

MTi-3 是一个独立的姿态和航向参考系统(AHRS)。除了由 MTi-1 和 MTi-2 收集和计算的数据外, 它提供真正的北参考偏航, 或航向。

作为 MTi 1 系列的一员, MTi-3 因其小的外形系数(12.1mm x 12.1mm)、易于集成、低成本和健壮性——以及其捷联集成算法而脱颖而出。适用于广泛的(嵌

入式)应用, MTi-3 减轻了集成和维护陀螺仪、加速度计和其他传感器的工作, 以及必须设计一个一体化的 AHRS 解决方案。

MTi-7 GNSS/INS

MTi-7 是一种独立的 GNSS/INS(全球卫星导航系统/惯性导航系统)。MTi-7 采用 Xsens 公司开发的先进传感器融合算法, 将模块机载加速度计、陀螺仪和磁强计的输入与外部 GNSS 接收器和/或晴雨表的数据同步。原始传感器信号被组合, 并以 100hz 的高数据速率进行处理, 生成一个实时数据流, 包含设备的 3D 位置、速度和方向(横摇、俯仰和偏航)。

作为 MTi 1 系列的一员, MTi-7 是同类中最小的运动跟踪模块(12.1x12.1mm)。它还因其易于集成、低成本、鲁棒性和捷联集成算法而脱颖而出。适用于广泛的(嵌入式)应用, MTi-7 减轻了用户的任务, 设计, 集成和维护陀螺仪, 加速度计和其他传感器的 GNSS/INS 功能。

MTi-7 GNSS/INS 模块是一种运动跟踪模块, 具有微型 SMD 形状因子和低功耗。它具有多个 GNSS 接收器支持, 是我们最小的 GNSS/INS 模块, 采用先进的完全可配置传感器融合算法。它是无人机和其他无人驾驶车辆以及移动物联网应用的底层集成的理想解决方案。

MTi-8 RTK GNSS/INS

MTi-8 是一种自给自足的 GNSS/INS(全球卫星导航系统/惯性导航系统), 具有与外部实时运动学(RTK) GNSS 接收器的接口。MTi-8 增加的 RTK 功能意味着您可以提高位置数据从米级到厘米级的精度。

作为 MTi 1 系列的一员, MTi-8 是同类中最小的 rtk 增强运动跟踪模块(12.1x12.1mm)。它还因其易于集成、低成本、鲁棒性和捷联集成算法而脱颖而出。

适用于广泛的(嵌入式)应用, MTi-8 减轻了你的任务, 设计, 集成和维护陀螺仪, 加速度计和其他传感器的 GNSS/INS 功能。

13) NovAtel - EG320N

NovAtel 提供一系列来自领先制造商的 IMU, 这些 IMU 可以与 GNSS 接收器相结合, 提供高精度和连续的位置、速度和姿态数据。包括商用 MEMS IMU、高端战术级 MEMS IMU、战术级 FOG IMU 和战术级 RLG IMU。



EG320N 是来自爱普生的微机电系统(MEMS) IMU。它的特点是低噪声陀螺仪和加速度计在一个小的, 轻量级的外壳。EG320N 能够在非常小的尺寸下实现对低成本、高性能和坚固耐用的应用的精确测量。当与 NovAtel 的 SPAN 技术集成时, 该 IMU 非常适合尺寸受限的应用, 这些应用需要精确的 3D 位置、速度和姿态数据。

14) NovAtel - EG370N



EEM -IMU- EG370N 是爱普生的高性能微电子机械系统(MEMS)惯性测量单元(IMU)。EG370N 能够实现更高的数据速率和精确的测量, 适用于需要高性能和坚固耐用的小型、轻量级外壳的应用。

NovAtel®SPAN®技术可与该 IMU 集成, 提供稳定和准确的 3D 位置、速度

和姿态。GNSS 定位的绝对准确性和 IMU 测量的稳定性结合在一起，提供了一种特殊的 3D 导航和姿态解决方案，即使在卫星信号被阻塞的时期也能稳定持续地使用。

五. LiDAR传感器

1. 激光雷达传感器技术

Lidar – Light Detection and Ranging 是一种遥感技术，用脉冲激光束扫描环境，测量信号从物体返回到探测器的反射时间。飞行时间(ToF)反射时间测量可以用于从一米到几公里的距离。为了增加激光雷达系统的范围，在不可见的近红外 (Near Infrared) 范围内使用非常短的激光脉冲。与连续波激光器相比，这些激光器能够提供更高的激光功率，同时仍然符合眼睛安全要求。

在扫描过程中，激光雷达系统将在集合点中收集单独的距离点，从这些点可以计算出环境的 3D 图像。激光扫描仪使用偏转镜来偏转激光束，这使他们能够实现非常宽的视野(FoV)。大多数最新的无人机激光雷达系统可以绕自己的轴旋转，并提供 360 度能见度。现代设备实现非常高的数据速率，每秒超过 100 万个距离点。

在激光雷达传感器中，许多独立的元素被集成到单个设备中，将生成关键的测距数据，用于安全导航和精确定位。激光雷达传感器具有在广阔视野内探测障碍物的能力，这使它们成为感知和避免解决方案的理想组成部分。激光雷达是汽车防撞和无人驾驶汽车领域的领先技术，防撞技术现在已经进入了消费无人机领域，高度创新的大疆 Mavic 2(四面都有传感器)、大疆 Phantom 4 Pro V2(使用 2 个超声波传感器和 4 个单眼传感器)和 Yuneec Typhoon H Pro(使用英特尔 RealSense R200 3D 相机)现在都具有防撞功能。

最新的激光雷达传感器集成了光学测高仪技术，可以在满足无人机制造商的尺寸、重量和成本要求的同时，提供精确的地面以上距离测量。农业和林业使用

激光雷达检查树叶和作物等植被。此外，还可以删除地面图像(例如森林冠层)以查看地面表面积。最好的激光雷达传感器具有强大的内置信号处理、大视场和多段测量，产生关键距离数据和有效的障碍物检测，在执行结构检查时实现安全导航。激光雷达传感器也被称为激光扫描，可以在低对比度或阴影环境下工作，甚至在晚上。

安装在无人机上的激光雷达传感器和激光雷达软件可以非常快速地处理图像，使利益相关方和相关方能够做出有效的决策。在过去的几年里，激光雷达传感器的发展和改进的速度是巨大的，并将继续更多的进入该领域。在未来几年里，我们将看到大多数激光雷达传感器工作从飞机转移到激光雷达无人机上。事实上，所有用于飞机的大型激光雷达传感器制造商都开发了用于无人机的小型激光雷达传感器。

大疆 Matrice 600 和 600 Pro 可用于携带许多不同的激光雷达传感器。许多解决方案需要一个激光雷达传感器和另一个传感器，如用于摄影测量的 RGB 相机或安装在无人机上的多光谱传感器，以捕获特定解决方案的图像。因此，在选择无人机时，需要考虑激光雷达传感器和 RGB 相机的有效载荷能力。

2. 可选激光雷达型号

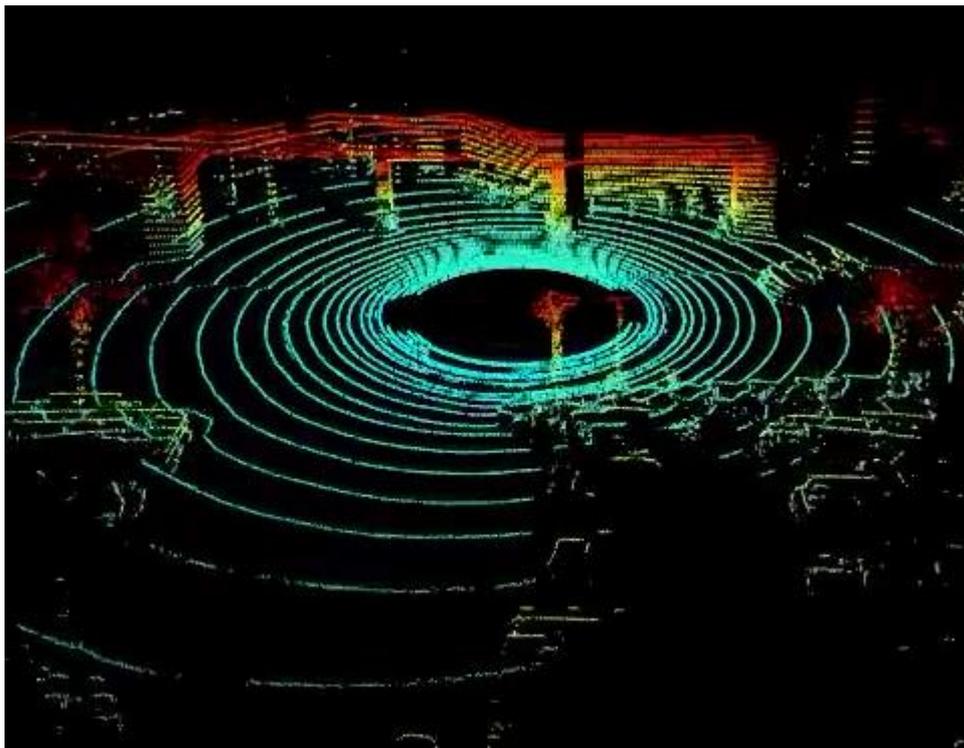
manufacturer	model	max. range	vertical FoV	horizontal FoV
Velodyne	HDL-32E	100m	41.33deg	360deg
	Puck	100m	30deg	360deg
	Puck LITE	100m	30deg	360deg
	Puck Hi-Res	100m	20deg	360deg
Ouster	OS0	50m	90deg	360deg
	OS1	120m	45deg	360deg
	OS2	240m	22.5deg	360deg
Livox	Avia	450 m	77.2deg	70.4deg
	HAP	150 m	25°	120°
	Mid-70	260 m	70.4°	70.4°
HeSai	Pandar40M	120 m	40deg	360deg
	Pandar40P	200 m	40deg	360deg
	PandarXT-16	80 m	30deg	360deg
普宙科技	PLI01	450m	4.5deg	70.4deg
AGM	MS1	200 m		360°
	MS3	200 m		360°

表中型号的具体性能对比、报价及网址信息，详见“附件 1.xlsx”中的“LiDAR”
表单。

1) Velodyne HDL-32E



HDL-32E 激光雷达传感器体积小、重量轻、坚固耐用，在 40 度垂直视场上可达 32 个激光。HDL-32E 只有 5.7"高 x 3.4"直径，重量不到 2 公斤，设计用于满足最具挑战性的现实世界自主导航、3D 移动测绘和其他激光雷达应用的需求。

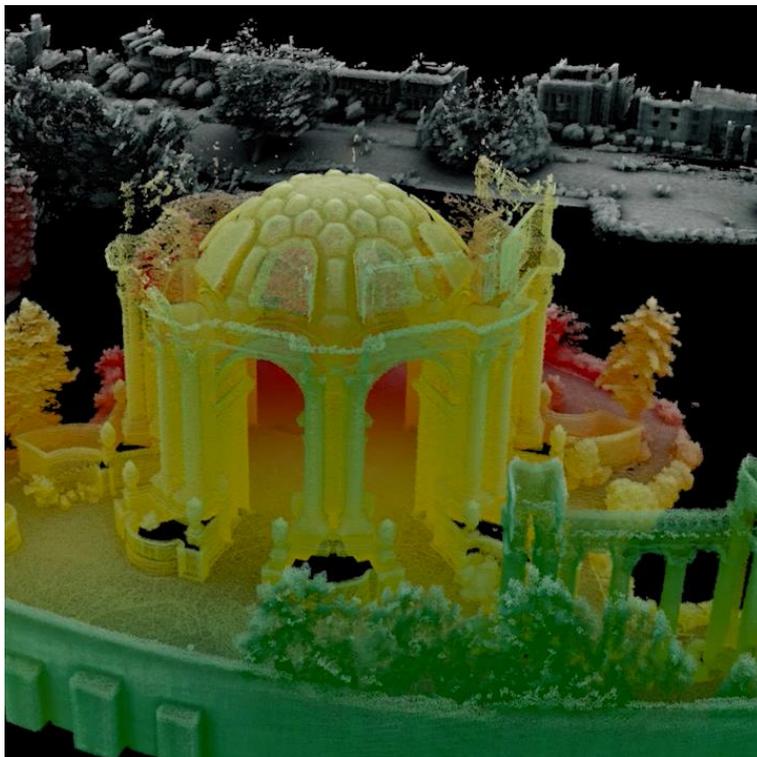


外形小巧、易装配，并且具有大视场的特性，使得 Velodyne's HDL-32E LIDAR 可以应用于诸多工业领域，例如自动驾驶、三维建图、安全巡检等。Velodyne's HDL-32E 可以达到最高 695,000pts/sec 的点云生成速率，高达 100m 的探测距离， ± 2 cm 的探测精度。单帧数据中全面的点云覆盖率使得 HDL-32E 成为传感

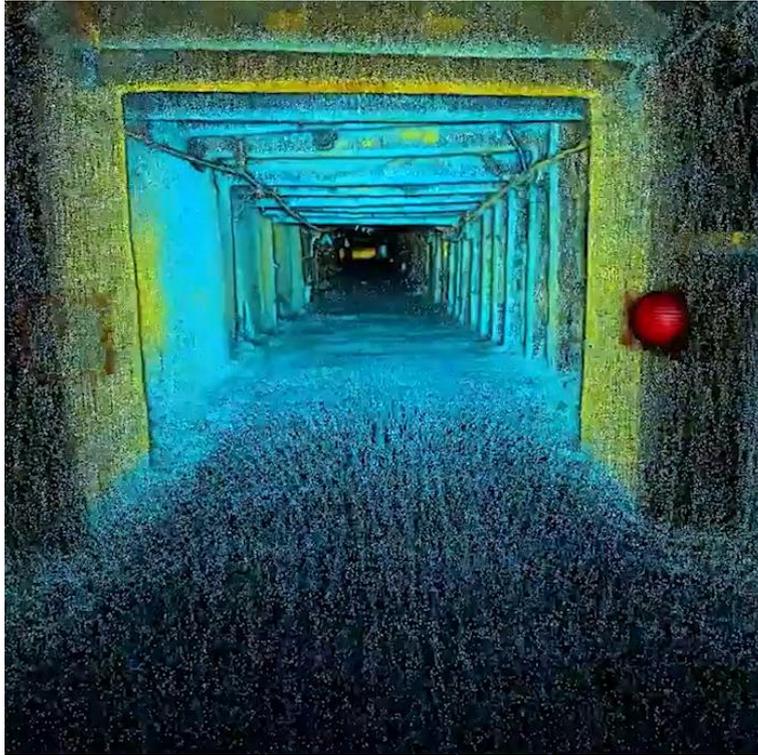
器套件中不可获缺的一部分。

2) Velodyne Puck

Velodyne 的新型 PUCK™VLP-16 激光雷达传感器是 Velodyne 3D 激光雷达产品系列中最小、最新、最先进的产品。它比同样价格的传感器更具成本效益，并且在开发过程中考虑到了大规模生产。它保留了 Velodyne 在激光雷达方面的突破的关键特征:实时、360 度水平视场、3D 距离和校准反射率测量。



Velodyne 支持双回波模式，可以更精确地捕捉复杂环境的细节信息，例如森林环境、基础设施环境和高楼建筑物，其中包含杂乱小型物体以及透明表面。相比于单回波模式，多回波可以显著增加可用数据点的数量，用来进行更精细的建图或导航。这个特性使得 Velodyne 传感器可以输出精度更高的 3D 图像数据，提高系统的有效性、安全性和可持续性。



3) Velodyne Puck LITE



Velodyne LiDAR 的 Puck LITE™是 VLP-16 Puck 的轻量级版本，适用于需要较低重量以满足其要求的应用。Puck LITE™与 VLP-16 具有相同的性能，唯一的

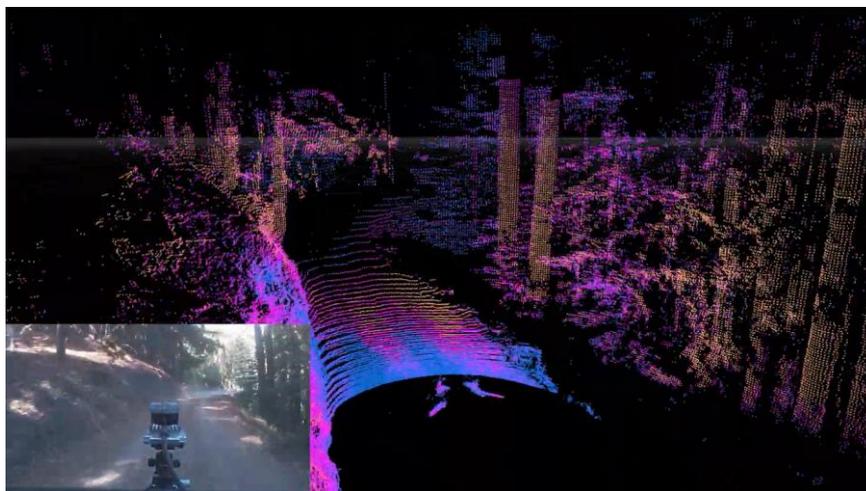
区别是重量为 590 克(1.3 磅)，而 VLP-16 为 830 克。Puck LITE™没有进行其他更改，因为它保留了其 360 度环绕视图专利，以捕获实时 3D 激光雷达数据，包括距离和校准反射率测量。

这一款激光雷达专为需要轻巧型设备的应用场景而设计，是 Velodyne 历来最轻便的一款设备，Puck LITE 保留了 Puck 的视场范围以及领先的性能（双回波模式）。Puck LITE 可用于无人机、背包等需要可靠性的低重量的平台。

4) Ouster OS0/OS1/OS2（超广角/中距/长距）

OS0 实测

- 载有支持 SLAM 算法的内置 IMU
- 输出均匀间隔的 3D 点云图像和像素对齐的 2D 照相级图像，实现更高效的数据处理、更快的标注和更简的算法应用。

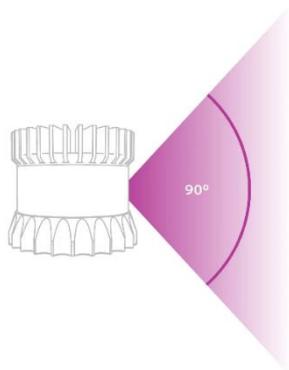


OS0 具有 90° 垂直视场角，实现更强的环境感知，仅重 447 克，且采用模块化散热盖设计，可无缝集成到自动驾驶车辆、无人机或机器人上。L2X 是截至目前该厂商设计过的最强大、性能最高的芯片，将最新 Rev 06 OS 机械旋转系列激光雷达的信号处理能力和数据输出提升了一倍。借助 L2X 芯片和双回波功能，最新版本的数字激光雷达能够更好的在雨雪雾、扬尘、烟雾和其他遮蔽物存在的环

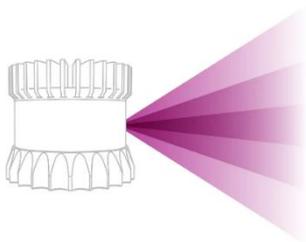
境下进行精准探测。Ouster 激光雷达可持续使用 10 万小时，防水、防冲击、防振动，工作温度 -40°C 至 $+64^{\circ}\text{C}$ 。Ouster 激光雷达输出的结构化数据和高质量的强度数据，可提高算法的效率和准确性。

OS0 激光雷达线束分布（可配置）

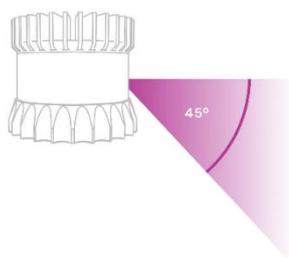
均匀分布



中心加密



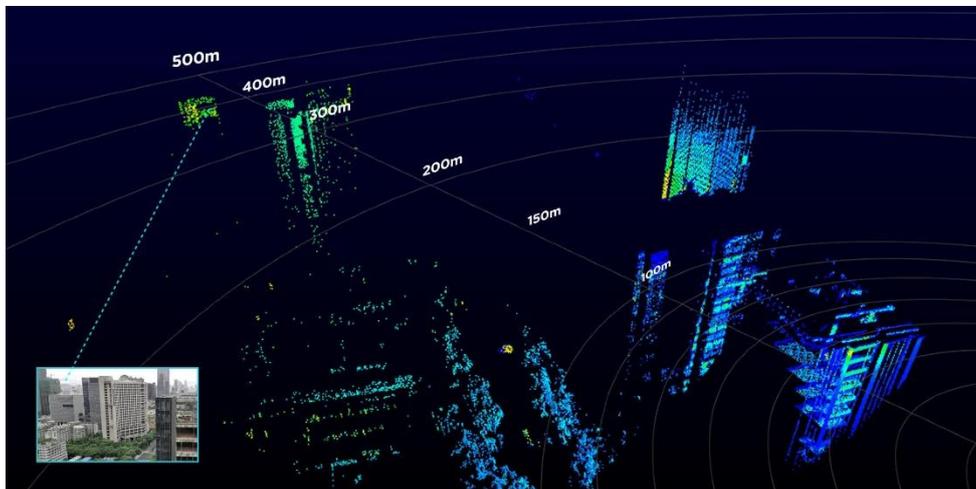
向下分布



5) Livox Avia

Livox Avia 固态激光雷达外形轻巧紧凑，探测距离和效率也全面提升，FOV 超过了 70deg。支持三回波和双扫描模式，可广泛应用于建图、电力检测、智慧城市等场合。

根据环境光的强弱，在保证低噪点率的同时调节探测距离，在低照度环境（阴天、夜晚等）的量程可提升至 450m，可支持无人机设备在更高的航行高度进行作业，提升效率的同时不遗漏远距离物体的细节。



在工作时可射出多路激光同时进行高速扫描，点云数据率可达 240,000pts/s，可配置三回波获得更深层的点云信息。提供非重复扫描以及重复扫描两种扫描模式，可适配不同的作业场景。在非重复扫描模式下，视场覆盖率随时间推移而显著提高，70deg 的大 FOV 可一次性获取更大场景的点云数据，形成高密度点云。适用于智慧城市、移动测绘、三维建图等场景。重复扫描模式针对精度及点云均匀度要求更高的电力巡检、林业测绘等场景，重复扫描模式可显著提升作业效率。独特的光斑形态可对细长物体（如电线）有更优分辨率，辅以特殊的扫描模式，带来更高的测绘精度。其三回波特性和亦可获得更多来自树冠、地面的点云数据。

6) Livox HAP

Livox HAP 由 Livox 团队耗时两年精心打造,是 Livox 首款面向智能辅助驾驶市场研发的车规级激光雷达。HAP 于 2021 年在全新自建的车规级智能制造中心进行批量生产,可满足 74 项严苛的车规可靠性要求。

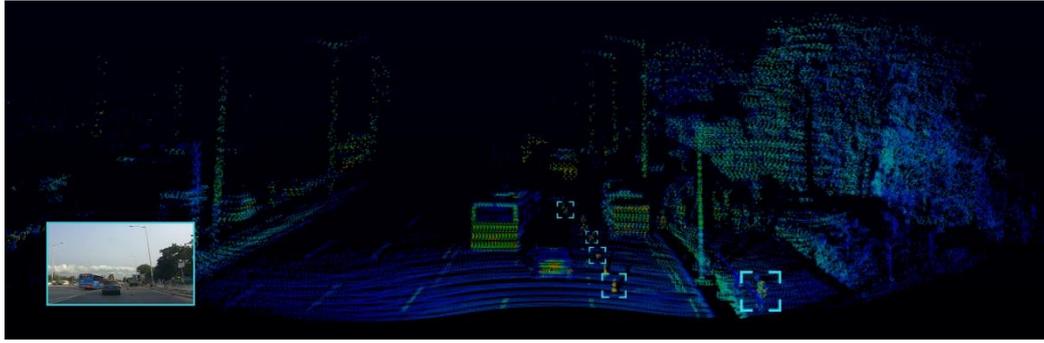
HAP 已成功为小鹏汽车、一汽解放等商乘用车项目批量供货,帮助客户进一步打造行业领先的智能辅助驾驶系统,为更安全与舒适的驾驶体验保驾护航。

HAP 已在 Livox 自建的车规级检测中心完成并通过了 70 余项可靠性测试。该中心按 CNAS 标准打造,引进世界领先的先进测试设备,并配置业内顶尖的专业化团队,可满足产品自主高效的专业化测试需求,并确保产品各项指标可满足主流车企客户企标以及 ISO 16750 等多项行标的严格要求。

Livox 全新自有车规级智能制造中心首期规划面积约 1500 平米。该中心拥有全自动化激光雷达组装线,每条产线年产能达 20 万颗,同时配备数条 PPM 低至 10 的全球顶级 SMT 产线,可确保 Livox 激光雷达核心组件的自主高效生产。

HAP 探测距离提升至 150 米,助力自动驾驶系统更游刃有余地应对高速公路、城区道路等场景中远处障碍物的超前检测。HAP 横向视场角为 120°,通过双台部署,可为车前方提供最高至 180° 的超宽点云视野,提高应对近处车辆加塞、十字路口拐弯等复杂路况的通行能力,优化智能辅助驾驶功能的用户体验。

HAP 角分辨率高达 $0.18^{\circ} \times 0.23^{\circ}$,其中感兴趣区域 (ROI, Region of Interest) 的点云密度可等效 144 线激光雷达。更密的点云输出带来更丰富的环境感知,让算法可以更精准地检测到远处行人、自行车、雪糕桶等细小目标物体。

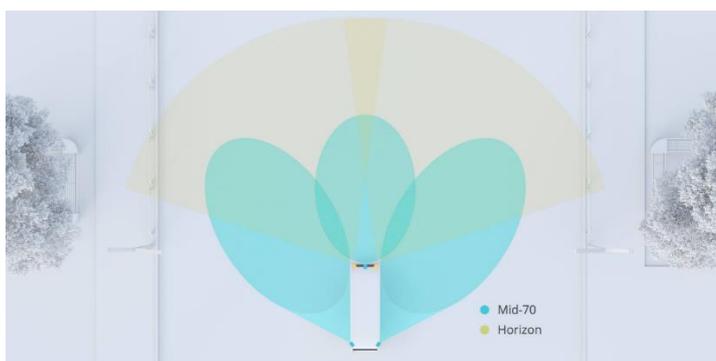


7) Livox Mid-70

Mid-70 延续 Livox 高性价比的优势，更针对低速自动驾驶、移动机器人等应用领域进行优化设计，大幅提升垂直与水平方向视场角、减小盲区、提高近处精度，为机器人带来更全面的视野。

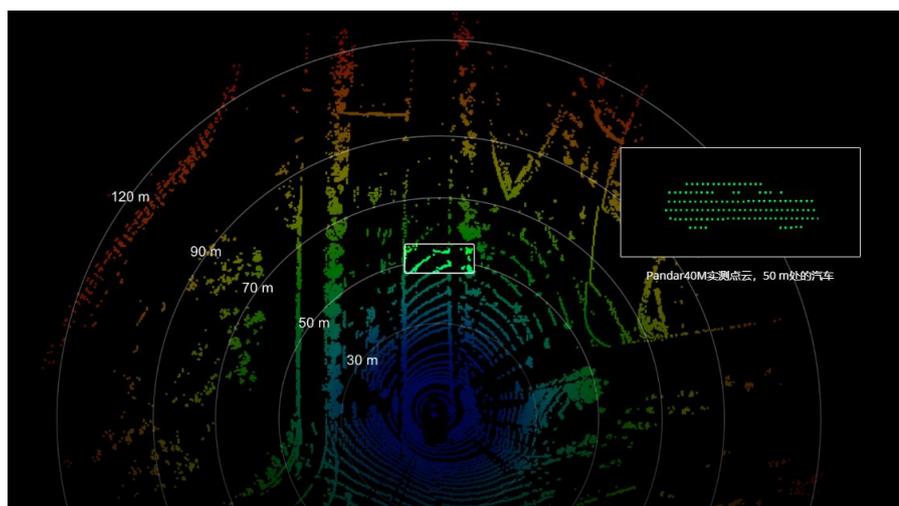
Mid-70 的圆形视场角在水平和垂直方向上均可达 70.4 度，近处盲区大幅度降至 5 厘米。更大视场角和更小盲区帮助机器人更全面探测周遭环境，及时避开细小障碍物，让机器人在机场、商超、医院等拥挤复杂环境下安全运行。视场角提升至 70 度，比 16 线机械式激光雷达的垂直视场角增加一倍以上，全面探测视场角内的物体，作业安全性更有保障。盲区最小处仅 5 厘米，帮助机器人精准实现避障、建图、定位和导航等各项功能，实现作业效率的高效化。

为普及激光雷达技术在移动式机器人、低速物流无人配送车等行业中的应用，Livox Mid 系列避开价格高昂的激光发射器及尚不成熟的 MEMS 扫描仪，用成本较低的半导体元件实现激光生成和探测。



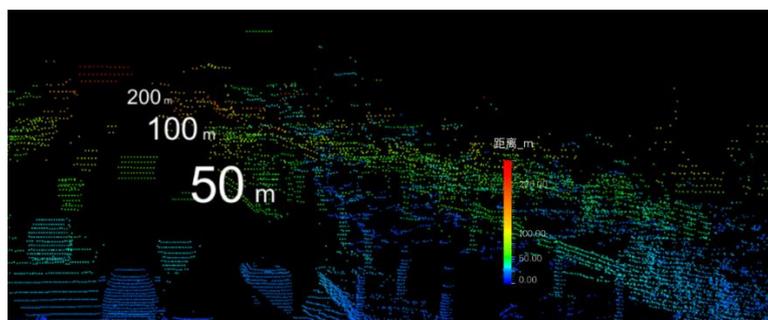
8) HeSai Panda40M

Panda40M 是禾赛科技的 40 线中距机械激光雷达。优化的测距与分辨率，在充分满足产品性能要求的前提下，提供更加经济的选择。专为中低速应用设计，为穿梭巴士、工业、物流、V2X 等多种场景提供精确有效的感知

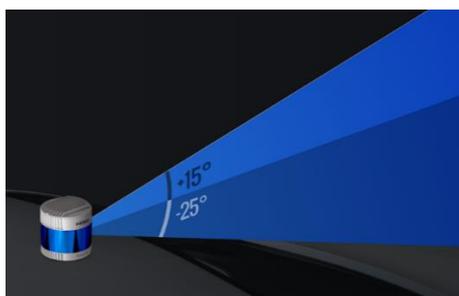


9) HeSai Panda40P

禾赛科技的 40 线机械激光雷达，拥有 200 m@10%反射率的超远探测距离。



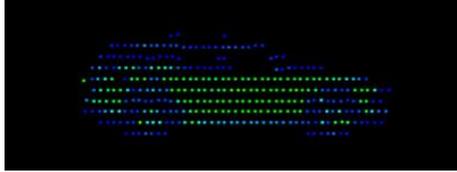
提供 40° (-25°至+15°) 垂直视场角。



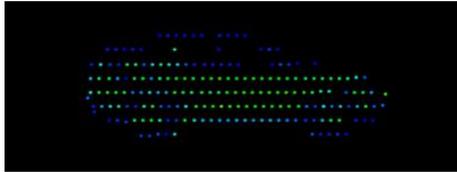
0.33° 最小垂直角分辨率使得 Pandar40P 可以清晰的探测到不同距离下的

车。

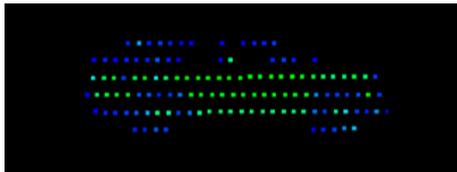
30m



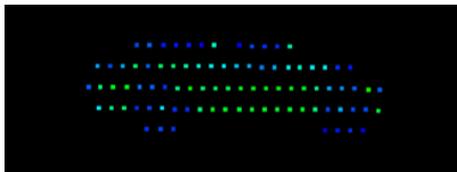
40m



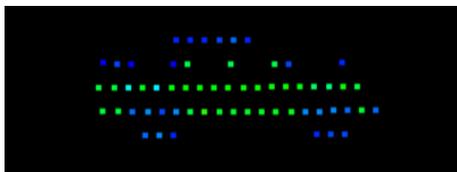
50m



60m



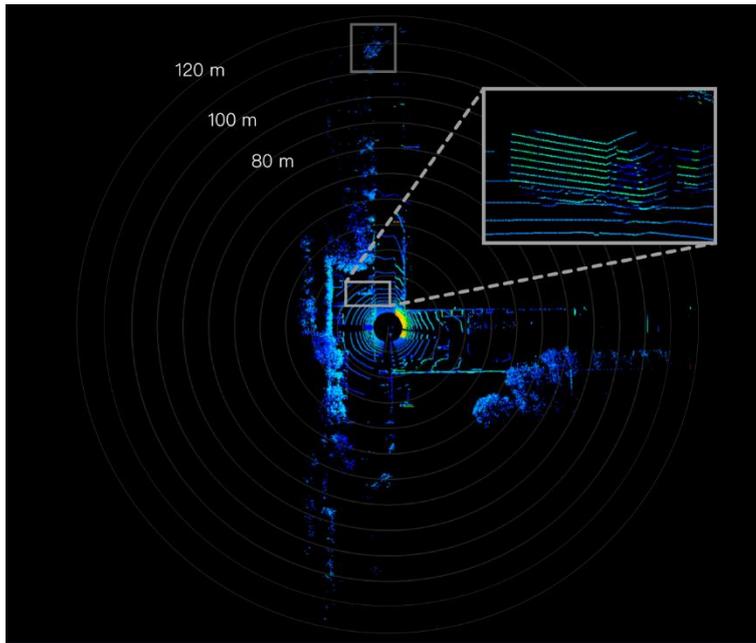
70m



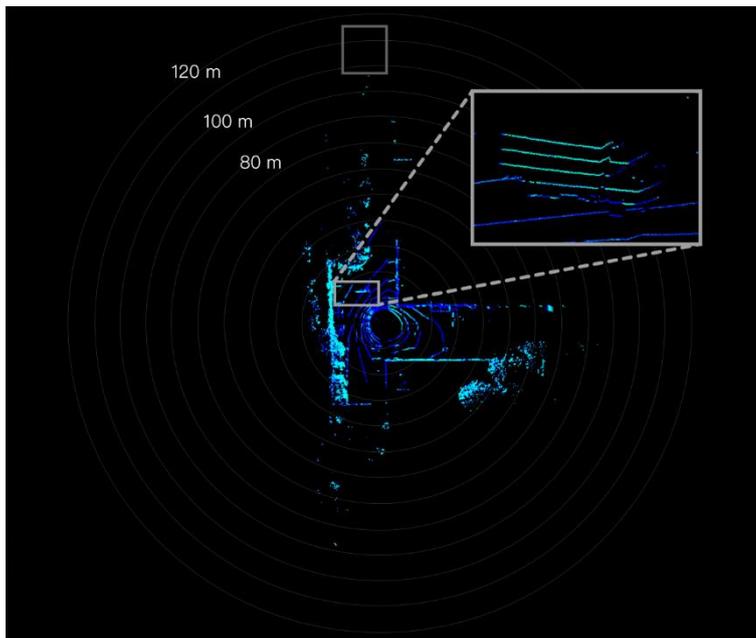
10) HeSai PandaXT 32/16

高精度、零盲区、自研芯片 32 线中距离机械旋转式雷达。相比传统中距离雷达，XT32 将线束提高至 32 线，点云分辨率提高一倍最远测距达到 120 米，80 米处探测 10%反射率目标，探测概率大于 90%。

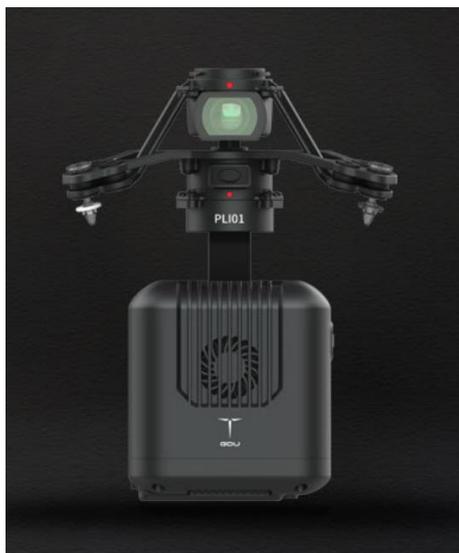
XT32:



传统 16 线激光雷达:

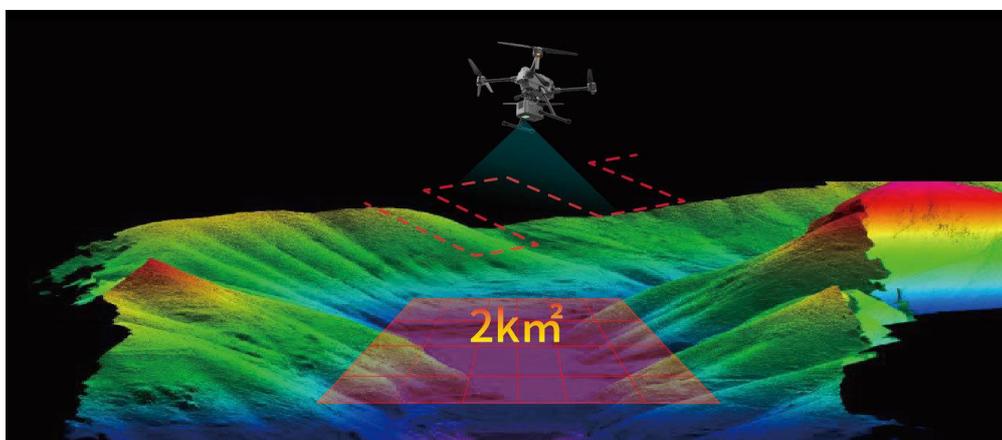


11) 普宙科技 PLI01 激光雷达



PLI01 激光雷达为一款针对多旋翼平台开发的轻量级专业设备，集轻小型激光雷达系统、惯性导航系统及高分辨测绘相机系统于一身，能高效采集高精度点云数据及丰富的影像信息，广泛应用于测绘、电力、林业、农业、国土规划、地质灾害、矿山安全等作业领域三维空间信息的获取。

支持三回波，其优异的点云穿透力，即使在高植被覆盖场景中，也能获取完整的林下地形数据信息。融合 GNSS，高精度惯导，生成厘米级高精度结果，为作业需求呈现更精准的三维场景。距离测量能力可达 450m (80%反射率)，单架次作业面积可达 2km²，高效灵活应对每一次作业需求。



12) AGM-MS1/MS3



廉价有效的无人机机载激光扫描解决方案。低重量和紧凑的扫描系统使该设备尽可能跨平台，允许安装在各种飞机上，包括固定翼飞机类型的无人机。集成一个外部相机的可能性-可见范围或多光谱，扩大了应用领域。这种激光雷达的主要用例:

用于无人机的激光扫描仪的重量为 1.5 公斤，这使得它很容易安装在广泛的无人机上。AGM-MS3 激光扫描仪设计为完全自主操作，最小的操作人员参与，使测量简单，快速和方便。集成外部摄像头的能力——从全景到热成像，打开了无限数量的应用。

无人机机载激光扫描技术的基础是在小型激光测距仪和导航测量的帮助下，将对下垫面的距离测量集成起来，以确定机载激光扫描仪的轨迹及其在空间中的定向角度。

无人机的机载激光扫描伴随着对地面基站网络的全球导航卫星系统测量。在这些测量的基础上，对机载激光扫描仪导航系统得到的弹道解进行微分修正。

通过对测距仪测量值和轨迹的联合处理，得到了一组激光反射点，每个点在所需坐标系中具有较高的空间坐标 XYZ。无人机空中扫描点密度每平方米可达几百个。与机载激光扫描同时，小型数码相机也进行了航空摄影。使用 AGM-PS 导

航系统进行航拍和图像的外部方向元素定义。这允许您“抓拍”航拍照片，以高精度的地点。

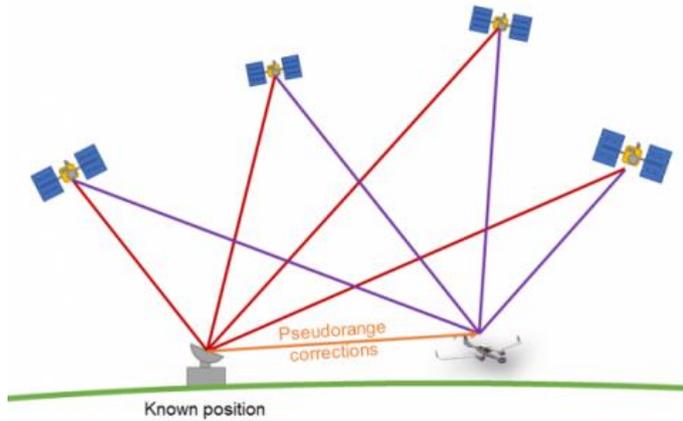
六. GNSS传感器

1. 全球导航卫星系统

在世界上任何地方和任何天气条件下获得最准确的无人机位置和姿态信息是无人机的一个基本因素。因此，了解先进的 GNSS 使用系统的类型和它们的功能是至关重要的。许多无人系统，如无人机、UGV 和 AUV 都需要使用 GNSS 为其提供高度的定位精度，用于测绘、测量、精准农业和搜救等应用。GNSS 天线安装在机体的某个地方，卫星数据通常被输入到航空电子设备、自动驾驶仪或导航系统。

GNSS(全球卫星导航系统)是一个标准术语，指任何提供全球覆盖的地理空间定位数据的基于卫星的导航系统。一组被称为星座的 GNSS 卫星由 18 ~ 30 颗中地球轨道卫星组成，这些卫星被用作计算位置的参考点。这些卫星包含一个高度精确的原子钟，用于同步星座内所有卫星之间的时间。它们向地球发射信号，包含时间和轨道位置信息。

将广播时间和接收时间进行比较，得到信号传播时间，再乘以光速，得到卫星到接收器的距离。GNSS 接收器需要“看到”——即跟踪并接收一个星座中至少四颗卫星的信号。三颗参考卫星之间的三段距离被用来通过一种叫做三分法的过程来确定卫星的位置，需要第四颗卫星来补偿精确的卫星原子钟和不太精确的地面接收器时钟之间的时钟误差。一旦确定了相对于卫星的位置，就可以将其转换为基于地球的坐标系统，以到达最终的地面位置。



除了导航，无人机还可以使用 GNSS 对收集到的数据进行地理参考，避免碰撞，或提供跟踪功能。GNSS 数据为无人机的控制回路提供输入，使其能够保持位置遵循一系列预设的路径点。这对水下机器人(如 AUV 和 ROV)也尤其重要，因为它们的位置会受到潮汐活动的显著影响。

GNSS 接收芯片接收卫星数据，并对其进行处理，以计算出位置、速度和时间。这些信息可以存储在本地或发送到远程监测或跟踪站。

许多 GNSS 接收模块可以同时跟踪多个 GNSS 星座和多个卫星。通常，来自每个卫星的每个信号被分配到接收机系统内自己的专用信道。多频接收器可以处理卫星在多个频率上广播的信号，如 GPS 的 L1、L2 和 L5。双天线接收器提供更大的航向精度，特别是在低动态情况下。

GNSS 通常由以下模块组成：

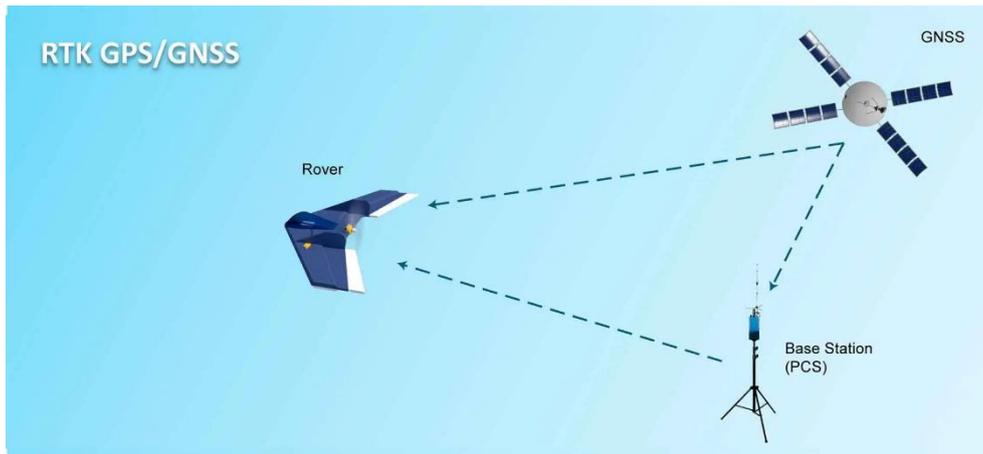
- 天线：天线捕获 GNSS 信号，以及可能的噪声和干扰。
- 前端：接收器的前端对天线捕获的信号进行降压、滤波、放大和数字化处理。
- 底板信号处理：许多信号处理序列用于搜索、保护和跟踪不同的信号。
- 应用程序处理：根据应用程序的不同，接收器处理 GNSS 信息，以便向用户提供有意义的输出。

GNSS 接收器大多是无源设备——当欧洲伽利略系统完全运行时将是一个例外。伽利略全球卫星导航系统接收器将配备紧急功能，在启动时能够广播信息。全球导航卫星系统面临着至少需要在四颗卫星的视线范围内才能提供可靠导航的限制。在信号差的环境中，将 GNSS 与惯性导航系统(INS)耦合是有利的，惯性导航系统使用旋转和加速度信息来计算在 GNSS 信号丢失期间可用于导航的相对位置。反过来，GNSS 可以为惯导系统提供外部参考，帮助减少偏置误差的影响。无人机和无人驾驶车辆的 GNSS/INS 接收器特别适用于城市或树木繁茂的环境，或用于无人机可能穿越隧道或其他 GNSS 信号障碍物的战术任务或工业检查。

RTK GPS/GNSS 定位

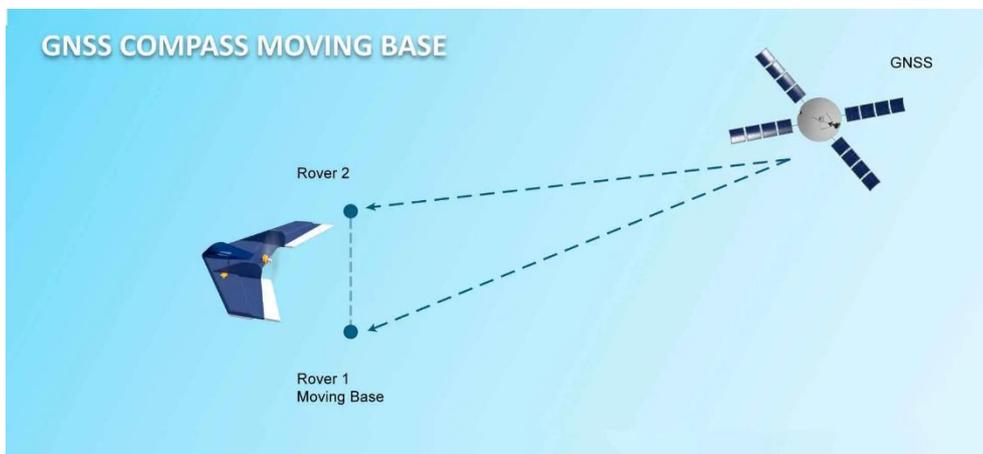
在 RTK(实时运动学)模式下，基站向 GPS/GNSS 空中模块发送修正信息。这可以提高两个设备之间的相对精度，消除大气和其他因素带来的误差。RTK 定位激活后，相对精度提高到厘米级别。根据操作需要，RTK 定位可以在整个飞行过程中激活或自动化激活，以便无人机在关键飞行阶段时开始接收 RTK 校正，例如在着陆阶段进行激活，确保接触点时间的厘米精度(在固定机翼的情况下)，降落在精确的点(在多旋翼的情况下)或激活高级模式(在网络或移动车辆降落的情况下)。

利用 RTK 模式的无人机应用之一是摄影测量。无人机的摄影测量可以为三维表面建模，创建计划和执行测量。因此，实现较高的精度是一个基本因素。利用 RTK 实时计算无人机相机位置，这允许校正相机位置的精度几厘米，无论是垂直和水平。



GNSS 罗盘移动基地

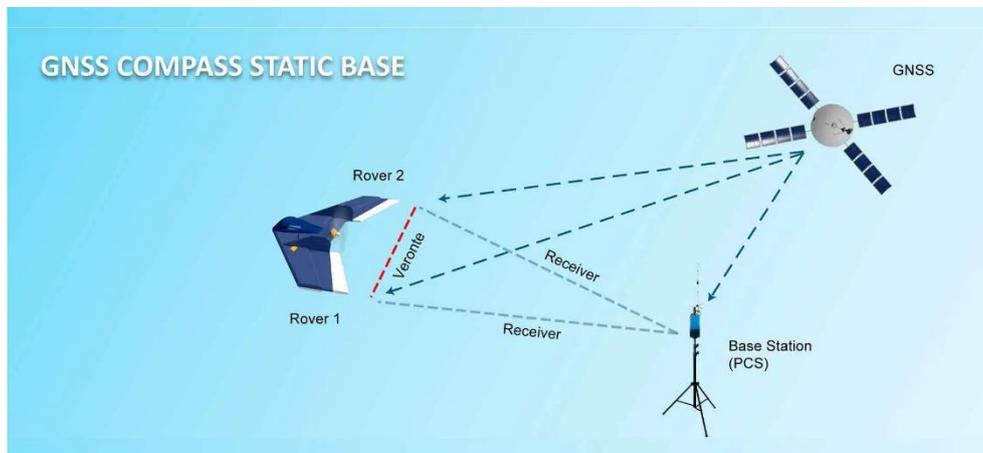
用这种方法，不需要使用磁强计或其他对电磁干扰敏感的传感器，就可以估计无人机的姿态和方向。为此，它使用至少两个 GNSS 天线(GPS, Glonass 和北斗)的相对定位，给定它们之间的已知相对位置。参考站和移动接收器可以移动，同时计算接收器天线之间的精确矢量，根据 GNSS 信号计算车辆的位置和姿态。该模型经常用于直升机，以实现磁强计冗余。其中一个应用是在高压塔附近，因为电磁干扰的存在干扰了磁强计的测量。



GNSS 罗盘静态基地

平台方位的修正由固定基站给出，无人机的航空电子系统可使用先前测量的天线位置在基座的坐标，这保证了更好的无人机绝对定位。航电系统知道了基地和每个无人机天线之间的两个矢量，计算两个天线之间的矢量。一个典型应用是

在移动平台上着陆，如船舶着陆，通过固定底座进行定向校正时，获得的移动平台精度较大。



GNSS 接收器是任何全球卫星导航系统(GNSS)的用户界面部分。接收器搜索和处理卫星传输的信号，以确定用户的位置、速度和精确时间(PVT)。虽然每个 GNSS 接收器将专门针对不同的可用系统和它们所使用的应用进行定制，但 GNSS 接收器的基本结构如下：

可供选择的 GNSS 接收器种类繁多，选择合适的 GNSS 接收器对项目的成功至关重要。不同的接收器将产生不同的性能，主要取决于以下几个因素，包括目标应用程序、接收器特性、环境、性能、精度、功耗和成本。

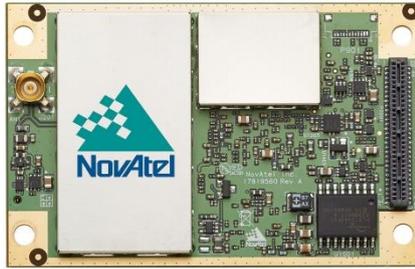
例如，单频接收器可以提供适合许多应用的精度水平，而且通常以较低的成本获得。然而，如果需要更精确的定位，提供多频率支持和差分定位模式的接收器可能更适合。

2. 可选 GNSS 接收机型号

manufacturer	model	single point L1	RTK
NovAtel	OEM7700	1.5 m	1 cm + 1 ppm
	OEM7720	1.5 m	1 cm + 1 ppm
	OEM719	1.5 m	1 cm + 1 ppm
ComNav Technology (SinoGNSS)	K801 GNSS module	1.5m RMS	8mm+1ppm horizontal 15mm+1ppm vertical
	K803 GNSS OEM module	1.5m RMS	8mm+1ppm horizontal 15mm+1ppm vertical
	K803 Lite (L1) GNSS Board	1.5m RMS	8mm+1ppm horizontal 15mm+1ppm vertical
	K823 GNSS OEM module	1.5m RMS	8mm+1ppm horizontal 15mm+1ppm vertical
Topcon	B111A OEM GNSS Receiver Board	H: 1.2m; V: 1.8m	H: 5mm+0.5ppm V: 10mm+0.8ppm
	B125 OEM GNSS Receiver Board	H: 1.2m; V: 1.8m	H: 5mm+0.5ppm V: 10mm+0.8ppm
	B210 OEM GNSS Receiver Board	H: 1.2m; V: 1.8m	H: 5mm+0.5ppm V: 10mm+0.8ppm

表中型号的具体性能对比、报价及网址信息，详见“附件 1.xlsx”中的“GNSS”
表单。

1) NovAtel OEM7700



OEM7700 多频 GNSS 接收机提供可靠的定位，简化集成，并在一个小的封装中提供最大的连接性。这种多频率 GNSS 接收器为空间受限的应用和具有挑战性的环境提供精确定位和先进的干扰缓解。

OEM7700 拥有 555 通道架构，可以跟踪当前和即将到来的 GNSS 卫星，包括 GPS、GLONASS、Galileo、北斗、QZSS 和 IRNSS。OEM7700 的固件选项包括带有 RTK 的 NovAtel CORRECT™用于厘米级实时定位，ALIGN®用于精确航向和相对定位，GLIDE®用于分米级传递到传递精度，SPAN®用于连续 3D 位置、速度和姿态。

特性

- 多频率，多卫星 GNSS 接收器提供灵活的定位选项和易于集成
- 多通道 I 波段支持 TerraStar 校正服务
- 串行，USB, CAN 和以太网连接与网络干扰
- 先进的干扰可视化和缓解功能
- 固件解决方案包括 RTK, GLIDE™, STEADYLINE®, SPAN®和 ALIGN®
- 集成简单，外形系数小，振动性能额定为 20 克
- SPAN INS 功能

多频率 OEM7700 为空间受限的应用提供了未来的精确定位。先进的干扰缓解功能在具有挑战性的环境中保持高性能。OEM7700 提供了多种界面选项以促

进系统集成, 为快速将强大的全球卫星导航系统(GNSS)功能产品推向市场提供了最有效的方式。OEM7700 利用 TerraStar 卫星提供的校正服务进行厘米级定位, 确保了全球可用的高性能定位, 而不需要昂贵的网络基础设施。

OEM7700 可以以多种方式配置, 以获得最大的灵活性。来自 Hexagon | NovAtel 的 OEM7 固件为用户提供了配置 OEM7700 的能力, 以满足他们独特的应用需求。OEM7700 可扩展, 可提供亚米到厘米级的定位, 并可现场升级到所有 OEM7 系列软件选项。这些选项包括用于精确航向和相对定位的 ALIGN, 用于分米级通对通精度的 GLIDE, 用于连续 3D 位置、速度和姿态的 SPAN GNSS+INS 技术, 以及用于高级定位保护的 GNSS 弹性和完整性技术(GRIT)。RTK 提供厘米级的实时定位, 或者它可以使用 TerraStar 校正在厘米级和分米级的 PPP 解决方案中实现无基准定位。

2) NovAtel OEM7720

OEM7720 双天线输入, 多频率 GNSS 接收器为空间受限的无人应用提供精确定位和 SPAN 功能。OEM7720 是一种多频率、双天线接收器, 提供稳健的航向和定位以及先进的干扰缓解功能。为了确保最大的灵活性, OEM7720 使用了 555 通道架构, 能够跟踪所有当前和未来的 GNSS 卫星。OEM7720 可伸缩, 可提供亚米到厘米级定位。该接收器可在现场升级到所有 OEM7®系列软件选项, 包括 NovAtel CORRECT™与 RTK, ALIGN®, GLIDE®和 SPAN®。

特性:

- 多频率, 多星座 GNSS 接收器提供灵活的定位选项和易于集成
- 多通道 I 波段支持 TerraStar 校正服务
- 串行, USB, CAN 和以太网连接与 web 界面

- 先进的干扰可视化和缓解功能
- 固件解决方案包括 RTK, GLIDE™, STEADYLINE®, SPAN®和 ALIGN®
- 集成简单, 外形系数小, 振动性能额定为 20 克
- SPAN INS 功能

3) NovAtel OEM719

OEM719 多频 GNSS 接收机提供精确定位, 同时保持与 NovAtel 公司流行的 OEM615™和 OEM617™的向后兼容。OEM719 是一种多频率、向后兼容的全球导航卫星系统(GNSS)接收器。它的外形和引脚与 NovAtel 流行的 OEM615™和 OEM617™外形兼容。OEM719 拥有 555 个可用频道, 能够跟踪所有当前和即将到来的星座和卫星信号, 包括 GPS、GLONASS、Galileo、北斗、QZSS 和 IRNSS。

OEM719 可扩展, 可提供子米到厘米级定位, 并可现场升级到所有 OEM7®系列固件选项。选择包括 NovAtel CORRECT™, 带有 RTK, 用于厘米级实时定位, GLIDE®用于分米级传递-传递精度, SPAN®用于连续 3D 位置、速度和姿态。

特性:

- 多频率, 多星座 GNSS 接收器提供灵活的定位选项和易于集成
- 多通道 I 波段支持 TerraStar 校正服务
- 先进的干扰可视化和缓解功能
- 固件解决方案包括 RTK, GLIDE®, STEADYLINE®, SPAN®和 ALIGN®
- 集成简单, 外形系数小, 振动性能额定为 20 克
- 与现有的 OEM719 集成兼容

4) ComNav Technology K801 GNSS Module

ComNav Technology 新推出的 K8 系列 OEM 模块集成了最新的 QUANTUM

III SoC 芯片，在具有挑战性的环境中提供更可靠和准确的定位数据。K8 系列模块具有更小的尺寸，更低的功耗和表面安装的设计，可以更容易地集成到更广泛的应用。



K801 是一种表面贴装 GNSS 模块，具有较小的 SWaP 占地面积，适用于各种高性能定位应用，如无人机、机器人和自动驾驶汽车。多星座模块支持 GPS L1 和 L5 频率，支持北斗、GLONASS、Galileo 和 QZSS。通过内置高精度 IMU, K801 采用了先进的融合算法来提供连续定位数据，还集成了内置的抗多径和抗干扰能力，以增强在城市峡谷等挑战性环境中的可靠性和稳定性。

K801 GNSS 模块是一款高性能、低成本的 GNSS 定位模块。K801 具有表面安装设计，12mm × 16mm 的较小尺寸和低功耗，是物联网、智能驾驶、无人机和机器人等消费市场和解决方案的理想选择。

特性

- 支持北斗 3、北斗 2、GPS、GLONASS、Galileo、QZSS
- 支持 L1/L5 频段
- 小尺寸，12mm×16mm
- 集成表面安装设计
- 船上 IMU
- 0.15W 低功耗

5) ComNav Technology K803 GNSS OEM module



K803 是全星座全频率 SMD GNSS OEM 模块。它采用了先进的 QUANTUM III SoC 芯片，可在具有挑战性的环境中提供健壮的 RTK 和高精度定位数据，如城市立交桥和城市峡谷。定位精度在本测试报告中得到验证。此外，它在锁失期间的性能通过机载 IMU 增强，以提供响应性和无缝定位。超小的尺寸和 1.0W 的低功耗，使其易于集成，是无人应用的理想选择。

K803 是全星座三频 GNSS OEM 板，跟踪 GPS、北斗、北斗全球信号、GLONASS、Galileo、QZSS、IRNSS、SBAS 和 L-Band。K803 采用机载高精度 IMU 模块，通过惯性导航融合算法提供连续、高质量的定位数据。K803 是一个 30mm×30mm×3.2mm 模块，表面安装设计，非常适合用户集成。功耗降低到 1.0W。

特性：

- GPS L1/L2/L5、北斗 B1/B2/B3、GLONASS L1/L2、Galileo E1/E5a/E5b、QZSS、IRNSS、SBAS
- 北斗全球信号 B1C、B2a、B2b
- 支持 L-Band 和 PPP
- 支持 GNSS+INS 导航

- 表面安装设计和小尺寸集成

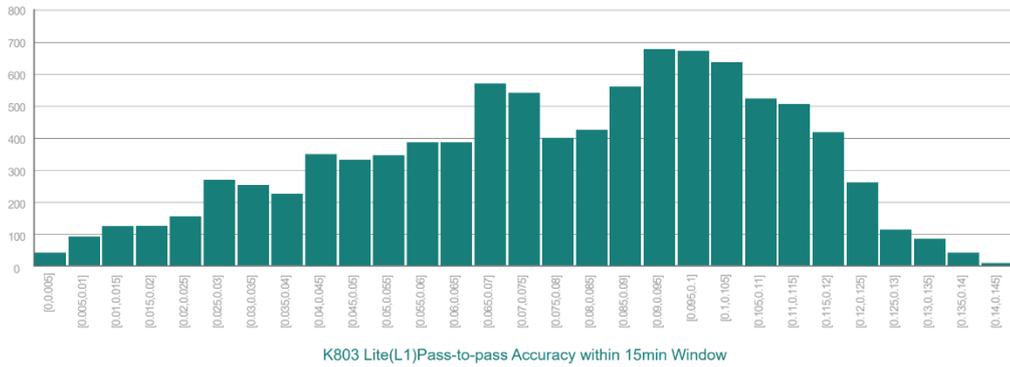
6) ComNav Technology K803 Lite (L1) GNSS Board



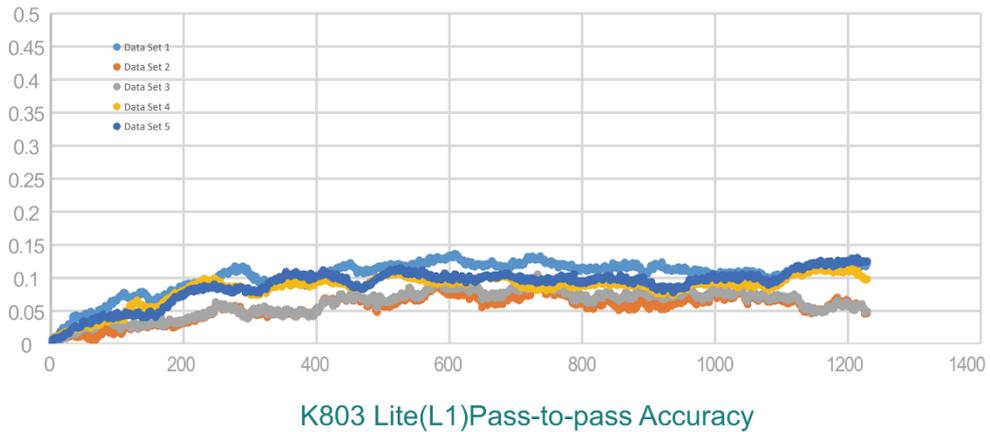
K803 Lite 是一款全星座 OEM GNSS 板, 具有先进的 DP 滤波平滑定位能力。紧凑和轻便的板提供了优秀的传递到传递的准确性。K803 Lite 板使用与许多常见品牌相同的引脚定义, 为用户提供无缝的即时升级解决方案。当与 AT360 大地测量天线配合使用时, 该板是精确农业和机器控制应用的理想定位解决方案。

K803 Lite(L1)内置 QUANTUM III SoC 芯片, 能够跟踪所有运行星座和规划星座, 提高了 GNSS 定位的可用性和可靠性。K803 Lite(L1)模块通过 DP 滤波算法大大减少了位置的突然跳跃, 在单点定位模式下提供了平滑的定位轨迹。根据 GNSS 信号载波相位和多普勒观测, K803 Lite (L1)在不需要输入 GNSS 校正数据的情况下, 可以提供光滑、准确的弹道。理论上, 通过多普勒频移计算运动载体的速度精度可以达到 1cm/s, 这对于一些动态应用是理想的。

Pass-to-Pass 误差是基于期望轨道间距和 GNSS 接收器计算的轨道间距之间的位置偏移。在 15 分钟的时间窗口内, K803 Lite (L1) 95%的传递误差在 12cm 以内, 整体误差值在 15cm 以内



K803 Lite (L1)充分利用了 GNSS 单频载波相位和多普勒观测的优势，为相关应用提供了一种流畅、准确的 pass-to-pass 解决方案。在 DP-filter 算法的帮助下，在单点定位模式下，K803 Lite (L1)在连续 2 个 epoch 之间的相对精度在 1cm 以内。对于较长的时间，如 15-30 分钟，传传精度可以在 95%的情况下保持在 15cm 以内。



7) ComNav Technology K823 GNSS OEM module



K823 是一款双天线双频全星座 GNSS OEM 板，带有板载 IMU 模块，提供可

靠的高精度定位和航向信息。

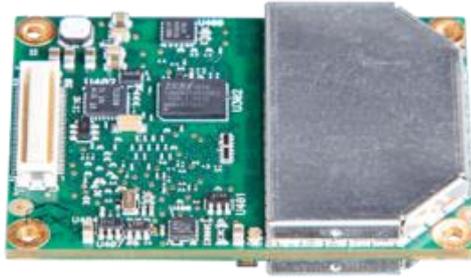
特性：

- 双天线稳健航向定位设计
- GPS L1/L2、北斗 B1/B3、GLONASS L1/L2、Galileo E1/E5b、QZSS、SBAS、IRNSS
- 北斗全球信号 B1C, B2b
- 支持 L-Band 和 PPP
- 支持 GNSS+INS 导航
- 表面安装设计，体积小，便于集成

K823 采用双天线设计，可为各种无人系统提供高精度定位和航向信息。K823 采用机载高精度 IMU 模块，通过惯性导航融合算法提供连续、高质量的定位数据。K823 是一个 30mm×40mm×3.2mm 模块，表面安装设计，非常适合用户集成。功耗降低到 1.6W。

Model	K801	K803	K803 Lite (L1)	K803 Lite	K803S	K823
Size (mm)	12x16x2.4	30x30x3.2	30x30x3.2	30x30x3.2	30x30x3.2	30x40x3.2
Weight (g)	1.6	8	8	8	8	10
Consumption	0.15W	1.0W	0.85W	0.85W	1.0W	1.6W
Channels	372	965	965	965	965	1226
GPS	L1 C/A, L5	L1C/A,L2C,L2PL5,L1C	L1	L1C/A	L1C/A,L2C,L2PL5	L1,L2
GLONASS	G1	L1,L2,L3*	L1	L1	L1,L2	L1,L2
BDS	B1I, B2a	B1I,B2I,B3I,B1C,B2a,B2b	B1	B1I	B1I,B2I,B3I,B1C,B2a,B2b	B1I,B3I, B1C*
Galileo	E1, E5a	E1,E5a,E5b,E6*,E5 AltBoc*	E1	E1	E1,E5a,E5b	E1,E5b
SBAS	WAS,EGNOS,MSAS,GAGAN,SDCM	L1,L5	L1	L1	L1,L5	L1

8) Topcon B111A OEM GNSS Receiver Board



B111A 是一种超紧凑的精确 GNSS 定位解决方案，提供可扩展的定位，从亚米级 DGPS 到亚厘米级 RTK，“全视野”双频码/载波跟踪 GPS, GLONASS, 北斗, 伽利略, QZSS 和 SBAS。

B111A GNSS 接收板能够提供从米级 DGPS 到厘米级 RTK 定位的可扩展定位。该轻型板提供了 226 个通用通道，可对 GPS、GLONASS、北斗、伽利略、QZSS 和 SBAS 信号进行可靠的“全视图”跟踪。该板的灵活设计，包括其低功耗，全面的通信接口和外围支持，使它很容易将 B111A 集成到任何精确定位应用程序。

特性：

- 紧凑，双频接收器
- 低功耗
- 226 通用跟踪通道，用于可靠的“全视图”双频跟踪
- 具有 100 赫兹的位置更新速率的高性能 RTK 引擎
- 通过单一连接器可获得不同的接口集
- 支持 SD 卡接口
- 石英锁环(QLL)，可在强振动和冲击下连续工作
- 通过软件选项授权(OAF)实现可伸缩性能

9) Topcon B125 OEM GNSS Receiver Board

B125 是一款面向未来的紧凑型定位发动机，支持 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗信号跟踪。不同的通信能力，包括串行，USB 和 CAN，以及高速以太网和远程 web 访问，都可以通过单个连接器。

B125 集成了 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗信号的未来跟踪功能，能够执行厘米级 RTK 定位，同时通过以太网远程访问。B125 GNSS 接收板是一种超紧凑的定位引擎，能够提供可扩展的定位，从亚米级 DGPS 到亚厘米级 RTK。低功耗，全面的通信接口和外围支持使 B125 非常灵活，易于集成到任何精确定位应用程序。

特性：

- 超紧凑的接收板与未来防 GNSS 跟踪
- 低功耗
- 226 通道先锋技术™与通用跟踪通道™，为可靠的“全视图”跟踪
- 支持 SD 卡接口，方便快捷的数据采集
- 串行，USB, CAN 和以太网可通过单一连接器进行数据交换

10) Topcon B210 OEM GNSS Receiver Board

B210 是一款高度通用的接收板，具有强大的先锋技术，提供高精度 VHD 航向测定以及厘米级 RTK 定位，即使是最苛刻的定位应用。GPS, GLONASS, 伽利略和北斗的跟踪保证了未来的保障。

B210 接收板包含高精度 VHD 航向测定和厘米级 RTK 定位，所有这些都具有低功耗，使其成为最可靠和高效的 OEM 板。

特性：

- VHD 航向引擎的快速初始化和高精度的航向输出
- 226 通用跟踪通道™
- 高精度 VHD 航向测定
- 串行, USB, CAN, 以太网和外部 SD 连接
- 用于高精度定时的 PS 输出和标记输入

七. 磁强计传感器

1. 磁强计工作原理

磁强计是一种用来测量磁场的装置，特别是测量磁场的强度和方向。磁强计的一个常见例子是指南针，它被用来测量环境磁场的方向(在这种情况下，即地球磁场)。其他磁强计测量磁偶极矩：磁偶极子是电流闭环或一对磁极的极限，因为在保持磁矩(磁场的磁场强度和方向)恒定的同时，源的大小减小为零。

磁强计可以利用霍尔效应、磁感应或磁电阻等现象进行工作：

(a) 使用霍尔效应的磁强计：

磁强计使用的一种方法依赖于所谓的霍尔效应。霍尔效应是通过电导体产生的电压差(霍尔电压)，横向到导体中的电流和垂直于电流的外加磁场。这意味着磁力计可以使用半导体材料让电流通过，并确定磁场是否在附近。因此，磁强计评估电流因磁场而扭曲或倾斜的方式，而发生这种情况的电压是霍尔电压，它与磁场成正比。

(b) 使用磁感应方法的磁强计：

另一方面，磁感应法计算材料暴露于外部磁场时的磁化程度。这包括创建退磁曲线，也称为 B-H 曲线或迟滞曲线，用来测量暴露在磁场中的材料所经历的磁通量和磁力。

正是这些曲线使科学家和工程师能够根据它们对外界磁场的反应来对构成电池和电磁铁等设备的材料的磁性强度进行分类。

(c) 使用磁阻方法的磁强计：

同时，磁电阻法检测物体暴露于外部磁场时改变电阻的能力。像磁感应技术

一样，磁力计使用铁磁体的各向异性磁电阻(AMR)(也就是受磁化的材料，即使在去除磁化后仍继续具有和显示磁性)

AMR 基本上就是在磁化存在的情况下，检测电流方向和磁化之间的关系。一旦暴露在外部磁场中，构成材料的电子轨道的自旋就会重新分布。电子自旋实际上是角动量的一种形式。因此，当电流与外部磁场平行时，电阻最大，以便正确地测量磁场。

2. 磁强计分类

磁强计主要分为两类:标量和矢量压力计。标量压力计用于精确测量磁通强度的标量值。这些标量磁强计又可分为质子进动磁强计、大修效应磁强计和电离气体磁强计。另一方面，矢量压力计是用来测量磁场的大小和方向的。这些可以分类为旋转线圈，霍尔效应，磁阻，磁通门，搜索线圈，SQUID 和 SERF 磁强计。

(a) 标量磁力计

质子旋进磁强计

这种磁强计利用核磁共振(NMR)测量质子在磁场中的共振频率。当极性直流电流通过螺线管时，它会在富含氢的燃料(如煤油)周围产生高磁通，一些质子就会与这种磁通对齐。在极化通量释放后，用质子向正常排列的进动频率来测量磁场

Overhauser 效应磁强计

这里使用低功率射频信号代替螺线管来校准质子。因此，当富电子液体与氢结合时，就会受到射频(RF)信号的影响。在大修效应作用下，质子与液体的原子核发生耦合。由于进动频率与磁通密度呈线性关系，可以用来测量磁场强度。此

外，拥有更快的采样率，这些磁力计需要更少的电力。

电离气体磁强计

电离气体磁强计比质子进动磁强计更精确，它由充满铯、氩和铷等蒸气的气腔组成;和光子发射光。当铯原子遇到灯的光子时，电子的能级以与外部磁场相对应的频率波动，从而有助于测量磁场的强度。

(b) 矢量磁强计

磁通门磁力仪

用于高灵敏度的应用，这里的磁通门传感器驱动-由一个磁敏感的磁芯缠绕两圈电线-有一个交流驱动电流运行的渗透磁芯材料。这里的一个线圈有交流电流通过它不断变化的磁场在第二个线圈中感应出电流。当前的更改是基于背景字段的。因此，交变磁场和感应输出电流与输入电流不同步，其程度随背景磁场强度的不同而不同。

磁阻式磁强计

这些是由半导体器件组成的，其电阻随着应用磁场或环境磁场的变化而变化。

SQUID 磁力计

这些超导体由薄绝缘层隔开，形成两个平行结。考虑到它们对低范围强度场的敏感性，它们在医疗应用中最常被用于测量大脑或心脏产生的磁场。

探察线圈磁力计

基于法拉第感应定律的原理，这些磁力计由缠绕在磁芯上的铜线圈组成。磁芯被线圈内部产生的磁力线磁化，磁场的波动导致电流流动。正是这种电流引起的电压变化被磁强计测量和记录下来。

旋转线圈磁强计

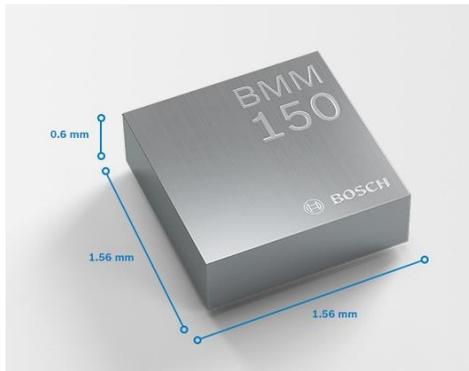
当线圈旋转时，磁场感应线圈中的正弦波信号。由于信号幅值与磁场强度成正比，因此磁强计能够测量磁场强度。然而，这种方法在今天已经过时了。

3. 可选磁强计型号

		#axes	resolution	sensitivity	Zero-B offset	Magnetic range
Bosch Sensortec	BMM150	3	0.3 μ T		$\pm 40\mu$ T	$\pm 1300\mu$ T (x,y-axis) $\pm 2500\mu$ T (z-axis)
Bartington	Mag-13	3			$\pm 5\mu$ T $\pm 5\mu$ T $\pm 25\mu$ T $\pm 50\mu$ T	$\pm 60 \mu$ T $\pm 100 \mu$ T $\pm 500 \mu$ T $\pm 1000\mu$ T
	Mag658	3	62.5pT/bit		± 100 nT	$\pm 524\mu$ T
SENSYS	FGM3D	3	< 150 pT	2.5 V/ μ T to 0.01V/ μ T		$\pm 4\mu$ T to \pm 1,000 μ T
	FGM3D / 125-C3T	3	< 150 pT	0.08 V/ μ T		$\pm 125,000$ nT
华舜	HSF-600	3		142.86mV/ μ T 100mV/ μ T 40mV/ μ T		70 μ T 100 μ T 250 μ T
Geometrics	G-823A			0.02 nT/ \sqrt Hz_rms.		20,000 to 100,000 nT
	MFAM			2-20 pT/ \sqrt Hz_rms.		20 nT to 100,000 nT

表中型号的具体性能对比、报价及网址信息，详见“附件 1.xlsx”中的“磁强计”
表单。

1) Bosch Sensortec BMM150



BMM150 是一款用于消费市场应用的独立地磁传感器。它允许在三个垂直轴上测量磁场。基于博世的专有 FlipCore 技术, BMM150 的性能和功能经过精心调整, 完美匹配所有三轴移动应用的苛刻要求, 如电子罗盘、导航或增强现实。评估电路(ASIC)将地磁传感器的输出转换为数字结果, 可以通过工业标准数字接口(SPI 和 I2C)读出。BMM150 的包和接口已被设计以满足多种硬件需求。由于该传感器具有超小的占地面积和扁平的封装, 它非常适合移动应用程序。晶圆级芯片规模封装(WLCSP)尺寸仅为 $1.56 \times 1.56 \times 0.6 \text{ mm}^3$, 确保了 PCB 放置的高度灵活性。BMM150 提供超低电压操作(VDD 电压范围从 1.62V 到 3.6V, VDDIO 电压范围从 1.2V 到 3.6V), 并可编程以优化功能, 性能和客户特定应用的功耗。可编程中断引擎为开发人员提供了设计灵活性。BMM150 在手机、手持设备、计算机外设、人机界面、虚拟现实功能和游戏控制器中感知地面场的三个轴。

下表为 <https://www.digikey.com/>网站给出的报价情况:

QTY	UNIT PRICE	EXT PRICE
1	\$2.40000	\$2.40
5	\$2.27400	\$11.37
10	\$1.94900	\$19.49
25	\$1.55920	\$38.98
50	\$1.42920	\$71.46
100	\$1.29920	\$129.92
500	\$1.13680	\$568.40
1,000	\$1.00688	\$1,006.88
5,000	\$0.94192	\$4,709.60

Tape & Reel (TR)

QTY	UNIT PRICE	EXT PRICE
10,000	\$0.87696	\$8,769.60

2) Bartington Mag-13



mag13 传感器提供高精度的静态和交变磁场测量。不同组合的噪音水平，测量范围，和一系列的外壳，使传感器适用于许多应用。这些专业包括国防、物理学、地球物理学、生物电磁学和矿物勘探。所有传感器都有一个完整的测试线圈，不需要单独的校准单元和温度传感器。

特性：

- 多种包装选项：可提供未包装版本和潜水版本
- 噪音水平在 1Hz 时降至 $6\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下
- 测量范围从 $\pm 60\mu\text{T}$ 到 $\pm 1000\mu\text{T}$

- 带宽 3kHz
- 环境密封，屏蔽电气干扰
- 集成测试线圈和温度传感器

Product name	Package	Noise	Range in μT
Mag-13	MS = Square MSS = Square, submersible MC = Cylindrical MCD = Cylindrical, deep submersible U = Unpackaged	no code = Standard L = Low noise	± 60 ± 70 ± 100 ± 250 ± 500 ± 1000

下表为网站 <https://gmw.com/product/mag-03-mag-13/> 给出的报价情况：

Mag-13MS	Three axis sensor, square, standard noise	\$3,330.00	16-20 weeks. Quote
Mag-13MSL	Three axis sensor, square, low noise	\$4,950.00	16-20 weeks. Quote
MAG-13MSSL	Three axis sensor, square, submersible, low noise	\$6,560.00	16-20 weeks. Quote
MAG-13MSS	Three axis sensor, square, submersible, standard noise	\$4,410.00	16-20 weeks. Quote
Mag-13MCD	Three axis sensor, cylindrical deep submersible, standard noise	\$6,050.00	16-20 weeks. Quote
Mag-13MCDL	Three axis sensor, cylindrical deep submersible, low noise	\$9,020.00	16-20 weeks. Quote
Mag-13U	Three axis sensor, unpackaged, standard noise	\$2,850.00	16-20 weeks. Quote
Mag-13UL	Three axis sensor, unpackaged, low noise	\$4,230.00	16-20 weeks. Quote

3) Bartington Mag658

三轴磁通门磁强计



Mag658 能够精确测量高达 $524\mu\text{T}$ 量级的矢量场, 结合集成加速度计的方向数据。未包装的格式和 RS-422 接口使传感器易于直接集成到客户的数据采集系统中。Mag658 的平均故障时间(MTTF)超过 100 万小时, 这使得 Mag658 非常可靠, 是长期安装的理想选择。

特性:

- 积分加速度计
- RS-422 接口
- 高可靠性, 适合永久安装
- 可定制包装设计

4) SENSYS FGM3D



FGM3D 是一种小巧、高性能的三轴磁通门磁强计。它的测量范围从 $\pm 75\mu\text{T}$ 到 $\pm 1000\mu\text{T}$, 带宽高达 6000 Hz, 由 PEEK 或 POM 组件制成的小而紧凑的防水

外壳保护。它可以在三轴上精确测量静磁场和交变磁场。

FGM3D 在科学、地球物理、医学、实验室和材料检测等领域有着广泛的应用。典型应用包括被动屏蔽装置的评估、电子显微镜的校准探头、海上和井眼测量系统(如 SENSYS BM2)的测量探头、MagDrone 的航空测量或地球磁场的长期测量。

传感器可以从任何 $\pm 15\text{v}$ 电源供电。在其基本配置中，该设备可提供不同的测量范围。标准测量范围为 $\pm 100\ \mu\text{T}$ ，带宽为 2 kHz。 $\pm 250\ \mu\text{T}$ 的传感器可以改善传感器轴的正交性，降低传感器噪声水平。这将提高分辨率到 $<70\text{pT}$ 。此外，所有传感器都可以按 3 kHz 甚至 4 kHz 的带宽进行订购。

由于磁通门传感器的设计和测量原理，FGM3D 的使用保证了低偏移误差，低内部噪声和高稳定性。虽然所有三个场分量的测量是同时进行的，但每个轴的所有测量数据的输出是独立的。这样就可以对每个轴进行处理，并将总字段用于后处理活动。

5) SENSYS FGM3D/125-C3T



作为 FGM3D 传感器系列的一部分，SENSYS FGM3D/125-C3T 是一种紧凑的高性能三轴磁强计。它由三个磁通门传感器和集成电子设备组成，全部由 PEEK 和 POM 组件制成的防水外壳(IP65)保护。

FGM3D 传感器允许在三个轴上精确测量静态和交变磁场。

FGM3D/125-C3T 的独特功能是在每个磁通门传感器周围集成补偿线圈，允许对传感器进行两项重要操作。第一个特征是一个定义的数字信号，可以应用和所有轴然后响应一个定义的校准跳(-10 μ T)。通过这种方式，操作员可以检查传感器是否仍然根据 SENSYS 工厂校准和提供的校准协议工作。或者他们可以评估采集单元的正确性。

另一方面，线圈可以应用电流来补偿外部场和所有轴归零。因此，传感器可以完美地适应当地条件和测量运动的具体要求。此外，传感器可以使用不同的选项进行订购，如改进传感器轴的正交性或减少传感器噪声和增加分辨率。FGM3D/125-C3T 根据 DIN54145 制造和校准，SENSYS 通过 ISO 9001:2008 认证，以确保最高的产品质量和可靠性。

6) 华舜 HSF-600



航空系列三轴磁通门传感器是西安华舜针对航空磁测领域应用需求开发的轻量化磁通门传感器，可以满足无人机磁测应用对三分量磁通门传感器的需求。产品具备低噪声、高灵敏度、线性度好、功耗低、轻量化设计的特点。

7) Geometrics G-823A



G-823A 铯磁力计在性能、尺寸、功能和成本效益方面提供了无与伦比的多功能性，适用于更大规模的空中磁测量。也可作为陆地便携式系统使用。

除了磁强计测量，内部 CM-201 计数器还包括朱利安时间/日期，接受外部同步脉冲的规定，以及六个 A/D 转换器，用于数字化和记录信号幅度，雷达/气压高度计，EM 或其他模拟数据。所有功能的传输格式由软件命令选择，并可针对每个作业进行定制。

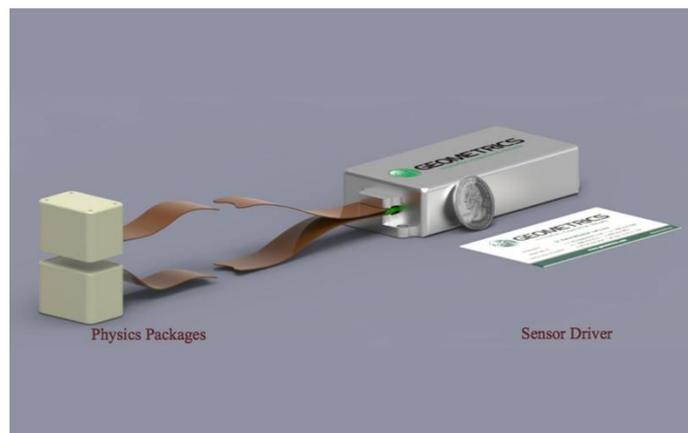
G-823A 满足航空、陆地或海洋测量的最高振动和温度标准。定制长度的电缆和特殊包装可用于这些应用。每个 G-823A 系统的关键航向错误性能都有记录和提供。

特性：

- 多功能多传感器阵列能力:该仪器可用于固定翼，直升机或陆地应用，以满足任何测量师的需求
- 最高灵敏度:拾取磁场中最小的变化
- 快速采样:在更快的速度下更好的覆盖
- 非常低的航向误差:获得非常干净，可重复的测量，而不用担心仪器噪音影响数据

- 交流磁场干扰小:必要时在电源线旁进行测量
- 坚固可靠
- 超稳定:无需校准
- 出口版可用:在世界任何地方使用， 无需出口许可证(禁运国家除外)

8) Geometrics MFAM



Geometric 最近宣布了一种革命性的新型磁强计产品，该产品基于最近对小型化原子钟和磁强计的研究，允许在不牺牲性能的情况下减少 10 倍的尺寸和功耗。即将上市的新设备只有大约 15cc 大小，每个传感器只需要 2W。现在已经有了可以将尺寸和功耗再减少 10 倍的制造技术。在美国国防高级研究计划局 (DARPA)和战略环境研究与发展计划(SERDP)的支持下，激光技术和 MEMS 制造技术的最新进展导致了原子钟和磁力计的小型化组件。凭借其在制造现场坚固磁强计方面的长期经验，geometric 最近在传感器和电子设计方面取得了必要的突破，为市场带来了具有成本效益，可靠的产品。传感技术的进步将对传感和探测应用产生巨大影响。许多应用都可以从低成本、低功耗的传感器中受益。一些应用程序将使用相对较少的传感器，而其他应用程序将产生对大量传感器的需求。这些应用程序和所需的生产技术必须经过精心设计，才能成功地推出这种技术。我们认识到每个客户都有独特的需求，因此为了更好地满足这些需求，我们创建

了四种不同的传感器，每种传感器都具有不同的技术规格。这些传感器是低噪声 MFAM，低航向误差 MFAM, Super-MFAM(将低噪声和低航向误差配置组合到同一个 MFAM 模块中)和 SX-MFAM，以符合出口要求。如欲查看各型号的规格，请参阅下面的“规格表”。

特性：

- 双传感器模块:两个传感器允许单独或梯度测量
- 小尺寸:添加到现有仪器或系统时，重量不会显著增加
- 低功耗运行:通过在较小的电池上运行更长时间来减少停机时间
- 模块化架构:将 MFAM 模块集成到现有的仪器中，扩展服务线路
- 高性能:快速采样和低噪声可用于各种应用，包括地球物理、无损评估、磁心图和结构健康领域
- 四个模拟输入通道:差分和可扩展的多功能集成输入
- PoE (Power over Ethernet)支持单连接供电和数据下载
- 车载 GPS: GPS 提供位置，1PPS 控制测量时间
- 温度/压力/湿度传感器:了解环境条件
- 10mhz 参考输入:允许主系统时钟的纪律
- 提供的原理图和示例源代码:根据接口要求修改代码，并使用原理图启动自定义板布局

八. 气压计传感器

1. 气压计传感器

在飞行中，无人机的内部电子设备可以促进自主操作，或者可以由操作员远程控制。在任何一种情况下，无人机都严重依赖各种传感器来确保它们按预期执行。为了正常工作，无人机依赖于许多传感器，这些传感器通过测量各种条件来指导系统进行调整。无人机上的传感器包括：

- 加速度计跟踪沿任何轴的线性运动。
- 迎角(AOA)测量有翼无人机的气流角，在确定飞机的气动力方面起着关键作用。
- 气压计用来测量气压，建立并保持稳定的高度。
- 陀螺仪建立旋转速率、倾斜度和角速度。
- GPS 根据来自 GPS 卫星的信号确定无人机的定位。
- 磁力计显示磁场的强度和方向，以验证航向。
- 避障传感器，以确保无人机或无人机不会撞到其他物体。这些躲避系统可以包括一个或多个立体传感器(用于观察物体的视觉摄像机)、激光雷达(通过激光发射光脉冲来测量物体的距离)、超声波传感器(用于确定物体距离的超声波)和红外传感器(类似于超声波传感器，但使用红外信号而不是超声波)。

气压计是一种用来测量大气或空气压力的科学仪器。气压计仍然是评估和预测天气的最重要工具。晴雨表是气象部门用于天气预报和高度变化的重要工具。有许多层空气包裹着地球，我们称之为大气。空气是有重量的，当重力把它拉向

地球时，它会把接触到的任何东西都推开。这种压力就是气压计测量的大气压力。

气压计是天气预报员和科学家最重要的工具之一。由于气压与温度有关，气压的快速变化会导致极端天气的变化，从而可能导致龙卷风、飓风等，因此气压计成为预测此类极端天气事件的关键工具。气压计以大气压或巴为单位来测量大气压。气压计需要调整，必须保持在同一水平。两种主要的气压计是水银气压计和无液气压计。

高度可以通过比较当前高度的大气压力和海平面的压力来计算。一般来说，海拔越高，压力越低。然而，气压不仅受到海拔高度的影响；空气压力也会因天气变化而波动，天气变化会引起压力和温度的变化。为了从气压高度计获得准确的读数，必须考虑到这些变量。

为了计算高度，气压高度计使用以下公式：

$$z = cT \log \frac{P_0}{P}$$

其中：

c 是一个常数，它取决于重力加速度和空气的摩尔质量；

T 是绝对温度；

P 是海拔 z 处的压强；

P_0 是海平面的压强。

气压高度在通用航空飞机上应用广泛。这种高度计的使用是标准的，被认为是可靠的，这种可靠性部分来自于所涉及的设备的简单性，在某些情况下完全是机械的。就相对准确性而言，结果是不错的。在同一空域，在同一高度飞行的不同飞机的无补偿高度计读数几乎相同，是分离飞机飞行路径的可靠仪器。

2. 可选气压计型号

		pressure range	resolution	start-up time	digital interface
Bosch Sensortec	BMP390	300-1250hPa	0.016Pa	2ms	I ² C and SPI
	BMP581	300-1250hPa	0.016Pa	3ms	I ² C and SPI
Superior Sensor's Technology	ND210	62.5-7500Pa		80ms	I ² C and SPI
AMSYS	MS5611	10-1200mbar	0.012mbar		I ² C and SPI

表中型号的具体性能对比、报价及网址信息，详见“附件 1.xlsx”中的“气压计”
表单。

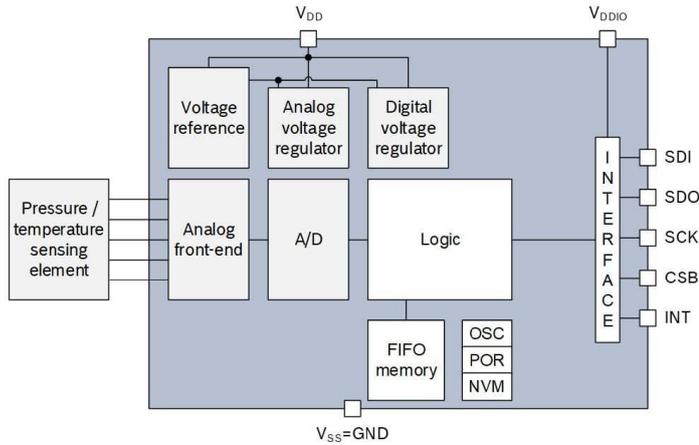
1) Bosch-Sensortec's BMP390



Bosch-Sensortec 的 BMP390 是一款非常小的气压计/温度计组合，功耗低至 3.4 μ a(更新频率为 1 Hz)。它的设计目的是为导航仪器提供高度信息，精度为 \pm 0.66 米。

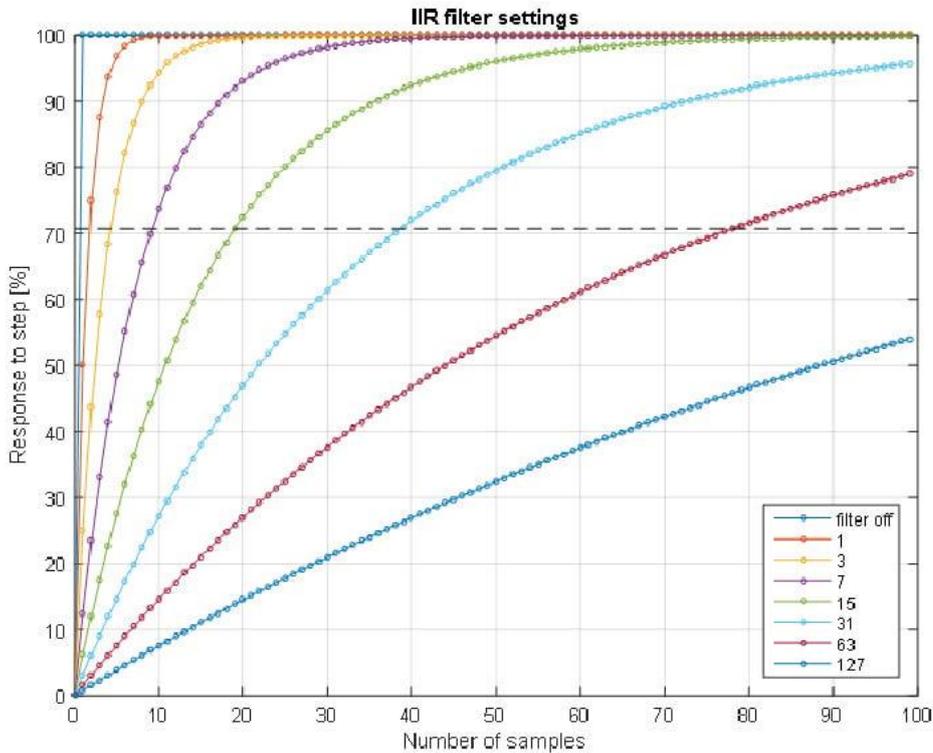
该传感器支持 SPI(3 线或 4 线)以及 I²C 接口。一个板载 512 字节 FIFO 缓冲区允许在一个可配置中断指示“FIFO 满”、“数据准备好”或“FIFO 存储级别超过”(又名“水印”中断)后，数据被突发地取出。配置通过机载寄存器执行，博世提供了控

制传感器的源代码。



BMP390 包括一个无限脉冲响应(IIR)滤波器，使其能够过滤掉可能由环境噪声引起的压力突然变化。例如，有人关门或开枪引起的室内气压的突然变化。这些类型的事件导致气压突然和短时间的升高。为了过滤掉这些突然的、临时的干扰，BMP388 可以通过可配置的 IIR 发送压力测量数据，也可以直接将数据发送到主机微控制器进行处理。

下图为 datasheet 中给出的不同 IIR 滤波器系数的阶跃响应：



BMP390 的一个应用是无人机制导。由于 BMP390 气压计的精度只有 ± 0.66 米，这意味着气压计本身不足以让一个设备保持准确高度。解决方案是传感器融合，将气压计信息和加速度计信息与互补(或其他)滤波器结合起来。

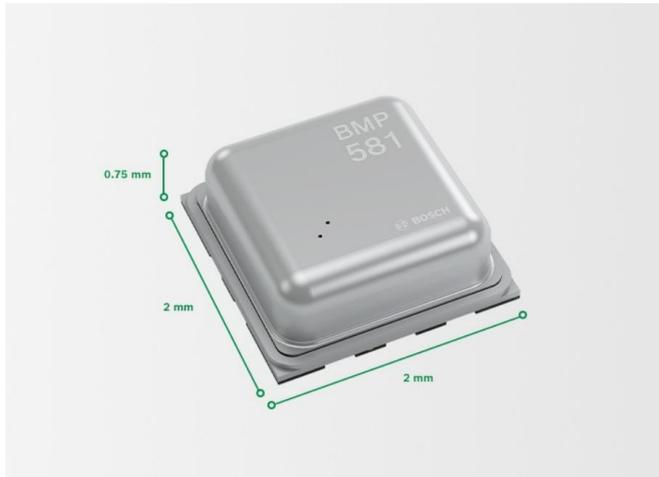
加速度计数据可以集成来提供速度数据，速度数据可以集成来提供位置数据。集成错误会随着时间的推移而累积，提供的位置会随着时间的推移而变得越来越不精确。另一方面，它们在短时间间隔内是高度准确的。气压计提供了一个粗略的高度测量，可以通过加速度计的数据进行细化。

互补滤波器结合了气压计和加速度计的测量，以提供高度准确的垂直速度和高度数据。与更复杂的卡尔曼滤波器不同，互补滤波器数学非常简单，可以在 8 位微控制器上执行。

下图为 [BMP390 Bosch Sensortec | Sensors, Transducers | DigiKey](https://www.digikey.com/en/products/detail/bosch/BMP390) 网站给出的报价情况：

QTY	UNIT PRICE	EXT PRICE
1	\$5.18000	\$5.18
5	\$4.57000	\$22.85
10	\$4.03600	\$40.36
25	\$3.27480	\$81.87
50	\$2.89400	\$144.70
100	\$2.81790	\$281.79
500	\$2.36096	\$1,180.48
1,000	\$2.20864	\$2,208.64

2) Bosch-Sensortec's BMP581



BMP581 是气压传感器领域的新标杆，并以其巨大的精度给人留下深刻的印象。这可以实现无穷无尽的新用例，例如健身跟踪，其中精确的海拔变化是关键。低功耗和低噪声的 24 位绝对气压传感器在最小尺寸下显著提高了其精度。它提供出色的设计灵活性，提供单一的包解决方案，客户可以轻松地将集成到众多现有和即将推出的设备中，如 GPS 模块、可穿戴设备、可穿戴设备、智能家居、物联网和工业产品。

3) Superior Sensor's Technology ND Series



基于 Superior 的 NimbleSense™ 架构，ND 系列将工作温度扩展到 -20°C，最高可达 85°C。此外，ND 还利用公司专有的 Multi-Range™ 技术，创造了业界最宽的动态范围。这种更宽的动态范围在单个封装中提供多个压力范围，从而最大限度地减少所需的传感器变体数量，以支持各种工业细分市场的苛刻功能要求。

例如，一个 Multi-Range 支持的 ND 传感器可以取代多达 7 个竞争产品，极大地简化了安装要求，并显著降低了库存成本。支持压力范围低至 0.25 inH₂O 至高达 30 inH₂O, ND 系列是各种工业应用的理想选择，从空气幕到航空，从环境室到眼科手术设备，从无人机到 3D 打印。

ND 系列测量干燥空气和非腐蚀性气体压力具有非常高的精度和稳定的零点。非线性也是行业领先的，通常是 0.05% 的 FSS。ND 系列具有从 1Hz 到 200Hz 的可选带宽滤波器和 16 位分辨率。为了提高性能，ND 系列集成了 50/60Hz 陷波滤波器，以最大限度地减少电源噪声峰值的影响。最后，ND 系列是要求最高可靠性的应用程序的绝佳选择。ND 系列提供了一个新的集成水平，将先进的压阻传感元件与集成放大，ADC, DSP 和数字接口相结合，极大地简化了客户的集成工作。先进的数字处理实现了新的功能，从而简化了系统开发，增加了制造难度并提高了可靠性。可选的集成闭环控制定制，高级数字滤波定制和 3 模式压力开关，ND 系列不仅仅是一个压力传感器-它是一个完整的压力传感子系统。采用高可靠性塑料外壳构造的 ND 系列系列在扩展温度范围内提供了非常高性能和可靠性的理想组合，同时确保客户拥有针对各种工业要求优化的高产量，高成本效益的解决方案。

特性：

- 高度集成 ADC 和 DSP 传感器
- 每个设备最多 7 个可选压力范围
- 压力范围 0.25 inH₂O (62.5 Pa)至 30 inH₂O (7500 Pa)
- 16 位分辨率(每个选定范围)
- 卓越的零稳定性

- 集成 50/60Hz 陷波滤波器
- 1.0Hz ~ 200Hz 可选带宽滤波器
- 输出数据速率高达 444Hz
- 总误差带小于 0.15% FSS
- 精度极高 +/- 0.05% 的选定范围
- 长期稳定性 +/- 0.05% FSS
- 温度补偿 -20°C 至 85°C
- 电源电压补偿
- 标准 I2C 与 SPI 接口

下图为 [ND210-SM02-R Superior Sensor Technology, Inc. | Sensors, Transducers | DigiKey](#) 网站给出的报价情况:

QTY	UNIT PRICE	EXT PRICE
1	\$55.65000	\$55.65
5	\$52.86800	\$264.34
10	\$48.69500	\$486.95
25	\$43.12960	\$1,078.24
50	\$41.73820	\$2,086.91
100	\$40.34700	\$4,034.70

4) AMSYS MS5611



MS5611 是一款高精度压力传感器模块, 包括一个线性压力测量元件(压力模

具)和一个超低功耗 24 位 $\Sigma\Delta$ -A/D 转换器，具有内部工厂校准的系数。主要功能是将压力模的无补偿模拟电压转换为 24 位的数字值，以及为温度提供 24 位的值。这些值可以在任何外部处理器的内部系数的帮助下计算到真实的校准值。MS5611 提供了不同的操作模式，可以优化速度和电流消耗。每秒一次转换(8 位)消耗 0.9 μ A 至 12.5 μ A(24 位)，每次转换的分辨率选择可实现最佳的应用特定功率性能权衡。

模块通过四线 SPI 或两线 I²C 接口进行通信。MS5611 安装在一个小的 QFN 包中，允许集成在小型移动设备中，而不需要任何额外的组件。所采用的传感原理使压力和温度信号具有极低的滞后和高的稳定性。

特性

- 压力范围:10 至 1200mbar
- 温度范围:-40°C ~ 85°C
- 高度分辨率:10cm
- 分辨率压力:0.012mbar
- 分辨率温度:0.01°C
- 电源电压:1.8 ~ 3.6 V
- 极低电流消耗:待机最大 0.14 μ A
- I²C 和 SPI 接口
- 防静电保护
- QFN 外壳:5.0 x 3.0 x 0.95 mm³
- 符合 RoHS 和 REACH 标准

九. 无线电高度表

1. 无线电高度表

雷达高度表(RA), 也称为无线电高度表(RALT), 电子高度表, 反射高度表, 或低距离无线电高度表(LRRA), 通过计时一束无线电波传播到地面、反射并返回航天器所需的时间来测量飞机或航天器下方地面以上的高度。这种类型的高度计提供天线和地面之间的距离, 而气压高度计提供的是一个确定的垂直基准(通常是平均海平面)之上的距离。

顾名思义, 雷达(无线电探测和测距)是该系统的基础原理。该系统将无线电波传输到地面, 并测量无线电波反射回飞机所需的时间。地面上的高度是由无线电波的传播时间和光速计算出来的雷达高度计需要一个简单的系统来测量飞行时间, 可以用传统仪器显示, 而不是早期雷达系统通常使用的阴极射线管。

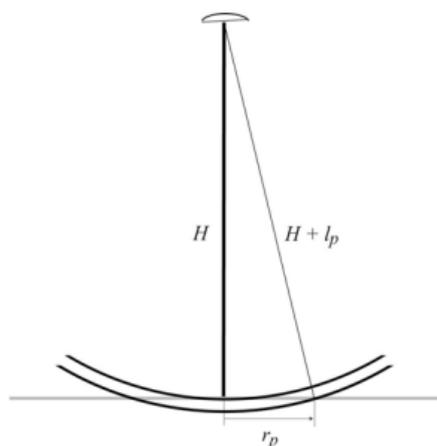
为此, 发射器发送一个频率随时间变化的频率调制信号, 在给定时间 t 内在两个频率限制 F_{min} 和 F_{max} 之间上升和下降。在第一个单元中, 这是使用一个带有由小型电动机驱动的调谐电容器的 LC 油箱完成的。输出然后与射频载波信号混合并发送到传输天线。

由于信号到达地面和返回需要一段时间, 因此接收信号的频率相对于当时发出的信号略有延迟。这两个频率之间的差异可以在混频器中提取出来, 由于两个信号之间的差异是由于到达地面和返回地面的延迟造成的, 因此产生的输出频率编码了海拔高度。输出通常是每秒数百个周期, 而不是兆周, 并且可以很容易地在模拟仪器上显示这种技术被称为调频连续波雷达。

无线电高度计是利用电磁波脉冲在地面或海面上反射的原理研制的。这些波

在无线电频谱范围内。电磁波以光速传播，因此距离的计算实际上是即时的。尽管无线电高度计受到地面不规则的影响而产生无线电信号的偏差，但无线电高度计提供了一种可靠而准确的测量高度的方法。

高度是通过测量波阵面从飞机传播到地面再返回所需的时间来计算的。为了解无线电高度计的工作原理，考虑从无线电信标发射到平面的无线电脉冲。



无线电高度计计算使用毕达哥拉斯定理：

$$H^2 + r_p^2 = (H + l_p)^2 = H^2 + l_p^2 + 2Hl_p$$

其中：

r_p 是脉冲前缘的半径；

H 是高度；

l_p 是脉冲长度。

由于 l_p 的平方非常小，可以忽略，所以 r_p 可以近似为

$$r_p = (2Hl_p)^{\frac{1}{2}} = (Hct_p)^{\frac{1}{2}}$$

其中 t_p 表示该长度脉冲的时间。

传输波和反射波之间的时间延迟太短，无法使用单一天线同时实现这两种功能。因此需要两个天线，它们必须在物理上分开，以避免干扰。

另一种航空无线电高度表是调频无线电高度表。这种类型利用了这样一个事实，即反射信号将以不同于发射信号的频率接收。信号频率的变化率是恒定的，这意味着高度可以计算出来，因为它将与发射机和接收机之间的频率差成正比。

2. 可选高度表型号

		frequency	altitude	accuracy
豪恩科技	HT-208A	4000~4400MHz	0~1500m	$\pm 0.1 \pm 1\%$,
	HT-208B	4000~4400MHz	0~3000m	$\pm 0.2 \pm 2\%$,
	HT-208C	4000~4400MHz	0~6000m	0.3 $\pm 3\%$ 三档
Honeywell	KRA-405B	4300 \pm 15 Mhz	55,000 feet (16,764m)	3ft (0.91m) or $\pm 4\%$
FreeFlight Systems	RA-5500	FMCW at 4.3 GHz center frequency, 100 MHz sweep at 4.25 to 4.35 GHz	-20 to 2500 ft max. 55,000 ft	0 to 100 feet AGL ± 1.5 feet >100 to 2500 feet AGL $\pm 2\%$
	RA-6500	FMCW at 4.3 GHz center frequency, 200 MHz sweep at 4.2 to 4.4 GHz	-20 to 2500 ft max. 55,000 ft	0 to 100 feet AGL ± 1.5 feet >100 to 2500 feet AGL) $\pm 2\%$

表中型号的具体性能对比、报价及网址信息，详见“附件 1.xlsx”中的“高度表”
表单。

1) 豪恩科技 HT-208 系列



豪恩科技公司携手航天工程师共同研发的 HT-208 型无线电高度表，是以数字技术为基础的新型无线电高度表，先后在运五、运八、运十二、米八直升机、歼教六和歼六无人机上进行飞行试验一百多次，试验结果非常成功，并于 2006 年 6 月顺利通过设计定型鉴定、批产和军检。

在大量试验和实际生产经验基础上，工程师们进一步优化了线路，改进了结构，研制成功 HT-208 系列高度表。该系列高度表，针对不同飞行高度空域，细分为三大类 7 种型号，分别对应中低空、中空和高空飞行的测高需要，其性能更提高，设计更优化，体积、重量、功耗更小、可靠性更高！该系列产品，充分利用数字技术特点，实现了数控调频、数字测频、数控变通带、数字滤波等技术，产品性能十分先进，能满足未来二十年内各类飞行器对高度测量和控制的需要，是现有高度表更新换代的理想选择。

豪恩科技公司研发生产的 HT-208 系列无线电高度表，目前共分为三大类产品。其中，HT-208A 型高度表，主要适用于 0~1500 米的低空区域，又根据其不同的应用高度和使用范围，划分为 5 种型号；HT-208B 型高度表，适用于 3000 米以下的中低空区域；HT-208C 型高度表，适用于 6000 米以下的中高空区域。三大类 7 种型号的全系列高度表产品，使用范围全面，定制灵活，便于用户根据

需要进行选购。

性能特点：

- 输出接口 RS232、485、422 任选；可提供 1553B 接口，此时机体高度增加 15mm，重量增加 150g。
- 适应各种恶劣环境条件，高温、低温、冲击、振动、离心、湿热、低气压、盐雾、霉菌及电磁兼容，全部满足国军标(GJB)要求。
- 配备三种天线：
 - 四振子微带天线：增益 10db, H 面 $\pm 22^\circ$, E 面 $\pm 25^\circ$, 尺寸 110×64×18 mm, 重量 110g
 - 特制四振子天线(用于大量程)：增益 ≥ 11 db, H 面 $\pm 22^\circ$, E 面 $\pm 25^\circ$, 尺寸 130×93×27 mm, 重量 250g
 - 单振子微带天线(用于小量程)：增益 ≥ 7 db, H 面 $\geq 30^\circ$, E 面 $\geq 35^\circ$, 尺寸 86×40×18 mm, 重量 55g
- HT-208 系列无线电高度表与现有各国高度表性能相比：
 - 低高度精度最高（可达 1%，提高一倍以上）；
 - 低空测高分辨率最好（可达 10cm，最高达 1cm，提高 3 到 30 倍）；
 - 体积最小（为现有产品的 1/4~1/10）；
 - 重量最轻（为现有产品的 1/3~1/20，现飞船着陆用 γ 射线高度表重达 6kg!）；
 - 耗电最少（为现有产品的 1/2~1/10）；
 - 可靠性最高（比现有产品提高 3~10 倍）；
 - 抗海浪干扰能力最强（实测中能描绘波浪起伏!）。

2) Honeywell KRA-405B



KRA-405B 雷达高度计(RADALT)是一种轻量化、固态、机载高度计，在飞行的各个部分提供精确的地面高度测量。迄今为止，KRA-405B RADALT 已生产和销售超过 10,000 个，服务时间超过 400 万小时，即使在现代 5G 环境中，也已被证明是最可靠和经过行业验证的雷达高度计之一。

特性：

- 频率:4.2 GHz ~ 4.4 GHz
- 工作范围:0 到+2500 英尺
- 精度:±3 英尺或±3%，<500 英尺。±5%,在 500 英尺。
- 模拟和数字输出
- 温度范围:-55°C ~ 70°C(工作状态), -55°C ~ 85°C(非工作状态)
- 尺寸:3 x11"x3.5
- 重量:3 磅
- TSO C87/ETSO-2C87(1997)机载低空无线电高度计
- 机载设备的环境条件和试验程序
- DO-155(最低性能规范。机载低程高度计)

➤ A 级(机载系统和设备认证中的软件考虑因素)

通过与 FAA 和 RTCA 合作, 霍尼韦尔对 KRA-405B 雷达高度计进行了射频测试, 以评估其在受到 5G 蜂窝基站射频能量时满足其最低操作性能规格的能力。KRA-405B 要求在雷达高度表接收天线和雷达高度表接收输入之间安装一个外部带通滤波器。外部带通滤波器降低了设备对 5G 基站干扰的敏感性。

使用带有外部带通滤波器的 KRA-405B 雷达高度计的飞机能够获得 FAA 于 2021 年 12 月推出的 FAA 适航指令 2021- 23-12(固定翼)和 2021-23-13(直升机)的替代合规手段(AMOC)。

3) FreeFlight Systems RA-5500/6500



FCC 最近批准在较低的 C 波段(3.7 Ghz - 3.98 Ghz)使用先前预留的无线电频率(RF)频谱, 以支持在美国各地部署 5G 系统。在实践中, 这意味着以前为低功率应用保留的频谱现在将可用于电信行业的高功率传输。这些高功率传输已被证明会影响雷达高度计准确地为机组人员提供高度测量读数的能力。这些高度读数对航空工业的安全进近和着陆操作至关重要, 无论是载人航空还是无人航空。与商业和商务航空类似, 雷达高度表向直升机上的地形躲避和预警系统(HTAWS)提供关键高度数据。这些系统对于飞行 VFR 和 IFR 的飞行员的安全是不可或缺的。最近的一份报告得出结论, 在低海拔地区作业受到干扰的可能性和严重程度都会

增加，而这正是雷达高度计信息最重要的地方。作为以优雅地解决复杂问题而闻名的创新者，FreeFlight Systems 意识到航空领域的广谱保护正在被稳步侵蚀。我们的工程团队在全球安装了超过 5000 个雷达高度计系统，作为为 FAA 的 NextGen 任务开发第一个 UAT ADS-B 解决方案的行业领导者，意识到 5G 基础设施将对雷达高度计产生的深远影响。预测全球 5G 网络的推出，地形系列或雷达高度计被设想。