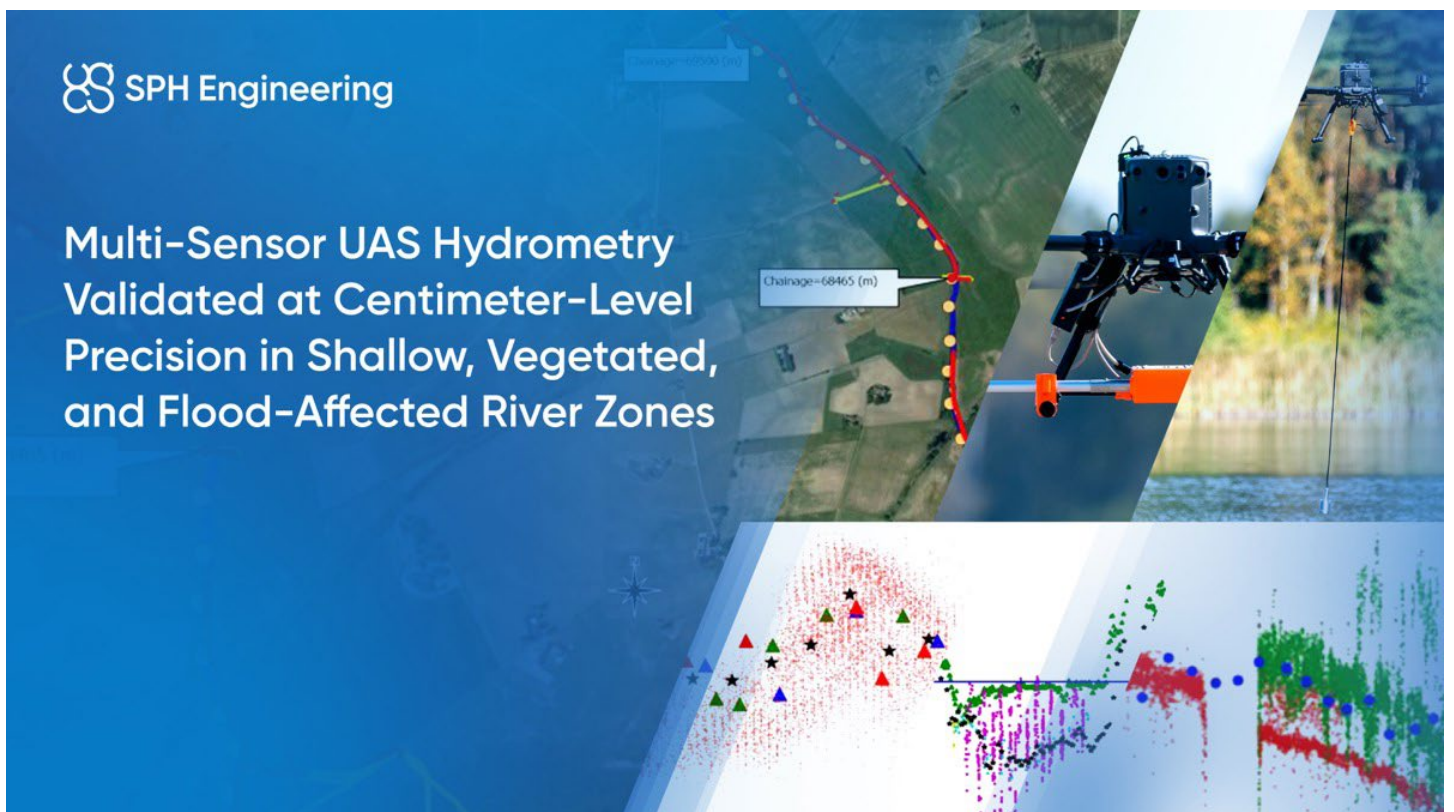


多传感器无人机水文测量在浅水、植被覆盖和受洪水影响的河流区域经过厘米级精度验证

2025年6月16日

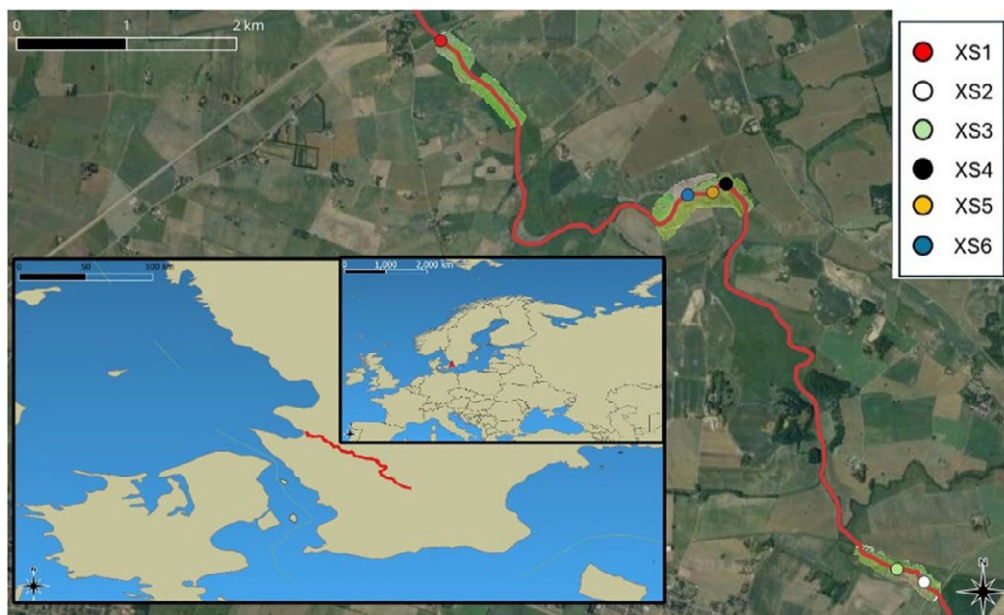


一个机载无人机 (UAV) 系统对瑞典的罗讷河 (Rönne Å) 进行了 10 公里的勘测，利用一套集成的机载传感器收集了水位、水深和流速数据。测量结果已通过地面测量的验证，确认了极其精确的非接触式性能。

背景

传统的河流监测通常依赖于固定的地面设备或人工采样，这些方法提供的空间覆盖范围有限，并且在植被茂密或易受洪水侵袭的区域部署起来非常复杂。因此，在动态水流条件下，这些方法缺乏所需的分辨率和灵活性。

为了解决这个问题，由丹麦技术大学领导的无人机水环境观测系统项目 (UAWOS project) 联盟的研究人员，在 2023 年 8 月 28 日至 9 月 1 日期间，对瑞典罗讷河进行了 10 公里的无人机 (UAS) 勘测。该系统结合了雷达高度计、回声测深仪、低频探地雷达 (在 UAWOS 项目的术语中称为透水雷达，简称 WPR) 和多普勒传感器，以测量水位、水深和表面流速。其目标是评估安装在无人机上的传感器在河流的浅水、植被覆盖和受降雨影响的区域是否能达到与地面方法相匹配的精度。



罗纳河勘测位置（红线），其中标记为圆圈的是六个测量的横截面。

面临挑战

尽管传统的河流监测方法和**基于无人机的水文测量**都具有潜力，但现场部署揭示了需要解决的几个技术和环境限制：

- **传统系统的空间覆盖范围有限。** 地面的水文测量站通常提供基于点的测量。在动态的河流系统中，这会导致数据空白，从而限制了对水位、水深或水流在空间上如何变化的理解，特别是在极端天气条件下。
- **植被茂密或偏远区域的不可达性。** 由于植被密度大、河岸陡峭或地面不稳定，罗纳河的许多河段难以进入。传统系统无法在这种条件下运行，并且可能对工作人员构成安全风险。
- **传感器在流动水体中的不稳定性。** 准确的声纳数据需要稳定、垂直的定位。从无人机上悬挂飞行的声纳会受到水流引起的倾斜和无人机运动的影响。这使得获得一致的水深测量变得复杂，特别是在快速流动或不均匀的水流中。
- **雷达信号处理中的干扰。** 透水雷达 (WPR) 会受到植被和水面杂波引起的早期信号干扰的影响。因此，在实时或多变的水流条件下，很难分离出河床反射信号。
- **机载多普勒流速测量的挑战。** 在**水文测量**中使用机载多普勒雷达的先例很少。准确的流速读数需要稳定的飞行、精确的角度控制以及良好的水面纹理，即在低空勘测期间并不总是能满足这些条件。

解决方案

为了测试基于无人机的传感器是否能达到与地面设备相匹配的精度，研究人员使用多传感器无人机平台对罗讷河进行了 10 公里的勘测。该勘测覆盖了六个横截面，并包含同步的地面真实数据测量以进行验证。

大疆经纬 300 RTK (DJI Matrice 300 RTK) 无人机配备了 SPH Engineering 的 **SkyHub** 和真实地形跟随系统 (**True Terrain Following system**)，以实现自动化低空飞行。无人机搭载了：

- **雷达高度计**：Geolux LX-80，用于测量水面高程。
- **回声测深仪**：**ECT400S**，用于水深测绘。
- **透水雷达 (WPR)**：**Zond Aero LF**，用于穿透植被进行非接触式水深测量。
- **表面流速传感器**：Geolux RSS-2-300W 多普勒雷达和 GoPro Hero 8 Black，用于基于视频的 PIV (粒子图像测速)。
- **激光雷达和摄影测量工具**：大疆禅思 L1 (DJI Zenmuse L1)，用于地形建模。

每个传感器数据流都经过三个步骤处理：原始数据记录、地理参考与同步，以及向河流横截面的空间投影。8 月 31 日的降雨造成了类似洪水的条件，允许在水文压力下进行验证。地面系统被联合部署，以实现直接的、逐点的性能比较。

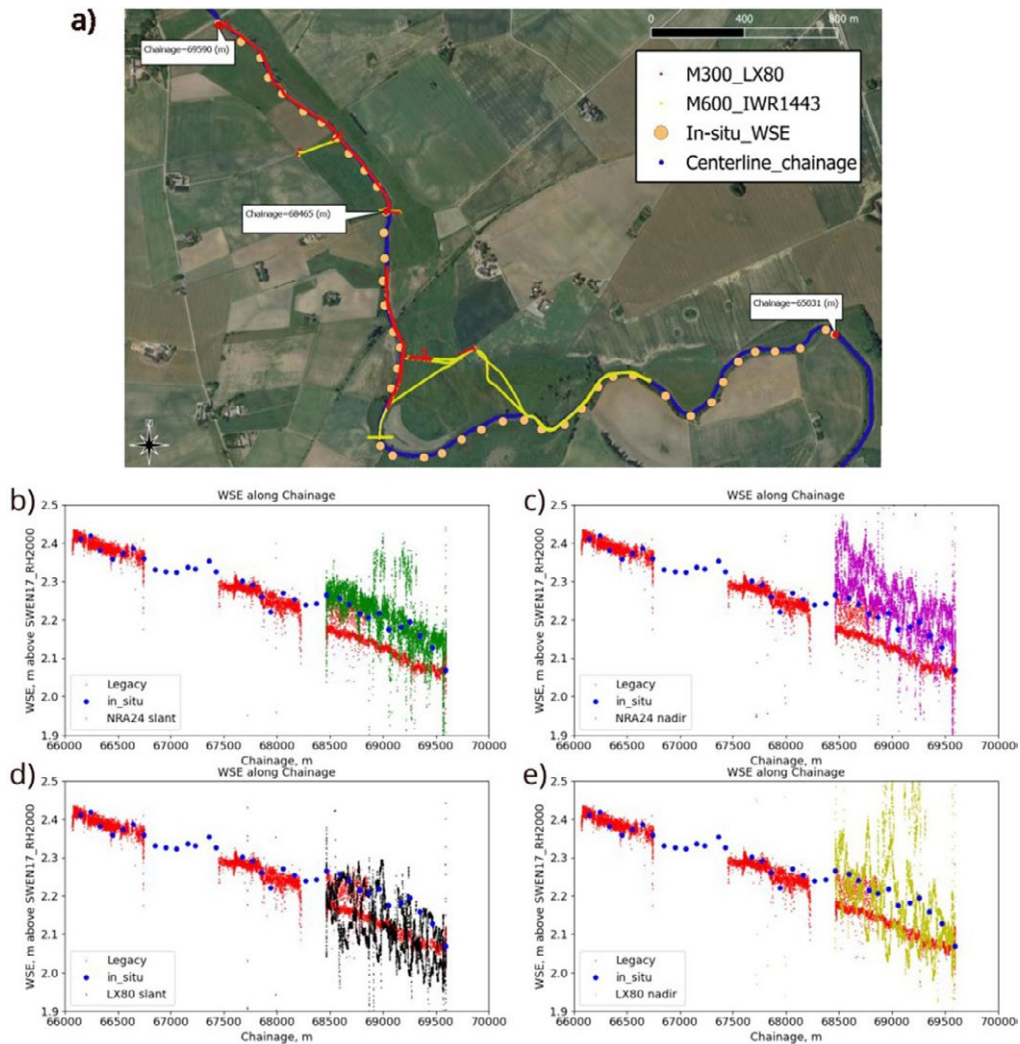


现场部署搭载 ECT400S 回声测深仪 (左) 和 Zond Aero LF WPR (右) 的 M300 无人机。

结果

水面高程 (WSE)

安装在大疆经纬 300 RTK 上的雷达高度计测量了水面高程，垂直精度在 3 厘米以内。与 GNSS 基准点和早期雷达传感器的对比证实了极强的一致性和对齐度。



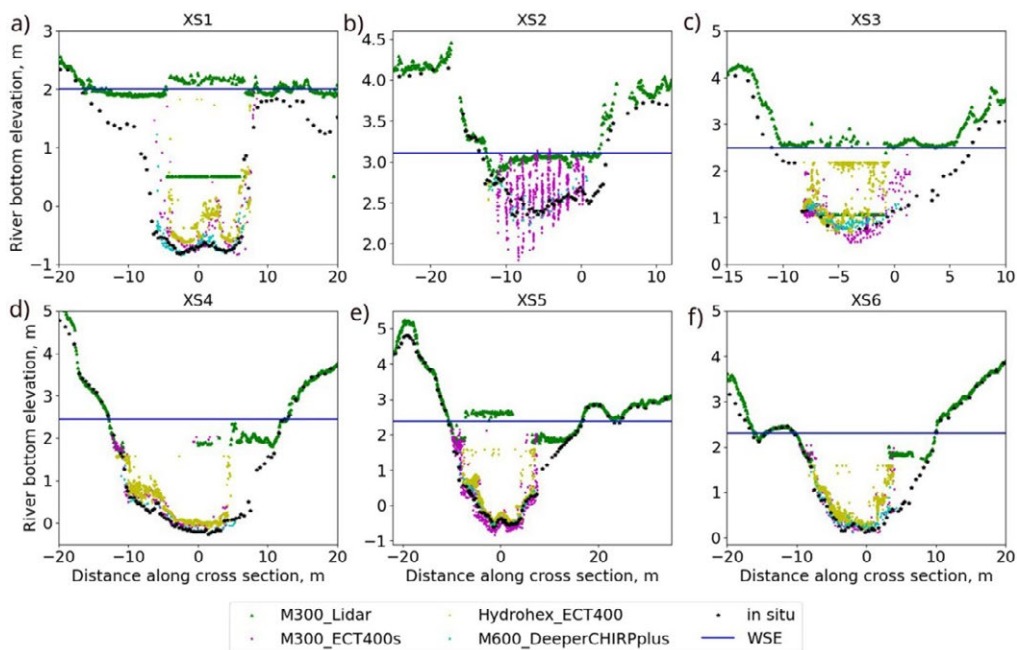
机载和地面 WSE 数据之间的代表性比较：(a) 飞行路径、原位 WSE 点和河流中心线。(b-e) 地面真实值与四种 LX80 配置之间的 WSE 比较。

了解更多关于非接触式机载水文测量的信息

水深测量 (Bathymetry)

回声测深仪和透水雷达 (WPR) 系统提供了互补的水深测量结果。ECT400S 提供了稳定的基于声纳的剖面，偏差在 10 厘米以内。相比之下，Zond Aero LF GPR (WPR) 系统成功穿透了植被，并识别出了回声测深仪无法探测到的河床轮廓。

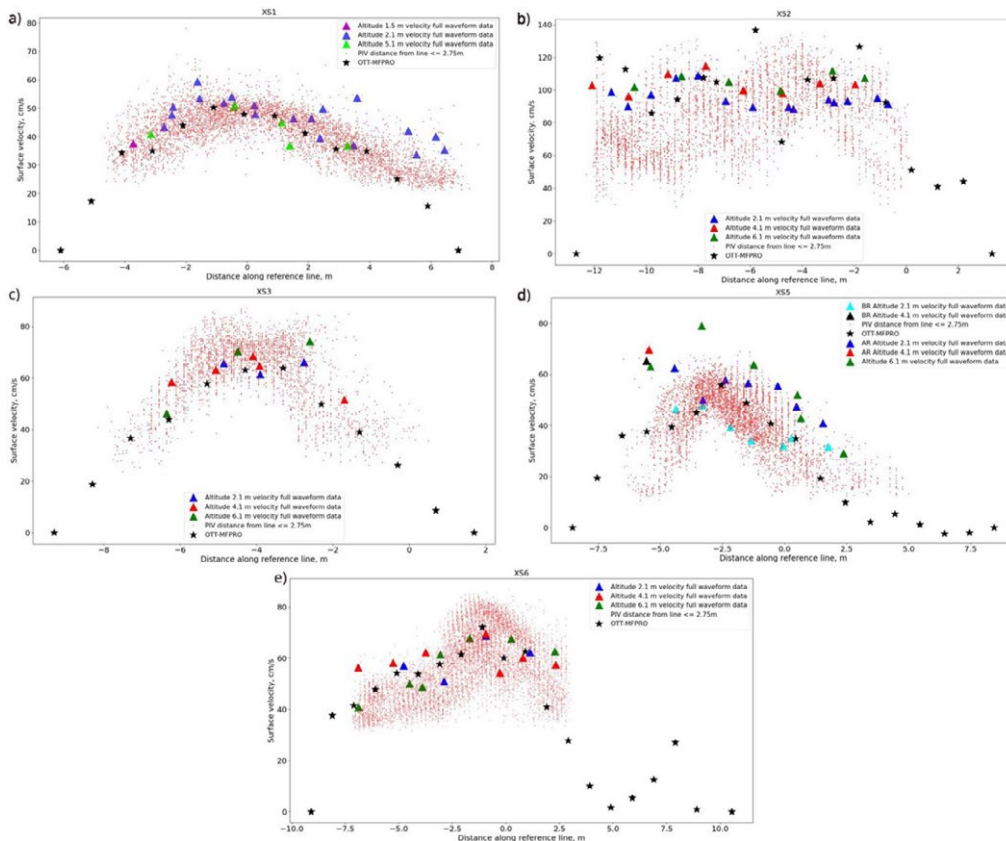
所有深度测量均通过了 ADCP (声学多普勒流速剖面仪) 读数的验证，显示 WPR 精度在 ± 8 厘米以内。



无人机和地面水深测量在六个横截面上的比较。包括搭载 ECT400s 的 M300 (品红色)、搭载 ECT400 的 Hydrohex (黄色)、搭载 Deeper CHIRP+ 的 M600 (青色)、原位 ADCP 参考值 (黑色星形) 和无人机机载激光雷达 (绿色三角形)。蓝线代表水面高程。

流速

表面流速是使用 Geolux RSS-2-300W 多普勒雷达捕获的，并与来自防水运动相机 (GoPro Hero 8 Black) 的基于视频的粒子图像测速 (PIV) 进行了结合分析。当以 OTT MFPro 仪器为基准时，多普勒系统保持了 7.3 毫米/秒的分辨率，并实现了低于 10 厘米/秒的偏差。PIV 结果显示有一定变化，特别是在有植被的横截面 XS1 中，但在其他地点吻合良好。



使用多普勒雷达 (三角形)、OTT MFPro (黑色星形) 和 PIV (红点, 在测量基线 2.75 米范围内) 在五个横截面上进行的流速比较。在 XS5 中, 显示了降雨前后两个高度 (2.1 米和 4.1 米) 的多普勒结果。

结论

罗纳河的勘测表明, 多传感器非接触式基于无人机的系统可以准确测量水位、水深和流速, 即使在浅水、植被茂密和受洪水影响的区域也是如此。在 SPH Engineering 的集成传感器、SkyHub 和 True Terrain Following (真实地形跟随) 的支持下, 该系统提供了精确的低空勘测结果, 与地面参考值高度吻合。

公开共享的数据集支持更广泛的研究, 并展示了基于无人机的水文测量作为传统方法实用替代方案的潜力。

阅读完整报告

相关出版物

- Zhen Zhou, Laura Riis-Klinkvort, Emilie Ahrnkiel Jørgensen, et al. (2024): [Measuring river surface velocity using UAS-borne Doppler radar](#). *Water Resources Research*, 60(11):e2024WR037375
- Monica Coppo Frias, Alexander Rietz Vesterhauge, Daniel Olesen, et al. (2025): [Combining UAS Lidar, Sonar and Radar Altimetry for River Hydraulic Characterization](#). *Drones*, 9(1), 31
- Fabian Merk, Timo Schaffhauser, Faizan Anwar, et al. (2024): [The Significance of the Leaf-Area-Index on the Evapotranspiration Estimation in SWAT-T for Characteristic Land Cover Types of Western Africa](#). *HESS*, 28, 5511–5539
- Zhen Zhou, Laura Riis-Klinkvort, Emilie Ahrnkiel Jørgensen, et al. (2025): [UAS Hydrometry: Contactless River Water Level, Bathymetry, and Flow Velocity -The Ronne River Dataset](#). *Scientific Data* 12, 294 <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04611-x>
- Peter Bauer-Gottwein, Linda Christoffersen, Aske Musaeus, Monica Coppo Frías, and Karina Nielsen (2024): [Hydraulics of Time-Variable Water Surface Slope in Rivers Observed by Satellite Altimetry](#). *Remote Sensing*, 16(21), 4010
- Musaeus, A. F., Kittel, C. M. M., Luchner, J., Frias, M. C., & Bauer-Gottwein, P. (2024). [Hydraulic River Models From ICESat-2 Elevation and Water Surface Slope](#). *Water Resources Research*, 60(6). <https://doi.org/10.1029/2023WR036428>