

下一代航空导航中气压高度与大地椭球高度转换的先进方法论综合研究报告

1. 引言

1.1 现代航空中的垂直导航挑战

垂直导航(Vertical Navigation, VNAV)一直是航空安全与效率的核心支柱，也是空中交通管理(ATM)中最复杂的维度之一。长期以来，全球航空业依赖于一种二元高度测量体系：在起降和近地阶段主要参考基于几何地形的几何高度(Geometric Altitude)，而在航路巡航阶段则严格依赖基于气压测量的气压高度(Barometric Pressure Altitude)。这种双重体系在标准空域的有人驾驶航空历史上被证明是行之有效的，但随着城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)、无人驾驶航空系统(UAS)以及基于性能的导航(Performance-Based Navigation, PBN)等新兴航空领域的迅速崛起，这种传统架构正面临前所未有的局限性与挑战¹。

这一挑战的核心在于两个主要参考系统之间存在的根本性脱节。气压高度是基于静压测量并参考标准等压面(通常是国际标准大气ISA的平均海平面气压1013.25 hPa, 即QNE, 或当地修正海平面气压QNH)推导得出的¹。这种机制创造了一个“虚拟”的垂直环境，航空器实际上是沿着等压面而非等高面飞行。虽然这确保了在同一气团内配备相似传感器的航空器之间的相对垂直间隔，但它切断了航空器指示高度与地球物理表面(如WGS84椭球体或大地水准面)之间的直接联系¹。

相比之下，全球导航卫星系统(GNSS)的普及使得大地椭球高度(Height Above Ellipsoid, HAE, 或称大地高 Geodetic Altitude)的精确测定成为可能¹。HAE是一个纯粹的几何量，参考于卫星系统使用的数学椭球体(如GPS使用的WGS84)。虽然HAE不受大气变化的影响，具有绝对的几何稳定性，但它与ATM传统使用的气压飞行高度层(Flight Levels)并不自然对齐。

随着空域日益拥挤，特别是自动化无人机在极低空域(Very Low Level, VLL)的密集运行，建立一种严格、高完好的转换机制，以弥合这两个领域之间的鸿沟，已成为当务之急。现有研究表明，由于非标准大气条件(如温度偏离ISA、气压梯度、位势标尺因子等)，气压高度(QNE)与真实大地高之间的偏差可能达到数百米之巨¹。这种偏差对于LPV-200等精密进近程序、自动着陆系统以

及必须在建筑密集的城市环境中保持极小越障余度的U-space运行来说，在操作上是不可接受的¹。

1.2 高度协调研究的演进路径

高度协调(Altitude Harmonization)——即在气压参考与几何参考之间实现无缝转换——的研究历程，已从早期的简单“D值”(D-value)修正，演变为如今涉及数值天气预报(NWP)模型和多传感器融合的复杂算法集成。

早期的尝试，如20世纪70年代开发的Blanchard算法，主要是为了抑制惯性导航系统(INS)垂直通道固有的不稳定性，通过整合气压更新与惯性数据来维持高度解算的稳定⁵。这些经典方法为理解动态飞行条件下的流体静力学关系奠定了基础，但在当时的计算能力和实时天气数据可用性方面受到严重限制。

当代研究已全面转向数据驱动的方法论。高保真外部天气数据的整合，特别是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA5再分析数据和实时预报产品，为“天气修正气压高度”(Weather-Corrected Pressure Altitude)开辟了新途径²。以Simonetti和García Crespillo(2024)以及Narayanan和Osechas(2022)为代表的研究表明，通过将机载气压测量与四维(4D)天气网格耦合，可以重建出足以支持GNSS完好性监测(ARAIM)和增强VNAV操作的大地高度⁷。

与此同时，诸如SESAR联合执行体的ICARUS项目等大型机构计划，正致力于构建将这些转换算法作为服务部署所需的运行架构。通用高度参考系统(Common Altitude Reference System, CARS)和垂直转换服务(Vertical Conversion Service, VCS)的概念，代表了这些算法的工业化进程，标志着从理论验证向标准化U-space服务的跨越²。

本报告将对这些高水平研究工作进行详尽的剖析。我们将深入探讨气压-大地高度转换的理论基础，评估BiG-C、Baro-ARAIM、Blanchard等最先进的算法，并基于DLR Falcon 20-E5和HALO等研究飞机的真实飞行数据，分析验证活动的成果与启示。

2. 测高学与参考系统的理论基石

要深刻理解将气压转换为大地高度的复杂性，首先必须建立对支配这些测量的几何大地测量学和气象学框架的严谨认知。这不仅是数学变换的问题，更是物理模型与地理空间定义的深度融合。

2.1 大地测量参考框架：椭球体与大地水准面的二元对立

在几何测高领域，最根本的区别在于椭球体(Ellipsoid)与大地水准面(Geoid)的定义及其相互关系。

- 参考椭球体(**The Reference Ellipsoid**)：GNSS系统提供的坐标是相对于参考椭球体的。这是一个平滑的数学曲面，用于近似地球的形状。对于GPS而言，这就是WGS84椭球体⁶。从该表面沿法线方向到航空器的垂直距离被称为大地高度(\$h\$)。虽然这种定义在数学上非常精确，但椭球体并不对应物理上的“海平面”，也不一定垂直于重力方向，这使得它对于依赖空气动力学和流体静力学的传统飞行操作来说，直观性较差。
- 大地水准面(**The Geoid**)：大地水准面是地球重力场的等位面，它在最小二乘意义上最贴合全球平均海平面(MSL)²。它考虑了由地球内部密度变化引起的重力异常。从大地水准面到航空器的垂直距离被称为正高(Orthometric Altitude, \$H\$)，这在物理意义上更接近我们传统理解的“海拔高度”。

这两个表面之间的关系由大地水准面起伏(Geoid Undulation, \$N\$)定义，即大地水准面相对于椭球体表面的分离距离。连接它们的基本方程为：

$$h \approx H + N(\phi, \lambda)$$

其中 ϕ 和 λ 分别为纬度和经度²。研究强调，为了实现精确转换，必须采用高分辨率的大地水准面模型(如EGM96或EGM2008)来确定 $N(\phi, \lambda)$ ，因为该起伏值在全球范围内大约在 -105米到 +85米之间变化²。如果忽略 N ，将引入一个静态偏差，这会使得任何基于气压的转换在物理上与GNSS垂直引导不兼容，导致严重的安全隐患。

2.2 流体静力学大气与气压高度的物理本质

气压测高的物理基础建立在流体静力学大气的假设之上，即空间中任意一点的气压完全来自于其上方空气柱的重量。这一关系由流体静力学方程(Hydrostatic Equation)支配：

$$dP = -\rho g dz$$

其中 P 是气压， ρ 是空气密度， g 是重力加速度， z 是几何高度²。

为了将这一物理原理转化为航空操作标准，国际民航组织制定了国际标准大气(ISA)模型。ISA假设对流层内存在恒定的温度递减率(Lapse Rate, α)，以及恒定的平均海平面气压(P_0)和温度(T_0)。标准气压高度(Z_p)是通过在ISA假设下积分流体静力学方程导出的：

$$Z_p = \frac{T_0}{\alpha} \ln \left(\frac{P_0}{P} \right)$$

其中 R 是干空气的比气体常数, g_0 是标准重力加速度。这一公式是现代航空电子设备中大气数据计算机(ADC)的核心逻辑。

2.3 标尺因子与参考基准的偏差问题

高水平研究主要聚焦于将标准气压高度(Z_p)视为大地高度(h)时产生的两类主要误差源,这两类误差决定了转换算法的复杂性:

1. 参考基准误差(Reference Error): ISA模型假设海平面气压恒为1013.25 hPa。然而,现实中的实际海平面气压(P_{MSL})随天气系统不断变化。这导致ISA等压面与真实平均海平面(大地水准面)之间存在垂直偏移,进而导致与椭球体之间存在更大的偏移¹。
2. 标尺因子误差(非标准温度效应): ISA假设了标准的温度剖面(海平面15°C,递减率-6.5°C/km)。然而,大气层极少处于“标准”状态。当实际气团比ISA更冷时,空气柱收缩,真实几何高度将低于指示的气压高度(航空界著名的“High to Low, Look Out Below”原则)。反之,在较暖条件下,空气柱膨胀,真实高度高于指示高度¹⁴。这种膨胀/收缩效应表现为一个随高度增加而放大的标尺因子误差⁶。

现代研究,如Simonetti等(2024)和Narayanan等(2022)的工作,致力于通过引入动态气象数据来替代静态ISA假设,从而消除这些特定误差²。

3. 高度转换的先进方法论:从经典算法到数值预报

近年来,关于协调气压高度与大地高度的研究已从理论探讨走向算法实证。目前的顶级研究主要集中在三种方法论上:经典的Blanchard算法、基于NWP的现代修正法(如BiG-C和DLR的方法),以及ICARUS项目的服务于架构。

3.1 Blanchard算法:惯性-气压集成的先驱

Blanchard算法由R.L. Blanchard在20世纪70年代初提出,代表了在GNSS出现之前获取高精度高度信息的“经典”方法。该算法最初设计的目的是为了抑制惯性导航系统(INS)垂直通道的发散,因为INS在垂直方向上由于重力异常和传感器漂移具有固有的不稳定性⁵。

机制与原理:

Blanchard算法对简单的气压测高进行了改进，它不仅仅依赖气压，而是通过实时测量静压、静温、航空器地速以及风速，对流体静力学方程进行数值积分⁵。引入速度项是该算法的创新之处，它允许算法考虑水平气压梯度力——这是一种气象现象，即由于地转风的影响，等压面相对于大地水准面会产生倾斜。

Blanchard高度(\$h_B\$)的控制方程可以近似表示为：

$$\$dh_B = \frac{R T}{g P} dP + \frac{V_g V_w}{g f(\phi)} dt$$

其中第二项专门用于修正由风速(\$V_w\$)和地速(\$V_g\$)引起的等压面倾斜⁶。这一项在高速飞行或强风切变区域尤为关键。

局限性与现代评估：

尽管Blanchard算法在当时具有革命性，但现代利用F-18飞行试验数据和DLR Falcon飞行数据的分析暴露了其局限性。Li & Chueh (2010) 和 Simonetti (2021) 指出，虽然Blanchard高度优于原始气压高度，但在长时间飞行中或在快速变化的大气动力学条件下(违反地转平衡假设时)，误差仍会累积⁵。此外，该算法高度依赖机载温度传感器的准确性，而这些传感器容易受到动力加热和安装位置偏差的影响。Simonetti (2021) 将Blanchard高度与GNSS真值进行了对比，发现虽然它减少了动力学引起的误差，但缺乏现代NWP方法所能提供的绝对全球参考框架的稳定性⁶。

3.2 基于数值天气预报(NWP)的大地高度重构

近年来最显著的进步是利用数值天气预报(NWP)模型——特别是像ERA5这样的全球再分析数据集或实时预报模型——作为航空器的“虚拟传感器”。

3.2.1 Simonetti & García Crespillo (DLR): Baro-RAIM方法

德国航空航天中心(DLR)的Maximilian Simonetti和Omar García Crespillo所做的工作可以说是目前该领域最全面、最深入的研究¹。他们在《Navigation》期刊(2024)上发表的方法论，提出了一套严密的处理链，旨在推导出适用于增强GNSS高级接收机自主完好性监测(ARAIM)的“气压大地高度”(Barometric Geodetic Altitude, \$h_{Baro}\$)。

方法论详述：

该过程包含一个多阶段的转换逻辑1：

1. 数据摄入(Data Ingestion)：系统摄入来自ECMWF ERA5数据集的4D天气数据(经度、纬度、气压层、时间)。关键参数包括位势高度(Geopotential Height, \$Z\$)、温度(\$T\$)和比湿(Specific Humidity, \$q\$)。
2. 多维插值(Interpolation)：算法在航空器的估计水平位置上执行多维插值(时间和空间上线性插值，气压上对数线性插值)，以确定精确的大气柱状态⁶。

3. 天气修正气压高度 ($Z_{p,w}^{msl}$)：算法不再使用ISA常数，而是利用从天气模型插值得到的实际温度 ($T_{w,user}$) 和气压 ($P_{w,user}$) 来求解测高方程。

$$\begin{aligned} Z_{p,w}^{msl} &= Z_{ref} + \frac{R_{dry}}{g_0} \cdot T_{v,avg} \\ &\ln \left(\frac{P_{ref}}{P_{meas}} \right) \end{aligned}$$

在此处，引入了虚温 (Virtual Temperature, T_v) 的概念来修正湿度的影响，这是相比传统方法的一个重要物理精度提升 1。

4. 参考基准转换 (Reference Transformation)：通过添加从EGM96模型导出的大地水准面起伏 (N)，将高度参考从MSL平移至WGS84椭球体：

$$Z_{p,w}^{wgs84} = Z_{p,w}^{msl} + N_{geopotential}$$

5. 标尺转换 (Scale Conversion)：最后，利用Somigliana重力模型 (考虑重力随纬度和高度的变化)，将位势高度 (基于能量的标尺) 转换为几何高度 (基于距离的标尺)²。

验证与结果：

利用Dassault Falcon 20-E5的飞行数据进行验证，作者证明该方法消除了QNE高度的系统性偏差。标准QNE偏差可达数百米，而NWP导出的 h_{Baro} 均值误差接近于零，标准差约为4-5米²。

更关键的是，他们为这种“虚拟传感器”推导出了**完好性支持信息 (ISM)**参数，建议完好性标准差 ($\sigma_{int, Baro}$) 设为约15米，名义偏差 (b_{nom}) 设为约1.2米²。这一成果使得气压计能够被ARAIM算法“信任”，从而在GNSS降级环境中显著改善LPV-200进近的垂直保护级 (VPL) 和可用性。

3.2.2 BiG-C算法 (Narayanan & Osechas)

同样关联于DLR/布伦瑞克工业大学的Narayanan和Osechas (2022) 提出了**BiG-C (Barometric to Geometric Converter)**算法⁷。

显著特征：

BiG-C算法侧重于转换的可重复性和无偏性，旨在支持垂直RNP (Vertical RNP) 和系统化空域设计。该方法利用预报NWM (Numerical Weather Models) 而非再分析数据，强调了实时应用的可行性⁷。

该算法在航空器周围构建局部大气剖面。它动态地从环绕航空器的模型层中估算温度递减率，而不是假设恒定的ISA递减率。通过将航空器测量的气压与NWM生成的压力-高度剖面进行比对，反向求解几何高度⁷。

性能表现：

利用HALO研究飞机的飞行数据验证显示，BiG-C实现了约30米 (100英尺) 的垂直误差标准差，且该精度在从50英尺到47,000英尺的所有高度范围内保持一致⁷。这种一致性对于要求“垂直包容性”的RNP运行至关重要。研究断言，该性能符合DO-236C/ED-75D等标准中定义的严格垂直路径性能限制 (VPPL)⁷。

3.3 用于校准与高度保持监控的NWP方法 (Schumann et al.)

Schumann等人(2017)探索了NWP数据的另一种应用方向²。他们的研究重点不是实时导航，而是利用ECMWF分析数据进行飞行后校准和**高度保持性能(HKP)**监控。

方法论：

他们将航空器测量的静压(p_{AC})与ECMWF模型在航空器精确GNSS几何高度($Z_{AC} = Z_{NWP}$)处预测的气压(p_{NWP})进行比较。其差值(Δp)代表了航空器空速管系统的静源误差加上天气模型的误差²。

关键发现：

通过分析飞行数据(包括作为真值的拖锥测量数据)，研究揭示现代NWP模型具有惊人的准确性。在同一等压面上，航空器与模型之间的高度差平均仅为 0.6 ± 2.8 米²。这表明NWP数据足以作为“真值源”来检查航空器是否遵守缩小垂直间隔(RVSM)要求(要求ASE < 25米)，这可能消除对昂贵的地面高度监控单元(HMUs)的需求²。

4. 系统级实施: SESAR ICARUS项目

虽然上述算法解决了数学和物理问题，但将这些解决方案整合到航空生态系统中需要一个服务导向的架构。这正是由SESAR联合执行体资助的**ICARUS**项目(Integrated Common Altitude Reference System for U-space, U-space集成通用高度参考系统)的领域²。

4.1 U-space中的“通用高度”难题

ICARUS项目识别出了无人机(UAS)融入极低空域(VLL)时的一个关键安全缺口。有人驾驶航空使用的是气压参考(QNH/QNE)，而无人机原生使用的是GNSS几何高度。在城市环境中，由于微气候和城市热岛效应，“局部”气压可能发生显著变化，使得单一的机场QNH对于在建筑物之间穿行的无人机来说变得不可靠²。此外，无人机通常缺乏有人驾驶飞机的优质静压孔，使其气压读数充满噪声且容易受旋翼洗流干扰¹。

4.2 CARS概念与VCS架构

为解决这一问题，ICARUS提出了通用高度参考系统(**CARS**)，其支撑核心是一个新的U-space服

务:垂直转换服务(Vertical Conversion Service, VCS)²。

垂直转换服务(VCS):

VCS充当U-space架构中的翻译层,是一个双向转换服务²:

- 输入:无人机位置(GNSS 经纬度/HAE)或有人驾驶航空器位置(气压高度)。
- 处理:VCS查询实时天气数据(RGIS - 实时地理空间信息服务)和大地水准面模型。它利用第3节中描述的基于物理的方法,将输入高度转换为接收方所需的参考系。
- 输出:通用垂直基准(通常转换为大地高用于避障,再转回气压高度用于ATC间隔)²⁶。

技术架构:

ICARUS架构由模块化区块组成:

1. 地理信息模块(**Geo-information Module**):存储参考WGS84的数字地形模型/数字表面模型(DTM/DSM)和障碍物数据²⁶。
2. **GNSS**模块:监控卫星信号的完好性,确保HAE输入的有效性²⁶。
3. **VCS**模块:算法核心,执行 \$HAE \rightarrow Baro\$ 的转换²⁷。
4. **VALS(垂直警报服务)**:一个安全网,使用通用参考来警告即将发生的地形或交通碰撞,无论源高度类型如何¹²。

验证:

在意大利进行的飞行试验验证了这一概念,证明了使用GNSS高度飞行的无人机可以在管制员屏幕上精确显示为等效的气压飞行高度层,有效地在不需要更改传统有人驾驶飞机硬件的情况下“协调”了空域²。

5. 技术挑战与误差建模

贯穿所有分析研究的一个核心主题是对误差的严格表征。在参考系之间进行转换会引入多种必须为安全关键操作界定的不确定性源。

5.1 NWP延迟与插值误差

基于NWP转换的主要威胁在于天气数据的延迟。Simonetti等人使用ERA5再分析数据进行验证,这是数周后才可用的“最佳估计”。对于实时操作(BiG-C, VCS),系统必须依赖预报数据(如GFS或IFS预报)。Narayanan指出,转换的准确性直接取决于预报代表大气真实状态的能力⁷。预测的温度递减率误差会直接传播到高度计算中。当航空器位于网格点之间时(例如,0.25度网格约为28公里),也会产生插值误差,这给未被模型捕捉的中尺度变化(如雷暴)留下了空间⁶。

5.2 大地水准面模型的不确定性

虽然EGM96是标准，但像EGM2008或国家高精度大地水准面模型提供了更好的精度。转换误差预算必须考虑大地水准面起伏(\$N\$)的不确定性，在重力数据稀疏的地区，这种不确定性可能达到数米²。

5.3 传感器误差与俯仰敏感性

DLR飞行测试(Simonetti & Crespillo)得出的一个有趣的“二阶”洞察是气压误差对飞行动力学的依赖性。他们观察到残余高度误差与航空器的**俯仰角(Pitch Angle)**之间存在线性关系²。这表明，在动态机动期间，大气数据计算机(ADC)未能完全补偿静压孔的空气动力学效应(位置误差)。他们提出了一个线性缓解模型 ($\Delta h(\theta) = m\theta + n$)，该模型将误差标准差从6.4米降低到了4.1米²。这凸显了仅仅依靠算法转换是不够的；传感器安装的空气动力学特性仍然是一个关键因素。

6. 未来方向：机器学习与混合融合

研究格局正朝着更智能、自适应系统的方向发展。

6.1 机器学习(ML)修正

最近的研究建议使用机器学习来修正气压误差。通过在包含历史飞行数据(ADS-B数据耦合气象数据)的海量数据集上训练神经网络，模型可以学习经典流体静力学方程可能遗漏的复杂非线性误差模式³¹。**“物理信息机器学习”(Physics-Informed Machine Learning, PINN)**正成为一种有前途的技术，它将ML模型约束在物理定律(流体静力平衡)内，确保它们在未见过的恶劣大气条件下具有良好的泛化能力³³。

6.2 气压-惯性-GNSS深度融合

终极目标是深度传感器融合。未来的架构(如UAM所提议的)不再将气压计视为独立的高度源，而是在紧耦合卡尔曼滤波器中融合气压、GNSS、IMU以及视觉/LiDAR数据。此时，NWP数据不仅作为转换工具，更是作为滤波器中的一种“约束”或“观测值”，帮助剔除城市峡谷中的GNSS多径误差，同时限制惯性解算的漂移³⁵。

7. 结论与建议

气压高度与大地高度的协调已不再是单纯的理论练习，而是下一代航空迫切的操作需求。本报告的研究分析表明了一个清晰的范式转变：

1. 从静态参考到动态参考：行业正从静态的ISA模型转向以动态、数据驱动的大气模型(NWP)作为高度计算的基础。
2. 天气即传感器：高保真天气数据(如ECMWF IFS)已成熟到可以作为虚拟导航传感器使用的程度，其精度可与物理仪器的校准检查相媲美。
3. 基于服务的架构：解决“混合装备”问题(无人机与客机)的方案在于地面转换服务(如ICARUS VCS)，而不是强制要求单一的机载标准。

由Simonetti, Crespillo, Narayanan以及SESAR联盟开发的方法论，为这一转变提供了数学和架构蓝图。通过严格的误差建模和利用全球天气数据集，这些方法使得未来拥挤空域所需的安全、高完好性垂直导航成为可能。

关键方法论详细对比表

方法论	主要输入	参考数据	核心算法	主要应用场景	精度(标准差)
标准气压高度	静压(\$P\$)	ISA模型(静态)	流体静力学方程(ISA常数)	传统ATM, 飞行高度层	偏差极大(>100m)
Blanchard	\$P\$, \$T\$	标准大气 +	动态流体静	INS阻尼, 军	优于ISA, 随

算法	\$V_{ground}\$\$,\$V_{wind}\$\$	风场	力积分	用	时间漂移
Baro-ARAI M (Simonetti 等)	\$P\$, GNSS 位置	ERA5 / NWP 预报	4D插值 + 大地水准面/标尺转换	GNSS完好性, LPV-200	~4-5m (修正后) ²
BiG-C (Narayanan等)	\$P\$, \$T\$	NWP预报	递减率估算 + 测高公式	垂直RNP, 系统化空域	~30m (保守边界) ¹¹
ICARUS VCS	GNSS HAE 或 Baro	实时气象数据 (RGIS)	双向转换服务	U-space, 无人机-有人机间隔	系统相关 ²

相关核心文献:

1. **Simonetti, M., & García Crespillo, O. (2024).** Geodetic Altitude from Barometer and Weather Data for GNSS Integrity Monitoring in Aviation. NAVIGATION, 71(2).²
2. **Schumann, U., et al. (2017).** Use of Numerical Weather Prediction Analysis for Testing Pressure Altitude Measurements on Aircraft. Avionics & Space Testing Conference.²
3. **Narayanan, S., & Osechas, O. (2022).** Enhanced Vertical Navigation Using Barometric Measurements. Sensors, 22(23).¹¹
4. **ICARUS Consortium.** Integrated Common Altitude Reference System for U-space. SESAR Joint Undertaking.²
5. **Blanchard, R. L. (1971).** A new algorithm for computing inertial altitude and vertical velocity. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.⁵

引用的著作

1. Geodetic Altitude from Barometer and Weather Data for GNSS Integrity Monitoring in Aviation | NAVIGATION, 访问时间为十一月 25, 2025, <https://navi.ion.org/content/71/2/navi.637>
2. Schumann_et_al_Avionics_Munich_paper_final.pdf
3. Robust Modeling of Geodetic Altitude from Barometric Altimeter and Weather Data, 访问时间为十一月 25, 2025, https://elib.dlr.de/144642/1/2021ION_Baro_Modeling_Simonetti_GarciaCrespillo.pdf
4. Geodetic Altitude from Barometer and Weather Data for GNSS Integrity Monitoring in Aviation, 访问时间为十一月 25, 2025,

<https://elib.dlr.de/202304/2/navi.637.full.pdf>

5. Analysis of pressure and Blanchard altitude errors computed using atmospheric data obtained from an F-18 aircraft flight - ResearchGate, 访问时间为十一月 25, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/3945747_Analysis_of_pressure_and_Blanchard_altitude_errors_computed_using_atmospheric_data_obtained_from_an_F-18_aircraft_flight
6. Modeling of Barometric Altimeter Measurements to support Geodetic Altitude Navigation, 访问时间为十一月 25, 2025,
<https://elib.dlr.de/144651/1/Master%27s%20Thesis%20Simonetti%202021.pdf>
7. Enhanced Vertical Navigation Using Barometric Measurements - PMC - NIH, 访问时间为十一月 25, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9735476/>
8. (PDF) Enhanced Vertical Navigation Using Barometric Measurements, 访问时间为十一月 25, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/365834850_Enhanced_Vertical_Navigation_Using_Barometric_Measurements
9. Geodetic Altitude from Barometer and Weather Data for GNSS Integrity Monitoring in Aviation - YouTube, 访问时间为十一月 25, 2025,
<https://www.youtube.com/watch?v=qEQgAf5bgVM>
10. GNSS Autonomous Integrity Monitoring with Barometric Pressure Measurements and Weather Data, 访问时间为十一月 25, 2025,
https://elib.dlr.de/189868/1/2022IONGNSS_Baro_ARAIM_Simonetti_GarciaCrespillo.pdf
11. Enhanced Vertical Navigation Using Barometric Measurements - MDPI, 访问时间为十一月 25, 2025, <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9263>
12. ICARUS - Integrated Common Altitude Reference system for U-Space - SESAR Joint Undertaking, 访问时间为十一月 25, 2025,
<https://www.sesarju.eu/projects/icarus>
13. How to convert barometric altitude to gps altitude? [duplicate] - Aviation Stack Exchange, 访问时间为十一月 25, 2025,
<https://aviation.stackexchange.com/questions/94182/how-to-convert-barometric-altitude-to-gps-altitude>
14. Pressure Altitude Explained (Formula and Examples) - Pilot Institute, 访问时间为十一月 25, 2025, <https://pilotinstitute.com/pressure-altitude-explained/>
15. What's the difference between pressure altitude and geometric height?, 访问时间为十一月 25, 2025,
<https://flyapg.com/kb/whats-the-difference-between-pressure-altitude-and-geometric-height>
16. Analysis of pressure and Blanchard altitude errors computed using atmospheric data obtained from an F-18 aircraft flight | Semantic Scholar, 访问时间为十一月 25, 2025,
<https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-pressure-and-Blanchard-altitude-errors-Li-Shaner/8e86baf36689167d8e0387b730438c0baa2f8882>
17. (PDF) Modeling of Barometric Altimeter Measurements to support Geodetic Altitude Navigation - ResearchGate, 访问时间为十一月 25, 2025,

https://www.researchgate.net/publication/358440008_Modeling_of_Barometric_Altimeter_Measurements_to_support_Geodetic_Altitude_Navigation

18. 7 shows the errors in the geodetic altitude from the Blanchard altitude... | Download Scientific Diagram - ResearchGate, 访问时间为 十一月 25, 2025, https://www.researchgate.net/figure/shows-the-errors-in-the-geodetic-altitude-from-the-Blanchard-altitude-obtained-using-as_fig21_358440008
19. Errors in the pressure and Blanchard altitudes for a cross country flight - ResearchGate, 访问时间为 十一月 25, 2025, https://www.researchgate.net/publication/224155005_Errors_in_the_pressure_and_Blanchard_altitudes_for_a_cross_country_flight
20. Wander Azimuth Implementation Algorithm for a Strapdown Inertial System - DTIC, 访问时间为 十一月 25, 2025, <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0784752.pdf>
21. Use of Numerical Weather Prediction Analysis for Testing Pressure Altitude Measurements on Aircraft - An Application Example | Request PDF - ResearchGate, 访问时间为 十一月 25, 2025, https://www.researchgate.net/publication/317091569_Use_of_Numerical_Weather_Prediction_Analysis_for_Testing_Pressure_Altitude_Measurements_on_Aircraft_-_An_Application_Example
22. Use of Numerical Weather Prediction Analysis for Testing Pressure Altitude Measurements on Aircraft - An Application Example1, 访问时间为 十一月 25, 2025 , https://elib.dlr.de/112420/1/Schumann_et_al_Avionics_Munich_paper_final.pdf
23. A universal approach to altitude measurement - SESAR Joint Undertaking, 访问时间为 十一月 25, 2025, <https://www.sesarju.eu/news/universal-approach-altitude-measurement>
24. News - U-space ICARUS, 访问时间为 十一月 25, 2025, <https://u-spaceicarus.eu/news/>
25. ICARUS - Integrated Common Altitude Reference System for U-space, 访问时间为 十一月 25, 2025, <https://u-spaceicarus.eu/>
26. ICARUS Architecture and Design document published | EuroUSC España, 访问时间为 十一月 25, 2025, <https://eurousc.es/news/icarus-architecture-and-design-document/>
27. Implementing and Testing a U-Space System - Encyclopedia.pub, 访问时间为 十一月 25, 2025, <https://encyclopedia.pub/entry/55747>
28. U-space ConOps (edition 3.10) - CORUS five, 访问时间为 十一月 25, 2025, https://corus-project.eu/wp-content/uploads/2022/11/CORUS-XUAM-D4.1-delivered_3.10.pdf
29. U-SPACE CONCEPT OF OPERATIONS (CONOPS) - SESAR Joint Undertaking, 访问时间为 十一月 25, 2025, <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20CONOPS%204th%20edition.pdf>
30. Geodetic Altitude from Barometer and Weather Data for GNSS Integrity Monitoring in Aviation - Navigation, 访问时间为 十一月 25, 2025, https://navi.ion.org/content/navi/71/2/navi.637.full.pdf?utm_source=consensus
31. Smartphone Pressure Collection and Bias Correction Using Machine Learning in - AMS Journals, 访问时间为 十一月 25, 2025,

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/35/3/jtech-d-17-0096.1.xml>

32. (PDF) An AI-Based Deep Learning with K-Mean Approach for Enhancing Altitude Estimation Accuracy in Unmanned Aerial Vehicles - ResearchGate, 访问时间为十一月 25, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/386396799_An_AI-Based_Deep_Learning_with_K-Mean_Approach_for_Enhancing_Altitude_Estimation_Accuracy_in_Unmanned_Aerial_Vehicles
33. Physics-informed machine learning: case studies for weather and climate modelling | Philosophical Transactions of the Royal Society A - Journals, 访问时间为十一月 25, 2025,
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2020.0093>
34. The Physics-Informed Neural Network Gravity Model Generation III - arXiv, 访问时间为十一月 25, 2025, <https://arxiv.org/html/2312.10257v2>
35. Toward Realization of Low-Altitude Economy Networks: Core Architecture, Integrated Technologies, and Future Directions Yixian Wang, Zemin Sun, Jiahui Li and Jing Wu are with the College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China, and also with the Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education - arXiv, 访问时间为十一月 25, 2025, <https://arxiv.org/html/2504.21583v1>
36. Positioning, Navigation, and Timing Strategic Plan - Department of Transportation, 访问时间为十一月 25, 2025,
https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2025-01/Positioning%20Navigation%20and%20Timing%20Strategic%20Plan_v%20FINAL.pdf