利用接收机自主完整性监测算法分析高空平台辅助全球导航卫星系统在城市区域的性能

Hongzhao Zheng，*IEEE*会员 *IEEE*，Mohamed Atia，*IEEE*高级会员，以及Halim Yanikomeroglu，*IEEE*会士

摘要—**对于现有的所有全球导航卫星系统（GNSS），全球平均民用定位精度仍处于米级，而在城市区域，定位性能甚至更差。与卫星相比，高空平台站（HAPS）飞行高度较低，因此具有多项优势，例如时延更低、路径损耗更小，并且伪距方程中相关参数的总体估计误差可能更小。HAPS可以通过多种方式为GNSS提供支持；本文将HAPS视为另一种测距源。为此，我们通过仿真和物理实验，考察高空平台辅助GPS系统在城市区域的定位性能。目前尚无法获取高空平台测量值，因此我们在仿真和物理实验中均以相当简单但合乎逻辑的方式对其进行建模。结果表明，在郊区和高密度城区，HAPS均可改善GPS的水平精度衰减因子（HDOP）、垂直精度衰减因子（VDOP）和三维定位精度。我们还证明了接收机自主完整性监测算法适用于高空平台辅助GPS系统，尤其是在高密度城区。**

索引词—高空平台站（***HAPS***）、水平精度因子（***HDOP***）、伪距、接收机自主完好性监测（***RAIM***）、垂直精度因子（***VDOP***）。

I. 引言

如今，许多国家和欧盟都拥有自己的全球导航卫星系统（GNSS）。然而，由于卫星几何构型的固有特点，现有全球导航卫星系统在全球范围内的平均水平定位精度，95% 的时间仍处于米级，垂直定位精度则更差 [1]-[4] 。虽然目前垂直定位性能不如水平定位性能重要，但未来可能会非常重要，例如，对于在三维空中高速公路上飞行的无人飞行器（UAV）而言 [5]。得益于定位和导航领域持续开展的研究，人们已开发出多种技术，能够将涉及卫星的系统的定位精度提升至厘米级。例如，Li 等人证明，采用由北斗卫星导航系统、伽利略卫星导航系统、格洛纳斯和全球定位系统组成的多星座全球导航卫星系统，并结合精密单点定位（PPP），可以实现厘米级定位精度 [6]。由于大多数民用应用使用单频低成本接收机进行定位和导航，许多先进的定位算法（包括能够提供厘米级定位精度的 PPP）无法实施。

因此，单点定位（SPP）是民用应用中最常用的算法。不过，这种情况即将改变。随着越来越多的低地球轨道（LEO）卫星被送入太空，研究人员正在探索利用低地球轨道（LEO）卫星辅助定位服务的可行性。例如，Li 等人证明，在实时精密单点定位（PPP）应用中，利用低地球轨道（LEO）卫星增强全球导航卫星系统，可以实现厘米级的空间信号测距误差（SISRE）[7]。如果城市区域无法接收到全球导航卫星系统信号，研究人员也在探索构建完全依赖低地球轨道（LEO）卫星信号的导航系统。例如，研究已证明，使用两颗 Orbcomm 低地球轨道（LEO）卫星和载波相位差分算法，可使无人机的位置均方根误差（RMSE）达到 14.8 米 [8]。与全球导航卫星系统通常使用的中地球轨道（MEO）卫星相比，低地球轨道（LEO）卫星具有多项优势，例如时延更低，且由于与地面用户的距离更短，路径损耗更小。低地球轨道（LEO）卫星数量庞大，因此也具有更高的可用性。

为了进一步提升障碍物密集区域（如城市区域）的高带宽网络覆盖能力，另一种选择是采用高空平台站（HAPS[1]）。高空平台站是指部署在平流层、典型高度约为 20 km 的空中平台。HAPS 可用于 5G 乃至 6G 及更先进技术中的多种应用，例如计算卸载 [9], 边缘计算 [10], 和空中基站 [11]。城市区域既是 GNSS 定位性能严重退化的地方，也是大多数人生活的地方，因此，我们可以在大城市上空部署多个 HAPS，并为其配备卫星级原子钟，使 HAPS 成为另一种测距源，从而提升 GNSS 的定位性能。尽管卫星上的原子钟精度很高，但由于爱因斯坦狭义相对论和广义相对论中的时间膨胀原理，它们并非完美无误。根据爱因斯坦的狭义相对论，快速移动的卫星上的原子钟每天比地球上的时钟慢约 7 微秒。另一方面，根据广义相对论，远处卫星上的原子钟所处的引力较弱，因此比处于较强引力环境中的时钟每天快约 45 微秒/天。

本文部分工作得到了华为加拿大的资助。H. Zheng、M. Atia 和 H. Yanikomeroglu 任职于加拿大渥太华 K1S 5B6 的卡尔顿大学系统与计算机工程系（电子邮箱：hongzhaozheng@cmail.carleton.ca；Mohamed.Atia@carleton.ca；halim@sce.carleton.ca）。

[1] 本文中，缩写“HAPS”按照国际电信联盟（ITU）文件采用的惯例，用于表示单数和复数形式的“高空平台站”。

地球上的时钟快约 45 微秒/天 [12]。由于 HAPS 在约 20 km 的高度运行且可准静止运行，从狭义相对论的角度看，其时间膨胀可以忽略不计；从广义相对论的角度看，时间膨胀也大幅减小。因此，HAPS 上的原子钟很可能比卫星上的原子钟更精确，从而使 HAPS 时钟偏差的估计误差小于卫星时钟偏差的估计误差。由于 HAPS 与地球的距离远小于卫星，预计 HAPS 的路径损耗要低得多，因此其接收信号功率很可能强于卫星，进而降低 HAPS 信号伪距测量相关参数的估计误差。HAPS 的移动范围可限制在半径为 400 m、高约 700 m 的圆柱形区域内 [13], , 这有助于减少导航过程中的切换次数，并提高其运行寿命期间的利用效率。由于 HAPS 位于电离层下方的平流层，其信号很可能不受电离层效应影响，而电离层效应是伪距测量误差的主要来源之一。因此，HAPS 的整体估计误差很可能小于卫星的整体估计误差。与包含卫星位置误差的卫星伪距测量类似，我们也应在 HAPS 伪距测量中考虑位置误差。幸运的是，研究人员一直在研究 HAPS 定位，并已证明 HAPS 的定位误差与卫星轨道误差相当或更小。例如，Dovis 等人证明，采用改进的实时动态定位方法 [14]，HAPS 可实现 0.5 m 的定位精度（圆概率误差 [CEP] 68 百分位）。文献中已有少量论文研究高空平台辅助全球导航卫星系统 [15]-[18]；然而，据我们所知，本文首次全面研究了城市区域中高空平台辅助全球导航卫星系统的定位性能。

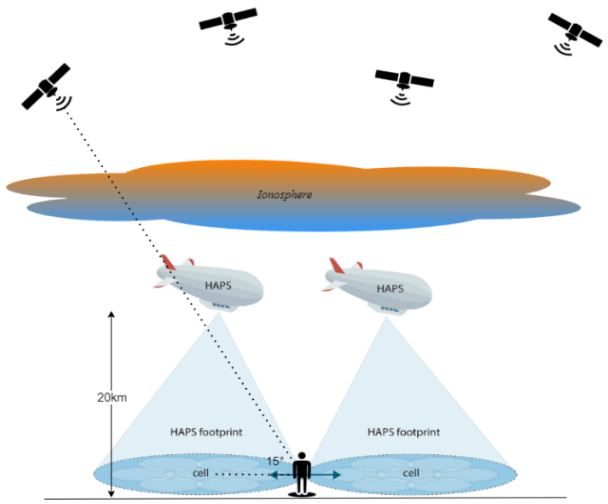


图1. 高空平台辅助GPS的系统模型。

大量在运行的GPS卫星可能会因信号质量下降而发生故障，造成信号质量下降的原因包括遮挡、多径、蓄意或非蓄意攻击等，从而影响全球导航卫星系统的定位性能。在这种情况下，采用接收机自主完好性监测（RAIM）算法等信号选择算法，有助于检测并排除质量较差的信号，从而提升定位性能。例如，在严重城市环境中，使用RAIM算法可使智能手机GNSS芯片在仅GPS情形下的均方根定位误差降低约35%，在GPS/GLONASS情形下降低约50% [19]。此外，Yang和Xu提出了一种基于鲁棒估计的接收机自主完好性监测算法，能够有效检测并排除多个故障卫星，且效率高于传统的基于最小二乘法（LS）的RAIM算法[20]。本文提出以下三项假设：1）高空平台信号不受电离层效应影响；2）高空平台时钟偏差的估计误差小于卫星时钟偏差的估计误差；3）高空平台的接收信号功率高于卫星信号功率。这些假设都有助于

认为高空平台伪距方程中相关参数的总体估计误差小于卫星伪距方程中的总体估计误差。在此假设下，我们使用此前工作中开发的单点定位算法 [21] ，通过仿真和物理实验表明，高空平台确实能够提升传统GNSS在城市区域的定位性能。我们还展示了RAIM算法在高空平台辅助GPS系统中的适用性，尤其是在高密度城区。由于目前尚无高空平台测量值，我们在仿真和物理实验中均以相当简单但合理的方式对其进行模拟。本文的贡献如下。

- 首先，我们使用商用全球导航卫星系统模拟器对GPS伪距信号进行仿真，并生成高空平台的位置。通过采用默认系统参数并适当调整可见卫星的数量，我们表明，在郊区和高密度城区，纯GPS系统的定位性能均接近真实场景。此外，我们还展示了使用不同数量高空平台、配合或不配合GPS系统时不同系统的定位性能。仿真结果揭示了测距源几何构型这一问题。

- 接下来，我们使用单点定位算法处理由两台商用全球导航卫星系统接收机采集的真实GPS数据，以及利用商用全球导航卫星系统软件生成的高空平台数据。由此，我们展示了高空平台辅助GPS系统在水平精度衰减因子（HDOP）和垂直精度衰减因子（VDOP）方面的优势。

- 最后，我们实现了一种接收机自主完整性监测算法，并展示了其在提升高空平台辅助GPS系统的三维定位性能方面的有效性，尤其是在高密度城区。

本文其余部分安排如下：第二节介绍系统模型、单点定位算法和接收机自主完整性监测算法。第三节将介绍高空平台-

辅助全球定位系统的仿真设置及仿真结果。第四节给出物理实验设置和实验结果，包括精度衰减因子分析和三维定位精度分析。最后，第五节总结全文并讨论未来研究方向。为简便起见，全球导航卫星系统信号仅涉及GPS C/A L1信号。

II. 系统模型

高空平台辅助GPS系统的系统模型如图1所示。图1中展示了四颗卫星，这只是提醒读者，使用全球导航卫星系统进行精确三维定位至少需要四颗卫星。高度角截止值通常设为10度。然而，出于以下原因，我们将卫星和高空平台的高度角截止值设为15度：1）如果卫星的高度角大于15度，由信号折射引起的大气误差可以忽略不计[22]，，高空平台也很可能符合这一条件；2）由于借助高空平台更有可能确保测距源数量满足要求，因此我们可以只使用质量较好的卫星信号，进一步提升定位性能。卫星的伪距方程为

$$p_{SAT} = \rho_{SAT} + d_{SAT} + c(dt - dT_{SAT}) + d_{ion,SAT} + d_{trop,SAT} + \epsilon_{mp,SAT} + \epsilon_p \quad (1)$$

其中，p_{SAT} 表示卫星伪距测量值，ρ_{SAT} 表示卫星与接收机之间的几何距离，d_{SAT} 表示卫星轨道误差，c 表示光速，dt 表示接收机相对于GPS时间的时钟偏差，dT_{SAT} 表示卫星相对于GPS时间的时钟偏差，$d_{ion,\ SAT}$ 表示卫星信号的电离层延迟，$d_{trop,\ SAT}$ 表示卫星信号的对流层延迟，$\epsilon_{mp,\ SAT}$ 表示卫星信号多径造成的延迟，ϵ_p 表示接收机噪声造成的延迟。高空平台的伪距方程可表示如下：

$$p_{HAPS} = \rho_{HAPS} + d_{HAPS} + c(dt - dT_{HAPS}) + d_{trop,HAPS} + \epsilon_{mp,HAPS} + \epsilon_p \quad (2)$$

其中，p_{HAPS} 表示高空平台伪距测量值，ρ_{HAPS} 表示高空平台与接收机之间的几何距离，d_{HAPS} 表示高空平台位置误差，dT_{HAPS} 表示高空平台相对于 GPS 时间的时钟偏差，$d_{trop,\ HAPS}$ 表示高空平台信号的对流层延迟，$\epsilon_{mp,\ HAPS}$ 表示高空平台信号多径造成的延迟。模拟的车辆轨迹始于位于郊区的卡尔顿大学，终点为里多街，该街道位于渥太华人口稠密的城区（见图2）。图3中显示了六个模拟的高空平台，它们作为发射机。可以看出，一个高空平台位于渥太华市中心上空；另外五个位于附近的人口密集区和保护区上空。高空平台处于准静止状态，这意味着它仍会以各种方式运动。在本研究中，所有高空平台均

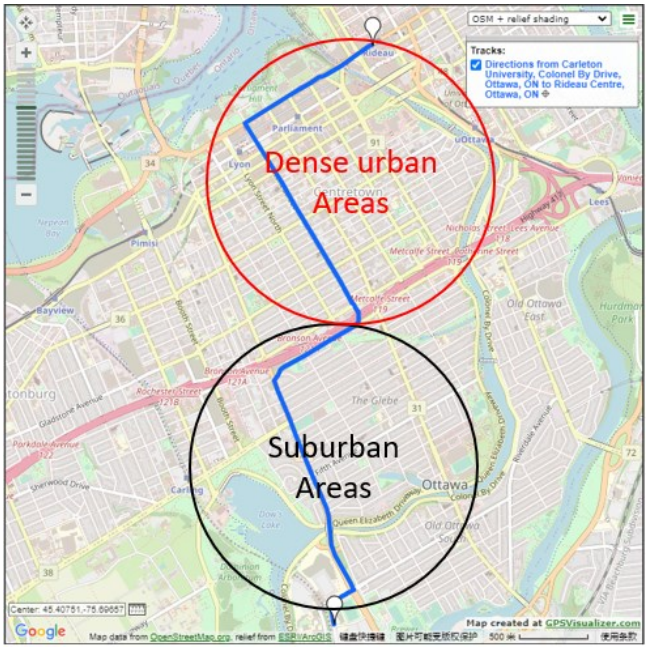


图2. 车辆轨迹。



图3. 模拟的高空平台位置。

模拟为沿半径为 300 m 的圆形轨迹运动。仿真开始时所有高空平台的仰角和方位角列于表 I。选择高空平台的位置是为了使方位角分布丰富。一个高空平台位于天顶，其余高空平台的仰角相对较低，这构成了近似天顶 + 地平线（ZH）几何构型，可提供较好的精度衰减因子 [23]。为确保整个城市区域得到良好覆盖，高空平台的位置不会离城市区域太远。为更好地理解精度衰减因子的概念，图 4 和图 5 分别直观展示了仿真中 HAPS 星座的水平精度衰减因子和垂直精度衰减因子。由于伪距测量会受到各种误差的影响，估计的高空平台与接收机之间的距离可能大于或小于几何距离。从几何角度来看，仰角较大的物体可能会导致垂直分量的不确定性较大，而水平分量的不确定性较小，

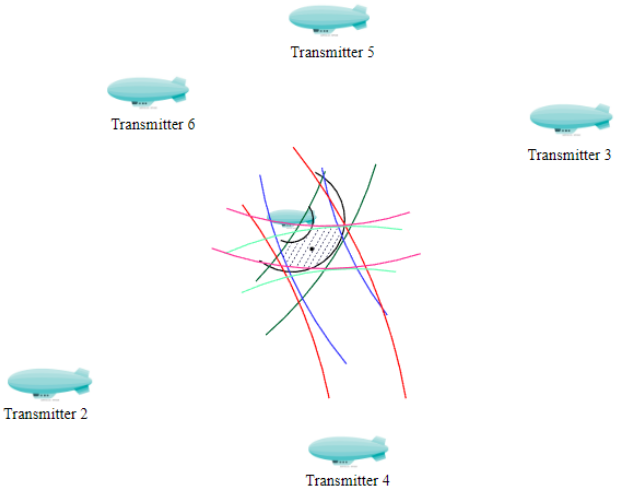


图 4. 仿真 HAPS 星座的水平精度衰减因子（俯视图　w).

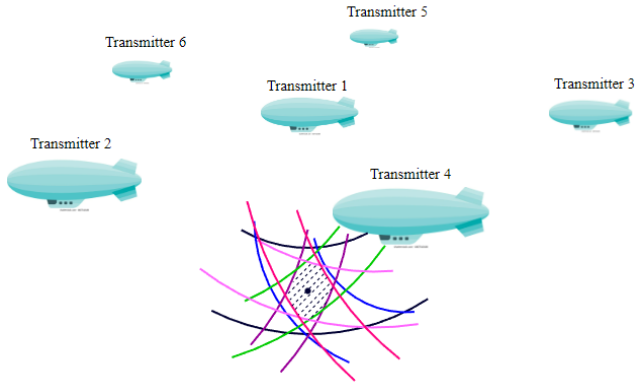


图 5. 仿真 HAPS 星座的垂直精度衰减因子（正视图）。

反之亦然。阴影区域表示估计的接收机所在位置。

A. 单点定位（*SPP*）算法

单点定位算法基于 Napat Tongkasem 开发的 SPP 软件包实现，并进行了适当修改 [24] [21]，以便将高空平台纳入单点定位算法。图 6 展示了单点定位算法的流程图。需要指出的是，所实现的单点定位算法并非最佳定位算法；本研究旨在说明高空平台对于提升传统GNSS定位性能的重要性。所实现的单点定位算法还有许多改进空间。例如，如果已知测量误差方差，我们可以应用加权最小二乘（WLS）算法，降低方差较大的观测值的权重，从而提升单点定位算法的定位性能 [25]。如果测量误差方差未知，则可以在式（9）的矩阵求逆中采用乔列斯基分解，降低单点定位算法的计算复杂度 [26]。我们还可以

表 I 仿真开始时 HAPS 的仰角和方位角

高空平台索引	仰角	方位角
高空平台 #1	81.087°	-14.210°
HAPS #2	24.054°	-128.878°
HAPS #3	27.952°	68.022°
HAPS #4	32.450°	171.477°
HAPS #5	36.554°	2.204°
高空平台 #6	33.805°	-57.884°

使用载波相位测量提升高空平台辅助GPS系统的定位性能，因为载波相位测量的精度高得多，通常能够提供更准确的位置解。由于本研究未明确模拟高空平台时钟偏差，我们仅用 dT 表示卫星时钟偏差。根据 GNSS接收机采集的数据，我们可以获得接收机无关交换格式（RINEX）观测文件和RINEX导航文件，并从中获取卫星信息，例如卫星伪距 $\boldsymbol{p_{SAT}}$、电离层参数 $\boldsymbol{\alpha}$、开普勒参数、伪随机噪声（$\boldsymbol{PRN}$）码（代表每颗卫星的唯一编号），以及年积日（DOY）（表示测量时的年积日）。我们用粗体 $\boldsymbol{PRN}$ 表示一个向量，其中包含当前历元所有可见卫星的伪随机噪声码。利用导航文件中的开普勒参数，我们可以计算卫星位置 $\boldsymbol{P_{SAT}}$ 和卫星时钟偏差 $\boldsymbol{dT}$。$\boldsymbol{P_{HAPS}}$ 表示一个包含所有高空平台位置的向量，这些位置由 Skydel GNSS模拟器生成 [27], ; $\boldsymbol{p_{HAPS}}$ 表示一个包含高空伪卫星伪距的向量，相关说明见第三节。为计算位置解 $\boldsymbol{x}$，我们首先将接收机位置初始化为地球中心；然后将接收机时钟偏差初始化为零，并将估计值的变化量 $\boldsymbol{dx}$ 初始化为无穷大。对于每个测量历元，我们首先检查可用测距源的数量是否大于三，因为要实现精确的三维定位，至少需要四个测距源。由于接收机位置是通过迭代估计的，我们根据最近一次估计的接收机位置，计算卫星和高空平台的仰角。由于对流层延迟和电离层延迟都是接收机位置的函数，因此这两种大气延迟也采用迭代方式估计。根据重新计算的卫星和高空平台仰角，迭代修正仰角、卫星伪距、高空伪卫星伪距、卫星位置、卫星时钟偏差、对流层延迟 $\boldsymbol{d_{trop}}$、电离层延迟 $\boldsymbol{d_{ion}}$ 以及伪随机噪声（$\boldsymbol{PRN}$）码。为准备最小二乘法所需的参数，需要按如下方式校正伪距：

$$\boldsymbol{p^c_{SAT} = p_{SAT} + c \cdot dT - d_{trop,SAT} - d_{ion,SAT}} \qquad (3)$$

其中，$\boldsymbol{p^c_{SAT}}$ 表示

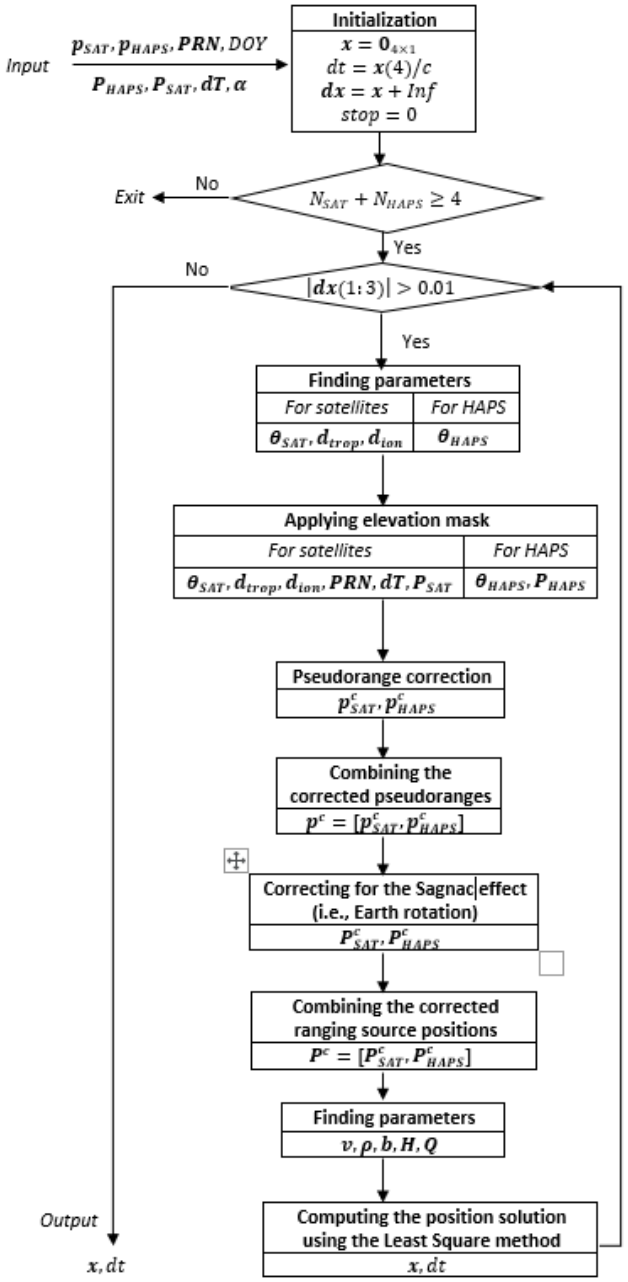


图 6. 单点定位算法流程图。

卫星的校正伪距，$\boldsymbol{p_{SAT}}$ 表示卫星未经校正的伪距。在本研究中，高空伪卫星伪距建模为几何距离与伪距误差之和，其中伪距误差表示高空伪卫星伪距方程中各参数的整体估计误差。因此，高空伪卫星伪距无需校正。由于地球自转，卫星和高空平台在信号发射时刻的位置与信号接收时刻的位置不同，这种现象称为萨格纳克效应 [28]。卫星/高空平台的坐标可通过 [28] 从信号发射时刻转换至信号接收时刻

$$\Delta t_{ROT} = t_{rx} - t_{tx} \tag{4}$$

$$P_{i,rx} = M_{ROT}(\omega_E \times \Delta t_{ROT}) P_{i,tx} \tag{5}$$

其中，Δt_{ROT} 表示信号传播时间，t_{rx} 表示信号接收时刻，t_{tx} 表示信号发射时刻，$P_{i,\ rx}$ 表示信号接收时刻卫星/高空平台的坐标，$P_{i,\ tx}$ 表示信号发射时刻卫星/高空平台的坐标，ω_E 表示地球自转角速度，$M_{ROT}(\omega_E \times \Delta t_{ROT})$称为旋转矩阵，其描述如下：

$$M_{ROT}(\omega_E \times \Delta t_{ROT}) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_E \times \Delta t_{ROT}) & \sin(\omega_E \times \Delta t_{ROT}) & 0 \\ -\sin(\omega_E \times \Delta t_{ROT}) & \cos(\omega_E \times \Delta t_{ROT}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

随后计算视线向量$\boldsymbol{v}$以及测距源与接收机之间的真实距离$\boldsymbol{\rho}$，以求得先验距离残差向量$\boldsymbol{b}$ 和设计矩阵$\boldsymbol{H}$，其中

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{p^c} - \boldsymbol{\rho} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{H} = [\boldsymbol{v}, \boldsymbol{1}_{length(\boldsymbol{P^c})\times1}] \tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{p^c}$ 是经过校正的卫星伪距与经过校正的高空伪卫星伪距的组合，$\boldsymbol{1}_{length(\boldsymbol{P^c})\times1}$ 表示一个长度等于可见测距源总数的列向量，$\boldsymbol{P^c}$ 是一个包含可见测距源（即卫星+ 高空平台）校正后位置的向量。最后，最小二乘解计算如下：

$$\boldsymbol{Q} = (\boldsymbol{H'H})^{-1} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{dx} = \boldsymbol{QH'b} \tag{10}$$

$$dt = \boldsymbol{dx}(4)/c \tag{11}$$

其中$\mathbf{Q}$ 称为协方差矩阵，$\boldsymbol{dx}(4)$表示向量$\boldsymbol{dx}$中的第四个元素。为避免算法出现数值问题，我们应确保式（9）中待求逆的项非奇异；换言之，设计矩阵$\boldsymbol{H}$ 应为非奇异矩阵。利用高空平台作为额外测距源所获得的额外观测值，可降低$\boldsymbol{H}$ 为奇异矩阵的可能性；通过避免使用共线观测值即可确保设计矩阵非奇异，也就是说，两个或多个观测值具有大致相同的方位角和仰角。我们观察到，式（9）中待求逆的项$\boldsymbol{H'H}$是厄米正定矩阵，因此可以采用乔列斯基分解来降低计算复杂度[26]。协方差矩阵$\boldsymbol{Q}$表示为

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{xt} & \sigma_{yt} & \sigma_{zt} & \sigma_t^2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中分别表示地心地固（ECEF）坐标系中的接收机坐标x、y、z以及接收机时钟偏差。当接收机位置变化量的范数$\boldsymbol{dx}$(1: 3) 足够小时，即可得到最小二乘解。在本研究中，该阈值设为0.01 m。我们采用水平精度衰减因子、垂直精度衰减因子和三维定位精度作为指标，以展示所提出的高空平台辅助GPS系统的优势；三维定位精度用于展示接收机自主完好性监测算法在高空平台辅助GPS系统中的适用性。为计算水平精度衰减因子，我们需要将协方差矩阵转换到局部北东地（NED）坐标系中，可通过以下方程完成[29]:

$$\boldsymbol{Q_{NED}} = \boldsymbol{R}'\tilde{\boldsymbol{Q}}\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \sigma_n^2 & \sigma_{ne} & \sigma_{nd} \\ \sigma_{ne} & \sigma_e^2 & \sigma_{ed} \\ \sigma_{nd} & \sigma_{ed} & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\tilde{\boldsymbol{Q}} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\cos\lambda\sin\varphi & -\sin\lambda\sin\varphi & \cos\varphi \\ \cos\lambda\cos\varphi & \sin\lambda\cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \tag{15}$$

其中，σ_n、 σ_e和σ_d 分别表示接收机在局部北、东、下方向的位置误差。λ 和φ 分别表示接收机的经度和纬度。则水平精度衰减因子可表示为

$$HDOP = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2} \tag{16}$$

垂直精度衰减因子可表示为

$$VDOP = \sqrt{\sigma_d^2}. \tag{17}$$

B. 接收机自主完好性监测（*RAIM*）算法

接收机自主完好性监测算法是一种信号选择算法，可利用冗余测量检测甚至排除异常观测值。当观测值数量至少为五个时，该算法能够检测出异常观测值；当观测值数量至少为六个时，则能够排除该异常观测值。接收机自主完好性监测算法通常应用于多星座全球导航卫星系统中，此时测距源的数量足以进行精确的三维定位；该算法也通常应用于可能至少存在一个与预期值显著不符的观测值的情况。这类情况包括城市区域，其中伪距

算法 1 基于 C/N_0 的接收机自主完好性监测算法

输入：单点定位估计的位置解 $\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{C/N_0}$;
输出：单点定位与接收机自主完好性监测联合估计的位置解 $\hat{\boldsymbol{x}}$。

```
初始化参数 stop 和 dx;
当 |dx(1: 3)| > 0.01 时
    直到“参数求解”之前，步骤与单点定位算法相同
    在对……进行校正后，执行“参数求解”
    萨格纳克效应;
    对于 i = 1 至 N，执行
        如果 stop == 1，则执行
            求观测方差 i, s_i,
            根据式（19）;
        结束 if
    结束 for
    求权矩阵 W 和设计矩阵
    H，并计算协方差矩阵 Q
    根据 (20);
    根据以下公式计算估计值的变化量 dx
    按照 (21) 更新位置解 x;
    根据以下公式计算伪距残差 v̂
    按照 (22)，并计算残差的协方差矩阵
    C_v̂ 根据 (24);
    对 i = 1 至 N 执行
        求观测值 i 的标准化残差
        在当前迭代 k，w̄_i 时        ,k 根据
        (26);
        如果 |w̄_i, k| > n_1−(α0/2) 则
            更新观测方差 i
            用于下一次迭代 k + 1，σ_i        , ²k+1,
            根据（25）;
        结束 if
    结束 for
循环结束
```

测量值极易受到多路径效应的影响。借助高空平台，启用接收机自主完好性监测功能的可能性很可能会增加。典型的接收机自主完好性监测算法通常使用目标观测量的标准差，而在本研究中，目标观测量为伪距测量。由于我们使用的接收机无法获得卫星伪距的标准差，因此本研究基于[30], 实现接收机自主完整性监测算法，该方法考虑了C/N_0方差模型，并采用了一种计算效率高的方法，即修正丹麦估计法。[2]所实现的基于C/N_0的接收机自主完整性监测算法见算法1，其中N 表示可见测距源的数量。该算法的输入包括使用单点定位算法$\boldsymbol{x}$计算的位置解，以及测距源信号的$\boldsymbol{C/N_0}$。由于高空平台的高度远低于

[2] 据我们所知，接收机自主完好性监测是最常用的完好性监测算法。由于我们只有可用于完好性监测的 C/N_0 数据，因此在文献中未能找到其他合适的类似接收机自主完好性监测算法作为对比。不过，我们认为，如果能够获得卫星伪距标准差的相关信息，其他接收机自主完好性监测算法也同样适用。

卫星，实际中高空平台的C/N_0 值可能高于任何卫星。由于少数高空平台信号可能受到严重多径效应的影响，我们可以排除那些C/N_0 值远低于较高值的高空平台信号。本研究未对高空平台信号的多路径效应进行明确模拟；因此，我们假设每个高空平台的C/N_0 等于每个历元可用卫星的最大 C/N_0 值，这意味着高空平台信号的质量始终优于任何卫星信号。观测值（伪距）的方差协方差矩阵（VCM）$\boldsymbol{\Sigma}\ \boldsymbol{p}$ 定义如下：

$$\boldsymbol{\Sigma} = diag(s_1, s_2, \dots, s_n) \tag{18}$$

$$s_i = 10 + 150^2 * 10^{(-C/N_{0,i})/10} \tag{19}$$

其中，s_i 表示观测值 i 的方差。我们假设各观测值之间不相关，且误差服从参数为 $\mathbf{0}$、$\boldsymbol{\Sigma}$ 的正态分布 N。权矩阵 $\boldsymbol{W}$ 定义为方差协方差矩阵（VCM）$\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ 的逆矩阵。最小二乘方程为

$$\boldsymbol{Q} = (\boldsymbol{H}'\boldsymbol{W}\boldsymbol{H})^{-1} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{dx} = \boldsymbol{Q}\boldsymbol{H}'\boldsymbol{W}\boldsymbol{P}. \tag{21}$$

伪距 $\hat{\boldsymbol{v}}$ 的最小二乘残差可按如下方式求得：

$$\hat{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{dx} - \boldsymbol{P} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{p^c} - \boldsymbol{\rho} \tag{23}$$

其中，$\boldsymbol{H}$ 表示设计矩阵，$\boldsymbol{dx}$ 表示估计值的变化量，$\boldsymbol{p^c}$ 表示校正伪距，$\boldsymbol{\rho}$ 表示测距源与接收机之间的几何距离。残差的协方差矩阵 $\boldsymbol{C}_{\hat{\boldsymbol{v}}}$ 计算如下：

$$\boldsymbol{C}_{\hat{\boldsymbol{v}}} = \boldsymbol{\Sigma} - \boldsymbol{H}(\boldsymbol{H}^T\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^T. \tag{24}$$

为检测并剔除异常观测值，我们采用文献 [30] 提出的修正丹麦估计法。

$$\sigma^2_{i,k+1} = \sigma^2_{i,0} \cdot \begin{cases} \exp\left(\frac{|\bar{w}_{i,k}|}{T}\right), & |\bar{w}_{i,k}| > n_{1-(\alpha_0/2)} \\ 1, & |\bar{w}_{i,k}| \le n_{1-(\alpha_0/2)} \end{cases} \tag{25}$$

with

$$\bar{w}_{i,k} = \frac{\hat{v}_{i,k}}{\sqrt{(\boldsymbol{C}_{\hat{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{i,1}}})_{ii}}} \tag{26}$$

其中 $\sigma_{i,02}$ 表示观测值 i 的先验方差（即 s_i），$\bar{w}_{i,k}$ 表示观测值 i的标准化残差

在第 k次迭代中，$\sqrt{(\boldsymbol{C}_{\hat{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{i,1}}})_{ii}}$ 表示从第一次迭代开始的观测值 i 的标准差，$n_{1-(\alpha_0/2)}$表示标准正态分布的 α_0分位数，也称为临界值；α_0 是预先设定的虚警率，本研究中该值为 0.5 %。改进的 Danish 方法是一种实现稳健估计器的迭代重加权最小二乘算法。该方法在每次迭代中，将各归一化伪距残差的绝对值$|\bar{w}_{i,k}|$与临界值 $n_{1-(\alpha_0/2)}$进行比较，以检测并剔除异常观测值。对于标准化残差大于临界值的观测值，其方差会乘以指数项，从而增大这些观测值的方差，进而降低其权重。通过迭代地将异常观测值的方差乘以指数项，异常观测值的权重很可能会远小于正常观测值的权重；因此，可以认为异常观测值已被剔除。

III. 高空平台辅助GPS系统的仿真

本节将介绍在 Skydel GNSS软件中采用的仿真设置 [27] ，并展示郊区场景和高密度城市场景下若干混合系统及两个独立系统的三维定位精度仿真结果。

A. 仿真设置

系统模型采用 Skydel全球卫星导航系统仿真软件的默认地球定向参数 [27], 建立。该软件将所有绕地球运行并发射 L1 C/A 码的 GPS卫星纳入考量。仿真中采用 Saastamoinen 模型模拟对流层效应，并使用软件自带的默认 Klobuchar 参数，通过 Klobuchar 模型模拟电离层效应。从仿真开始时起，Skydel 在每个时间戳输出的内容包括信号发射时刻卫星的地心地固坐标、电离层改正、对流层改正、卫星钟差、接收机的地心地固坐标、信号发射时刻等。仿真中的接收机时钟偏差默认设为零。仿真未单独考虑卫星伪距方程中的修正项，包括卫星轨道误差、多路径误差和接收机噪声，而是引入伪距误差来反映这些效应。卫星伪距误差采用内置的一阶高斯-马尔可夫过程建模，其默认时间常数为 10 s，标准差为 6 m。一阶高斯-马尔可夫过程的连续模型如下 [31]:

$$\dot{x} = -\frac{1}{T_c}x + w \tag{27}$$

其中，x 表示一种均值为零、相关时间为T_c、噪声为w的随机过程。一阶

仿真设置详情II表

Item	处理策略
地球定向参数	软件默认地球定向参数
卫星信号	GPS L1 C/A
对流层模型	Saastamoinen 模型
电离层模型	Klobuchar 模型
采样率	12.5 MS/s
卫星伪距误差	1st 阶高斯-马尔可夫过程（时间常数为 = 10 s；标准差为 = 6 m）
高空平台伪距误差	高斯噪声（均值为 = 0 m；郊区场景的标准差为 = 2 m；密集城市环境的标准差为 = 5 m 场景）
GPS卫星数量（高密度城市场景场景）	8-10
GPS卫星数量（郊区场景场景）	4
高空平台总数	6

高斯-马尔可夫过程的自相关可用[32]表示：

$$R(\Delta t) = \sigma^2 e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau}} \quad (28)$$

其中，Δt 表示采样间隔，σ 和τ 分别表示一阶高斯-马尔可夫过程的标准差和时间常数。在郊区场景和高密度城市场景中，卫星伪距误差的特性设为相同。不过，为了以较简单的方式模拟高密度城区，我们在高密度城市场景中随机选取四颗卫星。我们通过这种方式验证，仿真中纯GPS系统的三维定位精度标准差接近物理实验中的结果。高空平台伪距误差采用高斯噪声建模，其标准差分别设为 2 m 和 5 m，对应郊区场景和高密度城市场景。假设高空平台的总体估计误差小于卫星的总体估计误差，因此在郊区和高密度城市场景中，高空平台伪距误差的标准差特意设得小于卫星伪距误差的标准差。为了研究高空平台数量对高空平台辅助GPS系统定位性能的影响，我们考虑了四种混合系统，每个历元随机选取不同数量的高空平台。为使研究更完整，我们还考虑了仅高空平台系统。在此设置下，我们考察不同系统在郊区和高密度城市场景中的三维定位性能。在郊区场景中，可见卫星数量在八颗至十颗之间变化，而在高密度城市场景中，可见卫星数量设为四颗。仿真设置的详细信息见表 II。

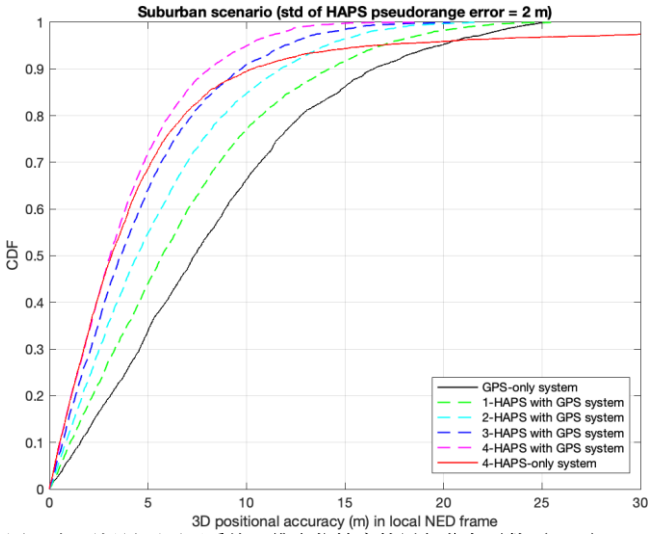


图 7. 郊区场景下不同系统三维定位精度的累积分布函数（CDF）。

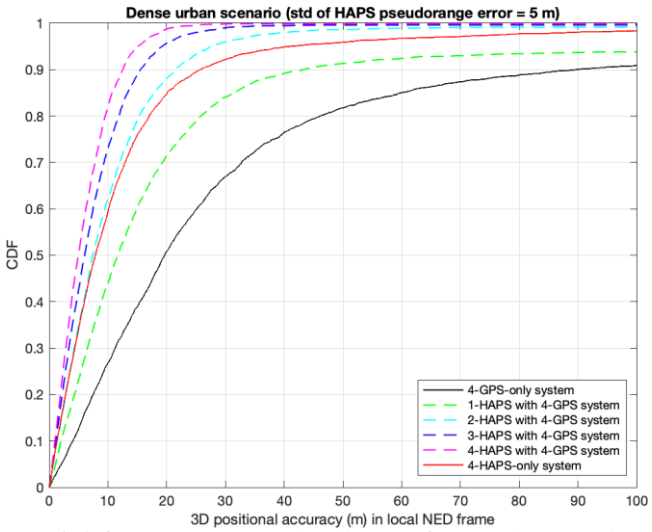


图 8. 高密度城市场景下不同系统三维定位精度的累积分布函数（CDF）。

B. 仿真结果

图 7 展示了郊区场景下不同定位系统三维定位精度的累积分布函数（CDF）。假设高空平台的伪距误差小于卫星的伪距误差，从图 7 可以看出，所有混合系统（高空平台 + GPS），其性能优于纯GPS系统；高空平台越多，高空平台辅助GPS的定位性能就越好

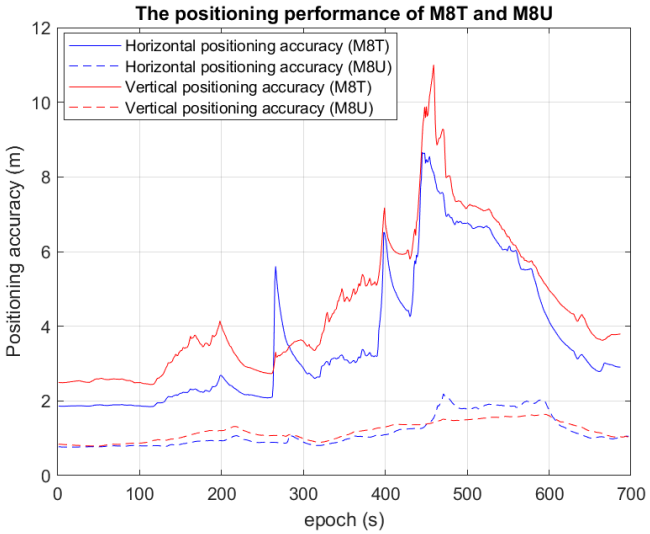


图9. M8T 和 M8U 在水平面和垂直面上的定位性能。

表III EVK-M8T GNSS单元规格 [35]

参数	规格
串行接口	1 USB 2.0
	1 RS-232，最大波特率 921,600 波特 DB9 +/- 12 伏特电平 14 引脚 – 3.3 V 逻辑电平
	1 显示数据通道（兼容 I²C）最大 400 千赫兹
	1 个 SPI时钟信号，最高 5.5 兆赫兹 – SPI数据 最高 1 兆比特每秒
定时接口	2 个时间脉冲输出
	1 个时间标记输入
尺寸	105 × 64 × 26 毫米
电源	通过 USB 提供 5 V 电源，或通过额外电源供电 电源引脚 14 (V5_IN) 13 (GND)
正常工作温度	−40°C 至 +65°C

系统。尽管如此，我们观察到，纯4-HAPS系统的定位性能并非最佳，有时甚至很差，尽管其中所有测距源的伪距误差都远小于卫星。这可能是由以下原因造成的：1）纯4-HAPS系统用于计算接收机位置的测距源少得多；2）由于每个历元都会随机选择四个高空平台，因此高空平台几何构型有时可能较差。高空平台几何构型较差的情况有多种，例如，随机选取的四个高空平台位于接收机的同一侧。图8展示了高密度城市场景下不同定位系统的三维定位精度累积分布函数（CDF），由此可见，高空平台越多，高空平台辅助GPS系统的定位性能就越好。在高密度城市场景中，仅选择四颗GPS卫星进行定位时，由于高空平台的信号质量更好，纯4-HAPS系统的定位性能优于纯4-GPS系统。不过，要获得最佳定位性能，我们应考虑采用高空平台辅助GPS系统。

IV. 外场实验

为验证并支持仿真结果，我们对使用两台商用全球导航卫星系统接收机采集的原始 GNSS 数据进行了处理。本节介绍实验设置、HAPS信号建模以及高空伪卫星伪距误差。我们还分析了纯GPS系统和高空平台辅助GPS系统的精度衰减因子（DOP）和三维定位精度。

A. 实验设置

原始 GNSS 数据沿着与图2所示相似的车辆轨迹采集，但由于采集当天部分道路封闭，轨迹略有不同。原始 GNSS 数据使用 Ublox EVK-M8T 和以及 Ublox EVK-M8U GNSS 单元。Ublox EVK-M8T 单元是一种授时产品，可为用户提供后处理所需的精确授时信息；Ublox EVK-M8U 单元是一种航位推算产品，配备了惯性测量单元（IMU），因此即使在高密度城区，该产品的定位性能也不会明显下降。图9展示了整个观测期内 M8T 和 M8U 在水平面和垂直面上的定位性能。从图9可以看出，M8U 的水平定位精度和垂直定位精度均优于 M8T。由于只有 M8T 能提供后处理所需的授时信息，因此使用 EVK-M8U 计算出的接收机位置作为分析定位性能的真实数据。原始 GNSS 数据采用第二节所述的单点定位算法进行处理。表III列出了 EVK-M8T GNSS 单元的规格。为模拟高空平台在城市区域中的真实视距条件，根据 [33] 和 [34]实现了城市区域中视距概率随高空平台站仰角变化的模型。值得一提的是， [33] 提出的高空平台视距概率模型基于芝加哥市；考虑到城市规模不相匹配，将该模型用于渥太华高密度城区可能过于严苛。由于 [34], 中没有与郊区对应的视距概率，因此采用 [34] 中的农村地区视距概率作为高空平台在郊区的视距概率。经验证， [34] 中农村地区高空平台的视距概率与 [33]中郊区高空平台的视距概率一致。实验中，高空平台的伪距建模为卫星与接收机之间的几何距离、接收机时钟偏差乘以光速，以及代表各种估计误差总和的伪距误差三者之和。郊区和高密度城区中高空平台的伪距误差模拟为均值为零、标准差分别为2 m和5 m的高斯噪声。由于车辆轨迹涉及

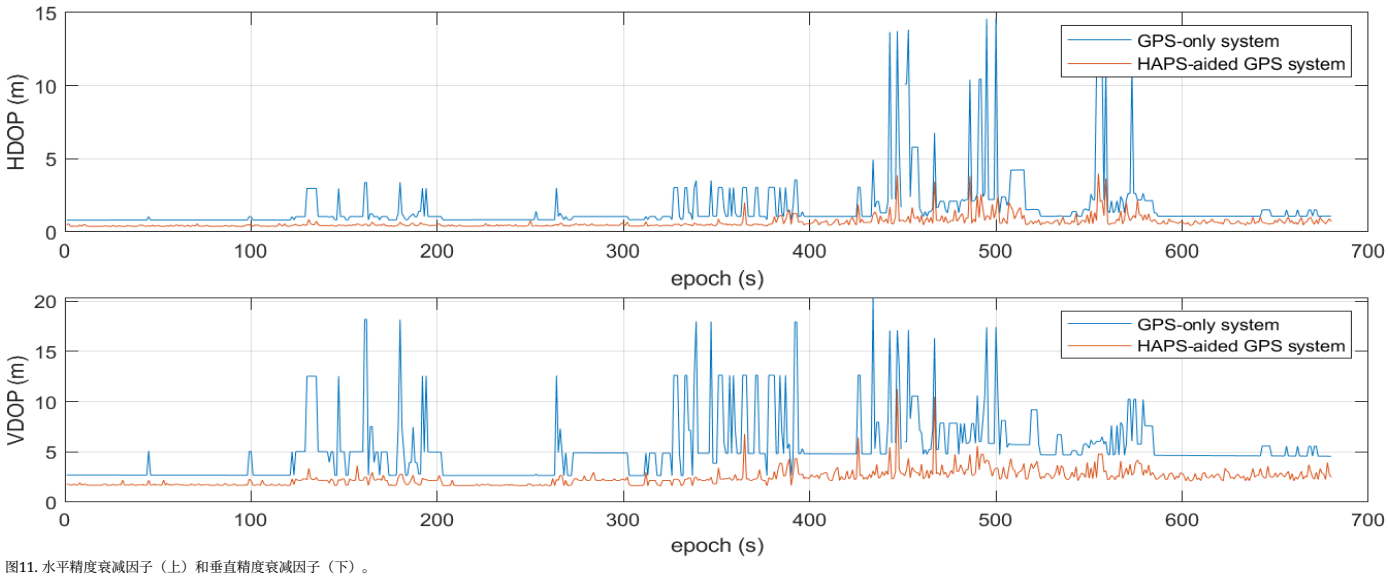


图11. 水平精度衰减因子（上）和垂直精度衰减因子（下）。

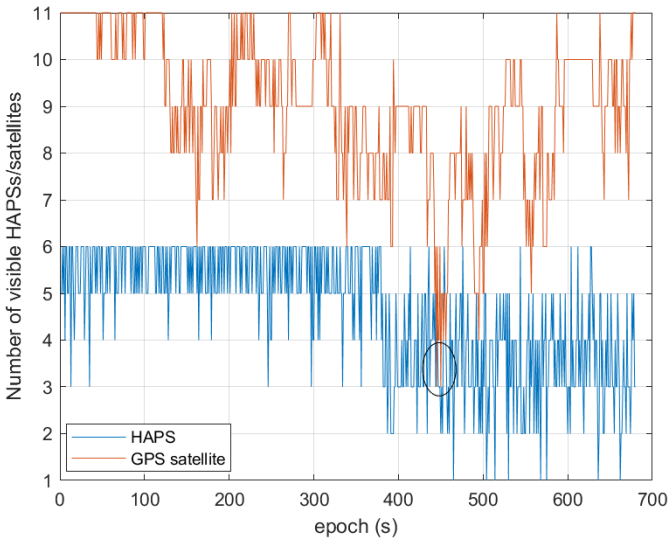


图10. 整个观测期内高空平台的可用性。

郊区和高密度城区，整条路线被划分为两个路段：第一段视为郊区场景，第二段视为高密度城市场景（见图2）。通过使用真实 GPS 数据观察纯GPS系统的定位性能，将郊区的视距概率用于历元小于380 s时的高空平台，将高密度城区的视距概率用于历元大于或等于380 s时的高空平台。由于我们使用的全球导航卫星系统接收机无法提供相对于GPS时间的准确接收机时钟偏差，因此利用 Ublox EVK-M8U 提供的接收机真实位置，以及 Ublox EVK-M8T 提供的精确授时信息（如接收机时钟漂移和接收机时钟偏差）来估计各历元的接收机时钟偏差。需要注意的是，实验中高空平台的伪距建模为接收机时钟偏差的函数，而该偏差是尽最大努力估计得到的。尽管如此，仍应预期存在额外误差

高空平台的伪距中会出现这种偏差，其幅度取决于所有可见卫星信号的质量以及接收机的真实位置。正如预期的那样，郊区的卫星信号质量优于高密度城区，因此我们也应预期，郊区的接收机时钟偏差估计精度高于高密度城区。

B. 实验结果

测距源越多，我们预期高空平台辅助GPS系统的可用性会高于纯GPS系统。图10展示了整个观测过程中高空平台和GPS卫星的可用性。如图所示，整个观测期内，高空平台辅助GPS系统的可用性为100%，而纯GPS系统的可用性为99.71%，这是因为有两个历元（以黑色椭圆圈出）的GPS卫星数量为3。高空平台辅助GPS系统与纯GPS系统之间的可用性差异并不显著，这可能是因为与芝加哥等大都市相比，渥太华是一个规模相对较小的城市。下面我们首先比较高空平台辅助GPS系统与纯GPS系统的水平精度衰减因子和垂直精度衰减因子。接下来，我们分析纯GPS系统和高空平台辅助GPS系统的三维定位性能。为展示接收机自主完整性监测算法带来的改进，我们将启用接收机自主完好性监测的定位系统（同时应用单点定位和接收机自主完整性监测算法）与未启用接收机自主完好性监测的定位系统（仅应用单点定位算法）进行比较。

1）精度衰减分析

图11展示了纯GPS系统和高空平台辅助GPS系统的水平精度衰减因子和垂直精度衰减因子。可以看出，高空平台辅助GPS系统的水平精度衰减因子和垂直精度衰减因子均优于纯GPS系统。特别是，我们注意到，高空平台辅助GPS系统的水平精度衰减因子和垂直精度衰减因子性能曲线上的尖峰较少，这表明

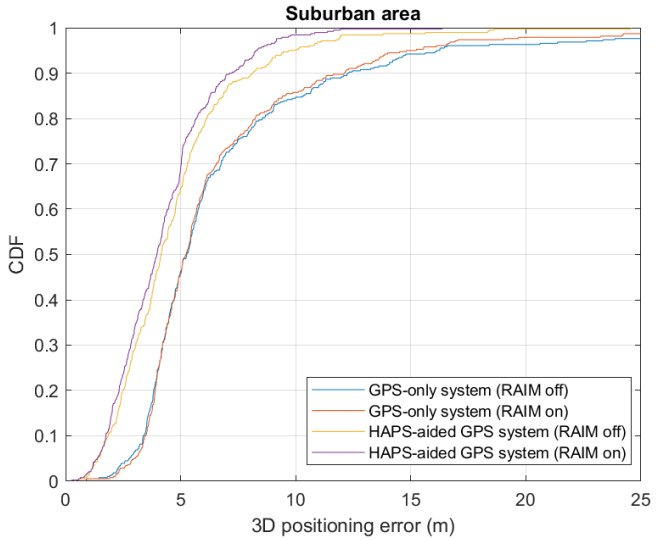


图12. 郊区三维定位精度的累积分布函数。

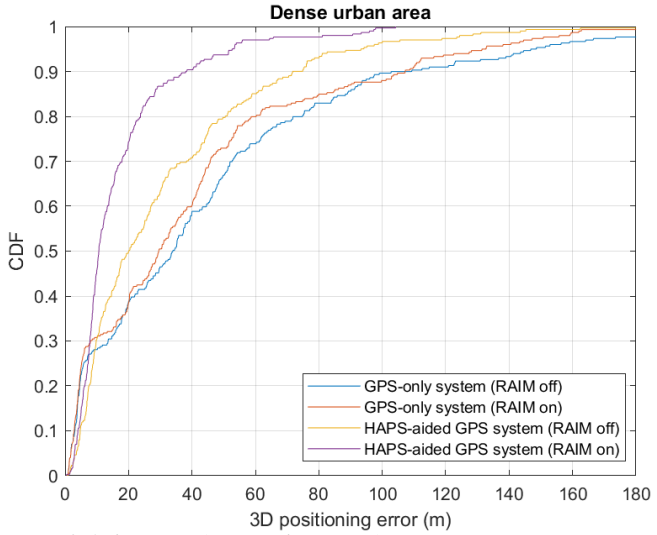


图13. 高密度城区三维定位精度的累积分布函数。

高空平台辅助GPS系统的水平精度衰减因子和垂直精度衰减因子性能比纯GPS系统更加稳定。

2) 三维定位精度分析

郊区和高密度城区的三维定位精度累积分布函数分别如图12和图13所示。如图所示，在未启用接收机自主完好性监测时，在高空平台的辅助下，纯GPS系统在郊区的90百分位三维定位精度可提升36%，在高密度城区可提升33.64%。启用接收机自主完好性监测后，可以看到纯GPS系统和高空平台辅助GPS系统的定位性能都得到了进一步提升。不过，接收机自主完好性监测对郊区纯GPS系统的提升几乎可以忽略不计，而对高空平台辅助GPS系统的提升则更为明显。这是因为郊区的信号质量通常较好，而且高空平台辅助GPS系统由于测距源较多，启用接收机自主完好性监测的概率相对较高。这一观察结果同样适用于高密度城市场景：高空平台辅助GPS系统的90百分位三维定位精度提升了45.2%，远高于纯GPS系统。在多径严重的高密度城市场景中，接收机自主完整性监测算法发挥着更重要的作用，尤其是在高空平台辅助GPS系统中。这是因为高密度城区的可见卫星数量较少，导致纯GPS系统的接收机自主完整性监测算法效果较差。由于所采用的接收机自主完整性监测算法会在归一化伪距残差的绝对值超过临界值时，通过将异常观测值的方差乘以一个指数项来检测并剔除该观测值，因此，我们统计了所考虑的两个系统在郊区场景和高密度城市场景下，归一化伪距残差绝对值超过临界值的次数。为方便起见，我们将归一化伪距残差绝对值超过临界值的次数称为接收机自主完好性监测启用次数。基于本文所考虑的系统模型，我们发现，在郊区，纯GPS系统的接收机自主完好性监测启用次数约为高空平台辅助GPS系统的23.84%；在高密度城区，纯GPS系统的接收机自主完好性监测启用次数约为高空平台辅助GPS系统的50.72%。这表明接收机自主完整性监测算法适用于高空平台辅助GPS系统，尤其是在高密度城区。

V. 结论

与卫星相比，高空平台具有诸多优势，包括但不限于更低的时延、更低的路径损耗和更小的伪距误差；此外，高空平台能够提供连续覆盖，减少用户切换的次数。因此，高空平台是另一类测距源的理想选择。城市区域既是GNSS定位性能严重下降的地方，也是大多数人的居住地，因此，在大都市上空部署多个高空平台作为额外测距源，将有助于提升GNSS定位性能，并最大限度地发挥高空平台额外载荷的效益。根据仿真和物理实验结果，我们发现，高空平台确实能够改善传统GNSS的水平精度衰减因子、垂直精度衰减因子和三维定位精度。基于本文所考虑的系统模型，我们表明，在郊区和高密度城区，纯GPS系统的三维定位精度第90百分位数均可提高约35%。我们验证了接收机自主完整性监测算法在高空平台辅助GPS系统中的适用性，尤其是在高密度城区。为改进高空平台辅助GPS的仿真，应以更高精度估计接收机时钟偏差。我们认为，如果能够获得目标观测量的标准差，接收机自主完整性监测算法的有效性将得到提升。为进一步改善城市区域的定位性能，我们可以利用地面信号，例如蜂窝网络信号和多径信号。这将构成一种垂直

异构网络（V-Het-Net）定位系统。根据本文给出的精度衰减因子示意图，我们认为该系统将带来更低的垂直精度衰减因子。

致谢

Skydel 软件是 Orolia 正式捐赠给卡尔顿大学的。

参考文献

[1] “全球定位系统标准定位服务性能标准”，GPS.GOV，美国华盛顿哥伦比亚特区，2020年4月。访问日期：2022年12月31日。[在线]。可查阅：https://www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf[2] “北斗卫星导航系统开放服务性能标准”，中国卫星导航办公室，中国，2021年5月。访问日期：2022年12月31日。[在线]。可查阅：http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110 0202110 14595952404052 /P .pdf[3] Korolev，“开放服务性能标准（OS PS）”，全球导航卫星系统格洛纳斯，俄罗斯，2020年6月。访问日期：2022年12月31日。[在线]。可查阅：https://www.glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en.pdf[4] “开放服务——服务定义文件”，欧洲全球导航卫星系统（伽利略卫星导航系统），2019年5月。访问日期：2022年12月31日。[在线]。可查阅：https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS- SDD_v1.1.pdf[5] G. K. Kurt 和 H. Yanikomeroglu，“面向下一代空中配送网络的通信、计算、缓存与感知：以高空平台站作为赋能技术”，IEEE Veh. Technol. Mag.，第16卷，第3期，第108-117页，2021年9月。[6] X. Li 等人，“利用现有多星座全球导航卫星系统实现精密定位：全球定位系统、格洛纳斯、伽利略卫星导航系统和北斗卫星导航系统”，Sci. Rep. 5，第8328号，2015年2月。[7] B. Li 等人，“用于实时精密定位服务的低地球轨道增强型全球导航卫星系统（LeGNSS）”，《空间研究进展》，第63卷，第1期，第73-93页，ISSN 0273-1177，2019年。[8] J. Khalife、M. Neinavaie 和 Z. M. Kassas，“利用巨型星座低地球轨道卫星的差分载波相位测量进行导航”，IEEE/ION Position, Locat. Navig. Symp. (PLANS)，美国俄勒冈州波特兰，2020年，第1393-1404页。[9] Q. Ren、O. Abbasi、G. K. Kurt、H. Yanikomeroglu 和 J. Chen，“高空平台站（HAPS）辅助智能交通系统中的缓存与计算卸载”，IEEE Trans. Wirel. Commun.，第21卷，第11期，第9010-9024页，2022年11月。[10] C. Ding、J. Wang、H. Zhang、M. Lin 和 G. Y. Li，“卫星和高空平台辅助边缘计算中的传输与计算资源联合优化”，IEEE Trans. Wirel. Commun.，第21卷，第2期，第1362-1377页，2022年2月。[11] M. S. Alam、G. K. Kurt、H. Yanikomeroglu、P. Zhu 和 N. D. Dao，“基于高空平台站的超宏基站星座”，IEEE Commun. Mag.，第59卷，第1期，第103-109页，2021年1月。[12] J. V. Sickle 和 J. A. Dutton，“卫星时钟”，宾夕法尼亚州立大学。访问日期：2022年12月31日。 [在线]。可查阅：https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1714。[13] 国际电信联盟无线电通信部门，“在47.2-47.5 GHz和47.9-48.2 GHz频段运行的、使用高空平台的固定业务系统的首选特性。”国际电信联盟，日内瓦，F.1500号建议书，2000年1月。[14] F. Dovis、L. Lo Presti 和 P. Mulassano，“基于高空平台的导航卫星系统支撑基础设施”，IEEE Wirel. Commun.，第12卷，第5期，第106-121页，2005年10月。[15] O. Kim 等人，“多用途任务期间，搭载伪卫星的高空长航时无人机在城市区域提供导航增强”，Int. J. Aeronaut. Space Sci. (IJASS)，第18卷，第3期，第545-554页，2017年9月。[16] G. Boiero、F. Dovis、P. Mulassano 和 M. Mondin，“利用平流层平台扩大局域面积差分全球定位系统的空间范围”，J. Navig.，第54卷，第2期，第255-267页，2001年5月。

[17] F. Dovis、P. Mulassano 和 M. Dumville，“平流层伪卫星概念：伽利略卫星导航系统平流层伪卫星的设计”，载于 ION GPS 2002 会议论文集，美国俄勒冈州波特兰，2002年。[18] T. Tsujii、M. Harigae 和 K. Okano，“基于安装在高空平台系统（HAPS）上的伪卫星的新型定位/导航系统”，载于第24届国际航空科学大会（ICAS）论文集，日本横滨，2004年。[19] A. Angrisano 和 S. Gaglione，“采用 RAIM 的城市环境智能手机 GNSS 性能”，Sens.，第22卷，第3期，2022年1月。[20] Y. Yang 和 J. Xu，“基于稳健估计的 GNSS 接收机自主完好性监测（RAIM）算法”，Geod. Geodyn.，第7卷，第2期，第117-123页，2016年3月。[21] H. Zheng、M. Atia 和 H. Yanikomeroglu，“高空平台站（HAPS）辅助的城市区域 GNSS”，载于第10届 IEEE 无线、空间与极端环境国际年会（WISEE）论文集，加拿大马尼托巴省温尼伯，2022[22] S. Bijjahalli、R. Sabatini 和 A. Gardi，“城市空中交通的 GNSS 性能建模与增强”，Sens.，第19卷，第19期，2019年9月。[23] J. Jang、D. Park、S. Sung 和 Y. J. Lee，“双全球卫星导航系统理想布设环境下的水平精度衰减因子和垂直精度衰减因子分析”，Sens.，第22卷，第9期，2022年5月。[24] N. Tongkasem、S. Sopan、J. Budtho 和 N. Wongthodsarat，“使用单点法计算用户位置”，CSSRG实验室，拉卡邦先皇技术学院，泰国曼谷，2019年2月。访问日期：2022年12月31日。 [在线]。网址：https://github.com/cssrg-kmitl/single-positioning-MATLAB[25] A. Tian、D. Dong、D. Ning 和 C. Fu，“基于最小二乘法的 GPS 单点定位算法”，载于第6届计算智能设计国际研讨会（ISCID）论文集，中国杭州，2013年，第16-19页。[26] A. Krishnamoorthy 和 D. Menon，“使用乔列斯基分解进行矩阵求逆”，载于信号处理：算法、架构、安排与应用（SPA）会议论文集，波兰波兹南，2013年，第70-72页。[27] “Skydel全球卫星导航系统仿真软件”，Orolia，网址：https://www.orolia.com/product/skydel-simulation-engine/。[28] B. Bidikar、G. S. Rao 和 L. Ganesh，“用于全球定位系统应用的萨格纳克效应与 SET 误差伪距建模”，Procedia Comput. Sci.，第87卷，第172-177页，2016年。[29] T. Soler 和 M. Chin，“局部笛卡尔坐标系之间协方差矩阵转换及交换图的研究”，载于第45届 ASP-ACSM年会议论文集，1985年1月。[30] H. Kuusniemi、A. Wieser、G. Lachapelle 和 J. Takala，“城市个人卫星导航的用户级可靠性监测”，IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.，第43卷，第4期，第1305-1318页，2007年10月。[31] A. G. Quinchia、G. Falco、E. Falletti、F. Dovis 和 C. Ferrer，“应用于 GPS/INS 集成系统的微机电系统同误差建模方法比较”，Sens.，第13卷，第8期，第9549-9588页，2013年7月。[32] O. G. Crespillo、M. Joerger 和 S. Langel，“具有不确定 GNSS 高斯-马尔可夫误差参的 GNSS/INS 集成超界定”，IEEE/ION 定位与导航研讨会（PLANS），俄勒冈州波特2020年，第481-489页。[33] F. Hsieh 和 M. Rybakowski，“基于射线追踪仿真的高平台系统传播模型”，载于第13届欧洲天线与传播会议（EuCAP）论文集，波兰克拉科夫，2019年，第1-5页。[34] S. Alfattani、W. Jaafar、Y. Hmamouche、H. Yanikomeroglu 和 A. Yongacoglu，“空中平台可重构智能表面的链路预算分析”，IEEE Open J. Commun. Soc.，第2卷，1995，2021 1980pp. - 。[35] “EVK-M8T用户南”，Ublox，2018年5月。访问日期：2022年12月31日。[在线]。网址：https://content.u- blox.com/sites/default/files/products/documents/EVK- M8T_用户指南_%28UBX-14041540%29.pdf



Hongzhao Zheng（IEEE会员）于2019年在加拿大安大略省渥太华的卡尔顿大学获得工程物理荣誉工学学士学位。他目前是卡尔顿大学的一名博士生。他的研究兴趣是利用传感器赋能的异构无线基础设施进行城市定位。



Mohamed Atia（IEEE高级会员）于2000年和2006年分别获得埃及开罗艾因夏姆斯大学计算机系统理学学士学位和理学硕士学位，并于2013年获得加拿大安大略省金斯顿女王大学电气与计算机工程博士学位。目前，他是一名卡尔顿大学系统与计算机工程系副教授。他还是卡尔顿大学嵌入式与多传感系统实验室（EMSLab）的创始人兼主任。他的研究兴趣包括传感器融合、导航系统、人工智能和机器人学。



Halim Yanikomeroglu （IEEE会士）于1990年获得土耳其安卡拉中东技术大学电气与电子工程理学学士学位，并于1992年和1998年分别获得加拿大多伦多大学电气工程（现为电气与计算机工程）应用科学硕士学位和电气与计算机工程博士学位。自1998年以来，他一直曾在 卡尔顿大学系统与计算机工程系加拿大渥太华卡尔顿大学，现任正教授。他的研究兴趣涵盖无线通信与网络的诸多方面。过去五年中，他曾举办过110+ 特邀研讨会、主旨演讲、专题讨论和教程。Yanikomeroglu博士与业界合作开展的研究获得了39项专利授权。Yanikomeroglu博士是IEEE、加拿大工程院（EIC）和加拿大工程院（CAE）会士。他是IEEE通信学会和IEEE车辆技术学会的杰出演讲人，也是加拿大科学院理事会（CCA|CAC）的专家组成员。

Yanikomeroglu博士目前担任IEEE旗舰无线通信盛会——无线通信与网络会议（WCNC）指导委员会主席。他还是IEEE通信学会GIMS、IEEE通信学会会议理事会和IEEE PIMRC指导委员会的成员。他曾担任多场IEEE会议的大会主席和技术程序委员会主席。他还曾在多种IEEE期刊的编委会任职。

Yanikomeroglu博士因其研究、教学和服务获得了多项奖项，包括IEEE通信学会弗雷德·W·埃勒西克奖（2021年）、IEEE车辆技术学会斯图尔特·迈耶纪念奖（2020年）以及IEEE通信学会无线通信技术委员会表彰奖（2018年）。他还获得了最佳论文奖包括2022年IEEE 面向 B5G 和 6G 的非地面网络竞赛（大奖）、IEEE ICC 2021、IEEE WISEE 2021和2022年的奖项。