高空平台站（HAPS）辅助城市区域全球导航卫星系统

Hongzhao Zheng、Mohamed Atia、Halim Yanikomeroglu 卡尔顿大学
系统与计算机工程系，加拿大渥太华 hongzhaozheng@cmail.carleton.ca

摘要—目前，所有现有全球导航卫星系统（GNSS）的全球平均民用定位精度仍处于米级，而在北极地区和城市区域等地，民用定位性能甚至更差。本文通过仿真和实物实验，研究了高空平台站（HAPS）辅助GPS系统在城市区域的定位性能。HAPS可以通过多种方式为全球导航卫星系统提供支持，本文将HAPS视为一个额外的测距信号源。从仿真和实验结果中可以看出，HAPS能够改善水平精度因子（HDOP）和三维定位精度。HAPS辅助GPS系统的仿真定位性能取决于接收机钟差的估计精度。本文还介绍了未来的研究工作，以及HAPS伪距建模面临的挑战。

关键词—高空平台站（***HAPS***）、全球导航卫星系统（***GNSS***）、伪距、水平精度因子（***HDOP***）

I. 引言

全球导航卫星系统（GNSS）已经发展了数十年。自1978年首颗早期全球导航卫星系统卫星发射以来，美国拥有的全球定位系统（GPS）所带来的卫星定位精度，得益于相关科学领域持续不断的研究，已有所提升。根据应用场景的不同，通过差分全球定位系统（DGPS）、实时动态定位（RTK）、多星座全球导航卫星系统等技术，可以达到厘米级精度。例如，研究表明，多星座全球导航卫星系统（北斗 + 伽利略 + 格洛纳斯 + 全球定位系统）不仅能够缩短收敛时间，还能在截止高度角为40°时，通过精密定位算法 [1]实现厘米级定位精度。尽管人们已开发出许多实现厘米级定位精度的技术，但其中许多并不适用于智能手机、智能手表、自行车等民用应用。大多数民用应用使用单频低成本接收机进行导航和定位，因此无法实现精密定位，原因之一是电离层延迟未能被完全消除，而电离层延迟是伪距测量中最大的误差来源之一。出于类似原因，民用应用中最常用的算法是单点定位算法，该算法在定位时只需要单一频率。然而，采用单点定位算法得到的全球平均定位精度仍处于米级。例如，全球定位系统的95%全球平均水平误差小于或等于8米，95%全球平均垂直误差小于或等于13米 [2]；北斗卫星导航系统（BDS）的95%全球平均水平误差小于或等于9米，95%全球平均垂直误差小于或等于10米 [3]；格洛纳斯的95%全球平均水平误差小于或等于5米，95%全球平均垂直误差小于或等于9米 [4]；95%伽利略的全球平均定位误差小于或等于7米 [5]。全球导航卫星系统在城市区域的定位性能甚至更差。

如今，许多低地球轨道（LEO）卫星已被发射到太空，人们也开始关注利用低地球轨道卫星辅助定位服务。例如，Li 等人证明，低地球轨道卫星增强全球导航卫星系统可在实时精密单点定位（PPP）应用中实现厘米级的空间信号测距误差（SISRE）[6]。此外，研究人员也在探索当全球导航卫星系统信号不可用时，仅依靠低地球轨道卫星信号进行导航的性能。Khalife 等人表明，使用载波相位差分算法，仅借助两颗 Orbcomm 低地球轨道卫星，即可使无人机（UAV）的位置均方根误差（RMSE）达到 14.8 米 [7]。与传统全球导航卫星系统通常使用的中地球轨道（MEO）卫星相比，低地球轨道卫星的优势包括但不限于：由于与地面用户的距离更短，传播时延更短、路径损耗更低；由于同时可见或可用于定位的卫星数量庞大，覆盖范围更广、可用性更高。为进一步提升复杂区域的高带宽网络覆盖能力，可以引入高空平台站（HAPS）。高空平台站位于平流层，典型高度约为 20 千米。由于城市区域是全球导航卫星系统定位性能下降最严重的区域，我们可以在大都市上空部署高空平台站，并为其配备卫星级原子钟，将其用作另一种测距信号源。高空平台站距地面仅 20 千米，其信号的路径损耗预计远低于任何卫星信号，因此接收到的高空平台站信号功率强于卫星信号，这可能会降低高空平台站信号多径抑制中的估计误差。高空平台站近乎静止，不会绕地球运行，因此可减少定位过程中的切换次数。此外，高空平台站信号从电离层下方发射，不受电离层效应影响。因此，与卫星伪距相比，高空平台站伪距的估计误差可能更小。与包含卫星位置误差的卫星伪距类似，我们也应考虑高空平台站伪距测量中的位置误差。值得庆幸的是，已有研究正在探索高空平台站定位，并表明其定位误差可与卫星轨道误差相当，甚至更低。例如，研究表明，采用改进的实时动态定位（RTK）方法，高空平台站的定位精度可达到 0.5 米（圆概率误差 [CEP] 68 百分比）[8]。事实上，已有少量文献探讨了高空平台站辅助全球导航卫星系统定位性能 [9]-[12]，，但都未考虑利用高空平台站专门提升城市区域的全球导航卫星系统定位性能。在本研究中，我们通过仿真和实物实验考察城市区域的高空平台站辅助全球导航卫星系统定位性能。为简化起见，全球导航卫星系统信号仅

涉及 GPS 粗捕获码 L1 信号，并使用单点定位算法计算位置解。

II. 系统模型

通用系统模型如图1所示。高空平台站位于地面上方20 km处的平流层中，平流层位于电离层下方。图1中展示了四颗卫星，这只是为了提醒读者，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。实际上，计算位置解时只会使用部分可见卫星；但为简化起见，本文在计算位置解时使用所有可用卫星。卫星和高空平台站的仰角截止值均设为15度。卫星的伪距方程如下：

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

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 时间的钟差，dT_{SAT} 表示卫星相对于 GPS 时间的钟差，$d_{ion,\ SAT}$ 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，$\epsilon_{mp,\ SAT}$ 表示卫星信号因多径造成的延迟，ϵ_p 表示接收机噪声造成的延迟。高空平台站的伪距方程为：

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

其中，p_{HAPS} 表示高空平台伪距测量值，ρ_{HAPS} 表示高空平台站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} 表示高空平台站相对于 GPS 时间的钟差，$d_{trop,\ HAPS}$ 表示高空平台信号的对流层延迟，$\epsilon_{mp,\ HAPS}$ 表示高空平台信号因多径造成的延迟。为简化起见，本文假设卫星轨道误差、高空平台位置误差和 HAPS 钟差均为零。模拟车辆轨迹始于郊区的卡尔顿大学，止于密集城区渥太华的里多街（见图2）。模拟中共有四个高空平台站，其中一个沿渥太华市中心上空的圆形轨迹运行，另外三个则分别沿渥太华附近三个居民区上空的类似圆形轨迹运行。注意，由于风等因素，高空平台站并非完全静止，而是可以在有限空间内移动。图3展示了单点定位算法的流程图。由于本文假设 HAPS 钟差为零，因此我们只用 dT 表示卫星钟差。通过 GNSS接收机采集的数据，我们可以获得接收机独立交换（RINEX）格式的观测文件和 RINEX导航文件，其中包含卫星信息，例如伪距、电离层参数、$\boldsymbol{\alpha}$、开普勒参数等。利用这些信息，我们可以确定伪随机噪声（$\boldsymbol{PRN}$）码（表示每颗卫星的唯一编号）以及年积日（DOY）（表示测量时所在的年积日）。注意，$\boldsymbol{PRN}$ 以粗体表示一个向量

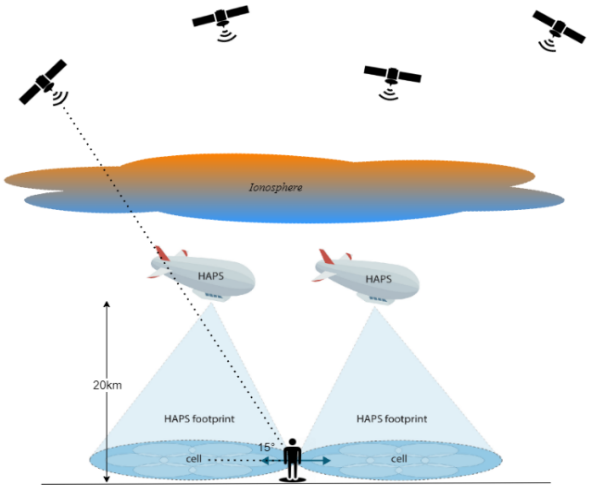


图1：HAPS辅助GPS系统的系统模型。

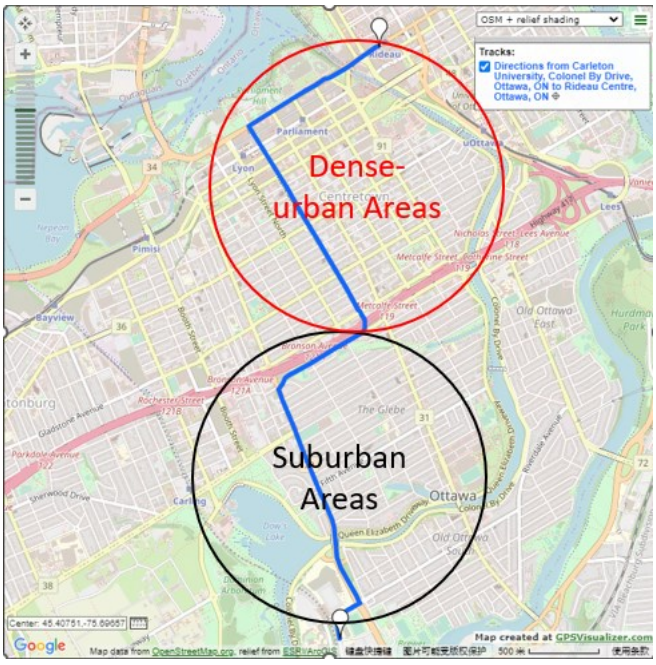


图2：车辆轨迹。

其中包含当前历元和当前估计迭代中所有可见卫星的伪随机噪声码。我们可以使用导航文件中包含的开普勒参数计算卫星位置，$\boldsymbol{P_{SAT}}$, 以及卫星钟差，$\boldsymbol{dT}$，。$\boldsymbol{P_{HAPS}}$ 表示一个包含所有高空平台站位置的向量，这些位置由 Skydel GNSS仿真器 [13], 生成；$\boldsymbol{p_{HAPS}}$ 表示一个包含高空平台站伪距的向量，相关内容将在第 III 节说明。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，并将接收机钟差初始化为零。估计变化量 $\boldsymbol{dx}$ 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，因为要进行精确的三维定位，至少需要四个测距源。由于接收机位置是通过迭代估计的，因此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站的仰角。由于对流层延迟和电离层延迟均为接收机位置的函数，因此这两种大气延迟也通过迭代估计。

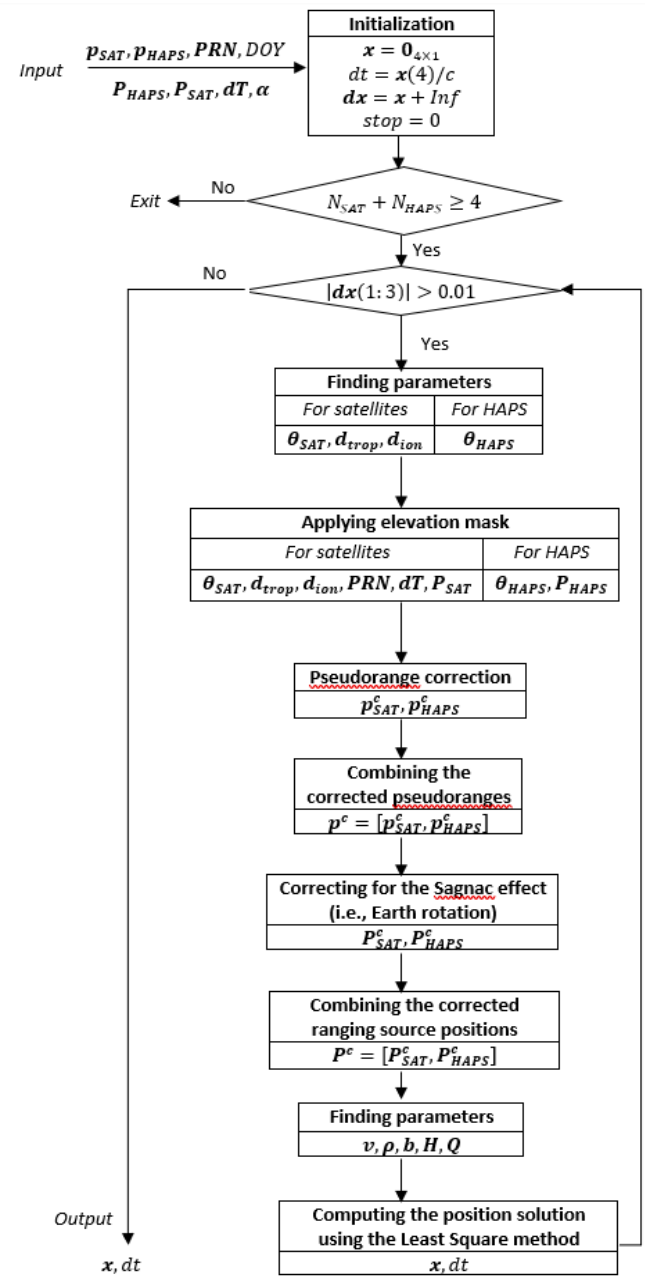


图 3：单点定位算法流程图。

仰角、卫星伪距、高空平台站伪距、卫星位置、卫星钟差、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，都会根据重新计算的卫星和高空平台站仰角进行迭代更新。为准备最小二乘法所需的参数，需要按如下方式计算校正伪距：

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

其中，$\boldsymbol{p^c_{SAT}}$ 表示卫星的校正伪距，$\boldsymbol{p_{SAT}}$ 表示卫星的未校正伪距。由于HAPS的伪距误差被建模为表示估计残差的高斯噪声，因此HAPS伪距无需校正。由于地球自转，卫星和HAPS在信号发射时刻的位置与信号接收时刻的位置不同，这被称为萨格纳克效应[14]。

卫星/HAPS的坐标可通过[14]从信号发射时刻转换到信号接收时刻

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

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

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，$P_{i,\ rx}$ 表示信号接收时刻的 i^{th} 卫星/高空平台站坐标，$P_{i,\ tx}$ 表示信号发射时刻的 i^{th} 卫星/高空平台站坐标，ω_E 表示地球自转角速度，而$M_{ROT}(\omega_E \times \Delta t_{ROT})$称为旋转矩阵，其定义如下：

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

随后计算视线向量$\boldsymbol{v}$以及测距源与接收机之间的几何距离 $\boldsymbol{\rho}$，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，$\boldsymbol{p^c}$ 为校正后的卫星伪距与校正后的高空平台站伪距之和。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，**Q** 称为协方差矩阵，$\boldsymbol{dx}(4)$表示向量$\boldsymbol{dx}$中的第四个元素。协方差矩阵$\boldsymbol{Q}$定义如下：

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

其中，σ_x、σ_y、σ_z 和 σ_t 分别表示接收机在地心地固（ECEF）坐标系中的坐标 x、y、z 以及接收机钟差的标准差。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。本文将此阈值设为 0.01 m。我们采用水平精度因子（HDOP）和三维定位精度作为指标，评估所提出的 HAPS辅助GPS系统的定位性能。为计算 HDOP，必须将协方差矩阵转换到局部北-东-地（NED）坐标系，可通过以下公式完成 [15]:

$$\boldsymbol{Q_{NED}} = \boldsymbol{R'\tilde{Q}R} \tag{13}$$

其中 $\tilde{\boldsymbol{Q}}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 定义为

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

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

其中 λ 和 φ 分别表示接收机的经度和纬度。则水平精度因子可表示为

$$HDOP = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2} \quad (16)$$

其中，σ_n、σ_e和σ_d 分别表示接收机在局部北向、东向和下向的接收机位置误差。

III. HAPS辅助GPS系统仿真

A. 仿真设置

系统模型采用Skydel GNSS仿真软件的默认地球定向参数建立 [13]，该软件将所有绕地球运行并发射L1 C/A码的GPS卫星纳入考虑。选择Saastamoinen模型来模拟对流层效应，并选择Klobuchar模型来模拟电离层效应，同时采用软件默认的Klobuchar参数（即alpha和beta）。从仿真开始后的每个时间戳，Skydel的输出包括卫星在信号发射时刻的ECEF坐标、电离层校正、对流层校正、卫星钟差、接收机的ECEF坐标、信号发射时刻等。仿真中的接收机钟差默认值为零。仿真中未单独考虑卫星伪距方程中的校正项，包括卫星轨道误差、多径和接收机噪声，而是引入伪距误差来反映这些效应的存在。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秒，标准差为6米。一阶高斯-马尔可夫过程的连续模型由[16]描述。

$$\dot{x} = -\frac{1}{T_c}x + w \quad (17)$$

其中，x 表示一个均值为零、相关时间为T_c且噪声为w的随机过程。一阶高斯-马尔可夫过程的自相关由[17]描述

$$R(\Delta t) = \sigma^2 e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau}} \quad (18)$$

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。HAPS伪距通过在HAPS与接收机之间的几何距离上加入高斯噪声进行模拟，其中高斯噪声代表各类估计残差之和，包括HAPS位置、HAPS钟差、对流层延迟、多径和接收机噪声。HAPS伪距误差采用高斯噪声建模，其标准差分别设为2米和5米，对应郊区场景和高密度城市场景。郊区场景和高密度城市场景下的卫星伪距误差特性设为相同。需要注意的是，这样设置后，GPS-only系统在郊区场景和高密度城市场景下的定位性能保持不变。在这两种场景下，均将HAPS伪距误差的标准差限定为小于卫星伪距误差的标准差。所有可用卫星（即仰角大于预设仰角截止值的卫星）均同时用于定位，并假定仰角高于截止值的所有卫星都与接收机保持视线（LOS）。在此设置下，我们考察仅GPS系统、单HAPS与GPS系统、四HAPS与GPS系统以及仅四HAPS系统的三维定位性能。对于单HAPS与GPS系统，我们使用位于渥太华市中心上空、仰角高于80°的HAPS。

B. 仿真结果

图4和图5分别展示了不同系统在高空平台站伪距误差标准差为2 m和5 m时三维定位精度的累积分布函数。从图4可以看出，由于高空平台站的伪距误差小得多，四HAPS与GPS系统的定位性能最佳，单HAPS与GPS系统的定位性能与仅GPS系统几乎相同，而仅四HAPS系统的性能略逊于四HAPS与GPS系统。仅四HAPS系统未能取得最佳定位性能，可能有以下原因：1）在接收机位置计算中，测距信号源少得多；2）测距源几何构型较差，因为任意时刻四个高空平台站的仰角均超过40°，其中一个甚至超过80°。从图5可以看出，当高空平台站的伪距误差与卫星伪距误差相近但略小时，仅四HAPS系统的定位性能最差，而四HAPS与GPS

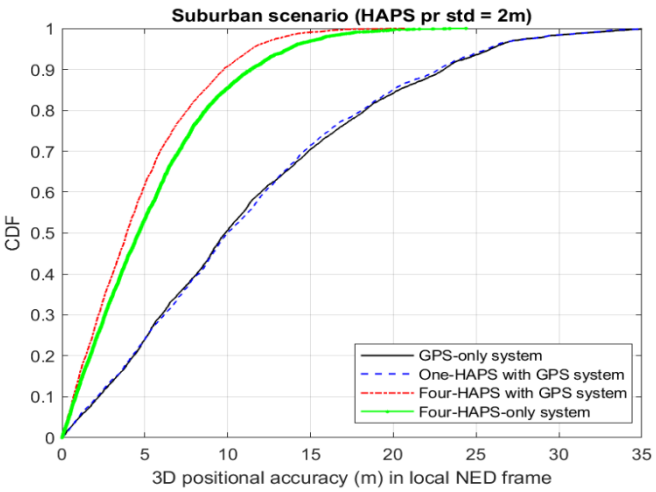


图4：郊区场景下三维定位精度的累积分布函数。

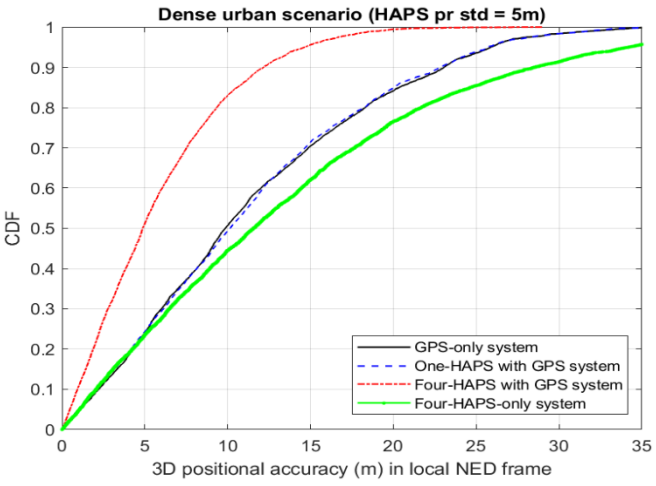


图5：高密度城市场景下三维定位精度的累积分布函数。

系统仍然优于所考虑的其他系统。

IV. 实地实验

A. 实验设置

为验证并支持仿真结果，我们还处理了沿车辆轨迹采集的原始GNSS数据。该轨迹与图2所示轨迹相似，但由于采集数据当天部分道路封闭，略有不同。原始GNSS数据由Ublox EVK-M8T GNSS 接收机采集，并使用 Napat Tongkasem [18] 开发的单点定位软件包进行处理，同时做了适当修改，以便在单点定位算法中纳入高空平台站。表I列出了EVK-M8T GNSS 接收机的规格。为反映高空平台站的实际视距条件，我们根据 [19] 和 [20] 实现了城市区域中高空平台站视距概率与仰角之间的关系。需要注意的是，[19] 提供的高空平台站视距概率是基于芝加哥生成的；考虑到城市规模并不相当，将该视距概率用于渥太华的密集城区可能过于严苛。实验中，高空平台站的伪距建模为卫星与接收机之间的几何距离、接收机钟差乘以光速，以及代表各类估计残差总和的伪距误差三者之和。郊区和密集城区中高空平台站的伪距误差分别模拟为标准差为2米和5米的高斯噪声。由于车辆轨迹途经郊区和密集城区，整个路线被划分为两部分：第一部分视为郊区场景，第二部分视为高密度城市场景（见图2）。通过观察使用真实GPS 数据的仅GPS系统的定位性能，将郊区的视距概率应用于历元小于380秒的高空平台站，而将密集城区的视距概率应用于历元大于或等于380秒的高空平台站（参见图6）。由于GNSS接收机无法提供相对于GPS 时间的精确接收机钟差，因此利用接收机真实位置估计各历元的接收机钟差。真实值数据由Ublox EVK-M8U GNSS 接收机提供，该接收机配备了加速度计和陀螺仪，因此能够进行传感器融合，以在信号质量下降时获得更好的定位性能并进行航位推算。

表 I . EVK-M8T GNSS 接收机规格 [2 1]

参数	规格
串行接口	1 个 USB V2.0
	1 RS232 ，最大波特率 921 ，6 千波特 DB9 +/- 12 V 电压电平 14 引脚 – 3.3 V 逻辑电平
	1 显示数据通道（兼容集成电路总线），最大 400 kHz
	1 SPI时钟信号，最大 5,5 MHz – SPI数据 最大 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，或通过额外电源进行外部供电 电源引脚 14（V5_IN），13（GND）
正常工作温度	−40°C 至 +65°C

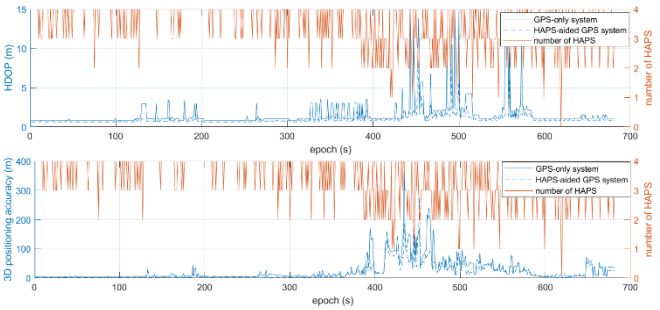


图6：水平精度因子（上）和三维定位精度（下）。

B. 实验结果

图6显示了水平精度因子（HDOP）、三维定位精度以及每个历元可见的高空平台站数量。由图6可见，在郊区和密集城区，高空平台站辅助GPS系统的水平精度因子和三维定位精度均优于仅GPS系统。此外，由于高空平台站辅助GPS系统出现的尖峰较少，其定位性能比仅GPS系统更加稳定。需要注意的是，实验中高空平台站的伪距被建模为接收机钟差的函数，而接收机钟差是尽可能准确地估计得到的；高空平台站伪距中仍可能存在额外误差，其大小取决于所有可见卫星信号的质量以及接收机真实位置。正如预期的那样，郊区的卫星信号质量优于密集城区，因此郊区的接收机钟差也预期会

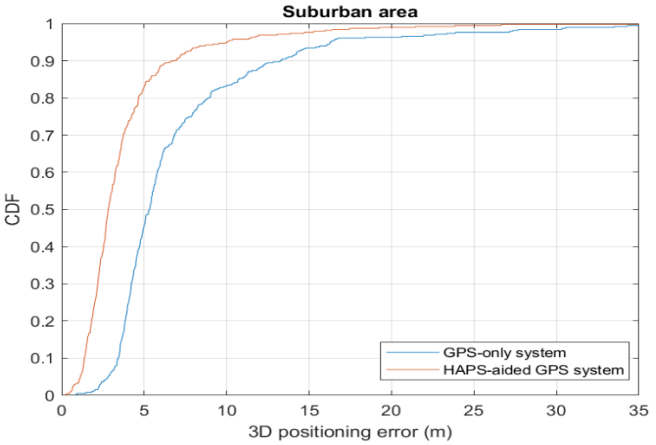


图7：郊区三维定位精度的累积分布函数。

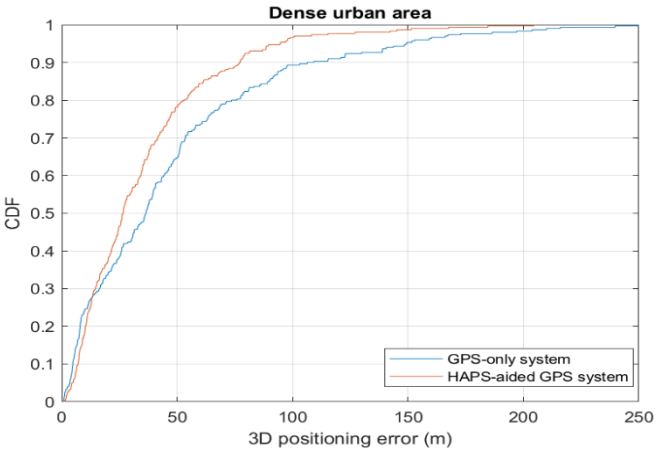


图8：密集城区三维定位精度的累积分布函数。

比密集城区估计得更准确，因此郊区的高空平台站辅助GPS系统具有更好的水平精度因子。郊区和密集城区的三维定位精度累积分布函数分别如图7和图8所示。由图7和图8可见，高空平台站辅助GPS系统优于仅GPS系统，尤其是在郊区。

V. 结论

随着第五代移动通信技术逐步发展，并即将迈入第六代移动通信技术及更高阶段，高空平台站可谓一座无形宝藏，可用于计算卸载[22], 边缘计算[23], 乃至基站[24]，以满足人类需求。高空平台站还可作为一种新型测距信号源，其位置近乎固定，且距离地球地面更近。与卫星相比，高空平台站具有时延更低、路径损耗更小、伪距误差更低等优势，还能提供连续覆盖，减少特定区域内用户的切换次数。城市区域是全球导航卫星系统定位性能严重下降的区域，也是大多数人居住的地方。在大都市上空部署多个高空平台站作为另一种测距信号源，将有助于提升全球导航卫星系统的定位性能，并最大限度地发挥高空平台站额外载荷的价值。高空平台站辅助全球导航卫星系统也可部署在北极地区等极端环境区域，这些地区卫星可用性较低，且电离层扰动严重[25]。从仿真和实物实验结果来看，高空平台站确实能够提高三维定位精度，尤其是在郊区。为改善高空平台站辅助GPS系统在密集城区的表现，应更准确地估计接收机钟差。在未来的工作中，将综合考虑高空平台站和卫星的接收信号功率，并采用卫星选择算法，更好地模拟现代全球导航卫星系统接收机处理原始GNSS数据的方式。

致谢

本论文部分得到华为加拿大的支持。Skydel 软件由 Orolia 正式捐赠。

参考文献

[1] X. Li 等人，“利用当前多星座全球导航卫星系统实现精确定位：全球定位系统、格洛纳斯、伽利略和北斗”，《科学报告》第5卷，8328（2015年）。[2] “全球定位系统标准定位服务性能标准”，GPS.GOV，美国，2020年4月。访问日期：2022年7月9日。[在线]。网址：https://www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf[3] “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7月9日。[在线]。网址：http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110 02021 1014595952404052 /P .pdf[4] 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7月9日。[在线]。网址：https://www.glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en.pdf[5] “开放服务——服务定义文件”，欧洲全球导航卫星系统（伽利略），2019年5月。访问日期：2022年7月9日。[在线]。网址：https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS- SDD_v1.1.pdf[6] B. Li 等人，“用于实时精确定位服务的低地球轨道增强全球导航卫星系统（LeGNSS）”，《空间研究进展》，第63卷，第1期，第73–93页，ISSN 0273-1177，2019年。

[7] 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定位、位置与导航研讨会（PLANS），第1393–1404页，2020年。[8] F. Dovis、L. Lo Presti 和 P. Mulassano，“基于高空平台的卫星导航系统支撑基础设施”，IEEE《无线通信》，第12卷，第5期，第106–121页，2005年10月。[9] O. Kim 等人，“多用途任务期间利用搭载伪卫星的高空长航时无人机增强城市区域导航”，《国际航空航天科学杂志》，18(3)：545–554，2017年9月。[10] G. Boiero、F. Dovis、P. Mulassano 和 M. Mondin，“利用平流层平台扩大局域增强差分全球定位系统的空间覆盖范围”，《导航杂志》，第54卷，第2期，第255–267页，2001年5月。[11] F. Dovis、P. Mulassano 和 M. Dumville，“平流层伪卫星概念：伽利略平流层伪卫星的设计”，ION GPS 2002论集，美国俄勒冈州波特兰，2002年。[12] T. Tsujii、M. Harigae 和 K. Okano，“一种基于安装于高空平台系统（HAPS）上的伪卫星的新型定位／导航系统”，第24届国际航空科学大会论文集，日本横滨，2004年。[13] “Skydel GNSS仿真软件”，Orolia，网址：https://www.orolia.com/product/skydel-simulation-engine/。[14] B. Bidikar、G. S. Rao 和 L. Ganesh，“基于萨格纳克效应和SET误差的GPS应伪距建模”，《计算机科学 Procedia》，第87卷，第172–177页，2016年。[15] T Soler 和 M. Chin，“局部笛卡尔坐标系间协方差矩阵的变换及交换图”，第45届ASP-ACSM年会论文集，1985年1月。[16] A. G. Quinchia、G. Falco、E. Falletti F. Dovis 和 C. Ferrer，“应用于GPS/INS集成系统的不同微机电系统误差建模方法较”，《传感器》，第13卷，第8期，第9549–9588页，2013年7月。[17] O. G. Crespillo、M. Joerger 和 S. Langel，“GNSS高斯－马尔可夫误差参数不确定时GNSS/INS集成的界限扩展”，IEEE/ION定位、位置与导航研讨会（PLANS），美国俄勒冈州波特兰，第481–489页，2020年4月。[18] N. Tongkasem、S. Sopan、J. Budtho 和 N. Wongthodsarat，“使用单点法计算用户位置”，CSSRG实验室，蒙国王先皇技术学院叻甲挽校区，泰国曼谷，2019年2月。访问日期：2022年7月9日[在线]。网址：https://github.com/cssrg-kmitl/single-positioning-MATLAB[19] F. Hsieh 和 M. Rybakowski，“基于射线追踪仿真的高空平台系统传播模型”，第13届欧洲天线与传播会议（EuCAP）论文集，第1–5页，2019年。[20] S. Alfattani、W. Jaafar、Y. Hmamouche、H. Yanikomeroglu 和 A. Yongacoglu “空中平台中可重构智能表面的链路预算分析”，IEEE《通信学会开放期刊》，第2第1980–1995页，2021年。[21] “EVK-M8T用户指南”，Ublox，2018年5月。访问日期：2022年7月9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[22] 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《无线通信汇刊》，（在线优先发表），2022年。[23] C. Ding、J. Wang、H. Zhang、M. Lin 和 G. Y. Li，“卫星与高空平台辅助边缘计算中的传输资源和计算资源联合优化”，IEEE《无线通信汇刊》，第21卷，第2期，第1362–1377页，2022年2月。[24] M. S. Alam、G. K. Kurt、H. Yanikomeroglu、P. Zhu 和 N. D. Dao，“基于高空平台站的超级宏基站星座”，IEEE《通信杂志》，第59卷第1期，第103–109页，2021年1月。[25] A. Yastrebova、M. Höyhtyä、S. Boumard、E. S. Lohan 和 A. Ometov，“北极地区定位：研究现状与未来展望”，IEEE《开放获取》，第9卷，第53964–53978页，2021年3月。