本文已被 2026年国际计算、网络与通信会议（ICNC）接收并将在会上发表。©2026年电气电子工程师学会。请按以下格式引用：M. Figaro、F. Rossato、A. Bonora、M. Giordani、G. Schembra、M. Zorzi，“无人机搭载的低地球轨道卫星回传的应急连接实验评估”，载于 2026年国际计算、网络与通信会议（ICNC）

arXiv:2601.03958v1 [cs.NI] 7 Jan 2026

用于应急连接的无人机搭载低地球轨道卫星回传实验评估

Mattia Figaro*、Francesco Rossato*、Alexander Bonora*、Marco Giordani*、GiovanniSchembra†、Michele Zorzi**
意大利帕多瓦大学信息工程系（DEI）。电子邮箱：{mattia.figaro, francesco.rossato, marco.giordani, alexander.bonora, michele.zorzi}@dei.unipd.it。
† 卡塔尼亚大学。电子邮箱：giovanni.schembra@unict.it。

摘要—**可靠的连接对于公共保护与灾害救援（PPDR）行动至关重要，尤其是在地面基础设施不可用的农村地区或受损环境中。在此类场景下，非地面网络（NTN），特别是无人机（UAV），有望作为空中基站，为地面用户按需快速提供连接。本文搭建了一套系统：旋翼无人机搭载星链 Mini 终端，通过低地球轨道（LEO）卫星，在没有蜂窝覆盖的情况下为应急地面用户提供互联网连接。无人机充当 Wi-Fi 接入点，并通过星链星座回传地面流量。我们在农村环境中结合 ns-3 网络仿真和实际飞行实验，对系统在静态和动态飞行条件下的吞吐量、时延、覆盖范围和能耗进行了评估。结果表明，该系统能够维持稳定的上行吞吐量，在约 200 米范围内可达约 30 Mbps，且对无人机电池续航时间的影响极小。这些发现证明，将商用低地球轨道卫星终端部署于无人机上，是实现应急连接的一种可行方案。**

索引词—**无人机（UAV）；非地面网络（NTN）；低地球轨道（LEO）卫星；星链；应急通信；实验分析。**

I. 引言

通信网络在公共保护与灾害救援（PPDR）行动中发挥着至关重要的作用，能够保护生命、保障公共安全，使应急响应人员和主管部门得以迅速协调应急行动，并高效调配人员和设备。随着全球自然灾害（如火灾、洪水、地震、海啸和火山喷发）的数量和严重程度不断增加，同时武装冲突和人道主义危机的规模与复杂性不断演变，强健的公共保护与灾害救援系统对于在紧急情况下维持可靠通信至关重要 [1], [2]。

近年来，基于空中和空间平台的非地面网络（NTN）[3] 已成为第六代（6G）无线系统的重要组成部分， [4] 可在地面蜂窝网络覆盖范围之外提供广域覆盖，例如农村和/或偏远地区，并能在地面基础设施缺失或受损的灾区迅速恢复连接 [5]。尤其是，无人机（UAV）等无人机可作为灵活、部署迅速、即插即用的空中基站和边缘节点， [6], 动态地为接入提供服务为难以抵达且应急响应人员难以开展行动的地区地面节点提供连接 [7], [8]。公共保护与灾害救援（PPDR）的另一种方案是依靠低地球轨道（LEO）卫星。与地球静止轨道（GEO）卫星不同，低地球轨道卫星运行在距地球更近的轨道上，通常为300至1000千米，因此能够实现与地面网络相近的时延和吞吐量 [9]。值得注意的是，低地球轨道卫星既可将数据中继至地面网关（透明载荷），也可在星上处理数据（再生载荷），从而提供直接的互联网连接，因此尤其适用于应急连接 [10]。在此背景下，截至2025年11月，星链已服务超过800万用户，是较为成熟的基于卫星的互联网解决方案之一，其服务性能可与许多4G和5G蜂窝运营商相媲美，尤其是在农村或服务不足的地区 [11], [12]。

科研界也在探索将低地球轨道卫星终端直接集成到旋翼无人机上的方案。具体而言，无人机可作为地面用户的空中接入点，并最终通过低地球轨道卫星网络将数据流量中继至互联网。例如，Almeida等人 [13] 展示了一种框架，其中一架具备目标检测能力的无人机通过星链充当空中移动5G基站。尽管该系统能够支持直连智能手机连接，但卫星天线并未安装在无人机上，而是设在地面，因此无人机只能在地面站附近运行。相比之下，Jordan 等人 [14] 成功在一架 Ultra无人机（一种大型固定翼平台）上部署了星链系统，用于在南极洲进行科学数据采集。尽管任务取得成功，作者指出，仍需进行大量设计迭代，才能降低重量和功耗，以满足常规运行的要求。同样，Liu等人 [15]在一只 Unitree GO2机器狗上测试了星链系统，为卫星通信提供了有价值的数据集，尽管轮式机器人的动力学特性、能耗和载荷约束与旋翼无人机有着根本差异。

与以往工作相比，本文实现了一种系统配置：将 Starlink Mini 直接安装在商用旋翼 X8-1000 Pro RTK 无人机上。具体而言，地面用户通过 Wi-Fi 连接无人机，而互联网接入则由星链星座提供。我们在卡塔尼亚附近一个没有蜂窝覆盖的农村地区，通过真实世界实验测试该系统，测量静态和

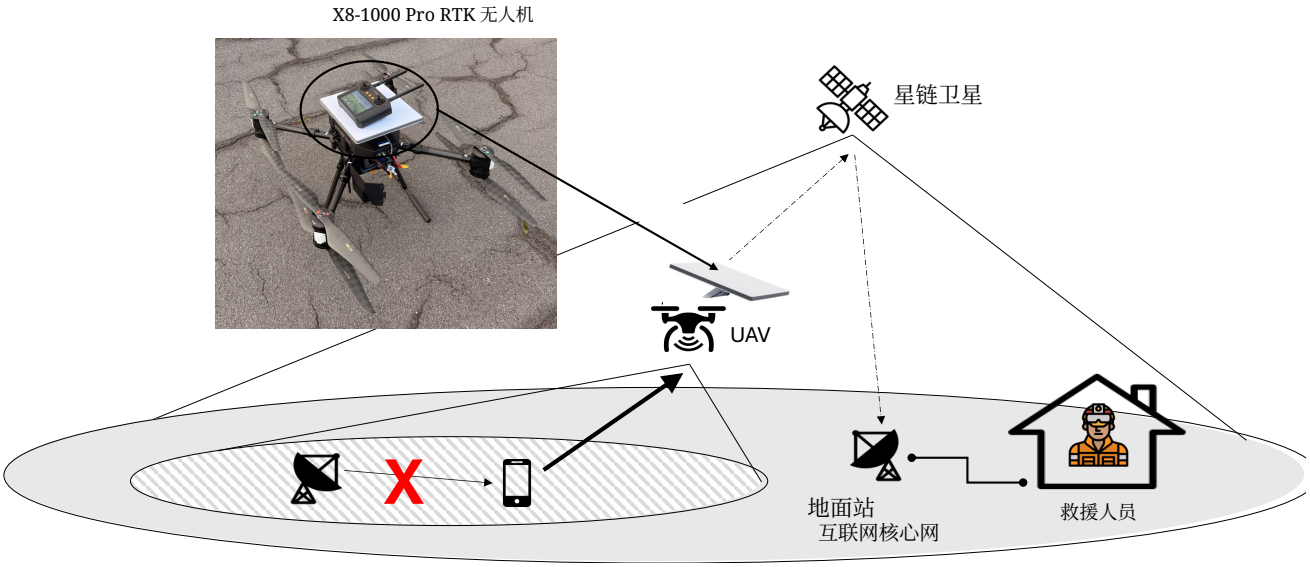


图 1：灾害救援PPDR场景：一架搭载 Starlink Mini天线终端的旋翼无人机，通过星链卫星回传链路，将地面用户经由 Wi-Fi 发送的数据流量中继给救援人员。

动态飞行条件下的吞吐量、时延、覆盖范围和能耗。结果表明，无人机能够承载 Starlink 天线的重量，飞行时间仅减少约 8%。此外，我们测得在 200 米范围内，上行吞吐量稳定在约 30 Mbps，表明该系统配置可为公共保护与灾害救援提供稳定可靠的回传连接解决方案。我们的实验结果通过实验室仿真得到验证；仿真使用 ns3-NTN，这是一个开源 ns-3模块，可根据第三代合作伙伴计划（3GPP）规范对全栈卫星通信进行仿真 [16]。

本文结构如下：第二节介绍我们的场景与动机，第三节介绍实验与仿真设置，第四节展示测试结果，第五节总结全文并提出未来工作的建议。

II. 场景与目标

A. 动机

在公共保护与灾害救援场景中，突发自然事件或人为事件会破坏传统通信基础设施，尤其是电力线路、光纤回传链路、基站和核心网络节点。在农村或其他服务不足地区，由于网络冗余有限，这类中断尤为严重。例如，2016年8月袭击意大利中部的6.2级地震重创了 Amatrice 和 Norcia 等城镇，电力线路和电信电缆受损，导致当地数日无法使用电话或互联网 [17]。更近一些，2023年5月，意大利艾米利亚-罗马涅地区发生严重洪水和山体滑坡，受影响地区超过30,000名用户遭遇互联网中断 [18], ，救援行动也因此受到影响。

在此场景中，当地面基础设施不可用时，无人机可作为空中移动基站 [19], ，为公共保护与救灾运营人员及地面团队提供可靠的本地网络。此外，无人机还可搭载光学、红外或热成像摄像机等传感载荷，通过探测幸存者或其他兴趣点，协助开展搜救（SAR）行动 [20]。此外，无人机还可为其他时间紧迫或基础设施受限的应用按需提供连接，例如远程工业检查、环境监测以及农业或林业管理，同时实时收集和传输相关数据。然而，无人机通常需要与附近的地面基站建立可靠的视距（LOS）连接，才能将接入侧地面流量或本地传感数据中继至互联网；而在灾害场景中，这种连接往往无法实现 [21]。

卫星也能在紧急情况下提供可靠、广域且不间断的互联网连接。例如，据报道，在意大利近期发生天气灾害期间，星链卫星在受灾区域支持的平均互联网吞吐量约为 50 Mbps [17]，，速度最高可达地面网络的三倍。然而，当前架构要求用户终端安装相对较大的天线面板（如 Starlink 终端）才能连接卫星，而这类设备无法集成到智能手机等商用用户设备中，因此难以实现设备直连的独立卫星连接。

B. 我们的公共保护与救灾场景

为解决独立无人机或卫星通信系统的问题，我们考虑图 1 所示的公共保护与灾害救援场景。具体而言，我们考虑一种兼具感知和通信能力的多角色旋翼无人机。在通信任务中，它充当移动空中 Wi-Fi 网关，为身处地面网络不可用的灾区的地面用户提供接入连接。为建立通往互联网的回传链路（否则该链路无法实现），无人机在载荷中搭载了 Starlink Mini天线终端，将地面流量中继至一颗星链卫星。从那里，数据被传输至地面站，并



图 2：论文部分作者与搭载 Starlink Mini 天线终端的 X8-1000 Pro RTK 无人机合影（左）。卡塔尼亚附近实验农村地区的航拍全景（右）。

最终路由至互联网，以支持救援中心的公共保护与救灾行动。[1]

我们研究的首要目标是评估集成式无人机卫星移动网关系统作为提供应急互联网连接的实用方案的运行限制与可行性。我们将通过现场实验和计算机仿真证明，无人机搭载 Starlink Mini 天线在载荷重量与容量、能耗、空气动力学及通信性能方面均具备可行性。

III. 实验与仿真设置

本节将介绍我们的实验（第三节-A）和仿真设置（第三节-B）。

A. 实验设置

我们的实验设置如图 2 所示，其概念设计是面向传统地面网络受损或中断的灾区，构建可快速部署的飞行回传系统。该架构将商用现成无人机与低地球轨道卫星天线终端相结合，打造移动中继节点。

a) 无人机： 空中节点是一架 DroneBase X8-1000 Pro RTK 八旋翼无人机。[2] 选择该平台是因为它具备较强的载荷能力（最高可达 10 kg），并且在恶劣条件下稳定性出色，包括抗强风能力（最高可抵御 35 节风速）；这些都是保持卫星对准可靠性所必需的条件。此外，该无人机采用双天线RTK GNSS模块，可实现厘米级定位精度，这对于摄影测量、制图和搜索与救援任务等公共保护与灾害救援应用至关重要。为确保为确保足够的飞行续航，推进系统由两块高压锂聚合物（LiPoHV）电池供电，每块电池均采用 6S 配置（22.8 V），容量为 30000 mAh。即使在载荷能力达到满载时，这种配置也能实现最长 50 分钟的飞行时间，表现出色。

b) 低地球轨道卫星天线终端：通信载荷由一台平板式 Starlink Mini 天线组成。[3] 选择该终端是因为其尺寸紧凑（298.5 ×259 × 38.5 毫米）、重量轻（1.16 千克）且功耗低（25-40 瓦），因此能够在无人机最大起飞重量的限制内集成。该天线采用电子相控阵（EPA），无需机械转向，并可在 110° 视场内同时跟踪多颗 Starlink卫星。Starlink Mini 具有双重功能：它既可连接至星链低地球轨道卫星星座，提供回传链路，也可同时充当 Wi-Fi 接入点，为地面用户广播局域网。其 Wi-Fi 模块是一台双频 Wi-Fi 5（802.11a/b/g/n/ac）路由器，最多可支持 128 台设备连接，覆盖面积可达 112 m^2。

星链星座由 SpaceX 运营，目前由约 9000 颗低地球轨道卫星组成，分布在倾角各异的多个轨道壳层中，轨道高度约为 550-570 千米。该星座实现了近全球覆盖，平均下行（上行）速率约为 110（15）Mbps，往返时间低于 40 毫秒 [22]。这些卫星主要工作在 Ku 波段的 10.7–12.7 GHz（下行）和 14–14.5 GHz（上行），以及 Ka 波段的 17.8–18.6 GHz 和 18.8–19.3 GHz（下行）和 27.5–30 GHz（上行），具体取决于各地区的授权情况 [23]。

c) 地面用户设备（用户设备）：用户段由一台 Lenovo Yoga S730 笔记本电脑组成，该电脑通过标准 Wi-Fi 协议连接到空中节点。

B. 仿真设置

为了验证实地飞行测量结果，我们在 ns-3 中复现了目标场景。ns-3 是一种广泛采用且可靠的

[1]目前尚不清楚 Starlink卫星是否像第一代卫星那样以弯管模式运行（即通过透明载荷直接连接地面网关），还是采用第二代卫星所使用的再生式载荷技术（这将使其能够利用星间链路进行流量路由）。为简化说明，图 1 展示了前一种方案。2

DroneBase Professional：https://dronebase .it/en/professional - drones/ .

[3]Starlink Mini：https://starlink.com/specifications.

端到端网络仿真框架。具体而言，我们使用 ns3-NTN 模块 [16],[4] ，这是我们开发的 ns-3 开源扩展，用于根据 3GPP 5G NR-NTN Release17+ 规范模拟全栈卫星通信。该模块实现了基于 [24]，的 3GPP NTN 信道模型，涵盖 S 、 L 和 Ka 波段的路径损耗、大气吸收、闪烁和频率选择性衰落。此外，它还包含来自 [25]，的圆形孔径、甚小口径终端（VSAT）和均匀平面阵列（UPA）配置天线模型，以及面向非地面网络的地心地固（ECEF）笛卡尔坐标系。它还实现了定时提前机制 [26] ，以及定制的无线资源控制（RRC）和混合自动重传请求（HARQ）定时器 [25] ，以精确计算传播时延。ns3-NTN 的准确性已通过 [10], [16], 中的 3GPP 校准结果得到验证，目前被视为最可靠、最易获取的非地面网络仿真软件工具之一。

在本研究中，该模块已进一步扩展，可模拟本文所研究的多层通信配置，具体用于地面—无人机—卫星链路。

IV. 真实场景测试与结果

实验测试在意大利西西里岛卡塔尼亚附近的农村地区进行，该地区射频干扰极少，且无人机与地面用户设备之间几乎始终处于视距状态，如图 2（右）所示。所有飞行测试均在理想天气条件下进行，天空晴朗、云量极少，以建立性能基准，并尽量避免大气衰减或雨衰的影响。

我们使用 iperf3 网络测试工具，从吞吐量、往返时延、信号稳定性和能耗等方面评估系统性能。我们在静态和动态飞行条件下采集现场测量数据：无人机以 20 米的固定高度静态悬停或持续移动。

a) 静态悬停：图 3 评估了无人机静态悬停时的平均下行链路（DL）和上行链路（UL）吞吐量，同时逐步增大地面用户设备与无人机之间的水平距离，最大达到 250 米。在这些测试中，我们量化链路随距离增加而产生的性能下降，以确定系统的最大有效范围。

首先，我们观察到，使用 ns3-NTN 得出的实验结果（实心柱）与仿真结果（条纹柱）高度吻合，这证明了仿真器和实验平台都具有良好的准确性。对于下行情况，在 0-50 m 范围内，最大吞吐量约为 90 Mbps，对应于最佳链路条件；这与先前研究报告的典型星链网络性能一致 [22]。随后，随着地面用户设备与无人机之间的水平距离增大，吞吐量开始下降，在 150-200 m 范围内降至约 30 Mbps；超过 200 m 后，链路完全中断。这一现象表明，当用户设备与无人机距离过远（在我们的实验结果中超过 200 m）时，性能会下降

[4]该模块的源代码：https://gitlab.com/mattiasandri/ns-3-ntn。

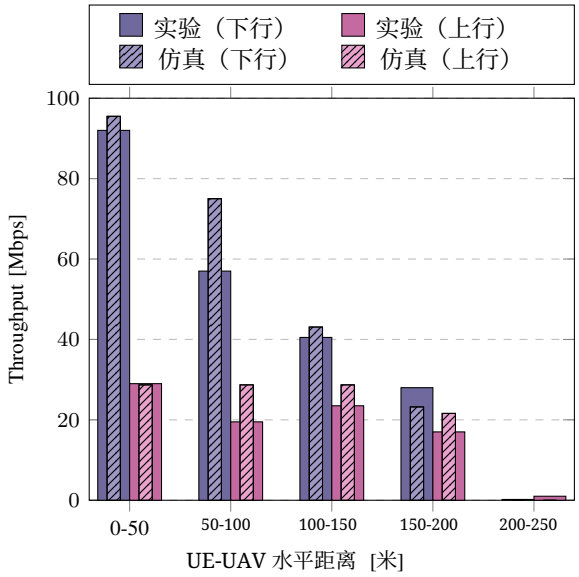


图 3： 静态悬停时，用户设备与无人机之间的水平距离对平均下行和上行吞吐量的影响。实心柱表示真实世界实验结果，条纹柱表示 ns-3 仿真结果。

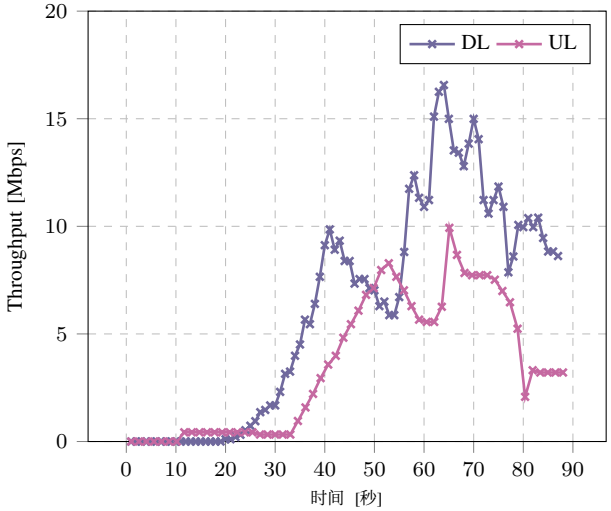


图 4： 动态飞行期间下行和上行吞吐量的变化：无人机以约 2.5 m/s 的恒定速度，从初始水平距离 250 m 处向用户设备移动。

由于 Wi-Fi 链路失效，下行和上行方向均出现了这种情况，这与预期一致。另一方面，在较短距离下，Wi-Fi 链路运行良好，但两个方向呈现出不同的表现。具体而言，下行吞吐量随着距离缩短而持续增加，而上行吞吐量则在约 25–30 Mbps 时达到饱和，表明此时的瓶颈是星链容量有限。尽管存在这种差异，这些结果仍表明，可以利用无人机作为中继和回程节点，通过卫星建立有效的地面双向互联网连接。

b) 动态移动性：在这些测试中，我们评估系统在飞行过程中、无人机持续移动时的韧性。图 4 展示了下行和上行吞吐量

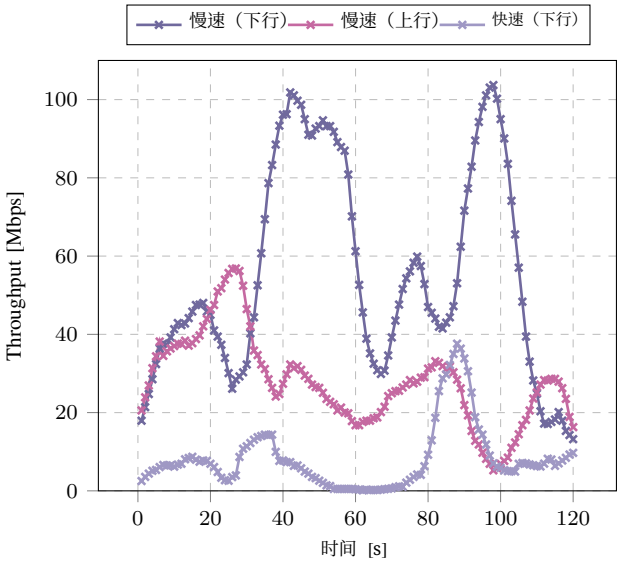


图 5：“慢速”（速度有限且姿态变化较小）和“快速”（高速复杂机动）移动条件下下行和上行吞吐量的变化。

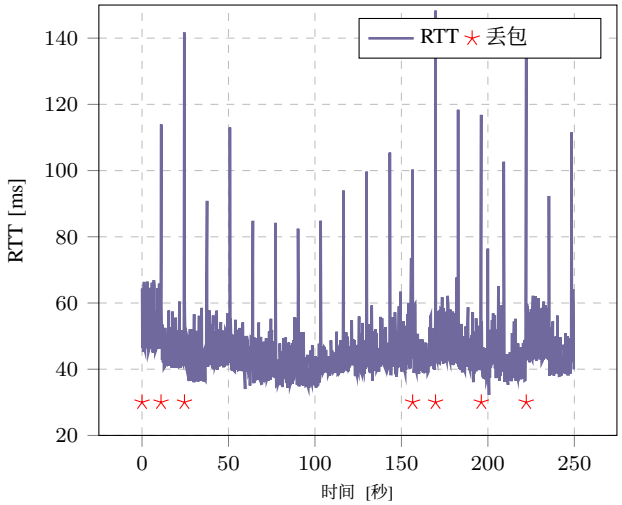


图 6：往返时延的变化情况及丢包事件。

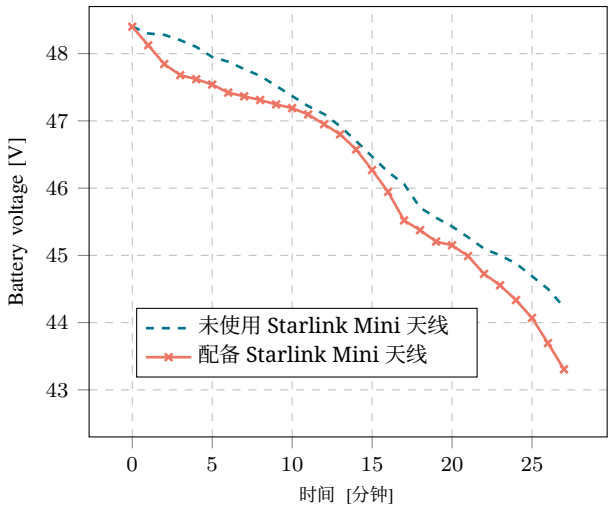


图7： 无人机电池电压的变化情况，有无 Starlink Mini 天线载荷。

随无人机以恒定速度从距用户设备 250 米处向其移动的变化情况。我们发现了不同的阶段。起初，吞吐量几乎为零，因为在 200 米以外无法使用 Wi-Fi 链路，这证实了图 3 中的结果。随后，随着无人机接近用户设备，Wi-Fi 链路终于建立，下行（上行）吞吐量逐渐增加；约 65 秒后（此时无人机距离约为 100 米），吞吐量达到约 18（10）Mbps。尽管如此，我们发现吞吐量相当不稳定。离线测试也记录到了这一现象：当时 Starlink Mini 天线安装在地面上，并通过有线以太网链路连接到用户设备。因此，我们认为这种不稳定性是卫星回传本身固有的，与无人机移动性或本地 Wi-Fi 连接无关。

接下来，我们在图 5 中测试系统在更动态条件下的表现。无人机要么以较慢的速度飞行，速度约为 2 m/s，且姿态变化较小（“慢速”）；要么以更高速度执行更复杂的机动，同时改变机身姿态和俯仰角（“快速”）。在高速下，我们观察到偶发的链路故障和吞吐量下降，例如在约 60 s 时。这是因为无人机的动态运动可能会影响 Starlink 天线与卫星保持精确对准的能力。相反，在低速下，即使存在一些波动，下行和上行链路仍完全可用，即使没有手动或机械天线指向也是如此，这证实了所提出系统的稳健运行。

c) 时延：非地面网络中的时延主要由地面与卫星之间的长距离所导致的传播时延决定。对于星链而言，与其他卫星解决方案相比，低地球轨道星座可提供具有竞争力的往返时延，通常低于 50 ms，但由于卫星相对于地球快速移动，因此需要频繁切换。

在图 6 中，我们考虑静态悬停场景，并展示网络传输单个数据包（Ping）的往返时延（RTT），测量从数据在地面用户设备生成到经由无人机卫星网络抵达地面站的时间，以及反向传输的时间。星号表示丢包事件。正如预期，往返时延通常低于 50 毫秒，但大约每隔 13 秒便会定期出现幅度较大的尖峰，最高达 140 毫秒。这种规律性的时序特征表明，星链特有的星座管理协议会触发切换，并需要耗时的信令过程，例如路径重路由和重新初始化。我们主要认为，这些尖峰是由卫星内波束间切换（用户设备在同一颗卫星的不同波束间切换）或星间切换（用户设备连接到另一颗卫星）造成的。此外还记录到偶发的丢包事件，说明切换期间可能发生数据丢失。

d) 能耗： 最后，在图7中，我们评估了无人机在搭载和未搭载 Starlink Mini 天线载荷两种情况下的电池电压水平，以衡量能耗。我们观察到，Starlink

设备的额外重量对电量消耗影响较小。飞行27分钟后，与基线配置相比，星链配置的电压下降了0.9 V。根据我们的工作范围（48.5 V至42 V，分别代表100%至30%的电量），这相当于在飞行第27分钟时剩余电量减少了9%。这一结果表明，所提出的公共保护与灾害救援系统不仅能够有效提供互联网连接，而且在任务续航时间方面也具有可持续性。

V. 结论与未来工作

本文通过在卡塔尼亚（意大利）附近开展的实地实验和 ns-3 仿真，成功展示了一种功能原型：搭载 Starlink 天线终端的无人机能够迅速为其他无法获得服务的区域提供互联网接入和回传连接，以支持公共保护与灾害救援行动。吞吐量分析揭示了不对称特性：下行容量主要受本地 Wi-Fi 链路限制，信号在约 150–200 m 的距离处会衰减；相较之下，上行容量受卫星回传链路制约。动态测试表明，在某些情况下，无人机速度和机动会严重影响吞吐量；不过，即使在中等速度下且没有机械天线指向，系统仍可正常运行。系统支持约 40–50 ms 的低往返时延，但观测到时延会系统性地每 13 秒出现一次周期性峰值，并偶尔发生丢包事件，这可能是由卫星切换造成的。最后，Starlink 载荷在无人机上消耗的能量很少，飞行时间仅缩短了 8%。

作为未来工作的一部分，我们将探索 Wi-Fi 之外的其他地面接入技术，例如 5G NR。我们还将测试一种闭环公共保护与灾害救援场景：无人机收集机会性 5G NR上行控制信号以定位用户设备，并通过所提出的无人机-卫星回传架构与地面站通信，为搜救提供支持。

致谢

本研究部分由欧盟通过意大利国家复苏与韧性计划（国家复苏与韧性计划）任务4、组成部分2、投资1.3、CUP C93C22005250001及“未来电信”（PE00000001——“RESTART”计划）合作项目资助。本研究还部分获得欧盟委员会通过欧盟“地平线欧洲”研究与创新计划下的玛丽·斯克沃多夫斯卡-居里-SE资助，资助协议编号101129618，UNITE。

参考文献

[1] B. Karaman, I. Basturk, S. Taskin, E. Zeydan, F. Kara, E. A. Beyazıt, M. Camelo, E. Björnson, and H. Yanikomeroglu, “灾害救援与管理场景中可持续且有韧性的通信基础设施解决方案”，*IEEE Communications Surveys & Tutorials [*在线优先出版*]*, 2025。[2] E. Di Fina, A. Galassi, F. Graziosi, F. Smarra, and F. Franchi, “危机应对新兴技术：将 5G 应用于公共保护和灾害救援场景所面临的挑战”，发表于*IEEE*未来网络世界论坛（*FNWF*），2024年。

[3] M. Giordani and M. Zorzi, “6G时代的非地面网络：挑战与机遇”，IEEE Network，第35卷，第2期，第244–251页，2020年3/4月。[4] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “迈向6G网络：用例与技术”，IEEE Communications Magazine，第58卷，第3期，第55–61页，2020年3月。[5] A. Chaoub 等，“弥合数字鸿沟的6G：面向偏远地区的无线连接”，IEEE Wireless Commun.，第29卷，第1期，第160–168页，2021年2月。[6] A. Traspadini, M. Giordani, and M. Zorzi, “6G中的无人机/高空平台辅助车载边缘计算：在哪里卸载以及卸载什么？”，发表于欧洲网络与通信联合会议暨6G峰会（EuCNC/6G峰会），2022年。[7] H. Küçükerdem, C. Yilmaz, H. T. Kahraman, and Y. Sönmez, “无人机自主控制：应用、要求与挑战”，Cluster Computing，第28卷，第11期，第734页，2025年9月。[8] M. Boschiero, M. Giordani, M. Polese, and M. Zorzi, “毫米波网络中的无人机覆盖分析：一种随机几何方法”，第16届电气电子工程师学会无线通信与移动计算国际会议（IWCMC），2020年。[9] M. Giordani and M. Zorzi, “毫米波卫星通信：6G时代的关键推动因素”，IEEE国际计算、网络与通信会议（ICNC），2020年。[10] M. Figaro, F. Rossato, M. Giordani, A. Traspadini, T. Shimizu, C. Mahabal, S. Herath, C. Lee, D. K. Pekcan, and M. Zorzi, “5G NR非地面网络：从早期成果到未来发展”，已投稿至npj Wireless Technology，2025年。[11] E. Lagunas, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, “用于实现全球通信网络连接的低地球轨道卫星星座”，Nature Reviews Electrical Engineering，第1卷，第10期，第656–665页，2024年9月。[12] F. Michel, M. Trevisan, D. Giordano, and O. Bonaventure, “初探星链的性能”，发表于第22届ACM互联网测量会议，2022年。[13] A. Almeida, F. Ribeiro, G. Vieira, M. Vila, T. Rodrigues, P. Valente, J. Ramos, P. Rito, D. Raposo, and S. Sargento, “采用5G和卫星支持的无人机任务”，发表于第15届未来网络国际会议（NoF），2024年。[14] T. Jordan, C. Robinson, T. Reed, R. Toomey, N. Jelev, J. Waters, N. Fenny, A. Weiss, and M. Lowe, “在南极洲罗瑟拉研究站成功部署用于多学科科学研究的大型无人驾驶飞行器：2024年季节概况与经验教训”，Antarctic Science，第1–18页，2025年6月。[15] B. Liu, Q. Zhang, Q. Yang, J. Jiao, J. Chauhan, and D. Kanoulas, “星链机器人：移动卫星通信平台与数据集”，arXiv预印本 arXiv:2506.19781，2025年。[16] M. Sandri, M. Pagin, M. Giordani, and M. Zorzi, “在ns-3中实现非地面网络信道模型”，发表于ACM Ns-3研讨会，2023年。[17] S. Shaffiee Haghshenas, V. Astarita, S. Shaffiee Haghshenas, G. Martino, and G. Guido, “城市疏散期间卫星互联网技术在危机管理中的潜力：意大利星链案例研究”，Information，第16卷，第10期，第840页，2025年9月。[18] A. C. Bakhtyari, A. Carboni, F. Deflorio, M. Ferraro, and L. Sica, “洪水导致道路网络中断时对空间连接性的影响评估与交通流模拟”，Sustainable Cities and Society，第107003页，2025年12月。[19] M. Bordin, M. Giordani, M. Polese, T. Melodia, and M. Zorzi, “来自天空的自动驾驶：设计与端到端性能评估”，发表于IEEE Globecom研讨会（GC Wkshps），2022年。[20] A. Khan, S. Gupta, and S. K. Gupta, “用于灾害探测、缓解、响应和准备的新兴无人机技术”，Journal of Field Robotics，第39卷，第6期，第905–955页，2022年4月。[21] W. Shi, H. Zhou, J. Li, W. Xu, N. Zhang, and X. Shen, “无人机辅助车联网：架构、挑战与机遇”，IEEE Network，第32卷，第3期，第130–137页，2018年5月。[22] D. Laniewski, E. Lanfer, and N. Aschenbruck, “测量移动星链性能：全面分析”，IEEE Open Journal of the Communications Society，第6卷，第1266–1283页，2025年2月。[23] N. Mohan, A. E. Ferguson, H. Cech, R. Bose, P. R. Renatin, M. K. Marina, and J. Ott, “多角度审视星链性能”，发表于ACM Web Conference，2024年。[24] 3GPP，“支持非地面网络（NTN）的新空口（NR）研究”，TR 38.811，2021年。[25] ——，“支持非地面网络（NTN）的新空口（NR）解决方案”，TR 38.821，2023年。[26] ——，“NR——数据物理层过程”，TS 38.214，2018年。