用于无人机传播建模、通信与导航研究的 LTE I/Q 数据集

Sung Joon Maeng、Ozgur Ozdemir、Ismail G¨uvenc、Mihail L. Sichitiu、Magreth J. Mushi 和 Rudra Dutta

arXiv:2303.01635v1 [eess.SP] 3 Mar 2023

摘要—近年来，无人驾驶飞行器（无人机）因潜在应用领域广泛而备受关注。为支持超视距（BVLOS）和自主飞行等无人机应用场景，蜂窝网络可作为地面连接点，并为无人机链路提供远程控制和载荷通信。然而，目前可用于研究不同海拔高度下蜂窝技术对无人机飞行的覆盖情况，以及开发提升无人机通信与导航能力的机器学习（机器学习）技术的数据集有限。本文介绍了在美国国家科学基金会 AERPAW 实验平台的 Lake Wheeler 农场区域开展的实地实验所采集的原始 LTE I/Q 样本数据集。我们操控一架搭载软件定义无线电（软件定义无线电）的无人机，在 30 m 至 110 m 的海拔高度飞行，并从地面一台基于软件定义无线电、工作频率为 3.51 GHz 的 LTE 基站采集原始 I/Q 样本。我们采用标准元数据格式，以便复现实验结果。文中介绍了使用 MATLAB 的 4G LTE 工具箱对原始 I/Q 样本进行后处理的方法，并给出多项具有代表性的结果。最后，我们讨论了其他机器学习研究人员未来如何利用所提供的数据集、后处理示例代码，以及用于采集 I/Q 测量和进行飞行器控制的示例实验代码。

I. 引言

随着无人机（UAV）的各种应用场景不断拓展，需求迅速增长，预计未来蜂窝网络连接无人机将得到广泛应用。凭借灵活、经济高效且易于获取等优势，无人机可用于多种应用，例如配送、搜索与救援、基础设施检查以及充当无线接入点等 [1]。为了支持无人机的广泛潜在应用，采用长期距离无线通信系统（如蜂窝网络技术）至关重要。

为了在未来实现无人机的普遍无线连接，了解并在实际条件下真实地建模空地信道传播至关重要。在现有文献中，通常使用无人机搭载的 LTE 蜂窝智能手机测量空地信道特性，并利用 Keysight NEMO Outdoor、Rohde & Schwarz QualiPoc 和 InfoVista TEMS 等智能手机软件采集数据集 [2]–[4]。然而，此类商用智能手机软件仅提供有限的一组关键关注参数（关键性能指标），获取成本高昂，也无法访问原始 I/Q 数据样本。另有多项研究探讨了基于信号强度观测的无人机导航机器学习（ML）技术（例如参见 [5]，[6]）；不过，射频数据通常基于仿真，而非真实世界的测量。

Sung Joon Maeng、Ozgur Ozdemir、 Ismail G¨uvenc、Mihail L. Sichitiu、Magreth Mushi 和 Rudra Dutta 均来自北卡罗来纳州立大学。

本文介绍了一种基于软件定义无线电（SDR）的框架，用于采集和后处理来自 LTE 演进型 NodeB 的 I/Q 样本。接收机 SDR 搭载在一架可编程无人机上。我们使用美国国家科学基金会的先进无线通信空中试验与研究平台（AERPAW）试验床开展了实地实验，数据已上传至 IEEE Dataport [7]，供研究社区更广泛地访问和使用。借助原始 I/Q 样本，可以灵活地使用 MATLAB LTE工具箱等软件获取感兴趣的任意关键性能指标。我们采用 SigMF元数据格式公开共享 I/Q 数据 [8]。我们介绍了所采集 I/Q 样本的后处理，并给出有代表性的结果，以探究空地信道传播特性和不同的接收机算法。

本文的主要贡献如下：
– 我们在农村环境中开展无人机实验，在五种不同的无人机海拔高度下采集原始长期演进 I/Q 样本，并公开提供所采集的数据，供其他实验人员使用。– 我们采用 SigMF 元数据标准格式整理并呈现所采集的 I/Q 样本和 GPS 数据。– 我们详细介绍了如何使用 MATLAB LTE 工具箱对采集的 I/Q 样本进行后处理，并提供了具有代表性的结果。– 我们介绍了其他无线通信和机器学习研究人员在相关领域中使用所采集的 I/Q 数据、实验样例代码和后处理代码的多种方式。

我们的早期工作 [9] 提供了有关空对地信道传播与建模的更多结果和讨论。

II. 实验描述

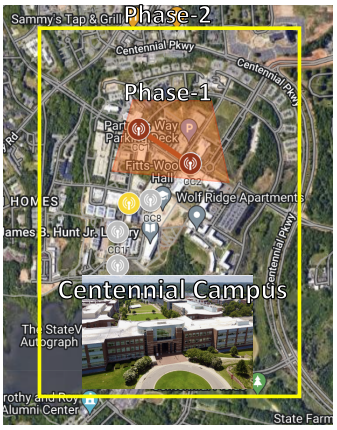
本节将简要介绍 AERPAW平台，描述 I/Q 样本采集实验，并概述具体的测量场景和实验设置。

A. AERPAW平台描述

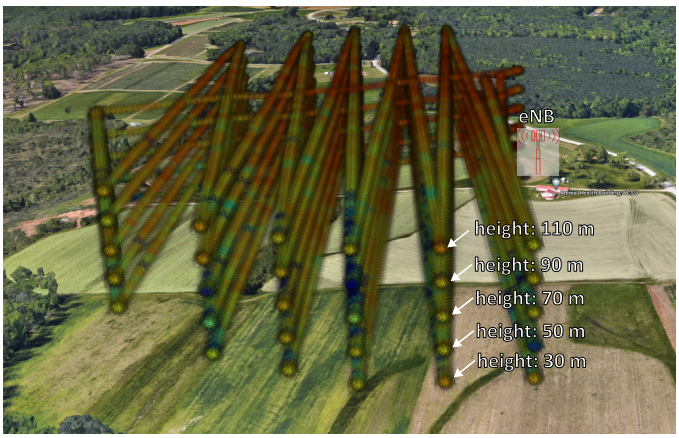
AERPAW 是一个先进的无线研究试验平台，实验人员可以使用可编程无线电和车辆开展实地实验。实验人员可以在开发环境中远程进行实验，准备就绪后，由 AERPAW运营团队在现场执行实验。收集到的测量数据可供实验人员返回虚拟环境中查看和分析，例如与在仿真环境中获得的结果进行比较。AERPAW 为用户提供各种实验场景和示例



(a) Lake Wheeler 路野外实验室场地。



(b) Centenninal 校园场地。



(c) Lake Wheeler 路野外实验室的无人机测量

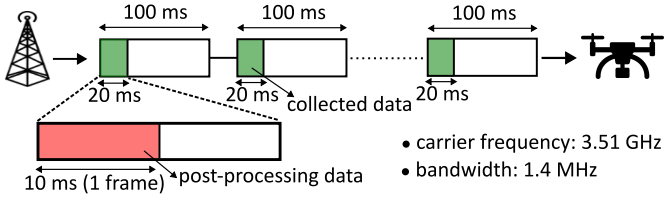
图 1：(a) AERPAW Lake Wheeler 路野外实验室的室外部署；(b) AERPAW Centennial 校园的室外部署；(c) 无人机在五个不同海拔下的飞行轨迹和参考信号接收功率（RSRP）。使用 Jet 颜色映射表示 RSRP 强度（红色表示最高 RSRP，蓝色表示最低 RSRP）。

实验，包括配备固定无线电节点和便携式节点的实验，以及自主无人机实验 [10]。此外，AERPAW 实验场地涵盖农村（Lake Wheeler 路野外实验室）、郊区和城市（Centennial 校园）环境，如图 1 所示。第一阶段 AERPAW 固定无线电节点（红色圆圈）截至 2021年11月已基本可用，而第二阶段 AERPAW 固定无线电节点（黄色圆圈）预计将于 2023年初基本可用。

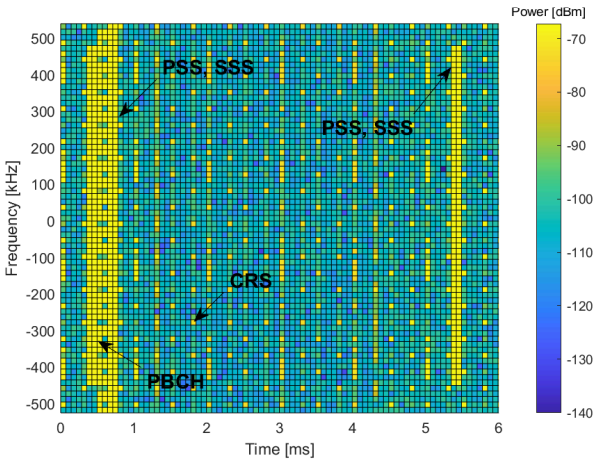
AERPAW 固定无线电节点支持美国国家仪器公司（NI）提供的多种通用软件无线电外设（USRP）软件定义无线电平台。此外，无人机、直升机和无人地面车辆（UGV）可用于搭载移动便携式节点，这些节点可包含软件定义无线电、手机和无线传感器。

B. I/Q 数据采集样本实验

AERPAW 平台的 I/Q 样本采集实验 [11] 会考虑指定的中心频率和带



(a) LTE I/Q 样本采集与后处理场景。



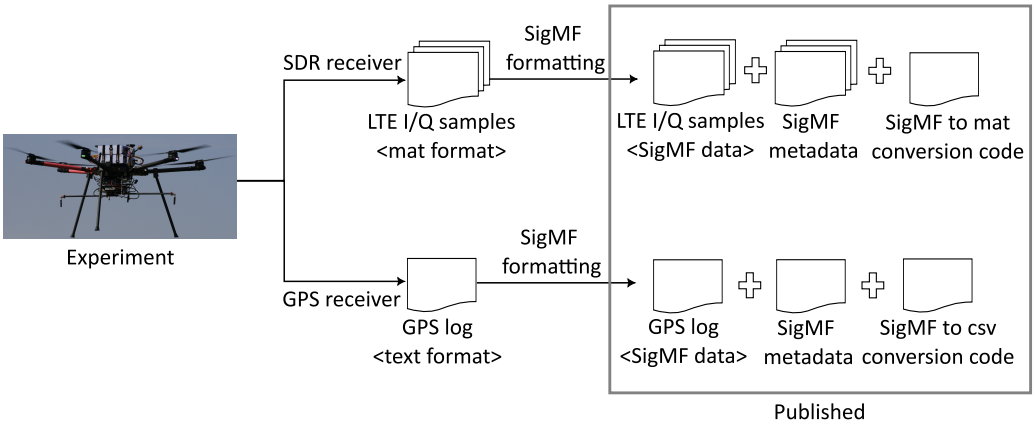
(b) 时长为 6 ms 的 LTE 资源栅格中的接收信号功率。

图 2：(a) LTE I/Q 数据集采集场景；(b) 使用 MATLAB 的 LTEToolbox 根据原始 I/Q 样本生成的 LTE 资源栅格中的接收信号功率。

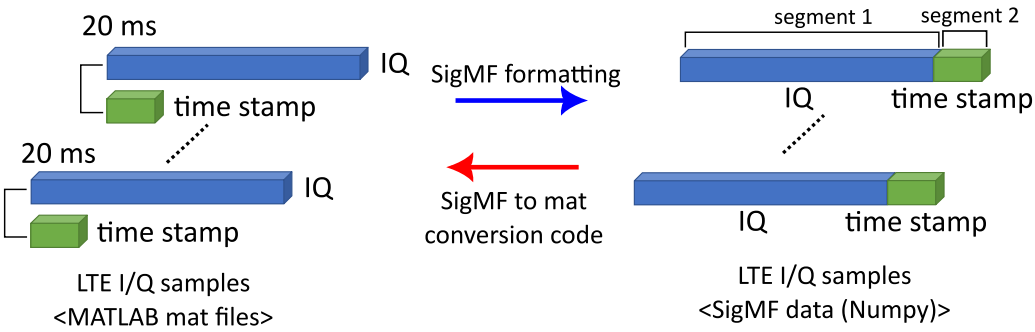
宽，并通过通用软件无线电外设记录 I/Q 样本（适用时同时记录 GPS 坐标）。通用软件无线电外设可以位于固定节点，也可以由无人机搭载。数据以 MATLAB（.mat）文件格式存储，可使用 MATLAB 工具箱或其他相关软件进行后处理。一般来说，使用提供的样例软件 [11]，可以按照配置的采样率，在多个中心频率上采集指定时长的 I/Q 样本。实验人员可以配置 USRP 接收增益、采样率、中心频率、I/Q 波形持续时间、每次 I/Q 采集之间的等待时间以及实验持续时间。用户可以在开发模式下设置实验参数。本研究使用的数据集由 AERPAW 固定无线电节点和安装在无人机上的 AERPAW 便携式节点采集；前者配置为 LTE 演进型 NodeB，后者配置为 I/Q 样本采集设备。

C. 测量场景与设置

本文使用 [11] 前文所述的 I/Q 数据采集样本实验，让无人机沿预设轨迹在五种不同海拔高度进行测量。我们在 AERPAW Lake Wheeler Road Field Labs 场地采集长期演进 I/Q 样本，该场地可归类为开阔农村地区。Lake Wheeler Road Field Labs 的一个固定无线电节点（图 1a 中标为红色的 LW1）被配置为长期演进演进型节点B；搭载软件定义无线电和 GPS 接收器的无人机则被配置为便携式节点。固定无线电节点使用 srsRAN 开源软件定义无线电软件作为长期演进演进型节点B，且两者



(a) 从实验期间采集射频和 GPS 数据集，到在线发布 SigMF 格式数据集的步骤。



(b) I/Q 样本与 GPS 数据的数据结构，以及 mat 格式与 SigMF 格式之间的转换。

图 3：(a) 数据采集和 SigMF 数据格式化流程；(b) 本文所提供数据的结构。作为 IEEE Dataport 提交内容的一部分，还提供了 SigMF 与 .mat 格式之间的转换代码。

演进型节点B和便携式节点均使用 USRP B205mini。演进型节点B塔高为 10 m，且演进型节点B和无人机均配备垂直安装的单极子天线。中心频率固定为 3.51 GHz，发射信号的带宽为 1.4 MHz。实验期间，在该频段内未观察到其他信号源。

实验期间，作为演进型节点B运行的固定无线电节点上的通用软件无线电外设会持续发送公共参考信号（CRSs）、同步信号（SS）和物理广播信道（PBCH）；与此同时，搭载便携式节点的无人机配备了运行 I/Q 数据采集实验的通用软件无线电外设，如图 2 所示，每隔 100 ms 采集一段时长为 20 ms、采样率为 2 MHz 的数据。实验在无人机海拔（高度）为 30 m 至 110 m 的不同条件下重复进行，间隔为 20 m。每次飞行中，无人机都以固定高度沿着相同的预设轨迹飞行，覆盖实验场地后返回起飞位置。无人机起飞后，先向南飞，再向北飞，呈之字形飞行，然后返回起点。图 1c 将五次不同实验测得的参考信号接收功率叠加显示在谷歌地图的三维视图上。具体而言，无人机分五次单独飞行任务，分别在 30 m 至 110 m 的海拔高度飞行；随后通过对采集的 I/Q 样本和无人机的 GPS 日志进行后处理，获得相应的参考信号接收功率。

III. SIGMF 数据格式化

本节将介绍如何使用标准数据格式对采集的数据集进行格式化，并公开分享这些数据集，供其他研究人员使用。信号元数据格式（SigMF）是一种标准数据格式，用于描述采集（记录）的数据，方便有需要的人访问这些数据 [8]。SigMF 可避免随着时间推移丢失采集数据的详细信息，并使数据集兼容不同的工具。SigMF 记录由任何随时间变化的数据源（例如采集的 I/Q 样本）以及一个包含纯文本的元数据文件组成，该文件用于描述数据集。

A. 将 *I/Q* 样本和 *GPS* 日志转换为 *SigMF*

在实验中，无人机便携式节点的输出数据集包括：1）包含来自软件定义无线电接收机的长期演进 I/Q 样本的 .mat 文件；以及 2）包含来自 GPS 接收器的 GPS日志的文本文件。长期演进 I/Q 样本的 .mat 文件包含由 I/Q 样本构成的复数，以及采集这些样本时对应的时间戳。GPS日志提供实验期间无人机的纬度、经度、海拔和时间戳。为公开发布测量数据集，供其他研究人员使用，我们采用 SigMF 标准。我们使用 SigMF Python 软件包将原始数据集转换为 SigMF。每个 I/Q .mat 文件和 GPS日志文本文件都会被改写为 NumPy 数组 SigMF 数据集，而每个生成的 SigMF 数据集则由 SigMF元数据进行描述。采集到的 I/Q 样本和 GPS日志中的

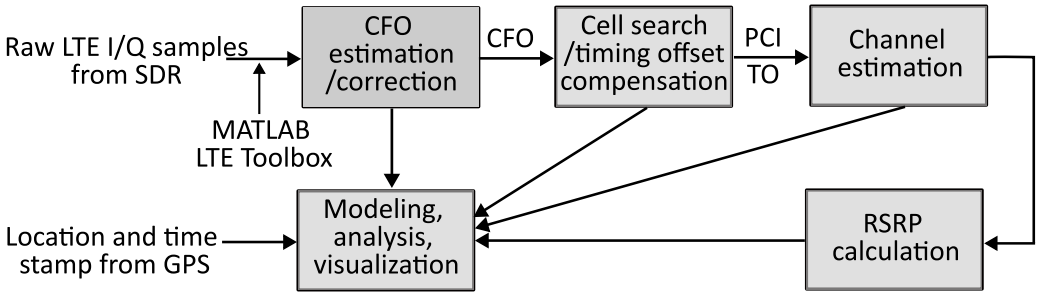


图4：无人机搭载的软件定义无线电和全球定位系统所采集的 I/Q 样本及 GPS 日志的后处理框图。

SigMF 数据集分别以 64 位复数浮点格式和 64位实数浮点格式记录。

SigMF元数据采用 JavaScript对象表示法（JSON）格式编写，并使用三个 JSON 对象（global、capture 和 annotations）来描述 SigMF 数据集。global 对象提供适用于整个数据集的信息，例如 SigMF 数据集的数据类型、SigMF 的版本、作者以及数据集的总体描述。数据集的各个片段可由 capture 和 annotation 对象描述。

*B. SigMF*格式数据集的公开共享

从原始数据集获得 SigMF 格式的录制数据（Sig MF 数据集 + SigMF 元数据）后，我们可以将其公开共享，以便他人下载和使用这些数据集。不过，大多数下载者可能需要使用包含 I/Q 样本的原始 .mat 文件格式，并以文本文件格式读取 GPS 日志。尤其是由于后处理代码是基于原始数据集格式编写的，有意使用后处理代码的研究人员需要获取原始格式的数据集。因此，我们还提供了用于 I/Q 样本数据集的 SigMF 转 .mat 格式转换 Python 代码，以及用于 GPS 日志的 SigMF 转逗号分隔值（CSV）格式转换 Python 代码。图3展示了从实验数据集采集到在线发布 SigMF 格式数据集的流程图，以及原始 I/Q 样本和 SigMF 格式数据集的数据结构。

IV. I/Q数据后处理与代表性结果

本节讨论对实验中获取的 LTE I/Q 样本和 GPS 日志进行后处理，并给出一些有代表性的结果。

*A. MATLAB LTE*工具箱的后处理

MATLAB LTE工具箱 [12] 能够解码实验中采集的原始 LTE I/Q 样本。具体而言，我们可以与 LTE 接收信号同步、实现 LTE小区搜索过程、利用小区专用参考信号估计信道，并根据原始 I/Q 样本计算参考信号接收功率。此外，我们还可以将后处理后的 LTE 信号整合到全球定位系统 GPS 信息中，以建模和分析信道传播的多种特性，并如图 1c 所示，在三维地图上显示接收信号强度。

图 4 描述了 LTE I/Q 样本后处理的框图。我们首先使用 MATLAB LTE工具箱，从输入的 LTE I/Q 样本中估计并补偿载波频率偏移（CFO）。估计 CFO 时使用 OFDM符号的循环前缀（CP）。接着，利用同步信号的自相关特性，从主同步信号（PSS）联合估计物理层标识和定时偏移（TO），并从辅同步信号（SSS）估计物理层组标识。结合物理层标识和物理层组标识，即可确定物理小区标识（PCIs）。利用 PCI，我们可以提取与该 PCI 值对应的小区专用参考信号（CRS），使用 CRS 估计信道，并计算参考信号接收功率（RSRP）。后处理的详细步骤见 [9]。

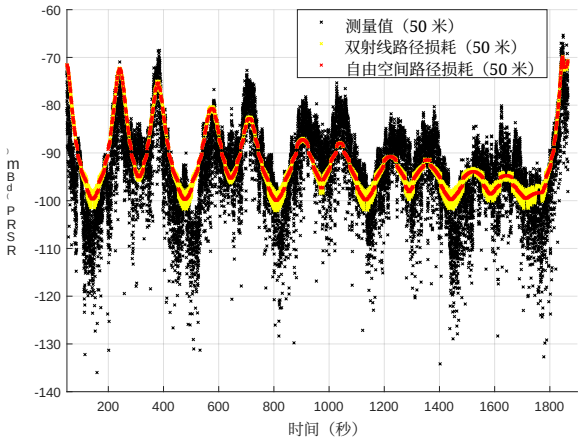
将原始 I/Q 样本与 GPS 信息相结合时，我们使用软件定义无线电（SDR）和 GPS 各自的时间戳。具体而言，SDR 会采集带有时间戳的 I/Q 样本，而 GPS 则单独记录带有时间戳的位置。因此，通过匹配并插值 SDR 与 GPS 接收机提供的两组不同时间戳，我们可以将 I/Q 样本与 GPS 位置信息相结合。

B. 代表性结果

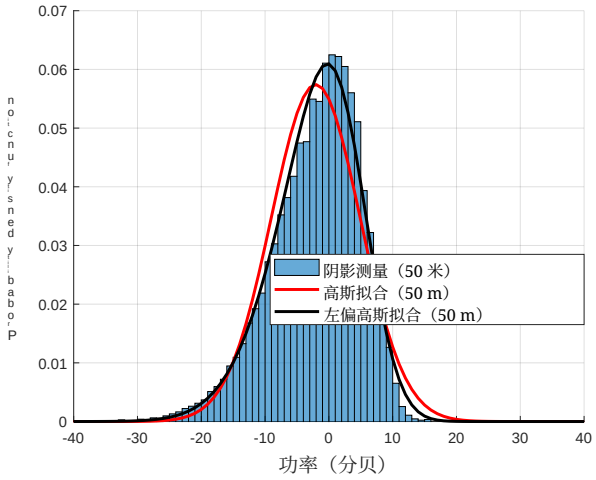
我们展示了对长期演进（LTE）I/Q 样本进行后处理后得到的空对地信道传播分析的关键示例结果。图 5 展示了基于无人机高度为 50 m 的实验数据集，对接收信号功率（参考信号接收功率（RSRP））进行分析和拟合的结果。接收信号功率由路径损耗分量和阴影衰落分量建模如下:

$$\mathsf{RSRP} = \mathsf{P}_{\mathrm{Tx}} - \mathsf{PL} + w,$$

其中，P_{Tx}、PL 和 w 分别表示发射功率、路径损耗和阴影衰落。在图 5a 中，测得的参考信号接收功率与自由空间路径损耗模型和双射线路径损耗模型进行拟合。两种路径损耗模型均考虑了仰角相关的收发天线辐射方向图。在双射线路径损耗模型中，计算接收信号强度时同时考虑了较强的地面反射路径和视距（LoS）路径。由于地面反射路径，

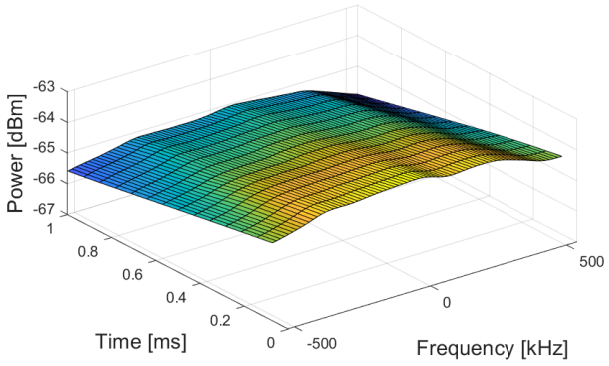


（a）基于参考信号接收功率的路径损耗分析。

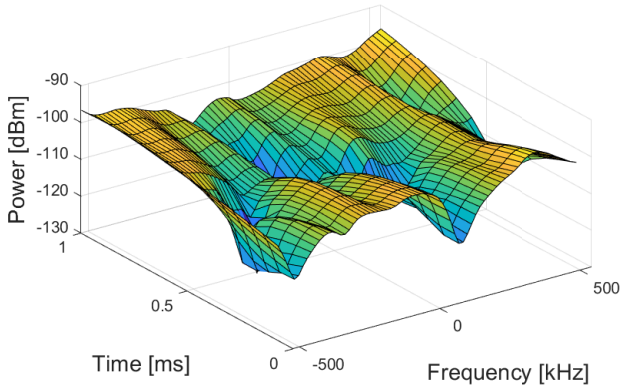


（b）基于参考信号接收功率的阴影衰落分布分析。

图 5：50 m 无人机高度实验的接收信号（参考信号接收功率）分析。路径损耗和阴影衰落由模型拟合。



(a) 90 米高度，380 秒时（参考信号接收功率高）



(b) 90 米高度，520 秒时（参考信号接收功率低）

图 6：无人机高度为 90 米的实验中，参考信号接收功率较高 (a) 和较低 (b) 时估计的信道。使用小区专用参考信号估计信道，并对时域和频域中未知的信道进行插值。

与自由空间路径损耗模型相比，双射线路径损耗模型能够捕捉参考信号接收功率的波动。在图 5b 中，测得的阴影衰落分量与高斯分布和左偏高斯分布进行拟合。测得的阴影衰落分量通过以下方式计算：

$$\hat{w} = \mathrm{RSRP} - \mathrm{P_{Tx}} + \mathrm{PL_{2ray}},$$

其中，$\mathrm{PL_{2ray}}$ 表示根据图 5a 得到的双射线路径损耗模型。可以观察到，尽管高斯分布能够很好地拟合测得的阴影衰落，但左偏高斯分布比高斯分布更能拟合测得的阴影衰落。

图 6 展示了在参考信号接收功率较高（图 6a）和较低（图 6b）时，基于一组测得的原始 LTE I/Q 样本估计得到的信道。这些图对应于图 5a 中参考信号接收功率分别较强和较弱时的 380 s 和 520 s 时刻。后处理中的信道估计步骤如图 4 所示。提取出的小区专用参考信号用于估计已分配资源上的信道系数，而信道系数在资源栅格中未知的位置则通过三次插值进行插值。可以观察到，参考信号接收功率较高时估计的信道较为平坦，而参考信号接收功率较低时估计的信道在时域和频域中都快速变化。

除了所展示的结果外，我们还可以通过后处理生成其他有趣的结果，例如无人机速度变化、空间相关性、相干带宽，以及基于主同步信号和辅同步信号的相关峰 [9]。

V. 数据的潜在用途与未来 AERPAW 实验

提供的测量数据、示例后处理代码和 I/Q 数据采集样本实验，可供其他研究人员以多种不同方式使用。

传播建模： 可利用所提供的数据开发不同的基于机器学习的空地传播模型——例如参见 [13] 及文献中的其他近期研究。这类模型可以考虑（如果已知）或实时学习（如果不可用）发射机和接收机处的三维天线方向图及其朝向、无人机的海拔、基站塔的高度、通信频率和带宽、无人机的速度和倾斜角、无人机的螺旋桨转速，

以及其他特征（因为这些特征可能会影响多普勒特性）。可以针对各种场景对相干带宽、相干时间和空间一致性进行表征。

新型接收机算法：所提供的数据可用于开发适用于空中通信场景的新型时域和频域同步算法以及信道估计技术。虽然 [9] 中采用了克里金法进行空间插值，但文献中还介绍了多种其他信号处理和机器学习技术，例如 [14],中所讨论的方法，这些技术可以进一步探索，以提高精度。

新型无人机轨迹设计和无人机航路：地面基站的三维无人机覆盖热力图可用于优化无人机轨迹，例如在实际信道条件下，为给定任务计划最大化数据速率。仅定义航路点时，无人机需要加速和减速，以便在满足任务时长和射频性能约束的同时沿航路点之间的直线路径飞行。给定环境的覆盖地图有助于在实际无人机任务计划下优化无人机航路点 [5] ，或测试基于机器学习的实时航路点选择算法的效率 [6]。所提供的数据还可用于设计和优化三维无人机航路，为无人机任务提供良好的无线覆盖。

I/Q 数据采集实验： [11] 中提供的 I/Q 采集示例实验可根据实验人员的具体需求进行调整，以便从不同频率的长期演进网络中采集数据，并让无人机在多个海拔高度沿不同轨迹飞行。除长期演进外，还可使用 5G、WiFi 和 LoRa 等其他波形与技术作为待采集 I/Q 数据的信号源。北卡罗来纳州立大学的 AERPAW平台可在相关实验通过 AERPAW 仿真环境测试后，为外部用户远程开展此类实验提供支持。或者，实验人员也可以使用所提供的软件，在自己感兴趣的环境中运行实验，无论是否使用无人机。采集到的数据可使用 MATLAB 的各种工具箱进行后处理——文中提供了一个长期演进示例代码，用于重新生成本文和 [7] 中的结果。近期还将提供一个 5G I/Q 数据集及后处理代码示例。

仿真实验：在室外测试平台上开展实验之前，可以先在 AERPAW 的开发环境等仿真环境中开发并运行相同的射频和车辆软件 [15]。本文撰写时，AERPAW 的射频软件仿真环境支持简单的双径多径信道、最高 100 MHz 的带宽、不同的中心频率、支持 2×2 空间复用的多输入多输出，以及不同的天线辐射方向图。车辆仿真支持为一架或多架无人机和/或无人地面车辆设定固定航路点；或者，无人机/无人地面车辆也可以根据射频信号观测，实时自主决策并选择后续航路点。射频和车辆软件完全开发完成后，即可迁移至 AERPAW 的测试平台环境。实验人员可以比较仿真与测试平台的实验结果，并可根据需要在仿真和测试平台环境中进一步开发和测试代码。

VI. 总结

本文提供 LTE I/Q 数据集，以支持无人机信道传播建模、通信和导航研究。我们在开放农村环境中使用无人机采集 LTE I/Q 样本，并采用元数据标准 SigMF 共享数据集。我们使用 MATLAB LTE工具箱对采集到的 I/Q 样本进行后处理。我们利用采集到的 I/Q 和 GPS数据给出具有代表性的结果，例如，比较使用各种不同路径损耗和阴影衰落模型得到的接收信号强度测量结果。我们还详细介绍了各种可能的机器学习研究思路，这些思路可以利用所提供的 LTE I/Q 数据集；或者，也可以利用 AERPAW 的仿真和测试平台环境，通过所提供的示例实验软件开展更多实验。

致谢

本研究部分由美国国家科学基金会项目资助，项目编号为 CNS- 1939334，并获得相关补充经费，用于研究国家无线电动态区。

参考文献

[1] S. Hayat、E. Yanmaz 和 R. Muzaffar，“民用无人机网络综述：通信视角”，*IEEE*《通信调查与教程》，第18卷，第4期，第2624–2661页，2016年4月。[2] J. Sae、R. Wiren、J. Kauppi、H.-L. Maattanen、J. Torsner 和 M. Valkama，“农村环境中的公共LTE网络无人机测量”，载于*IEEE*车辆技术会议（*VTC*）论文集，马来西亚吉隆坡，2019年4月，第1–5页。[3] R. Amorim、P. Mogensen、T. Sorensen、I. Z. Kovacs 和 J. Wigard，“连接至蜂窝网络的无人机路径损耗测量与建模”，载于*IEEE*车辆技术会议（*VTC*）论文集，澳大利亚新南威尔士州悉尼，2017年6月，第1–6页。[4] R. Amorim、H. Nguyen、J. Wigard、I. Z. Kov´acs、T. B. Sørensen、D. Z. Biro、M. Sørensen 和 P. Mogensen，“LTE蜂窝网络中空中飞行器造成的上行干扰测量”，*IEEE*《无线通信快报》，第7卷，第6期，第958–961页，2018年12月。[5] M. M. U. Chowdhury、S. J. Maeng、E. Bulut 和 I. G¨uvenc，“考虑天线辐射方向图和回传约束的无人机辅助蜂窝网络三维轨迹优化”，*IEEE*《航空航天与电子系统汇刊》，第56卷，第5期，第3735–3750页，2020年。[6] Y. Zeng、X. Xu、S. Jin 和 R. Zhang，“ 利用深度强化学习为蜂窝网络连接无人机实现同步导航与无线电测绘 ”，*IEEE*《无线通信汇刊》，第20卷，第7期，第4205–4220页，2021年。[7] S. J. Maeng、O. Ozdemir、I. Guvenc、M. Sichitiu 和 R. Dutta，“AERPAW平台的LTE I/Q测量：用于空地传播建模”，IEEE Dataport，2022年。 [在线]。可访问：https://dx . . 10.21227 0 43 0 72 doi org/ / p - d “信号元数据格式规范 v1.0.0”。 [在线]。可访问：https://github.com/gnuradio/SigMF/blob/sigmf-v1.x/sigmf-spec.md [8] [9] S. J. Maeng、I. Guvenc、M. Sichitiu、R. Dutta、O. Ozdemir 和 M. Mushi，“AERIQ：基于软件定义无线电的LTE I/Q测量与分析框架，用于空地传播建模”，载于*IEEE*航空航天会议论文集，美国蒙大拿州大天空市，2023年3月，第1–20页。[10] M. M. U. Chowdhury、C. K. Anjinappa、I. Guvenc、M. Sichitiu、O. Ozdemir、U. Bhattacherjee、R. Dutta、V. Marojevic 和 B. Floyd，“空中先进无线测试床平台实验场景分类与综述”，载于*IEEE*航空航天会议论文集，美国蒙大拿州大天空市，2021年3月，第1–20页。[11]“2022年4月：多个无人机高度下的LTE I/Q测量”，AERPAW用户手册。[在线]。可访问：https://sites.google.com/ncsu.edu/aerpaw-wiki/aerpaw-user-manual/4-sample-experiments-repository/4-4-data-repository/aerpaw-nrdz-research/april-2022-lte-iq-measurements-at-multiple-uav-heights [12] MathWorks，“LTE工具箱文档”。 [在线]。可访问：https://www.mathworks.com/help/lte/index.html

[13] S. Duangsuwan、P. Juengkittikul 和 M. Myint Maw，“在智慧农业场景中利用机器学习模型表征地面站至无人机通信的路径损耗”，《国际天线与传播期刊》，第2021卷，2021年。[14] S. ¨Ureten、A. Yongac¸o˘glu 和 E. Petriu，“认知无线电网络中干扰制图生成技术的比较”，载于*IEEE*国际通信会议（*ICC*）论文集，加拿大安大略省渥太华，2012年6月，第1879–1883页。[15] A. Panicker、O. Ozdemir、M. L. Sichitiu、I. Guvenc、R. Dutta、V. Maro- jevic 和 B. Floyd，“AERPAW仿真概述及初步性能评估”，《计算机网络》，第194卷，第108083页，2021年4月。

个人简介

Sung Joon Maeng (smaeng@ncsu.edu) 于2015年和2017年分别在韩国中央大学获得电气与电子工程理学学士学位和理学硕士学位，并于2022年在美国北卡罗来纳州立大学获得电气与计算机工程博士学位。他目前在北卡罗来纳州立大学担任博士后学者。其主要研究方向包括蜂窝网络连接无人机通信、毫米波通信和亚太赫兹通信。

Ozgur Ozdemir (oozdemi@ncsu.edu) 于1999年在土耳其伊斯坦布尔的博阿齐奇大学获得电气与电子工程理学学士学位，并于2002年和2007年分别在美国得克萨斯大学达拉斯分校获得电气工程理学硕士学位和博士学位。2007年至2016年，他在土耳其法提赫大学担任助理教授，并在卡塔尔大学担任博士后学者3.5年。2017年，他加入北卡罗来纳州立大学（NCSU）电气与计算机工程系，担任访问研究学者。目前，他在NCSU担任副研究教授。其研究兴趣包括软件定义无线电、毫米波系统的信道探测、射频损伤的数字补偿，以及无线系统中的机会式方法。

Ismail G¨uvenc (F’21) (iguvenc@ncsu.edu)于2006年获得南佛罗里达大学电气工程博士学位。2005年，他曾在三菱电机研究实验室工作；2006年至2012年，任职于DOCOMO Innovations；2012年至2016年，任职于佛罗里达国际大学。2016年至2020年，他担任北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系副教授，自2020年起担任教授。他发表了300多篇会议论文和期刊论文、书籍章节，并作出多项标准化贡献。他合著或合编了四本书，并且是约30项美国专利的发明人或共同发明人。他近期的研究兴趣包括5G无线系统、无人机通信与组网，以及异构无线网络。

Mihail L. Sichitiu (mlsichit@ncsu.edu)于2001年获得圣母大学电气工程博士学位。他目前的研究兴趣包括无线网络以及面向无人机的通信。在这些系统中，他研究定位、时间同步、仿真、路由、公平性和建模等相关问题。他教授无线网络和无人机课程。他是北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系教授。

Magreth J. Mushi （mjmushi@ncsu.edu）目前是北卡罗来纳州立大学（NCSU）计算机科学系的研究助理。她于2021年8月加入该系。在加入该系之前，她曾担任坦桑尼亚开放大学的首席执行官和研究人员。她于2016年获得北卡罗来纳州立大学的网络安全博士学位。她的研究兴趣领域包括网络安全，以及软件定义网络中的网络管理与运维。

Rudra Dutta （rdutta@ncsu.edu）于2001年在美国罗利的北卡罗来纳州立大学获得计算机科学博士学位。1993年至1997年期间，他在IBM担任软件开发人员和程序员，参与多个与网络相关的项目。自2001年起，他一直在北卡罗来纳州立大学计算机科学系任教；自2013年起担任教授，并自2018年秋季起担任副系主任。他目前的研究兴趣集中于大型网络系统的设计与性能优化、互联网架构、无线网络和网络分析。他是IEEE高级会员，也是ACM杰出会员（杰出工程师）。