arXiv:2303.01638v1 [eess.SP] 3 Mar 2023

使用 Helikite 在城市区域开展基于软件定义无线电的 5G新空口 C波段 I/Q监测与监视

˙Sung Joon Maeng*、Ozgur Ozdemir*、Ismail G¨uvenç*、Mihail L. Sichitiu*、Magreth Mushi*、Rudra Dutta*和 Monisha Ghosh†
*北卡罗来纳州立大学电气与计算机工程系，北卡罗来纳州罗利
†圣母大学电气工程系{smaeng,oozdemi,iguvenc,mlsichit,mjmushi,rdutta}@ncsu.edu
mghosh3@nd.edu

摘要——本文报告了使用搭载软件定义无线电（SDR）的 Helikite，在 3.7 GHz C波段采集和处理 5G新空口 I/Q 样本的实验结果。我们使用 MATLAB 的 5G 工具箱对采集的数据进行后处理，从 I/Q 样本中提取同步信号块（SSB），然后执行小区搜索和同步过程，并计算参考信号接收功率（RSRP）和参考信号接收质量（RSRQ）。我们绘制了不同物理小区标识的这些性能指标随 Helikite 海拔变化的情况。此外，基于采集数据及其后处理经验，我们讨论了 5G NR系统在监视、干扰攻击和后量子时代攻击方面可能存在的漏洞。

索引词—5G新空口、浮空器、AERPAW、气球、空对地、Helikite、软件定义无线电、监视、USRP。

I. 引言

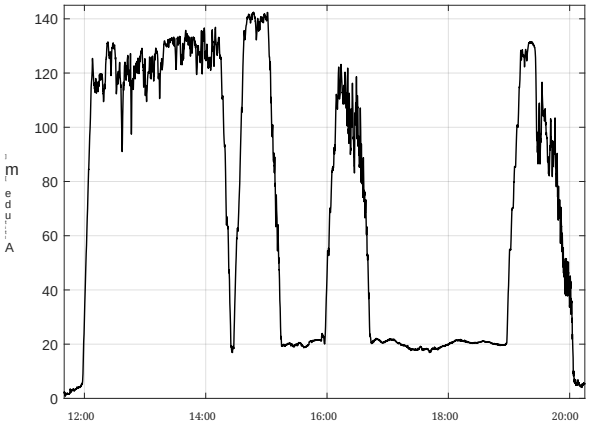
近年来，无人机（UAVs）因其各种潜在应用而受到越来越多的关注。无人机可以立即飞入危险区域执行搜救任务，也可用于运输医疗物资，以维护公共安全 [1]。搭载于无人机上的基站（BS）能够通过减少覆盖盲区来改善无线覆盖，并可增加容量，以支持更多用户 [2]。配备 5G能力的无人机还可用于智慧城市 [5], 、智慧农业 [6], 和工业物联网（IIoT）环境 [7], [8]中的数据收集和海量机器类通信（mMTC）边缘计算 [3], [4] 。要实现这些未来应用，关键是确保无人机在超视距（BVLOS）场景下的无线连接，而蜂窝网络连接无人机（C-UAVs）可以提供这种连接。

近期研究探讨了使用广泛应用的 4G 长期演进（LTE）无线标准实现蜂窝网络连接无人机的连接性和覆盖范围。在 [9]–[11], 中，使用 LTE 为其提供服务
已有研究探讨了无人机，并通过飞行搭载智能手机的无人机探索了空地无线电传播。然而，这些研究的结果仅限于商用智能手机软件提供的一组关键性能指标（KPI）。在 [12],中，研究人员利用 LTE eNB 和一架配备软件定义无线电及 GPS 接收机的无人机研究空地信道传播。采集的原始I/Q采样数据集经过后处理，并使用 MATLAB LTE工具箱进行分析

本研究部分得到美国国家科学基金会 CNS-1939334 项目的资助。



（a）Helikite 飞越北卡罗来纳州立大学罗利主校区，背景为罗利市中心。



（b）实验期间 AERPAW Helikite 的高度，由 GPS日志获取。Helikite 上下飞行四次。

图 1. 北卡罗来纳州立大学的 Packapalooza节期间，在罗利市中心附近进行的风筝飞艇实验。

以了解信道传播的多个方面，以及接收机算法，例如同步、信道估计，以及参考信号接收功率（RSRP）、空间相关性、相干时间和相干带宽的提取。

5G新空口（NR）是一种先进的蜂窝无线通信标准，正在取代长期演进（LTE）。文献中也对此进行了一定程度的研究，

旨在为无人机提供无线覆盖 [5], [13]。尽管 5G新空口比长期演进更安全，但仍容易受到网络安全攻击。在 [14]–[16], 中，研究了 5G新空口易受干扰、欺骗和嗅探攻击的情况，并提出了缓解措施。具体而言，同步信号（SS）、物理广播信道（PBCH）以及同步信号块（SSB）中的物理广播信道解调参考信号（PBCH-DMRS）符号，因攻击效率高、复杂度低而成为攻击者容易下手的目标 [14]。此外，随着量子计算的出现，预计其更强的计算能力将使大多数公钥安全方案失效 [17]。

本文介绍了在城市区域使用 Helikite 测量并后处理原始 5G新空口 I/Q 样本的结果。Helikite 收集来自 C波段（3.7 GHz）商用 5G NR 基站的公共无线信号。我们介绍了测量设置，并展示了 5G新空口同步过程，以及利用收集到的原始 I/Q 样本（AERIQ）提取参考信号接收功率（RSRP）和参考信号接收质量（RSRQ）的结果 [12]。基于测量结果，我们详细讨论了 5G新空口可能面临的网络安全与隐私风险，尤其是在能够通过空中平台大规模收集监控数据的情况下。

II. 使用 Helikite 收集 5G新空口 I/Q 数据

本节介绍我们如何在北卡罗来纳州立大学使用 Helikite 收集 I/Q 数据集。

A. 实验场景与设置

实验在北卡罗来纳州立大学主校区的美国国家科学基金会 AERPAW 平台 [18] 上进行。2022年8月，在北卡罗来纳州立大学 Packapalooza节期间，我们从中午到晚上9点将 AERPAW Helikite 升至海拔400英尺，并在全天持续进行实验。图1a展示了实验期间拍摄的照片。AERPAW Helikite 配备了软件定义无线电（USRP B205mini）和 GPS接收机，用于收集 I/Q 样本。整个飞行过程中，Helikite 进行了最高达6 GHz的频谱扫描，以收集频谱占用数据。此外，Helikite 被设置为每9分钟在3.7 GHz C波段以30.72 MHz的采样频率收集20毫秒的 I/Q 样本。频谱监测分析结果显示，实验期间检测到带宽为60 MHz、频率范围为3.70 GHz至3.76 GHz的 5G新空口 n77 频段信号，该信号由美国 Verizon 运营。

本文重点介绍 5G新空口 n77 频段的同相/正交测量与后处理结果。有关 AERPAW 风筝飞艇实验频谱占用监测结果的研究，请参见 [19], [20]。实验期间由安装在风筝飞艇上的 GPS 接收器记录的海拔变化如图 1b 所示。此外，风筝飞艇基于 GPS日志的三维轨迹可见于 [19]。

III. 5G新空口 I/Q 后处理

本节介绍对风筝飞艇实验中采集的 5G新空口同相/正交样本进行后处理的过程。我们利用 MATLAB 5G 工具箱 [21] 对同相/正交样本数据集进行解码。

A. 频谱图分析

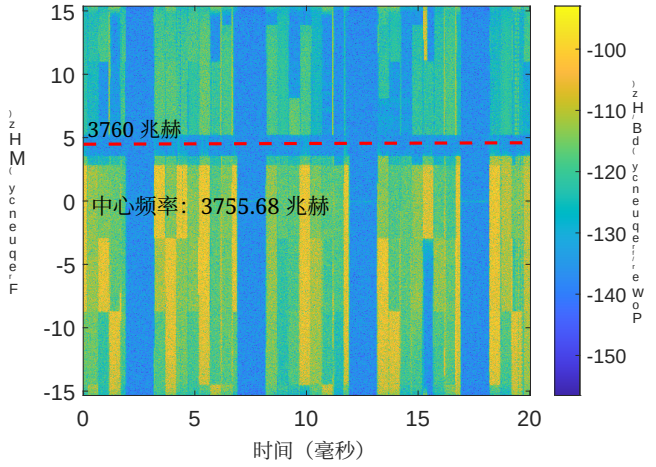
我们分析了通过 Helikite 收集的 I/Q 样本中 5G新空口 n77 频段的频谱占用情况。图 2 展示了 12:30:30（HH:MM:SS）时不同中心频率下 I/Q 样本的频谱图。频谱图直观呈现了信号频率随时间变化的频谱情况。根据采样频率，频谱带宽为 30.72 兆赫。频谱图中未直接显示中心频率，而是以 0 兆赫表示。我们发现，每隔 20 毫秒会在 3730 兆赫处分配一个同步信号块。我们将中心频率调至 3730 兆赫，并将 I/Q 下采样至 256 点快速傅里叶变换，子载波间隔（SC）为 30 千赫，以调整带宽，使其与图 2d 中的同步信号块相匹配。

B. 通过同步信号块进行小区搜索与同步

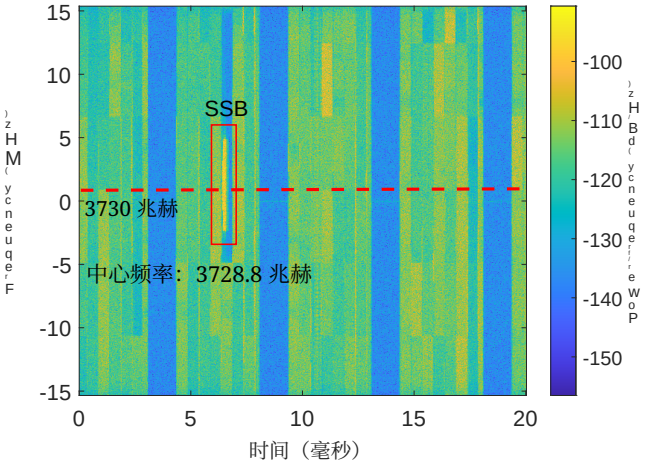
在 5G新空口 同步的第一阶段，用户设备（UE）通过使用 SSB 中由 m-序列生成的主同步信号（PSS）（参见 LTE 系统中的 Zadoff-Chu 序列），补偿频率偏移，估计用于物理小区标识（PCI）的 N_{ID}^{2}，并估计定时偏移。按照图 2d 所示对 I/Q 样本进行降采样以捕获 SSB 后，我们通过补偿候选粗频偏，计算接收信号与候选 PSS 序列之间所有可能组合的互相关。UE 选择粗频偏与 PSS 的组合中相关性最高的一组。接着，利用 SSB 上正交频分复用（OFDM）符号循环前缀（CP）之间的相关性补偿细频偏。最后，通过接收信号与估计出的 PSS 之间的相关峰估计定时偏移。

在第二阶段，用户设备（UE）使用 SSB 中由 Gold 序列生成的辅同步信号（SSS）估计 N_{ID}^{1}。然后，UE 利用公式中的估计 N_{ID}^{1} 和 N_{ID}^{2}，从 1008 个候选值中估计 PCI：$\mathrm{PCI} = 3N^{1}{}_{\mathrm{ID}} + N^{2}{}_{\mathrm{ID}}$。在给定 N_{ID}^{2} 的情况下，选择接收的 SSS 与所有候选 SSS 之间相关性最高的一项，以估计 N_{ID}^{1}。

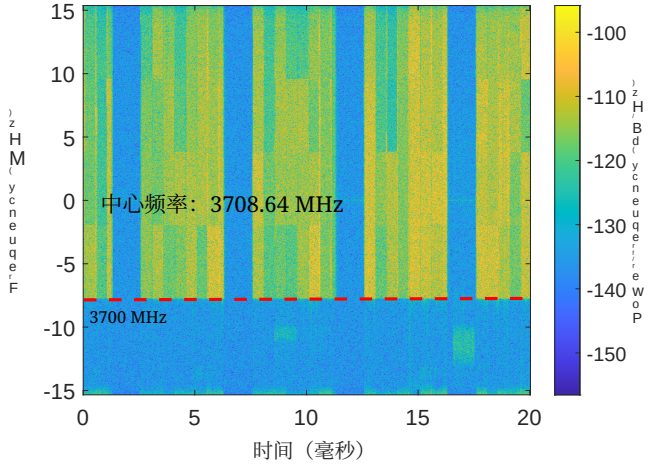
图3展示了根据12:30:30（HH:MM:SS）采集的 I/Q 样本，利用 PSS 和 SSS 估计 PCI 时的相关峰。图3a中，最高峰出现在$N_{\mathrm{ID}}^{2} = 1$ 处，估计得到的粗频偏为86.25 KHz。图3b展示了通过 SSS（$N_{\mathrm{ID}}^{2} = 1$）的相关峰进行的相应 N_{ID}^{1} 估计。然而，我们也可以观察到来自其他 N_{ID}^{2}的 PSS 相关峰，并通过手动选择 $N_{\mathrm{ID}}^{2} = 2,\ 0$，在图3c和图3d中检测到不同的 PCI。这意味着 Helikite 上的 SDR 接收到了来自三个不同基站（BS）的信号。通过分析整个实验期间的小区搜索结果，我们得出结论：在整个数据收集期间，Helikite 至少检测到了来自6个不同基站的信号。



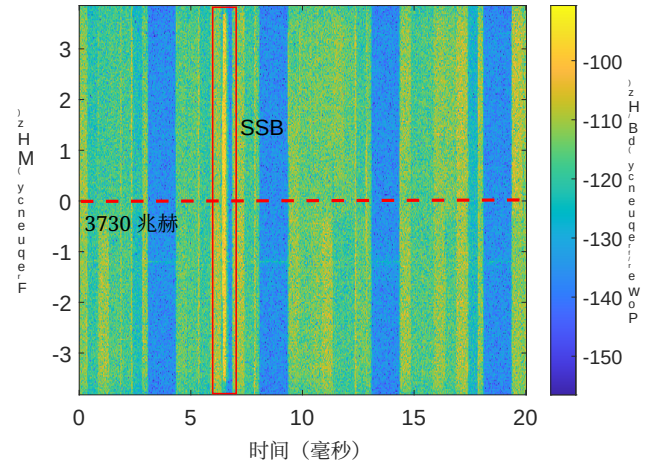
(a) 中心频率：3755.68 兆赫



（b）中心频率：3728.80 兆赫



（c）中心频率：3708.64 MHz



（d）中心频率：3730 兆赫。使用 30 千赫下采样至 256 点快速傅里叶变换子载波间隔，以捕获同步信号块的带宽。

图 2. 12:30:30 测得的第五代移动通信新空口 n77 频段 I/Q 样本频谱图。(a)、(b) 和 (c) 中的三种不同中心频率频谱显示了一个 60 MHz 带宽信号的占用情况。

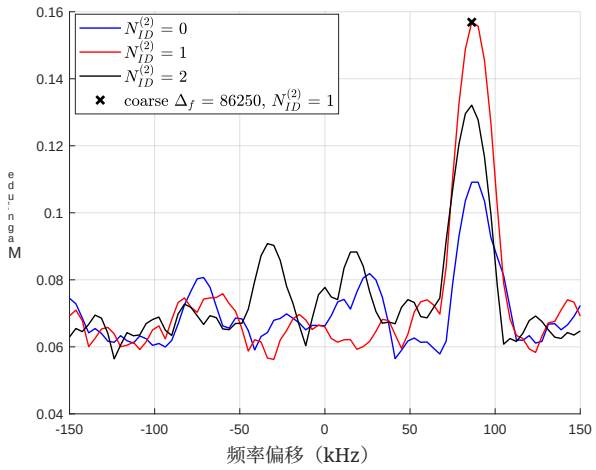
C. 基于同步信号块的参考信号接收功率和参考信号接收质量

在 5G新空口中，可以利用同步信号块（SSB）中的 SSS 和物理广播信道解调参考信号计算 RSRP（SS-RSRP）和 RSRQ （ SS-RSRQ ），以测量来自基站的接收信号功率和质量。由于物理广播信道解调参考信号和 SSS 的序列对于不同的 PCI 各不相同，因此可以针对不同的 PCI 分别计算 RSRP 和 RSRQ。图4展示了 RSRP 和 RSRQ 随 Helikite 的时间和海拔变化的情况。我们通过小区搜索算法获得 RSRP 和 RSRQ。实验期间占主导地位的6个 PCI 也通过小区搜索结果获得。具体而言，小区搜索算法表明，我们使用第III-B节中的小区搜索算法估计出单个 PCI，并计算与该 PCI 对应的 RSRP 和 RSRQ。

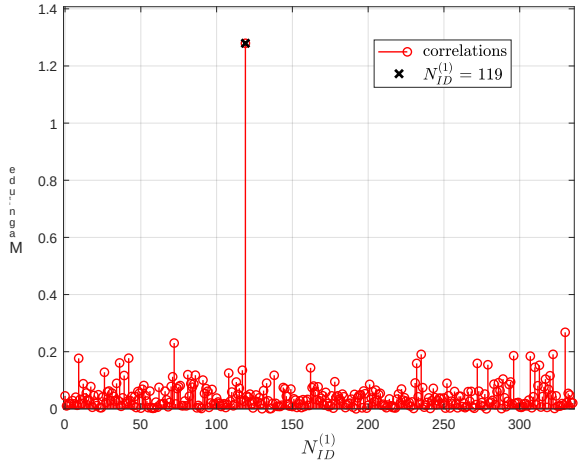
对于特定的物理小区标识，我们首先使用主同步信号和辅同步信号的相关峰手动检测物理小区标识，并计算参考信号接收功率和参考信号接收质量对于该特定的物理小区标识，如果通过分析主同步信号和辅同步信号的相关峰未检测到物理小区标识，我们将不再计算参考信号接收功率和参考信号接收质量。因此，图 4 中并未标出所有特定物理小区标识对应的参考信号接收功率和参考信号接收质量。在图 4c 中，我们观察到，随着 Helikite 海拔升高，参考信号接收功率逐渐增加，直到达到某一海拔高度；超过该海拔高度后，参考信号接收功率不再增加。另一方面，如图 4d 所示，参考信号接收质量与海拔之间的依赖关系并不明显。此外，无论参考信号接收功率处于何种水平，参考信号接收质量都较低，这表明在整个实验过程中，来自多个基站的干扰都很强。

IV. 讨论：第五代移动通信的安全与隐私考量

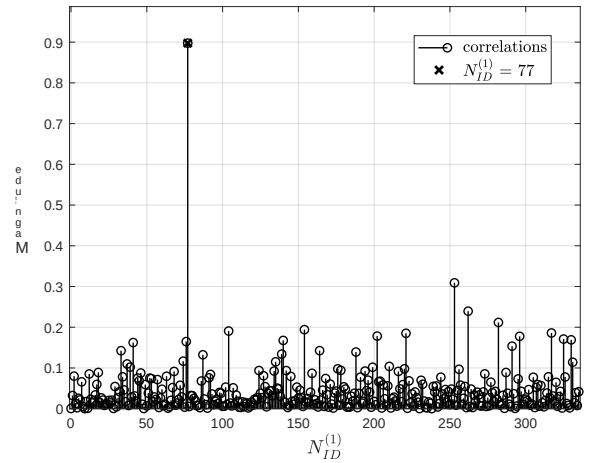
在本节中，我们将详细阐述第五代移动通信系统在监视、安全和隐私方面可能易受攻击的各种不同之处。



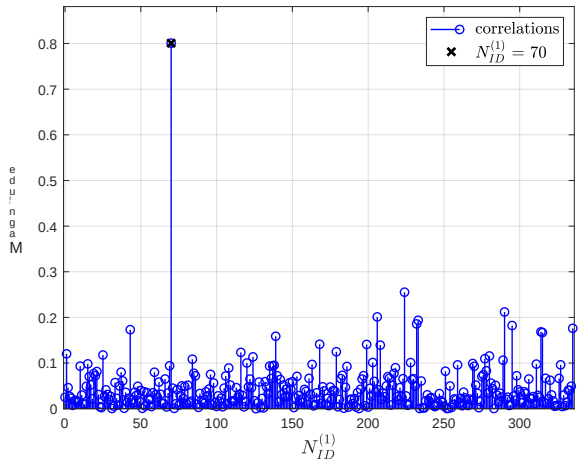
（a）接收信号与PSS候选序列之间的相关性，用于估计N_{ID}^{2}和粗频偏。



（b）当选择 $N_{\mathrm{ID}}^{2} = 1$ 时，接收的SSS与SSS候选序列之间的相关性。



（c）手动选择 $N_{\mathrm{ID}}^{2} = 2$ 时，接收的SSS与SSS候选序列之间的相关性。



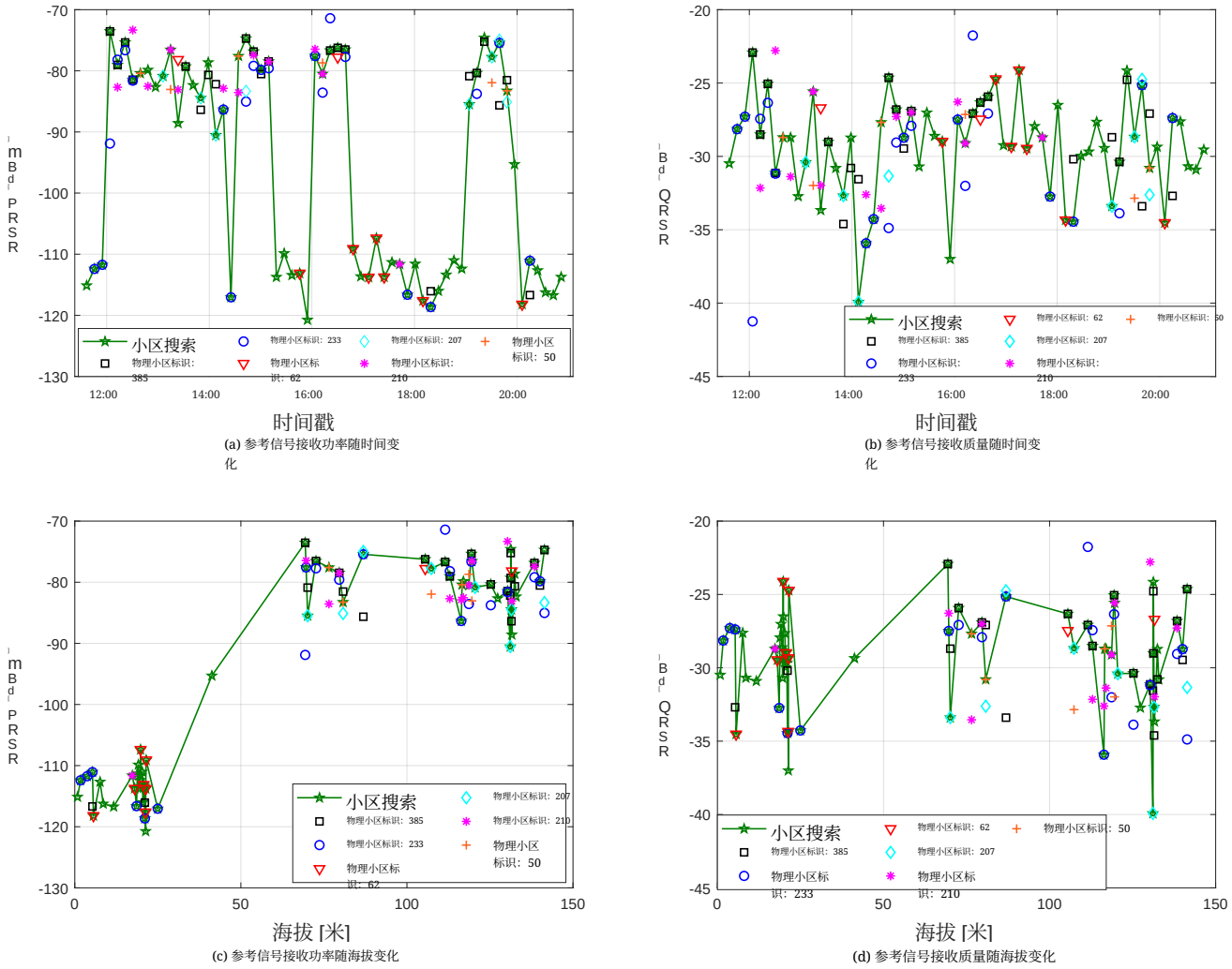
（d）手动选择 $N_{\mathrm{ID}}^{2} = 0$ 时，接收的SSS与SSS候选序列之间的相关性。

图3. 根据12:30:30采集的I/Q样本估计物理小区标识的相关峰。（a）当 $N_{\mathrm{ID}}^{2} = 1$ 时，PSS峰值最高，但仍能观察到其他 N_{ID}^{2} 产生的峰。在小区搜索中检测到三个不同的物理小区标识。

A. 监视

本文的结果表明，使用商用软件定义无线电设备，可以捕获来自 5G 网络的信号。具体而言，对原始 I/Q 样本进行后处理后，可以提取参考信号接收功率（RSRP）和参考信号接收质量（RSRQ）信号。对于这些采集到的同相/正交测量数据，由于传播信道具有很强的频率选择性，我们难以提取物理广播信道（PBCH）中的数据。不过，通过改进数据收集流程，并改进 USRP 的射频前端（本文报告的结果未使用 USRP 射频前端），便有可能解码 PBCH、物理下行控制信道（PDCCH）等其他信道，并扩大覆盖范围。我们采集的 I/Q 数据非常稀疏，因为我们的目标是分析 RSRP 和 RSRQ 如何随海拔变化；同时，也可以在更长的时间内更密集地采集数据。

利用商用软件定义无线电设备轻松捕获 I/Q 样本，这对现有及未来第五代移动通信/下一代无线网络的安全和隐私漏洞具有影响。正如近期飞越美国的监视气球事件 [22], 所显示的那样，可以在关键频段以及从关键基础设施收集大量数据。在更高高度飞行可与更多发射机保持视距，因此，只要接收信号强度足够强，便几乎可以从任何信号源捕获信号 [20]。可使用高端软件定义无线电而非 USRP B205mini 来提高信号接收质量，从而扩大覆盖范围。这可能引发安全方面的担忧，尤其是针对关键基础设施和频段。例如，在 CBRS频段，法规不允许存储有关雷达发射机移动和位置的信息 [23]。还可能存在其他法律影响和后果



(a) 参考信号接收功率随时间变化

(b) 参考信号接收质量随时间变化

(c) 参考信号接收功率随海拔变化

(d) 参考信号接收质量随海拔变化

图 4. 参考信号接收功率和参考信号接收质量由 SSS 和 SSB 中的物理广播信道解调参考信号计算得出。小区搜索表明，物理小区标识由第 III 节中的算法估算得出。小区搜索表明，物理小区标识，并通过相关峰值分析计算参考信号接收功率和参考信号接收质量（若检测到该物理小区标识）。

B，而特定物理小区标识检测算法会检测

，涉及在某些频段记录和存储原始频谱数据；有关讨论，读者可参见 [24]。

B. 抗干扰能力

文献 [14]–[16]研究了第五代移动通信新空口可能易受干扰、欺骗和嗅探攻击的各种方式。特别是，从攻击效率和复杂度来看，针对手段较简单的目标包括同步信号（SS）、物理广播信道（PBCH）以及同步信号块（SSB）中的物理广播信道解调参考信号符号（PBCH-DMRS） [14]。与长期演进相比，5G新空口在某些方面可能提高了抵御干扰攻击的能力。例如，5G新空口取消了长期演进中的物理控制格式指示信道（PCFICH），并将PUCCH、主同步信号和辅同步信号分配在资源栅格中更动态的位置。

大多数蜂窝系统都采用载波聚合，即聚合多个不同频段上的若干信道。

例如，根据我们此前对已部署蜂窝网络的测量 [25]–[27], ，我们发现，第四代移动通信系统通常会聚合多个授权频段，以及最多 3 个 5 GHz 非授权信道（每个 20 MHz），还有 CBRS 等共享频段。如今，第五代移动通信中的载波聚合主要见于毫米波（mmWave）频段，最多可聚合八个 100 MHz 信道。中频段的载波聚合尚未广泛应用，但 3GPP 允许聚合最多 16 个信道。载波聚合提供了一定程度的抗干扰能力，因为攻击者必须干扰基站可能使用的所有信道（包括非授权频段和共享频段），并且必须截获不同频段上的多个信道才能解码传输的信息，因为主信道及被聚合的信道可能会在毫秒级发生变化。如果这些信道中只有一小部分受到干扰，整体网络仍可使用其他可用信道继续运行，尽管容量可能略有下降。FR1 频段内也允许进行信道聚合

以及 FR2频段，从而进一步增强韧性。

C. 后量子时代攻击

如本节前文所述，恶意实体可能会在高空平台上捕获并存储大量无线I/Q数据。现有蜂窝网络的用户面数据均经过加密，因此，凭借当今的计算能力，目前无法从原始 I/Q 样本中将其解密。然而，后量子时代的量子计算能力预计将强大到足以破解当今的加密技术。文献中已有多项关于先收集后解密（HNDL）或先存储后解密（SNDL）攻击的研究 [17], [28]。因此，尽早开始采用能够抵御 HNDL/SNDL 攻击的后量子公钥密码学方法至关重要 [29]。

V. 结论

本文使用 Helikite 在城市区域采集了 n77 频段（3.7 GHz C波段）的 5G新空口 I/Q 样本数据集。Helikite 配备了软件定义无线电和 GPS接收机。我们使用 MATLAB 5G 工具箱解码 5G新空口 I/Q 样本，并展示了频谱图，用于呈现频谱占用、小区搜索，以及利用同步信号块中的主同步信号和辅同步信号进行同步；此外，还展示了通过同步信号块中的辅同步信号和物理广播信道解调参考信号测得的参考信号接收功率和参考信号接收质量。我们观察到主同步信号和辅同步信号的相关峰，并展示了参考信号接收功率和参考信号接收质量随 Helikite 海拔变化的情况。我们观察到，参考信号接收功率随海拔升高而增大，而参考信号接收质量与海拔的关系则不那么显著。此外，我们还讨论了 5G新空口的安全和隐私问题，包括其在监视、干扰和后量子时代攻击方面的脆弱性。

参考文献

[1] 联合国儿童基金会（UNICEF）。（2017年）马拉维启动人道主义无人机走廊。 [在线]。网址：https: //www。unicef。org/stories/humanitarian-drone-corridor-launched-malawi [2] 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10月。[3] K. Zhu、X. Xu 和 S. Han，“海量机器类通信网络中用于数据收集与计算的节能无人机轨迹规划”，载于*IEEE Globecom* 研讨会论文集（*GC Wkshps*），2018年，第 1–6 页。[4] S. R. Sabuj、A. Ahmed、Y. Cho、K.-J. Lee 和 H.-S. Jo，“认知无人机辅助超可靠低时延通信和海量机器类通信服务：能源效率与时延分析”，*IEEE Access*，第 9 卷，第 5011–5027 页，2020年。[5] S. Horsmanheimo、L. Tuomim¨aki、V. Semkin、S. Mehnert、T. Chen、M. Ojennus 和 L. Nyk¨anen，“智慧城市无人机服务的5G通信服务质量测量”，载于欧洲天线与传播会议（*EuCAP*），2022年，第 1–5 页。[6] G. Valecce、S. Strazzella 和 L. A. Grieco，“5G、移动边缘计算与机器人技术在智慧农业场景中的相互作用”，载于国际自组网与无线网络会议（*ADHOC-NOW*）论文集，卢森堡，卢森堡，2019年10月，第 549–559 页。[7] J. Liang、W. Liu、N. N. Xiong、A. Liu 和 S. Zhang，“面向工业物联网的智能可信无人机辅助代码分发5G系统”，*IEEE* 工业信息学汇刊，第 18 卷，第 4 期，第 2877–2889 页，2021年。[8] F. Al-Turjman 和 S. Alturjman，“面向行业应用的5G/物联网赋能无人机多媒体传输”，多媒体工具与应用，第 79 卷，第 13–14 期，第 8627–8648 页，2020年。

[9] J. Sae、R. Wiren、J. Kauppi、H.-L. Maattanen、J. Torsner 和 M. Valkama，“农村环境中的无人机公共 LTE 网络测量”，载于 IEEE 车辆技术会议论文集，吉隆坡，马来西亚，2019年4月，第 1–5 页。[10] 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 车辆技术会议论文集，悉尼，新南威尔士州，澳大利亚，2017年6月，第 1–6 页。[11] R. Amorim、H. Nguyen、J. Wigard、I. Z. Kov´acs、T. B. Sørensen、D. Z. Biro、M. Sørensen 和 P. Mogensen，“LTE 蜂窝网络中航空器造成的实测上行链路干扰”，IEEE 无线通信快报，第 7 卷，第 6 期，第 958–961 页，2018年12月。[12] S. J. Maeng、 ˙I. G¨uvenc.、M. Sichitiu、R. Dutta、O. Ozdemir 和 M. Mushi，“AERIQ：基于软件定义无线电的 LTE 同相/正交测量与分析框架，用于空地传播建模”，载于 IEEE 航空航天会议论文集，大天空，蒙大拿州，美国，2023年3月。[13] M. Heikkil¨a、V. Malkamo、P. Etel¨aaho、T. Kippola 和 M. Koskela，“面向三维5G网络超可靠低时延通信应用的时延验证方法”，载于欧洲天线与传播会议（EuCAP）论文集，2022年，第 1–5 页。[14] M. Lichtman、R. Rao、V. Marojevic、J. Reed 和 R. P. Jover，“5G 新空口干扰、欺骗与嗅探：威胁评估与缓解措施”，载于 IEEE 国际通信会议研讨会（ICC Workshops）论文集，美国密苏里州堪萨斯城，2018年5月，第 1–6 页。[15] Y. Arjoune 和 S. Faruque，“5G 新空口中的智能干扰攻击：综述”，载于计算与通信研讨会及会议（CCWC）论文集，美国内华达州拉斯维加斯，2020年1月，第 1010–1015 页。[16] F. Girke、F. Kurtz、N. Dorsch 和 C. Wietfeld，“迈向弹性5G：LTE 上行链路干扰实验评估的经验教训”，载于 IEEE 国际通信会议研讨会（ICC Workshops）论文集，中国上海，2019年5月，第 1–6 页。[17] M. I. Garcia Cid、J. ´Alvaro Gonz´alez、L. Ort´ız Mart´ın 和 D. Del R´ıo G´omez，“颠覆性量子安全技术”，载于国际可用性、可靠性与安全会议论文集，2022年8月，第 1–8 页。[18] V. Marojevic、I. Guvenc、R. Dutta、M. L. Sichitiu 和 B. A. Floyd，“无人机系统先进无线通信：5G 标准化、研究挑战与 AERPAW 架构”，IEEE 车辆技术杂志，第 15 卷，第 2 期，第 22–30 页，2020年6月。[19] S. Maeng、O. Ozdemir、H. Nandakumar、I. G¨uvenc.、M. Sichitiu、R. Dutta 和 M. Mushi，“使用 Helikite 监测和分析 6 GHz 以下频段的频谱活动”，载于国际通信系统与网络会议（COMSNETS）论文集，印度班加罗尔，2023年1月，第 857–862 页。[20] A. H. F. Raouf、S. J. Maeng、I. Guvenc、O. Ozdemir 和 M. Sichitiu，“不同高度下城市与农村环境中的频谱监测与分析”，已提交至 IEEE 车辆技术会议（VTC），2023年6月。[21] MathWorks。5G 工具箱。[在线]。网址：https:// www.mathworks.com/products/5g.html [22] O. Analytica，“气球事件推动美国国家防御战略”，Emerald 专家简报，第 oxan-db 号，2023年。[23] S. Sarkar、M. Buddhikot、A. Baset 和 S. K. Kasera，“DeepRadar：面向 CBRS 的深度学习环境感知能力传感器设计”，载于国际移动计算与网络会议论文集，2021年，第 56–68 页。[24] D. C. Sicker、P. Ohm 和 D. Grunwald，“网络研究期间监测涉及的法律问题”，载于 ACM SIGCOMM 互联网测量会议论文集，2007年，第 141–148 页。[25] V. Sathya、M. I. Rochman 和 M. Ghosh，“芝加哥授权辅助接入与无线保真部署的基于测量的共存研究”，IEEE 无线通信，第 28 卷，第 1 期，第 136–143 页，2020年。[26] M. I. Rochman、V. Sathya、N. Nunez、D. Fernandez、M. Ghosh、A. S. Ibrahim 和 W. Payne，“使用智能手机应用对芝加哥和迈阿密蜂窝网络部署进行比较研究”，2021年。[27] A. Narayanan、M. I. Rochman、A. Hassan、B. S. Firmansyah、V. Sathya、M. Ghosh、F. Qian 和 Z.-L. Zhang，“商用5G毫米波部署的比较测量研究”，载于 IEEE INFOCOM 2022——IEEE 计算机通信会议，2022年，第 800–809 页。[28] T. R. Raddo、S. Rommel、V. Land、C. Okonkwo 和 I. T. Monroy，“按需量子数据加密即服务：埃因霍温量子密钥分发网络测试平台”，载于国际透明光网络会议（ICTON）论文集，2019年，第 1–5 页。[29] G. Alagic、J. Alperin-Sheriff、D. Apon、D. Cooper、Q. Dang、J. Kelsey、Y.-K. Liu、C. Miller、D. Moody、R. Peralta 等，“NIST 后量子密码标准化进程第二轮状态报告”，美国商务部，美国国家标准与技术研究院，第 2 卷，2020年。