arXiv:2301.02380v1 [eess.SP] 6 Jan 2023

不同海拔下城市和农村环境中的频谱监测与分析

¨ ¨Amir Hossein Fahim Raouf*、Sung Joon Maeng*、Ismail Guvenc*、Ozg¨ur Ozdemir*和Mihail Sichitiu*
*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 amirh.fraouf@ieee.org，{smaeng,iguvenc,oozdemi,mlsichit}@ncsu.edu

摘要——**由于频谱资源稀缺，新技术不断涌现，且在射频频谱中运行的无线设备数量持续增长，导致数据拥塞和干扰。在本研究中，我们探讨海拔对 Helikite 在两种不同场景（即城市和农村环境）上空飞行时所获得的 6 GHz 以下频谱测量结果的影响。具体而言，我们旨在研究美国使用的多种长期演进（LTE）、5th 第五代移动通信（5G）和公民宽带无线电服务（CBRS）频段在上行链路和下行链路中的频谱占用情况，测量海拔最高达 180 米。结果表明，随着海拔升高，测量功率的均值通常也会增大，因为与附近基站之间的视距链路更容易形成。本文还提供了符合 SigMF 标准的频谱测量数据集，涵盖 100 兆赫至 6 吉赫之间的所有频段。**

索引词—**第五代移动通信、C 波段、公民宽带无线电服务、Helikite、长期演进、频谱监测、无人机（UAV）**。

I. 引言

无线通信服务和新技术的兴起，对射频频谱 [1]产生了巨大需求。当前无线网络 [2]面临的一个突出问题是频谱的可用性，以及干扰的增加 [3]。此外，近年来，人们越来越关注通过更积极地进行频率复用，在不引入额外频谱的情况下提高网络的链路容量 [3]。为了解和描述干扰问题，并识别频谱共享机会，有必要采用频谱感知技术开展频谱占用研究。

近期有多个案例凸显了理解频谱占用特性（包括非地面场景）的重要性，这有助于制定有效的频谱共享机制。美国启用 5th 代（5G）蜂窝服务，引起了使用航空业雷达高度计的商业航空公司和私人飞机群体的担忧。尽管分配给高度计的频段位于 4.2-4.4 吉赫之间，但由于设计不佳，目前的设备存在带外泄漏问题；也就是说，它们会超出分配给自己的频谱边界 [4]。具体而言，Verizon 和 AT&T 最近已开始在 3.7 吉赫至 3.8 吉赫的频谱范围内运行，该范围距离高度计频段有 400 兆赫。不过，对于某些飞机而言，这一间隔可能不足以确保安全着陆。此外，尽管 Verizon 和 AT&T 均已推迟启用各自部分网络，即各自的 5G C波段无线网络，直至 2023 年 7 月，但预计此后整个 3.7-3.98 吉赫 C 波段都可能用于 5G传输 [5]，，这将引发更多担忧。未来将在 3.1-3.55 吉赫频段部署的第五代移动通信网络与使用相同频谱的现有机载雷达之间，也存在类似的共存问题，涉及频谱共享。另一个近期引发争议的问题，是在 L波段（即 1-2 吉赫）使用地面全国性网络可能对 GPS 造成的干扰 [6]。

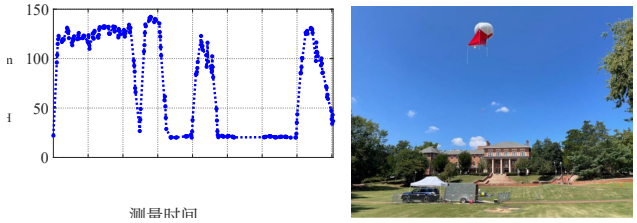
文献 [7] 总结了部分关于频谱占用的现有学术研究。在较新的研究中，[8] 提出了一种框架，用于捕获并建模短时频谱占用，以确定物联网（IoT）应用中的现有干扰。另一项研究 [9]，回顾了当前用于大型卫星网络的信道预测、频谱感知、信号检测、网络优化和安全领域的先进人工智能技术。在 [10]，中，作者利用随机几何研究并描述了共存的空中雷达与通信网络在频谱叠加和时分多址条件下的性能。在 [11],中，研究了共存地面网络产生的干扰对空中链路的影响；该链路可能是由无人机基站服务的空中小区的上行链路（UL）。通过考虑由地面干扰源构成的泊松场，研究人员描述了无人机所经历的聚合干扰。

本文通过对美国国家科学基金会 AERPAW平台在北卡罗来纳州罗利开展的实验测量数据进行后处理 [12]，分析城市和农村环境中不同美国蜂窝网络频段以及公民宽带无线电服务频段（CBRS）的频谱占用情况。此外，我们还研究了 Helikite高度对信号强度模式的影响。在第II节中，我们介绍数据结构以及测量活动的总体信息。第III 节和第IV 节分别展示城市和农村环境中多个 6 GHz 以下频段的频谱监测结果。第V节研究所考察频段的频谱占用随时间的变化。最后，第VI 节总结本文的结论。

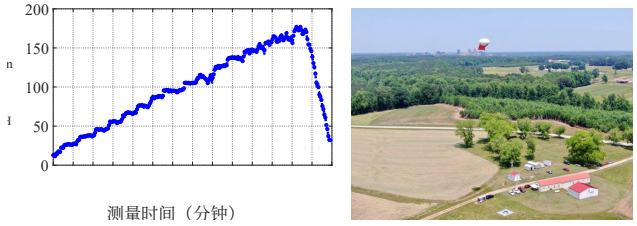
II. 数据结构

城市环境实验于2022年8月27日进行，一架 Helikite 飞至 140 米。农村环境实验中，Helikite 于2022年5月5日飞至海拔 180 米。机载安装了一台 NI USRP B205mini软件定义无线电

本研究部分由美国国家科学基金会（NSF）项目 CNS-1939334 及其用于研究非雷达检测区的补充资助支持。



（a）北卡罗来纳州立大学主校区（城市）中的实验场景。



(b) 北卡罗来纳州立大学莱克·惠勒试验场（农村环境）中的实验场景。

图 1：Helikite高度及以下环境中的实验场景：（**a**）城市环境，以及（**b**）农村环境。

表 I：美国长期演进和第五代移动通信频段概述。

技术	Band No	双工方式 Mode	上行频段（兆赫）	下行频段（兆赫）	运营商
LTE	12	FDD	698 - 716	728 - 746	AT&T、Verizon, T-Mobile
	13	FDD	777 - 787	746 - 756	Verizon
	14	FDD	788 - 798	758 - 768	AT&T, FirstNet
	41[1]	TDD	2496 - 2690	2496 - 2690	T-Mobile
5G	n5	FDD	824 - 849	869 - 894	AT&T, Verizon
	n71	FDD	663 - 698	617 - 652	T-Mobile
	n77	TDD	3700 - 3980	3700 - 3980	AT&T、Verizon、T-Mobile
CBRS	n48	TDD	3550 - 3700	3550 - 3700	北美洲

，可在 Helikite 上运行 Python 脚本，以所需的中心频率和采样率采集样本。数据集符合 SigMF 标准，包含不同海拔下 89 兆赫至 6 吉赫频段的频谱使用信息。 [13], [14] 数据包括时间、海拔、功率和 Helikite 的位置。测量设置的详细说明见 [15]。图1展示了 Helikite 在运行期间的高度。

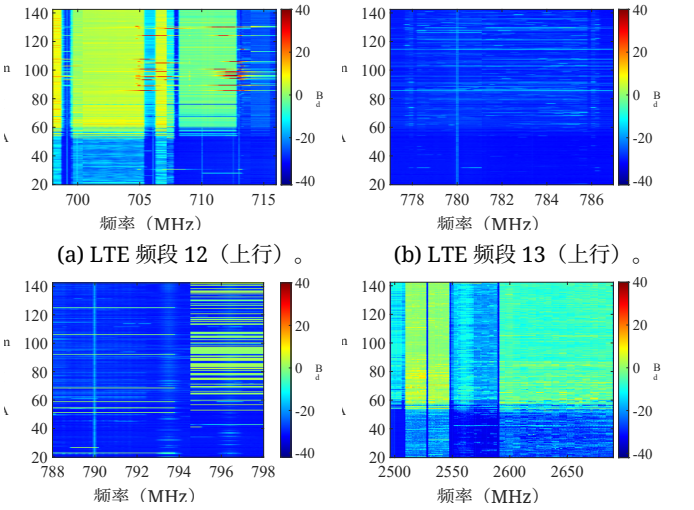
III. 城市频谱占用结果

本节介绍若干长期演进、第五代移动通信和公民宽带无线电服务频段的频谱占用结果。表I 根据美国所采用的技术，总结了一些主要蜂窝网络运营商的频谱分配情况 [16]。本文研究了各频段上行和下行链路频谱的带内总功率。

*A. LTE*频段—上行链路

图2展示了 LTE 频段 13、14、15 和 41 在上行频谱范围内的测量功率。可以看出，与 LTE 频段 13 和 LTE 频段 14 相比，LTE 频段 12 和 LTE 41 的频谱更加拥挤。值得一提的是，与其他 LTE 频段不同

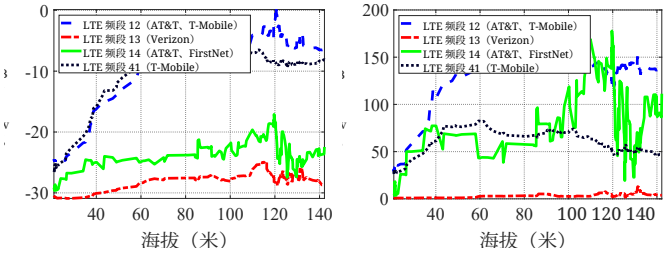
[1]值得一提的是，T-Mobile 的第五代移动通信 n41 也使用相同的频谱。



(a) LTE 频段 12（上行）。 (b) LTE 频段 13（上行）。

(c) 长期演进频段 14（上行）。 (d) 长期演进频段 41（时分双工上行链路/下行链路）。

图 2：城市环境下测得的长期演进上行功率。



(a) 均值。 (b) 方差。

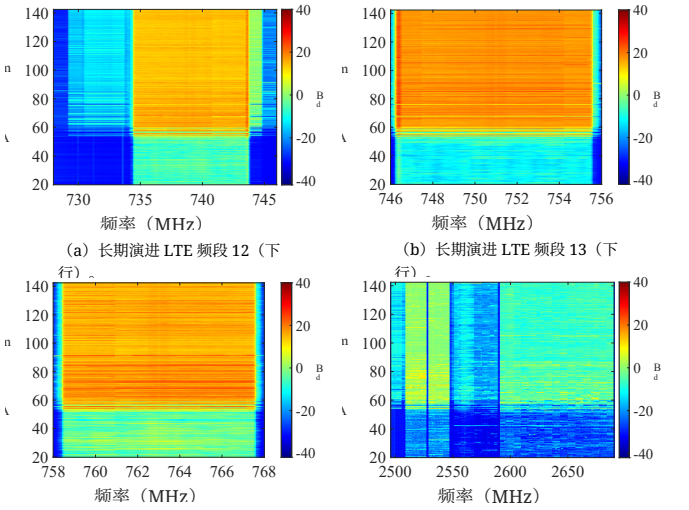
图 3：城市环境下长期演进频段 12、13、14 和 41（上行）的频谱占用与海拔的关系。

在所研究的频段中，LTE 41 采用时分双工（TDD）模式，同时包含上行和下行传输。图 3 展示了各 LTE 频段测量功率的均值和方差。从图3a中可以看出，通常测量功率的均值会随着海拔升高而增加。LTE 12和41频段的功率均值几乎相同，且远高于所研究的另外两个频段。请注意，频段 41 的带宽明显大于频段12，且同时包含上行和下行传输。从图 3b中可以看出，LTE 频段 13 的方差波动远小于其他频段。尽管 LTE 12 和 41 的均值表现相似，但 LTE 41 的方差低于 LTE 频段 12。

B. LTE 频段——下行链路

考虑不同 LTE 频段的下行频率范围，图4 展示了所考察频段的测量功率。可以明显看出，与上行频率范围相比，下行频率范围的频谱更加拥挤。尽管 LTE 13 和 14 的占用频谱扩展至整个范围，LTE 12 的主要频率使用范围为 735 - 745 兆赫。

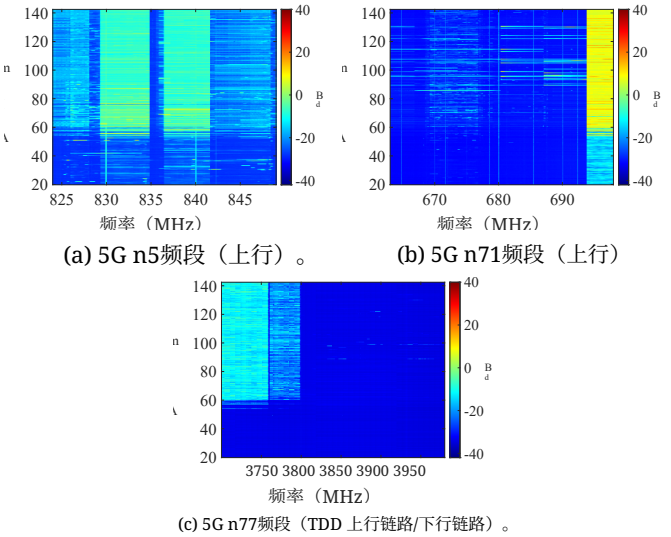
图 5 展示了测量功率的均值和方差随海拔的变化。如图5a所示，均值



（a）长期演进 LTE 频段 12（下行）。 （b）长期演进 LTE 频段 13（下行）。

(c) LTE 频段 14（下行）。 (d) LTE 频段 41（时分双工上行链路/下行链路）。

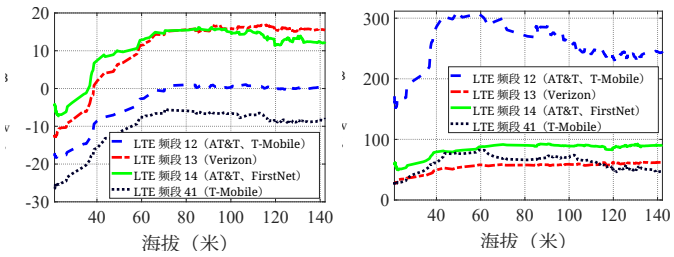
图 4：城市环境中的 LTE 下行功率测量值。



(a) 5G n5频段（上行）。 (b) 5G n71频段（上行）

(c) 5G n77频段（TDD 上行链路/下行链路）。

图 6：城市环境中的实测5G上行功率。



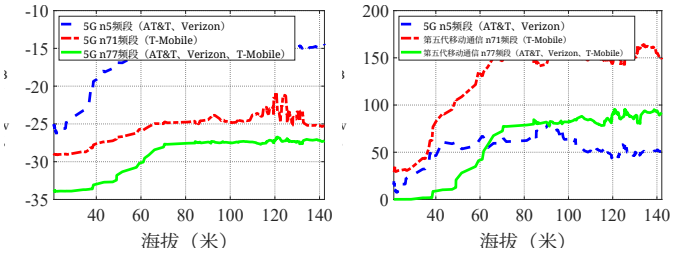
(a) 均值。 (b) 方差。

图 5：城市环境中 LTE 频段 12、13、14 和 41（下行）的频谱占用与海拔的关系。

测量功率的均值随着海拔升高而增大，直到接近 80 米。这是因为在高空，随着障碍物减少，接收到邻近小区信号的概率会增加，从而获得视距（LoS）。在更高的海拔（即高于 80 米）处，所研究的 LTE频段的均值基本保持不变。如图 5b所示，与 LTE 频段 12 相比，LTE 频段 13、14 和 41 的测量功率方差随海拔变化较小。通过观察图 4a中所示的 LTE 频段 12 的测量功率，可以找到这一现象的主要原因。似乎 LTE 频段 12 的部分频段未得到充分利用。

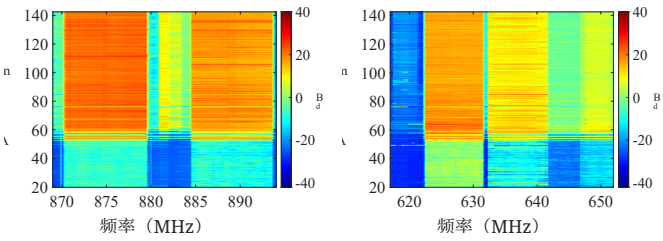
C. 5G 频段——上行

图 6展示了 5G 频段 n5、n71 和 n77 在上行频谱范围内的测量功率。结果表明，n77 的频谱主要占用 3700–3800 兆赫。还需注意，5G 频段 n5 和 n71 采用频分双工（FDD），而 5G 频段 n77 采用 TDD 模式。图 7展示了 5G 频段（上行）测量功率的均值和方差表现。如图 7a所示，由于前文提到的相同原因，测量功率的均值随着海拔升高而增加，最高接近 80 米



(a) 均值。 （b）方差。

图 7：城市环境中 5G n5、n71 和 n77 频段的频谱占用随海拔的变化（上行）。



（a）5G n5频段（下行）。 （b）5G n71频段（下行）。

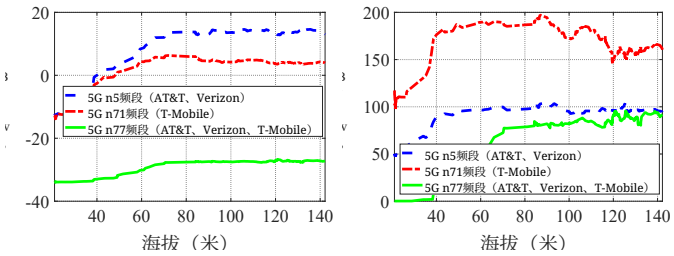
Fig. 8：城市环境中测得的 5G下行功率

环境。

如前所述。5G 频段 n5 的均值高于 n71 和 n77。如图 7b所示，5G 频段 n5 和 n77 的测量功率方差在海拔约 60 米处相交。随着海拔升高，n77 频段的方差持续增大。

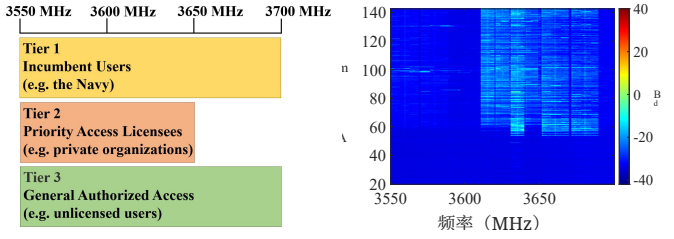
D. 5G 频段——下行

图 8 展示了考虑下行频率范围时，5G n5 和 n71 频段的测量功率。可以看出，870—880 MHz 和 885-894 MHz 的测量功率高于频谱的其余部分。图 9 显示了测量功率的均值和方差随海拔的变化。如图 9a所示，n5 和 n71 的测量功率均值相近，且显著高于 n77。



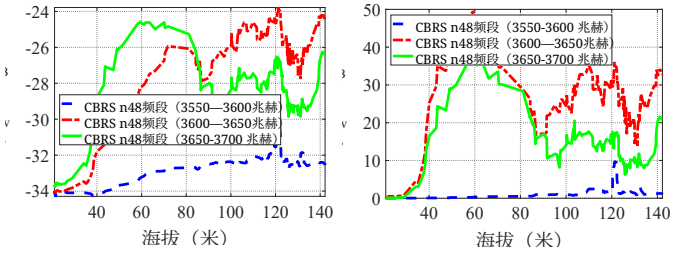
（a）均值。 （b）方差。

图 9：城市环境中，5G 频段 n5 和 n77（下行）的频谱占用与海拔的关系。



(a) (b)

图 10：（**a**）公民宽带无线电服务频谱和层级；以及（**b**）城市环境中测得的公民宽带无线电服务频段 n48 功率（TDD 上行链路/下行链路）。



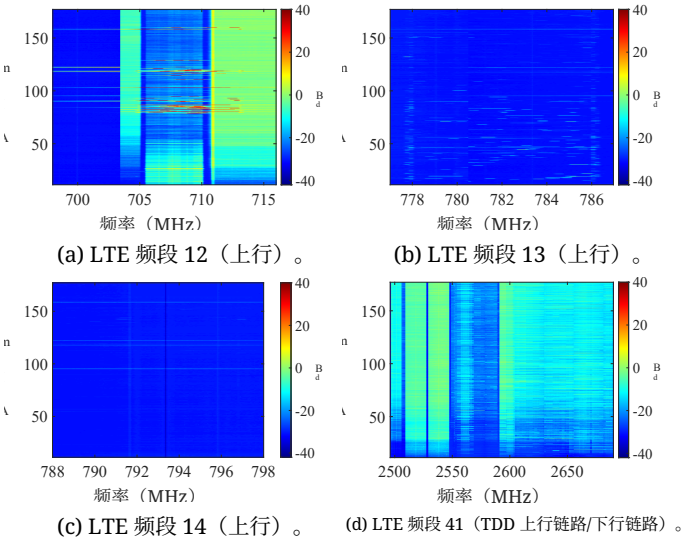
（a）均值。 (b) 方差。

图 11：城市环境中公民宽带无线电服务频段的频谱占用随海拔变化。

对于所考虑的频段，均值随海拔升高而增加，直至接近 80 米。如图 9b所示，n77 测量功率的方差起初较小，随后随海拔升高而增大，接近 n5 的方差值。与其他 5G 频段相比，n71 频段在所有测量海拔下的方差都较高。

*E. CBRS*频段

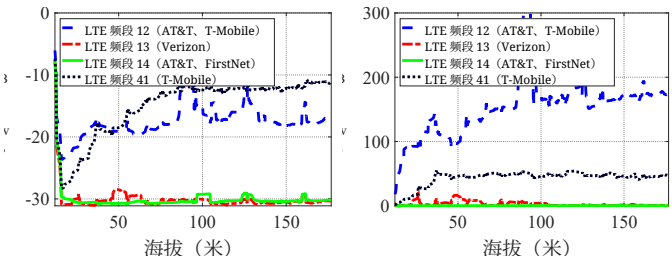
图 10a 展示了 CBRS 频谱，其中划分了三个用户层级。图 10b 展示了 CBRS n48频段的测量功率。与 LTE 41 和第五代移动通信 n77频段类似，n48 也采用 TDD 模式。如图所示，频谱主要占用 3610—3690 兆赫的范围。在图 11 中，我们研究了测量功率的均值和方差随海拔的变化，同时将 CBRS 频段划分为三个等份。如图所示，第一部分（即 3550—3600 兆赫）的测量功率均值和方差低于其他部分。第三部分（即 3650—3700 兆赫）的均值逐渐增大



(a) LTE 频段 12（上行）。 (b) LTE 频段 13（上行）。

(c) LTE 频段 14（上行）。 (d) LTE 频段 41（TDD 上行链路/下行链路）。

图12：农村环境中的长期演进上行功率测量值。



(a) 均值。 (b) 方差。

图13：农村环境中 LTE 频段 12、13、14 和 41（上行）的频谱占用随海拔的变化。

随着海拔升高，直至 60米，之后则下降。然而，第二部分（即 3600—3650兆赫）的均值随着海拔升高而持续增大。

IV. 农村频谱占用结果

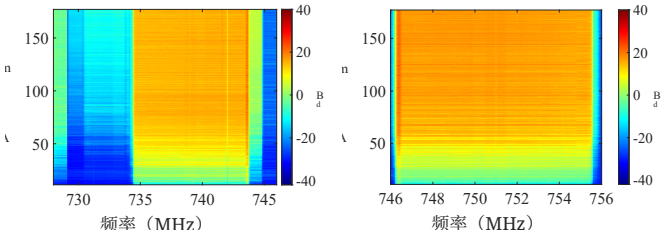
本节针对与上一节相似的频段，通过考察农村环境下的实验结果，研究频谱占用及其特征。

A. LTE 频段—上行链路

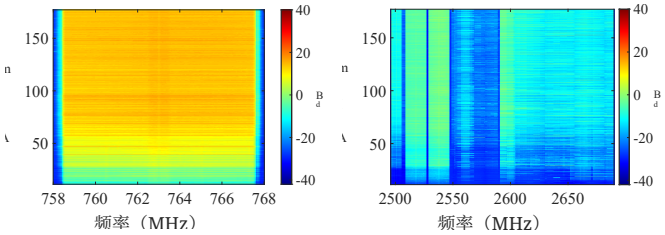
图12 展示了针对频段 13、14、15 和 41 的上行频谱测量功率。可以看出，与 LTE 13 和 14 频段相比，LTE 12和41频段的频谱更加拥挤。图中给出了各个 LTE 频段测量功率的均值和方差。 13。与城市环境（参见图 3a）相比，LTE 13 和 14 频段的均值远高于所考虑的另外两个频段。

B. LTE 频段——下行链路

考虑不同 LTE 频段的下行频率范围，图 14 展示了所研究频段的测量功率。与城市环境中的结果相同，农村环境中的下行频谱比上行频谱更拥挤。图 15 展示了均值

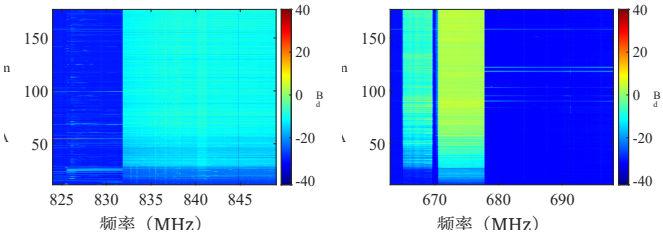


（a）LTE 频段 12（下行）。 (b) 长期演进频段13（下行）。

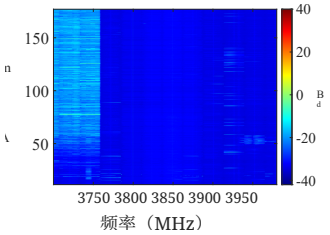


(c) 长期演进频段 14（下行）。 (d) 长期演进频段 41（时分双工上行链路/下行链路）。

图 14：农村环境下测得的 LTE 下行功率。

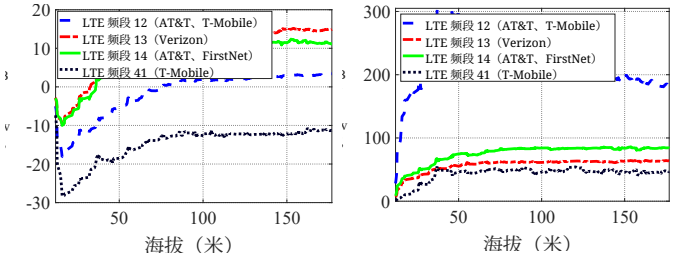


(a) 5G n5频段（上行）。 (b) 5G n71频段（上行）。



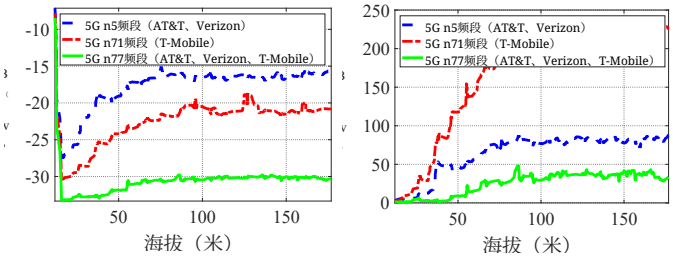
(c) 5G n77频段（时分双工上行链路/下行链路）。

图 16：农村环境下测得的 5G上行功率。



(a) 均值。 (b) 方差。

图 15：农村环境中 LTE频段 12、13、14 和 41（下行）的频谱占用与海拔的关系。



(a) 均值。 (b) 方差。

图 17：农村环境下 5Gn5 和 n77频段（上行）的频谱占用随海拔的变化。

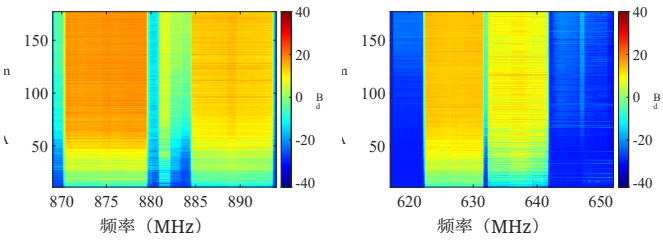
和测量功率随海拔变化的方差。从图 15a可以看出，测量功率的均值随海拔升高而增大，直至 80 米；在更高海拔时则几乎保持不变。LTE频段 13、14 和 41 的方差表现相似，而 LTE 频段 12 对应的曲线则先随海拔升高而增大，直至 40 米，之后开始下降。

C. 5G 频段——上行

图 16 展示了 5G n5、n71 和 n77频段在上行频谱范围内的测量功率。结果表明，n77 的频谱比 n5 和 n71 的频谱更不拥挤。图 17展示了 5G 频段（上行）测量功率的均值和方差。如图 17a所示，n77 的测量功率均值几乎不受海拔影响，而 n5 和 n71 频段的测量功率均值则随海拔升高而增大。如图 17b所示，与其他 5G 频段相比，n71 的测量功率方差较大。

D. 5G 频段——下行

图 18展示了考虑下行频率范围时第五代移动通信 n5 和 n71 频段的测量功率。与城市情况类似，可以看到，在农村环境中，870



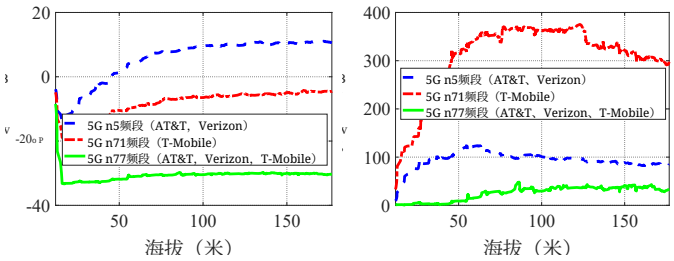
(a) 5G n5频段（下行）。 (b) 5G n71频段（下行）。

图 18：农村环境下测得的5G下行功率。

- 880 MHz 和 885-894 MHz 的功率高于频谱中的其他部分。图19 展示了测量功率的均值和方差随海拔的变化情况。如图19a所示，n77频段的测量功率均值在不同海拔下几乎保持不变，而 n5 和 n71 频段的测量功率均值则随着海拔升高而增加，在海拔接近 80 m 时达到较高水平。如图19b所示，第五代移动通信 n71 频段测量功率的方差高于 n5 和 n77。

*E. CBRS*频段

图20 展示了农村环境中 CBRS n48频段的测量功率。可以看出，频谱不那么



(a) 均值。 (b) 方差。

图19：农村环境中 5G 频段 n5 和 n77（下行）的频谱占用随海拔的变化。

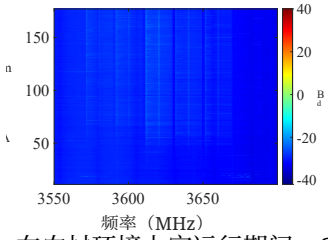
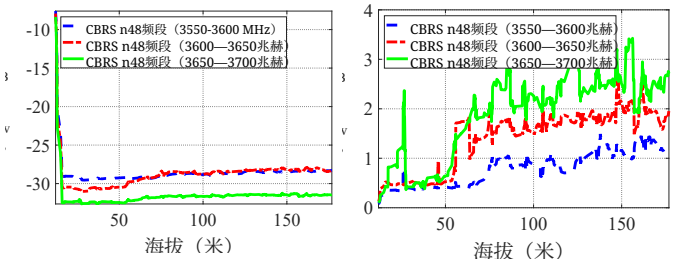


图20：Helikite 在农村环境上空运行期间，CBRS 频段 n48（TDD 上行链路/下行链路）的测量功率。



(a) 均值。 (b) 方差。

图 21：农村环境中 CBRS 频段的频谱占用随海拔的变化。

拥挤，与农村环境相比。在图21中，我们研究了测量功率的均值和方差随海拔的变化情况。可以观察到，所考虑的三个频段的测量功率均值几乎相同，并且随着海拔升高保持不变。此外，与其他正在考虑的频段相比，方差也仅有轻微波动。

V. 时间 E 频谱占用的域分析 NCY

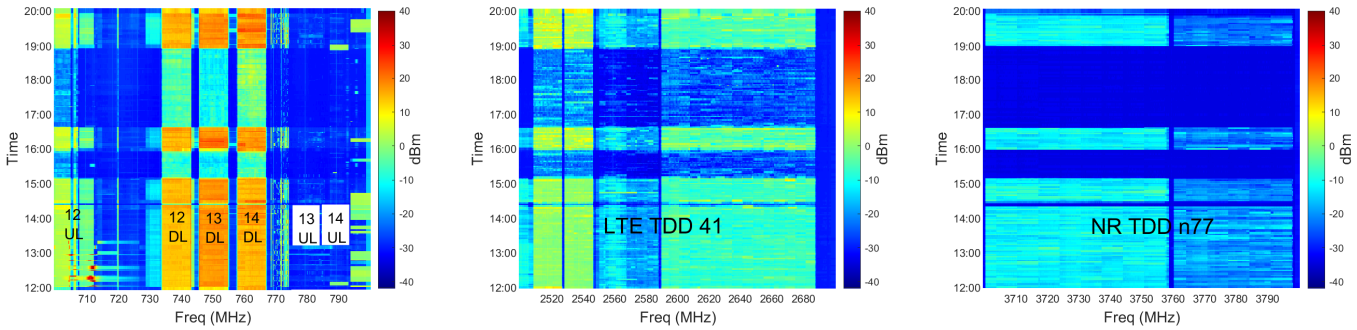
本节重点关注 LTE 和 NR 信号的频谱占用随时间的变化，而上一节介绍了频谱对海拔的依赖关系。在 Helikite 于城市环境中进行了约 8 小时的测量期间，我们观察到了信号强度的变化。本节仅关注这些城市环境中的测量结果。

图 22 展示了 Helikite 的频谱监测结果。x 轴表示监测的频谱范围，y 轴表示测量的时间戳，以小时和分钟标示。在图 22a中，我们采集了 700 MHz 至 800 MHz 的频率范围，其中包含 LTE频分双工频段 12，13、14（见表I）。首先，我们可以清楚地观察到一系列已占用的 10 MHz 带宽的下行频段 12、13 和 14。另一方面，上行频段的信号强度低于下行频段，且上行频段 13 和 14 几乎未被占用。我们还观察到，在某些时段，整个观测频率范围内的信号强度都会变低，这与图 1中 Helikite 海拔较低的时段相吻合。这表明，当 Helikite 的海拔低于某一高度时，遮挡会导致接收信号强度骤降。此外，在图 22b 和图 22c中也观察到了这一趋势。在图 22b中，我们采集了 2500 MHz - 2700 MHz 的频率范围，其中包含 LTE TDD 41 频段。由于载波频率高于图 22a，我们观察到该 LTE 频段覆盖了更宽的带宽：20 MHz、40 MHz 和 100 MHz。此外，我们还观察到其接收信号强度低于图 22a中的频率范围。这是因为载波频率越高，接收信号的路径损耗越大；在图 22c所示的更高载波频率范围内也观察到了这一现象。具体而言，图 22c展示了 NR TDD n77 频段（3700 MHz - 3800 MHz）的频谱占用情况。我们可以观察到 40 MHz 和 60 MHz 带宽的信号。

图23 展示了测量期间捕获的 LTE 和 NR 频段接收信号强度的变化。在图 23a中，我们观察到图 22a所示的 LTE FDD 上行/下行 12 频段。图中曲线表示整个频段内接收信号强度的均值，曲线周围的阴影区域表示信号强度标准差的一半。可以观察到，上行信号强度低于下行，而上行频段内的信号强度变化大于下行，这可从较高的标准差值看出。图23b 和图 23b展示了图 22b和图22c所示的 LTE TDD 41 和 NR TDD 77 频段接收信号强度变化。可以观察到，NR TDD 77 频段的信号强度波动大于 LTE 12 和 41 等其他频段。

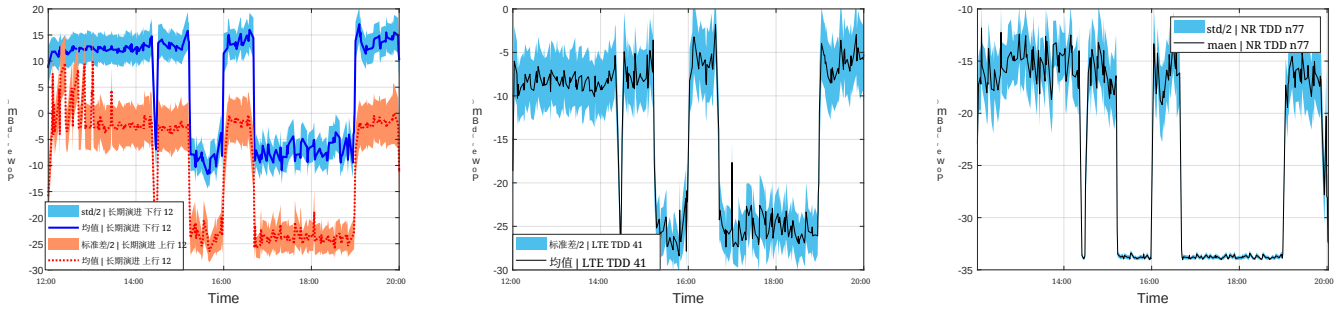
VI. 结论

本文使用 Helikite 在城市和农村环境上空飞行所测得的数据，研究了多个 6 GHz 以下的 4G、第五代移动通信和公民宽带无线电服务频段的频谱测量情况。我们对上行和下行频谱占用情况均进行了调查。结果表明，通常情况下，随着海拔升高，测量功率的均值也趋于增加，这是由于视距概率增大，至少在本文所考察的最大海拔范围内如此。此外，在两种环境中，下行频率范围的频谱都比上行频率范围更拥挤。研究还发现，与城市环境相反，在农村环境中，LTE 13 和 14 频段的均值远高于所考察的另外两个频段。此外，城市环境下 CBRS 频段的表现显示，其活动程度高于农村环境。



(a) 700 MHz - 800 MHz。 (b) 2500 MHz - 2700 MHz。 (c) 3700 MHz - 3800 MHz。

图 22：测量时间内的频谱监测。我们观察到不同长期演进和新空口频段的占用情况；当 Helikite 漂浮在高空时，接收信号强度很强。



（a）LTE FDD 12 频段。 （b）LTE TDD 41 频段。 （c）NR TDD 77 频段。

图 23：测量时间内不同长期演进和新空口频段的接收功率。实线表示信号功率的均值，阴影区域表示信号强度标准差（std）的一半，用于展示特定频段内信号强度的变化。

参考文献

[1] M. H. Islam, C. L. Koh, S. W. Oh, X. Qing, Y. Y. Lai, C. Wang, Y.- C. Liang, B. E. Toh, F. Chin, G. L. Tan 等，《新加坡频谱调查：占用测量与分析》，载于 *IEEE* 认知无线电导向的无线网络与通信国际会议论文集，2008年，第1–7页。[2] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui 和 T. Watteyne，《了解 LoRaWAN 的局限性》，*IEEE* 通信杂志，第55卷，第9期，第34–40页，2017年。[3] 爱立信，《频谱受限网络中的频率复用》，2022年10月，访问日期：2023年1月4日。[在线]。网址：https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/microwave-outlook/articles/maximizing-capacity-in-spectrum-limited-networks [4] D. Roberson，《本不该发生的第五代移动通信/航空危机》，https://www.linkedin.com/pulse/5g-aviation-crisis-never-should-have-happened-dennis-roberson/，2022年，访问日期：2023年1月4日。[5] W. Bellamy，《美国航空公司开始为空客A320飞机的无线电高度表安装5G C波段滤波器》，2022年9月，访问日期：2023年1月4日。[在线]。网址：https://www.aviationtoday.com/2022/09/14/us-airlines-begin-installing-5g-c-band-filter-radio-altimeters-airbus-a320s/

[6] K. Dennehy，《Ligado因干扰争议取消第五代移动通信网络部署》，2022年，访问日期：2023年1月4日。[在线]。链接：https://locationbusinessnews.substack.com/p/ligado-scraps-5g-network-launch-amid [7] Y. Chen 和 H.-S. Oh，《认知无线电基于测量的频谱占用建模综述》，*IEEE*通信调查与教程，第18卷，第1期，第848–859页，2014年。[8] B. Al Homssi、A. Al-Hourani、Z. Krusevac 和 W. S. Rowe，《用于感知和建模物联网频段干扰的机器学习框架》，*IEEE*物联网期刊，第8卷，4471，2020年6月，第4461–页。[9] B. A. Homssi、K. Dakic、K. Wang、T. Alpcan、B. Allen、S. Kandeepan、A. Al-Hourani 和 W. Saad，《面向下一代巨型卫星网络的人工智能技术》，arXiv预印本 arXiv:2207 00414，2022年。[10] S. J. Maeng、J. Park 和 I. Guvenc，《采用不同多址协议的无人机雷达与通信网络共存分析》，arXiv预印本 arXiv:2211.16614，2022年。[11] M. M. Azari、F. Rosas、A. Chiumento、A. Ligata 和 S. Pollin，《随机分布的地面干扰源环境下无人机蜂窝的上行链路性能分析》，载于IEEE无线通信与网络会议（WCNC）论文集，2018年，第1–6页。[12] V. Marojevic、I. Guvenc、R. Dutta、M. L. Sichitiu 和 B. A. Floyd，《无人机系统先进无线技术：5G标准化、研究挑战与AERPAW架构》，IEEE Vehicular Technology Magazine，第15卷，第2期，第22–30页，2020年。[13] AERPAW，《Helikite频谱测量（Packapalooza）》，2022年8月，访问日期：2023年1月4日。[在线]。链接：https://sites.google.com/ncsu.edu/aerpaw-wiki/aerpaw-user-manual/4-sample-experiments-repository/4-4-data-repository/aerpaw-nrdz-research/august-2022-helikite-spectrum-measurements-packapalooza [14] ——，《Helikite频谱测量》，2022年5月，访问日期：2023年1月4日。[在线]。链接：https://sites.google.com/ncsu.edu/aerpaw-wiki/aerpaw-user-manual/4-sample-experiments-repository/4-4-data-repository/aerpaw-nrdz-research/may-2022-helikite-spectrum-measurements [15] S. J. Maeng、O. Ozdemir、H. Nandakumar、I. Guvenc、M. Sichitiu、R. Dutta 和 M. Mushi，《使用Helikite对6 GHz以下频段进行频谱活动监测与分析》，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。[16] S. J. Maeng、I. G¨uvenc、M. Sichitiu、B. A. Floyd、R. Dutta、T. Zajkowski、¨O. ¨Ozdemir 和 M. J. Mushi，《采用自主空中与地面频谱传感器的国家无线电动态区概念》，载于IEEE国际通信会议研讨会（ICC研讨会），2022年，第687–692页。