



专题：无人机空地无线通信技术

面向空天应急通信系统的空地连续覆盖技术研究与应用

陈盛伟, 李帆, 杨光平, 周剑, 苏郁

(中国移动(成都)产业研究院, 四川 成都 610213)

摘要: 为了解决大型固定翼无人机应急基站覆盖范围小、覆盖不连续的问题, 提出一种无人机应急基站连续覆盖的设计方案。通过对机载基站单天线覆盖能力的分析, 提出内侧天线加边缘天线的多幅天线覆盖方案, 并结合无人机飞行的滚转角、俯仰角等参数, 设计保证连续覆盖的多天线挂装的安装方案。根据 3GPP 传播损耗模型进行链路预算, 根据连续覆盖面积需求, 规划无人机飞行方案。仿真和飞行测试结果表明, 所提方案能在不使用云台智能控制天线角度的情况下, 实现空中移动基站对地面 50 km^2 面积的连续覆盖。

关键词: 应急通信; 连续覆盖; 天线方案; 传播损耗

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022241

Research and application of air-to-ground continuous coverage technology for air-space emergency communication system

CHEN Shengwei, LI Fan, YANG Guangping, ZHOU Jian, SU Yu

China Mobile Chengdu Institute of Research and Development, Chengdu 610231, China

Abstract: To solve the problem of small coverage area and discontinuous coverage of large fixed-wing aerospace emergency base stations, a design scheme for continuous coverage of UAV emergency base stations was proposed. Based on the analysis of the coverage capability of the single antenna of the airborne base station, a multi-antenna coverage scheme with inner antenna plus edge antenna was proposed. Taking the roll angle, pitch angle and other parameters of the UAV flight into consideration, the installation plan of multi-antenna mounting that guarantees continuous coverage was designed. Then the link budget was carried out according to the 3GPP propagation loss model, and the UAV flight plan was planned according to the continuous coverage area requirements. Simulation and flight test results show that the proposed scheme can achieve 50 km^2 continuous signal coverage of the ground by the mobile base station on the UAV without using the intelligent control of the antenna angle of the PTZ.

Key words: emergency communication, continuous coverage, antenna scheme, propagation loss

0 引言

我国是一个自然灾害多发的国家,根据应急管理部发布的我国 2021 年全国自然灾害的情况,全年各种自然灾害共造成 1.07 亿人次受灾,因灾死亡失踪 867 人,倒塌房屋 16.2 万间,农作物受灾面积 11 739 千公顷,直接经济损失 3 340.2 亿元^[1]。

当地震、洪水、泥石流等大型自然灾害发生时,可能会造成受灾地区道路、通信、电力的中断,即“三断”。灾后受灾群众应急通信需求会急速上升,救援人员为了迅速了解受灾情况,及时进行救援需要通信通畅^[2]。灾后 72 h 是抢险救援的黄金时间,快速恢复通信,及时、准确地传递灾区信息,便于指挥者更好进行决策,更好地保护人民群众的生命财产安全。

传统的应急通信方案包括应急通信车、卫星电话等^[3-4]。应急通信车主要解决大型活动场景的通信容量问题,在我国已经广泛配备,是最为常见的应急通信设备之一。但是在“三断”场景下,应急通信车会受交通和道路影响,无法迅速到达受灾地区。卫星电话是一种特殊的通信终端,通过卫星通信系统进行信息传输,需要专用终端,而且带宽有限,不利于传输视频和图片,无法广泛配备^[5-6]。卫星通信背包(以下简称:卫通背包)基站是一种集成移动基站和卫星通信收/发设备的轻量化应急通信设备,整机重量可控制在十几千克内,可单兵携带,快速开通。设备可内置电池,无须外部供电。用户通过普通手机接入,不需要专有终端。在 2022 年 3 月东方航空坠机事故的搜救现场,中国移动开通卫通背包基站为救援人员提供通信保障^[7]。卫通背包设备具有集成度高、开通方便的优点,但是覆盖范围有限,需要通过车辆或单兵携带到灾区附近,不适合“三断”情况下的应急保障。

随着近年来应急通信领域研究的飞速发展,涌现一批更灵活、便捷的空天应急通信系统。

系留无人机应急通信系统通过光电复合线缆进行地面电源和通信设备的数据传输。由于系留无人机通过地面电源进行供电,因此能够提供长时间不间断的空中应急通信保障^[8]。相对应急通信车,系留无人机应急基站升空高度可达 200 m 以上,并可根据保障场景调节升空高度,覆盖面积可达数十甚至上百平方千米。系留无人机基站相对传统应急通信车覆盖范围更大、更加便捷,但是系留无人机需要由应急通信车搭载到灾区附近进行升空,因此同样会受到交通和道路的影响,不适合“三断”情况下的应急保障。

与系留无人机应急基站类似,近年来另一种系留气球基站也有一定范围的应用。无人气球依靠填充氦气驻空,搭载基站设备,可实现对地面的大范围覆盖。谷歌 Loon 气球项目实现通过 7 个不同的气球实现近 1 000 km 范围的信号覆盖,并应用于秘鲁、波多黎各的灾后应急通信中^[9]。云南移动研发的“5G 彩云一号”无人飞艇基站于 2021 年 9 月顺利完成试验飞行测试,覆盖范围可达 100 km²^[10]。但是无人气球基站机动性较差,只能实现升空地点附近的信号覆盖。

上述空天应急通信方案相对传统应急通信方案具有一定的灵敏性,但是在大型自然灾害发生造成“三断”的情况下,仍会受道路、交通等因素制约,难以迅速到达灾区。

大型固定翼无人机空天一体化应急通信方案示意图如图 1 所示,可以弥补上述方案的短板^[11]。空天一体化应急通信的系统包括地面、机载、空天三大部分。机载部分由固定翼航空器携带通信载荷作为一个空中基站。灾区地面基站被摧毁的情况下,空中基站可迅速飞抵灾区上空,为灾区民众和救援人员进行通信覆盖^[12]。空天一体化应急通信系统具有响应快、通信持续时间长、地面覆盖好、覆盖面积大等特点,成为应急通信系统的研究热点^[13-14]。

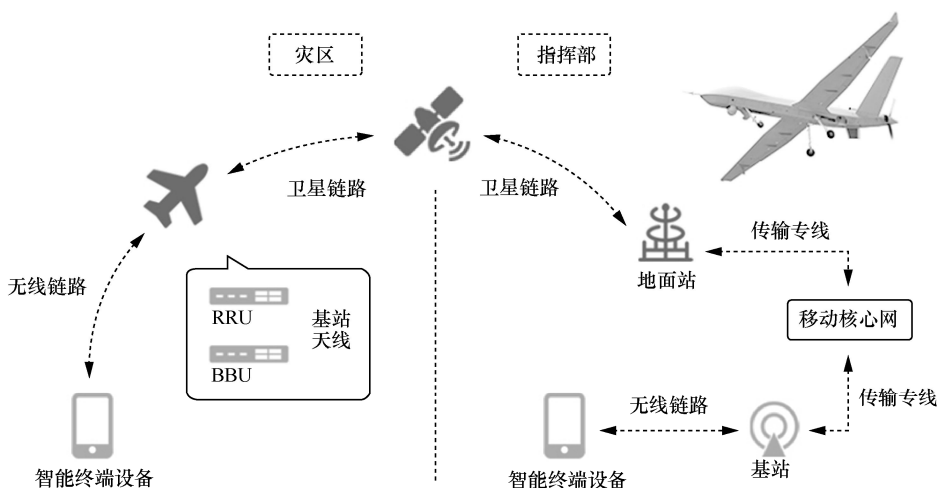


图1 大型固定翼无人机空天一体化应急通信方案示意图

目前业内空天基站的方案是把通信基站直接挂载到无人机上,飞机在目标区域上空进行盘旋,实现空对地覆盖^[15]。无人机的位置是不断变化的,所以地面上的可用信号覆盖区域随着固定翼航空器在空中的位置变化以及飞行姿态变化而移动,导致目标区域只有很小的一部分信号可以随着无人机的飞行实现连续覆盖,甚至完全不存在连续覆盖区域。本文的连续覆盖,是指业务层面的连续覆盖,即对地面上需要信号覆盖的某一点P,在空中基站整个盘旋作业过程中,都有满足基本通话和数据连接能力的信号覆盖。对于整个覆盖区域,要求95%以上点位的参考信号接收功率(reference signal receiving power, RSRP) ≥ -110 dBm^[16-17]。

覆盖不连续会导致地面通信出现信号时强时弱、频繁掉话等,对于应急通信来说是致命的缺陷^[18-19]。因此,如何设计对地覆盖方案,实现固定翼无人机通信基站对指定区域的连续覆盖,是空天基站方案的研究重点。

1 系统模型

1.1 单天线设计方案

目前空天基站的方案通常采用在无人机上搭

载单天线的方案,如图2所示。设飞机飞行高度为 h ,飞行轨迹是以D为圆心、半径为 R 的圆,天线的下倾角为 α (这里的下倾角指机腹与机载天线之间的夹角,不包含无人机盘旋时机身倾斜角),天线的半功率角为 β ,飞机滚转角为 γ ,E是天线可以覆盖的最远点,B是天线可以覆盖的最近点,A为飞机的飞行轨迹在地上的投影点,则有:

$$AE = h \cdot \tan(\alpha + \beta - \gamma) \quad (1)$$

$$AB = h \cdot \tan(\alpha - \beta - \gamma) \quad (2)$$

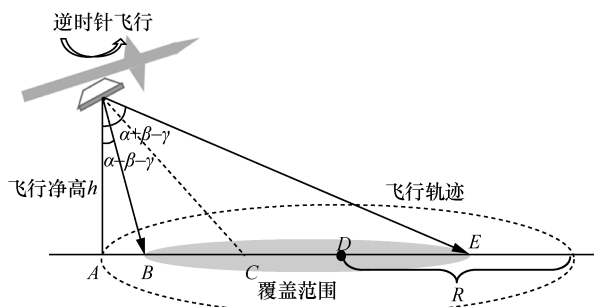


图2 单天线设计方案示意图

无人机沿着半径 R 的圆盘旋的过程中,无人机飞到A点正上方时,天线对地覆盖范围为BE。无人机在盘旋过程中,如对地形成连续覆盖区域,要求 $AE > R$,此时,以D为圆心,DE为半径的

区域形成连续覆盖区域。存在连续覆盖面积情况下，可以得到天线下降角为：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{DE + R}{h}\right) - \beta + \gamma \quad (3)$$

通过对连续覆盖区域的分析可知，单天线的情况下，空对地的覆盖范围取决于飞行高度、天线半功率角、飞机滚转角等因素，空对地覆盖范围十分有限。一般情况可以通过增加飞机飞行高度提高覆盖范围，但是无人机飞行高度一般有一定限制，同时飞行高度过高，会导致信号衰减大，达到地面的信号强度较弱，覆盖效果不理想。

1.2 多天线覆盖方案

单幅天线覆盖范围有限，难以实现对地面的连续覆盖，因此提出通过设计多天线方案解决连续覆盖问题。定义方向朝向圆心的基站天线为内侧天线，定义方向朝向飞行轨迹在地面投影的边缘位置的基站天线为边缘天线。在无人机上配置多副内侧天线和边缘天线，内侧天线为 $ANT_1, ANT_2, \dots, ANT_n$ ，外侧天线为 $ANT \sim 1, ANT \sim 2, \dots, ANT \sim n$ 。

通过内侧天线和边缘天线，在不需要空中基站作业过程中做任何物理变动（如实时调整天线角度）的前提下，实现对地面的连续覆盖。

水平和垂直半功率角差异大的天线设计方案示意图如图 3 所示，记内侧天线发射方向朝固定翼航空器盘旋轨迹内侧偏离 ε_n （天线面水平角度，即方位角），边缘天线发射方向朝固定翼航空器盘旋轨迹内侧偏离 ε_n 。内侧天线 1 下降角为 α_1 ，内侧天线 n 的下倾角在 α 的基础进行调整，以弥补在地面的连续覆盖区域是一个狭长小面积区域的缺点。内侧天线的垂直半功率角为 β_n 。边缘天线的下降角为 α_n ，垂直半功率角为 β_n 。

固定翼航空器俯仰角为 θ ，固定翼航空器飞行高度为 h 。

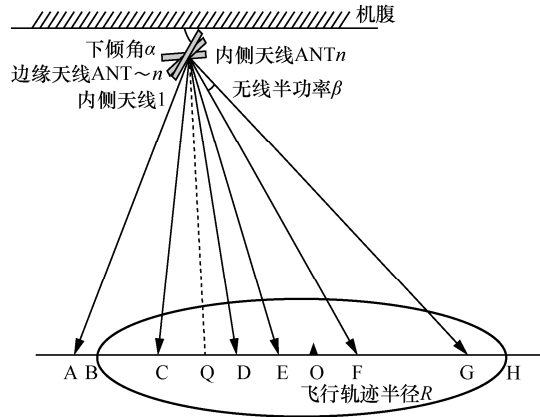


图 3 水平和垂直半功率角差异大的天线设计方案示意图

O 点是连续覆盖目标区域的几何中心点位置，OB 为飞行轨迹半径 R 。相对 O，G 是内侧天线所能覆盖最远点，C 是内侧天线所能覆盖最近点，A 是边缘天线所能覆盖最远点，D 是边缘天线所能覆盖最近点。

理论上要求 $OG > 0$ ，并且 $OC > 0$ ，否则没有连续覆盖区域。为了达到连续覆盖效果，要求 $OG \geq R$ 、 $OA \geq R$ ，并且边缘和内侧天线的覆盖范围有重叠，也就是 $OC > OD$ 。

连续覆盖面积近似为：

- 当 $OA \geq OG$ 时，信号连续覆盖以 OG 为半径的圆面积；
- 当 $OA < OG$ 时，信号连续覆盖面积为以 OA 为半径的圆面积。

$$OG = h \cdot \tan(\alpha_1 + \beta_1 - \gamma) - R \quad (4)$$

其中， OG 是地面目标覆盖区域几何中心 O 到内侧天线覆盖最远距离 G 的长度。

因此内侧天线 1 下降角为：

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{OG + R}{h}\right) - \beta_1 + \gamma \quad (5)$$

内侧天线 ANT_n 的下倾角为：

$$\alpha_n = \alpha_{(n-1)} - n\beta_n \quad (6)$$

边缘天线的下降角需结合航空器滚转角：



$$\alpha_{-1} = \arctan\left(\frac{OA-R}{h}\right) - \beta_{-1} - \gamma \quad (7)$$

边缘天线 ANT~ n 的下倾角为:

$$\alpha_{-n} = \alpha_{-(n-1)} + n\beta_{-n} \quad (8)$$

定义天线在垂直方向与地平面的夹角为 ξ_n , 则 $\xi_n = -\theta$, 即垂直方向上天线需抵消掉飞机俯仰角的影响, 保持和地面水平。

从而根据式 (6)、式 (8), 可以确定覆盖的具体位置, 并获得天线的下倾角, 空中基站扇区天线的下倾角设计符合此要求。

2 连续覆盖方案

2.1 无人机飞行方案

设无人机飞行净高为 h , 飞行半径为 r , 覆盖半径为 R , 覆盖最远距离为 d , 覆盖距离示意图如图 4 所示, H 、 r 、 R 和 d 之间需满足:

$$d^2 \geq H^2 + (r+R)^2 \quad (9)$$

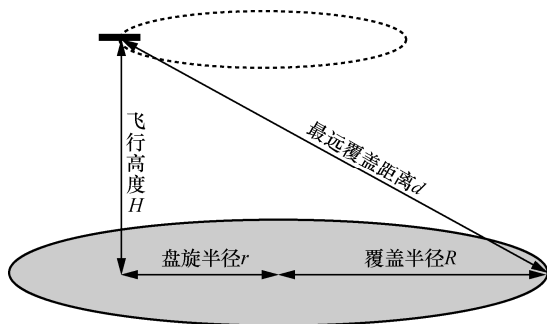


图 4 覆盖距离示意图

在最远覆盖距离满足 $\leq 6\,500\text{ m}$ 的条件下, 可以得到不同覆盖半径的飞行净高和飞行半径。

2.2 天线挂装方案

在进行天线挂装方案设计时, 首先考虑一个内侧天线和一个外侧天线的覆盖满足要求, 两个天线的覆盖边缘示意图如图 5 所示。图 5 中双实线和双虚线分别表示外侧和内侧天线的覆盖范围, a 、 b 、 c 、 d 和 w 、 x 、 y 、 z 点分别表示两根天线在 4 个方向上的边缘覆盖点。

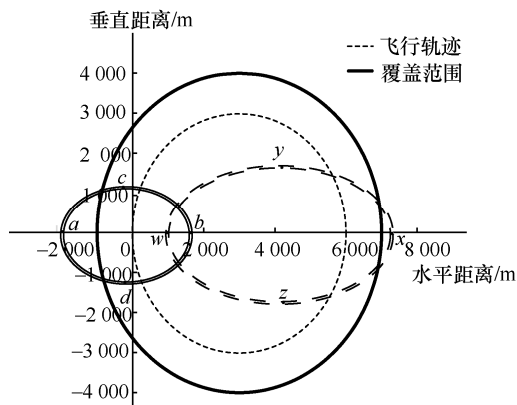


图 5 覆盖边缘示意图

设无人机飞行高度为 h , 天线水平和垂直半功率角分别为 ω 和 β , 天线和地平面夹角为 $\alpha + \gamma$, 则有:

$$OA = h \times \tan(\omega + \beta - \gamma_1) - R \quad (10)$$

$$OB = h \times \tan(\omega - \beta - \gamma_1) - R \quad (11)$$

$$OC = OD = h / \cos(360^\circ - \alpha - \gamma) \times \tan(\omega + \alpha) \quad (12)$$

w 、 x 、 y 、 z 点位置的计算方法同理。为了实现连续覆盖, 需要保证 $OB > OW$ 。同时还要保证 a 点和 x 点在待覆盖范围之外。在此基础上, 设计天线 2 和天线 3 的旋转角度 ε_n 和 ε_{-n} , ε_n 和 ε_{-n} 一般根据经验值取 $\frac{2}{3}\beta$ 。综合考虑飞行高度、飞行半径和覆盖范围等因素, 得到天线的安装方案。在飞行高度为 $3\,500\text{ m}$ 、飞行半径为 $3\,000\text{ m}$ 时, 预估天线覆盖范围如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 使用该天线安装方案, 可以实现半径 $3\,500\text{ m}$ 的连续覆盖。图 6 中所示覆盖范围是以半功率角的覆盖为最远点, 实际的覆盖范围可能更大。

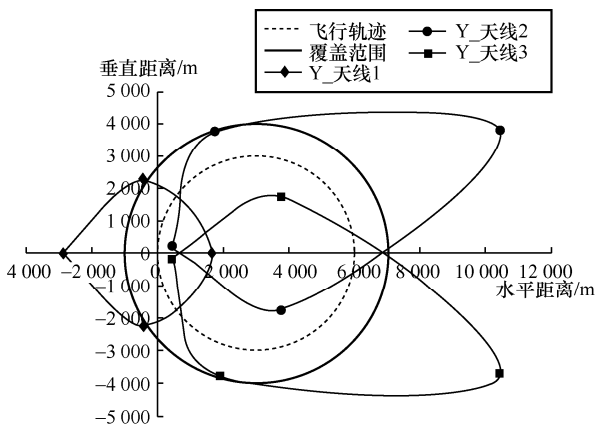


图 6 天线覆盖范围示意图

3 覆盖面积分析和仿真

3.1 传输损耗

上述方案中,连续覆盖的面积来自用户的需求。图 3 中的 OG 和 OA 是基站对地面连续覆盖的最远传输距离。但是,最远传输距离是否满足通信诉求需要结合基站的能力以及传播模型进行评价。评价方法如下。

在设备型号确定后,可通过设备的发射功率、接收机灵敏度、收/发天线增益等参数进行链路预算。并考虑信号传播过程中的干扰余量、馈线损耗、阴影衰落、路径损耗等损耗,可计算得到传输距离^[20-21]。

3GPP 38.901 协议规定了适用于 0.5~100 GHz 频率范围内空间损耗的数学统计模型,包括城市微站、城市宏基站、郊区宏基站等场景。无人机在空中飞行和终端间遮挡较少,可采用适用于郊区宏基站的 RMa-AV LOS 路损模型:

$$\text{PathLoss}_{\text{RMa}} = \max(23.9 - 1.8 \lg(h_{\text{UT}}), 20) \\ \lg(d_{3\text{D}}) + 20 \lg\left(\frac{40\pi f_c}{3}\right) \quad (13)$$

其中, h_{UT} 为终端高度, $d_{3\text{D}}$ 为传播距离, f_c 为载波频率。

根据上述方法,结合客户需求,可获得方案中的 PG、PA 的值。其中,阴影衰落余量为 3 dB。

3.2 最大传输距离

链路预算通过对发送端、通信链路、传播环境和接收端中所有增益和衰减进行估算,从而估计信号的最远覆盖距离^[22]。

以中心频率 0.95 GHz 为例,终端高度 1.5 m 的条件下,传播损耗和链路预算分析见表 1,上下行的最大覆盖距离分别为 6 543 m 和 26 412 m。与下行相比,上行由于发射功率小、没有发射天线增益等原因,覆盖较为受限^[23]。因此整体来看,在郊区场景下,无线传播的有效距离最大为 6.5 km。

表 1 传播损耗和链路预算分析

参数	含义	单位	上行	下行
发射机	最大发射功率	W	0.2	60
	最大发射功率	dBm	23	48
	发射天线增益	dBi	0	5
	EIRP	dBm	23	53
接收机	接收机噪声系数	dB	3	7
	速率要求	kbit/s	512	2 048
	RB 要求	—	8	20
	热噪声	dBm	-112.4	-108.4
	接收机底噪声	dBm	-109.4	-101.4
	SINR 要求	dB	-3	1.5
	接收机灵敏度	dBm	-112.4	-99.9
增益余量损耗	接收天线增益	dBi	5	0
	干扰余量	dB	2	0
	馈线损耗	dB	0.5	0.5
	塔放增益	dB	0	0
	阴影衰落	dB	3.4	3.4
	穿透损耗	dB	0	0
	人体损耗	dB	3	3
	发射分集增益	dB	0	0
	分集接收增益	dB	0	0
	切换增益	dB	0	0
最大路径损耗	最大路径损耗	dB	131.5	145.8
最大传输距离	中心频率	GHz	0.95	0.95
	终端有效高度	m	1.5	1.5
	最大传输距离 d	m	6 543.257	26 412.83

3.3 仿真分析

RSRP 是代表无线信号强度的关键参数,是在某个符号内承载参考信号的所有资源粒子上接收的信号功率的平均值^[24]。

RSRP 测试标准参考如下:

- 极好点: RSRP>-80 dBm;
- 好点: RSRP=-90~-80 dBm;
- 较好点: RSRP=-100~-190 dBm;
- 一般点: RSRP=-110~-100 dBm;
- 差点: RSRP=-120~-110 dBm;
- 极差点: RSRP<-120 dBm;

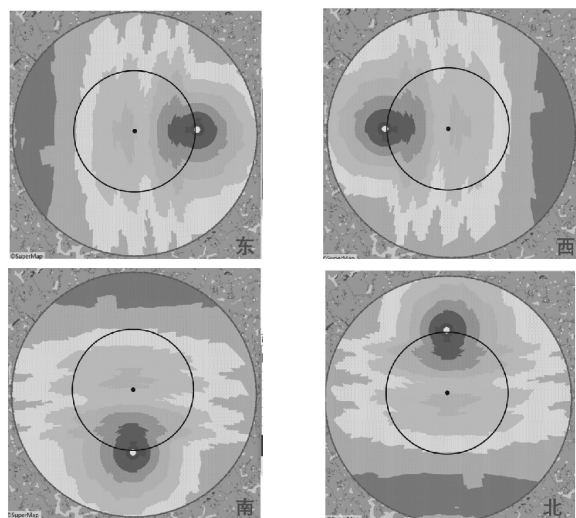
针对本文提出的天线挂装方案,对无人机 1 副内侧天线加 2 副边缘天线的空对地覆盖效果进行



了仿真。关键仿真参数如下：

- 广播信道水平波束宽度：74°；
- 广播信道垂直波束宽度：15°；
- 发射功率：20 w；
- 单天线最大增益：8.96 dBi；
- 无人机飞行高度：2 km；
- 盘旋半径：1.5 km；
- 滚转角：7°。

仿真结果如图 7 所示。圆形实线为待覆盖目标区域。可以看出，飞机在飞行到东、西、南、北 4 个方向时，待覆盖范围的 RSRP 均在-120 dBm 以上，主要集中在-100~-75 dBm，仅少数边缘区域 RSRP 小于-120 dBm。说明该方案可以实现良好的空对地连续覆盖。



图例	名称	面积/km ²	所占百分比
	$X < -120.000$	0.000	0.0
	$-120.000 \leq X < -100.000$	2.152	8.1%
	$-100.000 \leq X < -90.000$	5.354	20.9%
	$-90.000 \leq X < -85.000$	7.568	28.6%
	$-85.000 \leq X < -80.000$	6.571	24.8%
	$-80.000 \leq X < -75.000$	2.550	9.6%
	$-75.000 \leq X < -70.000$	1.313	5.0%
	$-70.000 \leq X < -60.000$	0.710	2.7%
	$-60.000 \leq X$	0.084	0.3%

图 7 仿真结果

4 飞行测试

为了测试本文提出的固定翼无人机天线挂装方案的实际覆盖效果，通过大型固定翼无人机搭载基站和卫星通信设备进行了实际飞行测试。无人机到达目标区域上空后，在 3 500 m 高度进行盘旋，基站对地进行无线信号覆盖，通过卫星回传业务到核心网，第一时间打通灾区通信。

4.1 测试配置

测试所用无人机、卫星和基站的参数以及飞行方案见表 2。

表 2 测试基本参数

测试项	参数
无人机	翼龙 II
通信卫星	中星 6A
基站类型	900 MHz FDD 基站
飞行方案	飞行对地高度 3 500 m，对应飞行半径分别为 3 000 m，正圆轨迹飞行，滚转角 7°
天线方案	1 副内侧天线加 2 副边缘天线

4.2 测试方案

移动测试路线从东—南—北—西，第一轮测试路线如图 8 所示，第二轮测试路线如图 9 所示。

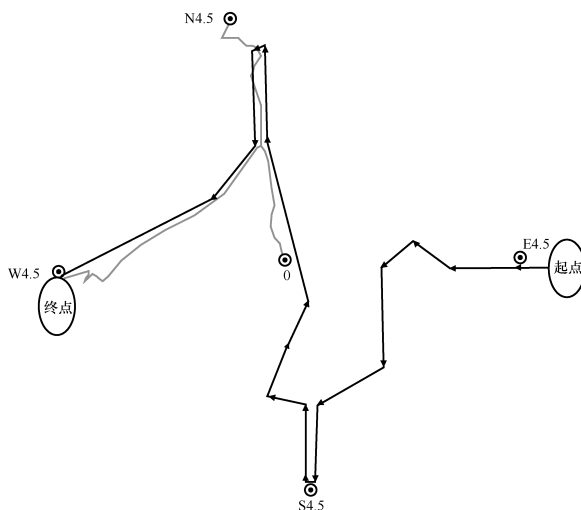


图 8 第一轮测试路线

4.3 测试分析

4.3.1 RSRP 分析

在移动测试路线中，RSRP 分布如图 10 所示。

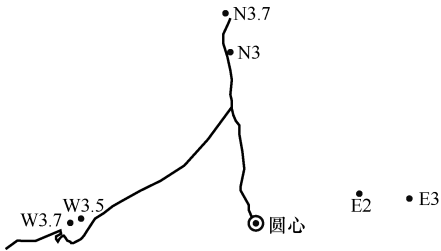


图 9 第二轮测试路线

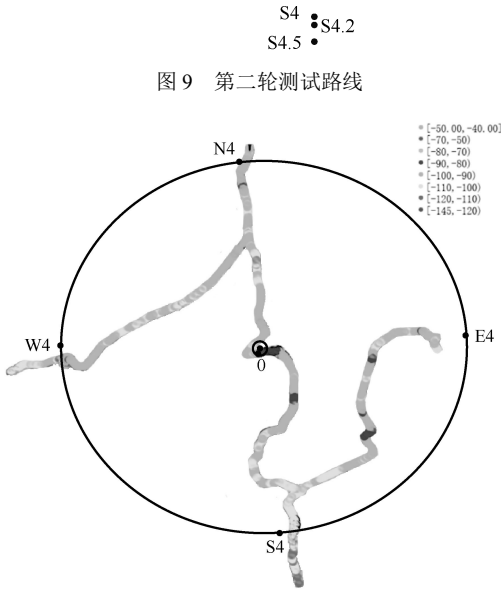


图 10 RSRP 分析

6 个固定点位的 RSRP 统计数据见表 3。
从移动路线和定点测试的 RSRP 分布可

以看出，在半径 3.5 km 以内的 RSRP 基本大于 -95 dBm，信号覆盖比较好；半径 4 km 位置信号覆盖一般，说明本文所提出的天线搭载方案可以实现对地面目标区域的连续覆盖。

4.3.2 VoLTE 分析

各个点位长期演进语音承载（voice over long-term evolution, VoLTE）测试统计数据见表 4。

表 4 VoLTE 测试统计

离飞行圆心距离	VoLTE 接通率 ($H=3\ 500\text{ m}$)
0 km	100%
2 km	100%
2.5 km	100%
3 km	100%
3.5 km	100%
4 km	100%

从表 4 可以看出，半径 4 km 以内的 VoLTE 接通率为 100%。

4.3.3 Ping 丢包时延分析

各个点位 Ping 包数据见表 5，半径 3.5 km 以内的 Ping 时延在 600 ms 以内，基本无丢包。

4.4 测试结论

测试总结见表 6。采用本文所提出的天线安装方案，在飞行场高 3 500 m 时，移动信号对地覆盖半径可到 4 000 m，空对地覆盖面积达 50 km²，且 VoLTE 语音质量较好，可以实现地面连续覆盖。

表 3 RSRP 统计

测试项	点位 0 (0 km)	点位 1 (2 km)	点位 2 (2.5 km)	点位 3 (3 km)	点位 4 (3.5 km)	点位 5 (4 km)
平均值	-89.15	-88.69	-93.32	-92.38	-91.05	-99.68
RSRP/dBm						
[-145, -120)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
[-120, -110)	0(0)	0(0)	0(0)	1(0.25%)	0(0)	13(4.42%)
[-110, -100)	0(0)	5(1.47%)	74(23.27%)	45(11.39%)	19(5.25%)	148(50.34%)
[-100, -90)	136(40.84%)	117(34.51%)	131(41.19%)	217(54.94%)	189(52.21%)	107(36.39%)
[-90, -80)	195(58.56%)	213(62.83%)	112(35.22%)	132(33.42%)	154(42.54%)	26(8.84%)
[-80, -70)	2(0.60%)	4(1.18%)	1(0.31%)	0(0)	0(0)	0(0)
[-70, -60)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
≥-110	100%	99.99%	99.99%	99.75%	100%	95.57%



表 5 Ping 包数据

测试项	点位 0 (0 km)	点位 1 (2 km)	点位 2(2.5 km)	点位 3 (3 km)	点位 4(3.5 km)	点位 5 (4 km)
Ping 包数	51	21	27	113	119	78
收包数	51	21	27	113	119	77
丢包率	0	0	0	0	0	1.28%
平均时延/ms	568.67	541.29	504.69	542.62	586.84	704.1

表 6 测试总结

测试项	测试结果
飞行场高/m	3 500
移动信号覆盖半径/m	4 000
移动信号覆盖面积/km ²	50
VoLTE 同时通话用户数/个	150~300
VoLTE 语音质量	整体上语音清晰无杂音，部分点位偶有杂音，不影响通话

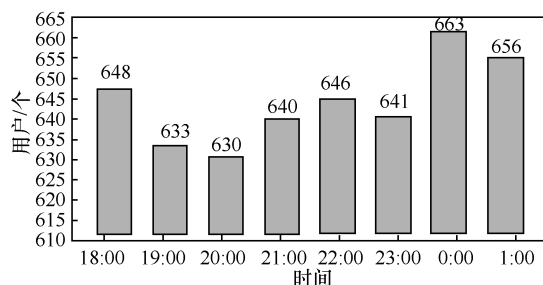


图 12 接入用户数统计

5 应用实践

2021 年 7 月，河南省多地由于极端强降雨造成特大洪涝灾害。其中，巩义市米河镇道路多处塌方，全镇道路、电力中断，光缆损坏，通信基站大面积退服，成为信息“孤岛”。应急管理部、工业和信息化部紧急调派中国移动翼龙空天一体化应急通信系统执行应急通信任务。翼龙无人机长途奔袭 1 200 km，完成了紧急网络信号覆盖，为灾区提供移动通信保障。

历时 14 h，中国移动翼龙应急基站累计接入 5 157 个用户，产生流量 4 360.5 Mbit/s，为抢险救灾信息传递提供通信保障。用户流量统计如图 11 所示，接入用户数统计如图 12 所示。

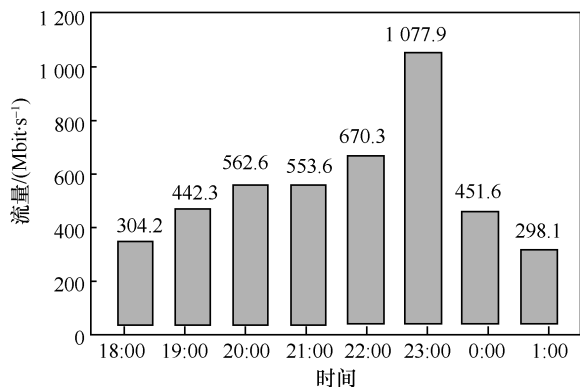


图 11 用户流量统计

6 结束语

当前业界所使用固定翼无人机空天基站单天线搭载方案，存在覆盖不连续、通信质量差等问题。针对此问题，本文创新性地提出内侧天线加边缘天线的多天线安装方案，在不使用云台智能控制天线角度的情况下，实现空中移动基站对地面的大面积连续覆盖。并提出了通过结合航空器滚转角、俯仰角、盘旋半径以及覆盖面积要求等参数，计算空中移动天线系统对地面信号连续覆盖的内侧天线和边缘天线的方案。同时结合 3GPP 空间损耗模型，设计飞机飞行方案。实际测试结果显示，采用本文所提出的天线搭载方案，飞行高度分别为 3 500 m 时，空对地无线信号覆盖半径可达 4 000 m，覆盖面积可达 50 km²，可以实现对地连续覆盖，且通信质量较好。

下一步研究目标是建立天线设计数学模型，根据基站参数、飞行高度、飞行半径、要求覆盖范围，设计最优的天线挂装方案，达到覆盖范围和性能最优的目的。

参考文献：

[1] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布 2021 年全国

- 自然灾害基本情况[EB]. 2021.
- The Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. The Ministry of Emergency Management released the basic situation of natural disasters in 2021[EB]. 2021.
- [2] 王海涛. 应急通信发展现状和技术手段分析[J]. 电力系统通信, 2011, 32(2): 1-6.
- WANG H T. Analysis on current status of emergency communication and its technical means[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(2): 1-6.
- [3] 万晓榆, 孙三山, 卢安文. 我国特大自然灾害下的应急通信管理探讨[J]. 重庆邮电大学学报(社会科学版), 2009, 21(1): 29-34.
- WAN X Y, SUN S S, LU A W. On the national emergency communication management of serious natural disaster[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Social Science Edition), 2009, 21(1): 29-34.
- [4] MARTINEZ F J, TOH C K, CANO J C, et al. Emergency services in future intelligent transportation systems based on vehicular communication networks[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2010, 2(2): 6-20.
- [5] MIRANDA F A, SUBRAMANYAM G, VAN KEULS F W, et al. Design and development of ferroelectric tunable microwave components for Ku- and K-band satellite communication systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(7): 1181-1189.
- [6] HATSUDA T, HASHIMOTO K, MASUDA J, et al. Diversity systems comparison of satellite visibility improvement for designing mobile broadcasting satellite system[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(8): 2365-2370.
- [7] 中新网. 卫星背包基站等移动高科技驰援确保东航坠机核心区网络畅通[EB]. 2022.
- China News Service. Satellite backpack base stations and other mobile high-tech assistance to ensure smooth network in the core area of China Eastern Airlines crash[EB]. 2022.
- [8] 徐秀杰, 贾荣光, 杨玉永, 等. 系留式无人机中继通信系统在地震应急现场的应用试验研究[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(3): 718-726.
- XU X J, JIA R G, YANG Y Y, et al. Technical application of the tethered UAV relay system in earthquake emergency site[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(3): 718-726.
- [9] 中科院遥感地球研究所. 谷歌 Loon 高空气球是如何工作的[EB]. 2020.
- Institute of Remote Sensing Earth, Chinese Academy of Sciences. How Google loon high-altitude balloons work[EB]. 2020.
- [10] 快科技. 5G 彩云一号: 首个 5G 无人飞艇试飞成功[EB]. 2021.
- Fast Technology. 5G Caiyun No. 1: China's first 5G unmanned airship successfully tested [EB]. 2021.
- [11] SHAO Z H, LIU Y X, WU Y, et al. A rapid and reliable disaster emergency mobile communication system via aerial ad hoc BS networks[C]//Proceedings of 2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [12] BUPE P, HADDAD R, RIOS-GUTIERREZ F. Relief and emergency communication network based on an autonomous decentralized UAV clustering network[C]//Proceedings of SoutheastCon 2015. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-8.
- [13] ZHU J L, WEI Z Q, WU H C, et al. Capacity of UAV-assisted air-to-ground communication with random perturbation of UAV platform[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 275-279.
- [14] ZHU L, YIN D, YANG J, et al. Research of remote measurement and control technology of UAV based on mobile communication networks[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2015: 2517-2522.
- [15] KIMURA T, OGURA M. Distributed collaborative 3D-deployment of UAV base stations for on-demand coverage[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1748-1757.
- [16] WU Q Q, XU J, ZHANG R. Capacity characterization of UAV-enabled two-user broadcast channel[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 1955-1971.
- [17] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Communications and control for wireless drone-based antenna array[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 820-834.
- [18] WAN N N, JIA X D, LV Y P, et al. Antenna tilt optimization scheme of UAV base station in multi-cell millimeter wave communication system[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering (ECIE). Piscataway: IEEE Press, 2021: 196-199.
- [19] QIU C, WEI Z Q, YUAN X, et al. Multiple UAV-mounted base station placement and user association with joint fronthaul and backhaul optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(9): 5864-5877.



- [20] AZAD U, JING H C, WANG Y E. Link budget and capacity performance of inductively coupled resonant loops[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(5): 2453-2461.
- [21] SANI A, ALOMAINY A, HAO Y. Numerical characterization and link budget evaluation of wireless implants considering different digital human phantoms[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(10): 2605-2613.
- [22] SALO J, HANEDA K, KOLMONEN V M, et al. Measurement-based evaluation of link budget gain from 3GPP LTE up-link transmit antenna selection[C]//Proceedings of 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [23] SOLOMITCKII D, GAPEYENKO M, SEMKIN V, et al. Technologies for efficient amateur drone detection in 5G millimeter-wave cellular infrastructure[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 43-50.
- [24] SOLOMITCKII D, GAPEYENKO M, SEMKIN V, et al. Technologies for efficient amateur drone detection in 5G millimeter-wave cellular infrastructure[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 43-50.

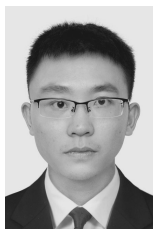
[作者简介]



陈盛伟（1980—），男，中国移动（成都）产业研究院 5G 网联无人机中心主任设计师，主要研究方向为无人机低空蜂窝无线网络、无人机应急通信等。



李帆（1994—），女，中国移动（成都）产业研究院 5G 网联无人机中心工程师，主要研究方向为无人机应急通信技术。



杨光平（1986—），男，中国移动（成都）产业研究院 5G 网联无人机中心工程师，主要研究方向为 5G 网联无人机低空网络。



周剑（1973—），男，中国移动（成都）产业研究院 5G 网联无人机中心副总经理、副总设计师，主要研究方向为 5G 网联无人机技术等。



苏郁（1968—），男，博士，中国移动（成都）产业研究院副院长，主要研究方向为基于 5G 的网联无人机的云、网、端产品体系。