



基于民航航线的5G地空通信上行干扰分析与商用建议

刘玮, 宋静川, 石一涵, 马骠, 李天任, 张宏坤, 薛强, 马学军

摘 要: 5G地空通信系统在西部“成都—敦煌—吐鲁番”航线实地部署,具备验证系统各项性能指标的基本条件,基于真实民航航线验证了该系统本身通信能力,与卫星通信系统进行了对比,说明5G地空通信系统具备实现空中互联网能力,具有一定商用价值。此外,5G地空通信系统使用频段为4 840~4 900 MHz,在商用之前需要研究对其他同频系统带来上行干扰情况,在传统基于扫频仪的干扰测量方法成本高效率低的情况下,提出了一种创新的利用5G地空通信基站本身信号监测能力的干扰测试方法,并基于真实民航航线获得一手5G地空通信系统上行干扰数据,最终从干扰角度出发对5G地空通信系统后续商用提出建议。

关键词: 5G-ATG; 上行干扰; 底噪抬升

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025293

0 引言

5G地空通信系统(5G-ATG),通过在地面5G-ATG基站、飞机终端接入设备(机载CPE)之间建立通信链路,实现飞机空中互联网接入。目前,5G-ATG系统端到端设备研发完成,取得适航证,并且在西部“成都—敦煌—吐鲁番”航线实现2 800 km的实地部署,具备基于民航航线验证系统各项性能的基本条件。

5G-ATG系统使用频段为4 840~4 900 MHz,可能存在同频干扰的系统还包括5G地面通信、通感一体和其他行业通信系统等。为保障各系统通信正常、性能不受影响,有必要对5G地空通信在4 840~4 900 MHz频段内对其他通信系统造成的干扰程度进行分析与研究,特别是机载CPE上行发射信号带来的上行干扰。本文基于真实民航航线,首先验证了5G-ATG系统本身通信能力,

与卫星通信系统进行了对比,说明5G-ATG具备实现空中互联网能力,具有一定商用价值;其次聚焦干扰问题,在传统基于扫频仪的干扰测量方法成本高效率低的情况下,提出一种创新的利用5G-ATG基站本身信号监测能力的干扰测试方法,并基于真实民航航线获得一手5G-ATG上行干扰数据;最终从干扰角度出发对5G-ATG系统后续商用提出建议。

1 5G地空通信在民航航线应用情况与验证效果

当前,5G-ATG已经在西部“成都—敦煌—吐鲁番”航线实地部署,航线里程2 800 km。基于此真实航线开展满带宽灌包测试,在全程3个多小时测试过程中,5G-ATG系统上、下行峰值速率可达74 Mbit/s、352 Mbit/s,上、下行平均速率可达35 Mbit/s、228 Mbit/s,用户面平均时

延约 164 ms，见表 1。其中，与地面 5G 系统平均 50 ms 的用户面时延相比，采用核心网集中部署方式导致了用户面时延的拉长。

表 1 5G 地空通信性能验证效果	
测试项目	结果
下行峰值速率/(Mbit·s ⁻¹)	352
上行峰值速率/(Mbit·s ⁻¹)	74
总飞行时长	3 小时 26 分钟
下行平均速率/(Mbit·s ⁻¹)	228
上行平均速率/(Mbit·s ⁻¹)	35
用户面时延/ms	164

实现民航航线空地互联的技术方案还包括高轨、低轨等其他两种卫星通信技术，5G 地空通信与高轨卫星、低轨卫星真实数据对比见表 2。

表 2 5G 地空通信、高轨卫星、低轨卫星 3 种技术手段性能对比			
对比项	高轨卫星	低轨卫星	5G 地空通信
可提供用户速率	下行峰值： 220 Mbit/s	下行峰值： 18 6Mbit/s	4.9 GHz 60 MHz 带宽
	上行峰值： 25 Mbit/s	上行峰值： 17 Mbit/s	下行峰值：352 Mbit/s
			上行峰值：74 Mbit/s
单系统通信容量	约 10~ 300 Gbit/s/星	约 5~ 20 Gbit/s/星	11 Gbit/s/站点
国内覆盖系统容量	100 Gbit/s	1 600 Gbit/s	5 500 Gbit/s

可以看出，和高轨、低轨卫星通信相比，5G 地空通信在用户速率、系统容量方面均具有一定优势，具有一定商用价值。

2 5G 地空通信上行干扰分析与研究

2.1 5G 地空通信上行干扰理论分析

5G 地空通信上行干扰的定义是指 5G-ATG 作为施扰系统，机载 CPE 上行发射信号能量落入地面同频受扰系统的接收窗内，影响受扰系统自身接收信号的解调性能。值得注意的是，受天线 360°球面增益不同的影响，只有当 5G-ATG 施扰系统机载 CPE 位于受扰基站定向天线主瓣覆盖区域范围内时，地面受扰系统才会收到较大干扰能

量，此时称之为共线干扰。若不在主瓣覆盖区域内，天线旁瓣的抑制能力反而会带来干扰降低的作用。

$$I_{\text{受扰}}=P_{\text{施扰}}+G_{\text{受扰}}-X_{\text{施扰系统与受扰系统天线极化隔离度}}$$

(1)

其中， $I_{\text{受扰}}$ 指受扰系统接收到的干扰功率； $P_{\text{施扰}}$ 指 5G-ATG 系统机载 CPE 上行发射信号落入地面同频受扰系统的天线口功率； $G_{\text{受扰}}$ 指受扰系统在机载 CPE 方向上的天线增益，方向不同增益不同； $X_{\text{施扰系统与受扰系统天线极化隔离度}}$ 指两系统天线极化隔离度。如果干扰 $I_{\text{受扰}}$ 严重，已经超过受扰系统的可接受范围，则需要通过频率隔离、距离隔离等方法进行协调。

5G-ATG 系统使用的频率是 4 840~4 900 MHz，其他同频系统包括 5G 通感一体、民航高度表等其他行业通信系统。因此，为判断与其他通信系统之间的共存可行性，获取 5G-ATG 系统机载 CPE 上行发射信号到地面不同投影距离不同夹角的能量残留，如图 1 所示，即受扰系统天线口功率 $P_{\text{施扰}}$ 至关重要。

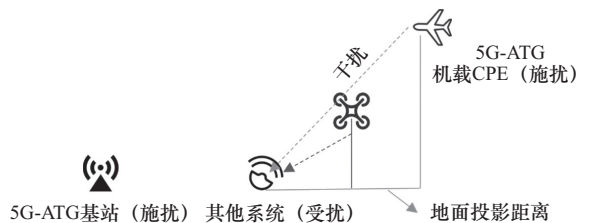


图 1 5G 地空通信上行干扰场景示意图

2.2 传统干扰测量方法与问题

传统干扰测量方法是使用外接全向天线的扫频仪，在指定位置处进行监测，分别测量 5G-ATG 机载 CPE 启动前后 4 840~4 900 MHz 频段内的信号功率变化情况。其中，机载 CPE 启动前，扫频仪测量到的信号功率可称为自然噪声，机载 CPE 启动并经过时，扫频仪测量到的信号功率可称为干扰功率，两者差值称为底噪抬升。

传统干扰测量方法运用于真实民航航线的



5G 地空通信上行干扰的具体方案如下。

(1) 在民航航路(宽 20 km)正下方设置若干干扰监测点,确保飞机由远及近飞行过程中距离监测点的直线距离在 10~150 km 范围内。

(2) 干扰监测点处,放置扫频仪,外接 3 个 15°波宽的高增益定向天线,3 个 15°波宽的高增益定向天线拼成一个 45°扇面,指向飞机由远及近飞行方向,确保能够收集完整信号功率情况。

(3) 地面监测点与飞机机载 CPE 保持时间同步与操作同步,保持扫频仪长时间打开,分别记录飞机由远及近飞行过程中与监测点直线距离在 10~150 km 时的信号功率变化情况,即底噪抬升情况。

其中,业内常见扫频仪测量灵敏度为-110 dBm @100 kHz,噪声系数 1 dB,外接定向天线增益为 15 dBi,理论可监测最小-125 dBm@100 kHz 的信号。

按照上述方法,在“成都—敦煌—吐鲁番”航线正下方分别选取 4 个监测点进行干扰测量。其中 3 个监测点未检测到有底噪抬升情况,仅有 1 个与飞机直线距离 6 km 的监测点(监测点 4)分别在 4.85 GHz、4.87 GHz 频点处监测出最大 10 dB、5 dB 的底噪抬升,见表 3。说明 5G-ATG 系统会在某些位置带来上行干扰,但由于数据样本点少,无法归纳整理具体规律。深入分析数据样本点少的原因,主要是由于扫频仪测量灵敏度有限,需要飞机位置严格处在扫频仪外接天线形成的扇面主瓣范围内,且与监测点直线距离足够近才能有效监测出底噪抬升。具体地,通过链路预算得知,当外接天线上倾 30°时,飞机距离监测点直线距离需要在 16 km 以内;当外接天线竖直向上时,飞机距离监测点直线距离需要在 6 km 以内。然而,受天气等环境影响,真实飞行活动存在飞行路线不固定、飞行高度受限等问题,对需要提前放置扫频仪、架设天线、调整天线波瓣方向的传统干扰测量方法提出挑战,容易造成测量数次才能获取 1 次有效数据的结果,工作效率极为低下。

表 3 传统干扰测量方法测量结果

监测点	飞机与监测点直线距离最近处, 扫频仪监测功率/dBm			自然噪声基 准值/dBm (5G-ATG 未 工作)
	4.85 GHz 频点	4.87 GHz 频点	4.89 GHz 频点	
1	-106	-106	-106	-106
2	-107	-107	-107	-107
3	-106	-106	-106	-106
4	-96	-101	-106	-106

2.2 创新干扰测试方案与实施效果

5G-ATG 系统主要包含 5G-ATG 地面基站和 5G-ATG 机载 CPE 两个部分,其中,5G-ATG 地面与 5G-ATG 机载 CPE 之间的通信分上、下行两个方向,由于 5G-ATG 基站噪声系数为 2 dB,天线增益为 10 dBi,可测量最小-132 dBm@100 kHz 的干扰信号,比扫频仪测量能力提升 7 dB。因此,是否可以通过降低 5G-ATG 基站发射功率,强制终端无法接入,只保留其信号测量能力,充当高灵敏度扫频仪使用?具体地,在民航航线现有的数十个 5G-ATG 基站中,筛选若干 5G-ATG 基站充当扫频仪,当飞机由远及近飞过上述 5G-ATG 基站时,可以自动监测 4 840~4 900 MHz 频段内的接收信号功率变化情况。与传统干扰测量方法相比,无需提前放置扫频仪、架设天线、调整天线波瓣方向,大大降低了测量工作成本。

在“成都—敦煌—吐鲁番”民航航线上,选择 X、Y 两个 5G-ATG 基站进行可行性验证。在整个测试验证过程中,飞机飞行高度保持 10.4 km,5G-ATG 机载 CPE 全程未接入 X、Y 两个基站,符合预期。其中,5G-ATG 基站 X 的两个小区(小区 1 方向角 85°,小区 2 方向角 250°)测试结果如图 2 所示。A、B 两点与基站 X 的位置示意图如图 3 所示。

(1) 当飞机飞到 A 点时,小区 2 的接收信号最大值可到-109 dBm,小区 1 的信号从-116.5 dBm 左右的自然噪声开始缓慢抬升,此时,A 点与 X 基站的投影直线距离是 21.8 km,与小区 1 的夹角是 165°,

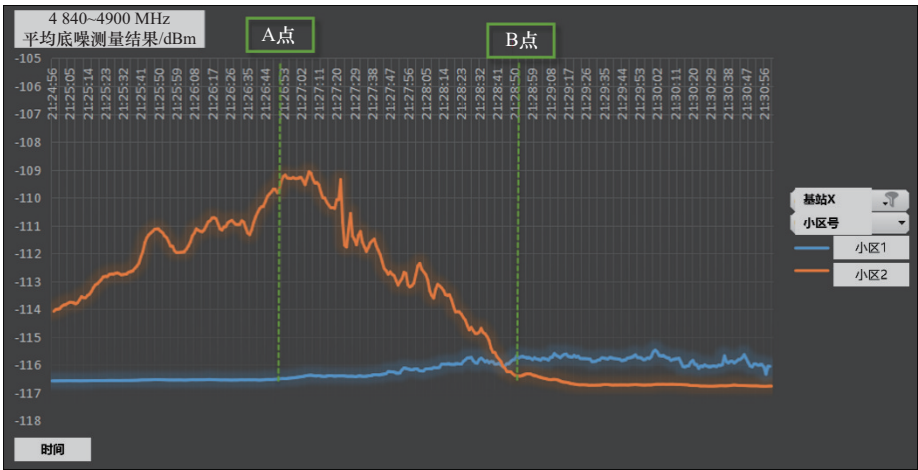


图2 5G-ATG X基站底噪测量结果

与小区2的夹角是0（与小区之间的夹角定义顺时针旋转为0~180°，逆时针旋转为0~-180°）。线距离是25.2 km，与小区1的夹角是80°，与小区2的夹角是-90°。

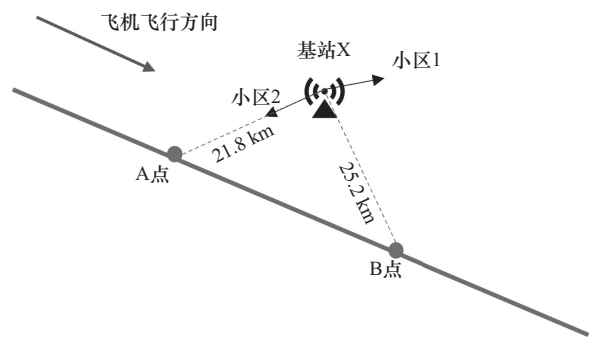


图3 A、B两点与基站X的位置示意图

（2）当飞机飞到B点时，小区2的接收信号下降到自然噪声，小区1的接收信号功率下降到-115.5 dBm左右，此时，B点与X基站的投影直

测试验证结果显示，使用创新干扰测试方法，可以较便捷地测量到连续的信号功率变化情况，如果把飞机飞行过程所经过的全部位置点与基站投影直线距离、夹角、信号功率监测情况都记录下来，则可获得表4，由于篇幅有限，只截取了部分采样数据。可以看到，监测点与飞机投影直线距离越近、夹角越小，信号接收功率越大，监测点与飞机投影直线距离在20~23 km时，夹角在-10°~-5°时，信号接收功率最高，可达-108.8 dB，相比-116 dBm的自然噪声，底噪抬升约7.2 dB。

相同的分析方法，分析5G-ATG基站Y 3个

表4 飞机与基站X之间不同投影直线距离,不同飞机夹角的信号功率监测值

距离/km	信号功率监测值/dBm								
	飞机夹角 [-20,-15]°	飞机夹角 [-15,-10]°	飞机夹角 [-10,-5]°	飞机夹角 [-5,0]°	飞机夹角 [0,5]°	飞机夹角 [5,10]°	飞机夹角 [10,15]°	飞机夹角 [15,20]°	飞机夹角 [20,25]°
[41,44)	—	—	—	—	—	—	—	—	-113.3
[38,41)	—	—	—	—	—	—	—	—	-112.6
[35,38)	—	—	—	—	—	—	—	-111.9	—
[32,35)	—	—	—	—	—	—	-111.6	-111.1	—
[29,32)	—	—	—	—	—	-110.6	-111.2	—	—
[26,29)	—	—	—	—	-110.4	-110.5	—	—	—
[23,26)	—	—	-108.9	-109.6	-110.5	—	—	—	—
[20,23)	-109.1	-109	-108.8	—	—	—	—	—	—



小区（小区1方向角 130° ，小区2方向角 220° ，小区3方向角 310° ）测试结果如图4所示。A、B、C 3点与基站Y的位置示意图如图5所示。

（1）当飞机飞到C点时，小区1的接收信号功率到 -112 dBm，小区2的接收信号功率到 -117 dBm，小区3接收信号功率到 -116.5 dBm，此时飞机距离基站Y的投影直线距离为 31.9 km，与小区1、小区2、小区3的夹角分别是 20° 、 -70° 、 -160° 。

（2）当飞机飞到D点时，小区1的接收信号功率到最大，保持在 $-108\sim-109$ dBm，小区2和小区3的接收信号功率到 $-117\sim-116$ dBm，此时飞机距离基站Y的直线距离为 4.5 km，与小区1、小区2、小区3的夹角分别为 -5° 、 -95° 、 175° 。

（3）当飞机飞到E点时，小区1的接收信号功率下降到 -116 dBm以下，小区2的接收信号功率下降到 -117 dBm以下，小区3的接收信号功率抬升到最大，保持在 -110 dBm左右，此时飞机距离基站Y的直线距离为 7.5 km，与小区1、小区2、小区3的夹角分别为 -150° 、 110° 、 60° 。

将5G-ATG基站Y的数据按照表4的格式进行统计，作为基站X数据的补充后见表5。可以看到，相比基站X，基站Y与飞机之间的投影直线距离更近，从而补充了飞机与5G-ATG基站近距离 $5\sim 20$ km，远距离 $44\sim 68$ km之间的信号功

率监测数据，监测数据依然遵循监测点与飞机投影直线距离越近、夹角越小，接收信号功率越大的结论，接收信号功率最高可达 -108.7 dB，集中出现在 $8\sim 11$ km、 $-20^\circ\sim -5^\circ$ 。

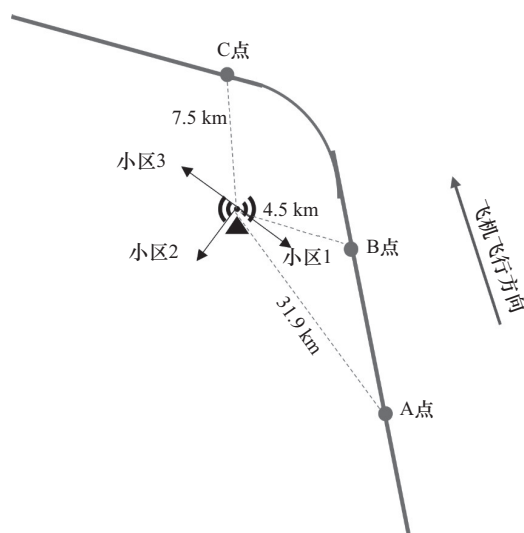


图5 A、B、C 3点与基站Y的位置示意图

值得注意的是，该创新干扰测试方案获取的不同监测点位置处在 $4\ 840\sim 4\ 900$ MHz频段内的接收信号功率是包含了5G-ATG基站天线增益影响的，要想解构出本文第2.1节中的 $P_{\text{施扰}}$ ，需要将图5中的信号功率监测值减去对应方向的5G-ATG基站天线增益值，最终的不同投影直线距离、不同飞机夹角的 $P_{\text{施扰}}$ 见表6。

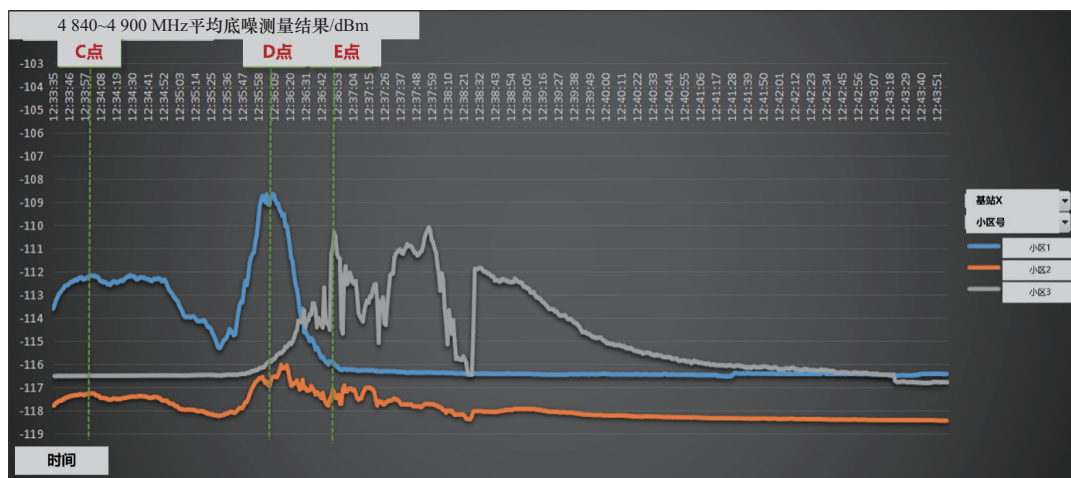


图4 5G-ATG Y基站底噪测量结果

表 5 基于 5G-ATG 基站 X 与基站 Y 的数据,不同投影直线距离,不同飞机夹角的信号功率监测值

距离/km	信号功率监测值/dBm								
	飞机夹角 [-20,-15]°	飞机夹角 [-15,-10]°	飞机夹角 [-10,-5]°	飞机夹角 [-5,0]°	飞机夹角 [0,5]°	飞机夹角 [5,10]°	飞机夹角 [10,15]°	飞机夹角 [15,20]°	飞机夹角 [20,25]°
[65,68)	—	-116.2	—	—	—	—	—	—	—
[62,65)	—	-116.1	—	—	—	—	—	—	—
[59,62)	—	-116	—	—	—	—	—	—	—
[56,59)	—	-116	—	—	—	—	—	—	—
[53,56)	—	-115.9	—	—	—	—	—	—	—
[50,53)	—	-115.7	—	—	—	—	—	—	—
[47,50)	—	-115.8	—	—	—	—	—	—	—
[44,47)	—	-115.3	-115.2	—	—	—	—	—	—
[41,44)	—	—	-114.9	—	—	—	—	—	-113.3
[38,41)	—	—	-114.3	—	—	—	-113.5	—	-112.6
[35,38)	—	—	-113.7	—	—	—	-112.7	-111.9	—
[32,35)	—	—	-113	—	—	—	-112	-111.1	—
[29,32)	—	—	-112.4	—	—	-110.6	-111.8	—	—
[26,29)	—	—	—	-112.2	-110.4	-110.5	-112.3	—	—
[23,26)	—	—	-108.9	-112.4	-110.5	—	-112.4	—	—
[20,23)	-109.1	-109	-108.8	-114.7	-112.1	—	-112.7	—	—
[17,20)	—	—	—	—	-110.8	—	-113.9	—	—
[14,17)	—	—	—	—	—	-113.1	-113.5	—	—
[11,14)	—	—	—	—	—	-114.5	-113.4	-113.5	—
[8,11)	—	-109	-108.7	-108.9	—	—	-113.8	-112.4	-112.6
[5,8)	-109.5	—	—	—	—	—	—	—	—

表 6 不同投影直线距离,不同飞机夹角的 $P_{\text{施扰功率}}$

距离/km	$P_{\text{施扰功率}}/\text{dBm}$								
	飞机夹角 [-20,-15]°	飞机夹角 [-15,-10]°	飞机夹角 [-10,-5]°	飞机夹角 [-5,0]°	飞机夹角 [0,5]°	飞机夹角 [5,10]°	飞机夹角 [10,15]°	飞机夹角 [15,20]°	飞机夹角 [20,25]°
[65,68)	—	-116.2	—	—	—	—	—	—	—
[62,65)	—	-116.1	—	—	—	—	—	—	—
[59,62)	—	-116	—	—	—	—	—	—	—
[56,59)	—	-116	—	—	—	—	—	—	—
[53,56)	—	-115.9	—	—	—	—	—	—	—
[50,53)	—	-115.7	—	—	—	—	—	—	—
[47,50)	—	-115.5	—	—	—	—	—	—	—
[44,47)	—	-115.3	-119.4	—	—	—	—	—	—
[41,44)	—	—	-122.7	—	—	—	—	—	—
[38,41)	—	—	-122.4	—	—	—	-123.6	—	—
[35,38)	—	—	-122.1	—	—	—	-122.9	—	—
[32,35)	—	—	-121.7	—	—	—	-122.5	—	—
[29,32)	—	—	-121.7	—	—	—	-122.7	—	—
[26,29)	—	—	—	-121.8	—	—	-122.3	—	—
[23,26)	—	—	—	-117.9	—	—	-121.8	—	—
[20,23)	—	—	—	-123.7	-122.6	—	-121	—	—
[17,20)	—	—	—	—	-121.4	—	-121.4	—	—
[14,17)	—	—	—	—	—	-120.7	-121.4	—	—
[11,14)	—	—	—	—	—	-121	-120.9	-120.6	—
[8,11)	—	-109.5	-112.2	-112.8	-116	—	-121.6	-119.3	-117.4
[5,8)	-105.7	—	—	—	—	—	—	—	—



需要说明的是,表6中很多缺失数据是因为此次基站X和基站Y的测试验证未抓取相应的样本点,但通过分析验证,证明该创新干扰测试方案可行。因此,后续可进一步扩大测试验证的基站范围,以抓取更多数据样本点进行补充,最终获得一张完整的距离飞机不同投影直线距离、不同夹角处的 $P_{\text{施扰}}$ 。为分析5G-ATG系统对其他同频通信系统造成的上行干扰程度,可将完整的 $P_{\text{施扰}}$ 数据通过式(1)代入受扰系统计算 $I_{\text{受扰}}$,再与受扰系统抗干扰门限进行对比,即可获悉受扰系统受干扰程度,最终判断两系统共存可行性与频率、距离隔离需求。

2.4 5G地空通信上行干扰底噪抬升分析与结论

以5G地面通信系统为受扰系统为例,将表6中的 $P_{\text{施扰}}$ 代入受扰系统对应方向处的天线增益,计算 $I_{\text{受扰}}$,再减去-116 dBm的自然噪声得出底噪抬升情况,见表7。根据多年运营经验,当5G地面通信系统底噪抬升大于6 dB时,系统自身性能将会受到影响,如表7中铺灰数据,此时,5G地面通信系统与5G-ATG机载CPE两者之间投影直线距离在26 km以内,夹角在 $-20^{\circ}\sim 0$ 之间。因此,为保障5G地面通信系统性能不受5G-ATG系统上行干扰,建议两系统保持26 km以上的隔离。

以上仅仅是以5G地面通信系统为受扰系统

表7 5G地面通信系统在不同投影直线距离,不同飞机夹角处,受到5G-ATG系统干扰的底噪抬升情况

距离/km	底噪抬升/dB								
	飞机夹角 [-20,-15] $^{\circ}$	飞机夹角 [-15,-10] $^{\circ}$	飞机夹角 [-10,-5] $^{\circ}$	飞机夹角 [-5,0] $^{\circ}$	飞机夹角 [0,5] $^{\circ}$	飞机夹角 [5,10] $^{\circ}$	飞机夹角 [10,15] $^{\circ}$	飞机夹角 [15,20] $^{\circ}$	飞机夹角 [20,25] $^{\circ}$
[65,68)	—	0	—	—	—	—	—	—	—
[62,65)	—	0	—	—	—	—	—	—	—
[59,62)	—	0	—	—	—	—	—	—	—
[56,59)	—	0	—	—	—	—	—	—	—
[53,56)	—	0.1	—	—	—	—	—	—	—
[50,53)	—	0.3	—	—	—	—	—	—	—
[47,50)	—	0.2	—	—	—	—	—	—	—
[44,47)	—	0.7	0.8	—	—	—	—	—	—
[41,44)	—	—	1.1	—	—	—	—	—	2.7
[38,41)	—	—	1.7	—	—	—	2.5	—	3.4
[35,38)	—	—	2.3	—	—	—	3.3	4.1	—
[32,35)	—	—	3	—	—	—	4	4.9	—
[29,32)	—	—	3.6	—	—	5.4	4.2	—	—
[26,29)	—	—	—	3.8	5.6	5.5	3.7	—	—
[23,26)	—	—	7.1	3.6	5.5	—	3.6	—	—
[20,23)	6.9	7	7.2	1.3	3.9	—	3.3	—	—
[17,20)	—	—	—	—	5.2	—	2.1	—	—
[14,17)	—	—	—	—	—	2.9	2.5	—	—
[11,14)	—	—	—	—	—	1.5	2.6	2.5	—
[8,11)	—	7	7.3	7.1	4.2	—	2.2	3.6	3.4
[5,8)	6.5	—	—	—	—	—	—	—	—

为例, 相同的数据分析方法可以延续至民航高度表系统等其他通信系统, 从而最终得到 5G-ATG 系统的距离隔离要求。

3 结束语

当前, 已建成覆盖“成都—敦煌—吐鲁番”航线的 5G-ATG 试验航线, 5G-ATG 商用在即。然而, 仍有诸如 5G 地面通信、5G 通感一体、民航高度表在内的若干其他通信系统同时使用 4 840~4 900 MHz 频段, 必然存在不同程度的同频干扰可能。本文从干扰测量方法到干扰数据获

取、分析, 干扰规避方案等系统介绍了 5G-ATG 系统上行干扰。为 5G-ATG 下一步商用提供了宝贵的数据支撑与建议。

参考文献:

- [1] 安建平, 李建国, 于季弘, 等. 空天通信网络关键技术综述[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 470-479.
- [2] 刘毅, 邱宝刚. 基于通信感知与 ATG 技术的空域覆盖研究[J]. 山东通信技术, 2025, 45(2): 1-6.
- [3] 曹伟, 施嵘, 张楠, 等. 跨海地空通信技术及应用[J]. 移动通信, 2024, 48(11): 109-114.
- [4] 刘蕾, 侯继江, 蔡云斌, 等. 3.5 GHz 频段 5G 系统对 ATG 系统干扰分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 477-482.