

Research on Inter-System
Interference Analysis and Solutions
for Communication Systems
Based on UAVs

基于无人机的通信 系统间干扰分析和解决方案研究

李海军¹, 马振东¹, 安少赓², 胡雅静¹, 李新谭¹, 胡明辉³ (1. 北京电信规划设计院有限公司, 北京 100047; 2. 中国信息通信研究院, 北京 100191; 3. 中国电子科技集团公司第十二研究所, 北京 100015)

Li Haijun¹, Ma Zhendong¹, An Shaogeng², Hu Yajing¹, Li Xintan¹, Hu Minghui³ (1. Beijing Telecom Planning & Designing Institute Co., Ltd., Beijing 100047, China; 2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China; 3. The 12th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

摘要:

随着国家低空经济相关政策的不断完善,基于无人机的各类应用得到蓬勃发展,然而受无人机空间条件的限制,公共移动通信系统、应急通信系统、无人机飞控系统等多制式系统间的干扰问题亟待被解决;借鉴移动通信系统间成熟的干扰分析理论和评估指标,通过对杂散干扰、阻塞干扰、互调干扰的分析和测算,确立了以隔离距离需求为核心的干扰解决框架;设计了3类新的基站性能指标,可有效解决无人机通信系统间的干扰问题。

关键词:

系统间干扰;低空平台;无人机;通信系统

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.06.008

文章编号:1007-3043(2025)06-0040-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

With the vigorous development of low-altitude economy, UAVs as its key bearing platform are constantly expanding new application scenarios. However, due to the limitations of the drone space, the interference between multiple communication systems such as public mobile communication system, emergency communication system, and drone flight control system has become a technical challenge that needs to be solved urgently. Using for reference of the interference analysis theory and measurement indicators of public mobile communication network, through the measurement of interference such as spurious emissions, out-of-band blocking, and intermodulation between systems, and using isolation requirements and isolation distance requirements as the core method; Three new performance indicators for base stations have been designed to effectively solve the issue of inter-system interference on UAVs.

Keywords:

Inter-system interference; Low altitude platform system; UAV; Communication system

引用格式: 李海军, 马振东, 安少赓, 等. 基于无人机的通信系统间干扰分析和解决方案研究[J]. 邮电设计技术, 2025(6): 40-44.

0 引言

随着无人机应用场景的日益丰富,无人机飞控系统和搭载的通信系统间相互干扰问题也日益凸显,成为制约无人机高效、安全运行的关键因素之一。现有文献对无人机通信干扰的研究多集中于复杂电磁环境下无人机自身的抗干扰技术,如扩频、自适应及信源编码技术等^[1-3]。此外,移动通信系统间因共址建设而产生的干扰问题也受到了关注^[4-6]。也有文献提出

了减少空间耦合的相关隔离技术^[7],但针对无人机这一新兴领域,对其通信系统间干扰的研究尚显不足。

本文从系统间主要的干扰类型及衡量指标出发,对无人机及其搭载通信系统间的隔离度和隔离距离需求进行理论分析测算,并根据测算结果提出了新的基站(含无人机)性能指标要求,从而规范无人机及其搭载通信系统的设计、研发和实际应用,保障无人机在复杂电磁环境下的安全运行。

1 干扰类型和衡量指标

在公共移动通信系统领域,存在不同运营商和同

收稿日期:2025-05-16

一个运营商的不同频率基站同址部署的情况,形成了一整套相对完善的系统间干扰分析理论体系^[8];考虑到公共移动通信系统、应急通信系统、无人机飞控系统间的频率间隔一般较远,参考公共移动通信系统分析理论体系,主要分析杂散、阻塞、互调干扰。

1.1 杂散干扰

杂散干扰是指当发射机的带外杂散信号落入受扰系统的接收机工作频带内时所引发的干扰现象,此干扰直接导致受扰系统的背景噪声上升,进而削弱其接收灵敏度;业界通常以受扰系统接收机灵敏度下降值不超过1 dB为标准,即施扰系统的杂散信号在抵达受扰系统接收机时,其信号强度比受扰系统的底噪低6 dB,使受扰系统背景噪声最多提升1 dB。为了缓解这一问题,通常采取的措施包括在发射机上加装滤波器或使受扰系统远离发射机。衡量这一现象的指标为杂散指标。

1.2 带外阻塞干扰

带外阻塞干扰是指当基站接收机的工作频带之外存在较强功率的信号时,会导致接收机进入非线性区甚至饱和,进而使放大器的增益迅速变小,不能正常放大有用信号。这种现象被称为带外干扰,它不仅会显著降低通信质量,甚至在极端情况下阻塞受扰系统接收机,导致通信中断,严重影响用户体验和通信网络的整体效能;为了缓解这一问题,通常采取在受扰系统接收机加装滤波器的形式以抑制带外强信号;衡量这一现象的指标为带外阻塞指标。

1.3 互调干扰

互调干扰指2个以上频率在同一空间同时工作时,因相互之间耦合产生的频率信号落在接收机接收范围内造成的干扰。在移动通信系统中,主要的互调干扰来自于三阶互调产物($\pm F_1 \pm 2F_2$ 和 $\pm 2F_1 \pm F_2$ 等组合形式),其频率可能接近或重叠于受扰系统频率范围,从而抬升底噪,造成接收机灵敏度严重下降,衡量这一现象的指标为三阶互调抑制指标。

2 隔离度和隔离距离需求

2.1 隔离度需求

2.1.1 杂散隔离度

杂散带宽通常为其发射机带宽的下限减10 MHz至9 kHz和带宽上限加10 MHz至12.75 GHz,这2段频率范围构成了杂散信号主要影响区域。在公共移动通信领域,对于共址部署的系统,杂散信号的功率水

平受到极为严格的限制,以确保系统间的良好共存,避免相互干扰。与公共移动通信系统不同的是,应急通信系统及无人机飞控系统未考虑与其他系统共址的情况,因此其杂散辐射指标较宽松。

公共移动通信系统、应急通信系统及无人机飞控系统杂散标准如表1所示^[9-14]。

表1 各制式杂散标准

通信系统	LTE 和 NR	UAV	PDT
杂散指标	-97 dBm/100 kHz(公众移动通信频率) -36 dBm/100 kHz(其他频段)	-36 dBm/100 kHz(1 GHz 以下) -30 dBm/1 MHz(1 GHz 以上)	-36 dBm/100 kHz(1 GHz 以下) -30 dBm/1 MHz(1 GHz 以上)

受扰系统的底噪为:

$$N_{\text{noise}} = -10 \times \lg(K \times T) + N_f + 10 \times \lg(BW_{\text{Rx}}) \quad (1)$$

其中, N_{noise} 为系统底噪(dBm); K 为波尔茨曼常数,取值 1.38×10^{-23} J/K; N_f 为噪声系数,一般取3; BW_{Rx} 为受扰系统测量带宽(Hz)。

以带宽20 MHz的LTE受扰系统为例,系统底噪为-104.5 dBm/4.5 MHz,LTE接收机灵敏度为-101.5 dBm/4.5 MHz;接收机允许的干扰系统到达LTE频段的杂散噪声比底噪低6 dB,为-110.5 dBm/4.5 MHz。

杂散隔离度计算如下^[4]:

$$I_{\text{Emission}} = E_{\text{Rx}} - L_{\text{Tx}} - L_{\text{Rx}} - M_{\text{Rx}} \quad (2)$$

其中, I_{Emission} 表示系统间杂散干扰隔离度(dB); E_{Rx} 表示施扰系统在受扰系统测量带宽的杂散(dBm/Hz), $E_{\text{Rx}}=E-T_{\text{BW}}$, E 为施扰系统在受扰系统接收机频段内的杂散指标(dBm/Hz), T_{BW} 为带宽转换因子, $T_{\text{BW}}=10 \times \lg(BW_{\text{Tx}}/BW_{\text{Rx}})$, BW_{Tx} 为施扰系统杂散带宽(Hz); L_{Tx} 和 L_{Rx} 分别表示发射系统和接收系统中的馈线损耗,目前一般使用光纤系统,馈线系统损耗取0 dB; M_{Rx} 表示受扰系统允许的杂散噪声,通信系统一般取比受扰系统底噪低6 dB为最大允许的杂散噪声,此时接收机灵敏度降低1 dB,故 M_{Rx} 等于 N_{noise} 减6。

经测算,各制式杂散隔离度如表2所示。

2.1.2 带外阻塞隔离度

表2 各制式杂散隔离度

受扰	施扰			
	LTE/dB	NR/dB	无人机/dB	PDT/dB
LTE	-	30	91	91
NR	30	-	91	91
无人机	91	91	-	91
PDT	91	91	91	-

阻塞带宽通常为受扰系统收信机自身带宽的下限减 10 MHz 至 1 MHz,以及在带宽上限加 10 MHz 至 12.75 GHz,这 2 段频率内如果存在施扰系统的强信号,会影响受扰系统接收机的正常工作。

在公共移动通信领域,对于共址部署的系统,明确规定了系统的带外阻塞指标。

带外阻塞指标计算如下^[4]:

$$I_{\text{Block}} = P_{\text{T}_x} - L_{\text{T}_x} - L_{\text{R}_x} - E_{\text{Block}} \quad (3)$$

其中, I_{Block} 为阻塞隔离度(dB); P_{T_x} 为施扰系统发射功率(dBm); E_{Block} 为受扰系统能允许的最大带外信号功率(dBm); L_{T_x} 和 L_{R_x} 见式(2)中的注释。

公共移动通信系统、应急通信系统及无人机飞控系统发射功率和带外阻塞指标如表3所示^[9-14]。

表3 各制式典型发射功率和带外阻塞指标

发射功率	LTE 和 NR	无人机	PDT
指标/dBm	46	40	47
带外阻塞指标/dBm	16	未制定,暂按 16 核算	未制定,暂按 16 核算

因此应急通信系统和无人机需要制定带外阻塞指标,在预设的阻塞指标下,各制式阻塞隔离度如表4所示。

表4 各制式阻塞隔离度

受扰	施扰		
	LTE 和	无人机/dB	PDT/dB
LTE 和 NR	30	23	31
无人机	30	23	31
PDT	30	23	31

2.1.3 互调隔离度

假设无人机上某点存在2个相同信号强度的邻频信号,核算得出互调隔离度需求如表5所示。

表5 各制式互调隔离度

制式	LTE 和 NR	无人机	PDT
互调隔离需求/dB	150	154	178

考虑到无人机上的基站和地面的同频段基站相隔较远,信号强度差别较大,其互调隔离需求将远远小于表5所示的隔离需求;另外无人机的各个不同频段也可能生成三阶互调产物,但是考虑其频率间隔非常远,因此互调隔离需求也远远小于表5所示互调隔离需求,故当采用正常达到 150 dBc 三阶抑制能力的天线时,不考虑其隔离需求。

综合考虑杂散、阻塞、互调隔离度需求,公共移动通信系统、应急通信系统、无人机飞控系统相互之间的隔离度为 91 dB,公共移动通信系统相互之间的隔离度为 30 dB。

2.2 隔离距离需求

考虑到无人机上做垂直隔离比较困难,因此主要考虑水平隔离,由文献[4]中水平隔离度公式可以推导出水平隔离距离为:

$$D_H = \lambda \times 10^{(I_n - 22 + G_{\text{T}_x} + G_{\text{R}_x} + S_{\text{T}_x} + S_{\text{R}_x})} \quad (4)$$

其中, D_H 为水平隔离距离(m); λ 为波长(m); I_n 为隔离度(dB); G_{T_x} 和 G_{R_x} 分别为施扰系统发射天线和受扰系统接收天线主瓣增益(dBi); S_{T_x} 和 S_{R_x} 分别为施扰系统发射天线和受扰系统接收天线副瓣增益,为负值(dBp)。

由式(4)可知,水平隔离距离主要由 λ 、 I_n 、 G_{T_x} 、 G_{R_x} 、 S_{T_x} 和 S_{R_x} 所决定,因此通信系统使用全向还是定向天线对水平隔离距离影响较大。

无人机上的飞控系统一般使用全向天线,无人机地面站可采用全向或定向天线;大型无人机因具备较强的承载与适应能力,搭载的移动通信系统(公共移动通信系统和应急移动通信系统)可采用定向天线,而中小型无人机受限于气动性能等因素,搭载的移动通信系统一般采用全向天线以提升飞行稳定性,因此存在无人机全向天线+移动通信系统定向天线,以及无人机全向天线+移动通信系统全向天线2种组合^[15-17]。

2.2.1 无人机全向天线+移动通信系统定向天线

该场景存在无人机全向天线和移动通信系统定向天线之间的隔离需求,以及多个移动通信系统定向天线间隔离需求,因此分为如下2类进行讨论。

a) 无人机飞控系统全向天线和移动通信系统定向天线水平隔离距离需求。二者之间隔离需求为 91 dB,无人机飞控系统一般使用 1 400 MHz^[12],假设飞控系统全向天线增益为 6 dBi,公共移动通信天线和应急移动通信天线主瓣增益均为 15 dBi,副瓣增益为-18 dBp,则水平隔离距离需要 832 m。

b) 移动通信系统定向天线之间水平隔离距离需求。假设公共移动通信天线和应急移动通信天线主瓣增益均为 15 dBi,副瓣增益为-18 dBp,定向天线水平隔离距离需求如图1所示。公共移动通信系统之间隔离需求为 30 dB,根据图1中 LTE 1 800 MHz 和 NR 2 600 MHz 共同部署时考虑2倍波长只需要0.4 m的水

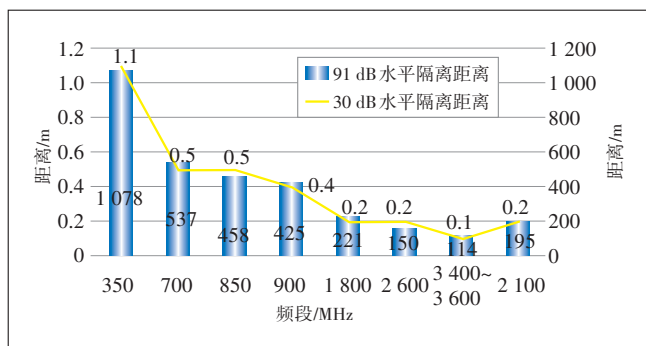


图1 91 dB和30 dB移动通信系统定向天线水平隔离距离

水平隔离距离;LTE 1 800 MHz同应急通信系统、无人机飞控系统之间隔离需求为91 dB,根据图1,至少需要221 m的水平隔离距离。

2.2.2 无人机全向天线+移动通信系统全向天线

中小型无人机和移动通信系统均采用全向天线,为了方便计算,统一取定全向天线增益为6 dBi,全向天线水平隔离距离需求如图2所示。

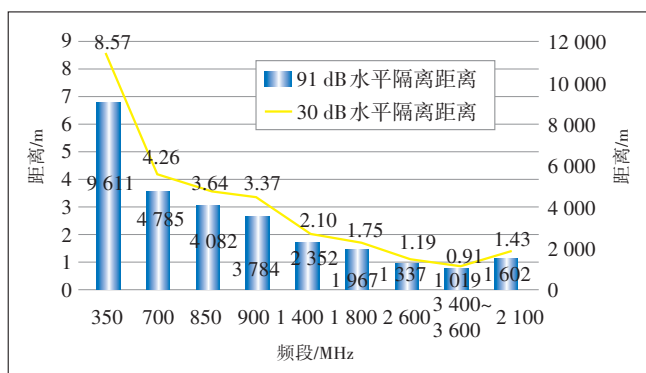


图2 91 dB全向天线水平隔离距离

如图2所示,当LTE 1 800 MHz和NR 2 600 MHz共同部署时,其隔离需求为30 dB,两系统间需要1.75 m的水平隔离距离;当LTE 1 800 MHz与无人机1 400 MHz共同部署时,其隔离需求为91 dB,需要2 352 m的水平隔离距离。

由于公共移动通信系统、应急通信系统、无人机飞控系统三者相互之间的隔离度需求为91 dB,以LTE 1 800 MHz为例,其同其他通信系统间至少需要221 m水平隔离距离,这一要求在各种机型的无人机上均不可实现;公共移动通信系统之间的隔离度需求为30 dB,若均为全向天线,以LTE 1 800 MHz为例,同其他公共移动通信系统所需的水平隔离距离至少为1.75 m,在部署多发多收和多套通信系统的中小型无人机上也难以实现。因此必须通过其他措施来满足

隔离度要求,如提升基站性能指标、调整天线布局、减小发射功率、调整天线方向角和下倾角、增加保护带等措施;而在无人机搭载空间受限条件下,且需保证覆盖效果,只能考虑更换高性能滤波器从而提升基站性能指标来实现。

3 基于无人机的基站性能指标

为确保无人机上各通信系统间能够实现有效隔离,最大限度地减少相互干扰,借鉴公共移动通信系统中有关共址指标要求^[9-11],结合无人机天线类型、工作频率、天面布局以及覆盖需求,考虑无人机平台不同的空间隔离能力,制定了搭载于无人机上的3种类型基站的性能指标,用以保障无人机在复杂电磁环境中的高效、稳定与安全运行,具体性能指标标准如表6所示。

表6 基于无人机的基站性能指标

类型	杂散指标/ (dBm/100 kHz)	阻塞指标/ dBm	三阶互调抑制 指标/dBc
类型I	-97	17	140
类型II	-107	27	150
类型III	-117	37	160

对于类型I基站,需要30 dB的空间隔离,对于类型II基站,需要20 dB的空间隔离,对于类型III基站,需要10 dB的空间隔离;建议公共移动通信系统、应急通信系统、无人机飞控系统在相互工作频率上具备类型I的能力。

3.1 大型无人机基站类型选择

基于类型I、II基站性能指标,当大型无人机飞控系统使用全向天线,其他通信系统使用定向天线时,类型I、类型II水平隔离距离的核算结果分别为0.8 m、0.4 m。因此,当大型无人机飞控系统使用1 400 MHz全向天线时,如具备类型I基站的能力,则同其他基站定向天线水平隔离0.8 m即可满足隔离需求。

当大型无人机上的移动通信基站使用定向天线时,其隔离距离需求如表7所示。从表7可知,类型I基站能力基本能满足空间隔离需求。

3.2 中小型无人机基站类型选择

基于类型I、II、III基站性能指标,当中小型无人机飞控系统和通信系统均使用全向天线,其隔离距离核算结果如表8所示。

当多架无人机飞行在同一空域时,飞控系统应至

表7 基于类型I、II的定向天线的隔离距离需求

制式	类型I		类型II	
	垂直/m	水平/m	垂直/m	水平/m
350 MHz	1.0	1.1	0.5	0.34
700 MHz	0.5	0.5	0.3	0.17
850 MHz	0.4	0.5	0.2	0.14
900 MHz	0.4	0.4	0.2	0.13
1 800 MHz	0.2	0.2	0.1	0.08
2 600 MHz	0.1	0.2	0.1	0.07
3 400 MHz	0.1	0.1	0.1	0.05
2 100 MHz	0.2	0.2	0.1	0.04

表8 基于类型I、II、III的全向天线隔离距离

制式	类型I		类型II		类型III	
	垂直/m	水平/m	垂直/m	水平/m	垂直/m	水平/m
350 MHz	0.96	8.57	0.54	2.71	0.30	0.86
700 MHz	0.48	4.26	0.27	1.35	0.15	0.43
850 MHz	0.41	3.64	0.23	1.15	0.13	0.36
900 MHz	0.38	3.37	0.21	1.07	0.12	0.34
1 400 MHz	0.18	2.10	0.13	0.66	0.06	0.18
1 800 MHz	0.20	1.75	0.11	0.55	0.04	0.12
2 600 MHz	0.13	1.19	0.08	0.38	0.03	0.09
3 400 MHz	0.10	0.91	0.06	0.29	0.05	0.15
2 100 MHz	0.17	1.43	0.09	0.45	0.30	0.86

少具备类型I的性能;当中小型无人机搭载1 400 MHz及以上频率的通信系统时,建议通信系统基站和无人机飞控系统应具备类型II的性能;当中小型无人机搭载900 MHz及以下频率通信系统时,建议通信系统基站和无人机飞控系统应具备类型III的性能。

4 结束语

本文借鉴移动通信系统间成熟的干扰理论框架,深入分析了系统间干扰、隔离度及隔离距离等参数指标,指出公共移动通信系统、应急通信系统、无人机飞控系统应至少在涉及的工作频段内把杂散辐射从-36 dBm/100 kHz降低到-97 dBm/100 kHz以下,且需提高带外阻塞指标到17 dBm以上以及互调指标应优于140 dBc。结合上述指标要求设计3种基站性能指标,并针对不同场景提出推荐的基站指标要求,为确保低空经济的健康、有序发展提供坚实的技术支撑。

参考文献:

[1] 张海燕. 复杂电磁环境下无人机通信干扰问题的探索[J]. 科技创新与应用, 2020(25): 75-76.

[2] 赵敏, 许彤, 程二威, 等. 无人机数据链电磁干扰机理和防护研究[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(3): 45-52.

[3] 姚昌华, 巫刚, 李家强, 等. 面向异构传输需求的多无人机通信协同抗干扰决策方法[J]. 电讯技术, 2024, 64(7): 1015-1024.

[4] 中华人民共和国工业和信息化部. 电信基础设施共建共享技术要求 第1部分: 铁塔: YD/T 2164.1-2022[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2022.

[5] 刘吉凤, 周瑶, 张忠皓. 5G NR FDD与WCDMA系统共存研究[J]. 邮电设计技术, 2021(2): 47-53.

[6] 潘桂新, 黄晓明, 李卫. 中国联通与中国电信LTE系统邻频合路研究[J]. 邮电设计技术, 2017(9): 47-51.

[7] 王守源, 安少康, 呼彦朴, 等. 5G基站的电磁特性检测[J]. 安全与电磁兼容, 2020(6): 18-22.

[8] 陈卓, 余重秀, 徐大雄. 无线通信系统频率干扰及其解决方案研究[J]. 数据通信, 2006(2): 17-18.

[9] 中华人民共和国工业和信息化部. TD-LTE数字蜂窝移动通信网基站设备技术要求(第二阶段): YD/T 3270-2017[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.

[10] 中华人民共和国工业和信息化部. FDD-LTE数字蜂窝移动通信网基站设备技术要求(第二阶段): YD/T 3727-2017[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2017.

[11] 中华人民共和国工业和信息化部. 5G数字蜂窝移动通信网6GHz以下频段基站设备技术要求(第一阶段): YD/T 3929-2021[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.

[12] 中华人民共和国工业和信息化部. 民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法[EB/OL]. [2024-08-06]. https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/1226211233/attach/202210/be43e8aach2e483f82969f9e6856f520.pdf.

[13] 中华人民共和国公安部. 警用数字集群(PDT)通信系统 射频设备技术要求和测试方法: GA/T 1255-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[14] 中华人民共和国工业和信息化部. 基于LTE技术的宽带集群通信(B-TrunC)系统 网络设备技术要求(第一阶段): YD/T 3780-2020[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.

[15] 李福昌, 裴郁杉, 王俊杰, 等. 基于“7·20 郑州特大暴雨”对空天地一体化通信的思考[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 81-85.

[16] 高洁, 范文博, 黄成富, 等. 应急通信空中平台的基站天线选型[J]. 长江信息通信, 2022, 35(12): 205-208.

[17] 曾勇, 周睿, 唐军, 等. 全网应急通信无人机系统设计与对地覆盖策略[J]. 电讯技术, 2024, 64(7): 995-1004.

作者简介:

李海军, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为移动通信和信息化工程咨询、规划、设计、行业标准编制工作; 马振东, 高级工程师, 学士, 主要从事无线网络规划、设计和优化等工作; 安少康, 高级工程师, 学士, 主要研究方向为通信领域的电磁兼容、电磁辐射、射频测试技术研究及标准编制工作; 胡雅静, 高级工程师, 学士, 主要研究方向为5G移动通信和卫星通信等; 李新谭, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为移动通信和信息化工程咨询工作; 胡明辉, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为大功率微波器件仿真、研制。