

doi: 10.7690/bgzdh.2022.11.017

## 系留无人机通信中继系统作战应用研究

郑华利<sup>1</sup>, 靳朝<sup>1</sup>, 雷超<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 32180 部队, 北京 100072; 2. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对系留无人机通信中继系统部署灵活、滞空时间长的特点, 分析系留无人机浮空通信中继系统工作原理, 建立通信中继模型, 对影响通信效能的主要因素进行分析, 研究无人机通信中继系统的作战应用问题, 并对未来发展趋势进行展望。结果表明, 该研究可为无人机通信中继技术系统发展提供参考。

**关键词:** 中继通信; 系留无人机; 军事化应用

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## Research on Operational Application of Tethered UAV Communication Relay System

Zheng Huali<sup>1</sup>, Jin Chao<sup>1</sup>, Lei Chao<sup>2</sup>

(1. No. 32180 Unit of PLA, Beijing 100072, China;

2. Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** According to the characteristics of tethered unmanned aerial vehicle (UAV) communication relay system, such as flexible deployment and long time staying in the air, the working principle of tethered UAV floating communication relay system is analyzed, the communication relay model is established, the main factors affecting the communication efficiency are analyzed, the combat application of UAV communication relay system is studied, and the future development trend is prospected. The results show that the research can provide a reference for the development of UAV communication relay technology system.

**Keywords:** relay communication; tethered UAV; military application

### 0 引言

现代战争对通信网络的依赖程度越来越高, 现有短波、超短波、微波等通信装备在平坦地形下, 通信效果较好, 在山地、丛林、城市等复杂环境下, 受地形、地物遮挡, 通信距离和带宽严重下降。

系留通信中继系统的工作原理与卫星中继通信类似, 可实现短波、超短波、集群通信、4G、5G 等多类通信信号的中继增程, 部署灵活, 可长时间滞空悬停, 是实现复杂地形战场通信的有效手段, 受到各国的高度重视。目前, 浮空通信系统的承载平台主要包括系留气球、高空飞艇、系留无人机等<sup>[1-4]</sup>。

系留气球依靠内部氦气或氢气产生静浮力升空, 系统成本低、留空时间长, 但其飞行轨迹难以控制, 浮空高度和精度受外部风速影响较大。高空飞艇依靠浮升气体提供静升力, 高度一般在 10 km 左右, 具有通信覆盖范围广、搭载通信载荷大等特点, 但成本高、操作复杂。系留无人机通信中继系统起源于以色列, 一般采用多旋翼或航道式无人机

结构, 地面电源通过系留线缆为空中无人机供电, 实现无人机长时间滞空悬停, 相比于系留气球、飞艇等, 具有悬停可控、灵活部署等优势, 目前美国、以色列等国已经大规模装备部队使用。

### 1 系留无人机通信中继系统概述

系留无人机通信中继系统主要包括无人机、通信中继载荷、线缆收放装置、地面电源系统等。如图 1 所示, 在地面线缆收放装置和电源系统的支撑下, 系留升空的无人机将通信中继系统上送至 50~300 m 左右的空中, 为地面用户提供跨越遮蔽的视距通信服务。

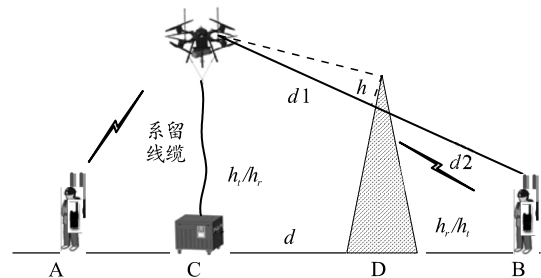


图 1 系留无人机通信中继系统

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-08-30

作者简介: 郑华利(1976—), 男, 河北人, 博士, 高级工程师, 从事信息系统装备论证、信息系统软件、军事建模与数据工程建设研究。E-mail: zhenghuali@126.com。

如图 2 所示,系留无人机一般采用多旋翼方式,包括 4 旋翼、6 旋翼、4 轴 8 旋翼、6 轴 12 旋翼等不同结构。共轴多旋翼无人机的动力系统采用冗余设计,在单桨故障情况下,无人机仍然能够悬停工作,提高无人机可靠性,一般多用于军用领域;4 旋翼或 6 旋翼成本低、重量轻,主要用于民用领域<sup>[5-7]</sup>。



图 2 4 轴 8 旋翼共轴系留无人机

通信中继载荷主要包括信道传输、网络控制、天线等功能设备,其性能直接决定系统的通信距离、覆盖范围、用户容量等关键指标;受无人机载重限制,大型通信中继节点一般将部分控制设备置于地面,通过系留线缆联接空中单元和地面单元。

地面线缆收放装置用于存放系留线缆,系留线缆内部集成电缆和光纤,同时实现供电和高速光纤通信功能,并支持长时间滞空悬停。

地面供电系统为无人机和通信载荷提供不同要求的供电保障,为降低系留线缆供电电流,进而减小系留线缆重量,目前一般采用直流高压供电,并通过无人机降压电源实现将高压直流电源降压为低压直流电。为提高系统可靠性,通常在无人机上预装备用电池,确保无人机在电源故障时,能够安全降落。

## 2 通信中继性能分析

通过对陆战场通信系统建模分析,系留通信中继通信系统接收机的接收信号强度可简化为:

$$P_r = P_t + G_t + G_r + G_d - 20\lg(d) - 20\lg(f) - 32.45 \quad (1)$$

式中:  $P_r$  与  $P_t$  为接收功率和发射功率, dBm;  $G_r$  与  $G_t$  为接收和发射天线增益, dB;  $d$  为发射天线和接收天线之间的水平距离, km;  $G_d$  为绕射增益, dB;  $f$  为信号频率, MHz。

接收机的接收灵敏度可表示为:

$$S = 10\lg(KTB) + NF + SNR + 30 \quad (2)$$

式中:  $S$  为接收灵敏度, dBm;  $K$  为波尔兹曼常数, J/K;  $T$  为绝对温度, K;  $B$  为信号带宽, Hz;  $NF$  为系统的噪声系数, dB;  $SNR$  为解调信号所需的最

小信噪比, dB。如果接收机的接收功率大于接收机的灵敏度,即  $P_r \geq S$ , 则接收机能够正常解调信号,中继通信系统能够正常工作;相反,则中继系统无法工作。

从以上公式可以看出,影响系留通信中继系统效能的主要因素包括天线增益、发射功率、接收灵敏度、天线高度等,下面对上述主要影响因素进行分析。

### 2.1 天线增益影响

在系留通信中继系统中,为实现中继信号 360° 空间覆盖范围,系留无人机的中继载荷天线一般采用全向鞭状天线。全向鞭状天线增益可近似表示为:

$$G = 10\lg(2L/\lambda)\text{dB} \quad (3)$$

式中:  $L$  为天线长度, m;  $\lambda$  为信号波长, m。在信号频率确定情况下,天线长度每增加 1 倍,天线增益增加 3 dB,通信距离理论上增加 40%。根据图 1,增加系留无人机中继天线,可以同时改善 C 到 A 和 B 点的中继通信距离,但是受限于系留无人机的载荷能力、抗风能力、安装空间等因素限制,目前系留无人机天线长度一般不大于 1.5 m。另一方面,增加 A 或 B 点地面端天线增益,只能改变 A 或 B 点到无人机端的通信距离,同时增加 A 和 B 两端的增益,才能提高系留通信中继系统的中继通信距离。在实际战场运用中,可通过在 A、B 点使用定向天线,增加天线增益,提高通信距离。

### 2.2 接收灵敏度影响

接收灵敏度表示接收机可以解析的最小信号强度,根据式(2),提高接收机灵敏度需要降低接收机噪声强度、降低接收机射频带宽。接收机噪声强度受器件技术水平限制,难以大幅降低;降低射频带宽会同步降低数据传输带宽,数据带宽降低为 1/2 时,理论通信距离增加 40%,在陆战场复杂应急情况下,可以通过降低通信速率,保证作战用户最低通信要求。

### 2.3 发射功率影响

发射功率主要受限于射频功率器件性能,随着射频器件技术的发展,大功率器件技术已相对成熟,但是增加发射功率只能提高单向通信距离,需要同时增加中继载荷和终端载荷的发射功率,才能提升中继系统的双向通信距离,另外提高发射功率将增加带外泄露功率,会增加对其他设备的电磁干扰。

## 2.4 天线高度和地形影响

根据 ITU-R P.526 单刀刃绕射模型<sup>[8]</sup>, 战场绕射增益  $G_d$  近似计算公式如下:

$$G_d = \begin{cases} 0 & v \leq -1 \\ 20\lg(0.5 - 0.62v) & -1 \leq v \leq 0 \\ 20\lg(0.5 \exp(-0.95v)) & 0 \leq v \leq 1 \\ 20\lg\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2}\right) & 1 \leq v \leq 2.4 \\ 20\lg(0.225/v) & v > 2.4 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $v = h\sqrt{2(d_1 + d_2)/\lambda d_1 d_2}$  为 Fresnel-Kirchoff 绕射参数;  $h$  为遮挡物的有效高度, m;  $d_1$  和  $d_2$  分别为遮挡物距离发射机或接收机的距离, m。绕射增益  $G_d$  近似曲线如图 3 所示, 随着障碍物有效高度  $h$  高度增加, 绕射损耗将急剧增大, 增加天线高度可以降低障碍物有效高度  $h$ , 减小障碍物遮挡影响。在地形确定情况下, 提高视距通信概率, 实现视距通信。在系留无人机通信中继系统中, 影响通信链路的的天线高度包括无人机高度和地面端天线高度, 地面端一般为单兵电台或车载电台, 在实际战场环境下, 受地形及装备高度影响, 增加地面端的天线高度难度较大; 增加无人机的高度, 可以同时提高图 1 中 A-C 和 C-B 的通信链路能力, 从而提升通信距离; 另一方面在遮挡物 D 高度确定情况下, 遮挡物 D 距离无人机 C 距离越近, 增加无人机高度对通信提升的效果越明显, 如果遮挡物距离地面 A、B 端距离较近时, 增加无人机高度对通信距离提升效果降低。

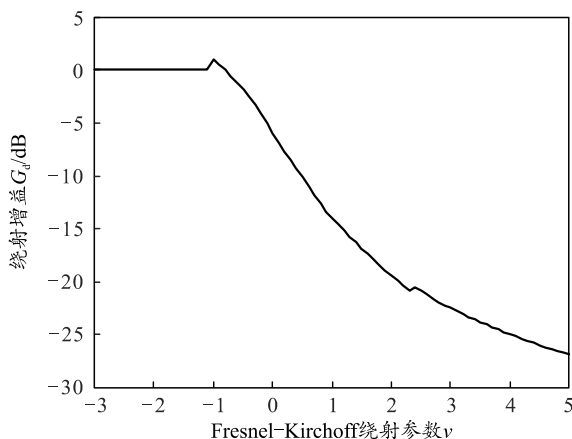


图 3 绕射增益  $G_d$  曲线

## 3 作战运用分析

系留无人机中继通信系统作为现代战术通信网络的重要与应急保障手段, 可将传统地面通信网拓

展为空地一体网络, 大幅提升陆战场通信保障能力, 解决复杂易遮挡地形环境下和广域作战场景下的通信覆盖范围受限和通信盲区等问题。

1) 作为空中中继节点, 拓展战场通信距离。

传统军事远距离通信主要依托散射、卫星等手段, 但散射通信受环境影响大、卫星通信易受敌方干扰, 在特定条件下难以满足远距离通信要求。采用系留无人机通信系统, 可将传统地面战术通信传输距离拓展数倍, 最大通信中继距离是该系统作战运用的关键指标。比如, 在炮兵/防空兵的前方侦察部位与后方发射阵地之间, 部署系留无人机通信系统作为中继节点, 有效延伸前方与后方通信距离, 满足远程火力打击、野战防空等作战需要; 也可为深入敌境的空突分队部署系留无人通信系统, 在前突分队与后方指挥所之间构建远距离通信中继链路。

2) 作为升空接入基站, 覆盖战场通信盲区。

长期以来, 以地面为主的战术通信系统在山地、峡谷、丛林、城市等复杂地域通联性能差, 战场上存在大量通信盲区。采用系留无人机通信中继系统作为空中接入基站, 将地面固定基站搬到空中移动, 通过搭载网络交换控制设备和信道传输设备等, 基于抗多径衰落波形和时域/频域均衡技术等, 克服地面障碍物对用户的遮蔽影响, 从而消除战场通信盲区, 覆盖通信区域是其关键指标。在作战运用中, 可针对战场环境变化提前进行网络规划, 临机在特定战场放飞系留无人机通信中继系统, 支持用户之间通信转发和网络交换。

3) 作为抗毁备份手段, 满足战场应急通信需求。

现代战争电子对抗激烈, 地面通信节点易受电磁干扰、遭敌信火打击, 导致通信网络瘫痪。在地面通信枢纽被毁后, 采用系留无人机通信中继系统作为应急空中接替节点, 通过快速升空、快速开通、快速运行, 可在较短时间内重组重构战场通信网络, 保障战场通信网络迅速恢复, 此时网络动态开通时间是其关键指标。

4) 作为空中组网骨干节点, 构建空地双平面网络。

传统战术通信骨干网主要依托地面节点构建, 存在距离近、抗毁性能差、易受地物遮蔽等问题。在陆战场地面骨干网络基础上, 使用系留无人机搭载微波等骨干通信设备, 作为空中骨干节点, 构建

分布式空中骨干网络，形成空地一体的双平面骨干网络，能够大幅提升骨干节点间传输距离，增强陆战场骨干网络的可靠性和抗毁性，网络传输带宽和用户接入容量是其关键指标。

#### 4 未来发展趋势

随着浮空平台技术的发展，系留无人机通信中继系统将向以下趋势发展：

##### 1) 无人智能值守。

当前系留无人机通信中继系统展开和撤收需要人工操作，在高寒、高海拔、沙漠、岛礁、边境地区，自然环境恶劣，不适宜有人长期驻守。在战场强对抗条件下，空中中继系统也容易成为敌方精确打击目标。随着无人化、智能化技术发展，系留无人机通信中继系统将向全自主化方向发展，系统将具有全天候无人值守能力，可快速自动部署和长期定点布置，减少系统人工操作与维护。

##### 2) 多样化工作模式。

当前系留无人机工作模式单一，不具备放飞、回收等多样化功能。比如，在城市作战复杂环境下，传统的定点浮空中继模式，难以适应高楼林立的作战环境；在战场快速推进条件下，需要通信中继系统能够伴随地面突击部队高速机动。为适应多样化的作战环境，未来系留无人机通信系统将向系留/非系留多模式发展，实现作战任务的多样化。

##### 3) 复杂环境适应能力。

系留无人机的抗风能力大约为 6 级风，在高原隘口、海岸、舰载等恶劣环境场景下，现有系留无人机抗风性能难以满足要求；另一方面，当前系留无人机悬停主要依靠北斗/GPS 进行定位，在强电磁干扰环境下，卫星定位信号易受干扰，无人机无

法可靠飞行；因此，未来系留无人机系统需加强抗风、抗雨以及卫星拒止等复杂环境下的可靠运行能力。

#### 5 结论

笔者阐明了系留无人机通信中继机理，构建通信中继战技性能影响因素模型，分析无人机升空高度、电台发射功率等影响通信系统性能的因素；明确了系留无人机通信系统在拓展战场通信距离、弥补战场通信盲区、满足战场应急通信和构建空地双骨干网络等方面的作战应用，并展望了其无人化、多样化和复杂环境适应性等发展方向，可为无人机通信中继技术系统发展提供参考。

#### 参考文献：

[1] 郎磊, 王荆宁, 李小明, 等. 基于浮空平台的星地激光中继通信系统设计[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(3): 304-309.

[2] 韩松岳, 黄伟, 李立甫, 等. 基于 5G 技术的军事应用场景构建[J]. 兵工自动化, 2022, 41(5): 53-59.

[3] 付松源. 系留多旋翼无人机及其在战术通信中的应用[J]. 无人机系统电子技术, 2018(44): 14-17.

[4] 许瑞明. 无人机集群智能涌现与演化建模论述[J]. 兵工自动化, 2021, 40(3): 5-9.

[5] 黄宇, 吴彦锋, 周镇宇. 基于系留无人机平台的应急通信中继技术研究[J]. 数据通信, 2020(2): 20-23.

[6] 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.

[7] 齐闾荣, 张氏, 姚洪斌. 小型无人机编队队形保持与重构算法设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(11): 32-35.

[8] RAPPAPORT T S. Wireless Communications: Principles and Practice, 2/E[M]. NJ: Prentice Hall PTR, 2002: 60-140.

[36] FLAKE G W, LAWRENCE S. Efficient SVM regression training with SMO[J]. Machine Learning, 2002, 46(1): 271-290.

[37] TANG M, CHEN F. Facial expression recognition and its application based on curvelet transform and PSO-SVM[J]. Optik, 2014, 124(22): 5401-5406.

[38] 马铮. 自抗扰控制技术在四旋翼飞行器中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.

\*\*\*\*\*

(上接第 62 页)

[34] 程恺, 车先明, 张宏军, 等. 基于支持向量机的部队作战效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1055-1058.

[35] 郭业波, 曾博韬, 郭贤生. 武器装备系统效能评估方法研究[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(3): 61-70.