

系留无人机在应急机动测控信息保障中的应用研究

李 娜, 宋 剑, 朱 琳, 高加俊

中国人民解放军63726部队, 宁夏 银川

收稿日期: 2024年9月12日; 录用日期: 2024年12月20日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

为了解决应急机动测控中的信息保障问题, 本文提出了一种利用无人机搭载卫星转发天线的方式, 实现测控设备与专用网之间的中继通信, 可将专用网覆盖范围在原有基础上向外延伸一定范围, 以支持机动测控装备在原本没有专用网覆盖的区域完成测控任务。分析结果表明, 采用该方法可将专用网覆盖范围向外延伸70 km以上, 并可实现带宽独享, 满足宽带高速数据传输需要。

关键词

无人机, 测控, 视距通信, 信息保障, 衰减

Research on the Application of Tethered UAV in Emergency Mobile TT&C Information Support

Na Li, Jian Song, Lin Zhu, Jiajun Gao

Unit 63726 of PLA, Yinchuan Ningxia

Received: Sep. 12th, 2024; accepted: Dec. 20th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

In order to solve the problem of information support in emergency mobile TT&C, a method of using UAV to carry satellite repeater antennae is proposed to achieve relay communication between TT&C equipment and the space business network, which can extend the coverage of the space business network to a certain extent on the original basis, so as to support mobile TT&C equipment to complete TT&C tasks in areas that were not covered by space business network. The analysis results

show that this method can extend the coverage of the space business network to more than 70 km, and can achieve exclusive bandwidth to meet the needs of broadband high-speed data transmission.

Keywords

UAV, TT&C, LOS, Information Support, Attenuation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

系留无人机，又称作系留式无人机，是多旋翼无人机的一种特殊形态，它是将无人机和系留线缆结合起来，通过线缆传输电能和信息，可实现 24 小时不间断的空中悬停，具有空中长时间作业、数据传输带宽大的特点。相较于传统的电池供电无人机，系留无人机可在空中停留更长时间，且仍保持高度的机动性，可以广泛应用于应急通讯、基地安全、景区检测、交通监管、影视拍摄、新闻采访等领域。

无人机在中继通信领域的研究受到学者的广泛关注。在无人机军事应用研究方面，军械工程学院袁全盛等人研究了无人机中继通信中的自适应编码技术及自适应调制技术[1]；西南电子技术研究所刘红军研究了美军无人机通信的现状及发展趋势[2]。在中高空无人机中继通信方面，重庆通信学院叶永桢等人研究了基于平流层无人机的无线光通信在军事上的应用[3]；海军 92941 部队张雪冬等人研究了一种利用中高空无人机进行遥测中继的方法[4]。在应急救援通信方面，电子科学研究院黄宇等人设计了一种基于无人机的应急通信中继系统，实现了在 100 m 悬停高度下，通信距离 23 km、最大传输速率 15 Mbps 的通信效果[5]；山东省地震局徐秀杰等人设计了一套系留式无人机中继通信系统，实现了在城区、郊区以及起伏较低的山谷、丘陵等地区，可实现单兵等移动图传系统与指挥车之间 5~10 km 范围内稳定、实时、快速的数据传输。上述研究多集中在民用应急救援领域，军事应用多是解决战术单兵的超视距通信问题。

专用网是支撑航天发射试验的基础平台，是联接各类信息传送的桥梁纽带[6]，航天测控装备通过专用网向指挥中心发送测控数据，并接收来自指挥中心的指挥和控制信息。

由于卫星通信需要申请卫星资源，都普遍存在着周期长、流程复杂、效益低的问题，并且传统的地面光纤通信只能依托现有的测控阵地，极大地制约了机动测控的范围。因此在专用网的覆盖区域范围之外，应用无人机可以作为其延伸而增加通信覆盖范围[7]，且部署灵活[8]。

本文利用系留无人机搭载卫星转发天线，通过线缆连接置于地面的 Ku 频段卫星转发器，设计了一种基于无人机的中继通信系统，实现机动测控装备与通信网的互联互通，解决应急测控时卫星通信资源紧张、申请周期长、效益低的问题，还可以独享带宽，实现高速数据传输。

2. 系统设计

2.1. 系统基本原理

本文中该系统的基本原理是采用无人机搭载转发天线，升空悬停在一定高度，转发天线通过信号线缆与放置在地面的卫星转发器相连，指挥中心通过既有专用网与地面卫通设备相连，地面卫通设备向无人机携带的转发天线发送无线信号，转发天线将接收到的信号通过信号线缆送至转发器进行变频并经过功放放大后，转发器通过信号线缆将放大后的信号发送至转发天线，机动卫通车接收到信号后，通过内

部局域网向机动测控装备发送指挥和控制信息；机动测控装备将测量数据通过相反的流程向指挥中心发送，系统原理图如图 1 所示。

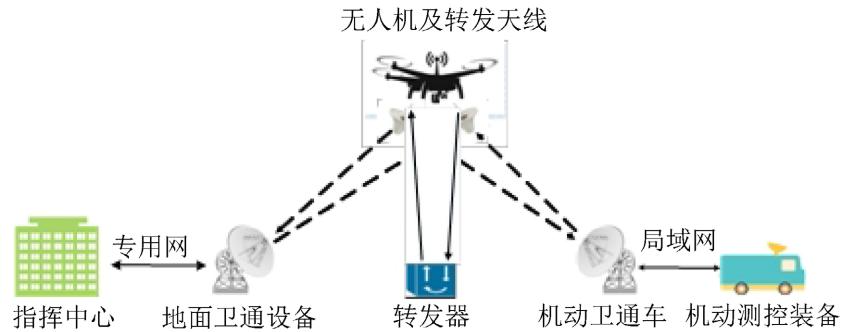


Figure 1. System schematic diagram
图 1. 系统原理图

2.2. 系统组成结构

系统分为三部分：机上部分、机下部分和附属部分，其中机上部分包括无人机平台和转发天线；机下部分包括转发器和功放；辅助部分包括线缆及其收放装置、电源(发电机或市电)、AC/DC 转换器。系统组成框图如图 2 所示。

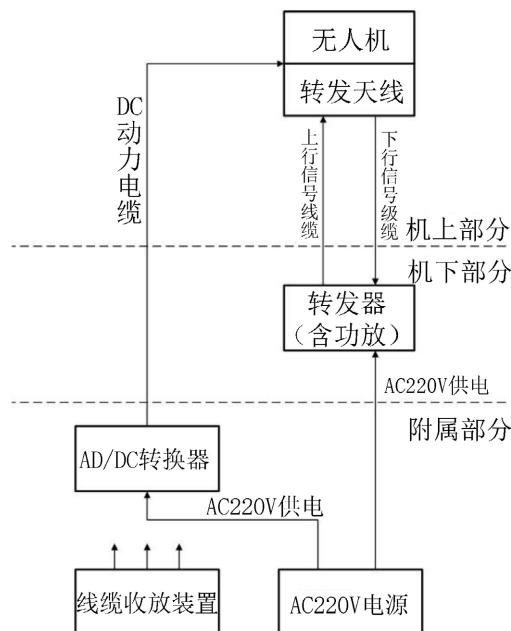


Figure 2. System composition diagram
图 2. 系统组成示意图

2.3. 系统功能与作用

无人机提供升空平台，扩展与地面通信设备之间的视距距离，搭载转发天线，实现与地面卫通设备之间的信号收发。

转发器和功放转发器的功能是接收来自地面的微弱信号，并将信号变换到下行信号和合适的功率电

平上。转发器有透明转发器和处理转发器两种，透明转发器结构简单、成本低、可靠性高，能够满足大多数业务的需要，目前通信卫星上使用的转发器绝大多数是透明转发器。透明转发器的基本结构如图 3 所示。

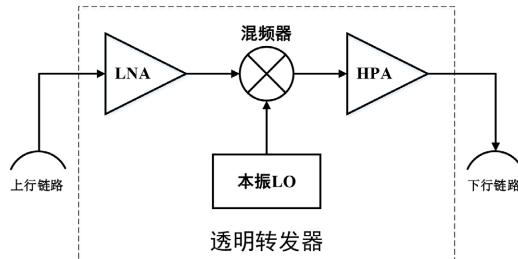


Figure 3. Transparent repeater structure diagram
图 3. 透明转发器的基本结构

线缆需要三根，分别是动力线缆、发射信号线缆和接收信号线缆，其中动力线缆负责向无人机提供能量，其型号由无人机功率确定，收发信号线缆的信号需要综合线缆重量、信号衰减等因素综合确定。

线缆收放装置完成动力线缆和信号线缆的有序、快速收放；电源提供 220 V 交流电，向线缆收放装置、转发器、功放及 AC/DC 转换器提供电能，在有市电保障条件下，使用市电，没有市电保障的，采用发电机；AC/DC 转换器将 220 V 交流电转化为 24 V 直流电，通过动力电缆输送给无人机。

3. 指标核算

3.1. 线缆衰减

虽然全向天线增益大，可以接收更微弱的信号，但由于无人机指向控制比较困难，因此无人机携带的通信天线为全向天线，收天线和发天线各 1 副，地面卫星通信设备采用定向天线。

考虑到无人机需要有一定的载重量，这里选用大疆定制型 LD-XF60 型大载重无人机(如图 4 所示)，其主要参数如表 1 所示。



Figure 4. LD-XF60 heavy duty multi UAV
图 4. LD-XF60 型大载重无人机

根据无人机技术指标，计算得知在负载 20 kg 时，其功率小于 8 kW，因此选择动力线缆市场上常见的 2 芯 4 方护套线，其重量为 15.6 kg/100 m。

关于信号线缆的选用，根据国家行业标准 GY/T135-1998、SJ/T11138-1997 及本系统的需求，初步确定可选用的线缆有 SYWV(Y)-75-5、SYWV(Y)-75-7、SYWV(Y)-75-9 和 SYWV(Y)-75-12 四种，查询相

关参数, 这四种线缆在 1 GHz 频率衰减系数分别为 22.7 dB/100 m、14.9 dB/100 m、11.7 dB/100 m 和 9.2 dB/100 m, 线缆重量分别为 41 kg/km、58 kg/km、80 kg/km 和 125 kg/km。

Table 1. Main technical indicators of UAV
表 1. 无人机主要技术指标

指标	参数值
有效最大载荷重量	≥20 kg
最大起飞重量	≥60 kg
GPS 垂直悬停精度	±0.5 m
GPS 水平悬停精度	±1.5 m
可承受最大风力	8 级
无负载悬停时间	≥50 min
负载 10 kg 悬停时间	≥45 min
负载 20 kg 悬停时间	≥30 min
供电电压	24 V 3 A
电池容量	22,000 mAh
电池数量	8

假定每副全向天线的重量为 1 kg, 根据无人机参数可知, 该型号无人机可承载动力线缆及信号线缆的总重量为 18 kg。已知线缆衰减与频率的平方根成正比[9], Ku 频段频率按 15 GHz 计算, 那么这四种型号线缆的在 15 GHz 下的衰减分别为 87.9 dB/100 m、57.7 dB/100 m、45.3 dB/100 m、35.6 dB/100 m, 根据以上约束条件, 采用这四种信号线缆的无人机升限及线缆衰减计算结果如表 2 所示(其中, 线缆重量 = 动力线缆重量 + 信号线缆重量)。

Table 2. UAV ceiling and corresponding cable attenuation
表 2. 无人机升限及对应的线缆衰减

参数	SYWV (Y)-75 系列			
	-5	-7	-9	-12
线缆重量/kg/m	0.238	0.272	0.316	0.406
升限/m	75.6	66.2	57.0	44.3
线缆衰减/dB	66.5	38.2	25.8	15.8

3.2. 作用距离

在视距通信中, 通信距离主要受地球曲率和链路功率的影响。在理想状况下, 在仅考虑地球曲率的情况下, 通信距离可以按照如下公式计算[4]:

$$R = 4.12 * \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right) \quad (1)$$

式中, h_1 和 h_2 分别为发射天线和接收天线的高度, 单位为 m, R 为视距半径, 单位为 km。假设地面卫星车的高度取 4 m, 根据公式(1)并结合表 2, 计算在采用不同型号线缆下的视距半径, 计算结果如表 3 所示。

Table 3. Sight distance radius corresponding to different types of cables
表 3. 不同型号线缆对应的视距半径

参数	SYWV (Y)-75 系列			
	-5	-7	-9	-12
视距半径/km	44.1	41.8	39.3	35.7

无线电波在自由空间的传播损耗可以按照如下公式进行计算，式中 R 单位为 km， f 为卫星转发器通信频率，单位为 MHz：

$$L_s = 32.5 + 20 * \log_{10} R + 20 * \log_{10} f \quad (2)$$

地球同步轨道(GEO)卫星的地高高度约为 36,000 km，大约是表 3 所计算的视距半径的 1000 倍，根据公式(2)，GEO 卫星的空间衰减比无人机大 60 dB 左右，因此所选用的信号线缆衰减不能超过 60 dB，否则转发器接收的信号太弱，无法进行有效转发，根据表 2 的计算结果，采用 SYWV (Y)-75-5 型线缆时的线缆衰减为 66.5 dB，故此种型号线缆不适宜作为本系统的信号线缆，在采用 SYWV (Y)-75 系列 SYWV (Y)-75-7、SYWV (Y)-7-9、SYWV (Y)-7-12 型号时，其作用距离分别为 41.8 km、39.3 km 和 35.7 km。

3.3. 多径衰落

在视距无线通信中，除自由空间损耗外，还有大气损耗和多径衰落[10]，在晴朗天气下，几十公里尺度下大气损耗较小，可忽略不计[11]；但在仰角较低的情况下，多径衰落是一个不能忽略的因素，为了使地面卫通车和系留无人机之间的信号传输距离在最大限度上延伸更远，本系统中的天线俯仰角接近 0 度，因此必须考虑多径衰落的影响。

开阔环境中，考虑多径效应影响下的空间衰减可用下列简化公式计算[12]：

$$L_m = L_s (1 + \tau \cos \Delta\theta) \quad (3)$$

其中 τ 为地面反射系数， $\Delta\theta$ 为多径引起的相位时延，其计算公式为：

$$\Delta\theta = 2\pi f \Delta t = \frac{2\pi \Delta D}{c} \quad (4)$$

其中， ΔD 为反射路径与直射路径的距离差(单位为 m)， Δt 为距离差引入的信号时延。

Table 4. Spatial attenuation and total attenuation considering multipath effect
表 4. 考虑多径效应情况下的空间衰减及总衰减

参数	SYWV(Y)-75 系列		
	-7	-9	-12
线缆衰减/dB	38.2	25.8	15.8
多径衰减/dB	26.7	26.6	26.5
自由空间衰减/dB	148.5	147.9	147
多径效应下的空间衰减/dB	175.2	174.5	173.5
总衰减/dB	213.4	200.3	189.3

在本系统中，由于地面卫通车天线高度和无人机悬停高度远小于二者之间的距离，故 $\Delta\theta \approx 0$ ，此时，受地球曲率的影响，收发信号漫反射的入射角在 60°以上，根据文献[13]的研究结论进行估算，北方干燥粗糙地面的地面反射系数约为 0.18，由式(3)和(4)可以计算，在考虑多径效应情况下的空间衰减及总衰减

(含线缆衰减)如表 4 所示。

根据式(2), 不难得出, Ku 频段(按 15 GHz 计算)通信卫星的空间衰减为 207.1 dB, 小于使用 SYWV(Y)-75-7 型线缆时的总衰减, 因此不能采用该型号线缆作为信号线缆, 故只能采用 SYWV(Y)-75-9 和 SYWV(Y)-75-12 这两种型号线缆作为信号线缆。

3.4. 结果分析

综合以上计算结果, 采用不同型号信号线缆的各项参数如表 5 所示。

Table 5. Summary of parameters of signal cables of different models

表 5. 采用不同型号信号线缆的参数总表

参数	SYWV(Y)-75 系列	
	-9	-12
线缆衰减/dB	25.8	15.8
空间衰减/dB	174.5	173.5
升限/m	57.0	44.3
视距半径/km	39.3	35.7
总衰减/dB	200.3	189.3
衰减余量/dB	6.8	17.8

在选用 SYWV(Y)-75-9 型信号线缆时, 信号衰减仅有 6.8 dB 余量, 余量偏小。为简单起见, 本文在分析时未考虑大气损耗、降水损耗、天线耦合损耗等因素的影响, 这些损耗一般在 3~10 dB, 因此在实际使用时, 也不能使用 SYWV(Y)-75-9 型信号线缆, 只能使用 SYWV(Y)-75-12 型信号线缆, 使用该型号线缆时, 视距半径最大为 35.7 km, 在理想情况下, 可实现距离为 71.4 km 的两台地面卫星通信设备之间的通信, 也就是说, 可以将专用网的覆盖范围向外延伸 70 km 以上。

3.5. 应用模式

使用时, 将无人机起飞地点选择为地面卫通天线与机动测控装备的中间位置, 且视距半径不超过 35.7 km。转发天线应当安装于无人机底部或顶部, 避免机身对信号造成遮挡, 影响正常通信。

地面卫通设备的发射功率在常规功率设置的基础上按照表 5 所示的衰减余量进行衰减, 然后再缓慢提升, 直至对端的信号电平符合指标为止。

要想实现转发器与地面卫通设备的通信, 必须要将地面卫通设备的天线对准无人机上的转发天线, 假定无人机和地面卫通天线所在位置的地理坐标分别为 (L_0, B_0, H_0) 和 (L_1, B_1, H_1) , 那么卫通天线的方位角 A 和俯仰角 E 由如下式(5)和式(6)近似计算得出:

$$\begin{cases} X = (B_0 - B_1) * \frac{\pi}{180} * R \\ Y = (L_0 - L_1) * \cos((B_0 + B_1) * \frac{\pi}{180}) * \frac{\pi}{180} * R \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} A = \left(\tan^{-1} \frac{Y}{X} \right) * \frac{180}{\pi} \\ E = \left(\tan^{-1} \frac{H_0 - H_1}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) * \frac{180}{\pi} \end{cases} \quad (6)$$

式中, R 为地球半径, 取 6.375×10^6 m, 经度、纬度、高程的单位分别为度和 m。

无人机和地面卫通天线的地理坐标可用设备自带 GPS 结果即可。图 5 是系留无人机进行试验时的实景图。



Figure 5. Real picture of tethered UAV
图 5. 系留无人机实景图

4. 系统应用发展前景

随着应急机动测控信息保障需求越来越大, 传统的卫星通信和地面光纤已无法满足信息保障需求, 利用该系统可实现快速建立通信桥梁, 在以后的发展中主要有以下四个特点:

(1) 利用地面卫星通信设备自带的保密机, 解决了无线通信中的保密问题

单从技术上讲, 解决机动测控中的无线信息保障的方法很多, 但其它方法都无法解决无线通信中的保密问题, 本系统使用原有的卫通保密机, 对无线信号进行加密和解密, 实现指挥控制信息和数据的安全传输。

(2) 无需对地面卫星通信设备进行改进或改造, 可直接使用设备

本系统对 Ku 频段地面卫星通信设备的使用与传统上使用通信卫星没有区别, 仅仅是通信天线的角度不同而已, 没有任何硬件和软件技术状态的变化。

(3) 无需申请卫星通信资源, 实现自我保障

本系统无需申请卫星通信资源, 克服了传统卫星通信资源协调难度大且传输带宽受限的缺点, 可以独享转发器带宽, 实现高速数据传输。

(4) 机动性更加灵活, 机动范围更广

利用系留无人机搭载卫星转发天线使得测控装备的机动性更加灵活, 不再受制于地理位置的局限性, 且进一步扩展了机动测控通信范围。

在实际应用过程中, 有以下两点需要注意: 一是需要根据无人机悬停功率和动力线缆电阻计算线缆

压降，设定合适的直流输出电压，以保证无人机长时间可靠工作；二是上述计算的视距半径和升限是理论计算的结果，实际使用时需考虑地面卫星通信天线周边建筑、树木的遮挡，实际通信距离比该理论值要小。

通过对应急机动测控中信息保障的问题进行分析，设计了一种利用系留无人机实现与地面卫星通信设备之间的中继通信方式，灵活拓展了机动测控装备的机动范围，无需申请卫星通信资源即可实现测控装备与指挥中心之间安全、可靠、高速的无线通信，将专用网的范围向外延伸了 70 km 以上。

参考文献

- [1] 袁全盛, 胡永江, 王长龙. 无人机中继通信的关键技术与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2015(10): 26-29.
- [2] 刘红军. 美军无人机通信中继发展现状与趋势[J]. 飞航导弹, 2017(2): 35-40.
- [3] 叶永桢, 李晓毅, 谭露. 基于无人机的中继通信系统在军事上的应用[J]. 信息通信, 2017(2): 212-213, 215.
- [4] 张雪冬. 基于中高空无人机的遥测中继系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(5): 67-70, 86.
- [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] 杜魁, 郝文缙, 潘亮, 等. 专用网闪断问题研究分析[J]. 测试技术学报, 2019, 33(4): 286-291.
- [7] 周天敬, 陈岳承, 傅庆丰. 一种基于升空平台的图像中继传输系统设计[J]. 电子世界, 2018(21): 181-182.
- [8] Kim, B., Kim, K., Roh, B. and Choi, H. (2018) A New Routing Protocol for UAV Relayed Tactical Mobile *Ad Hoc* Networks. 2018 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), Phoenix, 17-20 April 2018, 1-4.
<https://doi.org/10.1109/wts.2018.8363941>
- [9] 刘振, 张瑞江. 射频电缆的幅相稳定性测试研究[J]. 数字通信世界, 2021(4): 9-11, 40.
- [10] 陈嘉庆, 杨骏腾, 郭晴, 等. 开阔场环境下 VHF/UHF 频段单载波信号的空间衰减模型[J]. 中国无线电, 2022(5): 51-55.
- [11] 徐源, 陈伯孝. 地形对基于波瓣分裂的米波雷达测高方法的影响[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(1): 9-14.
- [12] 阿卜杜拉·卡西米. 无线通信传播工程[M]. 王敬超, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2020: 288-289.
- [13] 张秀再. 不同天气条件下气象卫星信道的建模与仿真研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.