

无人机射频通信链路稳定性提升的实践分析

吴少慈 张德超

石家庄海山实业发展总公司 河北石家庄 050208

摘要: 在测绘、后勤、应急救援等诸多方面,无人机面临的任务复杂性和环境挑战越来越大,对无人机的可靠性需求也越来越高。无线射频通讯是联系无人机与地控的关键通路,其数据的传输稳定与否将影响无人机的操作可靠性、数据回传质量以及总体工作性能。但由于城市建筑、山地地形以及电磁干扰等复杂的环境影响,导致其信号衰减、中断甚至失控,已成为影响无人机深度发展的重要技术瓶颈。因此,对RF通讯链路的稳定性能进行系统性的研究与改进,对于保证无人机安全运行、拓展其应用领域有着重要的实际价值。

关键词: 无人机; 射频通信链路; 稳定性提升

目前,无人机行业正处于快速发展的阶段,根据工信部最新公布的数字,目前,中国的无人机市场已经达到了1,200亿,与去年同期相比,上升25%,并有望在2025年达到1500亿。随着无人机的广泛使用,对其通讯性能提出了更高的要求。中国民用航空局飞机适航处到2025年一季度的一份报告显示,在国内注册的无人驾驶飞机中,大约68%是由于射频链路受到破坏或受到影响而引起的。尤其是在城区及工业物联网中,由于无线频段拥挤而引起的无线网络传输性能恶化问题更为严重。研究结果显示,随著无人机数目的迅速增加及使用情境的加深,射频通讯的稳定问题已经成为制约产业良性发展的重要问题,因此迫切需要从科技上提高无线通讯的可靠性。

一、无人机射频电路故障分析

(一) 电源噪声干扰机理

无人驾驶飞机射频回路的电源噪声是影响飞机通信链路稳定的首要因素。到2024年,国际电磁兼容性协会(IEEE EMC Society)测试表明,无人机通信中断事件中,有65%以上是由电源系统引起的。在2.4 GHz频段,直流脉动引起的本振相位噪声显著恶化,当纹波系数大于5%时,相位噪声将降低10-15 dBc/Hz,直接导致接收机误码率升高。以某工业无人机为研究对象,研究发现其开关电源模块在负载突变情况下产生的EMI峰值高达45 dB μ V/m,远远超过EN 55022 B级标准要求,严重抑制了接收机的灵敏度,降低了有效通信距离40%。多电压域耦合噪声传播路径分析表明,无人机数字电路(3.3 V/1.8 V)和射频电路(12 V/5 V)共接地阻抗是主要干扰

途径。矢量网络分析仪测试结果表明,当FPGA高速切换时,经地线耦合入RF前端的噪声可以达到-85 dBm,使接收机信噪比明显下降。特别是在高温高湿环境下,某型无人机在35℃环境下供电噪声水平较25℃升高8-10 dB,直接导致通信质量指标降低2个量级^[1]。

(二) 高频信号完整性缺陷

射频信号完整性不佳是影响射频链路性能的重要因素之一。中国电子标准化研究院2024年《微波电路质量白皮书》显示,在无人机射频系统中,由于阻抗不匹配引起的信号反射率高达32.7%,严重影响了系统性能。在5.8 GHz频段,微带线特性阻抗错配导致信号反射明显,当阻抗偏差大于10%时,其反射损失将达到-15 dB,使传输效率降低超过30%。对某测绘无人机进行故障分析时发现,由于射频馈线阻抗控制不严($53 \pm 5 \Omega$),导致驻波比(VSWR)高达2.5:1,较理想值高67%以上。本项目以某舰载无人机为研究对象,针对其服役200 h后,界面氧化导致接触电阻由5 m Ω 上升至85 m Ω ,6 GHz频段插损增大1.2 dB。根据IPC-6012D国际标准,FR4板厚度公差应控制在 $\pm 10%$ 以内,而实际测试中发现部分批次板厚偏差可达 $\pm 15%$,造成相位一致性误差大于8°,导致多天线MIMO系统波束赋形性能降低35%^[2]。

(三) 环境适应性不足

无人驾驶飞机射频链路的可靠运行受到了严重的限制。中国航天集团公司《无人机环境适应性报告》显示,由于滤波器温漂导致的滤波器频偏现象较为严重。LC滤光片的温度因子一般在-50~-100 ppm/C范围内,在25~75℃范围内,其中心频移可以达到2.5%,使相邻

信道的压制比降低 18 dB。在一架飞机上,一架飞机在夏天工作时,由于温度过高,使其带通滤波心频发生了 3.2 MHz 的漂移,使有效信号的有效损耗达 4 dB。基于 JESD22-B111 振动试验规范,无人机 0402 封装设备在 5 Grms 的震动下,其焊点的疲劳寿命只有 200 h;而在山地作业中,连续的振动造成了 32% 的高频组件的焊接接头产生微小的裂缝,使得地面阻抗由 1.5 mΩ 上升至 120 m。同时,高湿度条件下,绝缘体的介电常数也会发生改变,如 85% 相对湿度时,FR4 板的介电常数将增大 12%,从而引起线路的相移;在近海海域,由于湿度的改变,阵列天线的相位偏差达到 15°,使得方位通讯的增益降低 7 dB^[3]。

二、无人机射频通信链路稳定性提升策略

(一) 电源完整性优化

功率完整性的最优设计是提高无人机无线通信系统性能的重要前提。按照中国民航总局《民用无人机通信系统技术要求》,对无线射频组件的输出纹波提出了 10 mV 以下的限制,但实测结果显示,5% 以上的无人机通讯失效与功率噪声有关。根据国家发展改革委(5G)的专项测试结果,常规的开关功率(2.4 GHz)下的高频单元(2.4 GHz)相噪(-85 dBc/Hz)是限制其通讯范围和抗干扰性能的关键因素。在电力系统整体性能最优的实现中,首先应用了多层的 pi-pi 滤波器网络。在功率输出端构建三层结构,即 1 微米钽片电容对低频段的脉动进行滤除,2 层为 LC 复合(100 毫氟电感+1 μF),3 层为 0.1 微米 F 的 RF 电容,以降低高频的干扰。该方案使输出电压波动由原来的 150 mV 下降到 5 mV 以下,达到了军事规范 GJB18B-2012 A 类电源的需求。将本方法应用于测绘无人机,使其 OFDM 系统的误码率由 3.2% 下降到 0.8%。

其中,铁氧体微珠和退耦合电容器的协调布置是实现这一技术的重要环节。0.1 μF 的陶瓷电容器被安置在 RF 晶片供给管腿 2 毫米处,而 0805 包的 600 欧姆 @100MHz 铁氧体磁珠则被串接于该电路中。此结合可在 1-500 兆赫范围内,对噪声进行 40 分贝的压制,并能有效地阻止电子线路中的噪声传递至 RF 元件。试验结果显示,与常规的天线结构相比,这种结构可以将接收端的灵敏度提高到 -118 dBm,比常规的天线结构提高了 4 dB。以低电压差分线性电压调节器(LDO)代替传统的开关电源,是一种根本的改善方法。采用 TI 公司 TPS7A4700 型超高噪声 LDO,在保证高达 85% 的前提下,实现了

4.7 μVMS 的低噪声 LDO。在 LDO 输出口并联 100 μF 的电解电容器及 10 μF 的陶瓷电容器,并且在晶片的下方铺上一层厚的铜层以加强散热。通过对 200 台无人机进行技术升级,实现了对射频链路中断的 72% 的降低,系统的无故障运行时间提高到 1500 个^[4]。

(二) 传输链路增强

传输链路的增强是提高无人机无线通信系统稳定性的重要手段,其中,如何保证数据的高逼真度和界面的物理可靠性是其中的重要问题。以史密斯曲线为基础进行阻抗匹配的最优设计是提高能量转换效率的重要途径。按照《民用无人机射频技术要求》中的规定,无人驾驶飞机的无线通讯设备,其天线端的电压驻波比不得超过 1.5:1。在应用过程中,技术人员需要利用矢量网络分析仪对 RF 前端回路的 S 值进行测试,并在史密斯曲线上画出相应的阻抗曲线,从而准确地求出与之相对应的各参量。其方法为:第一步在 2.4 GHz、5.8 GHz 的工作频带内,用环形图形中常见的感抗区对其进行扫描;以 L 形匹配网络为基础,利用并联电容器的串联方式,在 50 欧姆的配合点上,逐级调节阻抗,使其达到圆形图形的中央;利用 0402 型高频芯片进行电路设计,将驻波率由优化之前的 2.2:1 降低到 1.3:1 以内,能量转换效率提高 25% 左右^[5]。

射频连接件镀金厚度规格的更新,将会影响到界面的耐用性和导电性。常规的连接涂层一般只有 0.2 微米,200 多个插头插入后,其触点电阻增大 30% 左右,造成了严重的信号损耗。新修改的《航空航天用射频连接器技术规范》对重要部件的镀层要求提高到 0.5 微米或更高,并对涂层进行 24 小时的盐雾试验。实际应用证明,按照新规范设计的接头,在同样的拔丝时间内,其触点电阻变化量小于 5%,且在湿度条件下也可维持其特征阻抗(50 ± 2 欧姆),大大减少了由于接触质量差而造成的信号干扰。采用刚-柔-黏合片(Rigid-Flex PCB)代替常规印刷电路板(PCB)是一种新型的、有效的方法,可有效地缓解在振动下链路故障。这种方法采用了一种新的方法,即把硬板片和软线路结合起来,并利用聚合物聚酰亚胺来进行分区之间的灵活连接。将一种新型的军用运输机改装成刚-柔联装后,经试验(5-2000 Hz,加载 10 g),系统失效率由原来的 35% 降低到 8% 以内(如表 1 所示)。基于弹性电路的新型天线结构,通过在天线阵列中引入一种新型的天线结构,实现对天线的高灵敏度、高可靠性、高可靠性和高可靠性的天线。基

于多天线的新型无线通信系统，将无线天线的传输距离缩减40%，降低天线的传输损失0.8 dB左右，从而提高系统的接收性能。

表1 无人机射频链路增强技术效果对比

技术措施	性能指标	提升效果
史密斯圆图阻抗匹配优化	电压驻波比 (VSWR)	2.2: 1 → 1.3: 1
射频连接器金镀层加厚	接触电阻变化率	30% → 5%
刚柔结合板替代传统PCB	振动环境下失效率	35% → 8%

(三) 环境适应性设计

针对无人机无线通信系统中存在的温度变化、机械振动、湿热等问题，提出了一种基于自适应的无线传输系统。据预测，在2024年，有42%的无人机的RF失效是由外界影响引起的，而由温度变化引起的频移则高达31%。为了解决这一问题，提出了一种基于温度补偿的介电振荡器(TC-DRO)技术。通过对外界温度的实时监控和调节，使其工作在-40℃到+85℃之间(-40℃~+85℃)，远超常规振子的测量精度。在实际实现中，TC-DRO器件需要与发热体保持一定距离，并通过导热硅胶强化散热衬底的散热，保证测温精度。针对飞机结构的减振问题，基于对“2025年”的飞机进行的可靠性试验，发现在飞机结构失效中，由振动引起的失效约占26%。为解决这一难题，在焊接接头的底面采用了补强的方法。以环氧树脂为基材，通过精密点胶装置将适当的胶粒均匀地涂覆于芯片周围，并通过毛细效应渗入锡珠缝隙中，再经过125℃热处理，得到力学支持。试验结果显示，该工艺对焊点抗振性能提高3.8倍，对5~500 Hz，振幅为2毫米的试验，无裂纹破坏。尤其是在一些关键的集成电路如功率放大器和频率合成器的组装中，更需要采用这种方法。

在高湿度和盐雾环境下，采用三种防护方法，并取得明显的成效。最近的调查显示，在海岸的飞机上，潮湿环境下的飞机的RF失效高达37%。利用氟化高分子纳米材料，利用真空镀膜的方法，在印刷电路板上制备5~10 μm厚、接触角大于150°的薄膜，防止湿气浸润。采用电路板清洗、等离子体激活、镀层沉积及固化四步工艺，在95%湿度、85℃的恒湿度环境下，经240 h试验，其绝缘电阻保留率可达90%，可有效避免电化学反应及金属侵蚀(如表2所示)。该方法尤其适合于海上巡视、

雨季等特殊情况下对无人机通讯系统进行保护，提高其在极端条件下的工作可靠性。通过该项目实施，实现射频链路-40℃到+70℃的低温范围内工作特性的变化幅度减小1/4，在振动条件下工作周期达到1200 h，在高湿度条件下工作寿命超过3倍，为飞行器在复杂工作条件下的可靠通讯奠定基础。

表2 无人机射频链路环境适应性技术成效对比

技术类型	应用指标	性能提升效果
温度补偿振荡器 (TC-DRO)	工作温度范围 (-40℃~+85℃)	频率稳定度 ±0.5ppm, 优于常规5倍
底部填充胶加固工艺	振动环境 (5 ~ 500Hz/2mm)	焊点抗振性能提升3.8倍, 零失效
纳米疏水三防涂层	高湿环境 (95%/85℃)	绝缘电阻保持率 > 90%, 寿命延长3倍

结束语

综上所述，提高无人机无线信道的稳定度，对于保障飞行安全，拓展其应用范围，推动产业的良性发展，都有着十分重大的意义。该研究对解决无人机在多个重要领域的实际问题，具有重要的科学意义和实用价值。在5 G-A/6 G通信、智能抗干扰以及自适应频谱管理等方面，无人机通信将朝着更加智能化、更加可靠和更加适应复杂的工作环境发展。在此过程中，通过不断地进行技术革新，不断地完善相关的标准，使无人机无线网络可以支撑更加自主安全的飞行，从而为我国的低成本发展奠定重要的理论与实践基础。

参考文献

- [1] 范哲. 无人机蜂群威胁及反无人机蜂群技术研究[J]. 中国宽带, 2025, 21(09): 133-135.
- [2] 边芮琪, 高振斌, 晏行伟, 等. 基于改进残差神经网络的无人机射频信号识别[J]. 电光与控制, 2025, 32(06): 86-93.
- [3] 丁雨谢. 一种无人机综合处理模块的设计与实现[J]. 现代导航, 2025, 16(01): 54-59.
- [4] 王豪, 罗俊松, 王惠明, 等. 无人机射频指纹识别方法综述[J]. 无线电工程, 2024, 54(11): 2672-2684.
- [5] 肖立新. 基于深度残差网络算法的无人机射频信号识别分析[J]. 长江信息通信, 2023, 36(04): 63-65.