

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.004

引用格式:涂宜锋. 无人机宽带测控与信息传输系统关键技术研究[J]. 电讯技术,2014,54(9):1193-1199. [TU Yi-feng. Research on Key Technologies of UAV Wideband TT&C and Information Transmission System[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(9):1193-1199.]

无人机宽带测控与信息传输系统关键技术研究*

涂宜锋**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:分析了中高空长航时无人机和高分辨率任务载荷的工程化应用对无人机测控与信息传输系统带来的工程和技术挑战,给出了构建适用的无人机宽带测控与信息传输系统需要考虑的因素和相应的系统组成,重点对需要攻克的关键技术进行了研究并给出了初步解决途径,可作为今后无人机宽带测控与信息传输系统工程研制的重要参考。

关键词:无人机;测控与信息传输系统;单载波频域均衡;高速数传

中图分类号:TN919.72;V279 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)09-1193-07

Research on Key Technologies of UAV Wideband TT&C and Information Transmission System

TU Yi-feng

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: This paper analyzes the engineering and technical challenges to the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Telemetry, Track & Command (TT&C) and information transmission system originated from engineering application of long-altitude long-endurance UAV and high-resolution payload, provides some necessary considerations and the corresponding system composition for designing an applicable UAV wideband TT&C and information transmission system, with emphasis on the key technologies and the initial technical routes, which can be used as important reference for the future engineering development of UAV wideband TT&C and information transmission system.

Key words: UAV; TT&C and information transmission system; SC-FDE; high speed data transmission

1 引言

随着高新技术在无人机领域的广泛应用,无人机平台及任务载荷均获得了长足的发展。中、远程高空高速无人机等信息化侦察作战平台具有大的承载能力、长续航能力、全天候全天时自主飞行和规避危险能力以及低的可观测性,可作为长航时、高可靠、高精度的侦察监视、定位导航和通信与数据中继平台,能够携带多种高精度侦察设备、定位导航设备

和区域通信与数据中继设备,在任务区域长时间驻留,不间断地执行规定的任务,从而使无人机平台成为陆海空天一体的通信、导航、侦察监视系统的有力补充^[1]。

无人机在执行高精度侦察或测绘任务时,其所携带的侦察任务载荷有低照度轻量化高分辨率可见光相机、长焦斜视双频段侦察相机、高光谱成像仪和高分辨率 InSAR/GMTI 雷达等,测绘类载荷有面阵

* 收稿日期:2014-04-24;修回日期:2014-07-31 Received date:2014-04-24;Revised date:2014-07-31

** 通讯作者:yftuye@163.com Corresponding author:yftuye@163.com

CCD 摄影相机和分布式阵列天线合成孔径雷达等, 这些载荷都将产生大量待处理数据, 相应的数据需要根据实时性要求传输到地面进行加工、处理, 形成可用产品, 如按原始数据量进行传输, 则数据率必须达到数百 Mb/s 才能满足要求, 在系统传输能力的约束下, 往往需要通过数据压缩方式以丢失部分有用信息为代价来降低传输速率。显然, 数据传输系统传输和处理的速度越高, 可获取的信息量越大, 侦察的效率就越高, 效果就越好。因此, 高速信息的传输和处理是实现高精度侦察、高速数据中继任务的关键环节。

另外, 在情报侦察方面, 目前需要解决的问题是原始采样数据的实时下传。由于在侦察过程中会发现许多新出现的未知信号, 而这些信号中有部分不能在无人机平台上实时处理, 需要传回地面的情报站进行进一步的分析, 这也对传输链路提出了更高的要求。由于现在侦察的目标信号带宽越来越宽, 动态范围也越来越大, 因此相应的 AD 采样位数与速率也越来越高, 导致数据量急剧增加。目前通常采用的办法是将该类信号的原始数据存储在飞机平台上, 等任务执行完成后在地面进行卸载。这种方法带来的问题是时效性较差, 特别是对于留空时间很长的长航时无人机, 这种问题尤为突出, 因此也急需采用大容量地空宽带数据传输通道。

无人机在中远程视距作用距离范围内, 测控站与终端用户经常需要处于无人机覆盖地带边缘执行任务, 在这种情况下, 无人机升空、着陆及平台的随机摆动与反射, 不仅会造成信号电平严重衰落, 而且会出现多径反射误差; 地面站对无人机进行连续跟踪时, 将呈现低角抖动, 这就是低仰角跟踪的多径效应。多径效应会造成信号的衰落而影响信号的接收和解调, 尤其是对高速信息传输会产生更为严重的影响。此外, 低仰角下多径效应还会导致跟踪天线差方向图零点发生偏移, 影响天线跟踪的平稳性、准确性, 在低仰角跟踪多径效应影响严重时, 可能会造成链路中断, 甚至目标的丢失, 为此就产生了无人机测控与信息传输链路在低仰角多径条件下的高速数据传输及目标稳定跟踪问题。

测控与信息传输系统是无人机系统的生命线, 需为无人机提供安全、可靠、即时、连续的测控与信息传输服务。传统的低频段窄带测控与信息传输系统(L 频段为主) 和准宽带测控与信息传输系统(C 频段, 信息速率不高于 32 Mb/s) 存在可用带宽窄、

抗干扰能力差、传输速率不足等缺点。与传统较低频率的频段相比, Ku 频段测控与信息传输系统可提供更宽的信道、更高增益的天线以传输更大容量的数据, 可提供更窄的波束宽度, 提高系统的抗干扰能力, 可提供更小更轻的测控与数据传输设备, 减轻对无人机载荷能力要求。测控系统采用 Ku 频段设备, 还可与卫星中继无人机载终端设备实现综合化, 进一步减小对系统设备配置的要求。在诸如 RQ-8B 火力侦察兵、联合无线空战系统(J-UCAS) 等新型系统中美军也主要使用 Ku 频段测控与信息传输链路^[2-3]。

为适应低仰角高速数据传输要求, 无人机测控与信息传输需要在现有技术基础上, 在低仰角抗多径传输体制、多任务载荷接入技术、低仰角二维天线稳定跟踪等技术方面切实采取措施, 降低高速数据在低仰角多径宽带信息传输条件下的不利影响。

2 系统组成

无人机 Ku 频段测控与信息传输系统由一套地面测控站(简称地面站, 含地面控制站、地面数据终端) 和一套机载数据终端组成, 系统组成及工作原理示意图如图 1 所示。

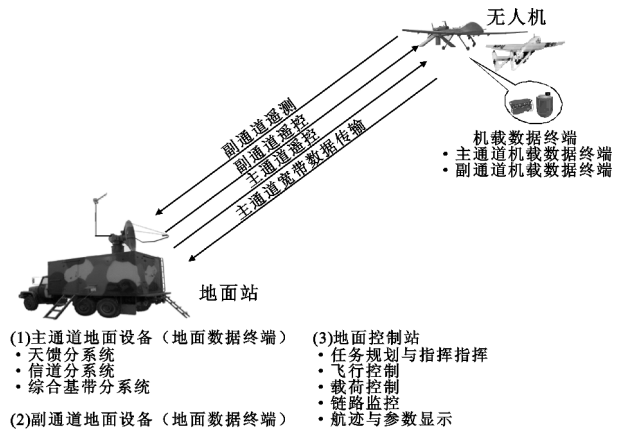


图 1 Ku 频段测控与信息传输系统组成示意图
Fig. 1 Structure of a Ku-band TT&C and information transmission system

地面站与机载数据终端之间的地空数据链主要是一条 Ku 频段视距宽带数据链(该链路作为主通道或主链路)。为提高可靠性, 系统还将配置一条 UHF 频段视距内备份数据链(简称副通道或备用链路)。

Ku 频段视距宽带数据链路作为无人机测控通信主通道, 主要完成对飞行器的遥控、遥测、跟踪定

位与话音、数据通信与高速载荷数据传输等功能。地面数据终端与地面控制站设备采用统一装车,简化系统规模。

UHF 频段备用链路作为副通道,是主通道的热备份,可完成对无人机的遥控、遥测和语音传输功能。

本系统中地面测控站由地面控制站(GCS)、主通道地面数据终端(M-GDT)、副通道地面测控设备(A-GDT)等三部分组成。

(1)GCS:GCS 采用车载式方舱结构,组成结构包括地面载车和方舱等辅助保障设备。车载指挥控制设备与 M-GDT、A-GDT 等集成在一个方舱内,GCS 设备与 M-GDT 和 A-GDT 之间采用 RS422 和 TCP/IP 等标准数据接口及通信协议进行通信。

(2)M-GDT:为无人机系统地空测控数据链路主链路的地面端设备,工作于全双工模式。该设备集成在地面站方舱内。

(3)A-GDT:为无人机系统地空测控数据链路备用链路的地面端设备,工作于全双工模式。该设备集成在地面站方舱内。

机载数据终端分主通道机载数据终端(M-ADT)、副通道机载数据终端(A-ADT)两部分。

(1)M-ADT:为无人机系统地空测控数据链路主链路的机载设备,工作于全双工模式。该设备主要安装于无人机设备舱内(天线除外)。

(2)A-ADT:为无人机系统地空测控数据链路备用链路的机载端设备,工作于全双工模式。该设备主要安装于无人机设备舱内(天线除外)。

M-ADT 和 A-ADT 为物理上完全独立的两个设备,分别通过专用接口(如 RS422,可通过外接接口转换模块扩展其他接口)与机载飞行管理计算机连接。

3 关键技术及解决途径

3.1 低仰角抗多径传输技术

(1)编解码技术

LDPC 码作为一种逼近香农限的好码,已经得到了广泛的研究与应用。它与 Turbo 码相比,具有复杂度低、译码延迟低、中高信噪比误码平层小、吞吐量高的优点,因此更适合应用于高速数据传输系统中。

实现数据速率300 Mb/s的高速 LDPC 编译码器应主要解决以下一些关键问题:编码块的帧同步和

相位模糊纠正技术、高速电路接口技术、大规模并发计算调度、比特似然比矩阵的简化计算和快速填充技术、译码算法的简化技术、译码加速技术、多端口独立存储技术、并行数据调度技术、快速结点计算处理单元等。

(2) 抗多径迭代均衡技术

在普通的频域均衡系统中频域均衡与信道译码是两个独立的部分,信息没有充分交互利用,导致解调门限偏高。为了解决这一问题,可以采用均衡与译码联合迭代技术,即 Turbo 均衡。Turbo 均衡实际上是将信道看做一个串行级联码的内编码器,将译码器输出的软信息反馈给均衡器,并通过多次迭代,在均衡器和译码器之间充分交换信息获得性能上的提高^[4-5]。

均衡与编码联合迭代分为时域反馈迭代(TD-DF)和频域反馈迭代(FDDF)两类,其区别在于反馈滤波和反馈滤波器系数更新所在的域不同,但最基本的思路都是通过一些统计信息和信道信息得到前后向滤波器系数,进而得到均衡软输出。采用时域反馈方式计算反馈滤波器系数时需对矩阵进行求逆,在无人机高速数据传输的应用中,由于带宽很高,需要对抗的多径延时又很长,导致逆矩阵规模过大,很难在实际系统中使用。而 SC-FDE 系统本身采用的是频域均衡,所以更适合采用频域反馈方式,即频域均衡频域判决反馈(FDE-FDDF)。这种方法在频域上求反馈滤波器系数,无需进行矩阵求逆的运算,同时便于更多地利用 FFT,进一步降低了运算复杂度,有利于系统实现。频域反馈 Turbo 均衡如图 2 所示。

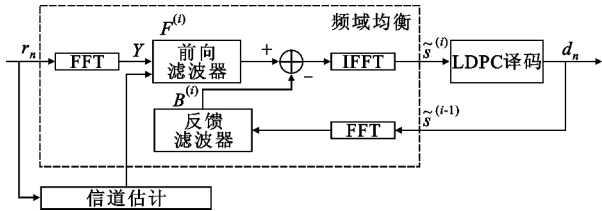
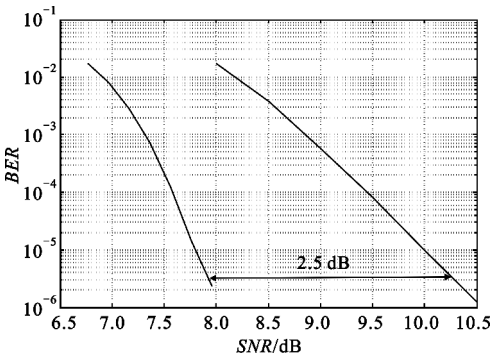
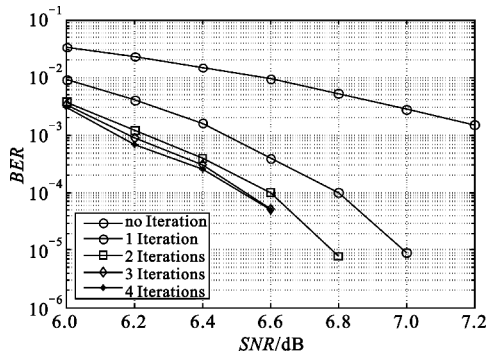


图 2 FDE-FDDF 均衡系统框图
Fig. 2 Block diagram of FDE-FDDF system

我们通过仿真比较了 AWGN 信道、SUI-3 多径衰落信道下 Turbo-SC-FDE 系统与普通 SC-FDE 系统的性能差距(映射方式 QPSK、信道编码 LDPC(8192,7168)、归一化频偏为 6.7×10^{-5}),仿真结果如图 3 所示。



(a) 白高斯信道



(b) SUI-3 信道

图 3 白高斯信道和 SUI-3 信道下 Turbo-SC-FDE 性能
Fig. 3 Turbo-SC-FDE performance under AWGN channel and SUI-3 channel

从图 3 中可以看出,在 AWGN 信道下,迭代系统和非迭代系统的性能差别在 2.5 dB 左右,而多径信道下 SC-FDE 系统通过迭代性能提升的幅度非常明显,当信噪比较高时,即使只有一次迭代,均衡译码后的误码率也能迅速下降,而非迭代系统的误码率下降得没有这么快,且在多径信道恶劣时,可能会存在误码平台。同时从图中可以看出,联合迭代系统相对于非联合迭代系统性能提升明显,但随着迭代次数的增加,系统性能的提升越来越小。

3.2 高性能宽带信道技术

数传信道中的主要技术问题可概括为失真和噪声。波形失真将引起码间干扰,眼图的眼孔张开度减小,使误码率增高和频谱失真;幅度和相位噪声也将产生误码,使误码率增高。系统中引起失真的主要因素有相频和幅频特性不理想、非线性失真、驻波以及多径干扰等,产生噪声的主要因素有系统热噪声(用系统等效噪声温度表征)和相位噪声(用频谱纯度或短稳表征)以及设计不当引起的互调干扰等。

信道传输系统的幅相特性不理想将引起信号线性失真,使系统误码率增加。而且码速率愈高,影响

愈大,尤其是相频畸变将会引起严重的码间干扰。线性失真主要表现在滤波系统的群时延失真与幅度失真。无论是哪种失真,它都由带内的线性失真、抛物线性失真和正弦失真三部分组成。3 种失真成分对信道 BER 的影响程度是不同的,而且群时延失真与幅度失真的影响也各不相同。通常,滤波器带内线性群时延变化影响最大,正弦群时延次之。而幅频特性的影响则是幅度正弦波动影响最大,抛物线性幅度失真影响次之。为了使线性失真对系统 BER 不产生严重影响,要求系统在感兴趣基带传输带宽中具有平坦的幅频响应和群时延特性。

(1) Ku 频段信道噪声及幅频特性

Ku 频段信道主要包括低噪声放大器和第一下变频器,可采用一体化设计组成 LNB。通常情况下,对低噪放输入端按最佳噪声匹配可以获得较低的噪声系数,但必然导致输入端驻波变差,为此,在低噪放前加一级隔离器,可以改善输入驻波。下变频器选用谐波混频器。谐波混频器虽然变频损耗略大,但由于本振频率低,实现难度相对较小,并且谐波混频器能有效抑制本振的奇次谐波参与混频,也能很好抑制本振的偶次谐波输出。

(2) 信道的相位噪声

信道的相位噪声对比特误码率的影响主要由接收机本振相位噪声、解调器及载波恢复环路的带宽决定,而微波接收机本振的相位噪声性能是由在信号带宽内对其相位噪声谱密度的积分得到的相位抖动均方根值 RMS 确定。由于高速数传信号占用带宽较宽,故影响更为严重^[6]。

本振源的相位噪声会降低信噪比,增加系统误码率,是高速数传系统必须严格控制的。一旦信道中包含了较高的相位噪声,即使是增强接收信号电平也无法降低误码率。相位噪声主要由本振源引起,经倍频按倍频次数 K 的 $20\lg K$ 增强。当载波频率高且数传速率也较高时,对相位噪声的要求更高。为了减小相位噪声,一本振宜选用低本振(即减小 K)。

(3) 信道群时延特性

对高速数传,由群时延引起的 BER 性能恶化较为严重,需要根据系统的误码特性要求进行分析,综合设计信道及高速解调器群时延均衡能力,合理分配群时延指标,并在设备研制过程中严格控制^[6]。

在实际系统中确切地分析各种调制的群时延变化影响非常困难,而进行仿真研究则较为简单,因此,实际应用中通常通过仿真来评估采用不同调制方式时每种群时延(线性、抛物线、波动)引起的发

射符号波形变化和误码率 (BER) 恶化值。

3.3 小型化轻质机载天线设计技术

无人机机载设备体积、重量和功耗指标是设备先进性的重要标志之一,小型化是无人机系统始终追求的目标。由于飞机运动特性比较复杂,运动的速度较快,要求定向天线能够快速准确地捕获和跟踪飞机的运行轨迹,保证可靠的信息链路传输。为此,机载需要设计小型化、重量轻、低功耗的伺服机构,保证天线转动平稳可靠,同时考虑新颖的阵面形式。主要可从以下三个方面入手。

(1) 高效率天线单元及灵活的天线阵列组阵技术

天线采用新型高效率的平板阵列天线单元形式,形式新颖,天线面尺寸可以根据安装条件任意改变形状,充分利用安装空间,适合车载或机载使用,代表了新型低剖面天线的发展方向。

(2) 有源一体化设计技术

天线阵列单元可以和有源器件进行一体化设计,阵列天线在同一辐射口面集成两种正交的线极化阵列,通过圆极化器使得能够按照圆极化方式工作。将天线阵列、馈电网络、LNA 进行一体化设计,整体结构简洁,可减小馈电损耗,提高天线效率,降低天线重量,缩小天线厚度,提高天线整体性能。

(3) 天线结构新型材料、工艺设计技术

优化结构设计,在保证振动等结构强度的情况下,采用挖空等措施减重;天线面采用密度较轻的高强度合金材料,降低天线重量;对天线齿轮等采用轻质材料的可行性进行必要分析。

3.4 多任务载荷接入技术

无人机搭载多种传感器协同执行任务,一次任务过程完成综合性情报侦察,保证得到连贯、完整的战场态势,可提高系统完成任务的效率,从而可提高无人机系统的使用效能。

宽带测控与信息传输系统机载数据终端可提供千兆以太网、1394、RS422、LVDS、HDMI、HD-SDI、YPbPc 和 Cameralink 等标准数据接口,可实现多种任务载荷数据(包括普清、高清、语音、遥测、高分辨率载荷数据等)的接入。

可参照网络分层协议框架,结合多任务载荷数据传输及链路管控的需求,对测控传输系统协议进行了设计。在实现不同用户端口数据的接入及分发的时候,考虑到复接效率和不同用户端口速率的差异,主要采用基于短数据的固定复接和基于长数据的动态复接的混合复接方案,完成数据分段/重组

和适配的操作,实现不同来源、不同数据速率的信息复合以及实时下传。

(1) 各种下行模式复接帧格式设计

下行传输的数据包含链路管理数据、测距数据、时间信息、机载数据终端状态、下行用户数据,其中下行用户数据可能包含遥测数据、视频数据、照片数据、语音数据和高速载荷数据等。

下行复接帧由复接报头、多个短复接以及长复接单元组成,不同速率档采用不同的帧格式。高速 (32 ~ 300 Mb/s) 下行采用基于短数据的固定复接和基于长数据的动态复接的混合复接方案,如图 5 所示;中速 (2 ~ 8 Mb/s) 下行采用基于固定复接单元长度的动态复接方案,如图 6 所示;低速 (12.8 ~ 200 kb/s) 下行采用纯动态复接方案,该模式下数据区包含的用户数据的类型以及用户数据包的长度全部不固定,如图 7 所示。

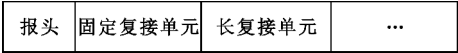


图 5 高速下行复接帧格式图
Fig. 5 Multiplexing frame structure under high speed downlink

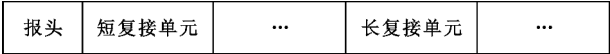


图 6 中速下行复接帧格式图
Fig. 6 Multiplexing frame structure under middle speed downlink

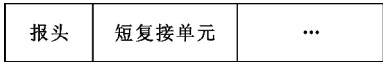


图 7 低速下行复接帧格式图
Fig. 7 Multiplexing frame structure under low speed downlink

(2) 下行复接/解复接的实现

协议板 FPGA 通过周期扫描各输入端口的 FIFO 深度,来判断各端口数据是否达到一个复接单元的长度。复接操作示意如图 8 所示。

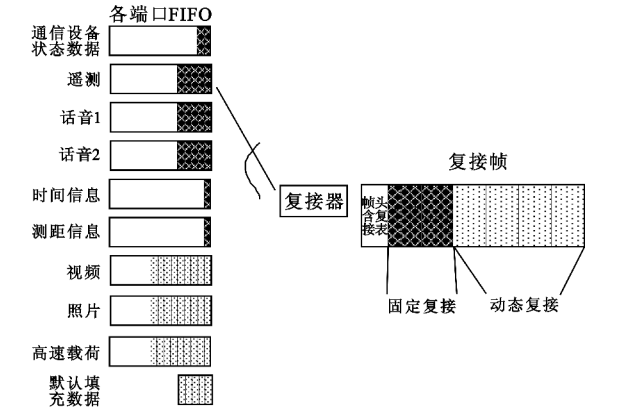


图 8 复接操作示意
Fig. 8 Multiplexing operation illustration

解复接是复接的逆过程,根据标志进行分类分发。

(3) 数据分段适配

为方便复接操作,格式层根据接收到的数据类型,按照预先定义的标准格式进行分段和适配。用户数据根据不同的来源具有不同的特性,因此按实时数据(不需重传,对重组要求不高)和非实时数据(需保证可靠传输,收端需进行重组)分别对数据进行适配。

为简化复接板的复接操作,经格式层封装的数据通过数据适配功能被分段重组为固定大小的数据。

根据数据来源的不同,通用数据帧分为两种长度:长数据和短数据。这两种数据采用统一的格式层头,唯一的区别是两种格式中数据正文字段长度不同。格式层中的复接单元定义为“格式层头+有效数据”,中速模式和高速模式下的每种复接单元均按照此格式进行封装,两种模式下的格式层头和数据长度均不相同;对于低速模式,则采用直接复接数据的方式,无格式化封装。

3.5 低仰角二维天线稳定跟踪技术

通过对无人机外场飞行试验过程的观察,发现无人机近场滑跑测试时,仰角 0° 左右,在滑跑过程中的某些特殊位置点,地面跟踪天线俯仰跟踪不正常,天线剧烈抖动,此时观察俯仰误差电压的输出大小、极性均出现异常。此时,通过频谱仪观察地面跟踪接收机的中频信号,发现中频信号幅度无规律抖动。在无人机远场飞行时,随着飞行距离的增加,地面跟踪天线的俯仰角度逐渐降低,当俯仰角度降到 2° 以下时,俯仰跟踪信号由于受到地面多径的影响,天线俯仰跟踪抖动变大,严重时又会影响到方位支路的跟踪,甚至丢失目标。通过对无人机外场飞行试验全过程的观察,发现多径对无人机跟踪的影响确实存在,而且这种影响还很严重^[7]。可从以下三方面入手降低多径对跟踪的影响。

(1) 单脉冲角跟踪的抗多径技术

对于单脉冲跟踪从理论上讲,解决低仰角跟踪的方法很多,如降低旁瓣、分集、数据引导和单轴跟踪等。自 20 世纪 70 年代以来在无线电设备跟踪领域提出了多种减小多径效应影响的技术,这些技术解决问题的方法主要从两个方面来考虑:一是使天线尽量避开地面反射,在天线波束设计上尽量使轴线下方的波束最小;二是当接收来自地面反射信号时,设法取得有用的直射信号跟踪信息,去掉无用的反射信号。几种已经用于实际工程的技术如下:偏轴单脉冲技术、复角技术、分集技术和阵列天线的空

域滤波技术等。这些技术都是在某一特定使用环境条件下所使用的传统的抗多径方法。

(2) 抗多径数字信号处理技术

受多径影响强烈,地面角跟踪抖动严重,甚至丢失目标。考虑到这种多径现象的特点,对跟踪接收机输出的误差信号进行卡尔曼滤波处理,减弱了多径对地面角跟踪的影响。在增加滤波处理后,天线抖动变小。

(3) 低仰角跟踪多信源融合技术

当俯仰角降低到 2° 以下,此时地面跟踪接收机长时间受到多径的影响。在这种情况下,只对输出的误差信号增加滤波处理,已经很难解决多径问题了,需要借助多种测量信息来辅助完成对目标的稳定、可靠跟踪。

对多径条件下误差电压信号的输出表达式进行分析可知,利用空间平台系统具有的“多信息源”的优势,就有可能在统计意义上减小地面反射所形成的偏差。如从遥测终端可以获得目标的实时高度数据 h ,从测距终端可获得目标斜距 R ,而 h 是不受地面多径反射影响的。与测量目标仰角相比, R 受多径反射影响很小。因此,由 h 和 R 所决定的仰角值就几乎不受多径效应影响,具有比天线测角更高的可信度。赋予它以较高的权值与天线测角值“加权平均”,其误差将明显小于天线测角中的多径反射偏差。 h 精度愈高,“加权平均值”的实际误差愈小。

这种对多种数据“加权平均”的处理方法实质是,在保证对目标“锁定”跟踪的前提下,部分“抛弃”受多径反射影响严重的天线测角信息,同时引入不受或少受多径反射影响的测角信息,减小测角误差。

为减小多径反射误差,在数据处理中,要求能融合多种测量数据作加权平均,对数据作时间平滑处理。实时加权递推最小二乘估计是满足这两种要求的数据处理方法,一方面它综合了多种测量数据求取残差加权平方和最小意义上的最优估计值,另一方面又利用了当前时刻的所有测量信息,实现了测量数据的时域平滑。

4 结 论

中、远程高空高速无人机等信息化平台的建设使单架无人机同时携带多种高精度侦察设备、定位导航设备和区域通信与数据中继设备成为可能,且随着高分辨率合成孔径雷达、高清晰度光电传感器

等新型任务载荷的研制,导致任务数据量急剧增加,这些均对地空链路高速数据传输提出了迫切的需求。无人机前突作业时,低仰角下地空传输通道多径效应明显,多径不仅对高速数传产生严重影响,而且对天线跟踪造成严重影响。本文重点从关键技术 的角度对构建合理的无人机宽带测控与信息传输系统进行了研究,以期为该系统的工程研制提供参考。

参考文献:

[1] 段海滨,范彦铭,张雷. 高空长航时无人机技术发展新思路[J]. 智能系统学报,2012,3(7):195-199.
DUAN Hai-bin, FAN Yan-ming, ZHANG Lei. New Thoughts on the Development of a HALE UAV[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2012, 3(7): 195-199. (in Chinese)

[2] 吴潜. 无人机测控系统的现状与发展趋势[J]. 电讯技术,2009,49(9):90-94.
WU Qian. TT&C System for Unmanned Aerial Vehicle (UAV): Current Status and Development Trends[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(9): 90-94. (in Chinese)

[3] 王毓龙,周阳升,李从云. 美军无人机数据链发展研究[J]. 飞航导弹,2013(4):73-76.
WANG Yu-long, ZHOU Yang-sheng, LI Cong-yun. Research on the development of U. S. UAV's Datalink[J]. Winged Missiles, 2013(4): 73-76. (in Chinese)

[4] 甄云卉,邱金刚,陈自力. 无人机数据链信道线性 Turbo 均衡研究[J]. 无线电工程,2011,41(5):20-22.

ZHEN Yun-hui, QIU Jin-gang, CHEN Zi-li. Research on Linear Turbo Equalization in UAV's Data Link Channel[J]. Radio Engineering, 2011, 41(5): 20-22. (in Chinese)

[5] 李浩. 联合均衡译码技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2012.
LI Hao. Research on Joint Equalization and Decoding [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2012. (in Chinese)

[6] 项钟. TDRSS 地面站 Ka 频段收发信道[J]. 电讯技术,2001,41(4):66-69.
XIANG Zhong. Ka-band Transmit/Receive Channel of TDRSS Ground Station[J]. Telecommunication Engineering, 2001, 41(4): 66-69. (in Chinese)

[7] 王英玲. 低仰角跟踪技术研究与应用[J]. 无线电工程,2008,38(9):43-46.
WANG Ying-ling. Research and Application of Low-elevation Tracking Technique[J]. Radio Engineering, 2008, 38(9): 43-46. (in Chinese)

作者简介:



涂宜锋 (1978—), 男, 江西吉安人, 博士, 工程师, 主要研究方向为无人飞行器测控与信息传输、多址接入、序列设计与应用。
TU Yi-feng was born in Ji'an, Jiangxi Province, in 1978. He is now an engineer with the Ph. D. degree. His research concerns UAV TT&C and information transmission, multiple access scheme, sequence design and sequence application.
Email: yftuye@163.com