

文章编号: 1001-893X(2012)09-1427-05

无人机测控新体制研究*

周定宇¹, 黄大庆², 周 未³

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 无人机研究院, 南京 210016;
3. 南京大桥机器厂 军事代表室, 南京 211101)

摘 要: 针对国内现有无人机测控体制的不足, 将无人机测控系统抽象为几个一般性模块, 对实现各个模块的多种备选方案进行综合分析比较, 选用其中适应无人机测控环境并且优势突出的备选方案作为新体制的内容, 同时在新体制中加入加密模块。理论分析表明, 新体制能够有效提高无人机测控系统信息传输的有效性与可靠性。

关键词: 无人机; 测控系统; 信息传输; 新体制模型; 直接序列扩频; 智能天线

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.003

Study on a New TT&C System for UAVs

ZHOU Ding-yu¹, HUANG Da-qing², ZHOU Wei³

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Research Institute of Unmanned Aircraft, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
3. Military Representative Office, Nanjing Daqiao Machine Factory, Nanjing 211101, China)

Abstract: Due to the deficiencies existing in domestic TT&C system for UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), the new TT&C system for UAVs is divided into several generalized modules. By comprehensively analysing and comparing multiple options to implement each module, alternatives suiting TT&C for UAV environment and showing obvious advantages are considered to be the contents of the new system. At the same time, encryption module is added to the new system. Theoretical analysis shows that the new system can effectively improve the information transmission's effectiveness and reliability in TT&C system for UAVs.

Key words: UAV; TT&C system; information transmission; new system model; DSSS; smart antenna

1 引 言

我国 20 世纪 80 年代开始研制无人机的统一测控系统, 即遥控、遥测、定位和图像传输“四合一”综合无线电系统^[1], 在当时的技术条件下是一种较为先进的测控体制, 突出表现在利用上下行通信实现目标的定位, 既有一定的抗干扰性能又有测距功能, 综合性较强。此后, 我国基本上每隔 3~5 年提出一套新的无人机测控系统, 虽然每套新系统都有一些

改进, 但体现在测控方面的改进却很少。随着各种新型无人机的出现和战场实际环境的需要, 无人机通信链路的可靠性、高效性和安全性越来越重要。近年来, Turbo 码、LDPC 码、网格编码调制 (TCM) 技术的飞速发展日趋成熟, OFDM 和 MIMO 等相关通信技术的提出与深入研究, 为构建更优性能的通信系统提供了新思路。本文从一般通信系统出发, 对无人机测控系统的各个组成部分进行深入分析, 并结合目前发展迅猛的几种关键通信技术, 提出了无人机测控系统的新体制, 可大大提高无人机测控

* 收稿日期: 2012-04-11; 修回日期: 2012-05-16

系统信息传输的有效性和可靠性。

2 一般通信系统模型

无人机测控系统是一般通信系统的一个特例,深入理解与分析一般通信系统,对于研究无人机测控新体制非常重要。无人机测控系统也包含了构成一般通信系统的几个必要模块,包括信源编码、加密措施、信道编码、数字调制、以扩频为中心的抗干扰技术、天线技术等,一般通信系统的模型如图1所示。为了提出符合新时代需求的无人机测控新体制,有必要对这些模块逐个进行深入分析,适时融合一些新技术,归纳总结出较为完整且更具生命力的无人机测控新体制。

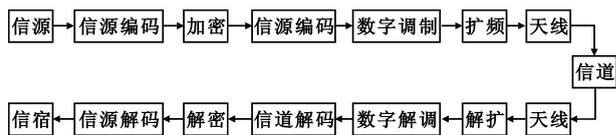


图1 一般通信系统模型

Fig.1 The model of a general communication system

3 无人机测控新体制分析

3.1 信源编码

一般来说,信源编码主要有两个作用,其一是设法减少码元数目和降低码元速率,即通常所说的数据压缩;其二是将信源的模拟信号转化成数字信号,以实现模拟信号的数字化传输。无人机测控系统传输的信息内容主要包括上行遥控指令、下行遥测数据(一般是模拟信号)以及任务传感器信息(包括静止图像以及视频流)。PCM编码是概念上最简单、理论上最完善、最早研制成功、使用最为广泛的编码方法,并且其数据传输率高,硬件技术成熟,所以新体制对上行控制信号以及下行遥测数据仍然采用PCM编码方法。近年来,新型第二代图像压缩编码方法^[2]迅速发展,大致可分为小波编码、分形编码、神经网络编码以及模型编码。分形编码最大限度地利用了空间域上的自相似性,然而其算法复杂度高,收敛过程难于控制,并且高压缩比下会出现方块效应;神经网络编码虽然具有良好的容错性、自组织性与自适应性,但由于神经网络理论本身仍亟待完善,阻碍了该编码算法的进一步发展;模型编码的算法

复杂度也很高,且通用性差,发展仍然不够成熟;小波变换由于其良好的时频定位性质与多分辨率特性,已经成为新一代静态图像压缩标准 JPEG2000 的核心技术。JPEG2000 既支持无损压缩也支持有损压缩,同时还能够实现渐进传输以及感兴趣区域编码,这些优良特性都特别符合无人机静态图像数据压缩的要求,因此,新体制将采用 JPEG2000 作为无人机测控系统静态图像的压缩编码标准。随着 HDTV 的兴起,H.264 这个规范频频出现在我们眼前。H.264 是在 MPEG-4 技术的基础之上建立起来的,其优势主要体现在它的高效压缩性能上,它在同等图象质量下的压缩能力比以前的标准提高了 50% 以上,同时它还具有强大的容错能力、精确的匹配解码性能以及更简单的实施规范。鉴于无人机测控系统下行链路传输数据量巨大造成数据高速传输瓶颈的现状,新体制将采用压缩比优势明显的 H.264 作为视频数据的压缩标准。

3.2 加密措施

目前无人机的测控数据基本都是透明传输,未采取任何加密措施,这样极易造成情报外泄,甚至在某些极端情况下可能被敌方掌握通信帧格式而对无人机进行控制,新体制有必要对无人机数据链采用加密技术。现有加密技术一般分为对称加密体制和非对称加密体制,前者仅能对数据进行加解密处理,后者除了用于数据加密外,还可以形成数字签名。为了兼顾加密效率以及可靠程度,新体制考虑采用混合加密方案,在 PGP 系统加密体制的基础上稍作改进^[3],就能够非常好地达到无人机数据链的保密需求。加密步骤简述如下:

- (1)对发送信息序列进行 SHA-1 散列处理,形成 160 bit 数据摘要;
 - (2)用发送方的 RSA 私钥 SK 对数据摘要进行数字签名;
 - (3)将发送信息序列与数字签名链接,规定发送信息序列在前,数字签名在后;
 - (4)使用 AES 加密算法对签名后的数据进行加密,密钥为 K;
 - (5)用接收方的 RSA 公钥 PK 解密 AES 的密钥 K;
 - (6)将使用 AES 加密后的数据与经 RSA 公钥加密的 AES 密钥链接,规定数据在前,密钥在后。
- 加密过程模型如图 2 所示。

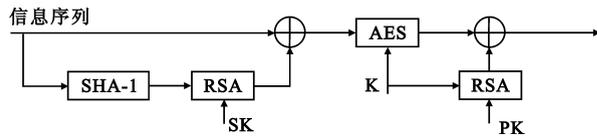


图 2 新体制混合加密方案模型

Fig. 2 The model of hybrid encryption scheme

新体制采用的加密方案巧妙地结合了公钥密码与私钥密码体制的优势,同时兼顾了安全性与效率。与文献[4]相比,该方案用 RSA 公钥加密 AES 的密钥,能够实现密钥管理,因此成功地解决了无人机链路的多址需求,能够适应未来“一站多机”的发展趋势。

3.3 信道编码

信道编码是提高通信系统可靠性的重要途径,其编解码型众多,大致可以分为分组码、卷积码和级联码。BCH 码和 RS 码是典型的分组码,BCH 码是纠错能力可控制的一类循环码,可以用于校正多个随机错误;RS 码是一类特殊的非二进制 BCH 码,其特点在于其纠正突发错误能力极强。卷积码和分组码的根本区别在于,它不是把信息序列分组后再进行单独编码,而是由连续输入的信息序列得到连续输出的已编码序列,其编码器将 k 个信息码元编为 n 个码元时,这 n 个码元不仅与当前段的 k 个信息有关,而且也与前面的 $(m-1)$ 段信息有关(m 称为约束长度)。级联码有串行级联码和并行级联码之分。RS-卷积级联码是串行级联码的代表,RS 码纠正突发错误能力极强,特别适合选作外码,卷积码本质上属于纠随机差错码,被选作内码,这种编码组合被称为串行级联码的黄金组合。并行级联码的代表是 Turbo 码,它巧妙地将卷积码和随机交织器结合在一起,同时采用软输出迭代译码来逼近最大似然译码,达到了近 Shannon 限的性能,目前已成为 3G 的信道编码优选方案之一。随着 Turbo 码的兴起,LDPC 码被重新重视,目前已成为信道编码技术研究的热点。LDPC 码是一种特殊的线性分组码,其校验矩阵具有稀疏性。LDPC 码具有较大的灵活性和较低的差错平底特性,且便于硬件实现,在信道条件极差的通信环境中体现出巨大的优势,非常适合处于复杂电磁环境的无人机数据通信系统。各种典型信道编解码型性能比较^[5]如表 1 所示。

表 1 典型信道编解码型性能比较

Table 1 Performance comparison of typical channel coding

码型	性能 码率比	译码 复杂度	应用环境
BCH 码	差	低	随机错误、信噪比高、低效传输
RS 码	较好	较高	随机错误、突发错误、信噪比高、高效传输
卷积码	较好	较高	随机错误、信噪比较高、中效传输
RS-卷积级联码	好	高	随机错误、突发错误、信噪比较高、低效传输
Turbo 码	好	高	随机错误、突发错误、信道条件恶劣、高效传输
LDPC 码	好	高	随机错误、突发错误信道条件极其恶劣、高效传输

从表 1 中可以看出,Turbo 码与 LDPC 码不仅能够纠正随机错误和突发错误,而且在信道条件恶劣的情况下仍能保证高效传输,是新体制信道编解码型的优选方案。众所周知,Turbo 码在中低长编码长度下仍占据绝对优势,LDPC 码只有在编码长度较长时才能保持优于 Turbo 码的性能^[6],鉴于无人机上行遥控数据量很小,不适于编码长度过长的现实情况,新体制提出上行链路采用 Turbo 码、下行链路采用 LDPC 码进行信道编码的方案。

3.4 调制

正交频分复用(OFDM)作为一种高速数据传输的有效方案已成为未来无线通信领域的核心技术之一。OFDM 调制是一种多载波调制技术,它在频域内将所给信道划分成多个正交子信道,在每一个信道上使用子载波进行调制,各个子载波并行传输。OFDM 技术能够保证在存在多径传播和多普勒频移的无线通信信道中进行高速数据传输,它突出的抗多径效应能力、无码间干扰特性以及抗频率选择性衰落的优势,特别适用于无人机数据传输环境^[7]。在进行 OFDM 调制之前,通常要先将信息序列映射成 OFDM 符号。QAM 是以载波的振幅和相位两个参量同时受调制的联合键控体制,比单一键控数字符号的频带传输更具抗干扰能力,同时 QAM 的多进制体制 MQAM, M 值可以很大,频带利用率高^[8],因此,新体制在将信息序列进行 OFDM 调制之前,采用 QAM 映射。由于无人机测控系统上行链路数据量小,对调制效率要求并不高,并且采用 OFDM 技术硬件成本昂贵,新体制只在下行链路使用 OFDM 调制技术。考虑到上行链路信道编码已采用 Turbo 码,

Turbo 码的两个分量编码器都是卷积码,因此可以在上行链路采用 TCM 编码调制技术。TCM 编码调制能够在不增加传输带宽的前提下,最大限度地发挥 Turbo 码的纠错性能。综上所述,新体制上行链路采用 TCM 编码调制方案,下行链路采用 QAM + OFDM 调制方案。

3.5 抗干扰技术

现有无人机上的测控系统多是简单的直接序列扩频,虽然具有一定的抗干扰能力,但远不能达到实际的作战需求,甚至发生过在某型无人机演示过程中,产生了站一站间的相互干扰,损失了一架飞机。因此有必要将扩频和跳频相结合,这样才是在密集电磁频谱对抗环境下的现代战争中最富有生命力的抗干扰通信系统。

直序扩频系统具有隐蔽性好、抗多径干扰、抗频率选择性衰落、有测距功能等诸多优势,然而同时它又存在捕获时间长、抗远近效应能力弱、抗窄带干扰能力差的缺点。跳频扩频通过频率的跳变来躲避干扰,其发射信号功率谱密度仍然高于噪声功率谱密度,如果敌方频谱仪的扫描时间能够小于跳频信号的驻留时间,就可以完整地显示跳频频谱,即使跳频速度较快,也可采用扫描累加方式监测跳频通信所占的频谱范围。FH/DS 混合扩频通信系统结合了两者的优势,它一方面通过直扩使信号功率谱密度低于噪声功率谱密度从而起到隐蔽通信的作用,另一方面通过跳频解决敌方窄带攻击的问题,目前已成为国内外公认的最富有生命力的抗干扰系统。差分跳频是近年来所提出的一种新型跳频体制,与常规跳频系统不同,差分跳频系统的发送频率直接由信息数据经 G 函数变换确定,因此,差分跳频系统接收端无需进行复杂的伪随机码同步过程,从而能够实现短波信道中的高速数据传输。在 AWGN 与瑞利信道下,差分跳频系统的抗部分频带干扰性能明显优于快跳频系统^[9]。综合以上分析,并且考虑到无人机测控系统下行链路数据量庞大,不适合采用直扩技术,新体制在无人机上行链路采用 FH/DS 混合扩频抗干扰体制,在下行链路采用差分跳频抗干扰体制。

3.6 天线

智能天线是由一组相关的天线元素在空间构成一定的几何形状,根据期望信号和干扰信号到达阵列各个元素的角度和相位的不同,通过相应的自适应

应算法和高速数字信号处理技术,以多个高增益的动态窄波束分别跟踪多个期望信号,从而抑制干扰信号的技术。智能天线可以有效地抵消多径干扰以及由于频率复用造成的同信道干扰,并可以对其载体的高速运动进行跟踪,这些特点非常符合无人机测控系统复杂电磁环境下对无人机群的跟踪测控需求。

近年来,许多研究表明,MIMO 技术通过在无线通信系统发射端和接收端使用多根天线,能够为无线通信系统提供空间复用增益和空间分集增益,空间复用增益可以有效提高无线通信系统的信道容量和频谱利用率,空间分集增益则可以有效克服无线信道的多径散射效应。

在智能天线上引入 MIMO 的分集思想能够实现比传统智能天线更好的性能。以智能天线单元组建 MIMO 阵列,通过智能天线单元间协同工作,形成不同指向的波束以跟踪具有不同到达角的可分辨时延路径,这种融合结构^[10]改变了 MIMO 信道矩阵的构成,达到了去相关目的,从而有效地提高了 MIMO 系统的信道容量,因此,新体制将采用智能天线和 MIMO 技术的融合技术。

4 无人机测控新体制模型

根据前文所述,本文总结出无人机测控系统的一套新的体制,信源编码部分采用 PCM 编码、JPEG2000 标准以及 H.264 标准,保证了信源编码的高效压缩性能,为高速数据传输提供了保障;加密方案采用非常适合无人机测控系统的混合加密体制,兼顾了安全性与效率;信道编码部分采用接近 Shannon 限性能的 Turbo 码和 LDPC 码,能够有效地提高信息传输的可靠性;调制部分在上行链路采用 TCM 编码调制技术,下行链路采用 OFDM 调制技术,充分考虑了无人机上下行链路数据传输的差异;抗干扰部分在上行链路采用 FH/DS 混合扩频技术,下行链路采用差分跳频技术,大大提高了无人机测控系统的抗干扰能力;最后采用智能天线和 MIMO 技术的融合技术,巧妙地结合了两者的优势。新体制上、下行链路的发射端原理框图如图 3 所示。



图3 新体制上行链路发射框图

Fig.3 The transmitting block diagram of the uplink

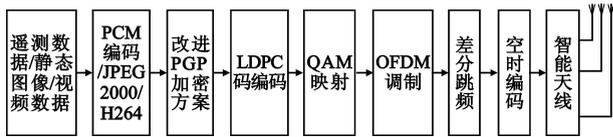


图 4 新体制下行链路发射框图

Fig. 4 The transmitting block diagram of the downlink

5 结论

本文提出了一套较为完整的无人机测控体制,并给出了这套体制的理论模型框图。针对现有无人机测控系统信息透明传输所存在的隐忧,新体制中增加了加密模块,为信息传输的安全性与可靠性提供了更有力的支持。此外,新体制的研究仍处于理论层面,对整个系统的仿真实现存在困难。进一步丰富和完善无人机测控新体制,可从无人机信息传输的复合链路以及多无人机测控系统两个方面着手深入。

参考文献:

- [1] 周祥生. 无人机测控与信息传输技术发展综述[J]. 无线电工程, 2008(1): 30 - 33.
ZHOU Xiang-sheng. Overview of UAV TT&C and Information Transmission Technology Development[J]. Radio Engineering of China, 2008(1): 30 - 33. (in Chinese)
- [2] 李高平. 分形法图像压缩编码[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2010: 24 - 27.
LI Gao-ping. Image compression based on Fractal theory [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010: 24 - 27. (in Chinese)
- [3] 何大可, 彭代渊, 唐小虎, 等. 现代密码学[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 152 - 153.
HE Da-ke, PENG Dai-yuan, TANG Xiao-hu, et al. Modern cryptography[M]. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2009: 152 - 153. (in Chinese)
- [4] 张兴凯, 王喜发, 隗云. 无人机上行链路的安全策略研究[J]. 计算机安全, 2008(3): 62 - 64.
ZHANG Xing-kai, WANG Xi-fa, KUI Yun. Research of security strategy of UAV board data link[J]. Computer Security, 2008(3): 62 - 64. (in Chinese)
- [5] 张永光, 楼才义. 信道编码及其识别分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 7 - 9.
ZHANG Yong-guang, LOU Cai-yi. Channel coding and recognition analysis[M]. Beijing: Publishing House of Elec-

- tronics Industry, 2010: 7 - 9. (in Chinese)
- [6] Andrews K S, Divsalar D, Dolinar S, et al. The development of Turbo and LDPC codes for deep-space applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(11): 2142 - 2156.
- [7] Wu Zhiqiang, Kumar H, Davari A. Performance evaluation of OFDM transmission[C]// Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory. Tuskegee, Alabama: IEEE, 2005: 6 - 10.
- [8] 王秉钧. 现代通信原理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 184 - 188.
WANG Bing-jun. Principles of modern communications[M]. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2006: 184 - 188. (in Chinese)
- [9] 朱毅超. 差分跳频与常规跳频抗部分频带干扰的性能比较[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(6): 61 - 65.
ZHU Yi-chao. Performance comparison of differential frequency hopping and conventional frequency hopping against partial-band jamming [J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(6): 61 - 65. (in Chinese)
- [10] 马优, 郑植, 周玉龙. 一种 MIMO 智能天线融合方法研究[J]. 通信技术, 2010, 43(5): 173 - 175.
MA You, ZHENG Zhi, ZHOU Yu-long. Study Incorporation of Smart Antennas into MIMO System[J]. Communications Technology, 2010, 43(5): 173 - 175. (in Chinese)

作者简介:

周定宇(1988—),男,江苏扬州人,2010年于南京航空航天大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为遥控遥测;

ZHOU Ding-yu was born in Yangzhou, Jiangsu Province, in 1988. He received the B. S. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010. He is now a graduate student. His research concerns remote control and telemetry.

Email: zdy118115@163.com

黄大庆(1959—),男,浙江余姚人,南京航空航天大学研究员、博士生导师,主要研究方向为电磁兼容、遥控遥测;

HUANG Da-qing was born in Yuyao, Zhejiang Province, in 1959. Now he is a researcher and also the Ph. D. supervisor. His research concerns EMC, remote control and telemetry.

周未(1979—),男,江苏南京人,1997年于东南大学获学士学位,2004年于解放军理工大学获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

ZHOU Wei was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1979. He received the B. S. degree from Southeast University and the M. S. degree from PLA University of Science and Technology in 2007 and 2009, respectively. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research direction is wireless sensor network.