

文章编号: 1001-893X(2011)08-0036-05

无人机数字视频图像传输技术*

蒋文丰, 万永伦

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:提出了无人机测控系统数字视频图像传输系统的设计方案, 分析了 RS + 卷积编码体制对编码数据块的定位需求, 提出了用帧同步环定位编码数据块的方法。针对帧同步环对数据流的特殊要求, 讨论了由 FPGA 数字系统自身导致的速率匹配问题, 提出了相应的解决方法。

关键词:无人机; 测控系统; 数字视频图像; 传输系统; 速率匹配

中图分类号: TN911.73; TN919 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.008

Digital Video Image Transmission Technology for UAVs

JIANG Wen-feng, WAN Yong-lun

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

Abstract: The scheme of the digital video image transmission system for Unmanned Aerial Vehicle(UAV) TT&C system is proposed. The position localized requirement for the coded data block in the RS + convolution encoding system is analysed, and using the frame synchronization loop to locate the coded data block is presented. According to the special requirement of the frame synchronization loop for the data stream, the data rate matching problem caused by the FPGA digital system characteristics is discussed and solution is provided.

Key words: UAV; TT&C system; digital video image; transmission system; data rate matching

率图像编码数据在信道编码器中的处理过程。

1 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在现代战争中扮演着越来越重要的角色。与有人驾驶飞机相比, 无人机可以做大过载机动, 不受限制地改变飞行姿态, 具有较好的隐身性, 深入敌后危险地带不用担心人员伤亡问题^[1]。无人机投入作战使用的最大优势一直体现在情报侦察上, 视频图像信号是无人机的主要侦察信息^[2], 也是无人机测控系统的重要组成部分。目前国内外大多数无人机视频图像传输系统采用模拟方式, 该方式易受复杂环境干扰, 而数字传输抗干扰能力强, 图像传输质量不易受环境干扰, 加密方便, 保密性高, 便于集成化且易于与外界直接通信^[3], 更适合于无人机视频图像传输。本文研究了无人机测控系统数字视频图像传输系统中固定速

2 视频图像的数字化传输方案

无人机数字视频图像传输系统整体结构如图 1 所示, 机载摄像机获取高质量的视频信号, 经预处理和图像编码, 送往无线通信系统, 对图像编码数据进行信道编码后送往调制器, 通过信道变频放大处理, 由天线完成发射。接收系统实现相反的过程, 最终在显示器上显示视频信息。

由于复杂战场环境存在强电磁干扰、噪声及障碍物等, 无人机无线信道误码率高, 故需对编码后图像数据进行纠错编码, 使其可靠传输。CCSDS(The Consultative Committee for Space Data Systems)标准给出了能有效提高无线链路传输可靠性的编码体制, 标准中推荐了采用 RS(255, 223) 编码和卷积编码级

* 收稿日期: 2011-04-07; 修回日期: 2011-06-24

联的数据编码方案^[4]。在标准中,规定了 RS 编码的交织深度可选择为 $I = 1, 2, 3, 4, 5$, 其中 1 表示无交织, I 越大纠错能力越强, 但是相应的系统越复杂, 占用的资源越多, $I = 4$ 是目前大多数无线通信系统常用的设置^[5]。

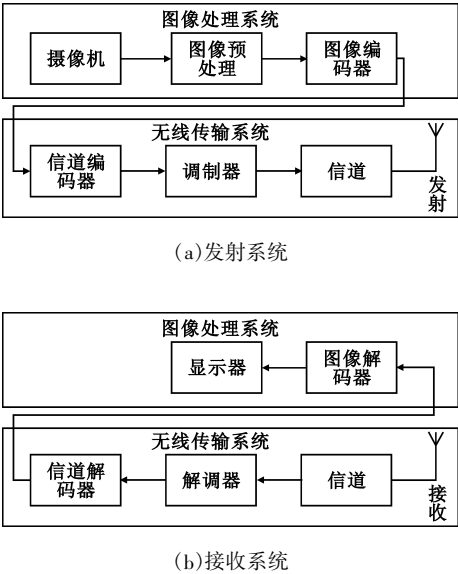


图 1 无人机数字图像传输系统

Fig.1 Digital video image transmission system for the UAV

本文将要讨论的基于 RS + 卷积级联编码数字图像传输方案如图 2 所示。首先对图像编码数据缓存, 然后按照 CCSDS 标准对每帧数据进行分组、补零后进行 RS 编码, 编码数据剔除补零位, 将原始数据和校验数据重新组合成帧, 新数据帧插入帧头后进入下一步处理。由于 RS 编码是以字节为单位, 因此需要进行并串转换, 并串转换后的 bit 信息流进入卷积编码。RS + 卷积级联编码体制能在低仰角及遇到信道突发衰落时显著改善数据传输质量, 这给传输系统及地面设备的设计带来了高度的灵活性。

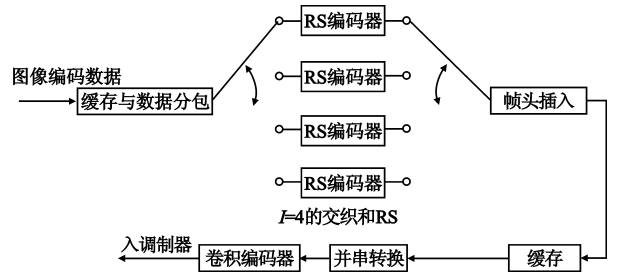


Fig.2 Schematic diagram of the channel encoding

3 数字系统速率匹配

由于 RS 是块编码体制, 要想译码必须找到编码数据块的起始和终止位, 对 RS 编码后数据进行帧头信息的插入是为了在接收端定位编码数据块。接收系统搜索卷积译码器的输出数据流来判定帧头, 以定位编码块数据。由于信道误码的存在, 接收系统有一定的概率漏检测帧头信息, 漏检测帧头信息会导致整帧数据的丢失, 此时系统误码率要大于漏检测帧头信息概率。假设信道误码率为 P , 帧头的长度为 M (以字节为单位), 那么漏检测帧头信息概率 $\eta = 1 - (1 - P)^{8M}$ 。表 1 给出了几组映射关系, 从中可以看出漏检测帧头信息概率比信道误码率高一个数量级, 使得 RS 编码获得的增益无法得到, 需要一种能够在帧头信息位出错时能正常定位编码数据块的机制。

表 1 η 与信道误码率 P 和帧头长度 M 的关系
Table 1 The relationship between η and P, M

P	η				
	$M = 2 \text{ byte}$	$M = 3 \text{ byte}$	$M = 4 \text{ byte}$	$M = 5 \text{ byte}$	$M = 6 \text{ byte}$
1.0×10^{-3}	$1.590 0 \times 10^{-2}$	$2.370 0 \times 10^{-2}$	$3.150 0 \times 10^{-2}$	$3.920 0 \times 10^{-2}$	$4.690 0 \times 10^{-2}$
1.0×10^{-4}	$1.600 0 \times 10^{-3}$	$2.400 0 \times 10^{-3}$	$3.200 0 \times 10^{-3}$	$4.000 0 \times 10^{-3}$	$4.800 0 \times 10^{-3}$
1.0×10^{-5}	$1.599 9 \times 10^{-4}$	$2.399 7 \times 10^{-4}$	$3.199 5 \times 10^{-4}$	$3.999 2 \times 10^{-4}$	$4.798 9 \times 10^{-4}$
1.0×10^{-6}	$1.600 0 \times 10^{-5}$	$2.400 0 \times 10^{-5}$	$3.200 0 \times 10^{-5}$	$3.999 9 \times 10^{-5}$	$4.799 9 \times 10^{-5}$
1.0×10^{-7}	$1.600 0 \times 10^{-6}$	$2.400 0 \times 10^{-6}$	$3.200 0 \times 10^{-6}$	$4.000 0 \times 10^{-6}$	$4.800 0 \times 10^{-6}$

3.1 帧同步环

由上面的分析可知, 如果只采用检测帧头信息的方法来定位 RS 编码块数据, 漏检测帧头信息会丢失整帧数据。当帧数据中有帧头信息或者由于误码导致出现错误的帧头信息时, 单纯的检测帧头信息的方法也会造成错误, 导致数据丢失。这里定义正确检测到帧头信息为真同步, 检测到错误的帧头信息 (包括检测到数据中的帧头信息和误码产生的帧头信息) 为假同步, 而漏检测帧头信息为漏同步。

为了对抗假同步和漏同步, 正确地定位 RS 编码块数据, 本文设计了一种能有效识别真同步、假同步和漏同步 3 种情况的帧同步环结构, 其结构如图 3 所示。其工作模式有 4 种: 搜索、捕获验证、锁定和保持锁定。帧同步器最初处于搜索状态, 这时触

发器 D1 的输出为高电平, Q 为低电平。当帧头检测器检测到帧头信息输出第一个同步指示信号时, 帧同步环初始化进入捕获验证状态。捕获验证的目的是鉴定识别器输出的第一个同步指示的真假。鉴定的依据是: 真同步具有固定的周期, 而假同步没有。如果鉴定结果为真, 帧同步环进入锁定状态, 反之回到搜索状态。识别器输出的第一个同步指示使帧同步计数器归零, 然后将帧同步计数器的输出与识别器输出相与, 若同步指示为真, 则与门 C 有输出。但考虑到噪声的影响, 在为真的情况下, 不一定每帧都有输出; 同理, 在为假的情况下, 不一定每帧都无输出, 所以要连续监视 $K-1$ 帧, 其间如果同步指示为真的个数大于等于 $m-1$ ($K \geq m$), 则帧同步环进入锁定状态。

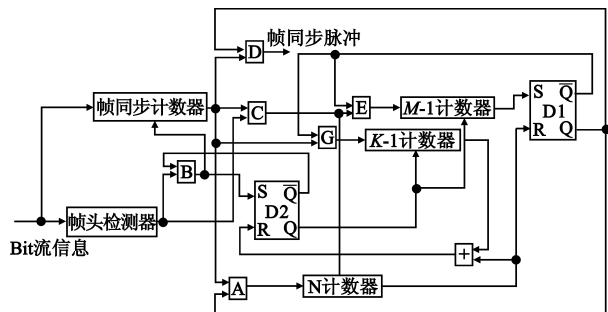


图3 帧同步环结构

Fig.3 Structure of the frame synchronization loop

电路的具体工作过程为: 第一个同步指示通过与门 B 使帧同步计数器归零, 同时触发 D2, 其 Q 端输出上升沿使 $K-1$ 计数器、 $m-1$ 计数器归零, 同时关闭 B 门, 此时帧同步环进入捕获验证状态。帧同步计数器输出周期性的脉冲信号, 与识别器输出的同步指示在与门 C 中相与^[6]。如果在 $K-1$ 计数器记满之前 $m-1$ 计数器先记满, 表示符合锁定条件, 这时 $m-1$ 计数器输出信号使 D1 翻转, 帧同步环进入锁定状态, 帧同步脉冲输出; 如果在 $K-1$ 帧内 $m-1$ 计数器无输出, 表示不符合锁定条件, $K-1$ 计数器输出使触发器 D2 复位, 帧同步器又回到搜索状态。进入锁定状态后, D1 触发器 $\overline{Q}$ 输出为低电平, 与门 E、G 输出为低, $m-1$ 、 $K-1$ 计数器停止计数, 帧同步环进入保持锁定状态, 按固定周期输出帧同步脉冲。在保持锁定状态下, 帧同步器需进行锁定保持检验, 以便在载波或位同步失锁时, 转入搜索状态。检验锁定是否继续保持由 N 计数器完成, 在锁定状态下, 当与门 C 无输出时, 表示识别器漏失同步, N 计数器即开始计数, 当连续 N 帧漏失同步

时, N 计数器记满, 输出信号使 D1、D2 触发器复位, 帧同步环重新进入搜索状态。

帧同步环的功能是在帧头信息出错的情况下能够利用同步脉冲完成编码数据块的定位, 但是它要求输入的数据具有如图 4 所示的格式, 即任意相邻的两帧间不能插入多余数据。

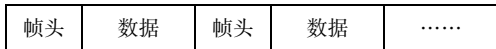


图4 源数据流格式
Fig.4 The format of the source data

3.2 速率匹配

假设机载图像处理系统和无线传输系统之间的信息传输采用 8 bit 位宽的并行接口, 帧长为 L (字节), 帧头长度为 M (字节), 读时钟 f_{in} 由无线传输系统提供, 无线传输系统工作时钟为 f_{sys} , 卷积编码采用 $(7, 1/2)$, 那么系统最终的图像传输比特流数据率为

$$f_{out} = (f_{in} \times \frac{255}{223} + \frac{f_{in}}{L} \times M) \times 8 \times 2 \tag{1}$$

由于视频图像的数据量大, 而且实时性要求高, RS+ 卷积编码工作一般采用 FPGA 实现, 在 FPGA 数字系统中 f_{out} 由 DDS 产生, 对于 32 位的 DDS 有:

$$\varphi = \lfloor f_{out} \times 2^{32} / f_{sys} \rfloor, \hat{f}_{out} = f_{sys} \times \varphi / 2^{32} \tag{2}$$

式中, φ 为相位因子, $\hat{f}_{out}$ 为数字系统通过 DDS 产生的时钟, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为下取整符号。由于 φ 是整数, 不能保证 $\hat{f}_{out} = f_{out}$, 一般情况下都有 $\hat{f}_{out} < f_{out}$, 这种情况下会出现缓存溢出现象, 造成丢帧; 如果在设计中取 $\varphi = \varphi + 1$, 那么有 $\hat{f}_{out} > f_{out}$, 此时要求在数据不足时插入废帧, 以保证帧同步环的数据流要求。插入废帧要求底层协议做重复帧丢帧处理, 这除了会造成系统不兼容的问题外, 还会引入延时, 严重时会出现图像停顿的现象。按照 CCSDS 标准, 对于一个 252 byte 的编码数据块, 在 $I=4$ 时, 252 byte 数据被分为四路数据, 每路数据补 0 后形成 223 byte 数据帧进入编码器, 编码器后面的电路抽取每路前 63 byte 源数据和后 32 byte 效验数据形成 380 byte 数据, 此 380 byte 数据加上帧头 (一般为 4 byte) 一共 384 byte。如果在 5 MHz 带宽的系统中传输, 会带来 1.23 ms 的延时; 在 1 MHz 带宽的系统中传输, 会带来 6.15 ms 的延时。

从系统兼容性和减少延时的角度看, 插入废帧是不允许的, 需要一种能进行速率匹配的机制。由于图像数据速率恒定, 图 2 中缓存模块之前的数据流也应该速率恒定, 尽管 RS 编码后数据对缓存模

块的写入是按块突发写入的,但是相邻两块之间写入的时间间隔是恒定的,而缓存模块数据的读取时钟为 $\hat{f}_{out}/16$,因此可以在每次突发写缓存时获取缓存中剩余数据量 N 来判断 $\hat{f}_{out}$ 与 f_{out} 之间的大小关系。如果 N 持续下降,表示 $\hat{f}_{out} > f_{out}$,为保证数据的连续性,将 φ 修改为 $\varphi - 1$,降低数据发送速率, N 的下限为 $\lceil L \times 8 \times 4 / (\varphi + 1) \rceil \text{bit}$ ($\lceil \cdot \rceil$ 为上取整符号),此下限保证下一次判决前,不会因为 $\varphi = \varphi + 1$ 而导致数据不足。当 $\varphi = \varphi - 1$ 时, N 会持续增加,需要给出一个上限,否则缓存会溢出,同时出现图像延时和丢帧。假设 $f_{sys} = 60 \text{ MHz}$, φ 在 ± 1 间的变动会导致发送频率 $f_{sys} \times 2/2^{32} \approx 0.0294 \text{ Hz}$ 的变化,这个频率跳变不会给接收系统的位环带来大的影响,实际上可以通过 DDS 产生 $\hat{f}_{out}$ 的倍数频率,通过分频得到 $\hat{f}_{out}$,这样可以得到更小的跳变频率。可以计算出大约每 272.12 s ($1 \times 8 / 0.0294 = 272.12$),由频率因子 φ 的变化引起发送数据一个字节的的变化,因此 N 的上限比下限多一个字节不会引起频率的频繁跳变,而且不会带来明显的传输延时。

4 测试分析

定义 N 的上下限差值为数据变化容量,图 5 是数据变化容量为 5 个字节时,系统在 8 h 内缓存模块剩余数据量 N 的变动情况。从图中可看出变化对 N 的影响。此系统在数据率为 5.12 Mbit/s、信号强度为 -102 dBm 时,实测系统误码率为 5×10^{-7} ,能满足大部分无线图像传输系统的要求。目前,采用该方案的图像传输系统设备已成功运用在某型浮空器和两种无人直升机系统上,已完成试飞。

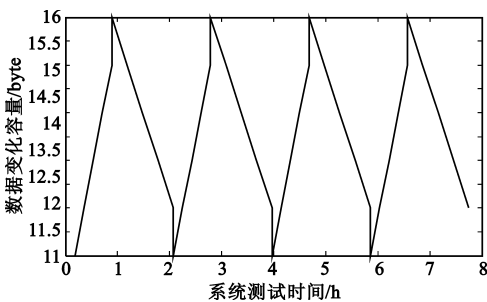


图 5 剩余数据量 N 变化过程

Fig 5 The change process of the remained data quantity N

上面讨论的系统由无线传输系统提供读时钟 f_{in} 给图像处理系统,设计时可以很方便地计算出 $\varphi - 1$ 和 $\varphi + 1$,但是在很多系统中 f_{in} 由图像处理系统

提供,大部分情况下图像处理系统和无线传输系统的时钟系统是不相关的,此种情况下需要一种自校正系统来捕获 $\varphi - 1$ 和 $\varphi + 1$ 。图 6 给出了一种捕获方法的流程图。

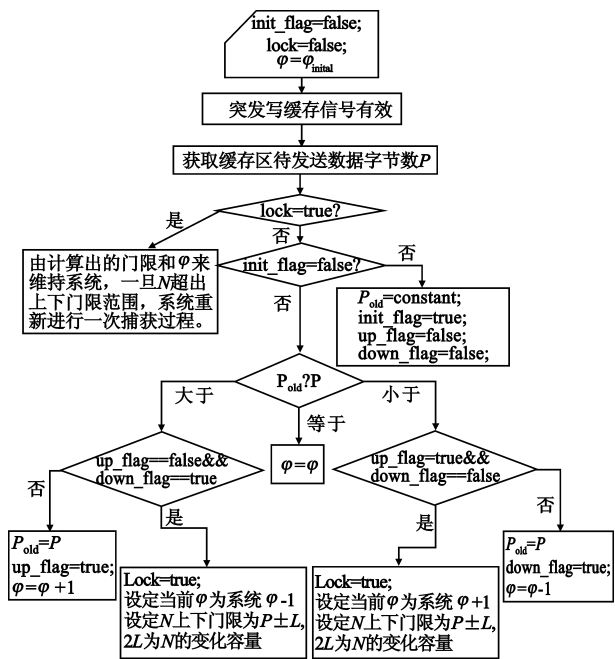


图 6 自校正捕获过程

Fig. 6 The process of self-revising and capturing

自校正捕获过程首先完成初值设置和系统初始化,当系统检测到缓存中剩余数据量 N 变大时,设置 up_flag 为 $true$,并修改 φ 为 $\varphi + 1$;相反,当系统检测到缓存中剩余数据量 N 变小时,设置 $down_flag$ 为 $true$,并修改 φ 为 $\varphi - 1$ 。当系统检测到 N 的变化状态发生突变时,系统完成捕获,并由当前的 φ 计算出 $\varphi - 1$ 和 $\varphi + 1$ 。

5 结束语

中、高速无线通信系统中一般采用 FPGA 处理编译码,此时会碰到码速率的转换问题,由于 FPGA 数字系统的离散特性,精确的匹配时钟很难办到。当源数据中允许插入无效数据时,不需要进行速率匹配;当源数据为连续数据流,且不允许中断和插入无效数据时,就需要进行速率匹配。本文针对 CCS-DS 标准下的 RS + 卷积级联编码传输体制,分析了其速率匹配问题,提出了相应的解决方法。实践证明,该方法可以有效地解决用 FPGA 实现 RS + 卷积级联编码的速率匹配问题,是一种可行的系统方案。

参考文献:

- [1] 姚如贵. 无人机系统高速数据链中 Turbo - OFDM 技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.
YAO Ru - gui. Research on Turbo - OFDM Technology for UAV System in High Speed Data Link[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [2] 崔麦会, 周建军, 陈超. 无人机视频情报的压缩传输技术[J]. 电讯技术, 2007, 47(1): 131 - 133.
CUI Mai - hui, ZHOU Jian - jun, CHEN Chao. Compression Transmission Technology of UAV Video Intelligence [J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(1): 131 - 133. (in Chinese)
- [3] 高珍, 邓甲昊, 孙骥, 等. 微型无人机图像无线传输系统的发展现状及其关键技术[J]. 科技导报, 2007, 25(16): 68 - 72.
GAO Zhen, DENG Jia - hao, SUN Ji, et al. Progress and Current State of Image Wireless Transmission System for MUAV and Its Key Technologies[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(16): 68 - 72. (in Chinese)
- [4] CCSDS 131.0 - B - 1, CCSDS Recommendation for TM Synchronization and Channel Coding[S].
- [5] 朱爱军, 郎宏山, 武震东. RS 编码与卷积编码级连在遥感卫星数据传输中的应用[J]. 遥感信息, 2007(1): 47 - 52.
ZHU Ai - jun, LANG Hong - shan, WU zhen - dong. An Analysis on Specification of Remote Sensing Satellite Trans-

mission Channel Coding Adopting Reed - Solomon and Convolutional Coding[J]. Remote Sensing Information, 2007(1): 47 - 52. (in Chinese)

- [6] 陈玲, 任重, 夏俊. 综合基带遥测单元信号同步的实现[J]. 电讯技术, 2001, 41(2): 16 - 18.

CHEN Ling, REN Zhong, XIA Jun. Synthetical Baseband Remote Cell Signal Synchronous Realization[J]. Telecommunication Engineering, 2001, 41(2): 16 - 18. (in Chinese)

作者简介:

蒋文丰(1982—), 男, 湖北天门人, 2008 年于中国科学院计算所获硕士学位, 现为工程师, 主要从事航天测控方面的研究工作;

JIANG Wen - feng was born in Tianmen, Hubei Province, in 1982. He received the M.S. degree from Chinese Academy of Sciences in 2008. He is now an engineer. His research concerns spacecraft TT&C.

Email: jiangwenfeng1982@126.com

王永伦(1970—), 男, 四川峨眉人, 2005 年于电子科技大学获博士学位, 现为高级工程师, 主要从事航天测控总体方面的研究工作。

WAN Yong - lun was born in Emei, Sichuan Province, in 1970. He received the Ph.D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2005. He is now a senior engineer. His research concerns spacecraft TT&C system.

Email: yonglunwan@tom.com

会议信息

2011 年中国国际雷达会议将在四川成都召开

会议时间: 2011 年 10 月 24—27 日, 会期 4 天。

会议地点: 成都

会议主题: “共享信息, 共享未来”

会议内容: 雷达系统、雷达分系统、雷达信号处理、现象学与建模, 以及一些相关的新兴雷达技术。

会议规模: 总人数 430 人, 其中外宾为 80 人。附设 500 m² 小型展览。

国内主办单位: 中国电子学会

国内承办单位: 中国电子学会

更多信息请浏览本次会议官方网站: <http://www.radar2011.org>