

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2019.02.005

大型民机试飞遥测视频编解码方法研究

Codec Method of Telemetry Video for Large Civil Aircraft Flight Test

毛 为 刘 涛 刘亚妍 / MAO Wei LIU Tao LIU Yayan

(中国商飞民用飞机试飞中心, 上海 201323)

(COMAC Flight Test Center, Shanghai 201323, China)

摘 要:

遥测数字视频作为一种监控手段,在大型民机试飞取证中扮演着重要角色。针对 H. 264 压缩下的遥测视频,提出了传输流编码和异步流编码两种不同的脉冲编码调制(Pulse Code Modulation,以下简称 PCM)格式,描述了两者的数据结构,对比分析了在带宽利用率、抗干扰等方面的特点,并阐述了在两种编码格式下多路嵌入式高清视频数据流的识别、提取、解析和播放,保障了某型民机首飞以及重要科目的试飞,为保证试飞安全、缩短试飞周期奠定了技术基础。

关键词: 传输流编码;异步流编码;PCM

中图分类号: V217

文献标识码: A

OSID:



[Abstract] As a monitoring method, telemetry digital video plays an important role in the test flight of large civil aircraft. For telemetry video under H. 264 compression, two different PCM coding formats are proposed, which are transport stream coding and asynchronous stream coding. This paper describes the data structure of the two codes, compares and analyzes the characteristics in terms of bandwidth utilization and anti-jamming. At the same time, this paper elaborates on the identification, extraction, analysis and playing of multi-channel embedded HD video data streams under two encoding formats, which successfully guarantees the flight test of some aircraft on important subjects, and lays the technical foundation for ensuring the flight test safety and shorten the flight test period.

[Keywords] transport stream coding; asynchronous stream coding; PCM

0 引言

作为飞行器与地面监控系统通信的重要手段,遥测在当代民机试飞过程中扮演着十分重要的角色。通过遥测实时传输试飞参数驱动地面监控系统可为地面指挥人员、试飞工程师、飞机设计人员等提供决策性的依据^[1]。国内民机试飞主要使用 FM/PCM (Frequency Modulation/Pulse Code Modulation, 简称 FM/PCM) 调制模式将机载采集信息、音视频等编码成脉冲编码调制(Pulse Code Modulation, 简称 PCM)格式无线传输至地面进行实时监控。以往的机载影像遥测以模拟 PAL (Phase Alteration Line,

简称 PAL) 制式信号实现,虽然模拟图像具有实时性高、抗干扰能力强等特性,但所需遥测带宽较大,并且受到 PAL 制式约束,分辨率不能突破 720×576 ^[2-3]。随着技术的不断发展以及机载采集系统网络化程度的不断加深,数字视频在试飞遥测领域应用得也越发广泛,如国内新支线客机 ARJ21-700 飞机使用遥测数字视频进行自然结冰、溅水等重要试飞科目的试飞;大型客机 C919 飞机在首飞时直播驾驶舱画面等。

目前,国内主流试飞机构所使用的机载数字视频均采用 H. 264 算法进行图像压缩^[4-5],而在视频的 PCM 编码方面则没有明确的标准。本文立足当

[基金项目] 大型民机试飞数据高速实时处理及异常状态检测分析平台(17511105000)。

前试飞模式,提出了两种不同的遥测视频 PCM 编码方式:一是传输流编码(Transport Stream-Pulse Code Modulation,简称 TS-PCM),即将 H. 264 压缩后的视频数据先转换为传输流(Transport Stream,即 MPEG2-TS 格式),然后以“超采”的方式均匀地放置在 PCM 主帧中;另一种是采用异步流编码,将压缩后的视频流以 PCM 单子帧的形式进行遥测,使用多重判定条件实现视频流信息的定位。本文对比分析了两种方式在 PCM 编码、解码方面的特性,并成功应用于某型民机的首飞和试飞。

1 遥测视频 PCM 编码

1.1 传输流编码

TS-PCM 的编码对象是传输流,因此 H. 264 压缩后的视频数据首先将被转换成传输流^[2]。传输流是基于数据包的位流格式,与 H. 264 视频帧的关系如图 1 所示:H. 264 视频帧作为基本流(Elementary Stream, ES 流),添加 PES(Packetized Elementary Stream, 简称 PES)包头后转换成 PES 数据包,将 PES 包分割后分别添加 TS 包头形成传输流。每个 TS 数据包包长固定为 188 字节,包含 4 字节的包头和 184 字节的有效数据。相比于 H. 264 视频流,传输流在包头中引入了同步字,当由于传输误码破坏了 TS 包中的同步信息时,接收方可在固定的位置检测后面数据包中的同步信息,从而恢复同步,避免信息的丢失,因此传输流抗干扰能力更强,但也不可避免的带来了数据的膨胀。

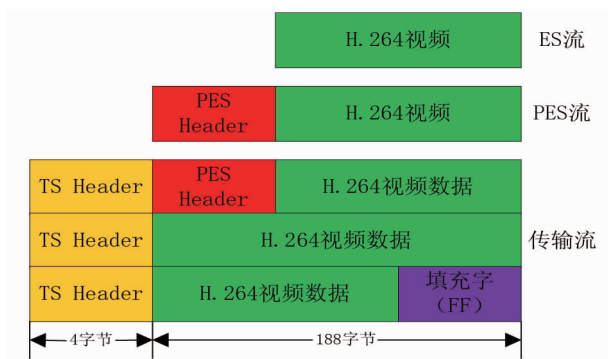


图 1 传输流数据包格式

转换后的传输流以“超采”的方式均匀地放置在 PCM 格式格栅中(如图 2 所示的 25×27 的 PCM 主帧中就包含黄色、红色和棕色等 3 路遥测视频信息),均匀的编码方式保证了各路视频之间的同步性。按照 400 HZ 的 PCM 的主帧频率(波特率为 5.64 Mbps),每路视频的遥测带宽则固定为

2.873 6 Mbps。但是,这种单位时间内固定传输带宽的编码策略,也为那些动态变化较大的视频解析和播放带来了较大挑战。

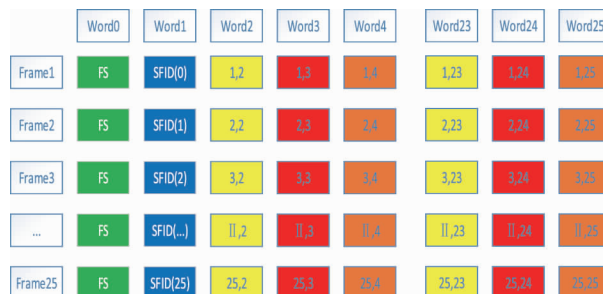


图 2 传输流的 PCM 编码

1.2 异步流编码

异步流编码是本文提出的另一种遥测视频 PCM 编码格式,其编码对象是 H. 264 压缩后的视频数据。编码时,每一个 PCM 主帧只包含一个子帧,子帧长度为 512Word(1 024 字节),且每一个子帧(主帧)只负载一路遥测视频,由 4 字节的 PCM 同步字(一般为 0xFE6B2840)、24 字节包头、6 字节保留字和视频数据组成,其结构如图 3 所示。



图 3 异步流编码结构

PCM 子帧的包头中包含了用于定位视频有效数据的信息,是解析视频数据的关键,异步流编码的包头信息见表 1。

表 1 异步流编码包头信息

地址(Byte)	类型	名称
4	Word	采集器 ID
6	Word	视频通道
8	Byte	音视频格式
9	Byte	帧类型
10	Word	图像宽度
12	Word	图像高度
14	DWord	当前帧 ID 号
18	DWord	视频帧帧长
22	Word	当前帧打包数量
24	Word	当前数据包 ID
26	Word	当前有效数据长度

相对于 TS-PCM, 异步流编码使用一个或多个 PCM 帧传输属于同一路视频的数据。如图 3 所示, 不同的视频(如驾驶舱和起落架), 来源于不同的采集器和视频通道, 且在单位时间内, 每一路视频的遥测带宽是动态分配的(不足 988 字节的有效数据使用 0xa7 填充), 最大限度地保证了实时性能, 同时, 因为 PCM 载荷除视频和填充字外不包含其他任何数据, 因此在相同带宽的前提下, 异步编码可传输更多的有效信息, 这有助于传输更多数量的高清及高帧率视频。

但在视频稳定性、画面恢复速度和各路视频的同步性方面, 该模式的缺点也十分明显: 在传输过程中, 当表示帧类型的信息被误码破坏时, 视频将不会被正确解析, 特别是关键帧错误时, 整个视频画面将会丢失, 画面的恢复也只能捕捉下一个关键帧, 因此恢复速度较慢。

2 视频解析及播放

两种不同编码的遥测视频在解析时存在较大差异。基于传输流编码的遥测视频解析相对简单, 只需要按照图 2 的结构将属于同一路视频的 PCM Word 按照子帧顺序提取出来, 并通过 UDP/IP 传输至 VLC Player (Video Lan Client Player, 简称 VLC Player) 即可实时播放, 具体细节本文不再赘述。

异步 PCM 编码下的遥测视频的解析步骤如下:

第一, 从 PCM 数据流中提取完整的 H. 264 影像帧信息;

第二, 对提取后的视频帧进行 RTP 的封装, 最终通过 UDP/IP 传输至 VLC Player 进行播放。

2.1 视频帧提取

视频帧的提取流程如图 4 所示:

按照表 1 描述的包头信息, 采集器 ID、视频通道以及音视频格式和帧类型组成了识别视频流的唯一主键, 其中“音视频格式”以“0”和“1”分别表示 H. 264 和 PAL 两种类型, “帧类型”的值为“1”时表示视频。视频流的识别主键用字符串描述为: “1024:1”, 即编号为 1024 号采集器的第一通道数字视频, 主键创建过程如图 5 所示。

通过主键可识别视频源, 根据图 4 所示的流程利用“当前帧 ID 号”和“当前数据包有效数据长度”可提取指定视频源的影像帧数据。在提取过程中, 当“当前帧 ID 号”这一值不一致时, 则认为属于“上

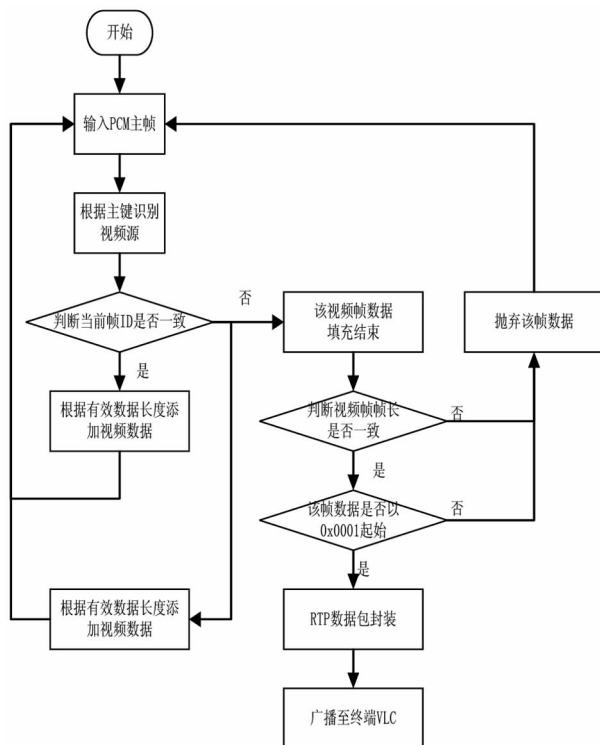


图4 视频帧提取流程

Algorithm 1: Extract Primary key

Initialization: $data \leftarrow \text{PCM Stream}$, $N \leftarrow \text{Video Stream Count}$

$dictionary \leftarrow \text{new Dictionary}\langle \text{string}, \text{string} \rangle$

While $t \leq N$ do:

$collector_id \leftarrow data[1]$

$channel_id \leftarrow data[2]$

$isH264video \leftarrow data[3] = 256 ? \text{true} : \text{false}$

If $\langle isH264video \rangle$ then:

$key \leftarrow collector_id : channel_id$

$value \leftarrow "video\ number:t"$

$dictionary.Add(key, value)$

$t \leftarrow t+1$

Else:

continue

End If

End While

Return $dictionary$

图5 视频主键创建伪代码片段

一帧”的数据已经提取完成。提取的视频帧还必须通过与“视频帧帧长”以及 H. 264 视频帧的起始字(即 0x0001)进行比对, 完全符合后才是完整的视频帧数据, 过程如图 6 所示。

Algorithm 2: Extract the complete video frame

```

Initialization: data ← PCM Stream, current_frame_id,
valid_data_length, valid_data_list, memory_frame_id
If <isH264video> then:
  For each item in dictionary:
    If <item.collector_id = data[1]
    && item.channel_id = data[2]> then:
      If <current_frame_id = memory_frame_id> then:
        valid_data_list.Add(data[36:valid_data_length+36])
        memory_frame_id ← current_frame_id
      Else:
        If <valid_data_list.length = valid_data_length
        && valid_data_list[0:4] = 0x0001> then:
          RTP_data ← Convert(valid_data_list)
          Send(RTP_data)
          valid_data_list.clear
        End If
      End If
    End For
  End For

```

图 6 H. 264 视频帧提取过程伪代码片段

2.2 RTP 封装

H. 264 视频帧必须通过 RTP (Real-time Transport Protocol, 简称 RTP) 才能传输至 VLC 播放器进行实时播放。RTP 是介于传输层与应用层之间的协议, RTP 报文由包头和有效载荷两部分组成, 封装时一般使用两种不同的封装方式: 单个 NAL (Network Abstract Layer) 单元包和分片单元包。分片单元包是指将单个 NAL 单元分片至多个 RTP 包, 分片的原则是当数据长度大于某一特定值时触发分片, 本例中这一长度被设置为 1024 字节, 详细处理流程如图 7 所示。

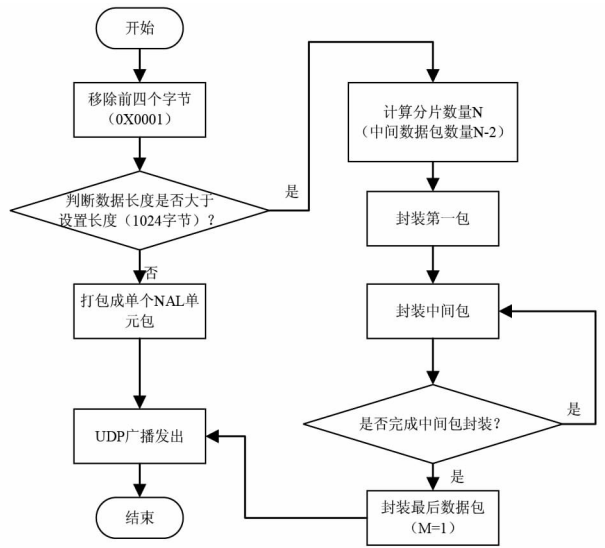


图 7 RTP 封装

单个 NAL 单元只需为视频数据添加 RTP 包头, 而分片单元则较为复杂, 当有效数据分片时, 按照 FU-A (Fragmentation Units-A, 简称 FU-A) 标准, 需要分别为第一个分片数据包、中间数据包 (如果存在中间包) 以及最后的数据包添加不同的 FU Indicator 和 FU Header, 图 8 是中间数据包的封装流程。

Algorithm 3: Convert

```

Initialization: valid_data_list, middle_packets_count ← 0
slice_length ← 1024, RTP_data
nalu ← valid_data_list[5]
valid_data_list.Remove[0:5]
If <valid_data_list.length % slice_length = 0> then:
  middle_packets_count ← valid_data_list.length / slice_length - 2
Else:
  middle_packets_count ← valid_data_list.length / slice_length - 1
End If
While t ≤ middle_packets_count do:
  FU_Indicator = Get_Middle_Indicator(nalu)
  FU_Header = Get_Middle_Header(nalu)
  RTP_data.Add(FU_Indicator)
  RTP_data.Add(FU_Header)
  RTP_data.Add(valid_data_list[0:slice_length])
  RTP_data.Remove(0:slice_length)
  RTP_data.Insert(0, RTP_Header)
  Send(RTP_data)
  RTP_data.clear
  t ← t + 1
End While

```

图 8 RTP 分片单元中间数据包封装伪代码片段

封装后的 RTP 视频数据包以 UDP (User Datagram Protocol, 简称 UDP) 广播的形式发送至各个监控终端, 终端通过加载 SDP (Session Description Protocol, 简称 SDP) 文件进行不同遥测视频的播放。SDP 文件中的信息如表 2 所示: 其中第 1 行定义了媒体类型和传输协议, 1242 为 RTP 通信端口 (必须为偶数), 可根据实际需求进行设置; 第 2、3 行表明了 RTP 数据包的负载类型和帧率。

表 2 SDP 文件信息

行号	文件信息
1	m = video 1242 RTP/AVP 96
2	a = rtpmap:96 H264
3	a = framerate:25
4	c = IN IP4 192.168.0.255

3 试验

在某型民机首飞和试飞时,分别采用了传输流



(a)异步流视频



(b)传输流视频

图 9 某型飞机驾驶舱采集视频效果

表 3 遥测视频实时解析系统性能

编码方式	遥测视频数量	遥测带宽 /Mbps	视频有效带宽/Mbps	最大分辨率	帧率 /(帧·s ⁻¹)	系统延时 /ms	误码时画面效果	视频误码恢复时间
IRIG 106 Ch10	3 路	8.64	6.620 8	1 600×1 200	15	≤ 150	局部丢失	≤ 500 ms
异步 PCM 编码	4 路	8.00	≈ 6.700 0	2 590×1 920	25	≤ 100	整体丢失	800 ms~1.5 s

通过对比试验,可以看出异步 PCM 使用更少的带宽传输了更多的遥测视频,且帧率和最大分辨率都远高于传输流编码,但在抗干扰方面则需要更长的时间进行画面的恢复。为了弥补这一缺陷,进一步提高异步 PCM 视频流的“健壮性”,可在 H. 264 视频帧压缩的基础上增加一层“数据压缩”,从而减少数据流的“尺度”,降低误码风险,同时可在 PCM 的编、解码两端引入校验来增强数据的“恢复能力”,如奇偶校验、CRC(Cyclic Redundancy Check,简称 CRC)校验等。

IRIG 106 Ch10 下的遥测视频用“牺牲带宽”的策略提高了视频画面的稳定性和质量,在面对未来民机试飞中越来越多的视频监控需求时,改变遥测调制传输模式增加遥测带宽将是合适的选择,如使用 SOQPSK(Shaped Offset Quadrature Phase-Shift Keying,简称 SOQPSK)或者网络传输。

4 结论

本文针对 H. 264 压缩下的遥测数字视频,提出了传输流编码和异步流编码两种 PCM 编码格式。两种 PCM 编码格式均能完成遥测视频的实时传输,在遥测带宽受限时或者需要传输更为高清的视频时

编码以及异步流编码两种不同的方式对采集视频进行了遥测,驾驶舱视频效果如图 9 所示,试验结果见表 3。

使用异步流编码更加合适,传输环境比较恶劣时传输流编码更加稳定。

参考文献:

[1] 白效贤,杨廷梧,袁炳南. 航空飞行试验遥测技术发展趋势与对策[J]. 测控技术,2010,29(11):6-9.
[2] The Telemetry Group of the Range Commanders Council. The standard for digital flight data recording:IRIG 106[S/OL]. (2017-01-02). <http://www.irig106.org>.
[3] 袁炳南,霍朝晖,白效贤. 航空飞行试验遥测标准概括[J]. 测控技术,2010,29(11):10-14.
[4] 黄兆靖,刘宇,田增山,等. 以太网数字影像遥测编码器的设计与实现[J]. 电视技术,2013,37(3):62-66.
[5] 李宏,吴衡,冯巧宁. 基于单向无线网的飞行试验视频遥测传输技术[J]. 测控技术,2010,29(6):29-32.

作者简介

毛 为 男,学士,副总工程师。主要研究方向:试飞与测试。E-mail: maowei@comac.cc
刘 涛 男,硕士,工程师,通讯作者。主要研究方向:试飞数据实时处理。E-mail: liutao2@comac.cc
刘亚妍 女,硕士,工程师。主要研究方向:视频采集及测试。E-mail: liuyayan@comac.cc