

文章编号:1001-5078(2007)增刊-1022-05

一种新的红外焦平面图像信号无线光输出协议

郭 磐,陈思颖,倪国强,高 昆

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系,北京 100081)

摘 要:文中提出了一种针对红外焦平面图像信号无线光输出的高速数据链路层协议。该协议以 IrDA 标准的红外数据链路协议(IrLAP)作为参考,通过红外无线信道来实现点对点、高速、稳定的图像信号输出。协议的设计充分考虑了对多种红外传输速率的支持,以及位错误率(BER)、红外帧长度、应答分组大小等因素对系统传输吞吐量的影响,提出了寻找合适参数有效的计算方法,以及基于 FPGA 的红外无线视频传输平台的设计方法。实验结果显示,传输平台可以在 16Mb/s 的红外传输速率下长期稳定工作。这表明本协议适用于 VFIR 及更高速率的图像无线传输,经过不断地测试与完善,可为制订今后焦平面图像信号光输出规范提供参考。

关键词:红外无线协议;红外焦平面;无线光输出

中图分类号:TN92

文献标识码:A

A Novel Wireless Optical Transport Protocol for Infrared Focal Plane Array Image Output

GUO Pan, CHEN Si-ying, NI Guo-qiang, GAO Kun

(Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A high-speed data link layer protocol of wireless optical transport is proposed on the basis of standard IrDA Link Access Protocol (IrLAP) for infrared focal plane array (IRFPA) image data output. This protocol makes use of the infrared wireless channel to realize the point-to-point, high speed and stable image data transport. With the multi-speed support of the infrared transmission, the protocol also takes the influence of Bit Error Rate (BER), frame length and window size into full account. Then equations about how to calculate the optimal parameters are presented to maximize the data throughput at a certain BER. An infrared wireless video transport platform based on FPGA is also given, which can work stably at the transmission rate of 16Mb/s for a long time. The experiment results show that the protocol is suitable for the image transporting at VFIR and higher rates. Through continuous development and consumption, this protocol is potential for the optical transport criterion of the IRFPA image data output in the future.

Key words: wireless infrared protocol; infrared focal plane array (IRFPA); wireless optical output

1 引 言

对于制冷型红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA),利用串行红外无线传输技术替代传统的引线方式作为杜瓦瓶内图像信号的输出方式,能有效减轻引线过多引起的漏热、传输功耗过高等问题,从而提高系统的稳定工作时间。目前,红外无线传输技术已有相应的国际标准。红外数据联合

会(IrDA)已制定了包括物理层、数据链路层、连接管理层及应用层等一系列传输协议。应用红外无线技术传输图像信号,在物理层可完全采用标准协议进行设计,但在数据链路层,IrDA 提供的协议 IrLAP

作者简介:郭 磐(1981-),男,北京理工大学在读博士生,研究方向为红外无线传输,高速图像和视频处理应用技术。E-mail: guopan@bit.edu.cn

收稿日期:2007-07-03

并不完全适用。其原因在于, IrLAP 是基于通用数据传输设计的, 而 IRFPA 图像信号的输出有其特殊的要求:

①实时性要求。IrLAP 是基于出错停等重传机制的, 而 IRFPA 图像信号是实时视频流, 没有太长的时间留给出错数据的重传, 而且对延迟要求较严格, 通常要求小于一帧图像。

②低功耗要求。制冷型 IRFPA 必需的杜瓦瓶结构, 严格限制了发送端的体积、功耗、发热等指标, 接收端虽位于杜瓦瓶外, 但仍然要求功耗、体积尽量小, 因而两端电路系统的复杂度不能太高。

③数据格式要求。实时的图像信号传输与一般的数据文件传输不同, 它符合特定的时序格式, 除了图像数据之外, 还需要帧同步、行同步等控制信号。

虽然存在以上的差别, 但 IrLAP 的基本设计思想仍然是非常值得参考的, 比如基于帧数据包的传输方式, 基于分组的应答反馈机制, 保证传输稳定性的主动重传机制等。本文在这些基本的传输原理之上, 根据红外焦平面图像信号输出的特点, 构建了适合于实时图像信号红外无线传输协议。

由于图像传输数据量通常较大, 超过了一般的红外无线传输标准的传输带宽, 因此本文仅基于高速的 VFIR 标准及未来的更高速率的物理层标准进行讨论。

2 图像输出协议设计

(1) IrLAP 协议简介

基于 IrLAP 协议的红外无线传输, 包括连接建立过程与数据传输过程。连接建立之初, 收发两端首先确定连接对象与传输方向, 之后通过命令字方式协商包括波特率、数据帧大小、分组大小、转换时间等所有具体的连接参数。数据的传输, 以一定大小的数据帧作为基本的传输单位, 在发送端发送了若干个数据帧之后, 改变连接方向, 接收端将已正确接收的数据帧的序号反馈给发送端。若出现接收错误, 发送端从出错的数据帧位置重新开始新的分组的传输。协议中规定了三种数据包格式, 无序号格式 (Unnumbered Format) 用于传送命令, 监督格式 (Supervisory Format) 用于应答已正确接收的帧数, 信息传输格式 (Information Transfer Format) 用于传输数据。

协议的具体细节, 可参考文献[1]。

(2) 基本传输框架

焦平面数据输出, 有固定的发送方与接收方, 且

为点对点传输, 因此不需要连接的发现与寻址过程; 由于被传输的图像信号为固定的时序格式, 所以可事先确定好协议中的连接参数, 而省略参数协商过程。

数据包格式简化为两种: 信息传输格式 I 帧, 以及应答格式 A 帧。I 帧数据包包括 2 个控制位、1 个帧序号字段和图像数据; A 帧相对于 I 帧则少了图像数据的部分, 仅用于接收端反馈接收帧的正确情况 (见图 1)。与 IrLAP 类似, 传输过程中没有对 I 帧逐个应答, 这是由于红外收发器件都是半双工工作的, 由发射状态转换到接收状态需要一定的时间, 频繁的收发转换会极大地浪费传输时间。因此, 仍然采用分组应答的方式, 每发送 N 帧数据, 作为一个分组, 之后由接收端给出接收正确与否的响应。

综合以上的设计思路, 连接的建立过程可描述如下: 初始状态时, 发送端将数据打包为 I 帧并发送出去, 每发送 N 个 I 帧, 将数据发送权转交给接收方, 并进入等待反馈的状态, 若超时仍没接收到反馈, 则继续打包发送下个分组的 N 帧数据; 接收端一直处于监听状态等待接收, 一旦接收到数据则对帧序号计数, 当计数达到分组帧数 N , 或收到反馈请求时, 则在一个收发转换时间后, 给出反馈。

对于数据传输出错的处理, 本文讨论两种可行的重传方案: 一种是 IrLAP 所采用的方案, 当接收端发现传输错误后, 反馈到发送端的是出错前最后一个正确收到的帧序号, 分组中出错后接收的帧全部抛弃, 下一分组的传输从出错的帧开始; 另一种方案是常规思路得出的方案, 当接收端发现传输错误后, 记录下出错的帧序号, 后面正确接收到的帧仍然保留, 反馈时将分组中所有出错的帧序号通知发送端, 发送端把出错的帧重新传输, 接收端则将这些帧插入正确的位置, 构成一个完整的分组, 再开始下一分组数据的传输。

为方便讨论, 将前一种方案称为方案 A, 后一种称为方案 B。方案 A 的优点是实现简单, 因为它的传输是顺序传送的 (只有停顿, 没有跳跃), 发送和接收端的缓冲就可以是先进先出 (FIFO) 缓冲, 而缺点是可能对传输带宽的浪费较大; 方案 B 的优点是优先考虑了传输带宽的有效利用, 但其调度更加复杂, 发送与接收的缓冲都需要寻址, 而且有一定可靠性的损失。

图 1 给出了根据两种重传方案构造的链路层帧结构。其中 P/F 位继承于 IrLAP, 将 P/F 位置 1, 代表下一帧数据传输方向改变, 用于发送端请求应答

和接收端的应答帧中。 V_{sync} 位用于视频帧的同步,区别相邻两帧图像数据。帧计数字段代表当前帧在分组中的位置,在方案 A 中帧计数采用 2 进制计数, N 帧的应答分组需要占用 $\log_2 N$ 位;方案 B 中,每帧占用 1 位来计数,这样在发送时有且仅有 1 位被置 1 来标示当前发送帧的位置,应答时,可出现多位被置 1 标示所有接收出错帧的位置。计数字段之后,是所要传输的图像数据。

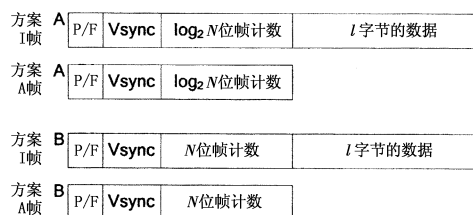
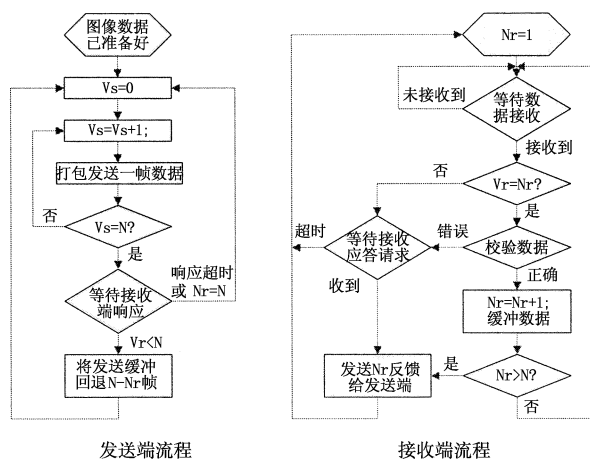


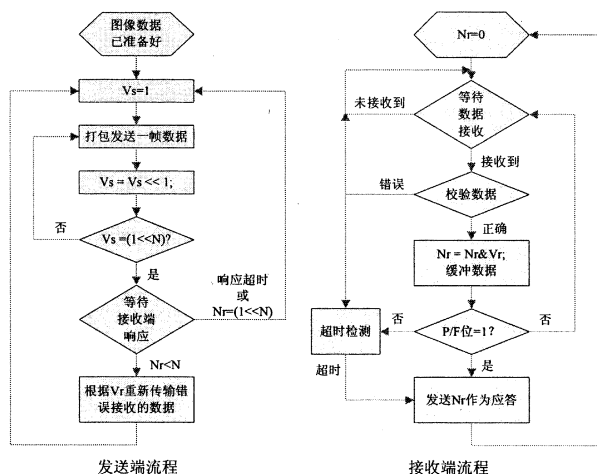
图1 数据链路层传输协议帧结构示意图

基于两种方案的传输协议流程在图2和图3分别给出详细说明。



V_s 表示发送端发出的帧序号; V_r 表示接收端收到的帧序号;
 N_r 表示接收端计的期望接收到的帧序号

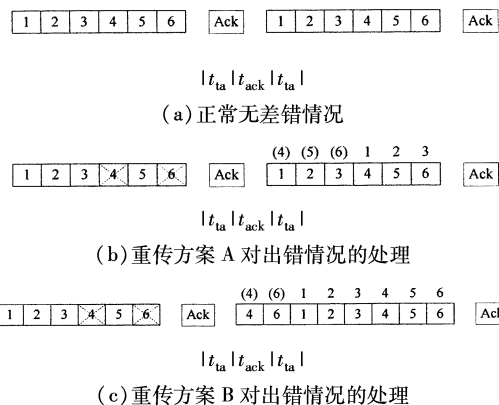
图2 基于方案A的协议流程控制



V_s 表示发送端发出的帧序号; V_r 表示接收端收到的帧序号;
 N_r 表示接收端已接收到的帧序号逻辑与的结果

图3 基于方案B的协议流程控制

两种重传方案对出错帧序列的处理差别,在图4中可以直观的看出来。它展示了在 $N=6$ 情况下的帧序列传输情况。



取 $N=6$ 为例,“ $\times$ ”标记的帧为接收错误的帧;
“() ”标记的帧序号为当前帧在前一分组中的帧序号

图4 两种重传方案帧序列示意图

(3) 协议参数的分析

下面我们对两种方案的吞吐量进行分析。表1中列出了协议涉及的相关参数,以便于在分析时引用。

表1 协议分析中涉及的参数[2]

参数	说明	单位	参数	说明	单位
C	红外传输速率	bit/s	t_1	I 帧的传输时间	s
BER	比特传输错误率	-	t_A	A 帧的传输时间	s
p_f	数据帧传输错误概率	-	t_{ack}	应答时间	s
l	I 帧中有效图像数据的长度	bit	t_w	无差错时分组传输时间	s
l'	I 帧中功能字段的长度	bit	t_{ta}	信道收发转换时间	s
L_1	I 帧的长度	bit	D_f	帧传输吞吐量	帧/s
L_A	A 帧的长度	bit	D_b	位传输吞吐量	bit/s
N	应答分组大小	帧			

其中, C ,BER, t_{ta} 是由系统所应用的红外收发器件和信道情况决定的; l , N 是需要通过计算分析来确定的参数;其他参数是由前面提到的参数和相应的协议机制共同决定的。

根据表1中的定义以及简单的数学推导,可以得出如下的关系:

$$\begin{cases} L_1 = l + l' \\ L_A = l' \\ t_1 = \frac{l + l'}{C} \\ t_A = \frac{l'}{C} \\ D_b = l \cdot D_f \\ p_f = 1 - (1 - \text{BER})^{l+l'} \end{cases} \quad (1)$$

下面的推导过程,基于一个假设前提,即 A 帧相对于 I 帧是很短的,不考虑它出现接收错误的情况。从图 4 中可以得到,响应时间为:

$$t_{\text{ack}} = 2t_{\text{ta}} + t_A \quad (2)$$

无传输错误时,一个分组正常的传输时间为:

$$t_w = N \cdot t_1 + t_{\text{ack}} \quad (3)$$

下面分别分析方案 A 与方案 B 的数据传输吞吐量与各协议参数的关系。首先,对于方案 A 来说,在一个分组传输过程中,前 ω 帧正确接收,第 $\omega + 1$ 帧出错的概率为:

$$p_c(\omega) = (1 - p_f)^\omega \cdot p_f, \omega = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4)$$

一个分组中所有帧都正确的概率为:

$$p_c(N) = (1 - p_f)^N \quad (5)$$

这样在连续传输的过程中,在一个分组的传送时段内,平均能够正确传输的帧数为:

$$p_{\text{all}} = \sum_{\omega=0}^N \omega p_c(\omega) \quad (6)$$

通过代数方法化简可推导出:

$$p_{\text{all}} = \frac{1 - p_f}{p_f} [1 - (1 - p_f)^N] \quad (7)$$

因此,平均的数据传输的帧吞吐量为:

$$D_f = \frac{p_{\text{all}}}{t_w} \quad (8)$$

将式(12)代入式(13),可以得到:

$$D_f = \frac{p_{\text{all}}}{t_w} = \frac{1 - p_f}{p_f} \cdot \frac{[1 - (1 - p_f)^N]}{N \cdot t_1 + t_{\text{ack}}} \quad (9)$$

相应地,根据式(1)可得到数据的位吞吐量。

下面分析方案 B 的传输吞吐量。由于出错重传时,一个分组内的帧序列被扩展了,超过了正常情况下的长度 N ,因此分析的方法有所不同。在方案 B 中,出错的帧仅被重传一次,并且不再反馈是否被正确接收。这样,平均每传输一个分组时,出错的帧数为 $N \cdot p_f$,从而得到平均一个分组的实际需要传输的帧数为 $N + N \cdot p_f$ 。因此,平均传输一个分组的 N 帧数据需要的时间为:

$$T_{\text{Nc}} = (N + N \cdot p_f) \cdot t_1 + t_{\text{ack}} \quad (10)$$

因此,平均的数据传输帧吞吐量为:

$$D_f = \frac{N}{T_{\text{Nc}}} = \frac{N}{(N + N \cdot p_f) \cdot t_1 + t_{\text{ack}}} \quad (11)$$

同样,可以根据式(1)得到数据的位吞吐量。

以上是基于连续数据源进行的计算推导,没有

考虑视频传输的具体需求,也没有涉及红外传输参数的实际取值,不能直接确定方案 A, B 的取舍,以及参数 l, N 的取值,需作进一步的探讨。

(4) 协议的应用分析

目前红外无线传输物理层传输速率仍在发展阶段,无法满足标准视频的实时传输应用。因此本文从非标准的低分辨率图像传输开始探讨。表 2 列出了常用的一些红外图像分辨率,以及在 25 帧/s、8bit 灰度模式下对应的传输比特率。

现在考虑 IRFPA 图像信号输出的要求,首先是同步的要求。图像的帧同步由计数单元确定;帧同步,通过将一帧图像分解为整数个分组,以帧结构中的 Vsync 位作为相邻两帧图像数据的区分标志来实现。对于传输实时性要求,体现在协议设计中,就是对于重传时间超过延迟限制的帧,放弃重传而直接抛弃。重传方案 B 中,每次出错仅重传一次,不会因为一帧数据的连续传输出错而过分停滞,能较好地保证实时性。

表 2 常用的红外图像分辨率

图像 分辨率	720 × 576	640 × 480	512 × 512	320 × 240	256 × 256	128 × 128
比特率 (bit/s)	82.944M	61.440M	52.4288M	15.360M	13.1072M	3.2768M

目前,红外无线通信物理层的最高传输速率为 VFIR 标准的 16Mb/s^[3]。从表 2 中可以直观地看到,在不超过 VFIR 的传输能力条件下,传输 256 × 256 的图像值得分析。下面应用上一节的方程式,对这一分辨率图像在 VFIR 速率下的传输进行分析。

在 IrDA 物理层标准中, VFIR 数据包的前导位 (PA)、开始位 (STA)、停止位 (STO)、CRC 校验位等功能字段共 280bit^[3]。因此,对于方案 A:

$$l' = 280 + 2 + \log_2 N \quad (12)$$

对于方案 B:

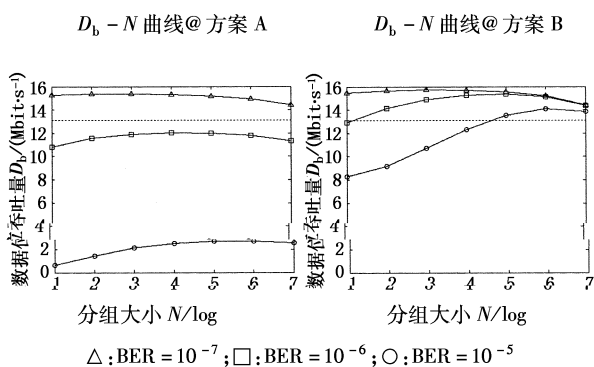
$$l' = 280 + 2 + N \quad (13)$$

要使得 1 帧图像数据正好等于 1 个红外传输分组的大小, l 和 N 还应满足约束条件:

$$l \times N = 256 \times 256 \times 8 = 524288 \quad l, N \in \mathbf{Z} \quad (14)$$

其余参数的取值:传输速率 $C = 16\text{Mb/s}$,收发转

换时间取为固定的常用值 $t_{\text{ta}} = 100\mu\text{s}$, 它通常是由红外收发器件的参数指标决定的。利用方程式 (1) ~ (14) 可以计算得到不同方案 (A、B)、不同 BER ($10^{-7} \sim 10^{-5}$) 条件下, 数据吞吐量与分组数 N 的关系曲线图。



“……线”: 标示了 256×256 图像传输的比特率要求: 13.1072M

图5 不同 BER 条件下数据吞吐量与分组数 N 的曲线图

从图5中可以看到, 方案A只有在 $\text{BER} = 10^{-7}$ 时, 数据吞吐量才能达到 13.1072M 的要求; 方案B在 $\text{BER} = 10^{-5}$ 时, 通过选取合适的 N 值, 仍然可以达到传输速率的要求。因此, 本文的协议采用方案B作为重传机制。IRFPA 图像信号输出是点对点固定位置的传输, 而且几乎没有环境杂散光的干扰, BER 指标通常较好。因此, 结合图5中的曲线, 选取 $N = 2^5 = 32$, $l = 16384\text{bit} = 2\text{k Byte}$ 作为协议参数值是合适的。它可以保证在满足传输速率要求的前提下, 在 BER 较低时能有比较好地表现。

对于表2中列出的其他分辨力的图像, 都可利用相同的方法进行分析设计, 表3中给出了利用上述方法计算得出的, 针对不同分辨力图像的协议参数参考值。

表3 针对不同分辨力图像传输的协议参数参考值

图像分辨力	720×576	640×480	512×512	320×240	256×256	128×128
比特率 $/(\text{bit} \cdot \text{s}^{-1})$	82.944M	61.440M	52.4288M	15.360M	13.1072M	3.2768M
红外传输速率 $C/(\text{bit} \cdot \text{s}^{-1})$	100M	100M	100M	100M	16M	16M
$N/\text{帧}$	256	256	128	64	32	16
l/bit	12960	9600	16384	9600	16384	8192

(5) 协议的实现与验证

基于 FPGA 的红外无线传输平台, 可随时调整

逻辑功能以适应不断改进完善中的协议, 是理想的协议实现与验证平台。在 IrDA 物理层协议基础上完成图像信号传输, 需要实现上述的数据链路层传输协议, 其重点在于重传机制的实现。重传机制的实现是一个缓冲调度的过程。根据图3给出的流程, 利用有限状态机或嵌入式微控制器的 IP 核都可实现调度过程。缓冲单元的设计也是很重要的, 由于重传过程具有随机性, 不能采用简单的 FIFO 缓冲器, 需应用可寻址访问的双口 RAM 来缓冲。

在发送端, 采用 $2l$ 大小的缓冲, 保证出错重传时仍有足够的空间缓冲焦平面信号。从焦平面读出的图像数据以顺序方式写入双口 RAM, 正常情况下顺序读出, 接收出错时, 根据反馈信息寻址, 重新发送相应的数据帧。在接收端, 采用 2 个 l 位的缓冲区做乒乓结构的双缓冲, 寻址写入、顺序读出, 根据数据帧中的 V_{sync} 位决定缓冲区的切换。

应用本文设计的协议, 在基于以上思路设计的红外无线传输平台上, 实现了双路 128×128 可见光图像的无线输出。显示图像稳定清晰, 验证了协议设计的可行性。

3 总结

本文提出的红外焦平面图像信号无线光输出协议, 简洁稳定, 比标准的 IrLAP 协议更适合点对点的图像信号传输。其中涉及的两种重传机制, 在带宽占用率小的情况下都是可以应用的, 而且方案A实现起来更加简单。但在带宽压力很高的情况下, 优先考虑实时性良好的方案B, 更适合实际应用。文中所采用的分析方法, 为今后在更高的红外无线传输速率下、更加实用的通信协议设计提供了良好的参考。

参考文献:

- [1] IrDA: Serial Infrared Link Access Protocol (IrLAP) [Z]. Ver. 1.1. Infrared Data Association, 1996.
- [2] Vitsas V, Boucouvalas A C. Optimization of IrDA IrLAP Link Access Protocol [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions, 2003, 2(5): 926-938.
- [3] Wee-Sin Tan, John Petrilla, Walter Hirt. Infrared data association serial infrared physical layer specification [Z]. Ver. 1.4. Infrared Data Association, 2001, 2: 1-60.