

模拟体制图像发射装置数字化改进与实现

邹冬杰, 李 礼, 李鉴涛, 范 秒

(国营长虹机械厂, 广西 桂林 541003)

摘要: 提出了一种数字体制图像发射装置设计方案, 旨在解决模拟体制图像发射装置图像清晰度不高、抗电磁干扰性能不足的问题, 提升武器系统在执行侦察、监控或打击任务时的实时图像传输能力, 项目沿用原有图像发射天线、射频电缆, 主要运用跳频跳时调制技术对模拟体制图像发射装置进行数字化设计, 研究了图像发射信号处理流程、图像时间同步的方法, 采用 Turbo 编码及跳频同步算法等关键技术, 在图像通信技术工程应用上实现了创新, 数字图像发射装置重量、功耗得到了优化, 干扰容限、图像清晰度和实时性得到明显提升, 确保了在高速动态环境下图像信息的高质量传输。

关键词: 图像发射; 数字体制; 跳频跳时; Turbo 编码; 抗干扰

Digital Improvement and Implementation of Analog System Image Transmission Device

WU Dongjie, LI Li, LI Jiantao, FAN Miao

(State-owned Changhong Machinery Factory, Guilin 541003, China)

Abstract: In order to solve the low image clarity and insufficient electromagnetic interference resistance in analog system image transmission devices, and improve the real-time image transmission capabilities of weapon systems during reconnaissance, surveillance, or strike missions, a design scheme for a digital system image transmission device is proposed. This scheme adopts existing image transmission antenna and RF cables, mainly employs frequency-hopping and time-hopping modulation technology to digitally design the analog system image transmission device, and research the image transmission signal processing flow and method for image time synchronization. Key technologies such as Turbo coding and frequency-hopping synchronization algorithms are used to achieve innovation in the engineering application of image communication technology, optimize the weight and power consumption of the digital image transmission device, significantly improve the interference tolerance, image clarity, and real-time performance, and ensure the high-quality transmission of image information in high-speed dynamic environments.

Keywords: image transmission; digital system; frequency-hopping and time-hopping; Turbo coding; interference resistance

0 引言

某型装备图像传输系统采用模拟传输体制, 当工作在不同的地域时, 由于周边电磁环境不同, 在未施加人为干扰的情况下, 图像传输系统还原图像画面会出现不同程度的马赛克干扰、横条纹干扰等现象^[1], 对使用人员的心理造成不同程度的影响, 已经难以适应现代战争的需要。

由于模拟图像传输系统在信道和信号抗干扰处理方面存在较大难度, 而数字图像传输系统具有传输距离更远、系统容量更大、抗干扰能力更强等优点。随着元器

件技术和数字信号处理技术的发展, 数字图像传输系统逐渐成熟, 其抗干扰性能好的优点也使其成为图像传输系统的发展方向^[2]。

以装备国产替代为工程背景, 通过对图像发射装置的改造, 将原模拟体制改为数字体制, 实现图像传输系统的抗干扰能力提升。

1 模拟体制图像技术特征

图像发射装置由视频处理电路、锁相调制电路、功率放大电路、DC-DC 电源变换电路、加温电路等组成, 原理框图如图 1 所示。视频处理模块对摄像机送来的视

收稿日期: 2024-09-08; 修回日期: 2024-11-20。

作者简介: 邹冬杰(1985-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 邹冬杰, 李 礼, 李鉴涛, 等. 模拟体制图像发射装置数字化改进与实现[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(3): 153-160.

频信号进行预加重处理，然后将信号送入频率调制电路；频率调制模块产生载波，并对载波进行稳频处理，将馈入的视频信号调制到载波上；功放模块对送来的已调频微波信号进行放大，使其达到规定的电平；电源及控制模块完成对+27 V 电源的变换、稳压，产生发射机各级电路所需的电压；加热模块在低温时对图像发射装置内部进行加热，改善发射机内部工作环境^[3]。

图像发射装置每个图像信道带宽 20 MHz，两个图像信道间隔 10 MHz，图像发射装置能够通过指令预置工作信道。在无外界电磁干扰的情况下，图像质量参照 GB7401 87《彩色电视图像质量主观评价方法》优于三级要求。由于采用 FDMA 模拟调制体制，噪声抑制性能弱，同频段无效信号容易被接收机接收，解调后会形成杂波电压叠加在视频信号上，极大影响了图像清晰度。

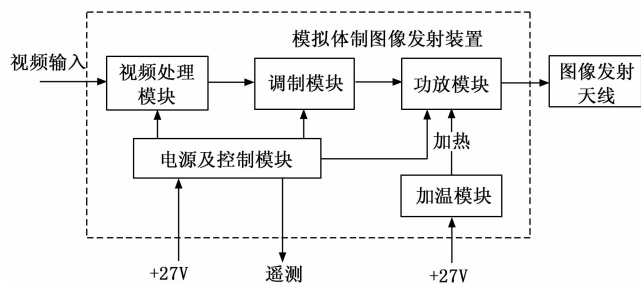


图 1 模拟体制图像发射装置原理框图

2 图像发射装置数字改进方案

2.1 总体方案

数字图像发射设备原理框图见图 2，输入视频信号（电视信号或红外视频）先进行 A/D 转换为数字信号，采用 8 比特采样，保证图像灰度达到 256 级。经 A/D 转换后的数字信号进行预处理、压缩，然后组帧、编码、调制、跳频跳时，经 DA 转换、滤波、功率放大后输出至天线^[4]。

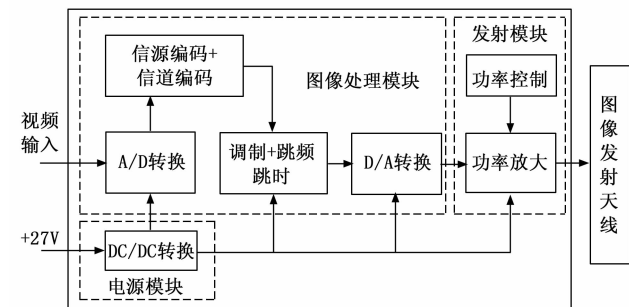


图 2 数字体制图像发射装置原理框图

2.2 图像发射体制

图像发射装置集成了跳时与跳频技术，其中每个脉冲均执行一次跳频传输操作，且传输起始时刻在预设范

围内进行随机性抖动。

发射信息速率为 2 Mbps，采用固定消息格式，信息脉冲宽度为 21 μ s，包含着一个发送帧的 336 bit 数据。码元速率为 16 Mbps，采用 GMSK 调制，BT = 0.3。脉冲间隔在伪随机码的控制下在一定的时间范围内随机抖动。

跳频速率超过 10 000 hop/s，脉冲时长为 25 ~ 62.5 μ s。由于有固定的 21 μ s 的信息脉冲，因此跳时造成的时间抖动 t 与 t' 等的长度区间为 4 ~ 41.5 μ s。跳频跳时脉冲示意图如图 3 所示。

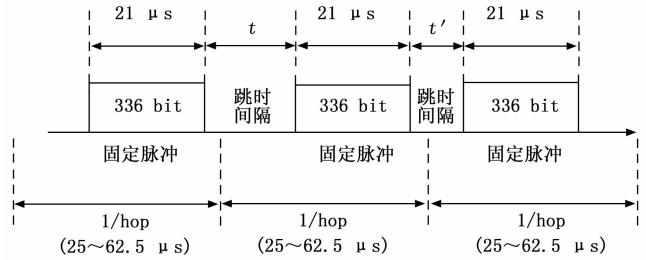


图 3 跳频跳时脉冲示意图

2.3 图像信号处理流程

图像信号处理流程如图 4 所示。

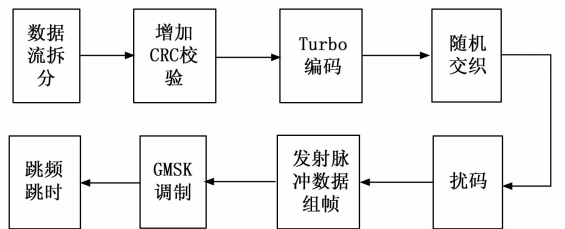


图 4 图像信息发送处理流程图

图像信息流按照每 1 000 bit 进行一次处理，每 1 000 bit 增加 24 bit 的 CRC 校验位，然后进行 Turbo 编码，编码后对数据进行随机交织。数据量及分包情况如表 1。

表 1 图像信息分包情况

信息速率	编码方式	编码后总 bit	分包情况
2 M	1/3turbo	3 072(19 680)	12×256
2 M	1/6 turbo	6 144(39 360)	24×256

如图 5 所示，信息在经过一系列复杂的处理过程之后，最终被封装成发送帧。这一过程包括编码、交织和加扰等步骤，确保数据的完整性和可靠性。在这些步骤完成后，数据被封装成特定格式的发送帧，其长度为 336 bit。每一个发送帧都包含了多个关键部分，以确保信息的正确传输和接收。

具体来说，发送帧由几个主要部分组成：同步与相位基准位、信息位、PA 功放控制位和 PD 功率检测位。

同步与相位基准位用于确保接收端能够准确地同步和锁定信号, 从而正确地解码信息。信息位则是实际传输的数据内容, 其长度会根据不同的编码效率而有所不同。PA 功放控制位和 PD 功率检测位分别用于实时监测和调整功率放大器 (PA) 的输出功率, 以及进行功率检测 (PD)。这两个部分的长度均为 16 bit, 通过这种方式, 可以显著减少带外辐射, 提高信号传输的质量和效率。

在不同的 Turbo 码编码效率下, 信息位和同步位的长度也会有所不同。例如, 在 1/3 和 1/6 的发送脉冲帧码率下, 信息位的长度为 256 bit, 而同步位的总长度为 48 bit。这意味着在这种情况下, 大部分的发送帧被用于传输实际的信息数据。而在 1/10 和 1/20 的发送脉冲帧码率下, 信息位的长度减少到 214 bit, 同步位的总长度增加到 70 bit。这表明在较低的码率下, 为了确保信号的同步和稳定性, 需要更多的比特用于同步和相位基准位。

通过这种灵活的分配和调整, 系统能够根据不同的传输需求和条件, 优化数据传输的效率和可靠性。这种精细的控制和管理, 确保了在各种复杂环境下, 信息都能够被准确无误地传输和接收。



图 5 图像信息发送脉冲帧结构

分包处理完毕后, 首先发送同步位跳数据, 为满足抗干扰要求, 同步位跳在规定带宽内的 3 个频点上各跳 4 次, 共计 12 跳, 之后再行数据跳发送。

同步位跳包含时间同步 (TOD, time of day) 信息、节点信息、优先级信息、跳频规则信息、跳时规则信息、数据量信息、数据速率信息与 CRC 校验。信息位跳仅包含有效数据。

3 硬件设计

3.1 硬件组成

图像发射装置硬件包括图像处理模块、发射模块和电源模块三部分。其实现框图如图 6 所示。

3.2 图像处理模块设计

图像处理模块硬件电路采用以 FPGA 芯片为核心, 外围器件包括 DA、FLASH、DDR、模拟采集等芯片的结构^[5]。基带信号处理 FPGA 芯片选用 XILINX 公司的 XC7K410T; 系统控制 FPGA 芯片负责图像解压缩、接口处理等工作, 选用的 XILINX 公司的 XC7K325T; DAC 芯片实现图像视频信号的数模转换, 选用的是 AD 公司的

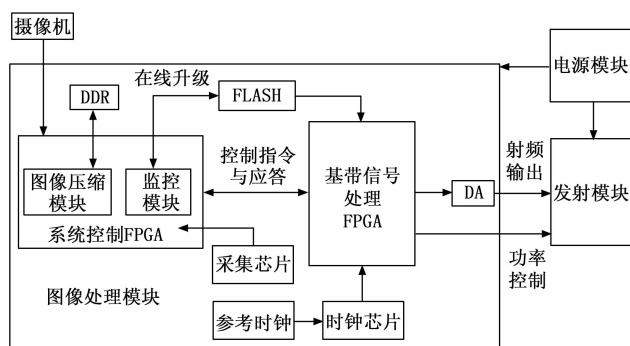


图 6 图像发射装置硬件实现框图

AD9739, 14 bits 分辨率, 最高转换速率 2 500 Msps, 利用 AD9739 实现直接由数字信号转换为射频信号, 减少了上变频的环节, 可以输出 DC-3 GHz 频带范围内的射频信号; FLASH 用于程序文件存储; DDR 用于视频数据的帧缓存; 时钟芯片负责为核心器件提供时钟; 采集芯片负责对收发模块输出的放大模拟电压和温度指示进行遥测采集, 电压范围为 0~5 V, 采样频率为 1 kHz; 接口处理与其他模块的硬件接口的电平转换及数据交互, 其中内部接口直接在系统控制 FPGA 内部完成^[6]; 发射模块采用频分多址方式, 发射信号采用脉冲形式发射, 完成图像射频信号的放大、滤波、放大输出^[7]。

3.3 发射模块设计

发射模块采用频分多址方式, 发射信号采用脉冲形式发射。

发射模块工作有两种模式: 大功率状态和小功率状态。武器系统投放后发射模块工作在大功率状态, 此时发射通道输出大功率; 小功率状态在产品测试联试时使用, 此时, 发射通道输出小功率^[8]。

发射模块实现完成图像处理模块输出信号的放大、滤波、放大输出。工作模式切换由图像处理模块发送指令控制。发射模块功能框图如图 7 所示。

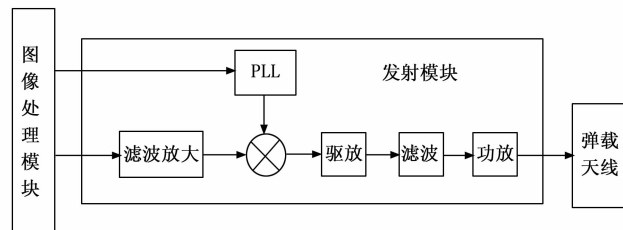


图 7 发射模块功能框图

3.4 电源模块设计

电源模块为图像处理模块和发射模块提供二次电源, 并提供二次电源的工作电流遥测。实现将 28 V 电源隔离变换输出 +5 V、+28 V 电源, 具有浪涌抑制、输出电流遥测、输入输出过压、过流保护等功能。

电源模块主要由输入 EMI 滤波电路、浪涌抑制电路、两组 DC-DC 变换模块、遥测采样单元、输出滤波单元组成^[9]。

为降低电源输出噪声干扰及电磁兼容性符合设计要求，对电源模块的滤波电路加严设计，输入采用共模滤波电路、差模滤波电路。电源入口设计有 TVS 瞬态抑制二极管及 MOV 压敏电阻，可吸收输入电源线上产生尖峰干扰及电压尖峰浪涌。

电压浪涌抑制需将 36 V 以上的浪涌电压降压处理到 36 V 左右，保护后续变换电路正常工作。设计采用宽范围降压电路来实现，原理如图 8 所示，该控制芯片工作电压范围 4~140 V，工作频率 50~900 kHz，浪涌电路输出电压为 36 V，开关 MOSFET 选择 100 V 以上耐压，电容耐压大于 100 V。保证了输入过压浪涌 80 V 时电源能正常工作，该电路输出设置电压为 36 V，当输入低于设定电压，Q1 导通、Q2 截止，输出电压低于输入电压大约 0.1 V (Q1、L1 导通电阻损耗) 送出；当输入超出设定电压时，输出稳压 36 V。该电路工作电压范围宽，过压、过流保护功能齐全，能够满足设计输入要求。

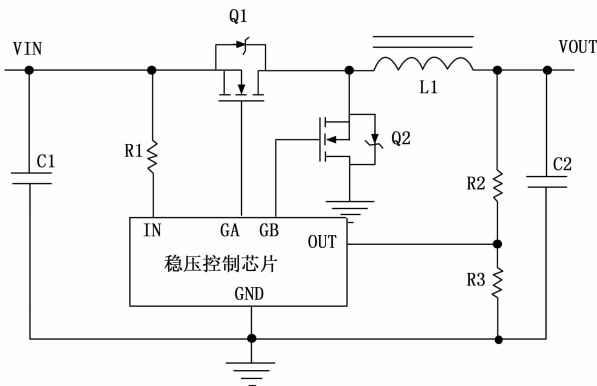


图 8 防浪涌电路原理图

DC/DC 变换电路采用级联式推挽变换结构。由降压调节级与推挽隔离级组成，降压级将输入电压降至输入最低电压以下，减小了后续 MOSFET 的电压应力，推挽级功率 MOSFET 电压应力为输入降压后电压的两倍，占空比达 50%，开关管尖峰干扰较小，相比普通推挽电路电压应力低，损耗小；同时变压器二次侧整流管电压应力低，可省去大电流输出滤波电感，简化了设计工作难度，适用大功率、大电流输出设计，输出采用同步整流电路，降低整流管导通损耗，提升电源整体效率。

4 软件实现

4.1 软件功能

软件框架主要包括信源编码以减少信息冗余度，信

道编码提高抗干扰能力以及数字调制，还包括遥测采集功能等其他辅助功能。

具体功能有：完成输入图像信息的预处理、压缩、通过 SPI 总线输出；完成图像信号的组帧、编码、调制、跳频等处理，经 DAC 后输出 1 路送给发射模块；完成与武器系统其他部件的数据交互；完成与发射模块及电源模块的遥测及遥测数据交互。

图像发射装置上电后，进入正常工作流程，进行自检，主动上报自检结果，包含各类状态与当前工作模式等信息，当收到武器系统综控机发来的信息后，按照回传协议进行图像传输。

4.2 信源编码

信源编码采用基于 FPGA 的 H.264 编码方案，H.264 编码 IP 特性为：输入视频最大分辨率为 1 920×1 080p@30 fps；Main profile, 4.1；视频格式为 4:2:0，色深为 8 bit；逐行视频输入；帧内预处理采用 I4×4 和 I16×16 两种宏块模式；帧内预处理采用 PSKIP 方式；通过 SATD 来得到帧内 cost 值；熵编码为 cabac；码流控制为 CBR（固定码流）；码流大小 400 kbps~20 Mbps；压缩数据码流为 RBSP 类型；AUD（access unit delimiter）访问单元分隔符；单芯片工作模式，不需要外部 CPU 和相应软件请求，上电即工作。

信源编码器接收到 YUV 4:2:0 格式的视频信号，通过 capture 模组将输入视频转换成宏模块（macroblock），同时编码器将其转换成 H.264 NAL 流。

其编码器包括帧内预处理（Intra Predictors），离散余弦变换（DCT/Quant Transformers），熵编码，码流控制器，RBSP 生成器，码流生成器和数据缓存模块，以上模块都是通过 VHDL 来实现。该编码器不需要外部 CPU/DSP 或相关软件来控制，能上电就工作。

编码器接口设计如下：控制信号为时钟信号，复位和使能；编码参数设置接口可以通过外部信号来控制输出码流等；视频输入接口为数字视频输入接口，可以根据需求进行配置；FPGA 芯片选择接口可选 Xilinx 等相关 FPGA 平台；压缩视频流输出接口为 H.264 NAL 流输出；错误信息接口从输入到输出、编码全程监控，方便故障排查。

4.3 信道编码

为增强通信过程中图像链路的抗干扰性能，图像发射装置信道编码使用 Turbo 码，亦称为并行级联卷积码，Turbo 码的卓越纠错性能将确保图像传输在遭受部分频带干扰时的正常运作^[10]。Turbo 码结合交织器技术，实现了从短码到长码的转换，并采用高效的软输入、软输出迭代译码算法，接近最大似然译码性能。它在各种信道中表现出色，特别是在较长的分组长度下，传输效率可接近香农极限。译码复杂度仅与迭代次数和

分量译码器的计算复杂度有关, 不受码长影响^[11]。

Turbo 码编码器的设计原理是通过将两个反馈式系统卷积码编码器并行连接, 并在这两个编码器之间插入一个随机交织器来实现的。这种结构使得编码器能够生成具有高度纠错能力的码字。在编码过程中, 原始数据首先被送入第一个系统卷积码编码器, 然后经过一个随机交织器, 再送入第二个系统卷积码编码器。这两个编码器分别生成各自的校验位。最后, 这些校验位经过删截处理, 以生成具有不同码率的码字。这种删截处理是为了适应不同的传输需求, 从而在保持较高纠错性能的同时, 调整码字的冗余度。通过这种方式, Turbo 码能够在较低的信噪比条件下, 依然保持较高的传输可靠性, 这使得它在无线通信等领域得到了广泛的应用^[12]。

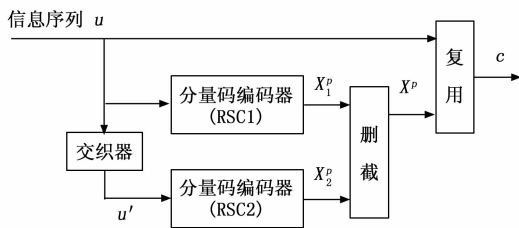


图 9 Turbo 码编码器的结构示意图

图 9 展示了 Turbo 码编码器的基本结构。信息序列 u_k 经过交织器处理生成 u'_k , 然后分别输入两个相同的分量编码器 RSC1 和 RSC2^[13], 产生编码序列 $x_{k,1}^p$ 和 $x_{k,2}^p$ 。通过周期性删截技术处理这两个序列, 得到校验序列 x_k^p 。复用调制后, x_k^p 与原始序列 x_k^s 结合生成码率为 $1/n$ 的 Turbo 编码序列 c ^[14]。研究了不同编码码率 (1/2、1/3、1/6、1/10) 对 Turbo 码性能的影响, 并在低 SNR 下进行了仿真。仿真采用随机交织, 1 000 bit 编码帧长度, 4 次迭代译码 (Log-MAP 算法), 结果见图 10^[15]。

仿真结果表明, 在信噪比低于 -4 dB 的条件下, 4 种不同码率的误码性能表现出相似性, 且误码率相对较高。当信噪比超过 -4 dB 时, 误码率曲线呈现出明显的转折点, 误码率随之显著降低。在 4 种不同码率的性能对比中, 可以观察到随着码率的降低, 误码率性能呈现出逐渐改善的趋势。在确保误码率保持在 10^{-4} 的前提下, 1/2 码率、1/3 码率、1/6 码率以及 1/10 码率的系统在正常运行状态下所需的最小信噪比分别为 -0.37 dB、 -2.13 dB、 -2.68 dB 和 -2.81 dB。在 1/2 的码率条件下, 性能表现最差, 且随着信噪比的增加, 与其他码率的误码性能差距逐渐扩大。其次, 1/3 码率的性能相对较差, 但与 1/6 码率和 1/10 码率的性能差距并不明显。在 1/6 与 1/10 的编码率条件下, 误码率曲线几乎重叠, 性能表现相近。换言之, 当编码率达到 1/6 时, 通过减少编码率以增加冗余信息, 对误码率性

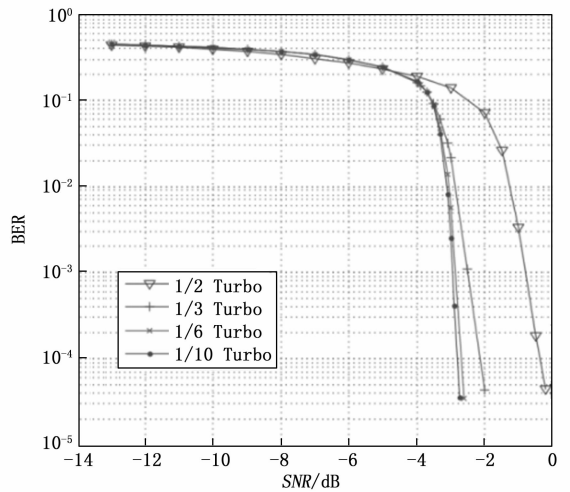


图 10 信息编码各码率下误码率仿真图

能的提升幅度是有限的。因此, 采用 1/6 Turbo 码。

分析循环迭代次数对 Turbo 码误码率性能的作用。通过随机交织方式, 设定编码帧长度为 1 000 比特, 并选定传输码率为 1/3, 本研究对 Log-MAP 算法进行了 1 至 8 次迭代的误码率仿真分析。仿真结果如图 11 所示, 图中展示了 1 次、2 次、3 次、4 次、7 次、8 次迭代的六条性能曲线。

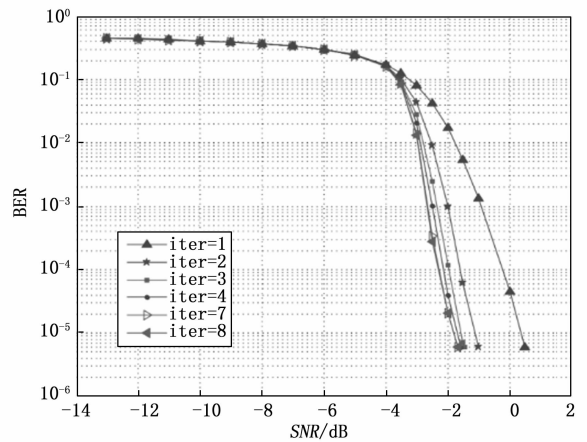


图 11 迭代次数不同时误码率仿真图

从图 11 的结果来看, 当信噪比降至 -4 dB 以下时, 不同迭代次数对应的误码率性能趋于一致, 且均呈现出较高的误码率水平。在信噪比超过 -4 dB 的条件下, 曲线呈现出急剧下降的趋势。随着迭代次数的增加, 下降速率进一步加快, 误码率相应地降低。当迭代次数少于两次时, 性能表现欠佳, 且与高迭代次数的性能差异显著。在迭代次数超过 4 次后, 各曲线的误码性能趋于一致。特别是当迭代次数达到 7 次以上时, 误码率曲线显示出明显的收敛趋势。此时, 译码器间信息交换对性能的提升作用变得微乎其微, 即增加分量译码器间外部信息的交换已不再能显著提高性能。

综上,译码选择 4 次迭代。

4.4 跳频调制

在跳频通信系统中,由于信号受到传输时延及多普勒效应等多方面影响,在接收端造成了码元相位和载波频率两方面的不确定性,为了保证通信正常,收发两端必须在同一时间同步跳转到同一频率,从而保证跳频图案同步。该过程要求收发两端具备一致的跳频码序列、相同的频率集以及精确的时钟同步信号。频率的不确定性可通过预先约定的跳频码序列及频率集来解决,而时间上的不确定性则需依赖同步系统予以消除。本系统跳频同步方法拟采用外同步和主从同步方式。

采用北斗高精度、高稳定度系统作为外同步时间基准,时间码与秒脉冲信号以 1 秒为周期进行传输。北斗接收机解调出时间码后,仅提取秒信号,并在秒信号的整秒时刻产生一个秒脉冲信号^[16]。时间码包含年、月、日、时、分、秒信息,每秒输出一次。鉴于接收机及终端设备的处理时延,北斗接收机当前解算的时间需延后 1 秒,以便在解算时刻的下一秒输出。秒脉冲信号的上升沿时刻被用作校准本信道设备时间的参考点。详见图 12。

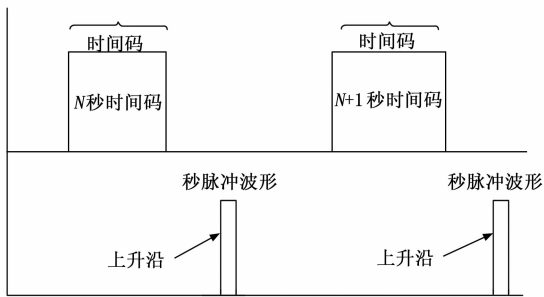


图 12 各终端设备授时示意图

主从同步方式是在将机载平台的时间作为基准,当武器系统工作后,机载终端通过指令链路发送带 TOD 的同步信息帧,武器终端接收带 TOD 的同步信息帧,实现武器终端与机载终端时间同步。然后,武器终端通过图像链路发送带 TOD 的同步信息帧给机载终端,从而实现与武器终端时间精确同步。完成精确同步以后,转入同步保持状态,进入同步保持与跟踪状态。

跳频同步的核心任务在于确保收发双方在每次频率跳变时能够精确地对齐,从而消除时间和频率上的二维不确定性。这一过程的关键在于,尽管收发双方使用相同的跳频和跳时图案算法以及相同的频率表,但他们之间存在一个关键变量,即时间戳(TOD)。时间戳(TOD)会随着时间的推移而不断变化。因此,为了实现跳频图案的同步,必须确保收发双方的时间戳(TOD)完全一致。只有当收发双方的时间戳(TOD)完全匹配时,才能确保他们在每次频率跳变时能够精确

对齐,从而实现有效的跳频同步。这种同步机制是确保通信系统稳定和可靠的关键因素之一^[17]。

跳频捕获设计对技术实用性有直接影响,需关注其可靠性和抗干扰能力。

为增强传输的可靠性,采用不同的频率对同步信息进行重复传送(跳频同步跳)。多频重传同步信息的方法,能够提升初始同步阶段的抗干扰性能,但此做法同时会导致初始同步所需时间的增长,反映了在提升抗干扰性能与延长同步时间之间存在的对立性。经综合分析,决定由 3 个频率构成同步频率,只要 3 个频率中的任一频率未受到干扰,即可实现跳频同步^[18]。

3 个同步频率按 F_0 、 F_1 、 F_2 编号次序,依次跳变发送同步信息。上述同步频率构成了跳频频率表中的元素集,跳频同步跳按同步频率重复发送 4 次,共 $3 \times 4 = 12$ 跳。

从站处于搜索状态时,以 $1/4$ 的跳速依次在当前的 3 个同步频率 F_0 、 F_1 、 F_2 上循环扫描。

接收机以本地已知的频率字 F_0 、 F_1 、 F_2 控制频率合成器以 $1/4$ 的跳速进行扫频,同时对跳频前导头符号进行滑动相关。

捕获到跳频前导头,完成跳频同步后,继续用该频率扫描,对该跳之后的有效数据进行解调、CRC 校验,并提取 TOD 信息;若校验正确且 turbo 译码没有出错,则跳频捕获完成;反之,重新搜索。依据同步信息的校验结果的正确性,即可以提取得到本跳处的 TOD,同时修正本地的 TOD,完成授时^[19]。

同步捕获过程是通过解析跳频前导序列中的 $24/35$ 个符号的伪随机码序列来实现的,在进行信号搜索时,无论是否存在有效信号或频率跳变扫描是否同步,均需对所接收信号执行高斯最小频移键控(GMSK)解调,并将解调后的数据与同步头进行相关性匹配,在接收到噪声信号或未能扫描到指定频率的情况下,相关峰的值会显著减小,唯有在接收到同步头信号,并且确保频率扫描正确、位对准无误(即最佳采样点精确对齐)的条件下,相关峰方能超越门限值,从而实现同步捕获。

根据系统信号波形设计,在一跳内有 336 个符号,其中 $24/35$ 个符号为已知的换频及跳频同步头数据,由于本系统采用 DUC 和 DDC 在 FPGA 内通过软件实现跳频,换频时间很快,约为一个采样周期,即 12.5 ns。

滑动相关时,滑动的的时间间隔也为 $T_c/4$ 。在频偏上,由于最大频偏(20 kHz)在最大 35 个符号内产生的相位旋转量仅有 0.0875π ,则相关后有用信号功率变小的因子为 0.999 36,约 0.003 dB,功率损失非常小,对于捕获影响不大,因此相关时不需要考虑频偏。

跳频捕获完成后,还需要进行跟踪。跳频跟踪与符号同步跟踪一起进行,因为只要完成了每个符号的跟

踪, 即可完成时间的精确的跟踪, 也可以完成起跳时刻的精确跟踪。

5 图像清晰度及实时性分析

5.1 图像抗干扰能力分析

对于单音干扰, 由于跳频系统的跳速足够快, 每一跳传输的信息量有限, 此信息即使丢失造成误码, 通过解跳后的纠错, 也能够还原出正确的图像, 单音干扰不会造成系统传输画面质量的损失。

对于多音干扰, 由于系统采用深度为 10 的交织, 超过 10 000 跳/秒的跳速, 系统可以纠连续 3 跳错误。对于少数量的多音干扰, 连续 3 跳都与干扰频谱碰撞的概率几乎为 0, 因此, 少数量的多音干扰也不会造成系统传输画面质量的损失。

对于窄带和部分频带干扰甚至巨大数量多音干扰时, 图像信息总的坏帧率为 B_j/B_s (并非还原后图像的坏帧率), B_j 为干扰信号带宽, B_s 为扩频信号带宽。只要没有连续的 3 跳都落在干扰信号带宽内, 跳频系统仍可以将误码纠正过来。由于窄带干扰和部分频带干扰信号并没有全部占据图像传输系统的射频带宽 (跳频带宽), 因此, 当图像被窄带或部分频带干扰信号干扰后, 可以通过缩小或转移图像传输系统的跳频带宽, 选择在没有干扰的频带内传输信息, 有效地解决被干扰问题^[20]。

对于全频段干扰, 如果要对跳频的整个频段进行连续波干扰, 要求干扰机功率足够大。对于此类干扰, 图像传输系统 (跳频带宽 160MHz) 的抗干扰能力可以通过干扰容限的计算公式进行计算。按公式 (1) 计算出跳频图像传输系统的干扰容限为 11 dB。

$$M_j = G_p - [L_{sys} + (S/N)_{out} + L_{other}] \quad (1)$$

其中: M_j 为干扰容限, G_p 为系统增益 23 dB, L_{sys} 为系统损耗 3 dB, $(S/N)_{out}$ 为输出信噪比 8 dB, L_{other} 为其他损耗 1 dB。

5.2 图像清晰度分析

图像压缩/解压缩算法综合考虑了图像清晰度、信源数据率、无线信道抗误码等特点, 该复合算法对应的峰值信噪比 PSNR 见表 2^[21]。

表 2 图像压缩效果对比表

方案	信源数据量 (Mb/s)	信道传输数据率 (Mb/s)	压缩比	帧频 (帧/s)	PSNR
1	10.1 376 (352×288×8×12.5)	0.512	19.8	12.5	31.8
2	20.2 752 (352×288×8×25)	0.512	39.6	25	29
3	5.0 688 (352×288×8×6.25)	0.256	19.8	6.25	31.8

图 13 是一幅原始图像, 当图像数据压缩比为 19.8 时, 峰值信噪比 $PSNR \geq 31.8$, 还原结果见图 14; 当图像数据压缩比为 39.6 时, 峰值信噪比 $PSNR \geq 29$, 还原结果见图 15。



图 13 原图像



图 14 恢复图像



图 15 恢复图像

由图 14 和图 15 可知: 图像压缩比不同时对应的图像清晰度是不同的, 工程应用中可根据要强调的目标进行取舍。综合考虑信息处理延时和清晰度等因素, 取图像压缩比为 39.6 的方案 2。

5.3 图像实时性分析

数字图像传输系统 A/D 变换、信道编码、调制、传输、信道译码、解调、D/A 变换等延时很小, 图像在数字化—传输—还原环节中, 耗用时间最多的是信源编码和信源译码, 即图像的压缩和解压缩。图像的压缩/解压缩算法很多, 可以分为基于静止图像的压缩算法和基于动态图像的压缩算法这两大类。由于武器飞行速度不高的特性, 采用基于动态图像的 H.264 压缩算法, 视频帧频 25 帧/秒, 进行实物仿真, 图像压缩/解压缩延时测试结果为: 压缩帧等待时间 40 ms, 图像压缩耗时 13.5 ms, 载波捕获耗时 0.5 ms, 解压缩帧等待时间 40 ms, 解压缩处理耗时 6.5 ms, 图像压缩/传输/解压缩延时 100.5 ms, 因此, 数字图像传输系统总延时完全可以控制在 200 ms 以内。

6 结束语

本文针对模拟体制图像发射装置性能存在的不足, 根据实际应用需求, 通过对图像发射装置数字化设计进行研究, 开发了图像信号处理方案, 实现了基于 FPGA 控制的视频发射, 经实验验证, 各项功能都正常实现, 相比原体制, 主要技术指标得到了提升, 在系统抗干扰方面, 通过仿真得出最优 Turbo 码率, 并提出了一种跳频同步算法, 为视频无线传输领域的工程应用提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] 赖敏琪, 朱城香, 温振宇, 等. 一种抗电场干扰短距离图传模块的设计 [J]. 电子设计工程, 2024, 32 (13): 185-189.
- [2] 常晓燕, 林宏伟. 扩频传输在图像传输系统中的应用 [N]. 科技创新导报, 2009 (19): 104.
- [3] 娄丽. 图像通信原理与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [4] 刘勇, 吴平. 一种新颖的图像传输系统抗干扰方案

- [J]. 空间电子技术, 2007 (2): 40-43.
- [5] 王海晏, 吕良飞. 使用小波变换的视频信号处理系统 [J]. 光电工程, 2001, 28 (5): 50-53.
- [6] 伯翰. 基于 CCSDS 的深空测控伪码同步技术与硬件实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [7] 孙楠, 张鹏, 孟园. 全景图像采集与高速传输系统设计 [J]. 研究与开发, 2023, 42 (7): 88-94.
- [8] 李原. 无线数据链通信系统硬件电路设计与实现 [D]. 北京: 北方工业大学, 2013.
- [9] 徐超. 视频图像无线传输技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [10] 杨鹏. 无线通信中 Turbo 编码与均衡技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [11] 刘铁凡. 针对 TTNT 的非协作式跳频 GMSK 信号检测 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [12] 叶睿. 多维 Turbo 码的分析和研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [13] 骆超, 史萍. 二进制与非二进制 Turbo 码性能研究 [J]. 中国传媒大学学报 (自然科学版), 2009: 25-29.
- [14] 柯德军. MARQ 系统中 RCPT 码的设计与应用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [15] 王兆伟, 王永达, 李秉权. Turbo 码应用于机载通信信道编码的研究 [J]. 移动通信, 2015: 55-59.
- [16] 张远利. 共址重叠多网跳频通信系统研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [17] 张扬石. 战术电台跳频控制模块的研究与设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [18] 张云飞, 焦素敏. 跳频通信系统同步算法的设计及 FPGA 实现 [J]. 电子制作, 2023 (21): 52-55.
- [19] 肖文奎, 张文学. 一种高隐蔽跳频同步算法 [J]. 电子技术与软件工程, 2022 (10): 9-13.
- [20] 潘勃, 冯金富, 陶茜, 等. 电视制导系统抗干扰性能评估 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37 (6): 68-76.
- [21] 王明伟, 韩宇, 张波, 等. 图像压缩算法发展概述 [J]. 空间电子技术, 2016 (2): 35-43.

(上接第 152 页)

- [11] 雷峰成, 程鹏, 邵云峰. 可配置高精度火工装置测试仪的设计与实现 [J]. 现代防御技术, 2017, 45 (3): 167-171.
- [12] 梁明, 吴建业. 导弹测试系统的屏蔽和接地抗干扰技术 [J]. 战术导弹技术, 2009, (3): 40-43.
- [13] 赖根, 肖明清, 夏锐, 等. 国外自动测试系统发展现状综述 [J]. 探测与控制学报, 2005, (3): 26-30.
- [14] 吴进华, 宋申民, 徐胜红. 一种便于扩展的飞航导弹测试系统 [J]. 战术导弹技术, 1998, (4): 56-60.
- [15] 马幼平. 镁铝合金加工技术及应用基础研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.

- [16] CUI H. Expert system for fault diagnose based on the test equipment for a missile [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental, Science, 2019, 242 (3): 032053 (5pp).
- [17] 邵金荣, 王瑞, 郭雨华. 一种新型导弹测试系统构建方法 [A]. 中国计算机用户协会仿真应用分会. 21 全国仿真技术学术会议论文集 [C] //西安现代控制技术研究所, 2021: 82-84.
- [18] 孙闯. 导弹便携通用测试系统硬件研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [19] 杨春辉. 基于网络的导弹一体化测试设备研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.