

# 基于光载波携能的制导武器无线携能通信研究

周明进<sup>1</sup>, 侯如非<sup>2</sup>, 陈 钊<sup>2</sup>, 张 帅<sup>2</sup>, 孟宇麟<sup>2</sup>, 丁立平<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 32381 部队, 北京 100072; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 制导武器和发射装置之间通常采用有线接触式数据通信和供电方式, 为了适应未来快速装填、抗饱和和攻击的需要, 应加强对无线携能通信方式的关注。当前无线携能通信广泛采用了基于无线耦合的数据传输技术, 但这在日益复杂的强电磁作战环境下易受干扰。针对强电磁环境下的可靠无线通信和传能需求, 提出了一种基于光载波携能的无线发射数据通信系统。该系统利用可见光、红外光不易受电磁波干扰的特点, 采用光载波调制、传输和解调技术, 实现了制导武器和发射装置之间的可靠无线携能通信, 弥补了传统无线携能通信在强电磁环境下易受干扰的不足, 可应用于强电磁环境下的无线发射场景。

**关键词:** 发射装置; 强电磁环境; 无线通信; 光载波; 数据通信系统

中图分类号: TJ 768.3 文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.02.008

## Research on Wireless Energy-Carrying Communication of Guided Weapons Based on Optical Carrier

ZHOU Mingjin<sup>1</sup>, HOU Rufeif<sup>2</sup>, CHEN Zhao<sup>2</sup>, ZHANG Shuai<sup>2</sup>, MENG Yulin<sup>2</sup>, DING Liping<sup>2</sup>

(1. Unit 32381 of the People's Liberation Army of China, Beijing 100072, China; 2. Shanghai Electromechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Wired-contact data communication and power supply are often used between guided weapons and launchers. In order to meet the needs of rapid loading and anti-saturation attack in the future, more attention should be paid to wireless energy-carrying communication. The data transmission technology based on wireless coupling is widely used in current wireless energy-carrying communication. However, in the increasingly complex and strong electromagnetic environment, this technology is susceptible to interference and thus fails. In order to overcome this deficiency, in this paper, a wireless energy-carrying communication system (WECS) based on optical carrier is proposed, which adopts the optical carrier modulation, transmission, and demodulation technology. The WECS utilizes the characteristics of visible light and infrared light to carry out reliable wireless communication and energy transmission in a strong electromagnetic environment, which can be effectively applied to the wireless launch scene of weapons.

**Key words:** launcher; strong electromagnetic environment; wireless communication; optical carrier; data communication system

## 0 引言

在传统制导武器发射控制技术中, 地面设备和制导武器通过电气连接机构进行接触式连接, 传输信号包括供电、通信、分立等, 电气连接机构在制导武器分离时通过轴向剪切或径向拔除等方式分

离<sup>[1]</sup>。随着现代化作战方式的不断发展, 小型化多功能弹药和超高速制导炮弹的不断出现<sup>[2]</sup>, 传统接插件式连接方案越来越难以满足武器装备自动化装填、高密度发射、无人智能化、多弹药一体化等需求<sup>[3-4]</sup>。无线携能通信技术综合运用无线通信技术

收稿日期: 2022-02-13; 修回日期: 2022-03-05

作者简介: 周明进(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为测试技术及仪器。

通信作者: 侯如非(1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为发控系统及整车电气。

和无线传电技术,取消了制导武器和发射装置之间的电气互联。电气链路具有耦合低、通用性强、高安全、高可靠、对接便捷等特点<sup>[5-6]</sup>,应用前景广泛,必要性愈发凸显。

随着实际作战电磁环境日益复杂,尤其当电流强磁干扰和电磁脉冲干扰的频谱较宽时,电磁等传统无线通信方式将被严重干扰<sup>[7]</sup>,从而对制导武器的无线发射控制产生不利影响。针对强电磁环境下的无线发射技术,需研制新型可靠的无线发射数据通信系统。光通信、光传能具有电气隔离、对电磁干扰天然免疫的能力<sup>[8-9]</sup>,是实现强电磁环境无线携能通信的优选技术途径。文献[10]针对机载环境设计了一种无线光通信设备,通过研制样机在模拟环境下验证了无线光通信的抗电磁干扰性和通信稳定性,但该设备需外部供电,无法满足携能通信的目的。文献[11]设计了基于环境光能量收集的低功耗传感器,通过高效的光照能量收集管理方案,可以维持该传感器的工作而无需外部供电,但该传感器依赖于蓝牙通信,同样存在被强电磁干扰的可能。如何合理地设计光路,实现光能传输和光通信的有效结合,对实现光携能通信具有重要意义。此外,考虑到光携能通信无外部供电,携能通信部分的电路要求实现自驱动工作,光传能的接收部分不仅要对外输出功率,还要维持通信链路的工作,受限于武器直径空间,通信系统的低功耗、自驱

动设计将成为难点。

本文针对强电磁环境下的无线发射技术,提出了一种基于光载波携能的无线发射数据通信系统。采用多波段和双光源方案,实现将可见光无线能量传输和红外通信技术的结合,且通信系统功耗低、可自驱动,可实现发射装置对制导武器的可靠无线数据通信,可有效应用于强电磁环境下的武器无线发射场景。

## 1 无线发射数据通信系统架构

无线发射数据通信系统中,设计合理光路实现光通信和光能传输的结合是重点。文献[12-14]对红外光通信技术进行了论述和验证,结果表明红外光通信具备协议简单、功耗低、适应性强的优点,可有效应用于光传能场景;文献[15-16]对光伏效应材料的特性展开了研究,结果表明,采用匹配光伏材料响应谱的多波段光,有益于获得最大能量匹配接收。为有效避免通信干扰并实现最大能量传输,无线发射数据通信系统采用基于红外光通信、多波段可见光传能的双光源方案,主要由发射端和接收端两部分组成,如图1所示。该方案通过独立的光通信系统、光源控制系统,将通信和传能的光在光谱上进行分离。与传统的电学上分离不同,该方案极大简化了接收端的内部结构,释放了受限的武器内部空间,便于实现发射端和接收端之间可靠的双向携能通信。

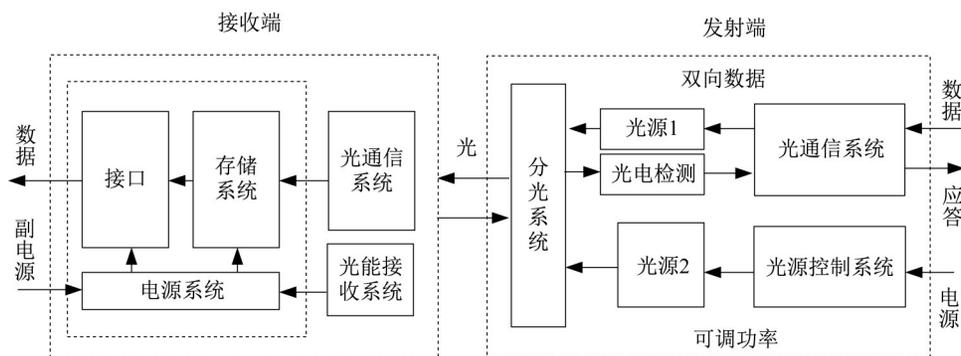


图1 通信系统架构

Fig. 1 Communication system architecture

在武器的无线发射过程中,该通信系统的工作逻辑可概括如下:1)发射端发送可见光束照射在接收端,接收端将其转化为电能,提供给光通信部分电路和数据存储系统;2)待接收端电源稳定后,在发射端的光源中混合1束红外光,通过脉冲编码方

式携带通信数据流,被接收端解码后进行存储;3)待接收端解码、校验和存储数据后,用剩余的电能向发射端回应1帧简短的红外脉冲编码信号,表示数据帧序号是否完整、正确;4)如果接收端正确解码、接收数据且校验成功,则将其保存在存储器

中,之后进入休眠状态,在以上过程中,武器接口和副电源均处于未上电状态;5) 武器被发射飞行约3 s后,其内部的电池被激活,通过副电源接口给模组通电,唤醒存储系统的处理器,读取存储器内保存的数据,并传回到武器的内部设备中。

### 1.1 双光路发射端

发射端采用双谱段光源,分别实现光传能和光通信,其电路方案如图2所示。发射端主要包括作为能量载体的可见光源、作为通信载体的红外光源、复合和滤光光路。通信和传能的光在光谱上进行分离,可以有效地防止自然状态下阳光对信息传输的干扰,在近距离条件下,该通信可靠性更高。此外,可采用滤光片消除环境光的工作波段,降低通信错误概率。

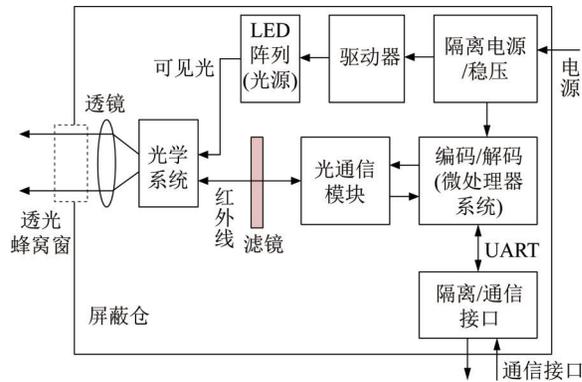


图2 发射端电路方案

Fig. 2 Transmitter circuit scheme

对于系统光能量传输,考虑到传输距离较近,发射端光源采用LED阵列配合透镜聚光。设LED发射光功率为 $P_1$ ,则有

$$P_1 = I_0 \int_{\Omega} R_1(\varphi) d\Omega \quad (1)$$

式中: $I_0$ 为LED中心辐射强度; $\varphi$ 为LED光束辐射角; $R_1(\varphi)$ 为相对辐射强度分布函数; $\Omega$ 为发光立体角,与最大光束半角 $\theta_{1/2}$ 有关, $d\Omega$ 用 $\sin \varphi d\varphi d\theta$ 表示。

$$P_1 = I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{1/2}} R_1(\varphi) \sin \varphi d\varphi d\theta = 2\pi I_0 \int_0^{\theta_{1/2}} R_1(\varphi) \sin \varphi d\varphi \quad (2)$$

由式(2)可得 $I_0$ 为

$$I_0 = \frac{P_1}{2\pi \int_0^{\theta_{1/2}} R_1(\varphi) \sin \varphi d\varphi} \quad (3)$$

则有辐射强度 $I_e(\varphi)$ 为

$$I_e(\varphi) = \frac{P_1}{2\pi \int_0^{\theta_{1/2}} R_1(\varphi) \sin \varphi d\varphi} R_1(\varphi) \quad (4)$$

当接收端有效感光面积 $S$ 满足 $S \ll L^2$ 时( $L$ 为光束传输距离),可得 $E_e(\varphi)$ 为

$$E_e(\varphi) \approx \frac{I_e(\varphi)}{L^2} = \frac{P_1}{2\pi L^2 \int_0^{\theta_{1/2}} R_1(\varphi) \sin \varphi d\varphi} R_1(\varphi) \quad (5)$$

则接受端光功率 $P_r$ 为

$$P_r = E_e(\varphi) S = \frac{P_1 S}{2\pi L^2 \int_0^{\theta_{1/2}} R_1(\varphi) \sin \varphi d\varphi} R_1(\varphi) \quad (6)$$

为使光能量集中,发射端采用非郎伯型LED,不适用于郎伯辐射定律。基于LED光子辐射机理,其相对辐射强度分布函数 $R_1(\varphi)$ 可使用高斯函数拟合<sup>[17]</sup>。发射端的光传能功率可基于式(6)针对接收端需求功率作相应调节。

针对LED波长选择,为提高接收端光-电转换效率,接收端的光伏电池板采用三结砷化镓材料,3个PN结为串联关系。从光谱能量匹配方面进行分析,在接收端表面3种波段的光强相同的情况下,更有利于达到最大能量匹配接收的目的。遵循最大能量匹配电池板响应谱的原则,选择3种波段可见光进行混合,以分别激发三结光伏电池板的3个PN结,实现最大能量匹配接收的目的。

对于光通信部分,系统采用红外光进行通信,一方面容易和串行数据进行逻辑转换;另一方面通过脉冲方式集中能量,具有较强的抗干扰能力。通信方案中,发射端和接收端均采用3/16脉冲编码,如图3所示,提供双向通信能力,采用IrDA推荐的基本编码可以达到115.2 kbit/s的速率。

### 1.2 低功耗接收端

为满足接收端体积小、功耗低的要求,接收端设计如图4所示,包含光伏电池板、红外双向通信部分和微处理器组合(存储、接口)。

通信系统无外部供电,光传能的接收部分不仅要对外输出功率,还需维持通信链路的工作。提高接收端光电转换效率,降低后端电路功耗尤为关键。接收端光伏板的工作状态可由“五参数模型”描述<sup>[18-19]</sup>:

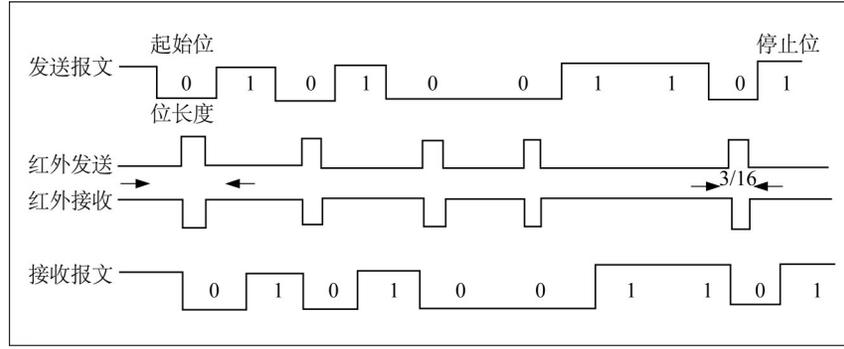


图 3 光通信编码方案

Fig. 3 Optical communication coding scheme

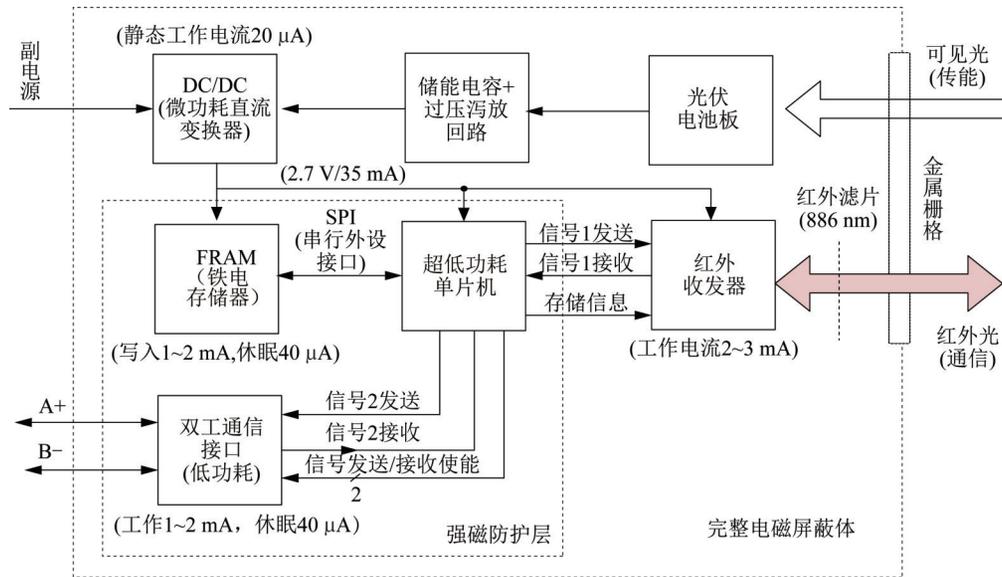


图 4 接收端电路设计方案

Fig. 4 Receiver circuit scheme

$$I = I_L - I_D \times \left( e^{\frac{U + IR_s}{\infty}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{SH}} \quad (7)$$

式中： $I$ 、 $U$ 分别为光伏板输出电流和输出电压； $I_L$ 、 $I_D$ 分别为光生电流和暗电流； $\infty$ 为理想参数因子； $R_{SH}$ 和 $R_s$ 分别为并联等效电阻和串联等效电阻。

由于除非光强较大时， $IR_s$ 一般远小于输出电压 $U$ ，上式可简化为

$$I = I_L - I_D \times \left( e^{\frac{U}{\infty}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{SH}} \quad (8)$$

因光生电流 $I_L$ 和光伏板接受光照强度有关，可以描述为

$$I_L = q \times \iint \varnothing(x, y) dx dy \quad (9)$$

式中： $q$ 为比例系数； $\varnothing(x, y)$ 为光伏板 $(x, y)$ 处所能接收到的有效光子数。考虑到发射端光源较为稳

定，接收端接受面积受限较小，光伏板上有效光子数近乎平均，式(9)可改写为

$$I_L = QS_0 E \quad (10)$$

式中： $S_0$ 为光伏板面积； $E$ 为光照强度； $Q$ 为常数系数。由式(2)可得光伏板输出功率 $P$ 为

$$P = UQS_0 E - I_D \times U \times \left( e^{\frac{U}{\infty}} - 1 \right) - \frac{UV^2}{R_{SH}} \quad (11)$$

式中： $V$ 为输出电压。对该式求偏导，可求得最大功率 $P_{max}$ 对应的输出电压 $V_0$ 。

光伏板后端的电路工作电压可和光照强度 $E$ 进行匹配设计，以获得最大的输出功率。

为节省功耗，接收端中的微处理器组合设计为休眠、光通信接收、光通信发射和接口通信4种工作模式：1) 休眠模式下，光源照射光伏电池板，整个电路正处于等待储能环节充电状态，所有芯片被强制

处于休眠状态,单片机处于低功耗状态;2) 光通信接收模式下,发射端向接收端通过光信号传输数据,储存器处于存储访问状态,红外收发器处于接收状态,单片机处于全速工作状态,接口芯片无需启动,处于休眠状态;3) 光通信发射模式下,接收端向发射端回馈正确应答信号,红外收发器切换为发射状态,其他元件的工作状态和接收状态相同,此时所需功率可能比光接收功率更大,所需能量可由储能电容放电提供;4) 接口通信模式中下,接收端由武器内电池供电,红外芯片无需启动,处于休眠状态,其他模块均需启动,单片机处于全速工作状态,储存器处于存储读取状态,接口芯片处于工作状态。

### 1.3 通信逻辑设计

系统光通信选用国际上通用的 X-Modem 协议<sup>[20]</sup>,协议规定每 1 帧数据由 1 字节帧头(Start of Header, SOH)、1 字节帧序号、1 字节帧序号补码、128 字节数据和 2 字节循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)校验值组成,协议中的校验重发机制可以保证通信的准确率。

为进一步防止外部干扰并降低功耗,设计基于双向应答和重传机制的低功耗通信逻辑,在保证通信可靠的同时减少接收端的能量损耗。在低功耗通信逻辑下,接收端状态转移关系如图 5 所示。当发射端开始提供光能一定时间  $T_c$ (储能电容电量充满时间)后,启动接收端系统,从休眠模式进入光通信发射模式,向发射端发送通信开启字符以开启通信。发送完通信开启字符后,接收端进入休眠模式,如接收端在  $T_c$  内未收到发射端发送的数据帧,则接收端会再次进入光通信发射模式,发送通信开启字符重新开启通信;如接收端在  $T_c$  内收到了发送

端发送的数据帧,则接收端会转换至光通信接收模式。当接收端收到 1 个字节后的等待时间  $T_w$  内未收到新的字节,则认为该字节为该数据帧的帧尾,此时接收端进入到接受好的状态,各个芯片的工作模式和接收中状态相同,接着进行数据的校验。校验结束后,接收端将变为光通信发射模式,向发射端回复确认字符(Acknowledge Character, ACK)确认数据正确或是回复否定应答(Negative Acknowledgment, NAK)要求重发数据。发送之后,接收系统将进入休眠模式,等待新的数据或者重发的数据。在此状态转移图下,接收端在数据通信过程中,绝大部分时间处于休眠模式,大幅减少了接收端的总体功耗。

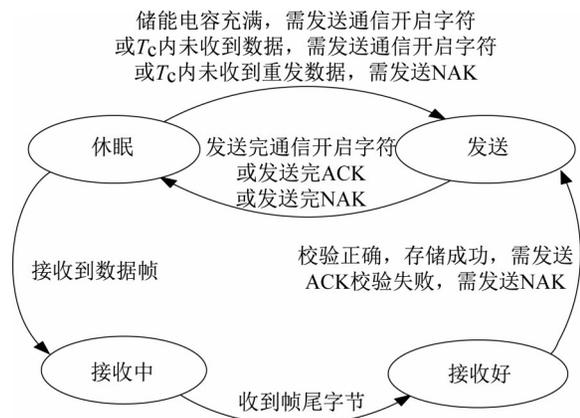


图 5 低功耗通信状态转移

Fig. 5 Low-power communication state transition diagram

## 2 试验验证

### 2.1 试验系统设计

为验证提出的强电磁环境无线发射数据通信系统的可靠性和有效性,设计实验测试系统如图 6 所示。

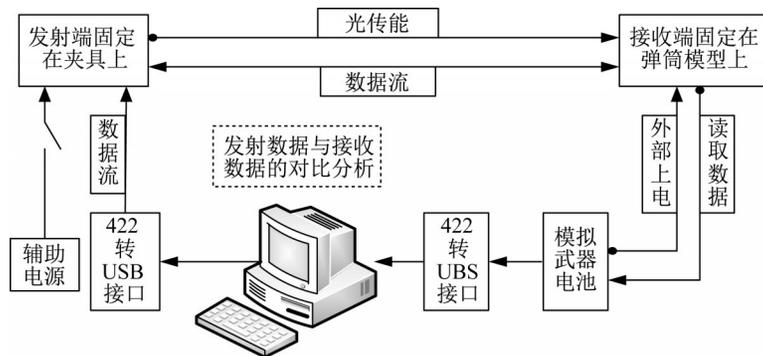


图 6 测试系统原理

Fig. 6 Schematic diagram of the test system

在夹具和武器模型上实现发射端和接收端的安装固定,整体安装在光学滑轨上,以便调节和测试收、发距离;用辅助电源给发射端供电,用模拟武器电池给接收端供电,计算机和发射端、接收端模块通过 RS-422 转 USB 接口实现数据流的传输。搭建试验平台如图 7 所示。

### 2.2 通信速率及误码率测试

将发射端和接收端分别通过 RS-422 转 USB 接口和上位机端相连,设置发射端和上位机的通信速率为 115 200 bit/s,接收端和发射端的通信速率为 115 200 bit/s,接收端和 PC 的通信速率为 614 400 bit/s。辅助电源对发射端上电 28 V,通过发射端依次发送 10 次 4 kbit 数据给接收端(以 128 字节

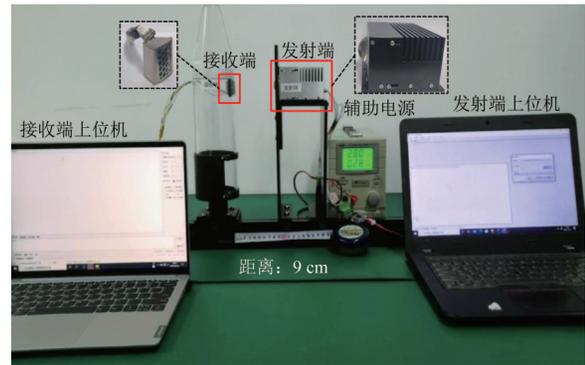
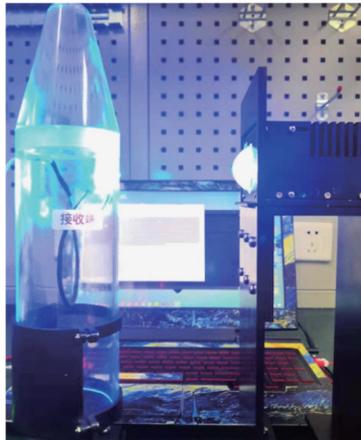


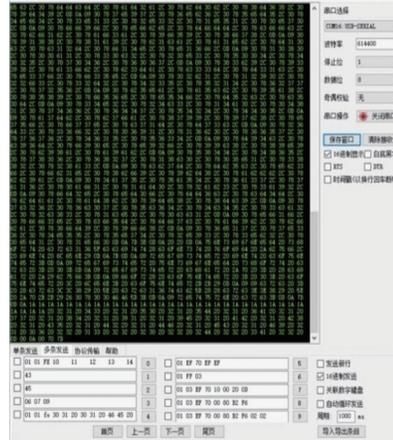
图 7 试验平台

Fig. 7 Experiment platform

为 1 帧,共 32 帧),接收端依次接收并存储。对发射端进行断电,模拟制导武器系统内部对接收端上电 5 V。通过上位机读取并保存数据,如图 8 所示。



(a) 通信场景



(b) 通信速率及误码率测试

图 8 通信速率及误码率测试过程

Fig. 8 Test processes of communication rate and bit error rate

整个过程,通信启动延迟约 160 ms,采用 Matlab 比对功能对收、发数据进行验证,数据误码率  $< 10^{-6}$ ,可见系统可实现可靠数据通信,如图 9 所示。

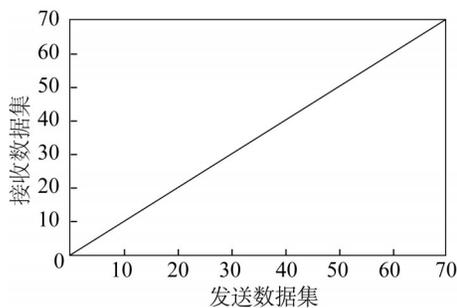


图 9 误码率分析结果

Fig. 9 Results of the bit error rate analysis

### 2.3 接收端功耗测试

#### 2.3.1 试验方法

1) 测试接收端的初始状态和接收状态:正常启动接收端,将电流表接入光通信链路,一端接储能电容,另一端接电源芯片的输入引脚,测试接收端初始状态和接收状态的电流。

2) 测试接收端的发射状态:在储能电容和电源芯片之间串联 1 Ω 电阻,将电阻的前后两端分别接示波器探头 1 和 2,正常启动接收端,测出电压的差值,计算其电流即为接收端的发射状态的电流。

#### 2.3.2 试验结果

按上述接线方法分别测量并计算接收端在初始、接收和发射状态下的电流变化,如图 10 所示。

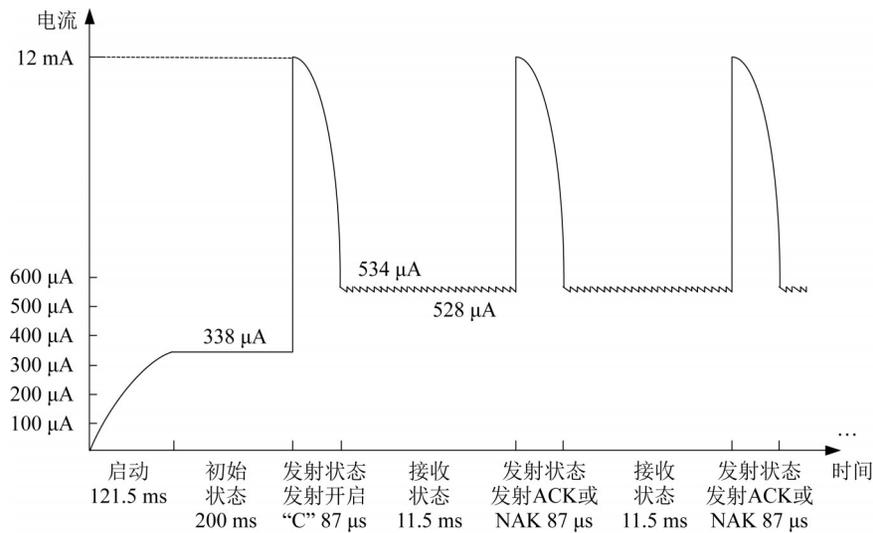


图 10 接收端不同工作状态下的电流变化

Fig. 10 Current changes of the receiver under different working conditions

各个过程的功耗计算见表 1。

表 1 接收端功耗测试结果

Tab.1 Test results of the power consumption of the receiver

状态	电流及功耗实际值
初始状态	338 $\mu$ A, 1.69 mW
接收状态	534~528 $\mu$ A, 2.65 mW
发射状态	12 mA, 60.00 mW

此时,发射端 3 种型号 LED 经计算分别消耗电能约为 7.08、3.60 和 1.80 W,即 LED 阵列总功率为 12.48 W。设 LED 电能转化为光能的效率为 40%,光学效率系数为 80%,凸透镜透光率为 95%,则从发射端窗口出去的光能为 3.80 W。按照光斑 40 mm 圆孔,能够覆盖整个接收端,接收端表面光强约为 0.3 W/cm<sup>2</sup>,此时接收端可获得超过 100 mW 的功率,满足表 1 中的功耗需求,证明通信系统功耗低、可自驱动。

### 3 结束语

为应对愈发复杂的作战电磁环境,提出了一种基于光载波携能的无线发射数据通信系统,其采用多波段、双光源方案,主要包括双光路发射端和低功耗接收端。通过试验测试表明,提出的无线发射数据通信系统,可有效结合可见光无线能量传输技术和红外通信技术,实现可靠的携能通信,且通信系统功耗低、可自驱动,能有效应用于强电磁环境下的制导武器无线发射场景。

### 参考文献

- [ 1 ] 王登,高跃飞,刘洋,等.一种长行程大负载链式输弹机设计[J].机械传动,2019,43(7):161-167.
- [ 2 ] 马晓平,廖欣,陈兵.电磁发射超高速制导炮弹国内外研究现状综述[J].空天防御,2021,4(2):87-92.
- [ 3 ] 唐文献,杨珺柳.李佳圣,等.柔索并联式导弹自动抓取装置动力学仿真[J].上海航天,2020,37(1):44-50.
- [ 4 ] 李家泰,罗文杰,陈志,等.便携式防空导弹发展现状与未来展望[J].上海航天,2017,34(增刊1):7-15.
- [ 5 ] 薛明,杨庆新,章鹏程,等.无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J].电工技术学报,2021,36(8):1547-1568.
- [ 6 ] 郭晶,卢锦.无线通信系统中无线携能通信技术的性能研究[J].陕西科技大学学报,2017,35(3):176-179,190.
- [ 7 ] 聂彬彬,聂丹凤.磁耦合谐振式无线电能传输方法研究[J].微处理机,2021,42(3):61-64.
- [ 8 ] 侯亮,谷博.无线光通信关键技术分析[J].中国新通信,2020,22(13):25.
- [ 9 ] 王惠琴,马玉昆,蔡红亮,等.无线激光数据通信系统收发电路的设计与实现[J].兰州理工大学学报,2021,47(3):91-96.
- [ 10 ] 覃智祥,安建欣,李树德,等.机载无线光通信设备设计及试验验证[J].中国电子科学研究院学报,2016,11(2):169-172.
- [ 11 ] 陈鹏展,祝振敏.基于环境光能量收集的低功耗蓝牙传感器[J].仪表技术与传感器,2014,1(2):4-7,10.
- [ 12 ] 潘佳琪,高韵淇,黄膺达,等.红外光通信装置设计[J].科技创新与应用,2020,1(9):60-62.

(下转第 65 页)