

# 近地层直视与非直视紫外光通信系统关键技术研究

吕照顺<sup>1,2</sup>, 吴晗平<sup>1,2</sup>, 梁宝雯<sup>2</sup>, 袁璐<sup>3</sup>

(1.海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033; 2.武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205;

3.株洲南车时代电气股份有限公司技术中心, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 针对当前紫外光通信中存在的问题和不足, 分析了紫外光通信系统基本组成原理和特点, 探讨了紫外大气传输特性、直视与非直视紫外通信距离方程理论、调制与解调、高性能紫外探测器、紫外光信号检测、紫外光学材料及系统等主要关键技术, 并研究了国内外发展现状, 提出了未来紫外光通信研究方向。

**关键词:** 近地层; 直视紫外光; 非直视紫外光; 紫外光通信

**中图分类号:** TN929.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-8891(2014)09-0688-07

## Research on Key Technology of the Near Ground Line-sight and Non-line-sight Ultraviolet Communication System

LYU Zhao-shun<sup>1,2</sup>, WU Han-ping<sup>1,2</sup>, LIANG Bao-wen<sup>2</sup>, YUAN Lu<sup>3</sup>

(1.Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2.Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

3.Technical centre, Zhuzhou CSR times electric Co.LTD, Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** Aiming at problems and deficiencies in the ultraviolet communication, the paper analyzed the basic principles and characteristics of ultraviolet communication system, discussed the characteristics of UV atmospheric transmission, theory of line-sight and non-line-sight communication distance equation, modulation and demodulation, high performance UV detector, ultraviolet signal detection, ultraviolet optical materials and systems, etc. It also researched the progress of UV communication at home and abroad, came up with the future research direction of ultraviolet communication.

**Key words:** near ground, line-sight ultraviolet, non-line-sight ultraviolet, ultraviolet communication

## 0 引言

无线光通信中, 以非紫外光作为载波进行的通信方式, 需要直视对准才能实现。紫外光通信是采用波长位于 200~280 nm 的紫外光作为载波, 既可以实现直视通信 (line-of-sight, 简称 LOS), 也可以实现非直视通信 (non-line-of-sight, 简称 NLOS)。紫外光通信克服了其它通信方式中的带宽不足、不灵活、不方便、可靠性差的缺点, 可以有效解决通信中宽带接入“最后一公里”问题, 也可以被广泛应用于战场通信, 空气探测等诸多军民领域<sup>[1-2]</sup>。目前, 国内外对这一领域进行了诸多探索性研究, 其中美国的研究成果较为领先, 其他国家还处于摸索阶段。

## 1 系统基本组成原理和特点

### 1.1 系统基本组成原理

紫外光通信系统是以日盲区的紫外光谱为载波, 在发射端将信息电信号调制加载到紫外光波上, 已调制的紫外光载波信号利用大气信道进行传播, 在接收端通过光探测器对紫外光束的捕获、跟踪建立起通信链路, 经光电转换和解调处理提取出原信息, 进而实现通信。紫外光通信系统框图如图 1 所示。

### 1.2 系统基本特点

紫外光是波长介于 10~400 nm 之间的电磁波。阳光中的紫外辐射在通过地球大气层时会受到对流层上部臭氧层对 200~280 nm 的紫外光的强吸收作

收稿日期: 2014-05-21; 修订日期: 2014-08-22.

作者简介: 吕照顺 (1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为军用光电技术。E-mail: lzhaoshun@163.com。

通讯作者: 吴晗平 (1964-), 男, 湖南澧县人, 工学博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为光电子系统总体技术及设计。E-mail: wuhanping601@sina.com。

基金项目: 国防技术基础项目。

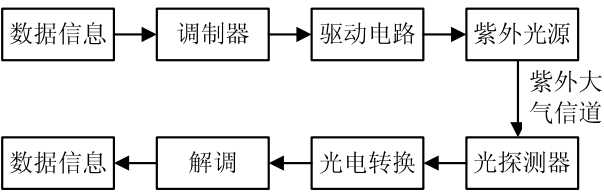


图 1 紫外光通信系统框图

Fig.1 Diagram of ultraviolet communication system

用，使得该波段的紫外光在到达地面附近时几乎衰减为 0，该波段被称为“日盲区”。紫外光通信系统是采用“日盲区”紫外光作为载波来实现通信的。“日盲区”紫外光通信示意图如图 2 所示。

紫外光通信系统主要特点：

- 1) 通信方式机动灵活，具有直视与非直视 2 种通信方式，能够实现全方位全天候工作。
- 2) 高保密性、抗干扰能力强，能够用于车载等移动设备之间的通信。
- 3) 通信带宽宽、易于小型化、成本投入少、实际应用价值高。

2 主要关键技术

2.1 紫外大气传输特性

大气对紫外光的散射是紫外光非直视通信的基础。紫外光在大气中传输时，受到大气分子和气溶胶微粒的散射作用，使紫外光信号的传播方向发生改变，从而可以绕过障碍物，实现非直视通信<sup>[3]</sup>。大气分子和气溶胶微粒是大气中的主要散射体，由于其尺寸大小不同，其具有不同的散射特性。大气分子的尺寸比紫外光波长小得多，呈现的是波长 $\lambda^{-4}$ 律的瑞利散射<sup>[4]</sup>；而气溶胶微粒比紫外光波长大得多，其呈现

的是米氏散射。在不同的天气条件下，这两种散射的作用不相同。

有研究表明，天气越好能见度越好，大气信道对紫外光能量的衰减并不是越小，当能见度为 18 km 时，能量衰减最小<sup>[5]</sup>。这是由于紫外光通信是利用有效散射粒子的作用来实现的，能见度的好坏会对紫外光能量产生衰减，但其也是紫外能量传输的不可或缺的重要因素。因此能见度存在一个折中值，使能量衰减达到最小。除能量衰减外，大气传输特性还包括对紫外光信号的多径传输、脉冲展宽和延时等。

2.2 直视与非直视紫外通信距离方程理论

通信距离是衡量系统水平的重要综合性能指标，因此通信距离方程理论是紫外光通信系统的主要关键技术之一。从不同工作环境和机理分析，紫外光通信可以分为直视通信与非直视通信 2 种。

直视通信距离方程理论是在收发端之间无障碍物的条件下，将发射机视为点光源，综合考虑大气传输衰减、光学系统增益、探测器性能等因素而建立的。分析表明，接收功率与发射功率、光学系统增益、探测器接收面积成正比，与发射机视场角、大气传输衰减、传输距离的平方成反比<sup>[6]</sup>。

非直视通信距离方程理论主要是基于大气分子以及散射粒子的散射作用，利用单次散射模型，综合考虑大气传输衰减、光学系统增益、探测器性能，并对有效散射区近似简化得到。分析表明，接收功率随着发射功率、光学系统增益、探测器增益、接收视场的增大而增大；随着发射仰角、传输距离增大而减小；发射视场对接收功率影响较小<sup>[7]</sup>。此外，非直视通信距离方程理论还可以利用 Monte Carlo 模型法和离散坐标法来研究。

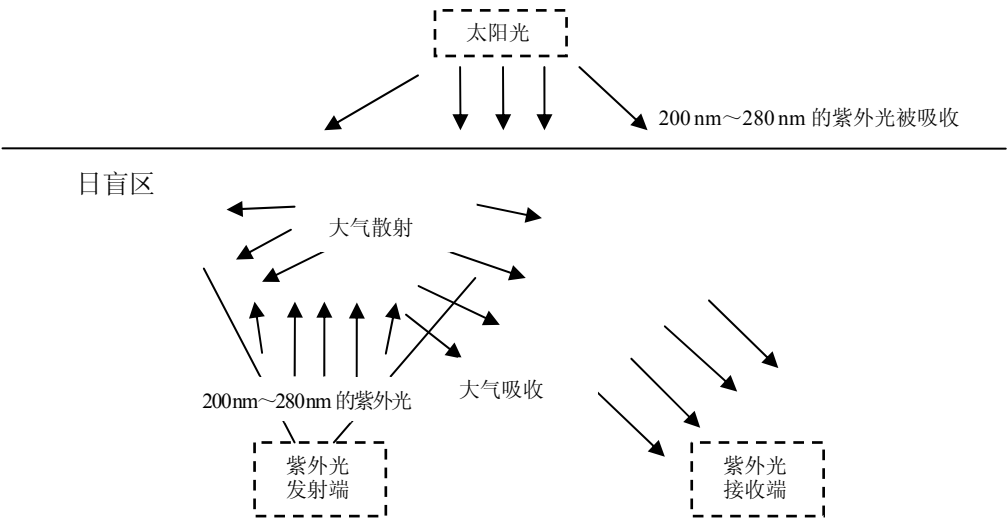


图 2 “日盲区”紫外光通信示意图 Fig.2 Diagram of ultraviolet communication in solar-blind

2.3 调制与解调

在紫外光通信系统中，采用合适的调制与解调技术可以有效地降低通信误码率，提高系统可靠性。紫外光通信系统的调制方式有开关键控（OOK）、频移键控（FSK）、脉冲位置调制（PPM）、单脉冲位置调制（LPPM）、差分脉冲位置调制（DPPM）、多脉冲位置调制（MPPM）、数字脉冲间隔调制（DPIM）以及在差分脉冲位置调制技术基础上改进的差分脉冲位置调制（IDPPM）等。表 1 对几种调制方式进行了比较。

2.4 高性能紫外探测器

紫外探测器是紫外光通信系统中的重要器件，其主要功能是探测到达接收端的紫外光信号，并将紫外光信号转换为电信号。由于大气信道对紫外光具有强烈的衰减作用，且紫外光信号在传输时也会受干扰光的影响。因此紫外探测器性能的优劣对整个通信系统的工作有着重要的影响。

随着紫外光通信系统对探测器性能指标的要求越来越高，对半导体紫外探测器的研究逐渐得到重视。半导体探测器有光电导探测器和光伏探测器 2 种。光电导探测器是利用光电导效应制作的光电探测器，其具有内部电子增益高的优点。光伏探测器是利用半导体 p-n 结光伏效应制作的光探测器。

N 化物半导体紫外探测器的探测波长范围可调，

且可靠性好，其中 GaN 基的紫外探测器是半导体紫外探测器的典型代表，GaN 基的紫外探测器热稳定性好、化学惰性良好，抗辐射能力强，在可见光和红外光范围内没有响应，且不要做成浅结，大大提高了量子效率。

GaN 基的紫外探测器有多种结构形式，各种结构形式具有不同的性能特点，常用的结构形式有 MSN 型、p-i-n 型和 Schottky 型 3 种<sup>[8]</sup>。

2.5 紫外光信号检测

紫外光信号检测主要有直接检测和外差检测 2 种方式<sup>[9]</sup>。

紫外光信号直接检测是指将紫外光信号直接入射到光电探测器的光敏面上，光电探测器直接响应紫外光光强的变化，并将光强变化转化为电压或电流信号。无论检测的光载波是相干光还是非相干光，接收端只能解调出光强度调制所形成的信息，与光载波的相干性无关。

紫外光信号外差检测是指将紫外光信号与参考光同时入射到光电探测器的光敏面上，形成光的干涉，光电探测器响应两光束的干涉光场，其输出信号不仅与入射光波的强度有关，还与频率和相位等参数有关。直接检测与外差检测的比较表 2 所示。

表 1 几种调制方式的比较 Table 1 Comparison of several modulation

调制方式	优点	缺点
OOK	实现简单，易于 IM/DD 系统	传输码率较低、抗噪声性能较差、误码率较高
FSK	实现比较简单，抗噪声性能优于 OOK	所需的功率大、能量效消耗大
PPM	功率效率高	同步难，带宽效率低
LPPM	传输速率较快、对能量的要求低、对 LED 尤为适应	实现稍微复杂
DPPM	信道占用率低	实现较为复杂、解调难度大、误码率较高
MPPM	数据传输速率快	实现最为复杂
DPIM	功率效率和带宽效率较好	无法实现软判决
IDPPM	功率效率和带宽效率较好	收发需要缓存设置

表 2 直接检测与外差检测比较 Table 2 Comparison of direct detection and heterodyne detection

检测类型	直接检测	外差检测
光源类别	非相干光源、相干光源	相干光源
接收灵敏度	灵敏度较低	灵敏度较高，优于外差检测 $10^7\sim10^8$ 倍数量级
系统结构和工作条件	结构简单，应用广泛，尤其是在紫外光通信系统中的应用较多	结构复杂，信号光信号和参考光必须满足一定的空间条件和频率条件
信息容量	信息容量较小	信息容量大

2.6 紫外光学材料及系统

紫外光学系统的作用是接收发射端发射的紫外光信号，并将接收到的信号传输给探测器。由于紫外大气信道对紫外光信号具有强烈的衰减作用，到达接收端的紫外光信号非常微弱，因此紫外光学系统性能的优劣对通信质量有着重要的影响，是研究紫外光通信的主要关键技术之一。

由于紫外光波长较短，在光学材料中紫外光透过率较好的材料较少，尤其是中紫外波段材料，同时紫外光波长较短使得紫外光学系统具有良好的衍射极限。目前紫外光学材料主要有石英玻璃、紫外玻璃、晶体以及其它透紫外材料等<sup>[10]</sup>。

1) 石英玻璃是二氧化硅的非晶态材料，其分子结构是一种由 SiO<sub>2</sub> 四面体结构单元组成的，且 Si-O 化学键能大，结构稳定，在紫外波段具有良好的透过率，石英玻璃耐高温，热稳定性好；电绝缘性能好；耐腐蚀性强；透光性较好。石英玻璃部分机械性能和电学性能如表 3 所示。

2) 紫外玻璃颜色为黑色，主要成分有二氧化硅、氧化钡、氯化钾、氧化镍、氧化铜等，对 400~700 nm 的透过率很低，可以用于制作紫外滤光器等光学元件。

3) 晶体主要有氟化钙、氟化镁、蓝宝石等。

氟化钙工作在 130 nm~10 μm 波段，且具有良好的透过率，但是大多数氟化钙具有吸湿的特点，长期暴露在空气中会降低紫外性能，且其柔软易碎，给加工带来了很大的难度。氟化镁的光谱响应范围比石英玻璃宽，是很有效的短波长膜料，但是沉淀到应用表面非常困难，且易碎。蓝宝石是很好的紫外光学材料，但是其制作成本高，难以成型和抛光。

4) 某些有机材料在紫外波段也有很好的透过性能，可以用于制作光学系统的滤光器，例如有机玻璃、聚氯乙烯等。常见有机材料中塑料价格便宜，易于加工，但是其稳定性差，使用寿命短、膨胀温度系数和折射指数较大。石英玻璃、氟化钙、氟化镁和蓝宝石的主要优缺点比较如表 4 所示。

根据以上分析，结合系统指标要求和各紫外材料的特性，综合考虑系统使用环境、成本、可靠性等因素，可以选用一种或几种紫外材料用于紫外光学系统设计。

结合紫外光特点，合理选择光学系统结构形式是完成光学系统的重要步骤。目前紫外光学系统的结构形式主要有反射式和折射式两种。反射式和折射式光学系统特点及经典系统与镜头，如表 5 所示。

表 3 石英玻璃部分机械性能和电学性能			Table 3 Part mechanical and electrical properties of quartz glass		
机械性能	标准值	机械性能	标准值	电学性能	标准值
密度	2.2 g/m <sup>3</sup>	变形点	1280℃	电阻率	7×10 <sup>7</sup> Ω·cm
抗压强度	1100 MPa	热膨胀系数	5.5×10 <sup>-7</sup> /℃	绝缘强度	250~400 kV/cm
抗拉强度	48 MPa	折射率温度系数	9×10 <sup>-6</sup> /℃	介电常数	3.7~3.9
折射率	1.4585	长期最高使用温度	1100℃	介电损失	<1×10 <sup>-4</sup>

表 4 石英玻璃、氟化钙、氟化镁和蓝宝石的主要优缺点比较		
Table 4 Main advantages and disadvantages of quartz glass, calcium fluoride, magnesium fluoride and sapphire		
材料类型	主要优点	主要缺点
石英玻璃	耐高温、耐腐蚀、热稳定性好、价格便宜	
氟化钙	紫外工作波段宽、透过率好	柔软易碎、容易吸湿潮解
氟化镁	紫外工作波段宽、不易潮解	易碎
蓝宝石	坚硬、耐用、抗腐蚀性强	成本高、难于抛光和成型

表 5 反射式与折射式光学系统特点及经典系统与镜头		
Table 5 Characteristics of reflective optical system and refractive optical system and classical system and lens		
光学系统结构形式	主要特点	经典系统与镜头
反射式光学系统	无色差、视场小、质量轻、中心遮拦、非球面、无热化	牛顿系统、格里高里系统、卡塞格林系统等
折射式光学系统	无中心遮拦、光效率高，透镜面型一般为球面，设计加工方便，通过增加透镜元件个数可设计大视场、大相对孔径的光学系统	消色差双胶合物镜、匹兹万镜头、柯克三片式镜头等

### 3 国内外研究现状

#### 3.1 国外研究现状

国外针对紫外光通信的研究工作起步较早,美国海军在其发布的报告中就分析了紫外光通信的关键器件及其性能,但未展开实际的研究工作。近年来,世界各军事强国围绕紫外光通信的关键技术加大了研究力度,并取得了一定的研究成果。

美国空军地球物理实验室开发了大气传输模拟仿真软件 LOWTRAN,到目前为止已公布了该软件的7个版本。该软件算法简单,经验性强,可计算紫外光的大气传输特性,并研制了一台紫外语音通信的实验样机,进行了大量实验<sup>[11]</sup>。

美国 Naval Ocean System Center 研制了一套紫外日盲短距离通信系统,其通信速率可达到 2400 bit/s,误码率 $<10^{-5}$ 。在平均臭氧浓度下,直视通信距离最大可达到 3 km,非直视通信距离最大可达到 1 km,在 750 m 的通信距离上可以正常工作 1 年。

美国通用公司(GE)研制了一套通信速率可达到 4800 bit/s,误码率可达到 $10^{-6}$ <sup>[12]</sup>的紫外光通信系统。该系统适用于近距离通信,且不易被干扰,可以满足战术通信要求,已装备部队。

美国国防预先研究计划局(DARPA)主要针对日盲紫外发光二极管<sup>[13]</sup>进行了研制,并启动了一个研制“半导体紫外光源”的项目,旨在研制紫外二极管光源。该项目启动后,南加州大学(OSC)和 Sandia 实验室就研制出工作波长为 274 nm,输出功率 1.3 mW 的紫外光源。由于大气对紫外光信号具有很强的衰减作用,因此为了有效提高紫外光探测水平,紫外光电探测器的研制也至关重要。衡量紫外光电探测器性能的主要指标有响应灵敏度、有效阴极面积、响应带宽以及暗电流等。目前可以用于紫外光通信系统中的紫外光电探测器主要有紫外光电倍增管(PMT)、雪崩光电二极管(APD)和紫外光电二极管等。该局研究了雪崩光电二极管<sup>[14]</sup>,要求其响应峰值波长为 280 nm,增益为 $10^6$ ,目前已取得积极进展。

加州大学从信噪比和误码率的角度对紫外光直视和非直视通信链路进行了分析,对于不同影响因素,例如通信速率、通信距离、发射功率、收发仰角、发射视场、接收视场进行了研究。对紫外光直视通信和非直视通信时,通信距离从米到百米的探测效果进行了比较<sup>[15]</sup>,并就短距离非直视紫外光通信的路径损耗模型和性能权衡进行了研究,从不同的收发角度分析了户外 100 m 距离非直视紫外光通信。并基于多次的测量,对经验信道损耗模型进行了修正,同时对弱

背景辐射和强背景辐射条件下的探测器性能进行了研究,为实际系统的设计提供了技术指导<sup>[16]</sup>。2010 年建立了一个窄脉冲展宽实验平台,发射机采用一种紧凑型 Q 开关,4 倍频的 Nd:YAG 激光器,波长为 266 nm,外接一个 10 Hz 的矩形脉冲信号发生器,产生相应的在 10 Hz 的激光脉冲序列。每个脉冲宽度为 3~5 ns 和能量为 3~5 mJ<sup>[17]</sup>。

麻省理工大学林肯实验室将 240 支发射波长为 274 nm 的紫外发光二极管做成阵列,其发射功率为 4.5 mW,将 10 个该阵列封装成一个发射单元,功率可达到 40 mW,实现了传输速率 2.4 kbit/s,约 11 m 的非直视通信,并就便携式紫外光通信系统的应用进行了验证<sup>[18]</sup>,进一步阐述了紫外短距离通信装置和技术的最新发展状况,指出了紫外光非直视通信是利用分子散射来实现的,这一技术也同样适用于某些直视通信,对野外较长距离、宽视野尺寸进行了描述,包括在树遮挡下的准直视通信链路,且测量了 275 nm 紫外光的大气衰减和预测了基于单次散射模型的直视通信特点<sup>[19]</sup>。

日本在紫外发光二极管(UVED)的研制方面也具备很强的实力,在深紫外光波段,采用氮化镓(GaN)类半导体材料,研制出了中心波长为 282 nm,输出功率为 10 mW 的深紫外发光二极管。在波长更短的紫外光波段,采用氮化铝镓为基础,得到了波长位于 264~282 nm,最大输出功率大于 10 mW 的 LED<sup>[20]</sup>。

#### 3.2 国内研究现状

国内开展对紫外光通信的研究工作较晚,且相关研究单位较少。

上海光机所主要在理论上对紫外光通信的原理和技术进行了研究。在非直视单次散射条件下,研究了紫外光通信的信道特性,分析了紫外光传输损耗与收发仰角、发射视场和接收视场的关系,计算了在单极性归零码(RZ)和单极性不归零码(NRZ)2种情况下码间干扰的影响。结果表明,采用 RZ 码可以减轻码间干扰,从而可以获得更高的系统通信速率<sup>[21]</sup>。

电子科技大学对紫外大气信道特性和紫外探测器做了相关研究。利用非直视单次散射模型,对紫外光信号的损耗、延时、脉冲半展宽进行了仿真计算<sup>[22]</sup>。针对非直视紫外光通信的特点和影响紫外光通信的大气因素进行了探讨,对影响紫外光通信的大气因素进行了仿真计算<sup>[23]</sup>,对应用于紫外光通信系统中的紫外探测器进行了研究,并对各种探测器的量子效率,光谱响应进行了分析,为系统设计时对接收器件的选择提供了参考<sup>[24]</sup>。

国防科技大学对紫外光通信系统展开了相关研究。采用低压碘灯作为系统光源,设计了一套调制频率可以达到 100 kHz 的紫外光通信系统,但只能用于短距离直视通信。利用蒙特卡罗方法建立了非直视紫外光多次散射模型,同时采用单次散射模型和实验方法验证了多次散射模型的有效性,对非直视紫外光大气传输特性进行了模拟<sup>[25]</sup>,定量计算了单次散射近似对研究非直视紫外通信传输的误差大小<sup>[26]</sup>,研究了 4 种典型大气条件下的紫外光散射相函数,并与 3 类常用的非紫外光散射相函数经验公式进行了比较<sup>[27]</sup>。

重庆大学主要针对短距离紫外光语音通信进行了相关研究。对基于 FPGA 平台的紫外通信系统的解调技术进行了研究,系统通信传输速率达到了 9.6 kbit/s,误码率为 0.001%<sup>[28]</sup>,并指出了制约紫外光通信速率的原因,并针对这些影响因素提出了有效的解决办法,进而提高了系统的通信速率<sup>[29]</sup>。采用改进型 FSK 调制方法,以紫外激光器作为光源,光电倍增管作为接收器,搭建了一套紫外通信系统实验平台,实现了通信距离 0.1 km、传输速率 0.6 kbit/s、误码率低于  $10^{-5}$  的紫外光通信<sup>[30]</sup>。

北京理工大学对战场紫外光通信和设备研制进行了研究,设计了一台非直视紫外光通信系统的实验样机,在直线距离 500 m 之内取得了较好的通信效果。利用 MODTRAN 软件对多种大气模型、天气条件和臭氧浓度下的紫外光大气透过率进行了仿真,对大气衰减系数进行了仿真计算<sup>[31]</sup>,同时对非直视紫外光通信单次散射模型进行了研究,并对已建立的单次散射模型做了简化,计算出了不同距离下的接收光功率和路径损耗,为系统设计提供了有效的技术支持。

中国科学院对紫外光通信系统关键技术和关键器件进行了研制,并对紫外大气传输特性进行了仿真研究,同时对样机进行了试制。就提高紫外光通信系统灵敏度的新方法进行了研究,分析了几种材料的光谱响应曲线,采用合适的材料,提高了探测器的灵敏度,通过实验方法证明了其可行性<sup>[32]</sup>,利用可编程逻辑器件 VSX35 设计了紫外光通信的调制与解调系统,详细阐述了实现调制与解调的过程,并通过仿真验证了设计的正确性<sup>[33]</sup>。利用 APD 完成了紫外光语音通信系统的设计,使用先进多带激励编码和开关键控调制方式,在光功率为纳瓦量级时完成实时语音通信,并将语音通信的速率降低到 2.5 kbit/s<sup>[34]</sup>。

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室,将分集接收技术应用于紫外光通信系统中,从理论上研究了分集接收技术对紫外光通信系统信噪比的改善,实验验证了该技术能够将系统信噪比提升

12 dB<sup>[35]</sup>。

此外,国内其它高校和研究机构对紫外光通信系统的关键器件、弱信号处理算法和紫外光自组织网络做了相关研究。在 210 mm 的石英基底上,制备了工作波长为 254 nm,在 280~600 nm 范围内,平均透射率大于 98%,并满足角度  $12^{\circ}\sim 30^{\circ}$  的滤光膜<sup>[36]</sup>。在分析最小均方误差 LMS、递推最小二乘 RLS 准则和线性神经网络 ADALINE 自适应噪声抵消算法的基础上,从功率信噪比角度仿真计算了 3 种算法的滤波效果<sup>[37]</sup>。

基于 NS<sub>2</sub> 的非直视紫外通信模型,分析了紫外光非直视通信的节点覆盖范围,链路模型及传输容量,建立了包括传输模型和多收发器节点模型在内的紫外光非直视通信模型,添加了支持此模型的定向静态路由协议,对紫外光非直视通信在不同拓扑结构下的方式进行了仿真研究<sup>[38]</sup>。对紫外光非直视通信的定向媒体接入控制协议进行了研究,推导了非直视紫外光通信覆盖范围的方位角表达式,根据通信时路径损耗的特点和方位角表达式,改进了紫外光非直视定向发送全向接收的节点设计规则,提出了紫外光非直视通信定向 MAC 协议,并利用网络模拟软件 NS<sub>2</sub> 进行了仿真验证<sup>[39]</sup>。基于眼图原理,建立了紫外光非直视通信模型,研究了系统的通信距离和稳定型,分析了散粒噪声和热噪声对通信性能的影响,利用 Optisystem 进行了实验。结果表明,一般环境下紫外光非视距通信距离可达到 0.3 km,热噪声对通信性能的影响比较大,在一定环境下紫外光通信系统可接受的热噪声最大值为  $1\times 10^{-20}$  W/Hz<sup>[40]</sup>。

## 4 未来研究方向

利用紫外光进行非直视通信,具有架设灵活、保密性好等诸多优点,但是目前国内外在该领域的研究技术还远不及无线电波通信成熟。未来紫外光通信主要围绕以下几个方面来进行研究:

1) 新型高效紫外光源。目前紫光光源主要有紫外气体放电灯、紫外激光器和紫外发光二极管 3 种。紫外气体放电灯驱动电压高,紫外激光器价格昂贵,而紫外发光二极管体积小、效率高、发射功率低,因此大功率紫外发光二极管阵列的研究将成为紫外光源发展的主要方向。

2) 紫外大气传输特性。大气因素和天气条件对紫外光通信系统的性能具有直接影响。紫外光信号在大气信道中传输时存在多径传输现象,这会引起信号的脉冲展宽,进而限制系统的最大工作带宽。因此加强对紫外大气传输特性的深入研究可以大幅度提高

紫外光通信的有效性。

3) 调制与解调。紫外光信号在大气信道中传输,会有色散延时的现象,采用高效的调制技术可以有效地提高紫外光通信系统的性能,因此加强调制与解调技术的深入研究将是研究紫外光通信的主要内容之一。

4) 高性能紫外探测器。紫外探测器是将接收到的紫外光信号转化为要求的电信号,紫外探测器的性能对紫外光通信系统具有重要的影响。对比目前已有探测器的类型和性能,半导体紫外探测器将成为未来研究的热点。

5) 紫外光学系统收发一体化。为了更好地实现紫外光通信的及时性和可靠性,实现发射光学系统和接收光学系统一体化十分必要,这也是紫外光通信技术发展的必然趋势。

6) 紫外光信号在大气中传输,损耗较大,接收端检测到的是微弱信号,提高微弱信号检测与处理水平将对紫外光通信性能的提高有着重要的影响和深远的意义。

## 5 结束语

鉴于紫外光通信的独特优势及其在未来军民通信中的广泛应用前景,国外对这方面的技术资料高度保密,加强对近地层紫外光通信系统关键技术研究及其总体设计,尽早完成从理论研究、实验验证、产品定型到装配使用,具有现实必要性和时间紧迫性。

### 参考文献:

- [1] Shaw G A, Siegel A M, Model J. Ultraviolet comm links for distributed sensor networks[C]//*Digest of the LEOS Summer Topical Meetings*, 2005: 39-40.
- [2] XU Zhengyuan, BRIAN M Sadler. Ultraviolet communications: potential and state of the art[C]//*IEEE Communication Magazine*, 2008, **46**(5): 67-73.
- [3] 吕照顺, 吴晗平, 周伟, 等. 近地面红外与紫外自由空间光通信特点及其比较研究[J]. *红外技术*, 2011, **33**(4): 207-213.
- [4] 吴晗平. *光电系统设计基础*[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 丁莹, 佟首峰, 董科研, 等. 大气信道对垂直收发模式紫外光散射通信性能影响的仿真[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 61-64.
- [6] 吕照顺, 吴晗平, 周伟, 等. 近地层紫外自由光通信传输距离及影响因素研究[J]. *红外技术*, 2011, **33**(10): 588-592.
- [7] 吕照顺. 近地层非严格对准自由空间紫外通信系统关键技术及其设计[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012: 41-47.
- [8] 孙媛媛. 氮化镓基紫外光电探测器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 2-3.
- [9] 江文杰, 曾学文, 施建华. *光电技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] 许强. *军用紫外探测技术及应用*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版

社, 2010.

- [11] 刘菊, 贾红辉. 军用紫外光学技术的发展[J]. *光学与光电技术*, 2006(12): 61-64.
- [12] He Q, Sadler B M, Xu Z. Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications[C]//*Proceedings of The International Society for Optical Engineering*, 2009, **7464**: H2.
- [13] Shaw G A, Siegel A M. Extending the range and performance of non-line-of-sight ultraviolet communication links[C]//*Proceeding of The International Society for Optical Engineering*, 2006, **4**(17): 1-12.
- [14] Xu Z, B M. Ultraviolet communications potential and state of the art[C]//*Proceedings of IEEE*, 2008, **5**(46): 67-68.
- [15] Zhengyuan Xu. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]//*Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2007: 577-580.
- [16] Chen Gang. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[C]//*OPTICS EXPRESS*, 2009, **17**(5): 3929-3940.
- [17] CHEN Gang, XU Zhengyuan, Brian M S. Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-line-of-sight communication channels[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10500-10509.
- [18] Gary A Shaw. Demonstration system and applications for compact wireless ultraviolet communications[C]//*Proceedings of SPIE*, 2007, **5071**: 241-252.
- [19] Gary A Shaw. Recent progress in short-range ultraviolet communication[C]//*Proceedings of SPIE*, 2005, **5796**: 214-225.
- [20] 陶立强, 梁菁, 任杰. 紫外光通信系统光源技术发展研究[J]. *电子科技*, 2011, **24**(8): 124-127.
- [21] 冯涛, 陈刚, 方祖捷. 非视线紫外光散射通信的信道特性[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(10): 226-230.
- [22] 张静, 廖云. 紫外光通信大气信道模型研究[J]. *电子科技大学学报*, 2007, **36**(2): 199-202.
- [23] 陈君洪, 杨小丽. 非视线“日盲”紫外通信的大气因素研究[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(4): 38-39.
- [24] 陈君洪, 杨小丽. 紫外通信中探测器的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(S3): 86-88.
- [25] 常胜利, 贾红辉. 非视线紫外通信大气传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 955-960.
- [26] 常胜利, 贾红辉. 单次散射近似研究非视线光传输中的误差[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(1): 40-44.
- [27] 朱孟真, 张海良. 基于 Mie 散射理论的紫外光散射相函数研究[J]. *光散射学报*, 2007, **19**(3): 225-229.
- [28] 向平, 肖沙里. 基于 FPGA 平台的紫外通信系统的解调技术的研究[J]. *光电子技术*, 2008, **28**(2): 86-88.
- [29] 汪科, 肖沙里, 罗辑, 等. 紫外通信研究的现状分析和改进[J]. *光通信技术*, 2008, **32**(3): 56-58.

(下转第 699 页)

- chemical vapor deposition[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(18): 183109-183109-3.
- [8] 吴娟霞, 徐华, 张锦. 拉曼光谱在石墨烯结构表征中的应用[J]. *化学学报*, 2014, **72**: 301-318.
- [9] Jahan M Dawlaty, Shriram Shivaraman, Jared Strait, et al. Measurement of the Optical Absorption Spectra of Epitaxial Graphene from Terahertz to Visible[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(13): 131905.
- [10] Michael E Thomas, Stefan K Andersson, Raymond M.Sova, et al. Frequency and temperature dependence of the refractive index of sapphire[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1998, **39**(4): 235-249.
- [11] Choi H, Borondics F, Siegel D A, et al. Broadband electromagnetic response and ultrafast dynamics of few-layer epitaxial graphene[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**: 172102.
- [12] Chen C F, CH Park, BW Boudouris, et al. Controlling Inelastic Light Scattering Quantum Pathways in Graphene[J]. *Nature*, 2011, **471**: 617-620.
- [13] 袁新强, 范有余, 曹国喜, 等. 透红外大尺寸氧氟化物玻璃研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, **24**(6): 752-755.
- [14] 宋宝安, 张莹昭, 王乔方, 等. 红外硫系玻璃光学特性检测及影响因素分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(6): 1442-1447.

---

(上接第 694 页)

- [30] 彭光辉, 施军, 吕凤飞, 等. 基于改进型 FSK 调制的紫外激光通信系统[J]. *光通信技术*, 2013, **37**(7): 56-59.
- [31] 唐义, 倪国强. “日盲”紫外光通信系统传输距离的仿真计算[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 27-30.
- [32] 王丽辉, 王孝坤. 提高紫外光通信系统灵敏度的新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2009(12): 120-123.
- [33] 于晓娜, 李霁野. 新型紫外光通信系统调制解调器的 FPGA 实现[J]. *光通信技术*, 2009, **33**(12): 14-16.
- [34] 王荣阳, 袁永刚, 李向阳. 基于 APD 的紫外光语音通信系统设计[J]. *光通信技术*, 2011, **35**(10): 24-27.
- [35] 范成, 左勇, 吴朝烨, 等. 紫外光通信系统中分集接收的研究[J]. *光通信技术*, 2013, **37**(12): 44-46.
- [36] 沈羿, 刘冬梅, 付秀华, 等. 紫外光通信滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1-6.
- [37] 周伟, 吴晗平, 吴晶, 等. 紫外目标探测弱信号处理方法研究[J]. *红外技术*, 2012, **34**(9): 508-514.
- [38] 柯熙政, 吴鹏飞, 侯兆敏. 基于 NS<sub>2</sub> 的非视距紫外通信模型的建立与仿真研究[J]. *激光杂志*, 2011, **32**(6): 30-33.
- [39] 柯熙政, 陈锦妮, 侯兆敏. 紫外光非视距通信的定向媒体接入控制协议[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(8): 1190-1195.
- [40] 王亚民, 杨轩. 基于 Optisystem 紫外光通信系统性能研究[J]. *光通信技术*, 2014, **38**(1): 46-48.