

# 紫外光通信中副载波强度调制的低密度奇偶校验码研究

赵太飞<sup>1,2\*</sup>, 屈瑶<sup>1</sup>, 许杉<sup>1</sup>, 邵军虎<sup>1</sup>, 张杰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

<sup>2</sup>西南科技大学特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;

<sup>3</sup>北京邮电大学光电信息学院, 北京 100876

**摘要** 在紫外光散射通信系统中, 脉冲展宽和噪声会对信号产生严重影响。为降低系统误码率、提高通信距离, 加入了低密度奇偶校验码(LDPC)进行码元纠错。对比了开关键控(OOK)和二进制相移键控(BPSK)副载波强度调制的性能, 仿真分析了 BPSK 副载波强度调制下不同编码效率、不同译码方式的 LDPC 码对非直视(NLOS)紫外光通信系统误码率的影响。结果表明: BPSK 副载波强度调制的性能优于 OOK 调制, 编码效率越小的 LDPC 码的纠错能力越强, 置信传播算法和对数似然比置信传播算法译码性能几乎一致, 均优于最小和算法。在小角度、短距离时, 非直视紫外光通信系统误码率更小, 当误码率为  $6.5 \times 10^{-6}$  时, LDPC(672, 168)码与未编码序列相比, 通信距离提高约一倍。

**关键词** 光通信; 紫外光散射; 低密度奇偶校验码; 二进制相移键控副载波强度调制

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.120602

## Low-Density Parity-Check Code for Subcarrier Intensity Modulation in Ultraviolet Communication Systems

Zhao Taifei<sup>1,2\*</sup>, Qu Yao<sup>1</sup>, Xu Shan<sup>1</sup>, Shao Junhu<sup>1</sup>, Zhang Jie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

<sup>2</sup>Sichuan Provincial Key Laboratory of Robot Technology Used for Special Environment, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

<sup>3</sup>School of Photoelectric Information, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** In ultraviolet (UV) scattering communication systems, pulse broadening and noise considerably affect the signal. To reduce system bit error rate and increase communication distance, it is necessary to add low-density parity check code (LDPC) to implement symbol error correction. The performance of on-off keying (OOK) modulation and binary phase-shift keying (BPSK) for subcarrier intensity modulation is compared. Further, the influence of LDPC codes with different coding efficiencies and decoding methods under BPSK subcarrier intensity modulation on the bit error rate of a non-line-of-sight (NLOS) ultraviolet communication system is simulated and analyzed. Results indicate that BPSK subcarrier intensity modulation performs better than OOK modulation. LDPC codes with low coding efficiency values exhibit strong error correction ability. The performances of belief propagation (BP) algorithms and log-likelihood ratio belief propagation (LLR BP) algorithms are virtually the same, and both are better than min-sum algorithms. When the bit error rate is  $6.5 \times 10^{-6}$ , the communication distance of the LDPC (672, 168) coded sequence is approximately doubled, compared with the uncoded sequence.

**Key words** optical communications; ultraviolet scattering; low-density parity-check code; binary phase-shift keying subcarrier intensity modulation

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510

收稿日期: 2018-06-13; 修回日期: 2018-06-19; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金-中国民航局民航联合研究基金(U1433110)、陕西省教育厅服务地方专项计划项目(17JF024)、西安市碑林区科技计划项目(GX1617)、特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金(17kftk04)

\* E-mail: zhaotaifei@163.com

## 1 引言

无线紫外光(UV)通信是主要采用“日盲”波段(200~280 nm)紫外光作为信息传输的载体,利用大气中分子、气溶胶、灰尘等微粒的散射作用进行信息传递的一种无线光通信方式<sup>[1]</sup>。相比传统的通信方式,紫外光通信具有低窃听率、低位辨率、非直视(NLOS)通信、强抗干扰能力等优点<sup>[2]</sup>,并且在“电磁寂静”环境中具有突出优势。目前关于UV通信的研究除了优化点对点通信、中继链路的性能外,也朝着组网发展。宋鹏等<sup>[3]</sup>对紫外光移动自组网的节点进行设计,并给出通信节点间捕获、对准、跟踪的方法;宋晓梅等<sup>[4]</sup>提出紫外光空分复用自组织网络路由协议。这些研究扩大了UV通信的应用范围,但是仍不能解决UV通信中脉冲展宽、码间串扰等问题。因此,需要对该问题进行进一步研究。

大气中各种微粒对紫外光的散射效应是UV通信区别于其他无线光通信的显著特征,其中散射会使得光子以多条路径到达接收端,造成严重的脉冲展宽效应。当通信速率较高时会使得接收码元串扰引起误码<sup>[5]</sup>。大气吸收、反射、折射和障碍物等因素,会对UV信道产生严重影响<sup>[6]</sup>。此外,信号传输过程中存在的各种噪声,也会使得UV通信系统的性能严重下降。为提高UV通信距离,降低误码率、增加消息传输的可靠性,需要一种有效的信道编码方案。由Gallager提出的低密度奇偶校验码(LDPC)是一种线性译码、复杂性低、结构简单、逼近香农极限的纠错码<sup>[7]</sup>,现已应用于深空通信、图像数字水印、光纤通信等领域。在UV通信中,Wu等<sup>[8]</sup>比较了开关键控(OOK)调制下里索(RS)码和LDPC码的性能,在误码率为 $10^{-3}$ 时,RS码和LDPC码的通信距离分别提高了32%和78%,验证了LDPC码的优越性。

紫外光通信中常用的调制方式是强度调制直接

检测(IM/DD),该方法操作简单、易于实现,但易受到大气信道的影响。近年来,在自由空间光(FSO)通信中的副载波调制技术得到广泛应用,Popoola等<sup>[9]</sup>指出湍流信道中二进制相移键控(BPSK)副载波强度调制比OOK调制性能更好。Wang等<sup>[10]</sup>验证了在UV通信系统中,BPSK副载波调制在传输光功率、通信速率等方面均优于IM/DD方式。因此,本文研究了采用BPSK副载波调制的LDPC码在不同紫外光系统设置下的性能,并与OOK调制下的性能进行了对比。文中采用单次散射近似法和长椭球坐标系对紫外光信道进行分析,并给出了LDPC码的编码和译码过程,重点仿真分析了不同编译码方式和调制方式对紫外光通信效果的改善情况。此外,对影响紫外光通信性能的各个因素、通信距离等参数进行仿真,得到了比较适合紫外光通信的参数设置范围。

## 2 非直视紫外光通信单次散射模型

分析紫外光通信散射过程的常用方法有单次散射近似法<sup>[11-12]</sup>、蒙特卡罗(MC)法<sup>[13-15]</sup>等。其中,MC法基于光子多次散射模型,需要追踪大量光子并多次计算每个光子的位置、生存阈值等,以判断是否为有效接收光子,计算复杂、耗时长。单次散射近似法假设从发射端到接收端最多只经历一次散射过程,简化了光子传输过程,多项研究基于此方法验证了其在短距离紫外光通信的有效性<sup>[16-17]</sup>。常利用长椭球坐标系分析紫外光通信单次散射<sup>[18]</sup>,长椭球坐标系示意图如图1所示。图中, $F_1$ 和 $F_2$ 是焦点, $r_1$ 和 $r_2$ 为球面上一点到两焦点的距离, $r$ 为焦距,空间中一点可由径向坐标 $\xi$ 、角坐标 $\eta$ 和方位坐标 $\varphi$ 唯一确定。采用该坐标系的优势在于给定一个表面,椭球面上任意一点到达两焦点的距离之和是一个常数,当紫外光收发机分别放在两焦点时,椭球面可视是等散射面,从而可简化计算。

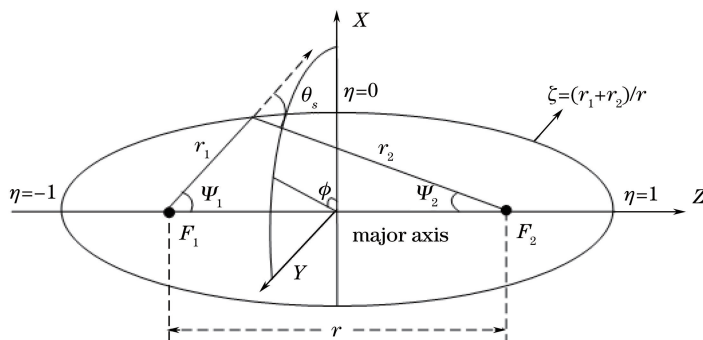


图1 长椭球坐标系示意图

Fig. 1 Schematic of prolate-spheroidal coordinates

图2为非直视紫外光通信单次散射模型,其中T为发射机,R为接收机, $\beta_T$ 为发射仰角, $\beta_R$ 为接收仰角, $\theta_T$ 为发散角半角, $\theta_R$ 为视场角半角, $V$ 为有效散射体, $\zeta$ 为有效散射体微元 $\delta V$ 到接收端的连线与接收视场轴线的夹角, $\xi_{\max}$ 和 $\xi_{\min}$ 为有效散射体交线的最大值和最小值,只有在此区域的光子才可能被

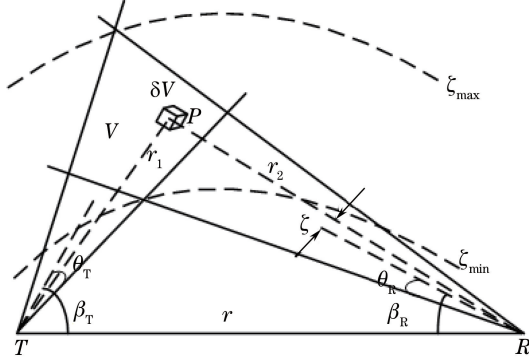


图2 非直视紫外光通信单次散射模型

Fig. 2 Single scattering propagation model of non-line-of-sight ultraviolet (UV) communication system

接收,因此, $\xi_{\max}$ 和 $\xi_{\min}$ 决定了信道响应时间长度和范围。经过同一椭圆面的光子,将在同一时刻 $t = (r_1 + r_2)/c$ 到达接收端。

$\xi_{\max}$ 和 $\xi_{\min}$ 满足

$$\xi_{\min} = \begin{cases} 1, & (\beta_R - \theta_R) \leq 0 \text{ or } (\beta_T - \theta_T) \leq 0 \\ a + (a^2 - 1)^{1/2}, & 0 < (\beta_R - \theta_R) + (\beta_T - \theta_T) < \pi \\ \infty, & \pi \leq (\beta_R - \theta_R) + (\beta_T - \theta_T) \end{cases} \quad (1)$$

$$\xi_{\max} = \begin{cases} b + (b^2 - 1)^{1/2}, & 0 < (\beta_R + \theta_R) + (\beta_T + \theta_T) < \pi \\ \infty, & \pi \leq (\beta_R + \theta_R) + (\beta_T + \theta_T) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a$ 、 $b$ 分别为

$$a = \frac{1 + \cos(\beta_R - \theta_R)\cos(\beta_T - \theta_T)}{\cos(\beta_R - \theta_R) + \cos(\beta_T - \theta_T)}, \quad (3)$$

$$b = \frac{1 + \cos(\beta_R + \theta_R)\cos(\beta_T + \theta_T)}{\cos(\beta_R + \theta_R) + \cos(\beta_T + \theta_T)}.$$

经推导得到 $t$ 时刻接收辐照度为

$$E(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi < \xi_{\min} \\ \frac{E_t c k_s \exp(-k_e r \xi)}{2\pi\Omega_t r^2} \int_{\eta_1(\xi)}^{\eta_2(\xi)} \frac{2g[\varphi_2(\xi, \eta)]P(\theta_s)}{\xi^2 - \eta^2} d\eta, & \xi_{\min} < \xi < \xi_{\max} \\ 0, & \xi > \xi_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_t$ 为发射脉冲的能量; $k_s$ 和 $k_e$ 分别为大气散射系数和大气消光系数; $c$ 为光速; $r$ 为收发机之间的距离; $\Omega_t$ 为发射立体角; $P(\theta_s)$ 为散射角的散射相函数; $g[\varphi_2(\xi, \eta)] = \varphi_2(\xi, \eta)\cos(\beta_R)\cos(\psi_1) + \sin(\beta_R) \cdot \sin(\psi_1)\sin[\varphi_2(\xi, \eta)]$ , $\varphi_2(\xi, \eta)$ 为 $\varphi$ 坐标的积分限。

将 $\xi = ct/r$ 代入(4)式,可得信道的脉冲响应,若 $E_t = 1$ ,即为单位脉冲响应。但是该式过于复杂,难以分析计算,因此文献[19]对其进行了简化,得到紫外光信道的脉冲响应为

$$h(t) = \frac{mk_s \exp(-k_e ct)}{16\pi^2 r \sin^2(\theta_T/2)} \times \frac{1}{t} \times \{ \ln(c^2 t^2 - r^2) - \ln[c^2 t^2 - 2cr\cos(\beta_R - \theta_R)t + r^2] - \ln[c^2 t^2 - 2cr\cos(\beta_T - \theta_T)t + r^2] \}, \quad (5)$$

式中: $m$ 为常数,为便于分析取值为1。(5)式中各角度与图2中角度相对应。

### 3 紫外光通信中的LDPC码研究

LDPC码几乎适用所有信道,但是应用在紫外

光通信中的研究还很少,并且大多采用OOK调制方式和单一的编译码方式。这里研究了在BPSK副载波调制方式下不同编码效率、不同译码方式、不同紫外光系统设置下LDPC码的性能。

#### 3.1 系统模型

紫外光通信系统框图如图3所示,信源产生信息序列经过LDPC编码后进行BPSK副载波强度调制。副载波强度调制的实质是使用辅助副载波传输数据,对二进制信息进行两次调制。该过程需要有两个载波,一个是电载波也称为副载波,另一个是光载波。首先经过采用BPSK方式的电调制,使用初始相位为 $\pi$ 和0的正弦信号作为载波,对应二进制信息“1”和“0”,然后用电信号对紫外光光源进行强度调制,再将光信号用发射天线发送到大气信道。接收机收到紫外光信号后经过光电倍增管将光信号变换成电信号,再经过电解调和LDPC译码后恢复出二进制信息。

#### 3.2 LDPC编码

进行LDPC编码的关键是产生 $m$ 行 $n$ 列的校验

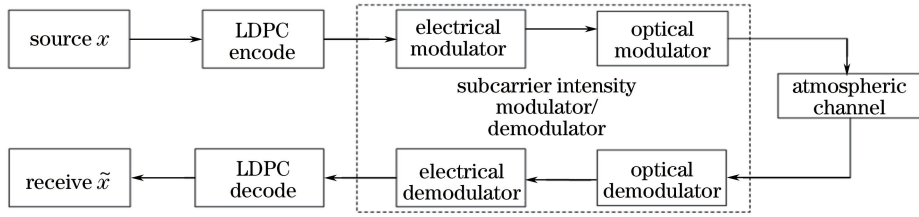


图3 紫外光通信系统框图

Fig. 3 Block diagram of UV communication system

矩阵  $\mathbf{H}_{m \times n}$ , 该矩阵是行重  $\omega_r$  列重  $\omega_c$  列远远小于  $m, n$  的稀疏矩阵,  $m, n$  与  $\omega_r, \omega_c$  之间满足  $m \cdot \omega_r = n \cdot \omega_c$ . 可生成码长为  $n$ 、校验位为  $m$ 、信息位为  $k = n - m$  的 LDPC 码, 可用  $(n, m)$  表示。编码效率简称码率, 若  $\mathbf{H}_{m \times n}$  满秩, 则码率  $R = (n - m) / n = 1 - m / n$ , 若  $\mathbf{H}_{m \times n}$  非满秩, 则  $R > 1 - m / n$ 。

校验矩阵的构造方法主要分为随机构造法和结构化构造法。随机构造法因为没有确定的数学结构, 产生的 LDPC 码没有规律, 所以编码复杂且译码时校验矩阵的存储量大, 实用性有限。而结构化构造的 LDPC 码有一定的规律, 译码过程简单且能实现线性时间译码。这里利用结构化构造的代数法<sup>[20]</sup> 构造行重和列重固定的去四环规则校验矩阵, 首先产生  $m$  行  $n$  列的零矩阵, 接着基于数论中的完全剩余系计算矩阵中 1 的位置, 替换零矩阵中相应位置的元素, 从而生成  $\mathbf{H}_{m \times n}$  矩阵, 该方法易于理解和实现, 且能产生具有不同码率的 LDPC 码。

一般线性分组码编码方法要先计算生成矩阵, 其复杂度与码长平方成正比, 实用性差。这里采用 Richardson 和 Urbanke 提出的 RU 算法, 该算法对  $\mathbf{H}_{m \times n}$  矩阵进行分解和行列重排得到近似下三角矩阵, 使复杂度降低为  $O(n + g^2)$ , 其中  $g$  远小于  $n$ 。编码过程首先对  $\mathbf{H}_{m \times n}$  矩阵进行预处理, 再计算校验信息, 即

$$\mathbf{H}_{m \times n} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{(m-g) \times (n-m)} & \mathbf{B}_{(m-g) \times g} & \mathbf{T}_{(m-g) \times (m-g)} \\ \mathbf{C}_{g \times (n-m)} & \mathbf{D}_{g \times g} & \mathbf{E}_{g \times (m-g)} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{T}$  为对角线上全为 1 的下三角矩阵, 除  $\mathbf{D}$  外其余都为稀疏矩阵。

假设信源  $s$  经过 LDPC 编码成  $\mathbf{x} = [s \quad \mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2]$ ,  $\mathbf{p}_1$  长为  $g$ 、 $\mathbf{p}_2$  长为  $m - g$  均为校验信息, 则

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{ET}^{-1} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{T} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} & \mathbf{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{T} \\ -\mathbf{ET}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{C} & -\mathbf{ET}^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

左乘矩阵是为了判断  $-\mathbf{ET}^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$  是否可逆, 若不可逆则重新生成  $\mathbf{H}_{m \times n}$  矩阵, 若可逆令  $\boldsymbol{\varphi} = -\mathbf{ET}^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$ , 根据  $\mathbf{H} \cdot \mathbf{x}^T = \mathbf{0}^T$  有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{T} \\ -\mathbf{ET}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{C} & -\mathbf{ET}^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s^T \\ \mathbf{p}_1^T \\ \mathbf{p}_2^T \end{bmatrix} = \mathbf{0}^T, \quad (8)$$

解出  $\mathbf{p}_1^T = -\boldsymbol{\varphi}^{-1}(-\mathbf{ET}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{C})s^T$ ,  $\mathbf{p}_2^T = -\mathbf{T}^{-1}(\mathbf{AS}^T + \mathbf{B}\mathbf{p}_1^T)$  编码后码字为  $\mathbf{x} = [s \quad \mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2]$ 。

编码后码字经过紫外光信道是一个与单位脉冲响应卷积的过程, 即对 (5) 式的  $h(t)$  进行采样得到  $h(k)$ , 再与码序列  $s(n)$  进行卷积。忽略光噪声的影响, 将过程中的其他噪声用高斯白噪声  $\omega(n)$  表示, 接收端收到的信号可表示为  $y_n = \sum_{k=1}^L h_k s_{n-k} + \omega_n$ , 式中  $L$  表示码间干扰的程度,  $L$  越大码间干扰越严重。

### 3.3 LDPC 译码

置信传播 (BP) 算法是一种在图模型上进行推断的消息传递算法, 对维数为  $m \times n$  的校验矩阵, 对应的行称为校验节点, 对应的列称为变量节点, 若  $\mathbf{H}_{m \times n}$  的第  $i$  行第  $j$  列元素非零, 则在对应的 Tanner 图上用线连接, BP 译码每次迭代都以概率形式对校验节点和变量节点处理, 计算得到的概率沿着这些连线传递。设  $d$  为发送码字,  $\bar{y}$  为接收到的数据,  $S_i$  是包含  $d_i$  的  $j$  个校验方程, BP 译码的关键公式为

$$\frac{P(d_i = 0 | \bar{y}, S_i)}{P(d_i = 1 | \bar{y}, S_i)} = \frac{1 - P_i}{P_i} \frac{\prod_{j \in D_i} [1 + \prod_{i' \in R_{j\setminus i}} (1 - 2P_{i'})]}{\prod_{j \in D_i} [1 - \prod_{i' \in R_{j\setminus i}} (1 - 2P_{i'})]}, \quad (9)$$

式中:  $P(d_i = 1 | \bar{y}, S_i)$  为收到的数据为  $\bar{y}$  且满足校验方程约束条件下, 码字被判断为 1 的概率;  $P_i$  为若每个发送码字独立不相关时收到的信息被判断为 1 的概率;  $R_{j\setminus i}$  为判断包含码字  $d_i$  的第  $j$  个校验方



程中第  $i$  个比特为 1 的概率;  $R_{j_i}$  为除  $i$  外与校验节点  $j$  相连的变量节点的集合;  $D_i$  表示与变量节点  $i$  相连的校验节点的集合。其本质是将看似独立不相关的  $P_i$  通过  $j$  个校验方程修正为  $P(d_i = 1 | \bar{y}, S_i)$  这类具有相关性的概率, 以降低误码率。置信传播译码算法流程图如图 4 所示。

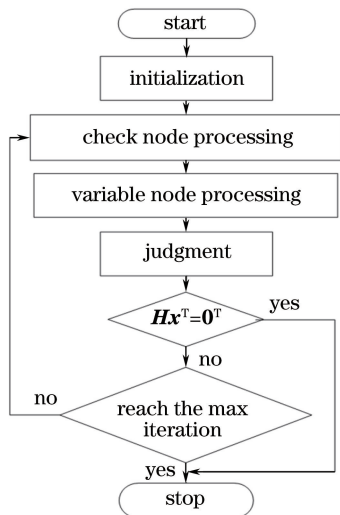


图 4 置信传播译码算法流程图

Fig. 4 Flow chart of belief propagation decoding algorithm

将 BP 算法中的概率消息用似然比表示即为对数似然比置信传播(LLR BP)算法, 这一过程将 BP 算法中的乘法运算变为加法运算, 减少了计算时间。基于 LLR BP 算法对校验节点的消息处理进一步简化则为最小和(Min Sum)算法, 其运算时间进一步减少但译码性能较差。

### 4 仿真及性能分析

基于第 2 节和第 3 节的理论分析, 仿真 NLOS 紫外光通信系统中 LDPC 码的性能, 部分仿真参数如表 1。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Elevation angles of transmitter and receiver	$\beta_T = 60^\circ, \beta_R = 60^\circ$
Half-beam angle of transmitter and half-field of view of receiver	$\theta_T = 15^\circ, \theta_R = 30^\circ$
Extinction coefficient $k_c/m^{-1}$	$0.74 \times 10^{-3}$
Scattering coefficient $k_s/m^{-1}$	$0.49 \times 10^{-3}$
Distance $r/m$	200
Communication rate $R/(bit \cdot s^{-1})$	$10^6$

图 5 为 NLOS 紫外光通信归一化信道脉冲响应。由图可见, NLOS 紫外光通信脉冲响应的时延

较大, 会造成较为严重的码间串扰, 从而导致误码率增大, 因此需要一种有效的手段来减少由于脉冲展宽造成的误码。

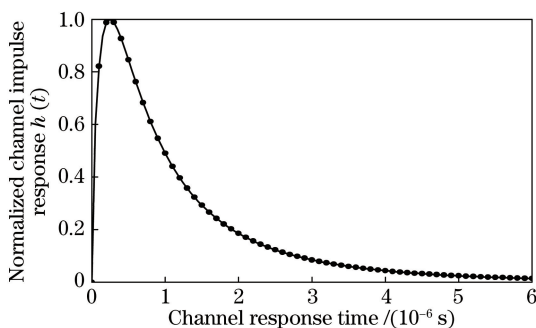


图 5 NLOS 紫外光通信归一化信道脉冲响应

Fig. 5 Normalized channel impulse response of NLOS UV communication

图 6 为  $r = 100 m$  时, LDPC(756, 252) 码在分别采用 OOK 调制和 BPSK 副载波调制下对误码率改善情况。由图可见, 在编码和未编码时, BPSK 副载波调制的误码率曲线均低于 OOK 调制, 相同信噪比下其误码率更小。当误码率为  $10^{-6}$  时, 未编码时 OOK 调制和 BPSK 副载波调制需要的信噪比分别为 22.4 dB 和 17.6 dB, 编码后两种调制方式所需要信噪比分别为 12.6 dB 和 8.3 dB, 即达到相同误码率时 BPSK 副载波调制对信噪比的要求更低, 说明该调制方式优于 OOK 调制方式。

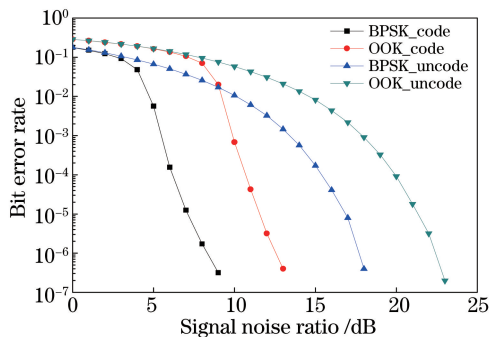


图 6 不同调制方式对系统误码率的影响

Fig. 6 Effect of different modulation methods on bit error rate of system

图 7 为基于 BPSK 副载波强度调制的紫外光系统设置改变对误码率的影响, 编码为 LDPC(756, 252) 码。由图 7(a) 可见, 收发仰角为  $60^\circ$  的误码率大于收发仰角为  $30^\circ$  的误码率, 这是因为随着角度的增大, 信号到达接收端的传输距离增大, 受噪声和大气衰减的影响越大; 由图 7(b) 可见, 发散半角和接收视场半角较大时, 误码率也变大, 虽然增大发散半角和接收视场半角能使公共散射体增大, 但是单

位体积内的光子数减少且光子到达接收端的时延增大造成了严重的脉冲展宽;由图 7(c)可见,误码率随收发端距离的增大而增大,这同样是因为受噪声

和衰减的影响。因此合理设置紫外光通信系统配置能降低误码率,在此基础上加入信道编码技术可进一步优化系统性能。

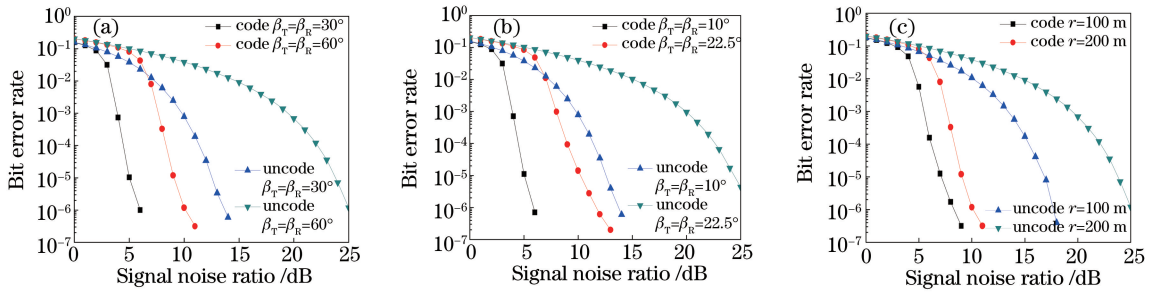


图 7 基于 BPSK 副载波强度调制的紫外光系统设置改变对误码率的影响。

(a)  $\beta_T = \beta_R = 30^\circ, 60^\circ$ ; (b)  $\theta_T = \theta_R = 10^\circ, 22.5^\circ$ ; (c)  $r = 100, 200$  m

Fig. 7 Effect of setting changes on BER of UV system based on BPSK subcarrier intensity modulation.

(a)  $\beta_T = \beta_R = 30^\circ, 60^\circ$ ; (b)  $\theta_T = \theta_R = 10^\circ, 22.5^\circ$ ; (c)  $r = 100, 200$  m

BPSK 副载波强度调制下,不同编码效率和不同译码方式对于 UV 通信误码性能的影响如图 8 所示。图 8(a)为有效位为 504 时,码率  $R$  为 1/2、2/3、3/4 的 LDPC(1008, 504)、(756, 252)、(672, 168) 码与未编码序列误码率的比较。当  $R = 1/2$  时,误码率随信噪比的增大下降最快,随着码率的增大译码性能有所下降,这是因为码率越大用于校验的码元越少,纠错能力减小,即便如此在信噪比大于

14 dB 时,码率为 3/4 的 LDPC 码误码率比未编码时低 3 个量级。图 8(b)为 BP、LLR BP、min\_sum 三种 LDPC 译码算法的对比,BP 和 LLR BP 算法的误码率性能基本一致,min\_sum 算法的性能较差。当信噪比小于 6 dB 时 4 条曲线基本重合,这是因为在低信噪比环境,校验位也可能发生错误,影响了其纠错性能,随着信噪比的增大,译码性能明显提高。

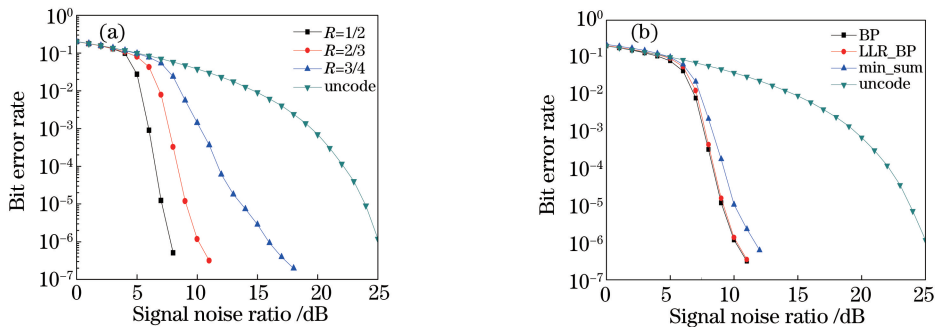


图 8 不同参数下的误码率性能。(a)不同编码效率;(b)不同译码方式

Fig. 8 BER performance for different parameters. (a) Different coding efficiencies; (b) different decoding methods

信噪比固定为 16 dB 时,误码率随距离的变化如图 9 所示。紫外光设备收发端仰角为  $45^\circ$ ,编码采用 LDPC(672, 168) 码,调制方式为 BPSK 副载波强度调制。整体来看,两条曲线误码率均随距离的增加而增加;通信距离较小时误码率较低,并且 LDPC 码纠正了一部分错误码元,因此对应的编码序列误码率很小。误码率为  $6.5 \times 10^{-6}$  时,未编码序列与经过 LDPC 编码序列的通信距离分别约为 74 m 和 150 m,即该条件下的 LDPC 编码可增大通信距离约一倍。

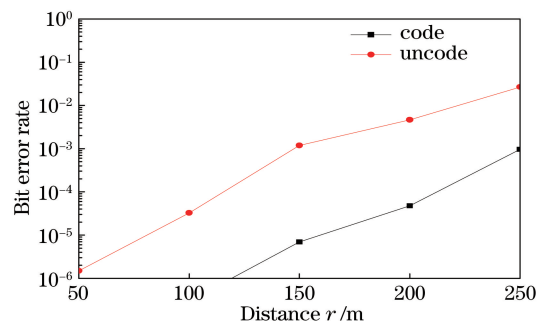


图 9 误码率随通信距离的变化

Fig. 9 Bit error rate versus communication distance

## 5 结 论

在 NLOS 紫外光通信单次散射模型下引入 LDPC 码能使误码率性能和通信距离明显改善, 误码率为  $6.5 \times 10^{-6}$  时, 编码后序列的通信距离比未编码时提高约一倍。仿真结果表明, 相较于 OOK 调制, BPSK 副载波调制误码率更小, 有助于改善系统性能, 并且适当的系统配置能有效降低误码率。编码效率越小时, LDPC 码纠错能力越强, 但用于校验的冗余也越多, 从而会使信道传输效率降低, 选择适合码率的编码时应折衷考虑信息传输有效性和可靠性。译码时, 若对可靠性要求高可选用 BP 或 LLR BP 算法, 若对信息处理时间要求高可选用 min\_sum 算法来译码。

### 参 考 文 献

- [1] Yuan R Z, Ma J S. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication [J]. *China Communications*, 2016, 13(6): 63-75.
- [2] Li H T, Li X Y, Ye Y Z, *et al.* Ultraviolet communication and its military application prospects [J]. *Information & Communications*, 2016(12): 60-62, 66.  
李海涛, 李晓毅, 叶永桢, 等. 紫外光通信及其军事应用前景[J]. *信息通信*, 2016(12): 60-62, 66.
- [3] Song P, Zhou X L, Zhao T F, *et al.* Node design and analysis of communication performance between nodes in ultraviolet mobile ad hoc networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0306004.  
宋鹏, 周显礼, 赵太飞, 等. 紫外光移动自组网节点设计及通信性能分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0306004.
- [4] Song X M, Song F, Song P, *et al.* Routing protocol of ultraviolet space division multiplexing ad hoc network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1006005.  
宋晓梅, 宋菲, 宋鹏, 等. 紫外光空分复用自组网网络路由协议[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1006005.
- [5] Qiang R X, Zhao S H, Liu Y. Influence of pulse broadening on bit error rate of ultraviolet communication[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(5): 559-563.  
强若馨, 赵尚弘, 刘韵. 脉冲展宽对紫外光通信误码率的影响[J]. *激光与红外*, 2015, 45(5): 559-563.
- [6] Liu W K, Zhang F, Wu M L, *et al.* Research on LDPC coding in ultraviolet communication systems and its implementation [J]. *Study on Optical Communications*, 2014, 40(5): 63-65.  
刘文楷, 张锋, 武梦龙, 等. LDPC 码在紫外光通信中的研究实现[J]. *光通信研究*, 2014, 40(5): 63-65.
- [7] Gallager R. Low-density parity-check codes[J]. *IRE Transactions on information theory*, 1962, 8(1): 21-28.
- [8] Wu M L, Han D H, Zhang X, *et al.* Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5422-5430.
- [9] Popoola W O, Ghassemlooy Z. BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(8): 967-973.
- [10] Wang Y, Gu S. Ultraviolet communication system based on BPSK subcarrier intensity modulation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9446: 94461K.
- [11] Reilly D M, Warde C. Temporal characteristics of single-scatter radiation [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1979, 69(3): 464-470.
- [12] Li B F, Wang H X, Liu M, *et al.* Applicability of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter approximation model [J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 31(1): 147-154.
- [13] Han D H, Fan X, Zhang K, *et al.* Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere communication [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(22): 5516-5522.
- [14] Wang X F, Zhang X, Zhang J Z, *et al.* Ultraviolet light atmospheric scattering propagation model based on Monte Carlo method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 110102.  
王晓芳, 张新, 张继真, 等. 基于蒙特卡罗方法的紫外光大气散射传输模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 110102.
- [15] Song P, Ke X Z, Xiong Y Y, *et al.* Pulse broadening effect of non-line-of-sight ultraviolet in noncoplanar communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106004.  
宋鹏, 柯熙政, 熊扬宇, 等. 非直视紫外光在非共面通信系统中的脉冲展宽效应[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106004.
- [16] Hou W J, Liu C H, Lu F P, *et al.* Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter path loss model [J]. *Photonic Network Communications*, 2018, 35(2): 251-257.
- [17] Wang P, Zhang H M, Xu Z Y. Simplified model and

- experimental validation for ultraviolet single-scattering channels [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(8): 080603.
- [18] Luetgen M R, Reilly D M, Shapiro J H. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1991, 8(12): 1964-1972.
- [19] Luo C, Li J Y, Chen X M. Analysis of channel of wireless ultraviolet communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(4): 040602.
- 刘畅, 李霖野, 陈晓敏. 无线紫外通信信道分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(4): 040602.
- [20] Liu B, Tong S, Bai B M. Algebraic construction of low-density parity-check codes without short cycles [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(11): 1778-1782.
- 刘斌, 童胜, 白宝明. 不含小环的低密度校验码的代数构造方法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(11): 1778-1782.