

基于蚁群算法的大气激光通信中 低密度奇偶校验码的盲识别

孙 韩 郝士琦 张 岱 赵青松 王 勇

电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 针对传统线性分组码识别方法对码长较长的低密度奇偶校验(LDPC)码不适用的情况,利用蚁群算法对对偶空间进行优化搜索,完成了对 LDPC 码的识别。建立了大气激光通信信道模型和 LDPC 码的识别模型,给出了大气激光通信湍流信道下校验关系对数似然比函数表达式;将基本蚁群算法与 LDPC 码的识别问题结合,将对数似然比函数经过处理作为目标函数,通过不断迭代每次搜索过程中目标函数最优值和最佳搜索路径,实现对 LDPC 码的识别。仿真结果表明:当码长为 256 时,在弱湍流条件下,当信噪比不低于 8 dB 时,识别率可达 78%;在强湍流条件下,当信噪比不低于 10 dB 时,识别率可达 77%。此外,蚁群算法中的参数设置对算法性能有较大影响,应根据实际情况加以选择。

关键词 光通信;低密度奇偶校验码识别;蚁群算法;优化搜索

中图分类号 TN919 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0906006

Blind Identification of LDPC Codes in Atmosphere Laser Communication Based on Ant Colony Algorithm

Sun Han Hao Shiqi Zhang Dai Zhao Qingsong Wang Yong

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract Given the fact that traditional linear block code identification methods cannot be applied to low density parity check (LDPC) codes, an ant colony algorithm is adopted to optimize the dual space search, so as to realize the LDPC code identification. The atmospheric laser communication channel model and the LDPC codes identification model are established, and the logarithmic likelihood ratio function of calibration relationship under the turbulent atmosphere channel is given. Then the basic ant colony algorithm is combined with LDPC code identification, the logarithmic likelihood ratio function is transformed into the objective function, and the recognition of LDPC codes is realized through continuous iteration for optimal value and optimal search path in the process of ants searching. The simulation results show that under the condition of 256 code length and weak turbulence, when the signal-to-noise ratio (SNR) is not less than 8 dB, the recognition rate can reach 78%; under strong turbulence, when the SNR is not less than 10 dB, the recognition rate can reach 77%. In addition, the parameter settings in the ant colony algorithm have a great influence on the algorithm performance and should be chosen according to actual situations.

Key words optical communications; low density parity check code identification; ant colony algorithm; optimization search

OCIS codes 060.2605; 200.2605; 200.3050; 200.4560; 200.4740

1 引 言

在大气激光通信中,为了克服信道湍流的影响,通常采用信道编码技术。在众多的信道编码中,低密度奇偶校验(LDPC)码作为一类接近香农极限的好码^[1],被广泛应用于大气激光通信系统中。在实际的大气

收稿日期: 2016-03-03; **收到修改稿日期:** 2016-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(61571446)、安徽省自然科学基金(1308085MF83,1408085MF120)

作者简介: 孙 韩(1992—),男,硕士研究生,主要从事大气激光通信方面的研究。E-mail: sunhanATeei@163.com

导师简介: 郝士琦(1963—),女,硕士,教授,博士生导师,主要从事大气激光通信、卫星通信方面的研究。

E-mail: liu_hsq@126.com(通信联系人)

激光通信中,为了节约频带资源,接收方需要根据接收序列直接对 LDPC 码进行识别。于明等^[2]提出了一种 LDPC 码码长和码率的识别方法,即从接收到的硬判决序列出发,通过遍历信道编码预设集合的所有码长和码率得到识别结果,但使用硬判决序列进行识别在一定程度上损失了部分初始信息;于沛东等^[3]提出了利用软判决信息来直接实现对信道编码方式的识别;Xia 等^[4-5]则将这一想法分别引入到对二进制和非二进制 LDPC 码的识别中,实现了对 LDPC 码的识别且取得了很好的效果;包昕等^[6]则对 LDPC 码的闭集识别方法进行了研究,设计了一种闭集集合应用背景下的识别方法。然而这些算法都是在已知校验矩阵集合的背景下展开,远不能达到非合作背景下 LDPC 码的盲识别要求。本文从对偶空间搜索的角度出发,通过对 X 维空间 2^X 组向量(X 为码长)的蚁群优化搜索来寻找校验矩阵,通过不断迭代每次搜索过程中目标函数最优值和最佳搜索路径,实现了校验矩阵的重建。

2 LDPC 码识别模型

大气激光通信通信速率较高,要求所使用的 LDPC 码能够快速和系统化编码。准循环低密度奇偶校验(QC-LDPC)码因其特殊的构造方式能够方便地实现线性复杂度的编码,因此被广泛应用于大气激光通信中。QC-LDPC 码校验矩阵可表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{P_{1,1}} & \mathbf{I}_{P_{1,2}} & \cdots & \mathbf{I}_{P_{1,n}} \\ \mathbf{I}_{P_{2,1}} & \mathbf{I}_{P_{2,2}} & \cdots & \mathbf{I}_{P_{2,n}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{I}_{P_{m,1}} & \mathbf{I}_{P_{m,2}} & \cdots & \mathbf{I}_{P_{m,n}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $P_{i,j} \in [0, q_0], i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n, q_0$ 为一个正整数, $\mathbf{I}_{P_{i,j}}$ 表示一个 $q_0 \times q_0$ 的循环移位矩阵,它由 $q_0 \times q_0$ 大小的单位矩阵 \mathbf{I} 按照行的方向向右移动 $P_{i,j}$ 位产生。将循环右移位数 $P_{i,j}$ 写成一个矩阵 \mathbf{P} , 即

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,n} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{m,1} & P_{m,2} & \cdots & P_{m,n} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

称为基矩阵(或称索引矩阵)。当基矩阵 \mathbf{P} 确定后,校验矩阵 \mathbf{H} 也随之确定。

图 1 为大气激光通信中 LDPC 码的识别问题模型。假设 LDPC 码码型集合为 $\Theta = \{\theta^{(x)} \mid x = 1, 2, \dots\}$, 对于 $\theta^{(x)}$ 型的 LDPC 码,可以由其校验矩阵唯一确定,记为 $\mathbf{H}_x, \mathbf{H}_x$ 的大小为 $m_x \times n_x$ 。对长度为 k 的信息序列 $\mathbf{b}_i = (b_{i,0}, \dots, b_{i,j}, \dots, b_{i,k-1}), b_{i,j} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots$, 采用 $\theta^{(l)}$ 类型的 LDPC 码对其进行编码得到编码序列 $\mathbf{c}_i^{(l)} = (c_{i,0}^{(l)}, \dots, c_{i,j}^{(l)}, \dots, c_{i,nl-1}^{(l)}), c_{i,j}^{(l)} \in \{0, 1\}$, 采用开关键控(OOK)调制,得到发送序列 $\mathbf{x} = (x_{i,1}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{i,nl-1}), x_{i,j} \in \{0, 1\}$, 在接收端得到软判决序列 $\mathbf{r}_i = (r_{i,1}, \dots, r_{i,j}, \dots, r_{i,nl-1}), r_{i,j} \in \mathbf{R}$, 式中 \mathbf{R} 表示实数域。

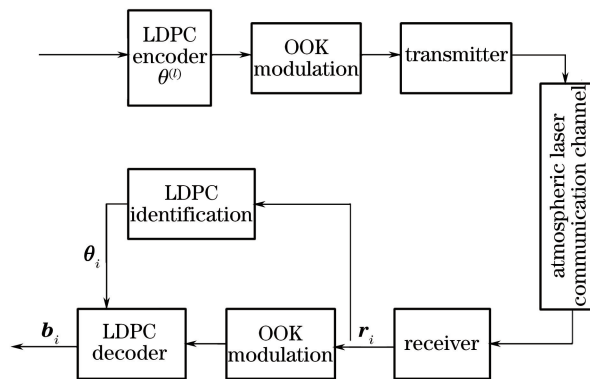


图 1 识别模型

Fig. 1 Recognition mode

推导可得 $\theta^{(x)}$ 型的 LDPC 码校验矩阵 \mathbf{H}_x 中第 w 行行向量 $\mathbf{h}_w^{(x)}$ 的校验关系对数似然比为^[7]

$$\gamma(\mathbf{h}_w^{(x)} \mathbf{c}_i^{(l)} | \mathbf{r}_i) = \left\{ \prod_Y \text{sign}[\gamma(\mathbf{c}_{i,Y}^{(l)} | \mathbf{r}_{i,Y})] \right\} \cdot \min[|\gamma(\mathbf{c}_{i,Y}^{(l)} | \mathbf{r}_{i,Y})|], \quad (3)$$

式中 Y 的所有取值的集合为 $\mathbf{h}_w^{(x)} = 1$ 时对应的列值。在大气激光通信信道模型下对 $\gamma(\mathbf{c}_{i,Y}^{(l)} | \mathbf{r}_{i,Y})$ 进行推导, 可进一步得

$$\gamma(\mathbf{h}_w^{(x)} \mathbf{c}_i^{(l)} | \mathbf{r}_i) = \left[\prod_Y \text{sign}\left(\frac{\eta^2 \alpha^2 - 2\eta\alpha r_{i,Y}}{2\sigma^2}\right) \right] \cdot \min\left(\left|\frac{\eta^2 \alpha^2 - 2\eta\alpha r_{i,Y}}{2\sigma^2}\right|\right), \quad (4)$$

式中 $r_{i,Y}$ 为接收端的输出电平, 可表示为

$$r_{i,Y} = \begin{cases} \eta\alpha I_0 + N, & \text{with signal} \\ N, & \text{no signal} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 I_0 为无湍流情况下接收到的光功率, N 为光电转换过程以及接收机电路等系统引入的加性噪声, 近似服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布, η 为接收机光电转换效率, $\alpha = \frac{I}{I_0}$ 是光强起伏造成的乘性噪声, 在弱湍流条件下服从对数正态分布^[8], 此时 α 的概率密度函数为

$$\rho(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R\alpha} \exp\left[-\frac{\left(\ln\alpha + \frac{1}{2}\sigma_R^2\right)^2}{2\sigma_R^2}\right], \quad (6)$$

式中 σ_R^2 为 Rytov 方差, σ_R 为闪烁指数。在强湍流条件下 $\rho(\alpha)$ 服从 K 分布^[9-10], 此时 α 的概率密度函数为

$$\rho_\alpha(\alpha) = \frac{2T^{\frac{T+1}{2}}}{\Gamma(T)} \alpha^{\frac{T+1}{2}} \mathbf{K}_{T-1}(2\sqrt{T\alpha}), \alpha > 0, \quad (7)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 为 gamma 函数, $\mathbf{K}_{T-1}(\cdot)$ 为 $T-1$ 阶第二类贝塞尔函数。 T 为与闪烁指数 σ_R 有关的信道参数:

$$T = 2/(\sigma_R^2 - 1). \quad (8)$$

在平面波条件下满足

$$\sigma_R^2 = 1.23k^{7/6} L^{11/6} C_n^2, \quad (9)$$

式中 k 为波数, L 为传输距离, C_n^2 为大气折射率结构常数。

定义整个校验矩阵 \mathbf{H}_x 的符合度函数为

$$J^*(\mathbf{H}_x) = \sum_{w=1}^{m_x} \gamma(\mathbf{h}_w^{(x)} \mathbf{c}_i^{(l)} | \mathbf{r}_i). \quad (10)$$

显然, $J^*(\mathbf{H}_x)$ 越大, 表明 \mathbf{H}_x 越接近真正的校验矩阵 \mathbf{H} 。对于盲识别而言, 由于不知道校验矩阵每一行中“1”所在的具体位置, 因此 $J^*(\mathbf{H}_x)$ 无法计算。对于一般的线性分组码来说, 最简单的想法是对校验矩阵的每一个位置进行二进制的遍历, 但是对于长码长的 LDPC 码来说, 这种方法的运算量显然是无法接受的。因此可以考虑使用优化搜索算法进行搜索, 蚁群算法就是其中的典型代表。

3 基于蚁群算法的 LDPC 码识别

蚁群优化(ACO)搜索算法由意大利学者 Colormi、Dorigo 和 Maniezzo 于 1992 年首次提出^[11-13]。它是一类模拟蚁群觅食行为的仿生学算法, 通过候选解群体的进化过程来寻求最优解, 该算法具有并行性、算法简单和求解效率高等特点。蚁群算法的本质是通过目标函数不断地迭代、优化来寻求最优解, 而且由于信息激素的存在, 每一次的迭代都会对下一次迭代起到促进作用, 使蚂蚁迅速寻求到最优解和最优解的路径, 可利用这一思想实现对对偶空间的快速搜索, 以寻找校验向量。

为方便对对偶空间进行搜索, 做如下规定: 1) 基矩阵 \mathbf{P} 中元素 $P_{i,j}$ 对大小为 $q_0 \times q_0$ 的扩展矩阵而言, 当 $P_{i,j} = \mu, \mu \in [1, q_0]$ 时, 表示将大小为 $q_0 \times q_0$ 的单位矩阵向右循环移位 μ 位; 当 $P_{i,j} = \mu, \mu = q_0 + 1$ 时, 表示此时所对应的单位阵退化为全零矩阵; 2) 目标函数值 $F(x)$ 取为 $1/J^*(\mathbf{H}_x)$ 。

如图 2 所示, 基矩阵元素 $P_{i,j}$ 的取值范围为 $1 \sim q_0 + 1$, 初始时刻将 Z 只蚂蚁随机置于 $P_{1,1}$ 的 $q_0 + 1$ 个位置上, 随后每一只蚂蚁对每一个 $P_{i,j}$ 进行遍历。第 k 只蚂蚁在 t 时刻、取值由 $i \rightarrow j$ ($1 \leq i \leq q_0 + 1, 1 \leq j \leq q_0 + 1$) 的概率为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^{\alpha'}(t) \cdot \eta_{ij}^{\beta'}(t)}{\sum_{s \in d_k} \tau_{is}^{\alpha'}(t) \cdot \eta_{is}^{\beta'}(t)}, & \text{if } j \in d_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

式中 $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 (i, j) 上信息素的强度, η_{ij} 为路径 (i, j) 的能见度, d_k 为蚂蚁 k 下一步可以选择的位置, α' 为轨迹重要性因子, β' 为能见度重要性因子。

每只蚂蚁据此遍历 $P_{i,j} (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n)$ 完成一次周游。每只蚂蚁完成遍历后, 计算由 $P_{i,j}$ 所确定的校验矩阵 \mathbf{H}_x , 并计算目标函数 $F(x)$ 的值。根据

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}, \quad (12)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^Z \Delta\tau_{ij}^{(k)}, \quad (13)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{(k)} = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{the } k_{\text{th}} \text{ ant go through } (i, j) \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (14)$$

更新各个变量的值, 式中 $\Delta\tau_{ij}$ 为在本次循环中路径 (i, j) 的信息增量, ρ 为持久性系数, L_k 为第 k 只蚂蚁所走过的路径长, Q 为常数。在未达到最大搜索次数时不停地迭代。因此, 基于蚁群算法的对偶空间的搜索算法可总结如下:

- 1) 设定各个变量的初始值, 即蚂蚁数量 Z 最大迭代次数 $N_{c_{\max}}$ 、常数 Q 及持久性系数 ρ , 并将路径 (i, j) 的信息素强度 $\tau_{ij}(t)$ 设为常数, 增量 $\Delta\tau_{ij}$ 设为常数;
- 2) 迭代次数 n_c 的初值赋为 0, 将 Z 只蚂蚁任意置于 q_0+1 个顶点上;
- 3) 将各个蚂蚁的初始出发位置记录于各自的解路径中, 对于第 k 只处在顶点 i 的蚂蚁按照概率 $p_{ij}^{(k)}(t)$ 选择下一个顶点 j , 并把 j 也置于当前解路径;
- 4) 计算各个蚂蚁解路径对应的校验矩阵 \mathbf{H}_x 以及目标函数值 $F(x)$, 记录当前的最优解;
- 5) 按照更新方程修改轨迹强度;
- 6) 对各路径 (i, j) , 置 $\Delta\tau_{ij}$ 趋于 0, $n_c = n_c + 1$;
- 7) 若 $n_c \leq N_{c_{\max}}$ 则继续进行搜索, 否则停止搜索;
- 8) 输出目前的最优解路径。

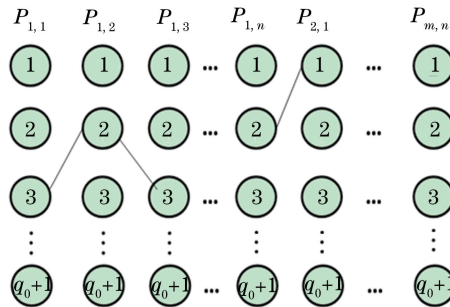


图 2 对偶空间搜索示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual space search

4 仿真结果与分析

4.1 算法有效性分析

图 3 给出了在不同大气湍流条件、不同码长 X 下本文算法与传统的矩阵分析算法的性能对比示意图, 其中 method 1 为本文所提出的算法, method 2 为矩阵分析算法, 仿真中各参数设置如表 1 所示。

由图 3 可以看出, 所提算法在弱、强湍流条件下均可以对 LDPC 码进行有效的识别, 且性能均优于矩阵识别算法; 码长为 256 时, 在弱湍流条件下, 信噪比不低于 8 dB 时, 识别率可达 78%, 在强湍流条件下, 信噪比不低于 10 dB 的情况下, 识别率可达 77%; 码长为 1152 时, 在弱湍流条件下, 信噪比不低于 8 dB 时, 识别

率可达 81%，在强湍流条件下，信噪比不低于 10 dB 的情况下，识别率可达 80%。特别地，随着码长的增加，本文算法识别性能基本稳定，而传统的矩阵分析算法性能会迅速恶化，这是因为码长越长，矩阵识别算法对误码率的要求越高，在相同信噪比的条件下识别率会快速下降，这也是传统识别方法对长码长 LDPC 码识别不适用的主要原因。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting

Turbulence	C_n^2	σ_k^2	λ / nm	L / km	Z	ρ	N_{c_max}	Q
Weak	5×10^{-15}	0.21	1500	1.5	17	0.8	100	500
Strong	10^{-13}	4.20	1500	1.5	17	0.8	100	500

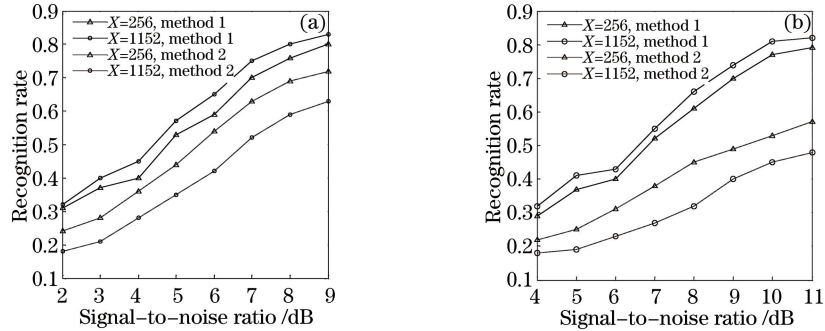


图 3 不同湍流条件、不同码长下识别率分布。(a)弱湍流条件；(b)强湍流条件

Fig. 3 Recognition rate under different turbulent conditions and different code lengths.

(a) Weak turbulence; (b) strong turbulence

4.2 蚁群算法参数设置对识别性能的影响

表 2~4 分别给出了在码长 $X = 256$ 时蚁群算法中各参数的大小对算法识别性能的影响情况。由表 2

表 2 不同蚂蚁数量 Z 对算法性能的影响

Table 2 Influence of ants' number Z on the algorithm

Ants' number	Best $F(x)$	Worst $F(x)$	Recognition ratio
17	0.0054	0.1366	0.27
34	0.0054	0.0361	0.51
51	0.0054	0.0258	0.66
68	0.0054	0.0248	0.87
85	0.0054	0.0198	0.91

表 3 衰减系数 ρ 对算法性能的影响

Table 3 Influence of attenuation coefficient ρ on the algorithm

ρ	Best $F(x)$	Worst $F(x)$	Recognition ratio
0.6	0.0054	0.0642	0.34
0.7	0.0054	0.0464	0.52
0.8	0.0054	0.0448	0.77
0.9	0.0054	0.0179	0.92
0.95	0.0054	0.0248	0.89

表 4 信息量 Q 对算法性能影响

Table 4 Influence of information content Q on the algorithm

Q	Best $F(x)$	Worst $F(x)$	Recognition ratio
500	0.0054	0.0562	0.71
1000	0.0054	0.0324	0.74
1500	0.0054	0.0283	0.82
2000	0.0054	0.0252	0.87
2500	0.0054	0.0346	0.84

可知,蚂蚁数目越大效果越好,但是蚂蚁数目变大后,蚁群算法的收敛速度会下降,在一定程度上会延长运行时间。由表 3 可知, $\rho=0.9$ 时算法效果最好, ρ 过大或者过小都会影响算法效果; $\rho\tau_{ij}(t)$ 太小,表示以前的信息素影响力较小,体现不出蚁群算法的优点; $\rho\tau_{ij}(t)$ 太大,表示以前的信息素影响力较大,体现不出每次蚂蚁运动后的影响。 Q 值与 ρ 值分析类似,过大或者过小都不合适,由表 4 可知 $Q=2000$ 时效果最好。

5 结 论

在大气激光通信信道模型的基础上给出了校验关系后验概率函数,将其处理后作为蚁群算法的目标函数进行迭代,实现了校验矩阵的重建。仿真结果表明,所提算法在大气弱、强湍流条件下,均能够对 LDPC 码进行有效的识别,与现有的识别算法相比,进一步降低了识别问题对先验知识的要求,可为未来大气激光通信中 LDPC 码的识别问题提供参考。下一步可以考虑将优化的蚁群算法引入识别问题,在保持算法识别性能的基础上进一步解决蚁群算法的全局收敛以及迭代速度慢的问题;此外,可以考虑将识别对象从结构化构造的 LDPC 码向一般形式的 LDPC 码过渡,进一步扩大识别范围。

参 考 文 献

- 1 Yuan Jianguo, Liu Wenlong, Huang Sheng, *et al.* A novel construction method of QC-LDPC code based on finite field additive group for optical communication[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(1): 75-78.
袁建国, 刘文龙, 黄 胜, 等. 光通信中基于有限域加群的一种 QC-LDPC 码[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(1): 75-78.
- 2 于 明, 高新华, 杜宇峰. 一种容误码的 LDPC 码编码码长和码率的识别方法: 201210384717.1[P]. 2013-02-06.
- 3 Yu Peidong, Li Jing, Peng Hua. A novel algorithm for channel coding recognition using soft-decision [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(2): 301-306.
于沛东, 李 静, 彭 华. 一种利用软判决的信道编码识别新算法[J]. *电子学报*, 2013, 41(2): 301-306.
- 4 Xia T, Wu H C. Novel blind identification of LDPC codes using average LLR of syndrome a posteriori probability[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 632-640.
- 5 Xia T, Wu H C. Blind identification of nonbinary LDPC codes using average LLR of syndrome a posteriori probability[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(7): 1301-1304.
- 6 Bao Xin, Wang Da, Liu Wanyue. A finite set recognition algorithm of LDPC coding by using soft-demodulation sequence [J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 55(1): 55-60.
包 昕, 王 达, 刘婉月. 利用软解调序列的 LDPC 码闭集识别方法[J]. *电讯技术*, 2015, 55(1): 55-60.
- 7 Liu Haida, Li Jing, Peng Hua. Identification algorithm for LDPC codes using maximum deviation ratio[J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, 30(8): 908-912.
刘海达, 李 静, 彭 华. 利用最大偏差比的 LDPC 码识别算法[J]. *信号处理*, 2014, 30(8): 908-912.
- 8 Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihou. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0606002.
李 菲, 吴 毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0606002.
- 9 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun, *et al.* Probability distribution of laser irradiance scintillation in a real turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(1): 81-86.
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春, 等. 实际大气中激光闪烁的概率分布[J]. *光学学报*, 1999, 19(1): 81-86.
- 10 Niu M, Cheng J, Holzman J F. Exact error rate analysis of equal gain and selection diversity for coherent free-space optical systems on strong turbulence channels[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13915-13926.
- 11 Xue Qiushi. The research on the constraint solving algorithms based on ant colony optimization[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 4-6.
薛秋实. 基于蚁群优化的约束求解算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 4-6.
- 12 Zhang Pinjie. Research on ant colony optimization and its applications[D]. Changsha: Central South University, 2010: 6-10.
张频捷. 蚁群优化算法及其应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 6-10.
- 13 Cui Lili. Ant colony algorithm for solving the weapon-target assignment problem [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 32-37.
崔莉莉. 基于蚁群算法的武器-目标分配问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 32-37.
- 14 Bao Xin, Zhou Leike, He Ke, *et al.* A method of restructuring LDPC parity-check matrix[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, 45(2): 191-196.
包 昕, 周磊珂, 何 可, 等. LDPC 码稀疏校验矩阵的重建方法[J]. *电子科技大学学报*, 2016, 45(2): 191-196.