

大气弱湍流信道无线光副载波调制识别研究

陈丹 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 基于无线光通信链路噪声特性,建立了大气信道等效数学模型。分析了弱湍流信道下多进制相移键控(MPSK)副载波调制信号星座图,采用近邻聚类法在不同光强起伏方差下对副载波 MPSK 调制信号进行了星座图识别研究。在弱湍流信道下, $M \leq 8$ 的 MPSK 调制信号均能获得较高的识别率,达到 88% 以上,而随着湍流强度的增加,星座图聚敛性变差,采用聚类分析法的 16PSK 调制信号识别率有所下降。仿真结果表明该方法复杂度低,对无线光副载波调制通信信号识别具有一定的应用前景。

关键词 光通信;弱湍流;副载波调制;聚类分析;星座图识别

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.070601

Modulation Recognition of Wireless Optical Communication Using Subcarrier Modulation Over Atmosphere Weak Turbulence Channel

Chen Dan Ke Xizheng

(School of Automation and Information, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract Based on noise characteristics of wireless optical communication, atmospheric channel model is established. Clustering analysis in constellation is used in subcarrier M -ary phase shift keying (MPSK) modulation under different scintillation distribution. While turbulence intensity is weak, MPSK ($M \leq 8$) modulation signal could get high recognition rate arriving 88%. With the increasing of turbulence intensity, clustering performance of constellation becomes poor, and the recognition rate of 16PSK decreases. The simulation results show that the method studied here has certain applied prospect in subcarrier modulation signal recognition over wireless optical communication.

Key words optical communications; weak turbulence; subcarrier modulation; clustering analysis; constellation recognition

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 200.2605

1 引言

大气无线光通信具有频率高、方向性强、容量大、保密性好、无须频率申请、造价低和室外设备安装方便等优点,是一种具有广泛应用前景的通信技术。可靠、高效和抗干扰性能强的调制技术是进行高传输率和低误码率通信的保证。无线光通信普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统,开关键控(OOK)作为无线光通信主要调制方案,受大气闪烁的影响较大^[1]。副载波强度调制是一种有效的战胜大气湍流的调制方法,文献[2~4]已经证实了在大气湍流环境下,副载波相移键控(PSK)调制的性能优于OOK调制。

调制识别技术在技术侦察、通信对抗和电子战等领域中都占据着重要地位。星座图提供了信号的结构以及各种不同调制状态的关系,将星座图检测运用于调制方式识别的方法实际上是将一般的模式识别问题

收稿日期: 2012-03-16; 收到修改稿日期: 2012-03-28; 网络出版日期: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(60977054)、陕西省教育厅科技专项基金(11JK1010)、西安市科技计划(CXY1120③)、西安理工大学科技创新研究计划(105-211014)、陕西省自然科学基金(2012JQ8004)和西安理工大学高层次人才科研基金(105-211202)资助课题。

作者简介: 陈丹(1975—),女,博士,讲师,主要从事大气激光通信及信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: chdh@xaut.edu.cn

转化为形状匹配的问题,因此,基于星座图聚类的方法成为微波通信数字幅相调制信号识别的重要方法之一。大气信道是一种有记忆的时变信道,大气散射和大气湍流对调制信号星座图形状的影响较大,所造成的相位模糊、偏移以及多普勒频移给星座图检测带来巨大困难。基于前期无线光通信大气信道建模和数字副载波调制的研究基础上,本文对大气湍流信道下多进制副载波相移键控调制信号的星座图检测采用近邻聚类方法进行了研究,通过对多进制相移键控(MPSK)调制标准星座图圆心和半径的设置给出聚类中心和范围,在大气湍流信道不同光强起伏方差下进行了四种相移键控调制信号星座图类内识别实验。

2 大气传播信道及系统模型

对于大气无线光通信系统,其噪声主要包括了背景光噪声和接收机噪声以及大气湍流引起的大气闪烁。大气湍流是由于大气温度和大气压强的微小变化引起的大气折射率在时间和空间上随机起伏,在直接探测强度调制系统中影响通信性能最主要的因素是强度起伏即光强闪烁,它服从对数正态分布,闪烁会导致比特错误概率的增加。很多科研人员针对湍流信道条件下光强闪烁的数学模型进行了研究,其中 Rytov 提出的弱湍流下光强的对数正态分布模型受到了学术界的普遍认可,这里仅考虑大气弱湍流对光通信的影响。

弱湍流信道下,对于光强度调制(IM/DD)通信系统,接收光功率 $P(t)$ 为

$$P(t) = A(t)P_s(t) + n(t), \quad (1)$$

式中 $P_s(t)$ 为无湍流下的接收光功率, $n(t)$ 为高斯白噪声, $A(t)$ 为等概率过程引起的光强起伏,其对数振幅起伏 $X = \ln(A/A_0)$ 服从高斯分布,由文献[5]概率密度函数:

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_X}} \exp\left\langle -\frac{(X - \langle X \rangle)^2}{2\sigma_X^2} \right\rangle, \quad (2)$$

式中 $\langle X \rangle$ 为对数振幅起伏 X 的均值, σ_X^2 为对数振幅起伏 X 的方差。

光强 I 和对数振幅起伏 X 的关系:

$$I = I_0 \exp(2X - 2\langle X \rangle), \quad (3)$$

其中 $I_0 = A_0^2$ 为自由空间(无湍流)时的光强。

由(2)式和(3)式可知光强的均值为

$$\langle I \rangle = \langle I_0 \exp(2X - 2\langle X \rangle) \rangle = I_0 \exp(2\sigma_X^2). \quad (4)$$

因此,可推出接收光强满足对数正态分布:

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln I} I}} \exp\left\langle -\frac{[\ln(I/I_0) + \sigma_{\ln I}^2/2]^2}{2\sigma_{\ln I}^2} \right\rangle, \quad (5)$$

式中 $\sigma_{\ln I}^2 = 4\sigma_X^2$,对数正态分布仅适用于 $\sigma_X^2 \leq 0.3$ 的弱起伏区^[6]。

假设系统接收机采用 APD 探测器,由 APD 接收机的暗电流和热噪声引起的接收机信号计数的波动可用一个高斯随机过程来模拟^[6,7],其中文献[8]详细分析了背景光计数的概率密度函数。对于大气无线光通信系统,考虑的系统噪声主要包括背景光噪声、APD 噪声等加性噪声以及基于对数正态分布的乘性噪声大气闪烁,因此,大气信道等效的数学模型框图^[5,9,10]可表示为:

图 1 中 $x(t)$ 表示发射信号, $y(t)$ 为接收机接收信号, $I(t)$ 和 $n(t)$ 分别为信道的乘性和加性噪声。加性噪声独立于发送光信号,而乘性噪声大气闪烁并不独立于发送光信号,它和信号的有无及大小有关,当发送“0”比特信号光时,噪声干扰也就不存在了。并且随着对数振幅起伏均方差的增大,通信链路中传输比特的错误概率增加,通信性能进一步恶化。由图 1 可知, $y(t) = I(t)x(t) + n(t)$,其中乘性噪声 $I(t)$ 是信道状态信息,表征为大气的湍流强度,弱湍流情况下服从对数正态分布,其均值为 $\exp(-2\sigma_X^2)$,方差为 $2\sigma_X^2$ 。本文研究弱湍流情况,加性噪声 $n(t)$ 满足均值为 0,方差为 σ^2 的高斯分布随机过程。

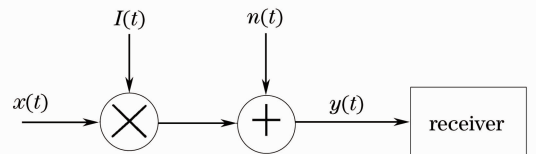


图 1 大气信道等效数学模型框图

Fig. 1 Block diagram of atmospheric-channel equivalent mathematical model

副载波强度调制/直接检测无线激光通信系统框图如图 2 所示。先将二进制比特信息进行高频副载波

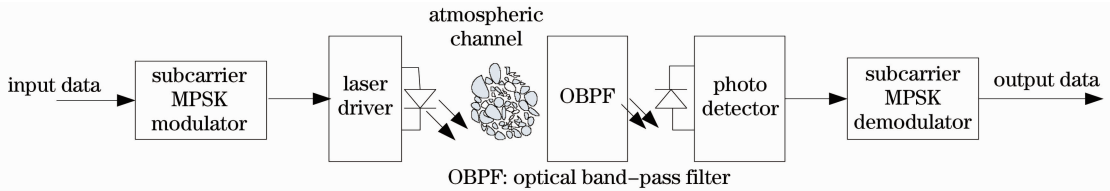


图2 无线光副载波调制系统框图

Fig. 2 Wireless optical communication system on subcarrier modulation

MPSK 电调制, 然后对光源进行强度调制, 通过发射天线进入大气信道, 接收端通过 APD 光电探测器进行光电转换, 再通过电解调还原出信息比特。

3 星座图调制识别

3.1 距离聚类法

聚类分析就是根据模式之间的相似性对模式进行分类, 是一种非监督分类方法^[11]。聚类分析目前的主要应用于模式识别系统的训练, 形成多个参考模式。其中相似性的含义为有 n 个特征值则组成 n 维向量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 称为该样本的特征向量。它相当于特征空间中的一个点, 点间的距离函数作为模式相似性的测量, 以“距离”作为模式分类的依据, 距离越小, 越“相似”。相似性测度就是衡量模式之间相似性的一种尺度。

设 X_1, X_2 为两个 n 维模式样本 $X_1 = [x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}]^T, X_2 = [x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}]^T$, 则它们的欧氏距离为:

$$D(X_1, X_2) = \|X_1 - X_2\| = \sqrt{(X_1 - X_2)^T (X_1 - X_2)} = \sqrt{(x_{11} - x_{21})^2 + \dots + (x_{1n} - x_{2n})^2}, \quad (6)$$

其中距离越小, 越相似。需要注意的是: 各特征向量对应的维上应当是相同的物理量, 某些维上物理量采用的单位发生变化, 会导致对同样的点集出现不同聚类结果的现象。

聚类的准则是根据相似性测度确定的衡量模式之间是否相似的标准, 即把不同模式聚为一类还是归为不同类的准则。确定聚类准则的两种方式:

- 1) 阈值准则: 根据规定的距离阈值进行分类的准则;
- 2) 函数准则: 利用聚类准则函数进行分类的准则。

聚类准则函数是在聚类分析中, 表示模式类间相似或差异性的函数。它应是模式样本集 $\{X\}$ 和模式类别 $\{S_j, j = 1, 2, \dots, c\}$ 的函数, 可使聚类分析转化为寻找准则函数极值的最优化问题。一种常用的指标是误差平方之和, 其聚类准则函数为

$$J = \sum_{j=1}^c \sum_{X \in S_j} \|X - M_j\|^2, \quad (7)$$

式中 c 为聚类类别的数目, $M_j = \frac{1}{N_j} \sum_{X \in S_j} X$ 为属于 S_j 集的样本的均值, N_j 为 S_j 中样本数目。 J 代表了分属于 c 个聚类类别的全部模式样本与其相应类别模式均值之间的误差平方和, 它适用于各类样本密集且数目相差不多, 而不同类间的样本又明显分开的情况。

3.2 近邻聚类法

近邻聚类法^[12] 一般解决的问题是有 N 个待分类的模式 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 要求按距离阈值 T 分类到以 Z_1, Z_2, \dots 为聚类中心的模式类中等问题。它的算法描述为: 任取样本 X_i 作为第一个聚类中心的初始值, 如令 $Z_1 = X_1$ 。计算样本 $X_2 \sim Z_1$ 得到欧式距离 $D_{21} = \|X_2 - Z_1\|$, 若 $D_{21} > T$, 定义一个新的聚类中心 $Z_2 = X_2$; 否则 X_2 属于以 Z_1 为中心的聚类。

假设已有聚类中心 Z_1, Z_2 , 计算 $D_{31} = \|X_3 - Z_1\|$ 和 $D_{32} = \|X_3 - Z_2\|$, 若 $D_{31} > T$ 且 $D_{32} > T$, 则建立第三个聚类中心 $Z_3 = X_3$; 否则 X_3 属于 Z_1 和 Z_2 中最近者(最近邻的聚类中心)。以此类推, 直到将所有的 N 个样本都进行分类, 它具有计算简单的优点。但也有一定的局限性, 就是很大程度上依赖于第一个聚类中心的位置选择、待分类模式样本的排列次序、距离阈值 T 的大小以及样本分布的几何性质等。用先验知识指导阈值 T 和起始点 Z_1 的选择, 可获得合理的聚类结果。否则只能选择不同的初值重复试探, 并对聚类结果

进行验算,根据一定的评价标准,得出合理的聚类结果。

4 星座图检测仿真分析

4.1 无噪和大气信道下 MPSK 星座图

图 3 给出了无噪情况下 2PSK、4PSK、8PSK 及 16PSK 星座图。其中,2PSK 相位为 $\pi/2, 3\pi/2$, 4PSK 相

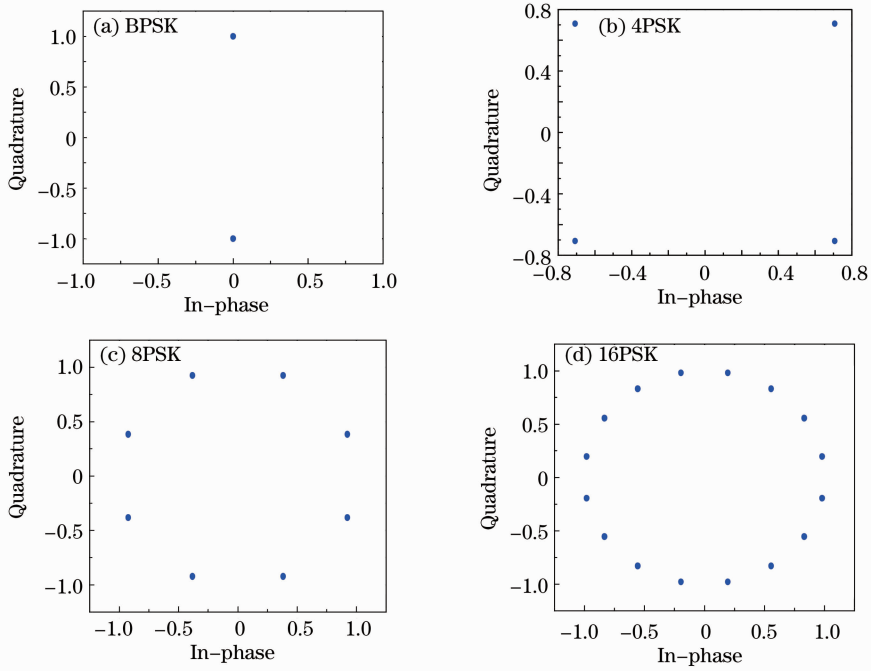


图 3 无噪下副载波 MPSK 调制信号星座图

Fig. 3 Constellation of subcarrier MPSK modulation signals without noise

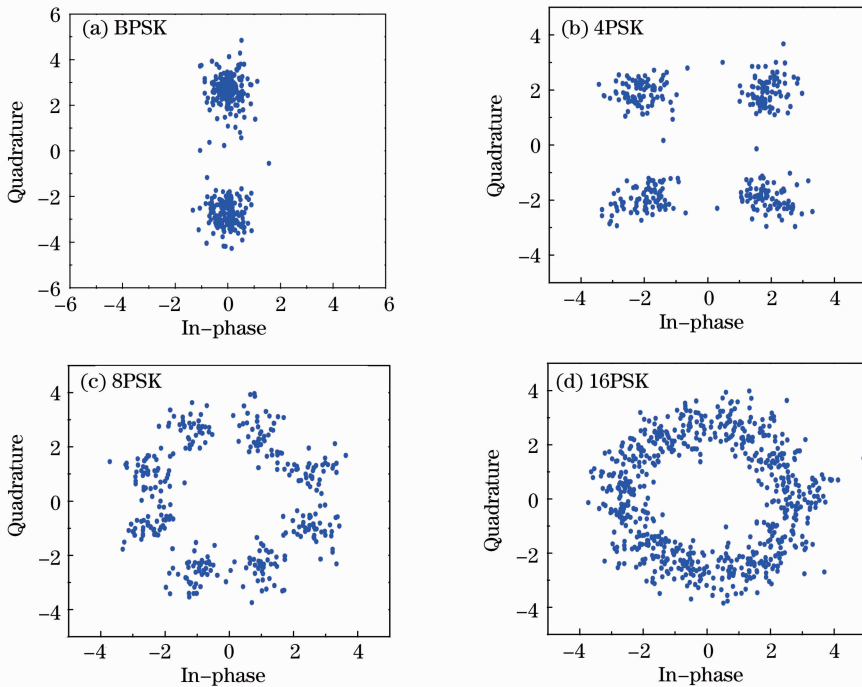


图 4 副载波 MPSK 调制信号经过大气信道后星座图

Fig. 4 Constellation of subcarrier MPSK modulation signals over atmospheric channel

位为 $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4, 8\text{PSK}$ 相位为 $\pi/8, 3\pi/8, 5\pi/8, 7\pi/8, 9\pi/8, 11\pi/8, 13\pi/8, 15\pi/8, 16\text{PSK}$ 相位为 $n\pi/16, n$ 取 $1\sim 31$ 的正奇数。

图 4 给出了当 MPSK ($M=2, 4, 8, 16$) 副载波调制信号通过大气信道后的星座图, 其中大气光强起伏方差 $\sigma_x^2=0.1$, 信噪比 (SNR) 为 10 dB。将图 3 与无噪声时 MPSK 信号星座图 (图 2) 相比较, 发现经过大气信道后的信号星座图聚类中心都产生了一定的相位偏移, 而且偏移的大小取决于光强起伏方差, 光强起伏方差越大, 聚类中心的相位偏移越大, 星座图包络已不再是圆形, 如 QPSK 星座图是四角相对对外发散的近似椭圆形。

因此, 对 MPSK ($M=2, 4, 8, 16$) 调制信号的星座图可采用近邻聚类原理进行分类识别。但是, 一般的最近邻聚类需要根据算法要求不断地定义新的聚类中心。而对于 MPSK 调制的星座图而言, 每个不同进制的调制方式的星座图具有不同个数的聚类中心。因此, 本文取在理想的不加噪声情况下的各个进制调制标准相位点为聚类中心, 再加上适当的相位偏移量得到新的聚类中心, 通过对星座图每个符号与聚类中心的距离与阈值半径进行比较, 就可以得到满意的聚类效果。在信号经过大气信道后, 各个抽样点受到大气湍流的影响后, 将偏离初始相位, 但其由于受到调制特性的影响会分布在聚类中心的周围。

我们知道 2PSK, 4PSK, 8PSK, 16PSK 分别有 2、4、8、16 个聚类中心。在这里用到的是最近邻识别中的阈值准则, 即根据规定的距离阈值进行分类, 因此阈值的选取对于识别的准确率起着非常重要的作用。图 5 所示为大气信道下 2PSK, 4PSK, 8PSK, 16PSK 的用于调制识别的标准星座图, 其中, 圆心为聚类中心 (Z (2PSK 的聚类中心有 2 个, 4PSK 有 4 个, 8PSK 有 8 个, 16PSK 有 16 个), 圆的半径为用于识别的阈值, 对应不同调制方式依次为 T_1, T_2, T_3, T_4 。图 5 中所示最大的两个圆对应于 2PSK, 16 个最小的圆对应于 16PSK, 其余的依次类推。

4.2 弱湍流信道下 MPSK 星座图识别

本实验星座图识别聚类算法的过程为: 计算每一个抽样点到每一个不同调制类型聚类中心的欧氏距离, 任何一个抽样点到任何一个聚类中心的欧式距离将与每一个不同调制类型的判别阈值即圆的半径进行比较, 做出一次抽样判断。判别的标准是, 在总共的抽样点中, 对于 2PSK、4PSK、8PSK 和 16PSK 四种不同的调制方式, 哪一种调制方式有更多的抽样点到其聚类中心 Z 的欧氏距离小于其判别阈值 T , 就可以判定它属于哪一种调制类型。

对经过大气湍流信道后所接收的四种不同进制 2、4、8、16 的 MPSK 信号星座图进行类内识别研究, 其中信噪比为 10 dB, 大气光强起伏方差分别取 $\sigma_x^2=0.1, \sigma_x^2=0.15, \sigma_x^2=0.2$ 和 $\sigma_x^2=0.25$ 。识别实验中采用蒙特卡洛方法取四种调制星座图共 200 个样本进行测试, 每种调制类型样本数均为 50 个, 数据长度为 600。经过多次实验证明, 大气弱湍流信道下用于识别的标准星座图四种调制对应的圆心坐标值均取为无噪声下星座图圆心坐标值的 3 倍, 2PSK、4PSK、8PSK 和 16PSK 标准星座图的半径阈值分别取 $T_1=1, T_2=1/\sqrt{2}, T_3=1/2, T_4=1/\sqrt{8}$ 时可以采用聚类法获得较好的识别效果。其中取 $\sigma_x^2=0.2$ 时的各调制信号星座图及标准星座图模板如图 6 所示, 图中横轴为同相, 纵轴为正交, 四种光强起伏方差下的识别结果如表 1 所示。

从表 1 中的识别结果来看, 对于 $\sigma_x^2 < 0.3$ 的弱湍流信道, 近邻聚类识别法对于 2PSK、4PSK 和 8PSK 星座图有很高的识别率, 当 $\sigma_x^2=0.25$ 时, 其识别率分别可达到 100%、100% 和 88%。而对于 16PSK 信号星座图, 因为随着湍流强度的增加, 星座图聚敛性变差, 因此在光强起伏 $\sigma_x^2=0.2$ 时, 其识别率仅达到 62%。在中、强湍流情况下, 星座图相位偏移增大且聚敛性变差, 星座图识别实验中标准星座图四种调制分别对应的圆心坐标值和阈值半径取值都应有所增大。

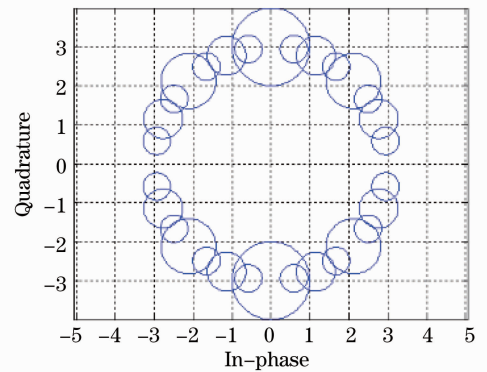


图 5 大气信道下用于识别的标准星座图

Fig. 5 Standard constellation chart used in recognition over atmospheric channel

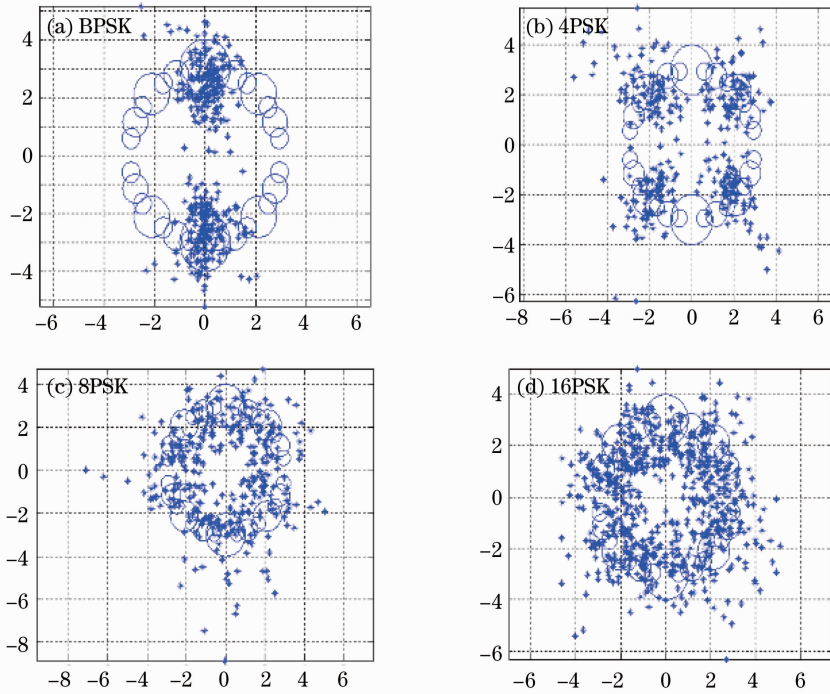


图 6 各调制信号星座图及标准星座图

Fig. 6 Each constellation of the various modulated signals and standard constellation charts

表 1 不同起伏方差下基于星座图的识别结果

Table 1 Recognition results based constellation chart under different scintillation variance

Modulation type	Recognition results															
	$\sigma_x^2 = 0.1$				$\sigma_x^2 = 0.15$				$\sigma_x^2 = 0.2$				$\sigma_x^2 = 0.25$			
	2PSK	4PSK	8PSK	16PSK	2PSK	4PSK	8PSK	16PSK	2PSK	4PSK	8PSK	16PSK	2PSK	4PSK	8PSK	16PSK
2PSK	100%				100%				100%				100%			
4PSK		100%				100%				100%				100%		
8PSK			100%				100%				100%		2%		88%	10%
16PSK				100%	10%	2%	2%	86%	34%		4%	62%				

5 结 论

本文主要讨论了在大气弱湍流信道下 MPSK ($M \leq 16$) 无线光副载波调制信号类内识别方法。从识别结果来看,在弱湍流下本文所设计的近邻聚类识别方法简单,可以有效用于 $M \leq 8$ 的 MPSK 星座图识别,获得较高的正确识别率,光强指数 $\sigma_x^2 = 0.25$ 时可达 88% 以上。识别实验过程中发现,当数据长度太短不足以覆盖整个星座图上的点,就会导致聚类中心数目 N 减少,增大了错误识别率。随着大气光强起伏的增加, MPSK 信号的聚类性不断变差,光强起伏对调制信号星座图的影响增大, M 越大调制信号正识率下降越多。在较大光强指数下, 16PSK 采用近邻聚类法不能得到较高识别率。因此在强湍流情况下,可以考虑高阶矩或神经网络等其它星座图估计方法的高阶 MPSK 调制识别研究。

参 考 文 献

- 1 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Annular-aperture averaging factor of optical scintillation in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1543~1547
- 2 马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 湍流大气中光波闪烁的圆环孔径平均因子[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1543~1547
- 3 Tomaki Ohtsuki. Turbo-coded atmospheric optical communication system [C]. *IEEE International Conference on*

- Communications, 2002, **5**: 2938~2942
- 3 Jia Li, John Q. Liu, D. P. Taylor. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2007, **55**(3): 1598~1606
- 4 Wu Hanling, Li Xinyang, Yan Haixing. Bit error performance analysis of atmospheric optical communication system based on gamma-gamma turbulence channel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **12**(28): 99~104
吴晗玲, 李新阳, 严海星. Gamma-Gamma 湍流信道中大气光通信系统误码特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **12**(28): 99~104
- 5 Xiaoming Zhu, J. M. Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2002, **50**(8): 1293~1300
- 6 Yang Xianglin. Optic Fiber Communication Systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 7 X. Sun, F. M. Davidson, L. Boutsikaris. Receiver characteristics of laser altimeters with avalanche photodiodes[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1992, **28**(1): 68~275
- 8 R. M. Gagliardi, S. Karp. Optical Telecommunications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998
- 9 Chen Dan, Ke Xizheng, Qu Fei. Research on homomorphism filtering technology of wireless optical communication based on four frequency shift keying modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205001
陈丹, 柯熙政, 屈菲. 基于4FSK调制的无线光通信同态滤波技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205001
- 10 Liang Jixiong. Study of LDPC Code of Atmospheric Wireless Optical Communication at Weak Turbulence[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004. 69~70
梁吉雄. 弱湍流情况下大气无线光通信 LDPC 码研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004. 69~70
- 11 J. L. Terry, A. Crampton, C. J. Talbot. Passive sonar harmonic detection using feature extraction and clustering analysis [C]. OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE, 2005, **3**: 2760~2766
- 12 Bian Zhaoqi, Zhang Xuegong. Pattern Recognition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000
边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000