

无线光副载波信号的循环谱分析

解孟其 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 以无线光通信中的副载波调制技术为背景,研究了光强调制正交相移键控信号的循环自相关和循环谱密度函数,并对实际测得的信号的循环谱和循环自相关函数进行了分析。结果表明,无线光副载波信号经过大气传输,同时受到了加性白噪声和乘性窄带随机噪声的影响,有限强度的大气湍流并未破坏正交相移键控信号的循环平稳特性。影响接收信噪比的主要因素是有用信号功率与低频噪声功率之差,通过加时间窗的方法可以有效抑制低频噪声的影响,从而提高系统接收信噪比。

关键词 光通信;光强闪烁;副载波;循环谱密度

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0201001

Cyclic Spectral Density Analysis of Free Space Optical Sub-Carrier Signals

Xie Mengqi Ke Xizheng

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

Abstract The background of atmosphere turbulence on free space optical sub-carrier modulation is set. The expressions of the cyclic auto-correlation function and the cyclic spectral density of quadrature phase shift keying (QPSK) signals are derived and the cyclic auto-correlation function and the cyclic spectrum density of series of experimental QPSK data are analysed. The results show that both additive and multiplicative noises in the experimental data are influenced by the atmosphere turbulence. And the turbulence which is not very strong can not disturb cyclostationarity of QPSK signals. The main factor of received signal to noise ratio is the power difference between the signal and low frequency noise. By adding a time window which can restrain low frequency noise, the signal to noise ratio of free space optical subcarrier modulation system can be improved.

Key words optical communications; scintillation; sub-carrier modulation; cyclic spectral density

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 010.3310

1 引言

近年来,自由空间光(FSO)通信正经历着一个蓬勃发展的时期,基于FSO技术的各种通信应用也逐步实用化。FSO通信技术主要包含两种技术体系:强度调制直接检测(IM/DD)和偏振调制相干检测^[1],采用强度调制直接检测技术的FSO通信系统具有结构简单、易于实现的特点,但是大气对探测器的影响较大;采用偏振调制相干检测技术的FSO通信系统具有通信速率快的特点,但系统结构复杂、成本较高^[2-3]。偏振调制相干检测是未来FSO发展的方向^[4],但是在目前阶段,成本问题仍然是制约偏振调制相干检测FSO系统发展的瓶颈。文献[5]提出了一种FSO副载波调制的综合系统,采用强度调制模拟激光器作为发射源,在接收端对

收稿日期:2014-07-24;收到修改稿日期:2014-09-23

基金项目:国家自然科学基金(61377080)、陕西省自然科学基金(2013JQ8011)、陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31)、陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17)、陕西省教育厅科研计划(14JK1292)、西安市科技成果转化基金(CX12165)

作者简介:解孟其(1986—),男,博士研究生,主要从事大气信道建模以及通信编码方面的研究。

E-mail: xiemengqi@stu.xjtu.edu.cn

导师简介:柯熙政(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

电信号进行相干解调,回避了成本问题,同时提高了探测灵敏度。相较IM/DD系统,该系统能提高探测灵敏度20 dB^[6-7]。但需要解决FSO副载波调制中的信道建模、载波恢复、信号识别等问题^[8-9]。20世纪80年代,循环自相关和循环谱概念的提出为非平稳信号的时频分析提供了研究方法和理论依据^[10-11]。之后,文献[12]验证了相移键控(PSK)信号的循环平稳特性,然后循环谱密度分析被广泛应用于PSK调制的信道估计中^[13],并取得了一定的研究成果。由于大气信道特性具有时变非线性非高斯的特点,传统的信道估计方法往往难以取得很好的效果,而循环谱分析法对于某些受非高斯分布噪声的数字调制信号具有良好的识别率^[14],因此,本文采用循环谱分析方法,研究无线光信道中副载波调制正交相移键控(QPSK)信号的噪声特性。

2 副载波信号的循环谱分析

对于零均值的非平稳复信号 $x(t)$, 时变自相关函数可写为^[15]

$$R_x(t; \tau) = E[x(t)x^*(t - \tau)], \quad (1)$$

式中 τ 为时延, $x^*(t)$ 是 $x(t)$ 的共轭。若时变自相关函数具有周期性, 并且周期为 T_0 , 对随机过程 $x(t)$ 以 T_0 为周期进行采样, 则样点序列满足遍历性, 因此可用样点的时间平均表示时变自相关函数的统计平均:

$$R_x(t, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)} \sum_{n=-N}^N x(t+nT_0)x^*(t+nT_0-\tau). \quad (2)$$

由(2)式可以看出, $R_x(t, \tau)$ 是关于时间 t 的周期为 T_0 的函数。因此, 可对 $R_x(t, \tau)$ 进行傅里叶变换, 并取 $\alpha = m/T_0$, 其中 m 为整数, 可得

$$R_x(t, \tau) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) \exp[j(2\pi/T_0)mt] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) \exp(j2\pi\alpha t), \quad (3)$$

式中 α 包含了基本频率 $1/T_0$ 的各次谐波, (3)式中的傅里叶系数为

$$R_x^\alpha(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} R_x(t; \tau) \exp(-j2\pi\alpha t) dt. \quad (4)$$

$R_x^\alpha(\tau)$ 称为循环自相关函数。将(2)式代入(4)式中可得

$$\begin{aligned} R_x^\alpha(\tau) &= \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)} \sum_{n=-N}^N x(t+nT_0)x^*(t+nT_0-\tau) \exp(-j2\pi\alpha t) dt = \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)T_0} \sum_{n=-N}^N \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t+nT_0)x^*(t+nT_0-\tau) \exp(-j2\pi\alpha t) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

再作变量代换 $T=(2N+1)T_0$, 得

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x^*(t-\tau) \exp(-j2\pi\alpha t) dt = \langle x(t)x^*(t-\tau) \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t. \quad (6)$$

从(6)式中可以看出, 循环自相关函数 $R_x^\alpha(\tau)$ 是二次时变统计量 $R_x(t, \tau)$ 对时间的傅里叶变换的系数。 $R_x^\alpha(\tau) \neq 0$ 的频率 α 称为信号的循环频率。

对于QPSK调制的副载波无线光信号, 可将信号 $x(t)$ 表示为

$$x(t) = A \cos\left[2\pi f_{sc} t + (2k-1)\frac{\pi}{4}\right], \quad (7)$$

式中 f_{sc} 为副载波频率, A 为信号光强, k 为集合 $\{1, 2, 3, 4\}$ 中的随机整数。

将(7)式代入(6)式中, 可得

$$R_x^\alpha(\tau) = \begin{cases} \frac{A^2}{2} \cos(2\pi f_{sc} \tau), & \alpha = 0 \\ \mp \frac{A^2}{4} j \exp[\pm i(k\pi - 2\pi f_{sc} \tau)], & \alpha = \pm 2f_{sc} \\ 0, & \text{other } \alpha \end{cases} \quad (8)$$

从(8)式可以看出, 未加噪声的QPSK信号的循环自相关仅在循环频率为0和2倍载波频率处有非零值, 在其他频率处其循环自相关均为零。根据维纳-辛钦定理, 谱密度与自相关是一对傅里叶变换对, 将循环平稳信

号的循环自相关 $R_x^\alpha(\tau)$ 的傅里叶变换 $S_x^\alpha(f)$ 称为循环谱密度(CSD)函数:

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau, \quad (9)$$

式中 f 为循环谱自变量, 即频率, 单位为 Hz。

使用 Matlab 仿真产生 QPSK 信号的采样序列, 设置参数与后文中的实测数据一致, 其中, 载波频率 $f_{sc} = 2.5$ MHz, 码元速率 $f_{symbol} = 625$ kbaud (其中 baud 为波特率), 接收端采样频率 $f_{samples} = 40$ MHz。典型的 QPSK 信号的循环自相关函数和循环谱密度函数如图 1 所示, 可以看出在循环谱中 $f = \pm 2.5$ MHz, $\alpha = 0$ 和 $f = 0$, $\alpha = \pm 5$ MHz 处具有成对出现的峰值, 这体现了 QPSK 信号具有循环平稳性。

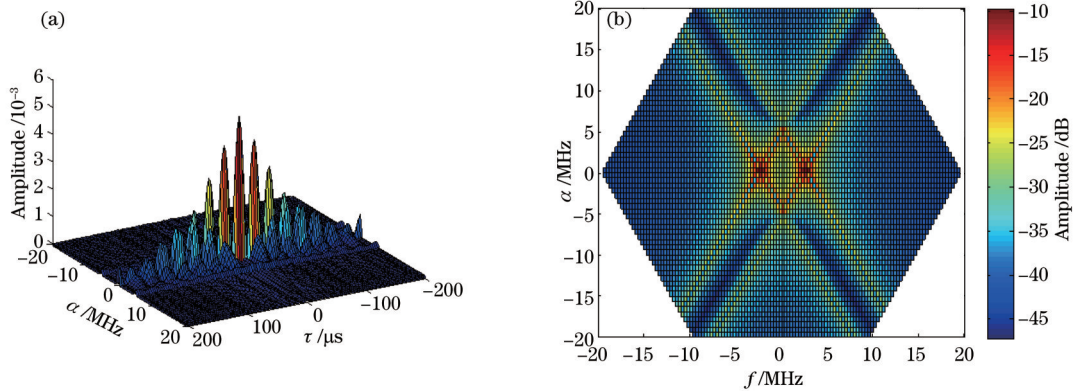


图 1 仿真 QPSK 信号的(a)循环自相关函数和(b)循环谱

Fig.1 (a) Cyclic auto correlation and (b) CSD of simulate QPSK signals without noise

3 考虑大气光强起伏

光信号经过大气信道的传播, 要经历大气吸收、散射、色散和湍流效应的影响。对于光强直接探测系统来说, 不考虑相位的影响, 可认为探测光强受到大气信道乘性噪声的影响。到达接收端的光强振幅 $A(t)$ 和不存在乘性噪声时到达接收端的光强振幅 $A_0(t)$, 存在以下关系^[16]:

$$A(t) = e^{\chi} A_0(t), \quad (10)$$

式中 χ 为对数光强振幅起伏。实际观测到的对数光强起伏可视为光强闪烁随机过程的一组时间样本, e^{χ} 可视为时间函数 $I(t)$ 。

包含乘性噪声的 QPSK 信号可表示为

$$A(t) = I(t) \cos \left[2\pi f_{sc} t + (2k-1) \frac{\pi}{4} \right]. \quad (11)$$

当信道为弱湍流并且观测时间很短时, 可认为 $I(t)$ 满足二阶循环平稳条件, 即它的功率谱存在。将(11)式代入(6)式和(9)式, 可求得包含乘性噪声的 QPSK 循环谱为^[15]

$$S_x^\alpha(f) = \begin{cases} \frac{1}{4} S_1(f+f_{sc}) + \frac{1}{4} S_1(f-f_{sc}), & \alpha = 0 \\ \frac{1}{4} \exp(\pm ik\pi) S_1(f), & \alpha = \pm 2f_{sc} \\ 0, & \text{other } \alpha \end{cases} \quad (12)$$

式中 $S_1(f)$ 为 $I(t)$ 的功率谱。从(12)式可以看出, 当 $\alpha = 0$ 时的循环谱就相当于信号的功率谱, 当 $\alpha \neq 0$ 时循环谱的非零值即为被测 QPSK 信号的循环平稳成分。当 $\alpha = \pm 2f_{sc}$ 时, $|S_x^\alpha(f)|$ 即为光强闪烁 $I(t)$ 的瞬时幅度谱。

4 实验结果和分析

在两地相距 1.3 km 的斜程大气环境中建立 IM/DD 单发单收 FSO 系统^[7], 发射端包含现场可编程门阵列 (FPGA)、高速数字模拟转换器(DAC)、功放以及模拟激光器, 发射 QPSK 调制光强信号; 接收端使用空间光探测器

以及高速数据采集卡采集模拟光强信号。实验系统参数:载波频率 $f_{sc}=2.5$ MHz,码元速率 $f_{symbol}=625$ kbaud,接收端采样频率 $f_{samples}=40$ MHz。图2为在21:00实测的一段接收数据,从图中可以明显地看出大气信道对光强的信号的影响,原本应为恒值的QPSK信号包络呈现出随机起伏的状态。从图中可以看出,接收到的光强信号存在负值,是因为接收端光电探测器的参考地电平存在噪声扰动,导致数据采集卡采集到负值的模拟电平,根据文献[14]中的FSO接收信号的简化模型,可认为采集卡输出的负值源于接收电路自身噪声的影响。

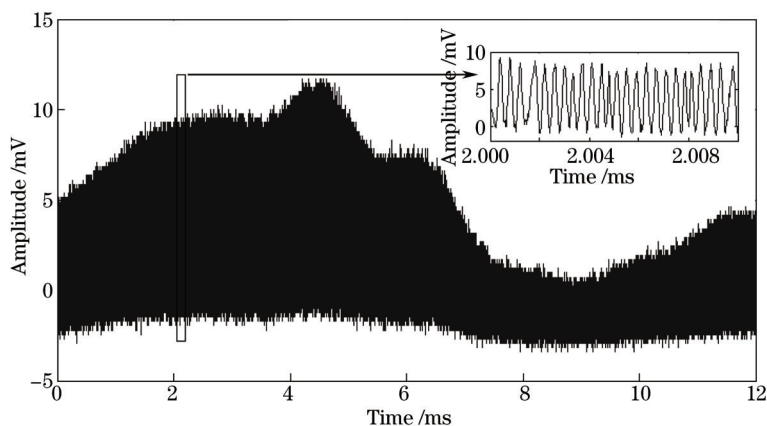


图2 一段实测光强调制QPSK信号波形

Fig.2 Waveform of measured intensity modulated QPSK signals

先对信号进行去直流,再使用循环周期图法计算接收数据的循环谱,如图3和图4所示。从循环谱切片图中可以看出,当 $\alpha=0$ 时,循环谱中出现了3个峰值, $f=\pm 2.5$ MHz处的峰值对应有用信号,而 $f\approx 0$ 处出现的峰值是由大气光强闪烁引起的光强包络变化产生的。此外,从图3中还可以看出当 $\alpha=0$ 时,全频段存在约为-27 dB的底噪,这可以认为是收发电路引入的白噪声,验证了文献[16]中FSO信号受电路白噪声与大气信道低频乘性噪声双重影响的结论。循环谱在 $\alpha=\pm 2f_{sc}$ 处存在峰值,验证了(12)式。可以看出大气湍流噪声虽然使信号谱在频域和循环频域发生了展宽,但并未完全破坏QPSK信号的循环平稳性,因此,循环谱可用于检测无线光信号的调制方式。

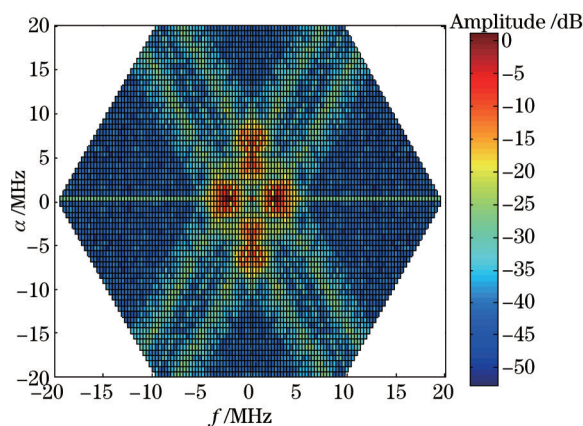


图3 未加窗时的信号循环谱

Fig.3 CSD of measured signals

对采样序列的循环谱作傅里叶逆变换得到实测信号的循环自相关函数,如图5和图6所示。从图中可以看出当 $\alpha=0$ 时,信号自相关呈现出载波频率信号受到窄带随机噪声的影响,包络线呈缓慢下降的趋势;当 $\tau=0$ 时, α 在-10~10 MHz的范围内自相关存在很小的非零值,可认为光信号经过大气传输受到乘性噪声的影响,有用信号受到光强闪烁的调制,影响了相移键控(PSK)信号自身的相关性,因此在 $\alpha=0$ 和 $\alpha=\pm 2f_{sc}$ 以外的地方也产生了很小的非零值。

由于信号包络幅度上存在缓慢变化,这种变化的频率(约为40 Hz)远小于2.5 MHz载波。对接收数据加矩形时间窗,通过控制时间窗口的长度可以抑制信号包络慢变化的影响。这里取窗口长度为2048点,即

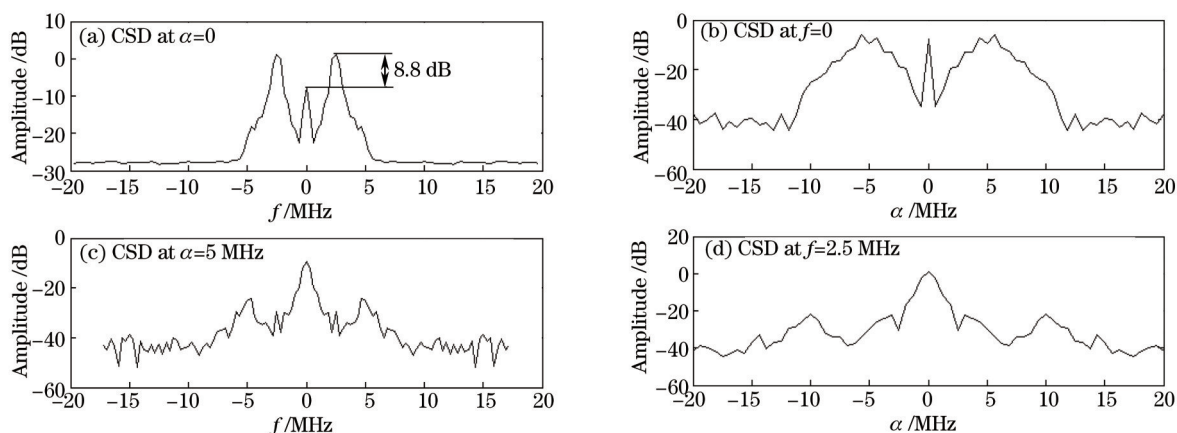


图4 未加窗时的信号循环谱切片。(a) $\alpha=0$; (b) $f=0$; (c) $\alpha=5$ MHz; (d) $f=2.5$ MHz

Fig.4 Slice figures of CSD of measured signals. (a) $\alpha=0$; (b) $f=0$; (c) $\alpha=5$ MHz; (d) $f=2.5$ MHz

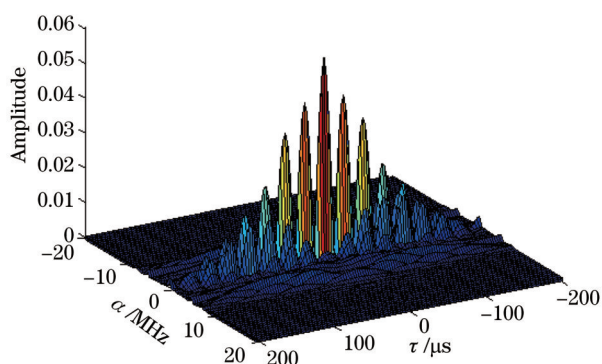


图5 实测信号的循环自相关函数

Fig.5 Cyclic auto correlation of measured signals

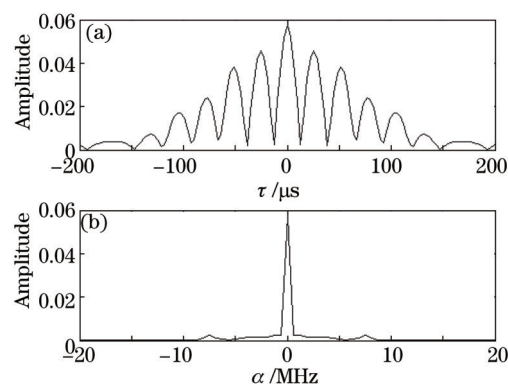


图6 循环自相关函数在 $f=0$ 和 $\alpha=0$ 处切片。(a) $\alpha=0$; (b) $t=0$

Fig.6 Slice figures of cyclic auto correlation of measured signals in $f=0$ and $\alpha=0$. (a) $\alpha=0$; (b) $t=0$

51.2 μs 时长的信号点,计算其循环谱,得到图7和图8。从图中可以看出,加窗压低了循环谱中 $\alpha=0, f=0$ 处的峰值。由图4(a)可以看出,此FSO系统的接收信噪比为循环谱在 $f=2.5$ MHz处的峰值与低频噪声之差,约为8.8 dB;而不是有用信号峰值与白噪声的差值,约为28.8 dB。通过加窗可以显著地抑制接收信号的低频分量,提高系统的接收信噪比。从图8(a)中可得加窗后信噪比为17.7 dB,可将接收信噪比提升约9 dB。相应的加窗信号的循环自相关函数如图9和图10所示,与图6比较,可以看出图10中的峰值有所提高,可以认为是加窗抑制了低频噪声,提高了待测信号的自相关性,从而提高了有用信号的检测概率。

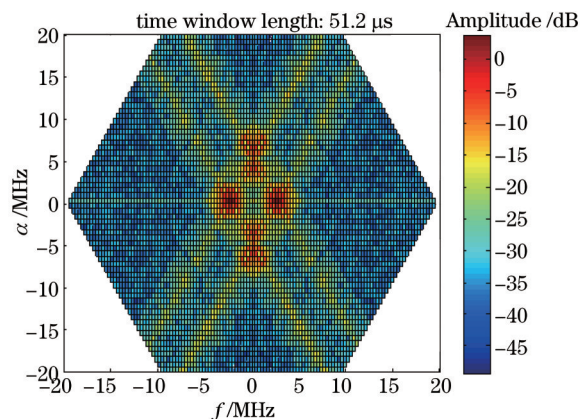


图7 加窗后的信号循环谱

Fig.7 CSD of windowed signals

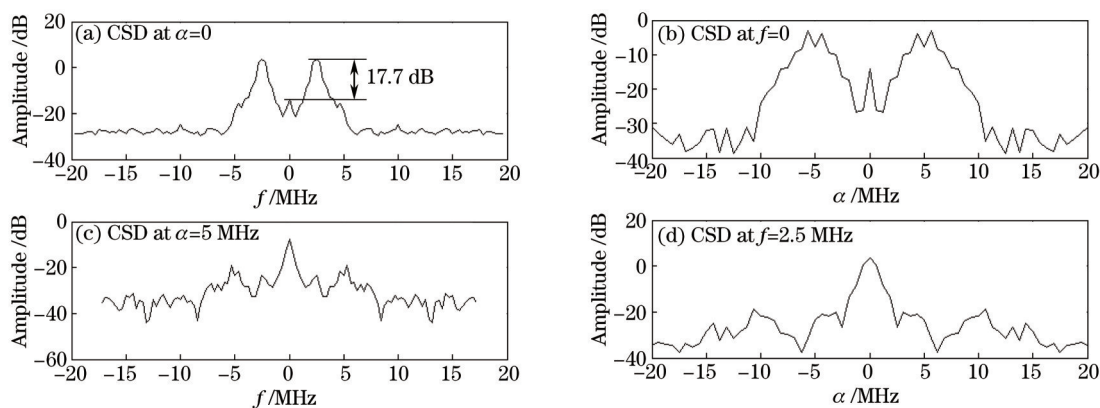


图 8 加窗后的信号循环谱切片。(a) $\alpha=0$; (b) $f=0$; (c) $\alpha=5$ MHz; (d) $f=2.5$ MHz
Fig.8 Slice figures of CSD of windowed signals. (a) $\alpha=0$; (b) $f=0$; (c) $\alpha=5$ MHz; (d) $f=2.5$ MHz

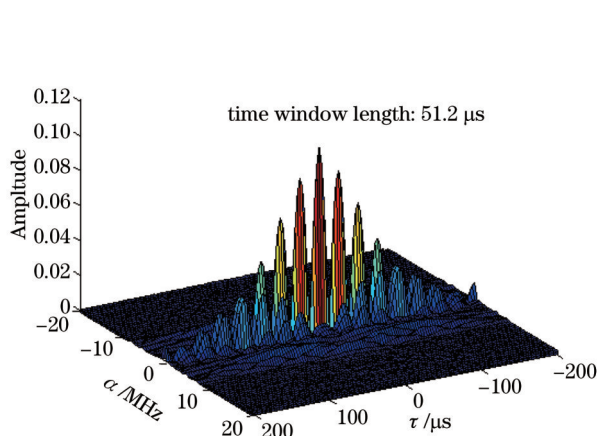


图 9 加窗后的信号循环自相关函数
Fig.9 Cyclic auto correlation of windowed signals

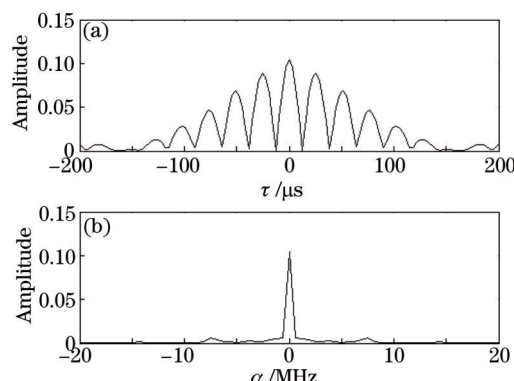


图 10 加窗后的循环自相关函数在 $f=0$ 和 $\alpha=0$ 处切片。(a) $\alpha=0$; (b) $t=0$
Fig.10 Slice figures of cyclic auto correlation of windowed signals in $f=0$ and $\alpha=0$. (a) $\alpha=0$; (b) $t=0$

5 结 论

推导了无线光副载波调制 QPSK 信号的循环自相关的数学表达式,讨论了包含未知噪声功率谱的接收光强信号的循环谱密度函数,并通过计算实测数据的循环谱和循环自相关函数验证了本文导出公式的正确性,结果表明循环谱可用于识别无线光副载波通信中的信号调制方式。

采用循环谱分析实测 FSO-QPSK 信号,验证了在接收信号时受到了加性白噪声和乘性窄带随机噪声干扰的情况下,影响系统信噪比的关键因素在于有用信号与噪声峰值功率的差值。为实测数据加时间窗可以压低循环谱中低频噪声分量,从而提高了检测信噪比。

参 考 文 献

- 1 Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, *et al.*. Research status and development trend of space laser communication [J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 116-125.
付 强,姜会林,王晓曼,等.空间激光通信研究现状及发展趋势[J].中国光学,2012,5(2): 116-125.
- 2 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.*. Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706017.
马小平,孙建锋,职亚楠,等. DPSK 调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J].光学学报, 2013, 33(7): 0706017.

- 3 Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.*. Opto-mechanical structure design of the space optical hybrid based on space coherent laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906008.
郑 阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信的空间光混频器光机结构设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906008.
- 4 Liu Hongzhan, Sun Jianfeng, Liu Liren. Analyzing the trends of space laser communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, 34(8): 39-42.
刘宏展, 孙建锋, 刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析[J]. *光通信技术*, 2010, 34(8): 39-42.
- 5 Chen Dan, Ke Xizheng. Research on diversity receive technology on wireless optical communication using subcarrier modulation [J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(8): 128-133.
陈 丹, 柯熙政. 副载波调制无线光通信分集接收技术研究[J]. *通信学报*, 2012, 33(8): 128-133.
- 6 Ke Xizheng, Chen Jinni, Lü Wangdong. Research and simulation of wireless optical heterodyne detection [J]. *Laser Journal*, 2012, 33(1): 47-49.
柯熙政, 陈锦妮, 吕王栋. 无线光外差检测系统研究与仿真[J]. *激光杂志*, 2012, 33(1): 47-49.
- 7 Ke Xizheng, Chen Jinni. Experimental investigation on non-optical heterodyne detection technology of 1 km atmospheric laser communication system [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2014, 32(4): 379-384.
柯熙政, 陈锦妮. 1 km 大气激光通信系统非光域外差检测的实验研究[J]. *应用科学学报*, 2014, 32(4): 379-384.
- 8 Zhai Chao, Wu Feng, Yang Qingbo, *et al.*. Simulation research of laser beam atmospheric propagation in free-space optical communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0505004.
翟 超, 武 凤, 杨清波, 等. 自由空间光通信中大气光束传输数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0505004.
- 9 Shou Qin, Zhang Tao, Wang Han. Analysis of BER performance in free-space optical MIMO-OFDM communication systems over the Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020602.
寿 钦, 张 涛, 王 涵. Gamma-Gamma 大气湍流下自由空间光通信 MIMO-OFDM 系统误比特率分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020602.
- 10 William A Gardner. The spectral correlation theory of cyclostationary time-series [J]. *Signal Processing*, 1986, 11(1): 13-36.
- 11 W Brown Gardner, Chih-Kang Chen. Spectral correlation of modulated signals: Part II--digital modulation [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, 35(6): 595-601.
- 12 Zhang Wei, Yang Hu, Zhang Eryang. Spectral correlation analysis of MPSK signals [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 392-396.
张 炜, 杨 虎, 张尔杨. 多进制相移键控信号的谱相关特性分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2): 392-396.
- 13 Jin Yan, Ji Hongbing. Influence of stationary noise on cyclic-autocorrelation based PSK symbol rate estimation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 505-508.
金 艳, 姬红兵. 基于循环自相关的 PSK 信号码速率估计的噪声影响分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2): 505-508.
- 14 Liu Mingqian, Li Bingbing, Cao Chaofeng, *et al.*. Recognition method of digital modulation signals over non-Gaussian noise in cognitive radio [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(1): 82-88.
刘明骞, 李兵兵, 曹超凤, 等. 认知无线电中非高斯噪声下数字调制信号识别方法[J]. *通信学报*, 2014, 35(1): 82-88.
- 15 He Zhengjia, Zi Yanyang, Zhang Xining. *Modern Signal Process and Engineering Applications* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007. 84-93.
何正嘉, 訾艳阳, 张西宁. *现代信号处理及工程应用*[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007. 84-93.
- 16 Xie Mengqi, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the signal-to-noise ratio of free space optical system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 110102.
解孟其, 柯熙政. 大气湍流对无线光通信系统信噪比的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(11): 110102.

栏目编辑: 王晓琰