

基于 Hilbert-Huang 变换对近海面光学湍流特性分析

张汉九^{1,2}, 孙刚^{2*}, 张坤^{1,2}, 巫阳^{1,2}, 王菲菲², 李学彬², 崔生成², 刘庆², 翁宁泉^{1,2}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 利用温度脉动仪在近海面测量的大气折射率结构常数 C_n^2 , 结合集合经验模态分解 (EEMD) 获得不同时间尺度的本征模态函数 (IMF) 分量, 对 IMF 的周期进行分析, 结果表明 IMF 的平均周期存在较高吻合度的自然指数关系, 根据大气湍流各态历经性可以得到其空间尺度特征。对得到的 IMF 分量进行 Hilbert 变换, 得到 IMF 在各自中心频率的瞬时波动情况, 同时得到常规气象参数与 C_n^2 的 Hilbert-Huang 变换边际谱。结果表明, 对比传统的快速傅里叶变换 (FFT), Hilbert-Huang 变换更能体现出光学湍流的频谱分布特征。分析了不同层结的常规气象参数与 C_n^2 的相关性, 进一步认识近海面光学湍流时空特征。研究结果为海洋环境下激光传输提供一定参考价值。

关键词 大气光学湍流; 集合经验模态分解; 本征模态函数周期; Hilbert-Huang 变换; 边际谱

中图分类号 P431

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1201001

Analysis of Near Sea-Surface Optical Turbulence Characters Based on Hilbert-Huang Transform

Zhang Hanjiu^{1,2}, Sun Gang^{2*}, Zhang Kun^{1,2}, Wu Yang^{1,2}, Wang Feifei², Li Xuebin²,
Cui Shengcheng², Liu Qing², Weng Ningquan^{1,2}

¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

²Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract We used a microtemperature sensor to measure the atmospheric refractive index structure constant C_n^2 of near sea-surface and combined ensemble empirical mode decomposition (EEMD) to obtain the intrinsic mode function (IMF) component with different time scales. Furthermore, the analysis of the IMFs' periods indicates that their mean periods have a high correlation of natural exponential function. Thus, we can derive the space characters based on the ergodicity property of atmospheric turbulence. The result of the Hilbert transform for the IMF component shows the different scale fluctuations near the center frequency of each IMF. Additionally, we can obtain the Hilbert-Huang transform marginal spectrum of conventional meteorological elements and C_n^2 , and the results indicate that it is superior to the traditional fast-Fourier transform (FFT) in reflecting spectral distribution characteristics of optical turbulence. Further, we analyze the relationship between the C_n^2 and conventional meteorological elements under different atmospheric stratification. From above, we can learn more about the space-time characters of near sea-surface optical turbulence, and the study results will provide some references for laser propagation in the marine atmosphere.

Key words atmosphere optical turbulence; ensemble empirical mode decomposition; intrinsic mode function period; Hilbert-Huang transform; marginal spectrum

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-02; 录用日期: 2021-06-21

基金项目: 十三五装备预研项目 (41416030204)

通信作者: *gsun@aiofm.ac.cn

1 引言

行星边界层的大气运动形式主要是湍流形式^[1],近地面层与近海面层位于边界层大气底层,对大气中的物质与能量输送有着重要作用,与人类生产生活息息相关。而湍流运动可以看作不同时空尺度的涡旋叠加,因此可以用谱分析等方法获得湍流时空特征的精细结构^[2]。对此国内外学者已经有相当多的研究,傅里叶分解可处理线性且平稳的信号,Kaimal等^[3]拟合的温度能谱曲线在惯性副区满足幂次规律;许满满等^[4]研究了复杂地形下海陆风功率谱、各向同性及耗散率问题;杨泽堃等^[5-6]用小波变换分析大气湍流的相干结构等。但是传统分析方法在分析类似光学湍流这种非线性、非平稳的信号时都存在着一一定的局限,因此对实际湍流使用的传统统计分析方法多是基于一定条件下的。

自Huang等^[7-8]提出具有自适应特点的经验模态分解(EMD)结合Hilbert谱分析以来,因在处理非线性、非平稳信号方面的优势,相关的研究与应用也越来越多,同时方法也得到了进一步的改进和完善。Wu等^[9]进一步改进,得到基于集合经验模态分解(EEMD)的Hilbert-Huang变换(HHT)。在研究全球性的气候问题^[10]、机械降噪^[11]、湍流间歇性和成层性^[12]、光学湍流廓线的组分^[13]、衍射相位像光晕效应的消除^[14]等问题上,Hilbert-Huang变换有着广泛的应用。

本文基于EEMD分析近地面湍流的时间尺度

特征,检验不同本征函数与原信号的相关性,分析其平均周期的规律性,并总结出一般的规律;同时结合Hilbert变换及其边际谱分析频谱特性,并探索其他气象要素和光学湍流的边际谱特征之间的关联性,分析潜在成因。研究中采取的方法和得到的结论对进一步认识近海面湍流时空特征、湍流的精细结构及发展规律有一定意义,同时对海洋激光大气传输也有一定的参考价值。

2 实验数据的获取及基本原理

2.1 实验数据的获取

本实验地点位于沿海区域。实验测量设备为中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的QHTP-2型温度脉动仪,如图1(a)所示,温度脉动仪距离水面约4.0 m。其工作原理是通过测量固定距离的两铂丝之间的温度差,在局地均匀和各向同性的假定下,获得温度结构函数,进一步计算获得大气光学湍流折射率结构常数^[15]。该设备性能指标采样频率为0.1~30 Hz,分辨率为 $10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$,测量范围为 $10^{-12} \sim 10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$ 。实验中所采用的数据均取自于2019年11月份天气良好适合测量的时间段为5 s的平均数据。图1(b)是2019年11月16日折射率结构常数 C_n^2 日变化曲线,近海面与近地面 C_n^2 日变化的整体呈现相似“草帽”的形式,同时根据Stull^[16]定义大气边界层使用的响应时间为1 h左右,因此在分析数据时选取的都是中午时分11:40至12:40,此时间段内湍流充分发展,时间长度为1 h,每小时数据720组。

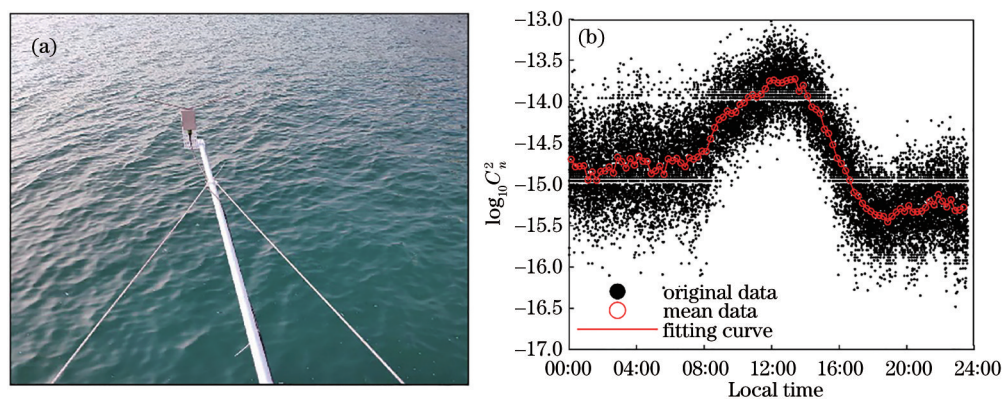


图1 仪器及 C_n^2 日变化。(a) 仪器安装环境;(b) 2019年11月16日折射率结构常数日变化

Fig. 1 Instrument and C_n^2 daily change. (a) Instrument installation environment; (b) daily change of refractive index structure constant on November 16, 2019

2.2 集合经验模态分解

针对傅里叶变换、小波变换等处理非线性、非

平稳信号时存在混叠和泄露等问题,Huang等^[7-8]在深入研究瞬时频率的基础上提出基于EMD的

Hilbert 变换, Wu 等^[9]为了解决尺度效应引起的模式混合, 防止 IMF 失去原有的物理意义, 提出基于 EEMD 的 Hilbert 变换, 统称 Hilbert-Huang 变换。

EEMD 的基本过程^[8]如下: 在原始数据 $c(t)$ 上加入频率均匀分布的白噪声, 通过重复的筛选过程, 即根据原始序列的局部极大值和局部极小值得到的上下包络线获得平均包络线, 在原始序列与平均包络线的差值不满足 IMF 特征情况下对得到的差值继续以上过程, 直至得到的差值满足 IMF 的特征。这样就获得了本征模函数 $c_i(t)$ 即 IMF_{*i*}, 以及余项 $r_i(t)$, 表达式为

$$c_i(t) = c(t) - r_i(t) \quad (1)$$

新的余项 $r_i(t)$ 一般仍含有更长周期的波动, 可以作为新的信号来进一步提取本征模函数, 直至 $r_i(t)$ 或 $c_i(t)$ 振幅过小, 或者 $r_i(t)$ 在整个尺度上已经是单调函数, 无法再进行分解, 此时余项也称趋势项。最终原始时间序列可以表示为

$$c(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

同时为了保证瞬时频率有意义和防止过筛, 筛选过程终止准则采用较简单的 Huang 提出的 S 值终止准则, 即极值点和零点数相同的筛选次数 S; 同时为了防止过筛, S 值不宜过大, 一般取 $3 \leq S \leq 5$, 得到不同的本征模函数。

2.3 Hilbert 变换

对非线性、非平稳信号而言, 全局意义上的傅里叶频率已经失去其物理意义, 而频率的峰值变化

可以使用瞬时频率来描述。在此处, 瞬时频率定义是对解析信号相位求导数, 因此需要构造满足瞬时频率定义的复信号的虚部, Gabor^[17]定义解析信号的复信号表示为

$$z(t) = c(t) + j \int \frac{c(t')}{t-t'} dt' \quad (3)$$

为了保证频率在时间域上的单值性, 需要保证信号在任一时刻仅含有一个频率成分或者是时间域上的窄带分布频谱。求式(3)虚部过程与 Hilbert 变换含义吻合, 而经 EEMD 得到的 $c_i(t)$ 均是满足 Hilbert 变换要求的单分量信号。对每个本征函数 $c_i(t)$ 进行 Hilbert 变换, 得到 $\hat{c}_i(t)$:

$$\hat{c}_i = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c(\tau)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi t} c(t) \quad (4)$$

同时解析信号的复信号表示为 $z_i(t)$:

$$z_i(t) = c_i(t) + j\hat{c}_i(t) = A_i(t)e^{j\theta_i(t)} \quad (5)$$

式中: $A_i(t)$ 为瞬时复振幅; $\theta_i(t)$ 为瞬时相位; 瞬时频率 $\omega_i(t) = d\theta_i(t)/dt$ 。Hilbert 边际谱 $h(\omega)$ 为

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (6)$$

式中: $H(\omega, t)$ 是 ω - t 平面的 Hilbert 谱。

3 分析与讨论

3.1 IMF 周期特性

图 2(a) 是 2019 年 11 月 16 日中午 11:40 至 12:40 时间段的大气光学湍流折射率常数 C_n^2 经 EEMD 变换后得到的结果, 添加的白噪声与原始数据的比值为

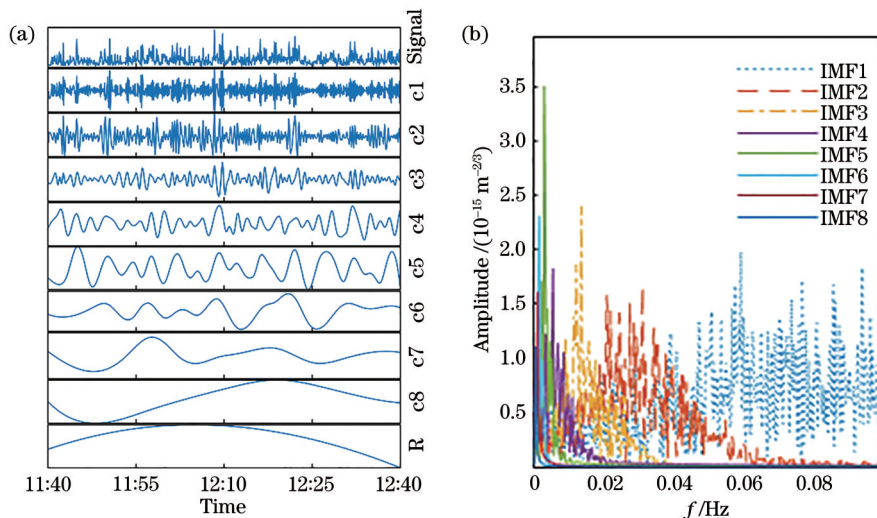


图 2 IMF 及 IMF 频谱。(a) 2019-11-16 中午 C_n^2 序列及其本征模态函数; (b) 本征模态函数 FFT 频谱
Fig. 2 IMF and IMF frequency spectra. (a) C_n^2 time series and corresponding IMF at noon on November 16, 2019; (b) IMF FFT frequency spectra

0.2, 筛选次数 S 值为 3。原始信号 (Signal) 被分解成 9 个 IMF, 运用快速傅里叶变换 (FFT) 检验 IMF 的周期性, 频谱结果如图 2(b) 所示。由结果可知: IMF1(c1) 无明显主频, 对应原始信号中的高频振荡, 反映了光学湍流中随机因素的影响; IMF2~IMF8(c2~c8) 频谱中主频明显, 且主频位置依次向低频区域平移, 是有一定周期特征的序列, 结合表 1 平均周期分析说明图 2(a) 中 IMF 平均周期随阶数增加而增大; IMF9(R) 是包含趋势信息的余项, 反映光学湍流在时间尺度上的宏观特征, 可以看出在该时间段上大气光学折射率有先增大后减小的趋势, 这是因为截取的时间段内影响湍流的因素主要是辐射热量, 它对湍流的发展起主导作用, 在此时间内太阳辐射经历了一个增大到减弱的过程, 从图 1(b) 中也能看出该趋势, 可见在长时间尺

度上, 近海面光学湍流也是非平稳、非线性的。

表 1 是图 2(a) 中各 IMF 项与原始信号的相关性、整段时间上各 IMF 周期数、平均周期时间、周期能量、平均周期能量的统计。从表 1 可以看出 IMF 与原始信号的相关性、平均能量、周期时间尺度、阶数的关系。结果表明, 除余项外的 IMF 与原始信号的相关性随阶数的增加逐渐降低, 而与原始信号相关性达到 0.67 的 IMF1 是从原始信号分离的高频项, 本身就包含了湍流中的随机噪声和添加的白噪声, 体现了湍流信号本身的随机性特点; 而趋势项的相关性略有升高, 原因是趋势项包含了整个时间段内湍流整体变化的宏观信息。能量分布在低阶和高阶本征函数中, 占比较少, IMF7 占据绝大部分的能量, 约达总能量的 47%。

表 1 各 IMF 特性统计

Table 1 Character analysis of each IMF

Parameter	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	R
Correlation	0.67	0.43	0.33	0.27	0.26	0.15	0.10	0.02	0.13
Period number	246	119.5	60	29.5	11.5	5	2.5	1	
Period /s	14.263	30.13	60	122.03	313.04	720	1440	3600	
Energy / $(10^{-28} \cdot m^{-4/9} \cdot s)$	1.15	2.45	1.98	1.35	2.31	14.45	33.80	9.80	3.96
Mean energy / $(10^{-31} \cdot m^{-4/9} \cdot s)$	4.68	20.50	33.08	45.83	201.04	2890	13520	9800	

进一步对各 IMF 的平均周期进行分析, 可知, 平均周期大小随 IMF 阶数 m 增加呈指数式增长, 为了更好体现其一般性规律, 图 3(a) 统计了 11 月份天气晴朗且无仪器故障的 21 天的同一时间段 C_n^2 数据的 IMF 平均周期 (T) 与阶数 (m) 关系。在同一横轴坐标下对平均周期取自然对数, 如图 3(b) 所示, 通

过拟合得到 $\ln T$ 与 IMF 阶数 m 单日和月份的统计, 分别满足关系 $\ln T = (1.64 \pm 0.20)m + (0.84 \pm 0.04)$ 和 $\ln T = (1.75 \pm 0.05)m + (0.80 \pm 0.01)$, 相关系数达 0.99 和 0.98, 即关系满足 $T = Ae^{\lambda m}$ 形式。在总体时间尺度 1 h 内, 实验条件是下垫面相对平坦均一的海面, 在水热相对均匀的情况下, 可认为

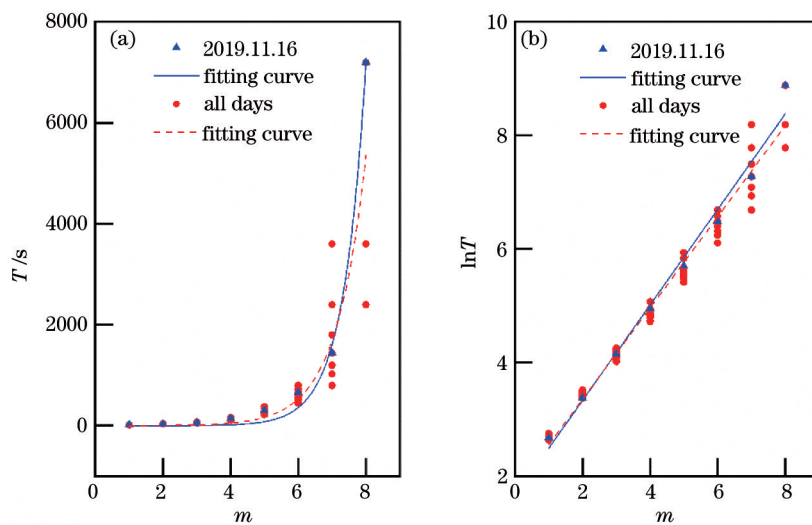


图 3 IMF 阶数 m 与周期 T 关系。(a) $m-T$; (b) $m-\ln T$

Fig. 3 Relationship between m and T of IMF. (a) $m-T$; (b) $m-\ln T$

满足近似平稳条件^[2],而平稳随机过程具有各态历经性,可以认为在该实验测量时间内的样本包含湍流所有尺度状态。IMF 的周期特征说明,在对应的时刻,湍流应具有形式类似时间尺度关系的不同空间尺度的湍涡特征,这也是 Richardson 湍流级串过程^[18]的反映。

图 4 是平滑过的原始信号与自身 IMF 组合的重构信号关系。选取部分重构组合,分析了与原信号的相关性,从图 4(a)、(b)看出,高阶的 IMF 携带了湍流原始信号较大尺度的结构,随着阶数的降低,湍流更精细的结构得以体现,同时周期波动增

强,周期性降低。图 4(c)、(d)中 IMF7~IMF9、IMF6~IMF9、IMF5~IMF9、IMF4~IMF9、IMF3~IMF9、IMF2~IMF9 与原始信号拟合相关系数分别为 0.3196、0.4644、0.5121、0.6883、0.8457、0.9514,随着 IMF 组合数的增加,选取的部分重构组合与原始信号的相关性也从 0.32 增加到 0.95。同时利用均方根误差(RMSE)衡量各重构信号与拟合函数的离散程度,图 4(c)中 IMF3~IMF9 与 IMF5~IMF9 的 RMSE 分别为 0.1409 和 0.1535,图 4(d)中 IMF4~IMF9 与 IMF6~IMF9 的 RMSE 分别为 0.1231 和 0.1463。统计的多天数据如表 2

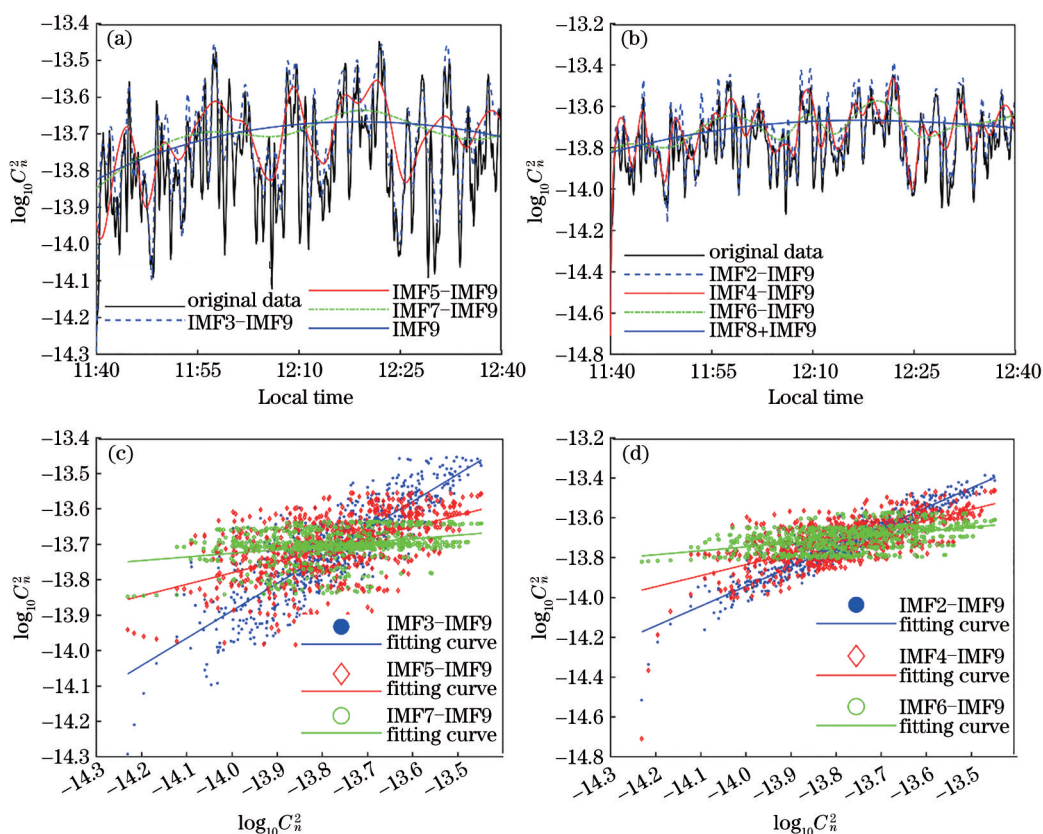


图 4 不同尺度 IMF 重构及与原信号的关系。(a)(b)不同 IMF 组合;(c)(d)重构组合与原信号关系

Fig. 4 IMF reconstruction with different scales and corresponding relation with original signal. (a)(b) Different IMF combinations; (c)(d) relation between reconstructed combination and original signal

表 2 多天 IMF 组合均方根误差

Table 2 RMSE of IMF combinations in many days

Combination	11.02	11.07	11.09	11.11	11.13	11.21	11.22	11.26
IMF2-IMF9	0.043	0.118	0.152	0.211	0.041	0.069	0.040	0.073
IMF3-IMF9	0.068	0.114	0.161	0.212	0.062	0.085	0.065	0.110
IMF4-IMF9	0.079	0.140	0.177	0.246	0.083	0.095	0.071	0.129
IMF5-IMF9	0.075	0.235	0.150	0.297	0.088	0.095	0.067	0.136
IMF6-IMF9	0.071	0.153	0.142	0.297	0.086	0.094	0.068	0.136
IMF7-IMF9	0.062	0.195	0.145	0.234	0.074	0.056	0.030	0.217

所示,结果表明,随着 IMF 组合数的增加, RMSE 在整体上呈现先增大后减小的趋势,说明湍流中的随机项和趋势项在一定程度上会增大其与原始信号间的离散程度。

3.2 Hilbert 频谱特征

由式(4)、(5)对得到的 IMF 进行 Hilbert 变换,得到的各 IMF 的时间-频率-能量分布如图 5(a)所示,以反映在特定时间不同频率的信号振幅能量变化情况。从频率轴上可以看出,振幅波动集中在频率段中高范围内;从时间轴上看,波动剧烈段集中在 11:55 至 12:25,而此段时间亦是热力湍流活动剧烈时间段,说明不同尺度下的频率波动与整体波动有很高的一致性。图 2 中 IMF9(余项 R)变化趋势与湍流整体变化趋势相符,说明正午时间段湍流主要受热力作用影响。

为进一步了解在整个时间段各个频率段对应的的时间尺度变化情况,由式(6)对三维 Hilbert 谱进行时间积分,可以获得其边际谱特征。图 5(b)是边

际谱特征,同时将频率转换成时间并取对数形式,对比 Hilbert-Huang 变换和传统快速傅里叶变换,由于未事先选定基函数, EEMD 的本征模函数是从自适应信号本身的特征中得到的,因此可以避免虚假波对结果的掩盖。 C_n^2 中时间尺度小于 30 s 部分,即图 5(b)中频率成分大于 0.03 Hz 部分,在 FFT 边际谱中,信号所携带的光学湍流的精细结构信息已经基本被噪声掩盖;在 HHT 边际谱中,在时间尺度 16 s 附近,频率成分在 0.06 Hz 附近处有明显周期波动,而在时间尺度 18~20 s,频率成分为 0.050~0.055 Hz,在整个周期尺度中波动较小。当然这两种频谱所代表的物理含义有一定的区别, Fourier 频谱反映整个时间段上不同频率分量信号能量分布情况, Hilbert 边际谱则表示整个时间段内在该频率附近的波动情况,但是从两者的频谱形态和结果来看, 边际谱更能有效地提取大气湍流的精细结构。

为进一步探究各 C_n^2 边际谱成因与气象要素之间的关系,选取实验中同一时间段气象站的相对湿

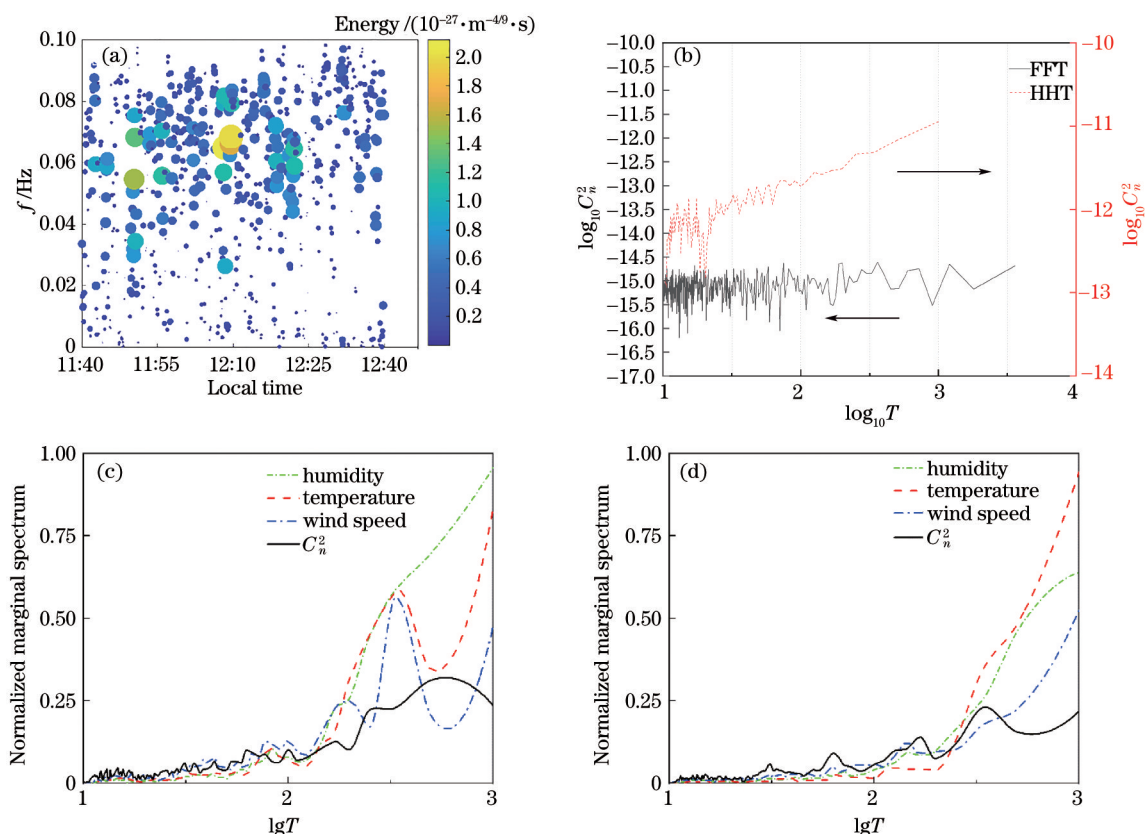


图 5 谱分析。(a) HHT 的 IMF 的时间-频率-能量分布; (b) HHT 边际谱和 FFT 频谱; (c) 不稳定层结下气象要素与 C_n^2 归一化边际谱; (d) 稳定层结下同图 5(c)

Fig. 5 Spectrum analysis. (a) Time-frequency-energy distribution of IMF obtained by HHT; (b) HHT marginal spectrum and FFT spectrum; (c) normalized marginal spectra of meteorological elements and C_n^2 in unstable layer condition; (d) as Fig. 5(c) but in stable layer condition

度、气温、水平风速常规气象参数 5 s 平均后的数据,对 4 种参数的 Hilbert 边际谱进行比较,为了更方便直观,进行了归一化处理。图 5(c)、(d) 分别是中午 11:40 至 12:40 不稳定层结下及夜晚 23:00 至 24:00 稳定层结下各因素的归一化边际谱,同时计算所有时间尺度下和长时间尺度 ($\log_{10} T \geq 2$) 下各参数边际谱的互相关性,如表 3 所示。结果表明:在不稳定层结,各因素与光学湍流周期波动整体相关性较大,时间周期在 100 s 以上时,相较于其他常规气象参数,湿度与光学湍流具有较高的相关性,同时温度和水平风速的周期波动具有相对较高的相关性,考虑测量地点是海边,水平风速受海陆风影响较大,

白天在太阳辐射作用下,由于海陆热力性质差异,主导风是海风,而温度波动反映了太阳辐射的变化,因此在较长时间尺度上风速与光学湍流周期波动有较高相关性;在稳定层结下,各因素与光学湍流的相关性减弱,造成该现象的原因可能是稳定层结下各组分温度趋于一致,热量交换及物质交换也基本处于平衡状态,整体上,风速与温度仍具有很高的相关性。结合上面结论得出,各因素与光学湍流周期波动在不稳定层结的整体相关性较大,稳定层结下减弱;但是稳定层结和不稳定层结下海陆交接处风速与温度的周期波动均有较强的关联性。

表 3 气象要素与 C_n^2 边际谱互相关性Table 3 Cross correlation of meteorological elements and C_n^2 marginal spectra

Cross correlation coefficient	Daytime		Night	
	All scales	$\log_{10} T \geq 2$	All scales	$\log_{10} T \geq 2$
$R(C_n^2 \text{ and humidity})$	0.9012	0.8893	0.7493	0.4992
$R(C_n^2 \text{ and temperature})$	0.8489	0.7350	0.7294	0.6102
$R(C_n^2 \text{ and wind speed})$	0.8357	0.5520	0.7550	0.4554
$R(\text{temperature and wind speed})$	0.9217	0.8534	0.9660	0.9609

4 结 论

利用 2019 年 11 月于沿海地区测得的近海面光学湍流数据,结合 EEMD 方法分析了近海面光学湍流的时空尺度特征,得到含 1 个高频噪声、7 个周期性较强项、1 个趋势余项的 IMF 信号,各分解信号包含 C_n^2 不同尺度的物理信息。 C_n^2 在整体上呈现非平稳、非周期性,无特征尺度,但其 IMF 有较好周期性;在月份统计的基础上,得到 IMF 时间尺度和阶数有较好的自然指数变化的规律,基本吻合 $T = Ae^{\lambda m}$ 形式,在近似平稳的条件下,时间尺度可以反映出空间尺度的信息,结果可以与湍流级串过程相互印证。下一步可探究数值 λ 与湍流间歇性及湍流分数维^[19-20]之间的关系。

将分解结果结合 Hilbert 变换,对时间-频率-能量三维频谱进行分析发现, C_n^2 的 IMF 频率波动集中在中高部分,时间上集中在热力作用比较强的时候,且光学湍流中不同尺度的信号在各自中心频率的波动强度在时间尺度上与整体湍流强度有较高的一致性。结合传统傅里叶方法和边际谱特征,分析了近海面光学湍流变化,边际谱在反映湍流精细结构时更具有优势,将 C_n^2 边际谱结合常规气象参数边际谱,分析发现各因素与光学湍流周期波动在不

稳定层结整体相关性较大,稳定层结下减弱;温度和水平风速在两种状态下相关性均比较高。

以上方法可作为进一步了解光学湍流的精细结构、发展和影响因素的技术手段,也为海洋环境下激光传输提供一定的参考意义。但是本文仅限于此次实验中的湍流及气象数据,今后可以采用相响应和采样频率更高的仪器,获得更高分辨率的数据,以获得更宽频的信息,从而来探索大气光学湍流的特性、形成和发展的机理。

参 考 文 献

- [1] 胡非. 湍流、间歇性与大气边界层[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 160-164.
Hu F. Turbulence, intermittence and atmospheric boundary layer[M]. Beijing: Science Press, 1995: 160-164.
- [2] 张宏昇. 大气湍流基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014: 31-36, 161-180.
Zhang H S. Atmospheric turbulence foundation[M]. Beijing: Peking University Press, 2014: 31-36, 161-180.
- [3] Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417): 563-589.
- [4] 许满满, 邵士勇, 刘庆, 等. 复杂地形下海陆风对大

- 气湍流的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1201002.
- Xu M M, Shao S Y, Liu Q, et al. Influences of sea and land winds on atmospheric turbulence under complex terrain[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1201002.
- [5] 杨泽堃, 孙刚, 刘庆, 等. 基于小波分析的高空大气湍流相干结构特征研究[J]. 大气与环境光学学报, 2017, 12(5): 340-348.
- Yang Z K, Sun G, Liu Q, et al. Characteristics of coherent structures of atmospheric turbulence in high latitude based on wavelet analysis[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2017, 12(5): 340-348.
- [6] 白士伟, 孙刚, 李学彬, 等. 小波分析在近地面湍流相干结构研究中的应用[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0501002.
- Bai S W, Sun G, Li X B, et al. Application of wavelet analysis in research of near-surface turbulence coherent structure[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0501002.
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [8] Huang N E. Review of empirical mode decomposition[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4391: 71-80.
- [9] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [10] Kidwell A, Jo Y H, Yan X H. A closer look at the central Pacific El Niño and warm pool migration events from 1982 to 2011[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(1): 165-172.
- [11] 曹冲锋, 杨世锡, 杨将新. 大型旋转机械非平稳振动信号的 EEMD 降噪方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9): 33-38, 212.
- Cao C F, Yang S X, Yang J X. De-noising method for non-stationary vibration signals of large rotating machineries based on ensemble empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(9): 33-38, 212.
- [12] 陈小威, 李学彬, 孙刚, 等. 基于 EEMD 的光学湍流廓线确定项与随机项分析[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0101001.
- Chen X W, Li X B, Sun G, et al. Background and stochastic terms of optical turbulence profile based on ensemble empirical mode decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0101001.
- [13] Chen X W, Li X B, Sun G, et al. Effects of intermittency and stratification on the evaluation of optical propagation[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(8): 080101.
- [14] 丁海宁, 朱苗苗, 马利红, 等. 白光衍射相位像光晕效应消除方法[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0509001.
- Ding H N, Zhu M M, Ma L H, et al. Elimination method of halo artifacts in white-light diffraction phase microscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0509001.
- [15] 翁宁泉, 曾宗泳, 肖黎明, 等. 大气光学湍流测量中平均时间和原始数据的筛选[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(9): 1101-1105.
- Weng N Q, Zeng Z Y, Xiao L M, et al. Study of average time and source data differentiation in measuring atmospheric optical turbulence[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(9): 1101-1105.
- [16] (美)斯塔尔. 边界层气象学导论[M]. 杨长新, 译. 北京: 气象出版社, 1991.
- Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Yang C X, Transl. Beijing: China Meteorological Press, 1991.
- [17] Gabor D. Theory of communication[J]. Radio and Communication Engineering, 1946, 93(26): 429-457.
- [18] Richardson L F. The supply of energy from and to atmospheric eddies[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1920, 97(686): 354-373.
- [19] 刘式达, 梁福明, 刘式适. 大气湍流[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008: 45-49.
- Liu S D, Liang F M, Liu S S. Atmospheric turbulence[M]. Beijing: Peking University Press, 2008: 45-49.
- [20] Mandelbrot B B. On the geometry of homogeneous turbulence, with stress on the fractal dimension of the iso-surfaces of scalars[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 72(3): 401-416.