

· 光学设计 ·

基于光纤色散的光学波束形成网络技术研究

陈尔东, 贺文干, 吴彭生, 李琳

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 合肥 230088)

摘要: 宽带光控阵列是将微波光子学技术同阵列技术相结合的产物, 它不仅保留了阵列系统的技术优势, 而且具有大带宽、易于同时形成多个波束、抗电磁干扰等特点, 宽带光学波束形成网络正是宽带光控阵列的核心技术。介绍了光学波束形成的基本原理及其宽带特性, 介绍了一种基于光纤色散的光学波束形成技术, 并搭建了光学波束形成网络试验系统, 对试验系统进行了测试, 最后给出结论。

关键词: 光学波束形成网络; 宽带光控阵列; 光纤色散

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-06-0029-06

Research on Optical Beamforming Network Technology Based on Fiber Dispersion

CHEN Er-dong, HE Wen-gan, WU Peng-sheng, LI Lin

(China Electronics Technology Group Corporation No.38 Research Institute, Hefei 230088, China)

Abstract: Optically controlled phased broadband array is a combination of microwave photonics technology and array technology, which not only retains the technical advantages of the array system, but also has the characteristics of large bandwidth, easily forming multiple beams at the same time and anti-electromagnetic interference. Broadband optical beamforming network is the core technology of optically controlled phased broadband array. The basic principles and broadband characteristics of optical beamforming network are introduced. An optical beamforming technology based on optical fiber dispersion is presented. An optical beamforming network experimental system is set up. The experimental system is tested and conclusions are drawn.

Key words: optical beamforming network; optically controlled phased broadband array; fiber dispersion

宽带光控阵列是将微波光子学技术同阵列技术相结合的产物, 它不仅保留了阵列系统的技术优势, 而且结合光学处理技术大带宽的特点, 相对于传统的微波技术及数字阵列技术, 宽带光控阵列具有瞬时工作带宽大、体积小、质量轻、集成度高、电磁兼容性好、传输损耗小等技术优势, 光学波束形成网络正是宽带光控阵列的核心技术。

1 光学波束形成原理

1.1 电信号的光学合成原理

对于光控天线阵列中经光学延时网络处理的

信号, 若采用传统的微波网络实现波束形成, 需首先将各通道的光信号转换为微波信号再进行合成。这种处理方式一方面会因为经多次光电、电光变换, 增加系统损耗, 使系统变得更加复杂; 另一方面也会因为引入微波域处理影响系统的宽带特性。若在光域采用光学处理方式直接实现波束形成处理, 将进一步提高光控天线阵列系统的技术优势^[1-3]。

采用光学处理技术实现波束形成的基本原理可通过图1表示。

两路微波信号经幅度调制到不同波长的光载波上, 光载波经过不同延时后采用波分复用技术合

成,波分复用的光信号最后经光电探测器转换为微波信号。由于调制在光载波上的微波信号保留着原有的幅度与相位信息,波分复用的两路波长不同,互不相干的光载波经过宽带光电探测器后,便实现了微波信号的合成。

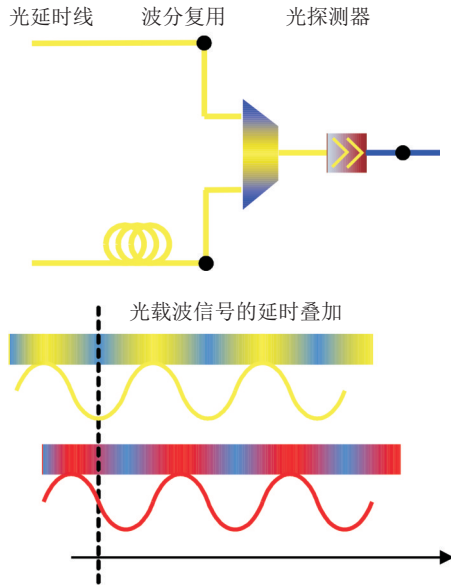


图1 光域实现微波信号的延时叠加

采用光处理技术实现微波信号的合成也可通过下述公式进行表示。

经光电转换链路后微波信号功率可表示为

$$P = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot |m \cdot I_{\text{det}} \cdot \exp(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)|^2 = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot (m \cdot I_{\text{det}})^2 \quad (1)$$

式中, m 代表调制深度; Z 代表匹配阻抗; φ 代表微波信号的相位; f 代表微波信号频率; I_{det} 代表光电转换强度。

设各路光载波是非相干的,互相之间不会产生相位干涉,宽带光电探测器对各路光载波有相同的强度响应。各路光载波合成后,经过光电探测器转换,恢复出来的微波信号功率为

$$P = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot \left| \sum_i m_i \cdot I_{\text{det}i} \cdot \exp(j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t + j \cdot \phi_i) \right|^2 \quad (2)$$

经过简化,合成后微波信号的功率值为

$$P = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot \left| \sum_i m_i \cdot I_{\text{det}i} \cdot \exp(j \cdot \phi_i) \right|^2 \quad (3)$$

由上式可知,多路信号合成后的功率值,仅同各路相位差有关,两路功率相同、相位相同的微波

信号,经合成后,功率值将增加一倍,其结果与微波合成是相一致的。因而,采用光学技术可以实现微波合成及波束形成。

1.2 光学波束形成带宽特性

采用微波移相器控制的相控阵天线,由于采用相位控制技术,对各频率点的延迟时间不同,会引起宽带、宽角扫描时波束指向的偏斜。而相对于传统微波阵列,光控阵列采用真时延技术,具有良好的超宽带特性,可以在很宽的频率范围内,实现宽带、宽角扫描,波束指向无偏斜^[4-9]。

这里通过一个4单元的阵列模型,对微波相控阵与光控阵进行比较,简要分析光控阵列实现宽带、宽角扫描的原理。

微波移相器控制的4单元阵列如图2所示。

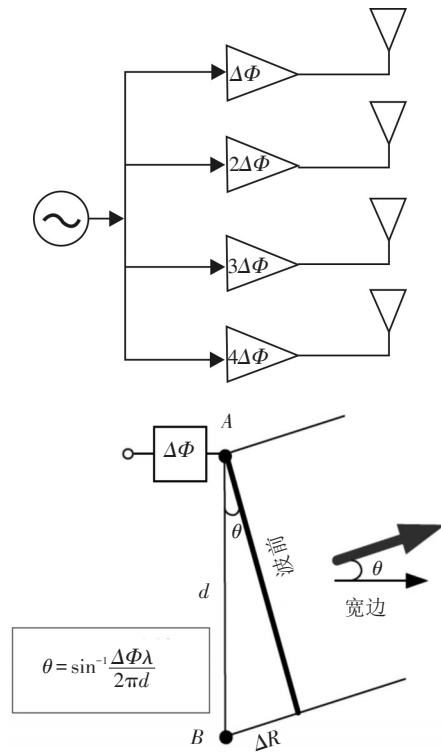


图2 基于微波移相技术的4单元阵列

若对各阵元分别进行的移相控制,相位延迟分别为 $\Delta\phi$, $2\Delta\phi$, $3\Delta\phi$, $4\Delta\phi$, 阵元间相位差为 $\Delta\phi$ 。

根据图中所示的几何关系:

天线波束指向可通过公式表示为

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi d} \quad (4)$$

式中, d 为阵元间距; λ 为工作波长; $\Delta\phi$ 为阵元间相位延迟。

由上式可见,微波相控阵天线的波束指向不仅是相位延迟 $\Delta\phi$ 的函数,而且是工作波长 λ 的函数,因而导致在相同的相位延迟下,波长不同时,天线波束的指向不同^[10]。

采用光延时控制的4单元阵列如图3所示。

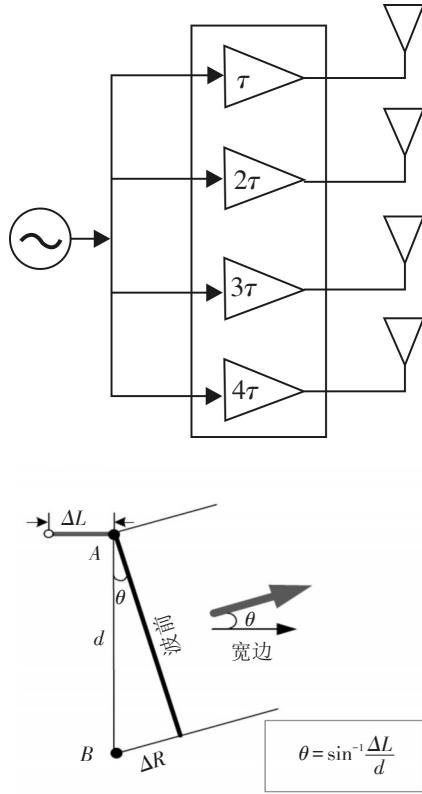


图3 基于光延时技术的4单元阵列

光延时技术采用真实时延代替微波移相器的相位控制,各阵元延迟时间分别为 $\tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau$, 阵元间时延差为 τ 。

根据图中所示的几何关系:

天线波束指向可通过公式表示为

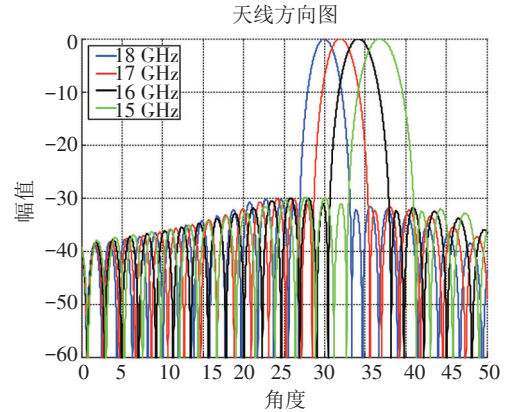
$$\theta = \sin^{-1} \frac{\tau}{d} \quad (5)$$

式中, d 为阵元间距; τ 为阵元间时延差。

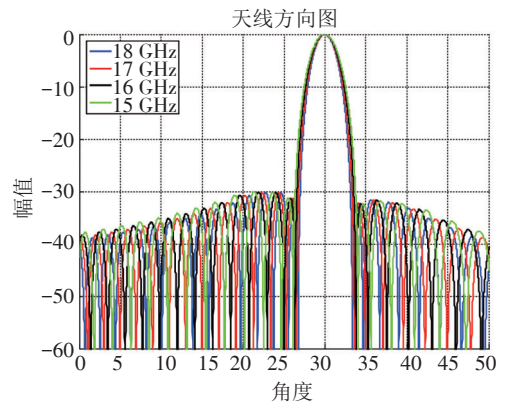
由上式可见,基于光延时技术的光控天线阵列,其波束指向仅与各阵元间的时延差有关,同波长无关。

基于微波移相技术与光延时处理技术仿真生成的天线方向图如图4所示。图4a为基于微波移

相器技术仿真生成的天线方向图,其波束指向随频率的变化发生了指向偏斜。图4b为基于光延时技术仿真生成的天线方向图,虽然随频率变化天线波束存在一定展宽,但波束指向未发生变化,避免了波束指向偏斜现象的发生。



(a)基于微波移相器的天线方向图



(b)基于光延时的天线方向图

图4 两种延时网络不同频点的天线波束指向

2 基于光纤色散技术的光学波束形成

2.1 光纤色散延时原理

在物理光学中,色散是指由于某种物理原因使具有不同波长的光通过透明介质后被散开的现象,例如一束白光经三棱镜后分为彩色光带,这是因为玻璃对不同波长(不同频率)的光有不同的折射率,即玻璃的折射率是光波长(光波频率)的函数,从而不同波长的光在玻璃中的传播速度也不相同。

光纤作为一种玻璃传输介质,若光纤中所传输的信号由不同频率成分携带,这些不同频率成分的

传输速度也不相同,从而产生了传输时延差,由于光纤色散效应所产生的时延差正可实现波束形成所需要的延时控制。

根据色散光纤的原理可知,采用色散光纤技术实现波束扫描,天线扫描角仅同色散光纤长度有关,色散光纤越长,则延时步进量越大,扫描范围越大。以采用色散系数 17 ps/nm.km 的商用 G652 光纤为例,基准波长设置为 1550 nm ,采用密集波分复用技术,相邻波长间隔设置为 0.8 nm ,相邻通道间由色散引起的时延量为 13.62 ps/km 。对于 $6\sim 18 \text{ GHz}$ 的天线阵列,阵元间距取 8 mm 时,按照波束扫描 30° 计算,通道间时延差为 13.3 ps ,最大时延差为 $13.3 \times (N-1) \text{ ps}$ 。经计算,采用 1 km 的 G652 光纤便可实现 $6\sim 18 \text{ GHz}$ 天线阵列 30° 的扫描控制。若采用高色散系数光纤(通常色散系数达 200 ps/nm.km),则只需更短的光纤便可实现大角度扫描。

基于色散光纤技术的光学波束形成网络,采用单根光纤可同时实现多通道延时,原理上具有较高的通道间幅度与相位一致性,其通道延时控制精度主要取决于对激光源波长的控制精度。光源的波长控制精度可控制在 0.005 nm 范围内,相对于 1550 nm 的基准波长,由于光源波长误差引起的相位误差可忽略。

2.2 宽带光学波束形成网络设计

搭建了一套光学波束形成网络试验系统,通过光纤色散原理实现天线单元的时延控制^[11],光学波束形成网络可实现 16 单元阵面的波束形成,同时形成 16 个覆盖 90° 空域的波束。宽带光学波束形成网络由多波长激光源阵列、电光调制器、波分复用器、色散光纤延时网络、光电探测器等组成,网络的原理框图如图 5 所示。

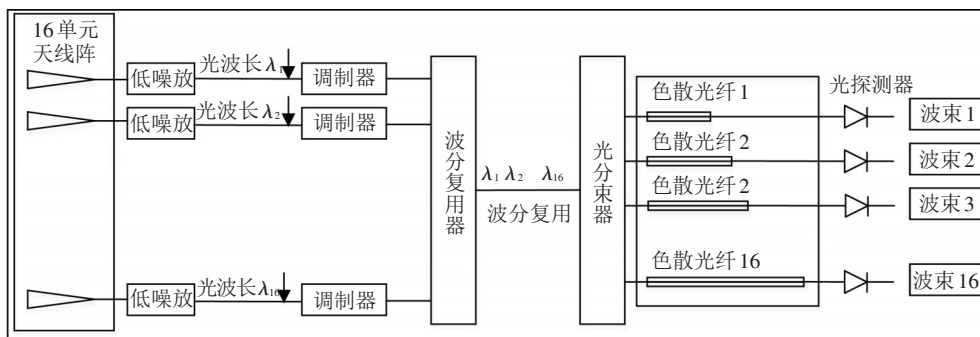


图5 基于光纤色散的光学波束形成网络试验系统

多波长激光源阵列用于产生 16 路不同波长的光载波信号,光载波信号经光纤阵列送 16 路电光调制器,电光调制器用于完成来自天线的 16 路射频信号到不同波长的光载波信号的调制。

经过电光调制器调制到光载波上的射频信号经过波分复用器后通过单根光纤合并为一路进行波分复用传输,由于各路光载波波长不同,各路信号通过单根光纤传输不会相互影响,且具有较高的幅度、相位一致性。

经波分复用合路传输的光载波信号经过光分束器等功分输出 16 路信号,并送给 16 路长度不同的色散光纤。在色散光纤中基于不同波长的光载波传输时延不同的原理,实现对 16 路信号的延时控制。由于不同长度的色散光纤色散延时量不同,因而对应不同的波束指向。通过 16 路色散光纤可

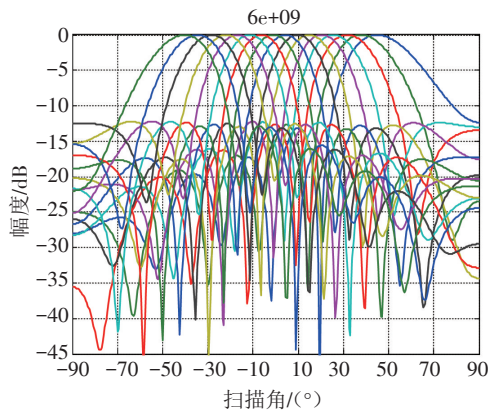
同时形成 16 个指向不同的独立宽带波束,光信号经光电探测器后重新转化为射频信号。

2.3 光学波束形成网络测试

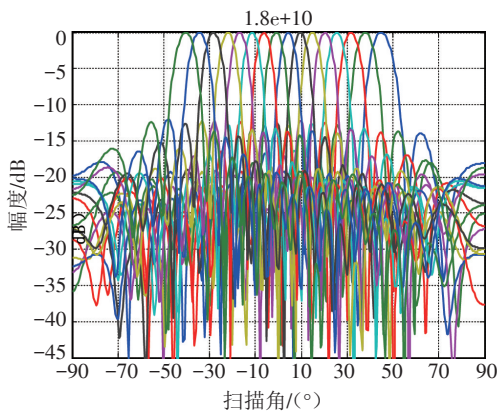
文中介绍的光学波束形成网络采用基于光纤色散的光学波束形成技术,通过光纤实现真延时,抵消了孔径渡越时间,解决了传统相控阵列的波束偏斜问题,满足了系统大扫描角工作、大瞬时带宽等要求。同时,光学波束形成网络采用单通道波束形成体制,通过一路光纤实现一个波束,因而通道间具有较高的幅度、相位一致性,可保证波束形成质量及较低的副瓣电平。

为进一步验证光学波束形成网络性能,对光学波束形成网络进行了性能指标测试,测试结果表明,网络通道间幅度一致性达到 1 dB ,相位一致性

达到 10° 。根据网络测试结果生成的波束方向图如图6所示。



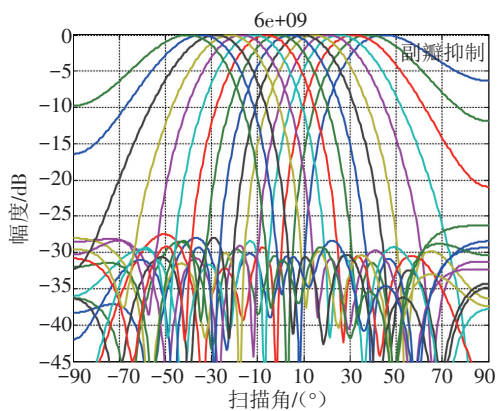
(a) 6 GHz 频点, 16 波束方向图测试结果



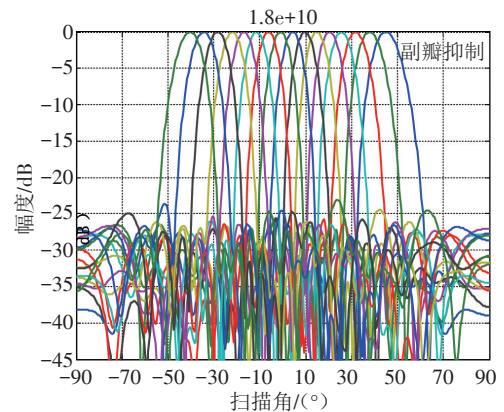
(b) 18 GHz 频点, 16 波束方向图测试结果

图6 光学波束形成网络方向图测试结果

文中为了验证光学波束形成网络在大的带宽内形成低副瓣的能力,通过对16单元阵面加泰勒权,实现了 $-20\text{ dB} \sim -25\text{ dB}$ 的副瓣抑制。采用泰勒加权措施进行副瓣抑制后的天线方向图如图7所示。



(a) 6 GHz 频点, 16 波束方向图测试结果



(b) 18 GHz 频点, 16 波束方向图测试结果

图7 光学波束形成网络泰勒加权后方向图测试结果

3 结论

介绍了一种基于光纤色散效应的光学波束形成网络技术,并基于该技术搭建了一套光学波束形成网络试验系统。该网络实现了16单元天线阵面的宽带波束形成,同时形成16个瞬时覆盖 90° 空域的宽带波束。

文中还对所搭建的光学波束形成网络进行了性能指标测试。测试结果表明,该光学波束形成网络在 $6 \sim 18\text{ GHz}$ 频段范围内实现了宽带光学波束形成,解决了波束指向偏斜的问题。同时,通过性能指标测试也证明了基于光纤色散体制的光学波束形成网络通道间具有较高的幅度、相位一致性,确保了波束形成质量。通过泰勒加权,网络可以实现约 -25 dB 的副瓣抑制。

参考文献

- [1] 张明友. 光控相控阵雷达[M]. 北京:国防工业出版社.
- [2] 何子述,金林,韩蕴洁,等. 光控相控阵雷达发展动态和实现中的关键技术[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2191-2195.
- [3] 张忠华,孙晓昶. 光控相控阵雷达[J]. 电讯技术, 2004, 44(2): 71-75.
- [4] 官伟,金谋平. 相控阵雷达中的光纤实时延迟方案研究[J]. 电信快报, 2005.
- [5] 李冬文,贾春燕,叶莉华,等. 光控相控阵雷达中的真延时技术[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(3): 37-42.
- [6] 周建华,任国荣,杨健君,等. 啁啾光纤光栅延迟线在光控相控阵雷达中的应用研究[J]. 光学与光电技术,

2008,6(1):33-36.

- [7] 江友平,梁晶.色散光纤在X波段光控相控阵雷达技术中的应用[J].舰船电子对抗,2012,35(2):47-49.
- [8] 严济鸿.宽带相控阵雷达波束控制技术[D].西安:电子科技大学,2011.
- [9] 蒋国锋.光控相控阵天线的关键技术[J].现代雷达,

2014,36(8):57-59.

- [10] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [11] Madziar K M, Dawidczyk J. Modelling of the dispersion coefficient for the optical beamforming for phased array antennas[J]. SPIE, 2006.

(上接第5页)

外波段比传统烟幕大得多。说明乳状液烟幕对可见光、中波红外、长波红外都具有良好的干扰效果。同时对雷达波段(3mm波和8mm波)乳状液烟幕相对传统烟幕也具有良好的衰减效果,扩展了干扰波段。

4 结 论

提出具有多层结构的乳状液烟幕,通过对液态烟幕多光谱干扰技术和乳状液烟幕干扰理论的研究,从其技术原理、实现方法和初步实验结果,都可看出该技术具有一定的有效性。即可同时高效干扰可见光、红外、雷达波段,适应烟幕向绿色环保、环境适应性好、宽波段干扰的发展趋势。为舰载烟幕的施放及干扰的实现提出切实可行的方法,以充分发挥现代液态烟幕在未来海战中的作用。

参考文献

- [1] 周刚,过海峰.遮蔽型烟幕作战使用效能评估[J].红外

与激光工程,2007,9(36):449-453.

- [2] 王甲寅,吕相银.水雾在舰艇防御光学制导导弹中的应用[J].舰船电子对抗,2004,27(2):15-23.
- [3] 高凯,沈卫东,宋思洪,等.水雾多光谱隐身实验研究[J].光电技术应用,2004,74(1):35-38.
- [4] 王培义,徐宝财,王军.表面活性剂——合成性能应用[M].2版.北京:化学工业出版社,2012.
- [5] 金良安,王孝通,付建国,等.泡沫型干扰幕及其多波段干扰特性研究[J].兵工学报,2006(3):248-251.
- [6] Giglia R D. Radar, infrared-detectable structural simulation decoy[P]. USP, 5092244. 1992-5.
- [7] Embury Jr. Method for creating a one way visible screening smoke[P]. USP, 5682010. 1997.
- [8] Stevens, Ward C. Metal-coated substrate articles responsive to electro-magnetic radiation and method for making and using the same[P]. USP, 60170626. 2000.
- [9] 白玉栋,吴涛.烟幕干扰下红外成像制导导弹的作战效能分析[J].红外,2013,34(5):39-41.
- [10] 谭伟,何友金,毛剑英.烟幕干扰效能评估系统设计[J].光电技术应用,2010,25(5):65-69.

(上接第19页)

- [11] Chen H L, Wen X W, Zhang J, et al. Ultrafast formation of interlayer hot excitons in atomically thin MoS₂/WS₂ heterostructures[J]. Nature Communication, 2016, 7: 12512.
- [12] Chen K, Gallaher J K, Barker A J, et al. Transient grating photoluminescence spectroscopy: an ultrafast method of gating broadband spectra[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2014, 5: 1732-1737.
- [13] Zhao L, Luis P L, Farztdinov V, et al. Femtosecond fluorescence spectroscopy by upconversion with tilted gate pulses[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2005,

7: 1716-1725.

- [14] Chen K, Barker A J, Reish M E, et al. Broadband ultrafast photoluminescence spectroscopy resolves charge photogeneration via delocalized hot excitons in polymer:fullerene photovoltaic blends[J]. Journal of American Chemistry Society, 2013, 135: 18502-18512.
- [15] Takeda A J, Nakajimma K, Kurita S, et al. Time-resolved luminescence spectroscopy by the optical Kerr-gate method applicable to ultrafast relaxation processes[J]. Physical Review B, 2000, 62: 10083.