

光波束形成中色散延时的非线性修正

邵光灏^{1,2}, 刘 昂^{1,2}, 翟计全^{1,2}, 张国强^{1,2}

(1. 南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039;

2. 中国电子科技集团公司 智能感知技术重点实验室, 江苏 南京 210039)

摘要: 光波束形成网络是光控相控阵雷达中的重要组成部分,有助于提升系统的宽带宽角扫描能力。利用光开关的切换,改变各收发通道间的相对延时量,从而实现波束指向的变化。在常用的技术中,色散延时是一种简洁的光波束形成实现方法,而色散线性项仅适用于色散量小且通道数少的情况。随着延时量的增加,非线性色散延时积累,会引起波束畸变。因此引入相对色散斜率(RDS)作为其非线性因子,并通过调整商用激光器波长来抵消色散介质的非线性效应。当 RDS 为 0.003 nm^{-1} 时,激光器阵列的最大波长间隔从 0.796 nm “拉伸”到 0.862 nm ,波长也整体“平移” -0.31 nm ,修正波长与商用激光器波长的最大调整量为 0.2 nm ,可满足商用波分复用器的通带带宽,大扫描角时主瓣与副瓣之比从 5 dB 提升至 12.9 dB 。通过分析,RDS 数值越小,激光器波长的修正量越小。因此,RDS 是选择色散介质和调整激光器波长的重要参数,从而能够恢复波束畸变,以提升相控阵系统的成像、识别能力。

关键词: 光波束形成; 色散延时; 相对色散斜率; 非线性修正

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210235

Nonlinear modification of dispersion delay for optical beam forming

Shao Guanghao^{1,2}, Liu Ang^{1,2}, Zhai Jiquan^{1,2}, Zhang Guoqiang^{1,2}

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China;

2. Key Laboratory of IntelliSense Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

Abstract: Optical beam forming network is an important part in optically controlled phased array radar, which could improve the beam scanning ability with large bandwidth and direction angle. The direction of beam is usually controlled by optical switches to change relative delay of transmitting and receiving channels. Among commonly-used techniques, dispersion delay is a concision way to realize optical beam forming network. Linear dispersion is only applicable to beam forming with limited dispersion delay and channels. With the increase of delay, nonlinear dispersion delay accumulates, which distorts the beamform. Therefore, relative dispersion slope (RDS) was used as a nonlinear factor. Moreover, adjusting wavelengths of commercial lasers was raised to compensate the nonlinearity. If RDS was 0.003 nm^{-1} , the maximum wavelength interval stretched from 0.796 nm to 0.862 nm and wavelengths shifted -0.31 nm . In this case, maximum difference between modified and commercial laser wavelengths was 0.2 nm , which was suitable for the passband of commercial wavelength division multiplexing devices. In the meantime, ratio of main to side lobe improved from 5 dB to 12.9 dB with large scanning direction. Based on the analysis, the smaller RDS value was, the less wavelengths modifications of lasers were. Therefore, RDS is a key parameter in choosing dispersion material and adjusting wavelengths of lasers. In this way, distorted beamform could be recovered. The abilities of imaging and identifying thus could be improved in phase arrayed systems.

收稿日期:2021-04-10; 修订日期:2021-05-26

作者简介:邵光灏,男,工程师,博士,研究方向为微波光子技术及其应用。

Key words: optical beam forming; dispersion delay; relative dispersion slope; nonlinear modification

0 引言

微波光子相控阵雷达,利用光子的大带宽、低损耗、抗电磁干扰等优势,融合于现有微波技术中,在微波信号远距离传输、任意波形信号产生、超宽带信号采样、宽带宽角波束形成等方面具有重要的研究意义和应用价值^[1-6],能够提升雷达的超宽带成像分辨率、精细化目标识别等能力,有利于雷达向超宽带、一体化方向发展^[7-8]。

光波束形成网络是光控相控阵雷达中的重要组成部分,利用光真延时网络补偿电移相器带来的孔径渡越效应,改善宽带信号在大角度扫描时不同频率波束指向的散焦问题。光波束指向切换大多通过调整阵列光开关的状态,利用不同开关状态下各收发通道间的相对延时差不同,调控雷达天线阵列间的相位关系,从而改变波束指向^[9]。实现光真延时大致分为两种技术途径,一种称为传输延时,即通过精准控制光传输介质的长度来实现延时^[10]。尽管该方案的灵活度较高,适用性广,但会遇到加工精度或插入损耗的问题。例如当传输介质为光纤时,在 X 波段,光纤实际长度与理论长度误差需小于 0.3 mm,在 Ka 波段,其误差需控制在 0.1 mm 以下,这给光波束形成网络的加工带来了挑战^[11]。而将集成光波导作为传输介质时^[12],在大延时量情况下会引起光插入损耗的增加。

另一种称为色散延时,不同波长的光依次对应不同的雷达收发通道,并通过相同的光色散介质,由于色散效应,不同波长对应的延时量不同,以此改变各通道相对延时量^[13]。色散延时技术实现简单,设备量小,对光色散介质的长度误差容忍度高,受到广泛的研究和关注。即使光纤长度误差为 1 m,各通道间的延时误差也仅为 0.4 ps。另外,色散延时也可与传输延时相互融合,扩展其应用范围^[14]。因此,深入分析和采用色散延时将有利于实现光波束形成网络的优化,在保持功能性的同时简化设备量和加工难度,提升系统的插损、功耗等指标。

直至今日,尽管色散延时已经得到了一些研究^[15],但相关分析均基于色散介质的线性色散系数。文中在基于色散延时的光波束形成中,对色散介质的

非线性效应进行分析,并引入相对色散斜率 (RDS) 作为非线性参量。经过理论推导和实验验证,在通道数多且延时量大的情况下,色散的非线性效应将引起波束畸变和散焦。文中提出利用激光器波长的修正来补偿色散介质的非线性效应,并对激光器的波长进行“拉伸”和“平移”优化。经过分析,RDS 数值越小,激光器波长的修正量越小,在商用化波分复用器 (WDM) 的通道带宽限制下所能承载的射频频率越高。因此,RDS 应作为选择色散介质和设计激光器输出波长的重要参数,以改善波束质量,提升系统的成像、识别能力。

1 基于色散延时的光波束形成

光波束形成包括接收波束和发射波束,通常在收发链路通过环形器互联可以共用一套延时网络。文中不失一般性,通过分析接收方向的波束形成来阐述色散延时的光波束形成方案。

图 1 为基于色散延时的光波束形成方案框图。天线接收微波信号,并经过低噪声放大器 (LNA) 进行前级放大,随后通过电光变换,将微波信号加载到光信号上。其中,每个电光变换通道对应的光波长不同,且随着天线通道依次变化。值得注意的是,图 1 中每个电光变换通道不仅可以对应一个单独的天线单元,也可以对应多个天线单元组合构成的集合。不同波长的光信号通过 WDM 合成一路光信号,进入光开关阵列。由于不同波长的光信号在色散介质中的延时量不同,各个天线通道间可以形成渐变的相位关系,并通过光电探测器 (PD) 进行波束合成。因此,通过改变阵列光开关的状态,可以对链路中色散延时总量进行切换,以实现波束的扫描。

常用的色散介质包括光纤、光栅或其他色散介质,其色散延时原理一致,非线性的修正方法类似。文中以现阶段工程化成熟度更高的光纤色散为例进行分析。

波长间隔为 $\Delta\lambda$ 的两个光波长,在长度为 L 、色散系数为 $D(\lambda)$ 的介质中产生的相对延时差为:

$$\Delta\tau = D(\lambda) \times L \times \Delta\lambda \quad (1)$$

值得注意的是,色散系数 $D(\lambda)$ 除包含线性项外,

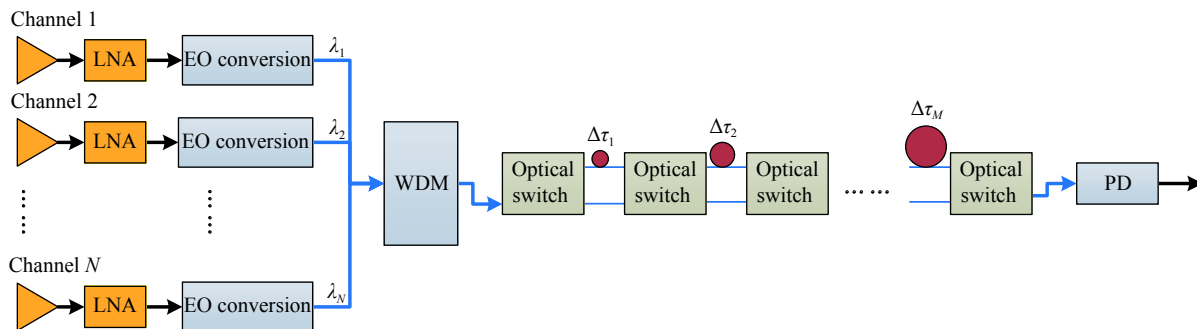


图 1 基于色散延时的光波束形成框图

Fig.1 Schematic diagram of optical beam forming based on dispersion delay

还包含了非线性项,会对相对延时量产生影响,并在多通道波束合成时改变波束合成质量。设定光纤在波长 λ 处的色散斜率为 S ,则色散斜率与该波长的色散系数 D 之比为相对色散斜率 RDS ,即 $RDS=S/D$ 。则

$$D(\lambda) = S(\lambda - \lambda_0) + D_0 = D_0(1 + RDS \Delta\lambda) \quad (2)$$

式中: D_0 为波长为 λ_0 时的色散系数; $\Delta\lambda$ 为波长 λ 与基准波长 λ_0 之差。而公式 (2) 中的第二项即为色散系数的非线性变化。通常而言,尽管色散系数会随着波长有微小变化,但在一定波段范围内, RDS 基本保持不变。因此,更高阶的非线性色散量可以忽略。

另一方面,波束指向 θ 与各通道间延时差可以表述为:

$$\theta = \arcsin(\Delta\tau \times c/d) \quad (3)$$

式中: c 为光速; d 为通道间隔。将公式 (1)~(2) 代入公式 (3) 中,即可得到波束指向与色散系数的关系为:

$$\theta = \arcsin(D_0(1 + RDS \times \Delta\lambda) \times L \times \Delta\lambda \times c/d) \quad (4)$$

值得注意的是,可以根据通道间距进行波长间隔的设计,因此,色散延时方案不仅适用于均匀分布的天线阵列,还可应用于稀疏阵等分布不均匀的天线阵列。

2 色散延时的非线性修正

之前的波束形成设计仅考虑了波束指向与色散系数的线性关系,即忽略公式 (4) 中的非线性项 $RDS \times \Delta\lambda$ 。在通道数较少或总延时量较小时,带来的非线性误差较小,波束方向图不会有明显的改变^[15]。而随着通道数的增加,通道间的波长间隔增大,非线性项的误差不断累积,会改变雷达的波束方向图,因此需要对其中的非线性因子进行修正。

设定雷达第 M 个通道对应的光波长为 λ_M ,则第 M 个通道与第 1 个通道的对应的色散延时差为 $D_0(1 + RDS \times \Delta\lambda_{M-1}) \times L \times \Delta\lambda_{M-1}$,其中已经将 $\lambda_M - \lambda_1$ 简记为 $\Delta\lambda_{M-1}$, D_0 为基准波长 λ_1 时的色散系数。对于等间距的天线阵面而言,各通道的延时差应为线性关系,即第 M 个通道与第 1 个通道的延时差应为第 2 个通道与第 1 个通道延时差的 $(M-1)$ 倍,因此有:

$$\frac{D_0(1 + RDS \times \Delta\lambda_{M-1}) \times L \times \Delta\lambda_{M-1}}{D_0(1 + RDS \times \Delta\lambda_{2-1}) \times L \times \Delta\lambda_{2-1}} = M - 1 \quad (5)$$

可以看出,色散的非线性可以通过改变激光器波长的间隔 $\Delta\lambda$ 进行修正,从而对色散介质的非线性效应进行补偿。将 $\Delta\lambda_{2-1}$ 作为各通道间波长间隔的基准量,通过公式 (5) 可以计算出第 M 个通道与第 1 个通道的激光器波长差为:

$$\Delta\lambda_{M-1} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4RDS(M-1)\Delta\lambda_{2-1}(1 + RDS\Delta\lambda_{2-1})}}{2 \times RDS} \quad (6)$$

选用商用 G652 光纤作为色散介质,其色散系数约为 $16 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$, RDS 约为 0.003 nm^{-1} ,截取约 5 km 的光纤进行试验分析。根据 1550 nm 波段密集波分复用设定的激光器阵列波长,选取 $1532.681 \sim 1557.363 \text{ nm}$ 中连续 32 个波长,每个波长间隔 100 GHz (约 0.796 nm),按照顺序依次对应天线的每个通道,其中波长与天线通道的对应关系如图 2(a) 中蓝色线所示。测试每个通道与第 32 个通道 (波长 1532.681 nm) 之间的色散延时差,结果如图 2(b) 中蓝色线所示,各通道间的延时差呈现一定的非线性弯曲,会导致光波束的散焦和畸变。

在波长修正时,首先根据公式 (6) 确定各通道波长间隔比例,由于 $RDS > 0$,相邻通道间的波长间

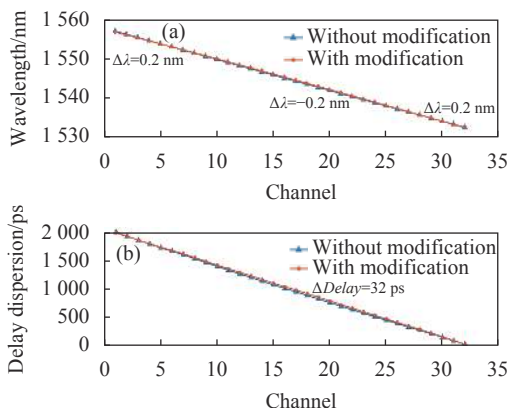


图 2 (a) 各通道非线性修正前后对应的波长; (b) 各通道非线性修正前后与第 32 通道的色散延时差

Fig.2 (a) Wavelengths versus channels without modification and with modification; (b) Relative dispersion delays of different channels to the 32nd channel without modification and with modification

隔逐渐减小。若 $\Delta\lambda_{2-1}$ 仍为 0.796 nm, 则激光器波长与 1550 nm 波段标准通信波长的偏差值将逐渐增加。为沿用商用化波分复用器, 降低光波束形成系统的成本, 对 $\Delta\lambda_{2-1}$ 进行“拉伸”。与此同时, 还需降低修正后各通道波长与标准通信波长差值的平均值, 对所有激光器波长进行“平移”操作, 以整体提升各通道的光合成性能。将 $\Delta\lambda_{2-1}$ “拉伸”为 0.862 nm 且激光器波长整体“平移”-0.31 nm, 此时, 修正后各通道与标准通信波长差值的平均值仅为 0.09 nm, 能够在修正非线性色散的同时, 兼顾使用低成本商用化器件。修正后的 32 通道波长如图 2(a) 中红色线所示, 其与未调整时的波长差最大值约为 0.2 nm, 出现在第 1、17 和 32 通道。测试修正后的每个通道与第 32 个通道之间的色散延时差, 从图 2(b) 中红色线可以看出, 修正前后的最大延时差约为 32 ps, 出现在第 17 个通道。经过非线性修正, 各通道间色散延时差的线性度提升, 拟合系数 $R^2=0.99998$, 有利于波束方向图质量的提升。

在波束指向计算中, 选用单元间隔为 15 mm 的 32 单元天线阵列, 共 5 级色散光纤, 长度分别为 170、340、680、1360、2720 m, 分别级联在如图 1 所示的阵列光开关中。通过调整光开关“直通”和“交叉”态, 可改变光合成时色散光纤的长度。因此, 共有 32 种不同的开关状态组合, 对应 32 种不同的色散光纤长度。基于 5 km 光纤时各通道色散延时差的测试结果, 分析出不同光开关状态组合, 波长修正前和修正

后各通道间的延时差, 并结合微波频率和天线单元间距仿真出该开关状态下的波束指向。而在所有光开关为直通状态 (对应色散光纤长度为 0) 时, 调整各通道初始延时差, 使波束指向为 -45° 。仿真使用 10 GHz 作为特征频率, 避免出现栅瓣。

图 3(a) 为激光器波长按照等间隔选择时所有开关状态下的波束指向。可以看出, 在扫描角与初始角度 (-45°) 相差不大, 即光纤长度短时色散的非线性累积效应不明显, 波束方向图仍保持较好。但随着扫描角度的增加, 未修正激光器波长的波束指向逐渐发生畸变, 主瓣逐渐展宽且副瓣逐渐抬升, 在波束指向 42° 时, 波束合成效果差, 出现了严重的散焦和畸变。这是由于在色散延时量增加后, 相邻通道间延时差的非线性度增加, 导致相邻通道间对应的波束指向偏离变大, 波束没有形成聚焦。图 3(b) 为激光器波长通过非线性修正后波束指向的结果。可以看出, 通过激光器波长对色散的非线性进行修正, 波束形状畸变消失, 在波束指向 42° 时, 主副比仍保持在 12.9 dB, 印证了通过激光器波长对色散介质进行非线性修正后能够明显提升波束形成质量。

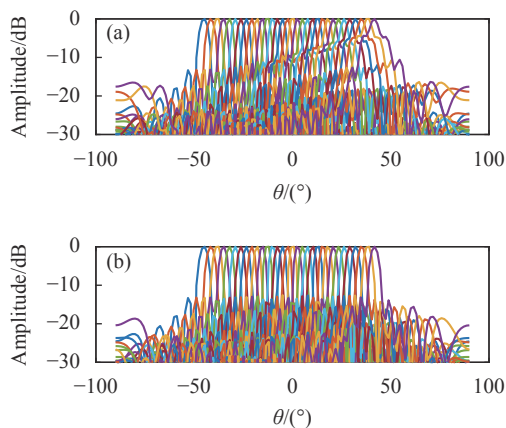


图 3 (a) 未修正激光器波长时波束指向方向图; (b) 修正激光器波长后波束指向方向图

Fig.3 (a) Beamform patterns without laser wavelengths modification; (b) Beamform patterns with laser wavelengths modification

3 讨论

通过上述分析可以看出, 在利用色散延时进行光波束形成时, 若仅考虑色散介质的线性效应, 在色散延时量增大后, 其非线性误差累积增加, 将改变波束

质量。而通过调整激光器的波长间隔,对天线通道对应的光波长进行修正后,则可对光波束的畸变进行改善。

通常来说,激光器波长的微调可以通过激光器芯片的温度控制板实现,不会增加成本和复杂度。而由于调整后的激光器波长偏离了 1550 nm 波段密集波分复用下的标准通信波长,理论上,使用的 WDM 的通带中心波长也需进行相应改变,这就带来了成本的提升。为降低成本,需选用商用化的光器件,因此可以根据链路中的 WDM 通带带宽和光载射频频率改变激光器波长基准偏移量和基准波长值,即对激光器阵列输出波长进行“拉伸”和“平移”,最小化各通道与标准波长的差值。

事实上,激光器波长的最大偏移量取决于色散介质的 RDS。图 4 展示了在采用了基准波长间隔和波长整体偏移两种优化方案后,如前所述的 32 通道中 RDS 的变化对最大波长偏移量的影响。总体而言,RDS 数值越小,激光器的波长偏移量越小,在 WDM 通道带宽的限制下,所能承载的射频频率越高。因此,RDS 是基于色散延时的光波束形成中不可忽略的因素,应作为选择色散介质和设计输出激光器波长的重要参数。对于其他色散介质,例如光栅或其他色散方式,其非线性修正的原理是类似的。而对未知的色散介质,也可以测试不同激光器波长的色散延时差,拟合出 RDS,并通过文中所述的非线性方法进行修正,调整激光器波长,进行光波束形成网络的设计和制备。

利用色散延时或融合了色散延时的光波束形成,将简化光波束网络设计,降低其加工复杂度和功耗,提升网络设计灵活性,这将有利于促进光控相控阵雷达的发展,提升其宽带特性。而通过色散的非线性修正,可以改善波束形成质量,解决波束的散焦和畸变

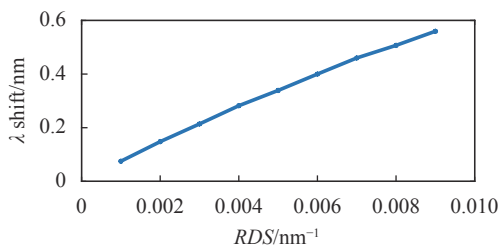


图 4 最大波长偏差与色散介质 RDS 的关系

Fig.4 Maximum wavelengths shifting versus RDS of dispersion material

问题,并增强系统的成像、识别等能力。

4 结 论

文中在基于色散延时的光波束形成分析中,引入 RDS 作为色散介质的非线性项,以增加色散系数分析的普适性。并提出通过调整激光器波长间隔来补偿色散介质的非线性效应。例如:当 RDS 为 0.003 nm^{-1} 时,激光器阵列的最大波长间隔从 0.796 nm“拉伸”到 0.862 nm,波长也整体“平移”-0.31 nm,因此修正波长与商用激光器波长的最大调整量为 0.2 nm,可满足商用波分复用器的通带带宽要求,改善了大色散延时量下的波束散焦和畸变问题,大扫描角时主瓣与副瓣之比从 5 dB 提升至 12.9 dB。另外,RDS 数值越小,激光器波长的修正量越小。因此,在基于色散延时或融合色散延时的光波束形成中,非线性参数 RDS 应作为选择色散介质和设计激光器输出波长的重要依据,以提升光波束形成质量,增强系统在成像、识别等方面的能力。

参考文献:

- [1] Xu Mengmeng, Zhou Yu, Sun Jianfeng, et al. Generation of linear frequency modulation laser source with broadband narrow linewidth using optical phase modulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0205004. (in Chinese)
- [2] Zheng Pengfei, Yun Binfeeng. Reconfigurable optical filter based on self-couple ring resonator assisted MZI structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 1-9. (in Chinese)
- [3] Wang Chao, Xiao Yongchuan, Lin Shuqing, et al. Generation of a 49 GHz, high-repetition-rate, all-polarization maintaining, frequency-locked multicarrier [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 745-751. (in Chinese)
- [4] Wu Nishan, Xia Li. Interrogation technology for quasi-distributed optical fiber sensing systems based on microwave photonics [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 245-263. (in Chinese)
- [5] Li Xiang, Wang Yalan, Ni Ziheng, et al. Broadband microwave frequency down-conversion using cascade Mach-Zehnder modulators to capture the target distance information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2622-2628. (in Chinese)
- [6] Cheng Chuyu, Yang Fu, Liu Zheng. Simulation of ranging precision based on dual comb ranging system [J]. *Infrared and*

- Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200376. (in Chinese)
- [7] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [8] Pan S, Zhang Y. Microwave photonic radars [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(19): 5450-5484.
- [9] Zhang Yebin, Sheng Yongxin, Tian Xiaoguang. In-situ calibration system of phased array radar antenna based on microwave photonic technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0717005. (in Chinese)
- [10] Dug S, Song L, Gyouon K. Optical true time-delay feeder for X-band phased array antennas composed of 2×2 optical MEMS switches and fiber delay lines [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(5): 1364-1366.
- [11] Qiu Zhicheng, Shi Shuangjin, Qiu Qi. Research of high precision optical fiber delay line [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 72-75. (in Chinese)
- [12] Moreira R, Garcia John, Li Wenzao, et al. Integrated ultra-low-loss 4-bit tunable delay for broadband phased array antenna applications [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(12): 1165-1168.
- [13] He Wengan, Chen Erdong, Hu Yuankui, et al. Insertion loss of optical beam forming network based on dispersion fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 070601. (in Chinese)
- [14] Ye X, Zhang F, Pan S. Compact optical true time delay beamformer for a 2D phased array antenna using tunable dispersive elements [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(17): 3956-3959.
- [15] Li Lin, Wu Pengsheng. A beam receiving network of optically controlled phased array antenna [J]. *Modern Radar*, 2017, 39(10): 72-74. (in Chinese)