

基于色散光纤的光学波束形成网络的插损特性

贺文干*, 陈尔东, 胡元奎, 梅理, 陈信伟, 崇毓华

中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088

摘要 光学波束形成网络相对于传统电学波束形成网络具有带宽大、传输损耗小、抗电磁干扰等特性。国内在多通道射频信号输入情况下,基于色散光纤体制的光学波束形成网络的插损变化规律研究较少。假设光子探测器达到饱和阈值的前提下,分别计算了单通道微波光子链路与双通道光学波束形成网络的插损。推导得到,随着输入射频通道数的成倍增加,采用色散光纤体制的光学波束形成网络的插损也成倍增加。搭建了实验系统,发现当输入射频通道数为2、4、8、16时,对应插损分别为-26.0 dB、-30.8 dB、-34.3 dB、-46.0 dB。

关键词 光纤光学; 色散光纤; 光学波束形成网络; 射频通道; 插损

中图分类号 O439 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.070601

Insertion Loss of Optical Beam Forming Network Based on Dispersion Fiber

He Wengan*, Chen Erdong, Hu Yuankui, Mei Li, Chen Xinwei, Chong Yuhua

No. 38 Research Institute of CETC, Hefei, Anhui 230088, China

Abstract Optical beam forming network has the characteristics of large bandwidth, low transmission loss, and anti-electromagnetic interference, compared with the traditional electrical beam forming network. In the case of multi-channel radio frequency signal input, the law of insertion loss of optical beam forming networks based on the dispersion fiber system is less studied. Assuming that the photon detector reaches the saturation threshold, the insertion losses of the single-channel microwave photon link and the dual-channel optical beam forming network are calculated. It is deduced that as the number of input radio frequency channels increases by multiple folds, the insertion loss of the optical beam forming network using a dispersion fiber also increases in an alike manner. A test system was set up, and verification was carried out. When the number of input radio frequency channels was 2, 4, 8, and 16, the corresponding insertion loss was -26.0 dB, -30.8 dB, -34.3 dB, and -46.0 dB, respectively.

Key words fiber optics; dispersion fiber; optical beam forming network; radio frequency channel; insertion loss

OCIS codes 060.2330; 060.2380; 060.4265

1 引言

基于电学移相器的传统相控阵侦察装备进行宽角扫描时受孔径渡越时间的影响,带宽受到了限制,因而大瞬时带宽信号的适应能力差。微波光子波束形成网络相对于传统电学波束形成网络具有与生俱来的带宽大、传输损耗小、抗电磁干扰等特性,使其成为突破雷达及电子侦察装备带宽瓶颈的关键使能技术^[1-3]。同时光子系统具有重

量轻、体积小、可集成的特点,可将雷达系统的重量大大降低,从而大大减轻飞机、卫星、舰艇等载荷^[4-5]。色散光纤真延时结构是在普通光纤延时结构的基础上发展起来的。采用色散光纤波束形成网络的延时结构简单,成本也较低。但随着微波光子波束形成网络通道数的增加,其性能指标也会发生变化。本文从理论上推导射频通道数与光学波束形成网络性能指标的变化规律,并搭建实验系统,对推导结果进行验证。

收稿日期: 2019-09-24; 修回日期: 2019-11-01; 录用日期: 2019-11-06

* E-mail: hwengan@163.com

2 链路模型

2.1 基于色散体制的接收光学波束形成网络原理

2.1.1 光延时原理

光延时控制四单元阵列如图 1 所示^[6]。光延时技术采用真实时延代替微波移相器进行通道之间的信号相位控制,各阵元延迟时间分别为 $t, t + \tau, t + 2\tau, t + 3\tau$, 其中 τ 为阵元间时延差。

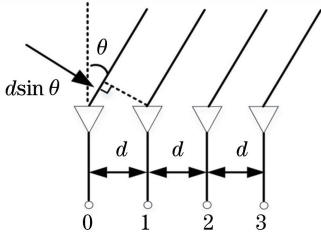
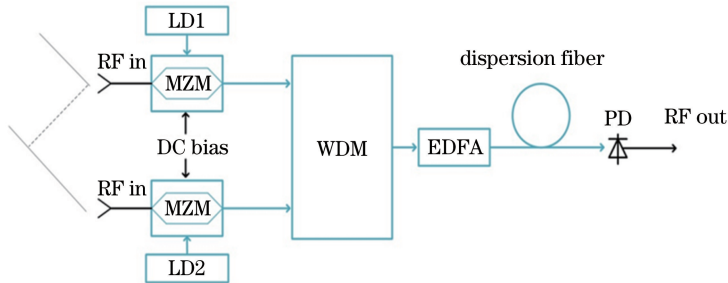


图 1 基于光延时技术的四单元阵列

Fig. 1 Four-cell array based on the technology of optical true time delay

根据图 1 所示几何关系,天线波束指向角^[7]的表达式为

$$\theta = \arcsin [(\tau \times c)/d], \quad (1)$$



RF: radio frequency; LD: laser diode; MZM: Mach-Zehnder modulator; DC: direct current; PD: photodetector; WDM: wavelength division multiplexer; EDFA: erbium doped fiber amplifier

图 2 基于色散光纤体制的双通道波束形成网络原理图

Fig. 2 Schematic of two-channel beam forming network based on dispersion fiber

2.2 多通道光学波束形成网络插损变化计算

2.2.1 双通道光学波束形成网络插损计算

假设 LD 1 与 LD 2 的输出波长不同,光场强度相同。调节矢网中输出信号,使其通过功分器后加载在两个调制器上进行调制,两束被调制的光通过波分复用合路器后,再依次通过光放与色散光纤传至光电探测器上恢复为电信号。基于色散光纤体制的双通道波束形成网络插损测量方法如图 3 所示。

两激光器输出电场强度为

$$E_1 = E_0 \exp(j\omega_1 t), \quad (2)$$

$$E_2 = E_0 \exp(j\omega_2 t), \quad (3)$$

式中: E_1 与 E_2 分别为两激光器作正弦振动的电

式中: d 为阵元间距; c 为光在自由空间的传播速度。由(1)式可以看到,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。

2.1.2 色散光纤真延时结构

以两单元天线为例,基于色散光纤的波束形成网络原理^[8-9]如图 2 所示。电光调制器接收来自天线单元的射频信号,采用幅度调制的方式将射频信号调制在光载波上,实现射频信号到光信号的转换,并将调制信号送入波分复用器^[10]。波分复用器将两条光路合为一并路并通过色散光纤依次经过光放大器与光探测器^[11]。

色散补偿光纤的延时公式为 $\Delta\tau = D \times L \times \Delta\lambda$ ^[12]。其中 D 为材料色散系数,单位为 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$; L 为相邻两段色散光纤的长度差,单位为 km ; $\Delta\lambda$ 为基准波长的波长间隔,单位为 nm 。图 2 中^[12] LD 1 与 LD 2 在不同波长下工作,波长差为 $\Delta\lambda$ 。从(1)式可以看到,对于固定波长差的两条光线,通过改变色散光纤的长度可改变阵元间的延时差,从而实现不同的波束指向。

场; E_0 为电场的振幅; ω_1 与 ω_2 分别为两激光器的角频率; t 为时间。

光场强度为

$$P_0 = E_0^2. \quad (4)$$

射频信号输入的交流电压为

$$v_{\text{RF}} = \sqrt{2} V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t), \quad (5)$$

式中: V_{RF} 为输入的电压振幅; ω_{RF} 为射频信号的角频率。

射频信号功率强度为

$$P_{\text{RF}} = (\sqrt{2} V_{\text{RF}})^2 / 2R = V_{\text{RF}}^2 / R, \quad (6)$$

式中: R 为 50Ω 阻抗匹配。

射频信号经功分器后分为两路送入 Mach-

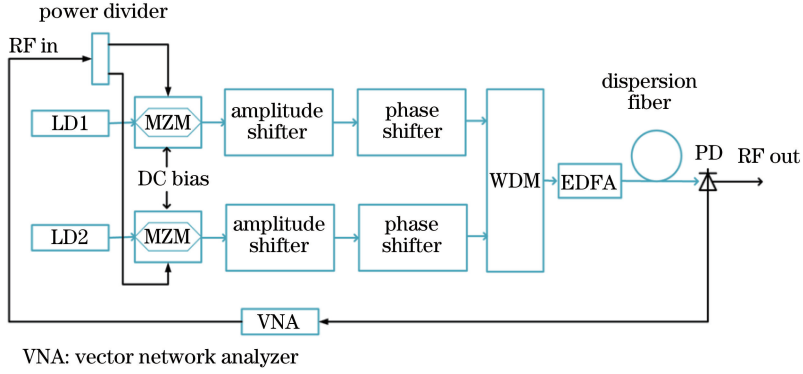


图3 基于色散光纤体制的双通道波束形成网络插损测量方法示意图

Fig. 3 Schematic of insertion loss measurement method for dual-channel beam forming network based on dispersion fiber

Zehnder 调制器 (MZM), MZM 上加载射频信号的交流电压为

$$v_{\text{RF_MZ}} = V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t). \quad (7)$$

射频信号功率强度为

$$P_{\text{RF_MZ}} = V_{\text{RF}}^2 / 2R. \quad (8)$$

设两调制器半波电压相同, 半波电压为 V_{π} , 加载的偏置电压^[13] 均为 $V_{\pi}/2$, 插损均为 I_{LMZ} . 则两个调制器的输出光场强度为^[14-15]

$$P_{\text{MZout}} = I_{\text{LMZ}} P_0 \{1 - \sin[v_{\text{RF_MZ}}(t)\pi/V_{\pi}]\} / 2. \quad (9)$$

取贝塞尔展开的一阶近似^[16], 则

$$P_{\text{MZout}} = I_{\text{LMZ}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t)\pi/V_{\pi}] / 2. \quad (10)$$

两路光经 5:5 耦合器合为一束, 并进行非相干叠加, 耦合器输出光场强度为

$$P_{\text{Coupler_out}} = P_{\text{MZout1}} + P_{\text{MZout2}}, \quad (11)$$

式中: P_{MZout1} 、 P_{MZout2} 分别为两个调制器输出的光场强度。

经光放及色散光纤后输入光电探测器 (PD) 中的光场强度为

$$\begin{aligned} P_{\text{PD_in}} = & G_{\text{Amp}} P_{\text{Coupler_out}} = \\ & I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_1)\pi/V_{\pi}] / 2 + \\ & I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_2)\pi/V_{\pi}] / 2 = \\ & I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_1)\pi/2V_{\pi} - \\ & V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_2)\pi/2V_{\pi}], \end{aligned} \quad (12)$$

式中: G_{Amp} 为光放引入的增益; φ_1 、 φ_2 分别为两路光信号经色散光纤后叠加的不同相位。

控制光放增益使得 PD 入射光功率为 PD 的光功率上限, 即 PD 的饱和阈值, 则最大光功率为^[17]

$$P_{\text{PD_max}} = I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0. \quad (13)$$

PD 的入射光场强度可简化为

$$P_{\text{PD_in}} = P_{\text{PD_max}} [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_1)\pi/2V_{\pi} -$$

$$V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_2)\pi/2V_{\pi}]. \quad (14)$$

设 PD 的光电转换效率为 η , 则光电流信号中, 射频信号输出的交流电压为

$$\begin{aligned} v_{\text{RF_out}} = & \eta R P_{\text{PD_max}} \frac{\pi}{V_{\pi}} V_{\text{RF}} [\sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_1) + \\ & \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_2)] / 2. \end{aligned} \quad (15)$$

令 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, 则 (14) 式和 (15) 式可简化为

$$P_{\text{PD_in}} = P_{\text{PD_max}} [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t)\pi/V_{\pi}], \quad (16)$$

$$v_{\text{RF_out}} = \eta R P_{\text{PD_max}} V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t)\pi/V_{\pi}, \quad (17)$$

此时两路信号相干叠加, 信号最强。

总射频信号强度为

$$\begin{aligned} P_{\text{RF_out}} = & (\eta R P_{\text{PD_max}} V_{\text{RF}} \pi/V_{\pi})^2 / 2R = \\ & V_{\text{RF}}^2 (\eta R P_{\text{PD_max}} \pi/V_{\pi})^2 / 2R, \end{aligned} \quad (18)$$

$$P_{\text{RF_out}} = P_{\text{RF_MZ}} (\eta R P_{\text{PD_max}} \pi/V_{\pi})^2. \quad (19)$$

所以相比于 MZM 输入端射频信号的插损为

$$\begin{aligned} G_{\text{RFout_MZ}} = & 10 \lg(P_{\text{RF_out}}/P_{\text{RF_MZ}}) = \\ & 10 \lg[(\eta R P_{\text{PD_max}} \pi/V_{\pi})^2]. \end{aligned} \quad (20)$$

从 (20) 式可以看到, 在光子探测器为饱和阈值的情况下, 双通道微波光子波束形成网络的插损取决于网络器件的固有参数。

相对于功分器总口的链路插损为

$$\begin{aligned} G_{\text{RFout_in}} = & 10 \lg(P_{\text{RF_out}}/P_{\text{RF}}) = \\ & 10 \lg[(\eta R P_{\text{PD_max}} \pi/V_{\pi})^2 / 2]. \end{aligned} \quad (21)$$

2.2.2 单通道微波光子链路插损计算

与双通道微波光子链路结构相似, 单路微波光子链路结构如图 4 所示。

激光器输出光场均记为 $E = E_0 \exp(j\omega_0 t)$, 光场强度 $P_0 = E_0^2$ 。

MZM 上加载射频信号输入的交流电压与 2.2.1 节相同, 即

$$v_{\text{RF_MZ}} = V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t). \quad (22)$$

信号强度为

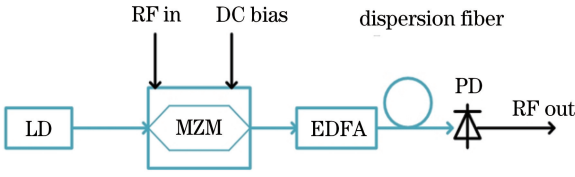


图 4 单通道微波光子链路图

Fig. 4 Single channel microwave photon link diagram

$$P_{\text{RF_MZ}} = V_{\text{RF}}^2 / 2R. \quad (23)$$

调制器的输出光场强度为

$$P_{\text{MZout}} = I_{\text{LMZ}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t) \pi / V_{\pi}] / 2. \quad (24)$$

控制光放增益使得 PD 入射光功率为 PD 的光功率上限,经光放及色散光纤后输入到 PD 中的光场强度为

$$P_{\text{PD_in}} = P_{\text{PD_max}} [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t) \pi / V_{\pi}]. \quad (25)$$

光电流信号中,射频信号输出的交流电压为

$$v_{\text{RF_out}} = \eta R P_{\text{PD_max}} V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t) \pi / V_{\pi}. \quad (26)$$

射频信号强度为

$$P_{\text{RF_out}} = (\eta R P_{\text{PD_max}} V_{\text{RF}} \pi / V_{\pi})^2 / 2R = V_{\text{RF}}^2 (\eta R P_{\text{PD_max}} \pi / V_{\pi})^2 / 2R. \quad (27)$$

相比于 MZM 输入端射频信号的插损为

$$G_{\text{RFout_MZ}} = 10 \lg(P_{\text{RF_out}} / P_{\text{RF_MZ}}) = 10 \lg [(\eta R P_{\text{PD_max}} \pi / V_{\pi})^2]. \quad (28)$$

在保证探测器输入光强一定的情况下,由(15)~(18)式以及图 3 可知,双通道波束形成网络中两路射频信号幅度相等、 $\varphi_1 = \varphi_2$ 时,信号相干叠加,信号最强,插损最小。对比(20)式与(28)式可知,在信号相干叠加这种情况下,双通道光学波束形成网络插损最小,此时单通道以及双通道光学波束形成网络的输出射频信号与对应 MZM 输入端射频信号之间的插损相同。若以功分器输入总口作为参考,双通道微波光子链路相对于单通道微波光子链路,链路输出信号插损增加 3 dB。

2.2.3 多通道微波光子波束形成网络插损计算

假设输入射频通道数为 2^n 时,激光器输出光场强度以及 MZM 上加载射频信号的强度与 2.2.1 节相同。则由(11)式可得

$$P_{\text{PD_in}} = G_{\text{Amp}} P_{\text{Coupler_out}} = I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_1) \pi / V_{\pi}] / 2 + I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_2) \pi / V_{\pi}] / 2 + \dots + I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_{2^n}) \pi / V_{\pi}] / 2 = 2^{n-1} I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_1) \pi / 2^n V_{\pi} - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_2) \pi / 2^n V_{\pi} - \dots - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_{2^n}) \pi / 2^n V_{\pi}]. \quad (29)$$

令 $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_{2^n} = 0$, 则

$$P_{\text{PD_in}} = 2^{n-1} I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0 [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t) \pi / V_{\pi}], \quad (30)$$

此时信号相干叠加,射频信号最强。

控制光放增益使得 PD 入射光功率为 PD 的光功率上限,令 $P_{\text{max}} = 2^{n-1} I_{\text{LMZ}} G_{\text{Amp}} P_0$, 经光放及色散光纤后输入到 PD 中的光场强度为

$$P_{\text{PD_in}} = P_{\text{PD_max}} [1 - V_{\text{RF}} \sin(\omega_{\text{RF}} t) \pi / V_{\pi}]. \quad (31)$$

由(31)式推导得到 PD 中的光场强度,对比(16)式与(25)式可以看到,单通道微波光子链路与双通道光学波束形成网络推导结果相同。所以,由(17)~(20)式可知,相比于 MZM 输入端射频信号,单通道、双通道以及 2^n 通道光学波束形成网络插损相同。若以功分器输入总口作为参考,不难发现,通道数每增加一倍,链路输出信号插损增加 3 dB。

3 实验验证

参见图 5,以双通道光学波束形成网络为例,矢

网^[18]发出信号通过 1 分 2 的功分器总口,光电探测器输出端接矢网的输入端。由于两个射频通道的幅度、相位都不一致,所以需要使用幅度调节器与相位调节器将两个通道的幅度和相位调为一致。使用幅度调节器与相位调节器将两路信号的幅度与相位调成一致后,此时两路信号相干叠加。通过矢量网测量输出与输入的信号强度,可计算得到插损。

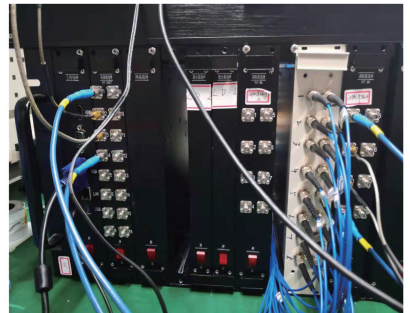


图 5 光学波束形成网络测试实验图

Fig. 5 Test experiment of the optical beam forming network

以 18 GHz 频点为例,系统插损测量数据如表 1 所示。

表 1 不同射频通道的光学波束形成网络在
18 GHz 的插损测量结果

Table 1 Insertion loss measurement results at 18 GHz for
optical beam forming networks with different RF channels

Number of RF channels	Insertion loss /dB
1	-26.0
2	-30.8
4	-34.3
8	-46.0

从表 1 可以看到,通道数从 1 变为 2,插损增加 4.8 dB;从 2 变为 4,插损增加 3.5 dB;从 4 变为 8,插损增加 11.7 dB。

通过理论推导可以发现,在两路射频信号幅度相等、 $\varphi_1 = \varphi_2$ 时,信号相干叠加,信号最强。如果光子探测器通过光放大器调节到饱和阈值,此时双通道光学波束形成网络相对于单通道微波光子链路,插损理论上增加 3 dB。但在实际情况中,通道数越多,光学波束形成网络各通道间的信号幅度和相位越难以保持完全一致,导致网络插损大于 3 dB。

4 结 论

从理论上推导了基于色散体制的光学波束形成网络,在光子探测器达到饱和阈值且通道间幅相完全相同的前提下,输入射频通道数每增加一倍,光学波束形成网络插损理论上增加 3 dB。并搭建实验系统,进行了实验验证,输入射频通道数 ≤ 4 时,插损的实际测量结果与理论吻合较好;输入射频通道数增加到 8 时,吻合较差。本文工作对设计多通道的光学波束形成网络具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Liu Y, Wichman A, Isaac B, et al. Tuning optimization of ring resonator delays for integrated optical beam forming networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(22): 4954-4960.
- [2] Zhang M Y. *Optically controlled phased array radar* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 20-30.
张明友. 光控相控阵雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 20-30.
- [3] Wang Z Y, Pan Z Q, Ye Q, et al. Fast pattern recognition based on frequency spectrum analysis used for intrusion alarming in optical fiber fence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0405010.
王照勇, 潘政清, 叶青, 等. 用于光纤围栏入侵告警的频谱分析快速模式识别[J]. *中国激光*, 2015, 42

(4): 0405010.

- [4] Moreira R L, Garcia J, Li W Z, et al. Integrated ultra-low-loss 4-bit tunable delay for broadband phased array antenna applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(12): 1165-1168.
- [5] Xie J Y, Zhou L J, Zou Z, et al. Continuously tunable reflective-type optical delay lines using microring resonators[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 817-823.
- [6] Zhuang L, Burla M, Roeloffzen C G H, et al. RF-to-RF characterization of a phased array receive antenna steering system using a novel ring resonator-based integrated photonic beamformer [C] // 2009 International Topical Meeting on Microwave Photonics, October 14-16, 2009, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2009: 10999467.
- [7] Ding Z D, Yang F, Cai H W, et al. Optical multi-beam synthetic system based on micro-optical array differential true time delay network [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0406004.
丁志丹, 杨飞, 蔡海文, 等. 基于微光学阵列差分真时延网络的光学多波束合成系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0406004.
- [8] Frankel M Y, Esman R D. True time-delay fiber-optic control of an ultrawideband array transmitter/receiver with multibeam capability [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1995, 43(9): 2387-2394.
- [9] Li D W, Jia C Y, Ye L H, et al. True-time-delay technologies of optical controlled phased array antenna [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(3): 37-42.
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.
- [10] Subbaraman H, Chen M Y, Chen R T. Photonic crystal fiber-based true-time-delay beamformer for multiple RF beam transmission and reception of an X-band phased-array antenna[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(15): 2803-2809.
- [11] Chang W S C. *RF photonic technology in optical fiber links*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [12] Zhao J Y. Study on the formation of optical beam based on dispersion optical fiber prism and its temperature characteristics [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 20-22.

- 赵嘉熠. 基于色散光纤棱镜的光控波束形成及温度特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 20-22.
- [13] Nagata H. Activation energy of DC-drift of x-cut LiNbO₃ optical intensity modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(4): 386-388.
- [14] Li G L, Yu P K L. Optical intensity modulators for digital and analog applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(9): 2010-2030.
- [15] Cox C, Ackerman E, Helkey R, et al. Direct-detection analog optical links[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(8): 1375-1383.
- [16] Owen D B, Abramowitz M, Stegun I A. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables[J]. Technometrics, 1965, 7(1): 78-79.
- [17] Xu C. The key technologies in optical true-time-delay phased array receiver [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 33-38.
- 徐晨. 光学真时延相控阵接收机关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 33-38.
- [18] Gu X H. Principle of operation of network analyzer and its application to electrical measurements [J]. Electronic Engineer, 2008, 34(7): 15-18.
- 谷歆海. 网络分析仪的工作原理及在测量领域的应用[J]. 电子工程师, 2008, 34(7): 15-18.