

微波光子技术相控阵雷达天线现场校准系统

张业斌, 盛永鑫, 田晓光

(中国电子科技集团公司第 38 研究所, 安徽 合肥 230088)

摘要: 研究了基于微波光子技术的相控阵雷达天线现场校准技术。介绍了微波光子技术进行相控阵天线现场校准的基本原理, 通过利用架设在相控阵天线阵面上的光学探针中的电光晶体的泡克尔斯效应, 使得自探针反射的光学信号携带有天线单元的近场辐射信息, 在将其进行光电转换后采用外差相干检测的方法来获得信号中所携带的天线单元的幅相信息, 便可实现对天线阵面天线单元辐射场信息的快速检测, 实验验证系统的电场幅度和相位测量精度可以分别达到 0.3 dB 和 2°, 同时该方法对被测天线单元具有侵入性低、抗干扰能力强、体积小等优点, 满足相控阵天线现场校准的实际需要, 具有很强的工程实用价值。

关键词: 现场校准; 相控阵雷达天线; 光学探针; 微波光子

中图分类号: O441.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0717005

In-situ calibration system of phased array radar antenna based on microwave photonic technology

Zhang Yebin, Sheng Yongxin, Tian Xiaoguang

(The 38th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: The in-situ calibration technology of phased array radar antenna has been researched. The principle of phased array antenna in-situ calibration based on the microwave photonic technology was introduced. By taking advantage of Pockels effect of the electro-optical crystal in the optical probes erected on the phased array antenna, the optical signal reflected from the probe was modulated by the measured electromagnetic field. Then the amplitude and phase information of the measured phased array antenna units can be obtained through photoelectric conversion and coherent detection of the optical signal. Experimental results demonstrate that the measurement amplitude and phase accuracy of radiation electromagnetic field respectively reach 0.3 dB and 2°. And this calibration method has the advantages of low aggressiveness, strong anti-jamming ability, small volume, etc. which can meet the practical demands of phased array antenna calibration and have very strong engineering practical value.

Key words: in-situ calibration; phased array radar antenna; optical probe; microwave photonic

收稿日期: 2016-11-07; 修订日期: 2016-12-13

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目(JSJC2013210C042); “十二五”民用航天科技[2013]669号

作者简介: 张业斌(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要从事微波光子学、光纤传感方面的研究。Email: wzhangyebin@163.com

0 引言

相控阵雷达^[1-7]以拥有相控阵天线而得名,其摆脱了传统雷达机械伺服控制系统机械惯性大、精度差、速度慢等问题,在国土防空、导弹防御系统及舰载、机载和星载火控、预警系统等军事领域,乃至在射电天文、卫星通信、气象水文、空中交通管制、地球勘探和生物医学等国民经济各部门的广泛应用,日益受世人的关注和重视。但随着雷达的功能越来越强大,天线阵元的数量也成倍地增加,其中许多器件的制造和组装都有差异,常常使各通道呈现出相当大的幅相误差,从而引起相控阵天线增益的下降、副瓣的升高甚至波束倾斜。因此在现代相控阵雷达中,如何能快速准确地确定天线单元的幅相误差,并能诊断出单元的故障,是保证相控阵雷达性能的重要环节,具有重要的意义。

目前国内已经建立了相控阵雷达系统的检测及校准方法,大致分为内校准和外校准两种。内校准是在雷达系统内部利用附加设备实现雷达性能的监控,通常做法是在系统内部设置开关矩阵、行波馈电网络(BITE 耦合系统)等设备形成雷达系统内闭环,在系统内部对雷达信道中的每个通道幅度和相位进行检查和修正。内校准实施起来较为方便,为一般小型相控阵雷达所采用。但内校准技术也存在相当大的限制,如:(1) 天线阵元数量较多时,由于每个通道需要配备一组闭环校准系统,设备量非常庞大,成本很高;(2) 在机载或者星载等领域,对载荷有严格限制,而内校准系统会带来额外的载重量;(3) 内校准只对闭环系统以内的部分进行校准,但对于闭环外的部分如天线以及天线阵元间的互耦影响等无法校准。因此对相控阵雷达天线校准需要用到外校准技术。一般相控阵雷达天线现场外校准方法大致分为远场校准和近场校准两种方式,远场校准时,需要特定的测试环境(远距离测试场),并在几个预定角度上测出天线辐射场幅相信息,再计算获得天线口径场的幅相分布。这种方法受限于测试场地要求,并且测试过程中容易受到环境散射及多路径效应的影响,往往具有较大的误差;在近场测量中,通常使用的近场接收天线有偶极子、开口波导、喇叭天线等接收天线放在被测天线阵的近场区域,对被测天线进

行校准,然而这些接收天线由于其均为金属结构从而会为辐射场测量带来限制^[8]。因此十分需要一种更为精确的现场近场校准技术可对相控阵雷达天线进行现场校准。

1 基于微波光子技术的相控阵雷达天线现场校准原理

基于微波光子技术^[9-12]的相控阵雷达天线现场校准技术是一种适合近场天线阵发射校准的光学电磁场探测技术。与传统的基于金属天线的近场测量不同的是,通过利用了光学晶体在电磁场环境中的光学属性的改变来探测被测天线的近场幅度和相位信息,把电磁场信息转换成光学信息并最终通过光电转换和信号处理技术来获取被测电场的幅相信息,该技术具有对被测场的干扰小、空间分辨力高、不受外界环境的电磁干扰、工作带宽大等诸多优势。在参考文献[13]中笔者提出了一种基于光子技术的相控阵天线校准方法,该方法可实现对天线阵面幅度和相移较高精度的精确校准,但是其系统较复杂,同时电信号的杂谱较多,导致测量校准的动态范围有限。文中提出一种结构更加紧凑的基于微波光子技术的相控阵雷达天线现场发射校准系统,图1所示为该现场校准方法的系统组成原理图,其主要包括光学探针阵列、信号处理系统两大部分。其中光

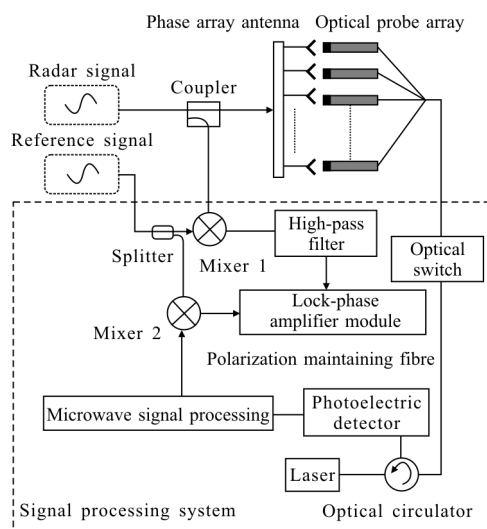


图 1 基于微波光子技术的相控阵天线现场校准系统组成原理图
Fig.1 Schematic diagram of in-situ calibration system of phased array radar antenna based on microwave photonic technology

学探针阵列是用于对被测天线单元的辐射场进行传感,将被测电场信息加载在激光信号上;信号处理系统用于将经光学探针阵列反射回来的光学信号进行解调、放大和信号处理,以获得被测天线单元的电场辐射信息。

光学探针采用基于电光效应的场测量技术,电光晶体在外电场的作用下其折射率特性发生改变,进而改变传输光的偏振态,通过检偏器件将传输光偏振态的变化转变为光强的变化,图 2 所示为光学探针的基本组成示意图。其主要由准直透镜、起偏器、λ/8 波片、电光晶体以及高反射介质片组成,通过这些光学元件集成在小的玻璃细管中,便可对天线单元的辐射场进行高分辨率的电场测量。

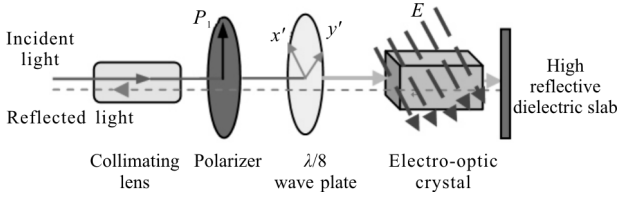


图 2 光学探针光路原理图

Fig.2 Schematic diagram of light path of optical probe

其工作原理为当入射光经过起偏器 P_1 后的琼斯矩阵表示为 $[E_0, 0]$,则沿图 2 中的路径依次经过光学元件并经过反射原路返回后的光束的琼斯矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cos \frac{\pi}{8} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\pi}{8} \cos 2\theta & -i \tan \frac{\pi}{8} \sin 2\theta \\ -i \tan \frac{\pi}{8} \sin 2\theta & 1 + i \tan \frac{\pi}{8} \cos 2\theta \end{bmatrix} \cdot \cos \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta' & -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta' \\ -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta' & 1 + i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta' \end{bmatrix} \cdot \cos \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta' & -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta' \\ -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta' & 1 + i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta' \end{bmatrix} \cdot \cos \frac{\pi}{8} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\pi}{8} \cos 2\theta & -i \tan \frac{\pi}{8} \sin 2\theta \\ -i \tan \frac{\pi}{8} \sin 2\theta & 1 + i \tan \frac{\pi}{8} \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: θ 为 λ/8 波片快轴与偏振通光轴夹角; θ' 为晶体感应快轴与偏振通光轴夹角; δ 为电光晶体两个

感应主轴上的相位差。当无电场作用时,电光晶体为单轴晶体则 $\delta=0$,则上式可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cos \frac{\pi}{8} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\pi}{8} \cos 2\theta & -i \tan \frac{\pi}{8} \sin 2\theta \\ -i \tan \frac{\pi}{8} \sin 2\theta & 1 + i \tan \frac{\pi}{8} \cos 2\theta \end{bmatrix} \cdot \cos \frac{\pi}{8} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\pi}{8} \cos 2\theta & -i \tan \frac{\pi}{8} \sin 2\theta \\ -i \tan \frac{\pi}{8} \sin 2\theta & 1 + i \tan \frac{\pi}{8} \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \cos \frac{\pi}{4} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\pi}{4} \cos 2\theta \\ 0 \end{bmatrix} E_0 \quad (2)$$

从公式(2)可以看出,当 $\theta=45^\circ$ 时, $I \propto \frac{1}{2} |E_0|^2 = \frac{1}{4} I_0$

(其中 I_0 为入射光强),对于电光调制来说,该位置也恰为调制的线性工作区,因此当取偏振通光方向与波片快慢轴夹角为 45° 时,返回光的琼斯矩阵可以写为:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cos \frac{\pi}{8} \begin{bmatrix} 1 & -i \tan \frac{\pi}{8} \\ -i \tan \frac{\pi}{8} & 1 \end{bmatrix} \cdot \cos \delta \begin{bmatrix} 1 - i \tan \delta \cos 2\theta' & -i \tan \delta \sin 2\theta' \\ -i \tan \delta \sin 2\theta' & 1 + i \tan \delta \cos 2\theta' \end{bmatrix} \cdot \cos \frac{\pi}{8} \begin{bmatrix} 1 & -i \tan \frac{\pi}{8} \\ -i \tan \frac{\pi}{8} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix} = E_0 \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{4} \cos \delta - \sin \frac{\pi}{4} \sin \delta \sin 2\theta' - i \sin \delta \cos 2\theta' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

公式(3)进行了近似计算(δ 远小于 1),略去 δ^2 高阶小值后可得 $I = \frac{1}{4} (1 - 4\delta \sin 2\theta') I_0$,因此当 $\theta'=45^\circ$ 时,可以获得最高的调制效率,最终可得:

$$I = \frac{1}{4} (1 - 4\delta) I_0 \approx \left(\frac{1}{4} - \delta \right) I_0 \quad (4)$$

从公式(13)可以看出,当小信号近似时,因电光效应产生的相位差与入射光强成线性关系。目前最常用的电光晶体为铌酸锂晶体,其优点是其在可见光及红外波段的透过性好,且易于光学加工,也是目前商用电光调制器中电光材料的常用选择。铌酸锂晶体作为单轴晶体,沿其光轴 Z 轴传输时,传输光不发生双折射,当在外电场作用下,由于泡克尔斯效应

产生新的折射率感应主轴,传输光发生双折射。经过对比分析,实验中选择 Z 轴通光的横向电光效应设计,这种情况下,通过晶体后的相位差可以表示为:

$$\delta = \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda} = \frac{2\pi L}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} E \quad (5)$$

式中: n_0 为晶体中 O 光折射率; λ 为传输光波长; γ_{22} 为电光系数; E 为外电场场强; L 为晶体长度,因此传输光强为:

$$I = \frac{1}{2}(1 - \sin 2\delta)I_0 \approx \left(\frac{1}{2} - \delta\right)I_0 = \left(\frac{1}{2} - \frac{2\pi L}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} E\right) \alpha I_{\text{Laser}} \quad (6)$$

式中: α 为激光器输出光在光链路中的累计插损。公式(6)表明经过光学探针反射回来的光学信号中携带有完整的被测电场的信息,并且输出光强信号与被测电场 E 成线性关系。因此光电探测器输出的电压与电光晶体所处的电场场强成线性关系,通过在信号处理系统中对反射回来的光信号进行信号处理便可以获得被测电场的准确信息。

信号处理系统提供了光路选择、光电变换、外差检测以及信号处理等功能,其组成如图 1 中所示。为了减小测量装置的复杂度和体积,同时实现大天线阵面的快速检测,系统选用了多路探针的光学探针阵列共用一条微波信号处理链路的设计,信号处理系统中的光开关用于切换选择触发光学探针,通过一次架设可以完成对多个天线单元的测量校准,可大大节省测量时间和工作成本。从光学探针反射回来的激光信号经过光电探测器后被转换为微波信号,为了同时获得被测电场的幅度和相位信息,实验中采用外差检测的方法利用锁相放大模块对该微波信号进行解调。

由于选用的锁相放大模块对输入信号的频率要求 200 MHz 以下,而雷达射频信号的频率较高,因此在现场校准时,需要另外一个参考信号作为本振信号对雷达射频信号进行下变频,该参考信号源和雷达信号源的输出射频信号频率应该相近,频率间隔低于 200 MHz,用于将光电转换的射频信号进行下变频。在信号处理系统中,经过光电转换后射频信号进入到混频器 2 的射频端进行下变频,其中频信号输出接入锁相放大模块的信号输入端。参考信号源输出的射频信号经过功分器一分为二,一路输出连接到混频器 2 的本振端,另一路连接到混频器 1 的本振端,雷达信号源的输出射频信号经过定向耦

合器分为两部分,一部分用于天线阵面的激励;另一部分作为混频器 1 的射频输入,其下变频产生的中频信号用作锁相放大模块的参考信号输入。在锁相放大模块中,混频器 2 输出的中频信号和混频器 1 提供的中频参考信号进行比相和放大,最后得到被测天线单元电磁场的相对幅度和相对相位信息数据,从而实现天线阵面各个天线单元的近场测量校准。

2 基于光电技术的相控阵雷达天线现场校准实验验证

为了验证基于光电技术的相控阵雷达天线现场校准系统的性能,设计了 X 波段 16 路光学探针阵列的校准系统,并对其进行了实验验证。图 3 所示为搭建的系统实物图,图 3(a)为制作的单根光学探针,其主要工作部分为前端光学元件集成处,其后细长的玻璃细管用于保护光纤尾纤以及便于固定架设在天线阵面,图 3(b)为实验系统装置。测量过程中 16 根同批次制作的光学探针通过定制的安装支架固定架设在相控阵天线阵面上,每个探针保持与天线单元一一对应,同时探针前端与对应天线单元的距离均保持为 2 mm。

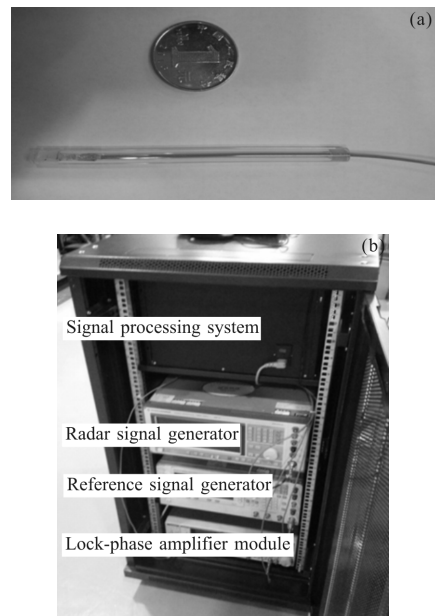


图 3 光学探针(a)和校准系统实物图(b)

Fig.3 Photo of optical probe (a) and calibration system (b)

对于相控阵雷达天线来说,天线的辐射方向图是评价天线最重要的指标。相控阵雷达天线众多天

线阵元之间的辐射场的相对幅度和相位是影响天线辐射方向图的最重要因素,在实际的相控阵天线测量中,由于场强绝对值的测量不确定度较高,因此通常以某一天线单元为的幅相值为基准,进而获得各天线阵元的幅相的相对基准值的变化,也就是相对幅度和相位,实验中对这两项参数进行了测试,选取的雷达信号频率为10 GHz,参考信号频率为 10.031 GHz,通过控制天线单元的激励信号改变天线单元辐射场的强度和相位,再通过架设在天线阵面上的 16 路探针依次获取天线单元的辐射信息与其进行了比较。

图 4 所示为在雷达信号源输出后接可调衰减器后,通过调节衰减器的衰减值来改变天线单元的激励信号的强度,以实现天线单元辐射电场强度在 1~200 V/m 的 23 dB 的范围内变化。其中图 4(a)为通过实验系统测得的 16 路天线单元的辐射电场的幅值变化与实际天线单元辐射场的标称变化值对应的曲线图,图 4(b)为天线单元辐射场在不同的标称值下,所测得的天线单元的辐射电场的幅度变化值与实际天线单元辐射场的标称变化值的偏差曲线图。

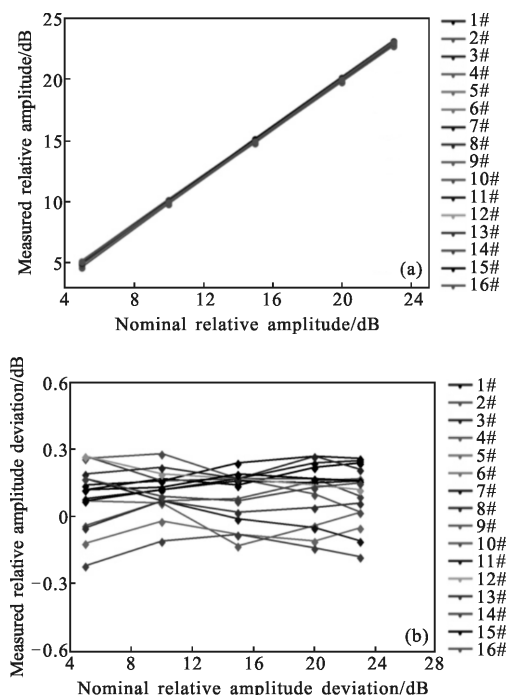


图 4 天线单元相对幅度测试结果

Fig.4 Measured relative amplitude results of antenna units

图 5 所示为在雷达信号源输出后接移相器后,通过调节改变天线单元的激励信号的相位,以实现天线单元辐射场电场的相位发生 20°~180°的改变。

其中图 5(a)为通过实验系统测得的 16 路天线单元的辐射电场的相移与实际天线单元辐射场的标称相移对应的曲线图,图 5(b)为天线单元辐射场在不同的标称变化值下,所测得的天线单元的辐射电场的相移与实际天线单元辐射场的相移的偏差曲线图。

从上述的实验结果可以看出,基于微波光子技术的该天线校准系统的实测值与标称值有很好的线性关系,同时具有很高的相对幅度和相移校准精度,从公式(6)中可以看出校准系统的测量误差的主要来源为激光器输出激光的功率和相位的抖动以及微波信号处理中的射频放大链路增益的波动。因此在测量过程中选择输出功率稳定和低的相对强度噪声的激光器以及增益平坦的射频放大器并且通过优化散热设计保证激光器和放大器的工作温度可以降低这些因素引起的系统测量误差。实验中测得系统的幅度测量误差小于 0.3 dB,相移测量误差小于 2.0°。相比于之前在参考文献[13]中提出的校准系统,该校准系统除了结构更加简洁紧凑之外,其测量误差更小,测量结果具有更好的线性度。

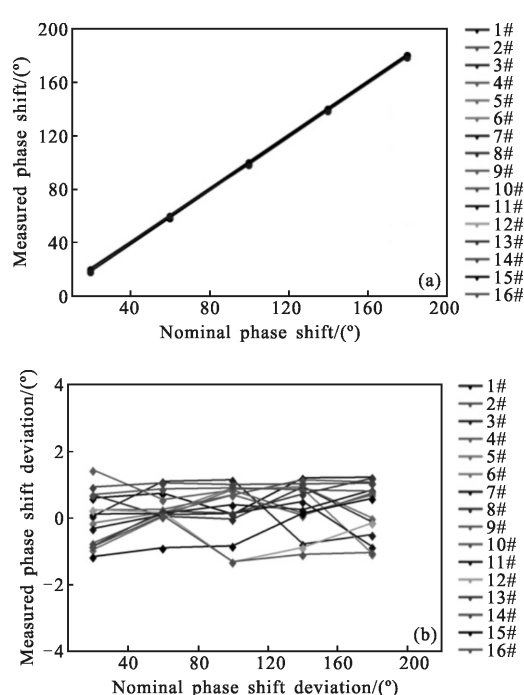


图 5 天线单元相移测试结果

Fig.5 Measured phase shift results of antenna units

3 结论

文中针对相控阵雷达天线现场校准的实际需

求,开展了基于微波光子技术的相控阵雷达天线现场发射校准系统的研究,利用光学电磁场探针对被测场的干扰小、抗电磁干扰、测量精度高、空间分辨力高、体积小等诸多优点,采用 16 路光学探针经过光开关切换依次工作的方法方式,通过单次架设测量实现了对相控阵天线 16 个天线单元的近场幅度和相移的精确测量,实验验证了校准系统的辐射电场的幅度和相移测量误差分别小于 0.3 dB 和 2°,远远优于传统微波校准方法。通过该方法对相控阵雷达天线单元的辐射近场进行实验或雷达服役现场的快速精确的测量校准,可以大大节省相控阵雷达天线校准所需的物力和人力成本,同时对提升雷达系统的指向精度和扫描精度等指标均具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Brookner E. Phased-array radars [J]. *Scientific American*, 1985, 252: 94–102.
- [2] Mailloux P. Phase Array Antenna [M]. London: Artech House, 2005.
- [3] He Xiaoxian, Wang Xiangru, Li Man, et al. Research review on mid-infrared liquid crystal optical phased array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0830003. (in Chinese)
贺晓娴, 汪相如, 李曼, 等. 液晶中波红外光学相控阵关键技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0830003.
- [4] Liu Guixiong, Tang Wenming, Tan Daji. Focusing time delay of ultrasonic phased array based on multistage half-band filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1571–1576. (in Chinese)
刘桂雄, 唐文明, 谭大基. 基于多级半带滤波器的超生相控阵聚焦延时[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1571–1576.
- [5] Wu Chao, Liu Chunbo, Han Xiang'e. Design of waveguide optical phased array ladar receiving system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1030003. (in Chinese)
吴超, 刘春波, 韩香娥. 光波导相控阵激光雷达接收系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1030003.
- [6] Yang Zuoyun, Wang Dayong, Wang Yunxin, et al. Measurement method for the half-wave voltage of phase modulator based on the principal of laser phased array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 906–910. (in Chinese)
杨作运, 王大勇, 王云新, 等. 基于激光相控阵原理的相位调制器半波电压测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 906–910.
- [7] Han Qi, Xu Lixin, Wang Ting, et al. Coupled feed phased array antenna integrated with MEMS phase shifter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10z): 272–278. (in Chinese)
韩琦, 徐立新, 王婷, 等. 集成 MEMS 移相器缝隙耦合和相控阵天线[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10z): 272–278.
- [8] Li Hong, Xue Bing, Yang Yingke. The technology of measuring and testing phased array antennas [J]. *China Measurement Technology*, 2003(9): 10–11. (in Chinese)
李宏, 薛冰, 杨英科. 相控阵天线的测试技术 [J]. 中国测试技术, 2003(9): 10–11.
- [9] Paolo Ghelfi, Francesco Laghezza, Filippo Scotti, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. *Nature*, 2014, 507: 341–345.
- [10] Paolo Ghelfi, Francesco Laghezza, Filippo Scotti, et al. Photonic generation and independent steering of multiple RF signals for software defined radars [J]. *Opt Exp*, 2013, 21: 22905–22910.
- [11] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photo*, 2007, 1: 319–330.
- [12] Li Jing, Ning Tigang, Pei Li, et al. Study on a radio over fibre link with improved receiver sensitivity based on polarization modulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0617004. (in Chinese)
李晶, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于偏振调制的最优接收灵敏度的 ROF 链路研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0617004.
- [13] Sheng Yongxin, Tian Xiaoguang. On-site calibration of phased array antennas based on optical technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2015, 35(6): 20–23. (in Chinese)
盛永鑫, 田晓光. 基于光子技术的相控阵雷达天线现场校准技术[J]. 计测技术, 2015, 35(6): 20–23.