

doi: 10.3788/gzxb20154411.1125002

# 基于微光学元件堆栈集成技术的收发一体化 宽带光控相控阵天线

王建<sup>1,2</sup>, 蔡海文<sup>1</sup>, 侯培培<sup>1</sup>, 王书楠<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国电子科技集团第五十一研究所, 上海 201802)

**摘 要:**设计了一种收发一体化的光控相控阵天线系统. 该系统中, 采用基于微光学元件堆栈集成技术实现真时延的产生. 天线系统通过光域内的延迟控制实现微波射频域的波束控制. 对系统接收模式状态进行实验验证,  $\pm 10.6^\circ$ 、 $\pm 30.8^\circ$  波束指向的暗室实验结果表明, 在 2~6GHz 宽带微波信号下,  $\pm 10.6^\circ$  指向角的最大指向角误差为  $3.1^\circ$ ,  $\pm 30.8^\circ$  指向角的最大指向角误差为  $1.2^\circ$ . 相控阵天线系统在 2GHz 频点动态范围约为 71 dB 左右. 该光控相控阵系统能够实现与宽带射频信号频率无关的波束指向及一维平面内方位向运动物体的跟踪.

**关键词:**微波光子学; 光控相控阵天线; 光学多波束形成网络; 无波束倾斜; 发射模式; 接收模式

**中图分类号:** TN249, TN256, TN977 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2015)11-1125002-7

## Optical Multi-beam Formation Technology of Broadband Phased Array Antenna Based on Stack Integrated Micro-optical Components

WANG Jian<sup>1,2</sup>, CAI Hai-wen<sup>1</sup>, HOU Pei-pei<sup>1</sup>, WANG Shu-nan<sup>1,3</sup>

(1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 The 51th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200063, China)

**Abstract:** A transceiver integrated optically controlled phase array antenna system was introduced. The true time delay of the system was generated by stack integration of micro-optical components. The antenna system accomplishes the control of microwave signal by virtue of controlling the time delay in optical domain. Experimental verification of the system in receive mode is conducted. Experimental results on steering angle of  $\pm 10.6^\circ$ ,  $\pm 30.8^\circ$  demonstrate that maximum error of steering angle at  $\pm 10.6^\circ$  is  $3.1^\circ$  and that at  $\pm 30.8^\circ$  is  $1.2^\circ$  under 2-6 GHz broadband microwave signal. The dynamic range of the optically controlled phase array antenna at 2 GHz microwave frequency is about 71 dB. The system can realize radio frequency independent broadband beam steering and the tracking of moving target in azimuth angle direction in one-dimensional plane.

**Key words:** Microwave photonics; Optically controlled phased array antenna; Optical beamforming network; Beam squint free; Transmit mode; Receive mode

**OCIS Codes:** 250.4390; 280.5110; 220.0220

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61108028, 61178031, 61405218)资助

第一作者: 王建(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光控相控阵列技术. Email: wangjian200206@163.com

导师(通讯作者): 蔡海文(1975-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为单频激光器, 时频技术等. Email: hwcai@siom.ac.cn

收稿日期: 2015-04-03; 录用日期: 2015-05-25

## 0 引言

在现代战争中,为提高雷达对目标的分辨、识别能力和解决目标的雷达成像问题,要求雷达具有波束形成技术,这是实现高精度测向的重要手段之一,也是相控阵雷达提高灵敏度和抑制干扰的主要方法.然而,现有的波束形成技术均是基于窄带信号的假设下分析和设计的,仅考虑到不同频率信号经过波束形成网络后的幅度变化,很少会考虑宽带信号经过波束形成网络后的幅、频、相的关联性.随着超宽带信号在雷达系统中的广泛应用,不仅要求波束形成网络在宽带范围内保持一致的方向图,更要具有高的波形保真能力,这就需要新的技术手段来实现.

基于传统移相器的相控阵天线由于天线阵列孔径效应的限制,无法在大的瞬时带宽下工作.为了实现相控阵雷达的宽带宽角扫描,应用真时延代替传统相控阵雷达中的移相器.但采用同轴电缆或波导组成的真时延无论对宽带信号的传输还是工程实现,都带来不便,微波光子学领域的发展为该问题的解决提供了可行的路径<sup>[1]</sup>.

如果将微波信号调制在光波上,用光波的传输延迟作为真时延,以抵消阵列天线的孔径渡越时间,并在光学域上实现射频信号的分配、传输及加权,而且不改变宽带信号的频相特性,从而可以在瞬时大带宽信号下实现信号无失真的传输<sup>[2]</sup>.并且在整个雷达频段,光纤传输损耗比同轴电缆和波导传输要低很多,非常有利于雷达信号的远程传输分配和雷达系统的远程控制.此外,该技术具有隐身特性好、抗电磁干扰能力强等特性,以及雷达主机远离天线,极大地提高了雷达和操作人员的生存能力.

国内外研究人员提出了许多不同技术实现光学真时延应用于光控相控阵天线(Optically Controlled Phase Array Antenna, OCPAA)中<sup>[3]</sup>,例如采用光波导<sup>[4]</sup>、光开关<sup>[5]</sup>、微环谐振腔<sup>[6]</sup>、硅基液晶<sup>[7]</sup>以及光纤光栅技术<sup>[8]</sup>等实现若干固定延时量的准连续时延产生以及基于可调谐激光器和色散光学器件(例如色散光子晶体光纤<sup>[9]</sup>、色散补偿光纤<sup>[10]</sup>等)的时延连续可调的连续时延产生;前者仅适用于若干个固定方位角指向的波束发射或接收,后者可以实现任意方位角指向的波束发射和接收.此外通过控制工作在单边带偏振调制的偏振状态实现任意相位的产生,从而实现产生连续的时延<sup>[11]</sup>.基于电移相器的 $16 \times 16$ 阵列相控阵系统,其体积一般在 $6500 \text{ cm}^3$ ,重量 $9 \text{ kg}$ ,功耗 $130 \text{ W}$ ;而采用光纤延迟线和光开关的 $16 \times 16$ 阵列光控相控阵系统,其体积约 $250 \text{ cm}^3$ ,重量约 $0.7 \text{ kg}$ 功耗 $13 \text{ W}$ <sup>[12-13]</sup>; M. Burla 等所实现的基于微环集成光波导结构的

$16 \times 1$  光学多波束形成系统的芯片版图尺寸为 $70 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ ,重量为数 $\text{kg}$ 量级,功耗为几 $\text{W}$ 量级,可以在保持通带范围较窄的前提下,实现大的调谐范围<sup>[14-15]</sup>.

本文介绍了课题组所实现的既可用于发射模式又可用于接收模式的收发一体化的光控相控阵系统,该相控阵系统的波束形成由基于微光学元件堆栈集成技术实现的差分真时延实现.所研制的光控相控阵天线样机不仅能够实现在宽带范围内与频率无关的宽带波束指向控制,而且能够实现宽带微波信号下在一维平面内多波束指向的同时实现.通过调节相邻棱镜组之间的距离能够实现波束指向角连续的扫描控制.此外,本系统受外界环境温度变化影响很小,该 $4 \times 4$ 光学多波束系统,体积为 $226 \text{ mm} \times 79 \text{ mm} \times 54.5 \text{ mm}$ ,功耗约 $8 \text{ W}$ ,重量约为 $10 \text{ kg}$ .

## 1 收发一体化光控相控阵系统及时延产生

图1是光控相控阵系统原理图,所设计实现的光控相控阵系统可工作在发射模式和接收模式两种状态.对OCPAA系统,发射和接收是一个可逆的过程.图1(a)为工作在接收模式的原理图,图1(b)为工作在发射模式原理图.系统主要组成部分:四路固定波长的分布式反馈(Distributed Feedback, DFB)激光器,4个电光调制器(Electro-optic Modulator, EOM),微波分束器,四路低噪声放大器, $4 \times 1$ 密集波分复用器(Dense Wavelength Division Multiplexer-mux, DWDM-M),掺铒光纤放大器(Erbium-doped Optical Fiber Amplifier, EDFA), $1 \times 4$ 密集波分解复用器(Dense Wavelength Division Multiplexer-demux, DWDM-DE),4路光时延补偿调整器(Optical Time Delay Trimmer, OTDT),光真时延产生单元(Optical True Time Delay, OTTD),4块聚焦透镜,4个光电探测器和4个Vivaldi天线单元组成的天线阵列.发射模式已在文献[16]中介绍,本文不再赘述,仅介绍接收模式状态.4个Vivaldi天线单元接收远端斜极化喇叭天线发射的射频信号,分别经4个低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)放大后调制到4路外调制发射机的电光调制器EOM上,调制有射频(Radio Frequency, RF)信号的4路不同波长的光波信号经 $4 \times 1$ 密集波分复用器复用到共用的通道上然后经过一段距离的传输后经掺铒光纤放大器放大,然后经解复用器解复用,解复用的四路光经光时延调整器调整等延时,依次送入光真时延产生网络.系统结构图的光真时延网络结构实物图如图2,该图也包含了图1中的会聚透镜与探测器阵列.

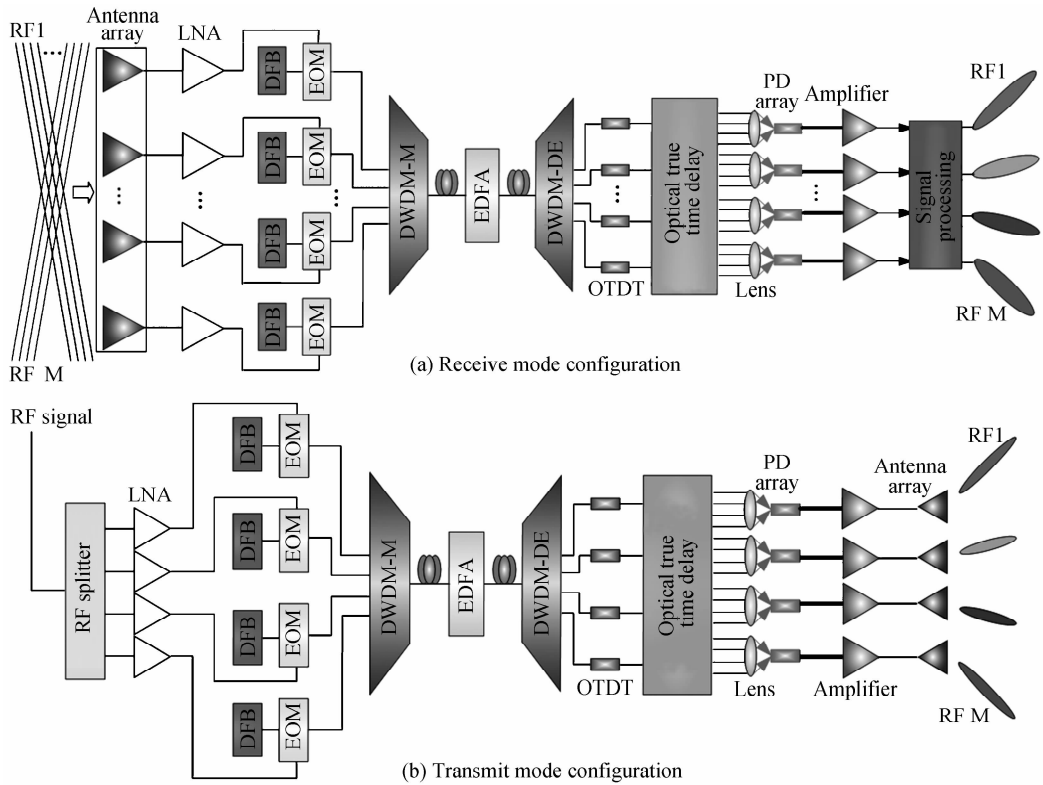


图 1 光学多波束形成网络系统工作

Fig. 1 Schematic diagram of the optical multi-beam formation network system

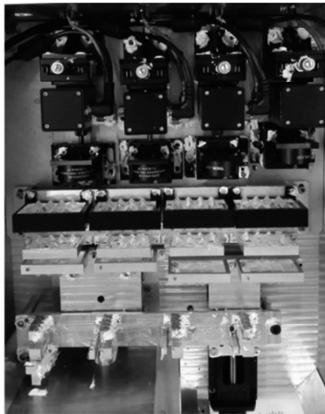
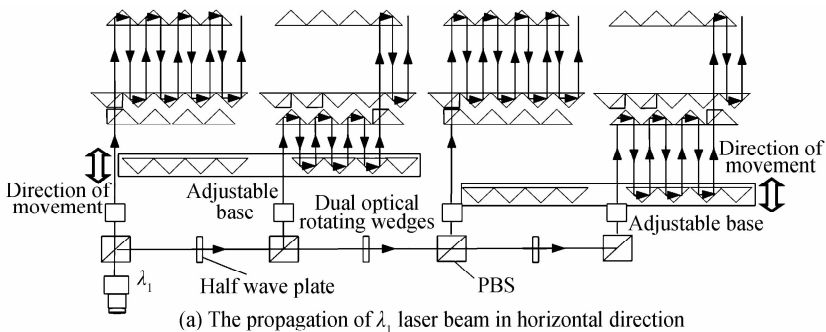


图 2 图 1 中所采用的光真时延网络结构

Fig. 2 Configuration of the proposed OTTD in Fig. 1

光真时延网络结构中光真时延的产生原理如图 3 所示,解调后的四路波长的光经过光纤准直头变成平行光,每路光在水平方向上经四个柱状的偏振分束器

分成四束,如图 3(a)所示;竖直方向上各路光波长从上到下分别为  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ , 进入最左端的探测器的四路光经过不同光程的四路光(称为第一组),其实际光路如图 3(b)所示,可知相邻两路的实际光程差为  $2(d_2 - d_1)$ ,  $d_1$  是固定的,  $d_2$  是可变的. 第一组的四路光和第二组(进入左起第二个探测器的四路光,称为第二组,依次类推第三组、第四组)的四路光在棱镜组中经过的实际光程相反. 第三组与第四组的各路光与第一组与第二组的各路类似,仅  $d_2$  值不同. 在每组由四路光组成的光束组中,在垂直于光的传播方向上有四组堆栈棱镜组,后面的三组棱镜组是固定的,第一组棱镜组连接由驱动电机驱动的导轨. 其中,构成前两组(第一组和第二组)光束组的第一棱镜组连接在一个导轨上,该两组光束组分别对应形成  $-\theta_1$  和  $\theta_1$  指向角的波束;后两组(第三组和第四组)光束组的第一棱镜组连接在另一个导轨上,对应分别形成  $-\theta_2$  和  $\theta_2$  指向角的波束;



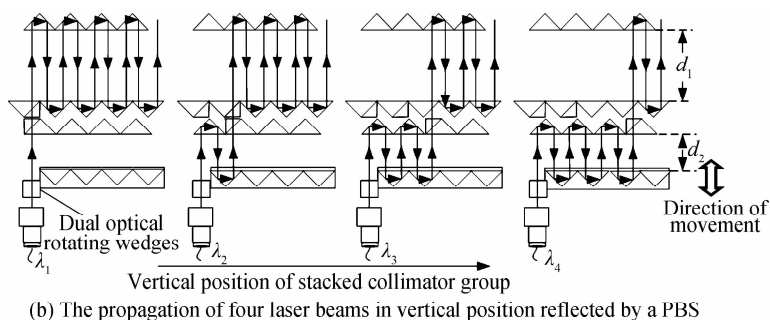


图3 真时延结构的实现原理

Fig. 3 Principle scheme of differential true time delay generation

两导轨独立控制,通过调节驱动电机驱动导轨运动,实现  $d_2$  的改变.各路光幅度的控制是通过调节位于偏振分光棱镜(Polarization Beam Splitter,PBS)之前的二分之一波片实现的;各路光路的平行调节是通过调节位于 PBS 反射方向处的旋转双光楔实现的.

竖直方向上相邻通道之间的时延表示为

$$\tau = \begin{cases} 2 \cdot (d_1 - d_2) / c & \text{第一和第三光束组} \\ -2 \cdot (d_1 - d_2) / c & \text{第二和第四光束组} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $d_1$  为第一组延时模块之间的距离,  $d_2$  为第二组延时模块之间的距离,其值为一变量,前两组  $d_2$  相同,后两组亦相同(与前两组值不同).  $c$  为光波在自由空间中传播的速度.基于式(1),称该时延为差分时延.波束指向角和时延的关系表示为

$$\theta = \arcsin(c \cdot \tau / d) = \begin{cases} \arcsin[2 \cdot (d_1 - d_2) / d] & \text{第一、三光束组} \\ -\arcsin[2 \cdot (d_1 - d_2) / d] & \text{第二、四光束组} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $d$  为天线阵列单元之间的距离.

对式(2)两端取微分,可以得到波束指向角精度和延时模块距离改变量  $\delta d_1, \delta d_2$  之间的关系为

$$\delta \theta = \frac{2 \cdot |\delta d_1 - \delta d_2|}{d \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

天线阵列间距为 38 mm 的天线阵列单元,在  $60^\circ$  指向角处,在机械精度为  $10 \mu\text{m}$  的情况下,其波束指向调节精度为  $0.667^\circ$ .

## 2 系统接收模式实验验证

由图 1 和图 2 设计结构,实现了结构紧凑的光控相控阵天线原型样机如图 4(a). 在实验中采用的器件的主要参数为:波长分别为 1549.92 nm, 1551.72 nm, 1552.52 nm, 1553.33 nm 的四路分布式反馈激光器 (Emcore 1772 DWDM Laser),功率约为 14 dBm;频率从 2 到 6GHz 变化的线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM) RF 信号经水平极化喇叭天线发射,接收天线阵列为 vivaldi 天线阵列,每个天线单元接收到的信号约为  $-28 \text{ dB}$ ,然后分别经过四个增益为 40 dB 的低噪声放大器放大驱动四路保偏电光调制器 EOM (SDL 12 GHz),调制器工作在 Quad+ 点.通道间隔 100 GHz 的保偏密集波分复用器 ( $4 \times 1 \text{ PM-DWDM-M}$ ) 使调制有微波信号的四路不同波长的光复用到一路上,并经 PM-EDFA 放大.放大后的信号经保偏密集解波分复用器 ( $1 \times 4 \text{ PM-DWDM-DE}$ ) 解复用.光时延调整器是为了补偿前端各链路之间的延时不一致而引入的.四路信号分别送入光时延产生网络,由时延网络输出的 4 组光束组,每组含有自上而下的等时延差的四路光信号,该四路光信号经透镜汇聚进入带宽超过 15 GHz,在 1550 nm 波段响应度为  $0.92 \text{ A/W}$  的光电探测器 (ET3500EXT, EOT Inc).图 4(b) 为样机在微波暗室的指向角测量实验验证.

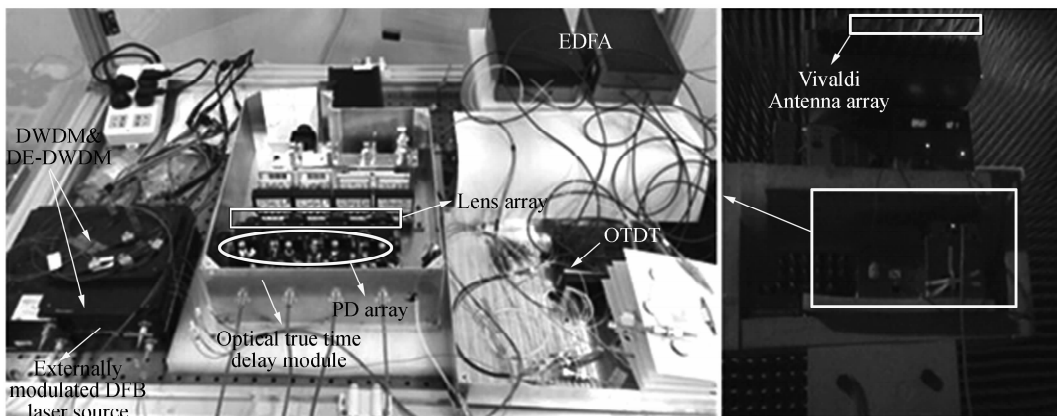


图4 系统整体结构和微波暗室实验图

Fig. 4 The configuration of the system and experiment in anechoic chamber

表 1 为 OBFN 系统各通道实际时延量参数测试结果及所对应的指向角;表 2 为各通道的链路增益;由表 1 可知第四组 PD4 的差分延时量比第三组延时绝对值大约 8ps. 究其原因为第四路光程太长,光路平行调节没有调整到较好的平行状态所导致. 由表 2 各通道链路增益测量值可知,第二组中的第四路增益比其它较高一些,可以通过调节该组该通道对应的二分之一波片实现各路增益的幅值相当.

表 1 OBFN 系统各路时延及相应指向角

Table 1 Time delay of each channel and their corresponding beam pointing angles of the OBFN

Channel \ PD	PD1	PD2	PD3	PD4
$\lambda_1$	0	0	0	0
$\lambda_2$	24	-24	67	-76
$\lambda_3$	49	-48	130	-156
$\lambda_4$	72	-69	198	-221
Beam pointing-angle	10.6°	-10.6°	30.8°	-32.8°

表 2 OBFN 系统各通道链路增益

Table 2 Link gain of each channel of the OBFN

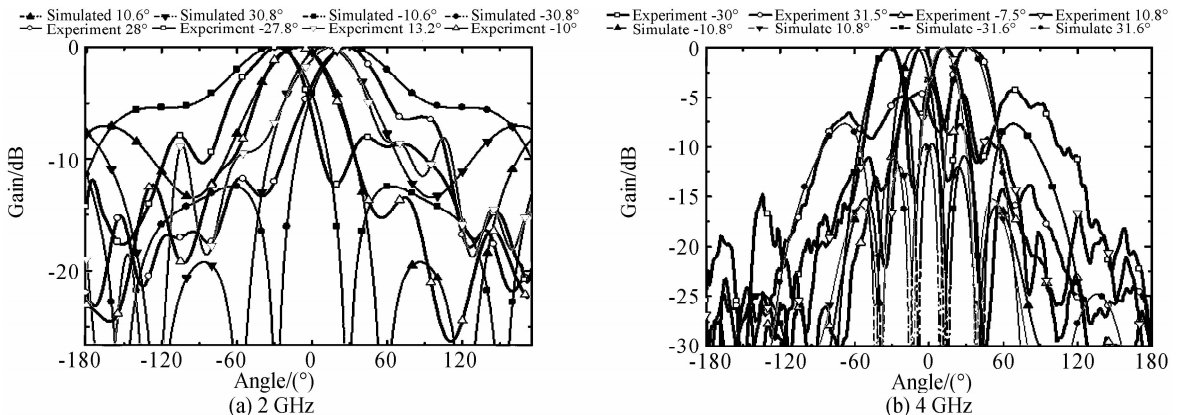
Channel \ PD	PD1	PD2	PD3	PD4
$\lambda_1$	-53.4	-56.0	-56.0	-54.0
$\lambda_2$	-58.2	-56.0	-54.2	-54.0
$\lambda_3$	-57.2	-57.2	-57.2	-57.6
$\lambda_4$	-54.2	-51	-53.2	-57.1

### 3 实验讨论及系统性能表征

#### 3.1 波束指向的频率无关性

通过调节  $d_2$  的大小( $d_1$  固定)可以实现各光束组中 RF 信号间延时差的连续变化,为验证所设计的光控相控阵天线的多波束实现功能. 在暗室中进行了 2~6 GHz 波段接收模式下四指向波束的同时实现验证. 天线阵单元选用具有宽带工作特性的 vivaldi 天线,天线单元间距 39 mm. 四光束组中以最上方一组通道

为基准,其它各通道与其时延差关系见表 2. 图 5 为接收模式下由所测得的各频点幅度和相位关系仿真所得波束指向和方位角测量仪直接实验测量所得波束指向图. 由图示可知,不同频率下幅度相位仿真所得各波束指向和方位角测试仪直接测试实验所得波束的各主瓣基本相吻合. 小的角度指向误差可能是由于天线单元等前端部分的幅度相位差异性所导致. 纯理论计算所得的波束指向  $\pm 10.6^\circ$ 、 $\pm 30.8^\circ$  和由幅相关系仿真所得的波束指向在 2~6GHz 最大指向角误差 0.8°,其原因是纯理论计算的波束指向  $\pm 10.6^\circ$ 、 $\pm 30.8^\circ$  是由等幅等相所得,而图示系统指向仿真是依据所测得非完全等幅等相的值所得,非完全等幅等相原因是由于电光调制器及光电探测器在宽频带内各频点相位响应的微小的不一致性和幅度响应的微小差异性所导致产生的. 另外,四条粗实线为直接方位角测量仪直接测量所得的波束指向图. 该光控多波束天线能较好的实现宽带 2~6GHz 频段下无波束倾斜效应的波束指向实现. 在 4,6 GHz 不同频点指向角为  $\pm 30.8^\circ$  时的最大指向角误差 1.2°,在 2GHz 频点处该指向角的最大指向角误差为 2.8°. 原因在于 2GHz 频点的波束宽度较大,导致较大指向角误差的产生. 在 4,6GHz 不同频点指向角为  $\pm 10.6^\circ$  时的最大指向角误差为 2.1°,在 2GHz 频点处该指向角的最大指向角误差为 2.6°. 在  $-10.6^\circ$  的处的指向角误差较大是由于第一光束组中四路光的平行度没有调整到较好的状态,因而相邻光之间延时差的不等所导致产生. 6GHz 栅瓣的产生是由于 vivaldi 天线阵列单元间距导致产生的. 原因在于 2~6 GHz 整个频段均无栅瓣且具有较大增益的天线阵列设计比较困难. 由计算可知大于 4.2GHz 频段的信号均会产生栅瓣. 且频率越高栅瓣越大. 从图中 6GHz 频点可以看出,此时各波束已经具有较大的栅瓣. 通过精密调节各光束组中各路光之间的相位关系,可以实现四波束副瓣电平的降低.



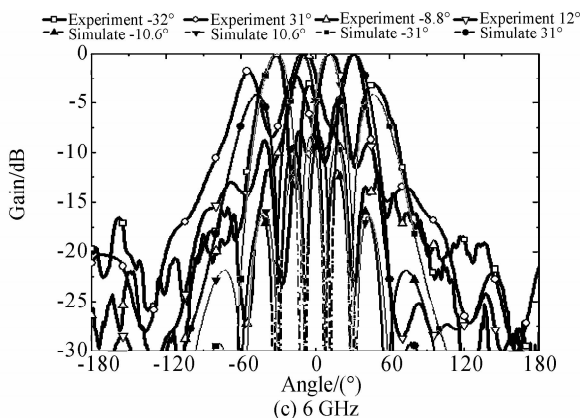


图5 接收模式下光控相控阵天线在不同RF频率下由系统实际幅度相位关系仿真和直接的波束指向角测量仪测量所得的波束指向角

Fig. 5 Beam steering angle of the optically controlled phase array antenna generated by simulating from amplitude and phase relation of the system and by measurement directed from the beam direction angle measuring instrument at different microwave frequencies

图6为通过调节 $d_2$ 实现其中一波束指向的连续调节.有图6可知,所采用的2,4,6GHz的RF信号波束指向的连续调节可知,不同频率的RF信号在实现指向角扫描的过程中,波瓣宽度不变.波瓣宽度只和所选用的天线单元阵列有关.6GHz频点有栅瓣的原因在论文前述已作介绍.通过调节各光束组中各路光的幅度相位关系,可以实现具有更低副瓣的波束方向图.系统的响应时间取决于电控驱动电机的响应时间,本系统为节省费用,采用的电控驱动电机的响应时间小于90ms,系统进行角度扫描的调节精度约为 $1.45^\circ/\text{ms}$ .

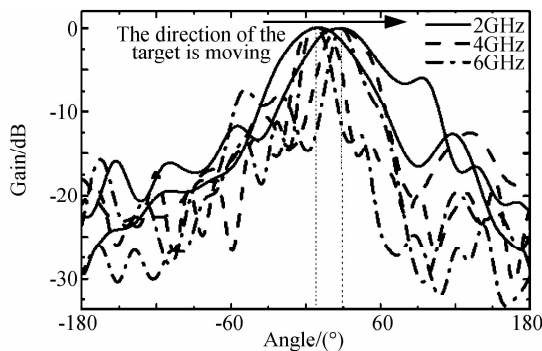


图6 目标从 $5^\circ$ 方位角连续移动到 $30^\circ$ 方位角测试结果  
Fig. 6 Performance of one of the beam as the target moving from  $5^\circ$  to  $30^\circ$  continuously

### 3.2 系统无杂散动态范围与噪声系数参数指标

图7为2GHz频点处无杂散动态范围(Spurious Free Dynamic Range, SFDR)测试值.双音频率分别为1.99GHz与2.02GHz.由图可知,多波束系统在2GHz频点处的 $\text{SFDR}_3 = 71.5 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ .可以通过对链路参数的优化例如射频信号的幅值(即调制度的选择)、光电探测器器件的选择等实现 $\text{SFDR}_3$ 的增加;纯光链路各通道的噪声指数为50~55dB,电光调制器前端加44dB的低噪放,可以实现链路整体噪声系数11.5~15dB.此时,系统输入IP3为一47dBm,系统输

出IP3为14.5dB,满足动态范围的需求.

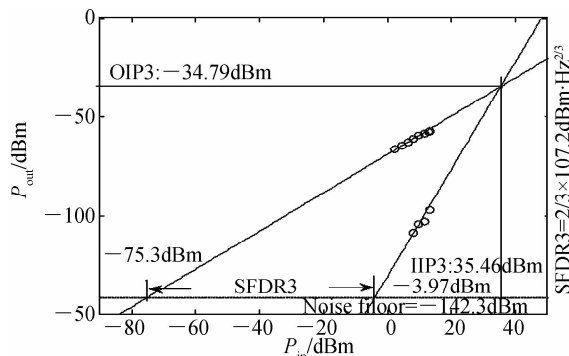


图7 2GHz频点处SFDR测试结果  
Fig. 7 SFDR measurement of the optically controlled phase array antenna at 2GHz RF signal

## 4 结论

本文研制实现了收发一体化光控相控阵天线系统,该系统的时延产生采用微光学元件堆栈技术实现,并对系统在接收模式工作状态进行了实验验证.该收发一体化相控阵天线通过进行光域内的延迟控制实现了微波射频域的波束控制,本相控阵天线能够实现了一维平面内的波束接收和发射.接收模式下的暗室实验证明,所实现的光控相控阵天线可以实现宽带微波信号下与频率无关的波束指向,以及一维平面不同方位角波束的连续跟踪.此外,该结构便于集成和扩展成二维阵列,即实现波束在水平方向和俯仰方向空间立体范围的波束操控.

### 参考文献

[1] WU Peng-sheng, HAN Xiu-you, GU Yi-ying, et al. Microwave frequency measurement based on optic delay line [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2011, 32(9): 944-949.  
吴彭生,韩秀友,谷一英,等.基于可调光延迟线的光子学微波频率测量[J].发光学报,2011,32(9): 944-949.

- [2] HE Zi-shu, JIN Lin. Development and implementation techniques of optically controlled phased array radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, **23**(12): 2191-2195.  
何子述, 金林. 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, **23**(12): 2191-2195.
- [3] LI Dong-wen, CUI Yi-ping. True-time-delay technologies of optical controlled phased array antenna [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **48**(3): 37-42.  
李冬文, 崔一平. 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, **48**(3): 37-42.
- [4] FU Zhen-hai, RICHARD L, RAY T C. Compact broadband 5-bit photonic true-time-delay module for phased-array antennas[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(7): 522-525.
- [5] JUNG B M, SHIN J D, KIM B G. Optical true time-delay for two-dimensional X-band phased array antennas [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(12): 877-879.
- [6] HAN Xiu-you, SONG Hong-yan. Study on the integrated waveguide optical delay line based on microring resonators[J]. *Acta Optic Sinica*, 2010, **30**(3): 782-786.  
韩秀友, 宋红妍. 微环谐振腔集成波导光延时线研究. *光学学报* [J], 2010, **30**(3): 782-786.
- [7] YI Xiao-ke. Photonic beamforming based on programmable phase shifters with amplitude and phase control [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(18): 1286-1288.
- [8] GRANIERI S, JAEGER M. Optical true time-delay for two-dimensional phased array antennas using compact fiber grating prism [J]. *Chinese Optics Letter*, 2003, **11**(10): 3262-3272.
- [9] SUBBARAMAN H, MAGGIE Y C. 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.
- [10] WU Peng-fei, TANG Su-ning. A prototype high-speed optically-steered X-band phased array antenna [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(26): 32599-32604.
- [11] ZHANG Ya-mei, WU Huan. An optically controlled phased array antenna based on single sideband polarization modulation [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(4): 3761-3765.
- [12] WILGUS J. RF photonics—key to information dominance [J]. *Analog Optical Signal Processing Workshop*, December 6, 2000.
- [13] MURPHY E J, THOMAS F A, WILLIAM J M, *et al.* Guided-wave optical time delay network [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, **8**(4): 545-547.
- [14] CHANG Y A, BORIS T, HAROLD R F, *et al.* Optical controlled serially fed phased-array transmitter [J]. *IEEE Microwave Guide Wave Letter*, 1997, **7**(3): 69-71.
- [15] DAVID M, CHRIS R, RENE H, *et al.* Integrated microwave photonics [J]. *Laser Photonics Review*, 2013, **7**(4): 506-538.
- [16] WANG Jian, HOU Pei-pei, CAI Hai-wen, *et al.* Continuous angle steering of an optically controlled phased array antenna based on differential true time delay constituted by micro-optical components [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 9432-9439.