

基于微光学阵列差分真时延网络的光学多波束合成系统

丁志丹^{1,2}, 杨飞^{2*}, 蔡海文², 王书楠³, 余胜武³, 侯培培², 孙建锋², 王廷云¹

¹上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200444;

²中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

³中国电子科技集团第五十一研究所, 上海 201802

摘要 提出了一种基于微光学阵列差分真时延网络的 optical 多波束合成系统, 研究了该系统中结构参数与波束形成性能的关系。通过改进基于微光学阵列差分真时延网络的参数, 优化了差分真时延网络的初相位以及幅相一致性; 通过改进天线单元的参数结构, 优化了各个天线单元的方向图, 解决了合成波束时容易出现栅瓣及波束较宽的问题。所提系统可抑制栅瓣, 得到的旁瓣消光比大于 10 dB, 频率为 3.8 GHz 时的 3 dB 带宽为 35°, 频率为 4.9 GHz 时 3 dB 带宽为 29°, 指向误差小于 1.5°, 频率覆盖范围为 2~6 GHz。该系统在光学相控阵雷达中具有广阔的应用前景。

关键词 光通信; 光学多波束合成系统; 差分真时延网络; 微光学结构

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0406004

Optical Multi-Beam Synthetic System Based on Micro-Optical Array Differential True Time Delay Network

Ding Zhidan^{1,2}, Yang Fei², Cai Haiwen², Wang Shunan³, Yu Shengwu³,
Hou Peipei², Sun Jianfeng², Wang Tingyun¹

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³China Electronics Technology Group Corporation No. 51 Research Institute, Shanghai 201802, China

Abstract An optical multi-beam synthetic system based on differential true time delay network which is with micro-optical array is proposed, and the relationships among the structural parameters and the beam-forming performance of the proposed system are studied. The initial phase and the consistence of amplitude and phase are optimized when we optimize the parameters of differential true time delay network based on micro-optical array. The directional diagrams of antenna elements are optimized when we optimize the structural parameters of antenna elements, and the problems of existing grating lobe and wide beam in beamforming are solved. At last, the grating lobe is suppressed, the extinction ratio of sidelobe is larger than 10 dB, the 3 dB bandwidths are 35° at 3.8 GHz and 29° at 4.9 GHz, the steering error is less than 1.5°, and the frequency covering band is 2-6 GHz. The proposed system has wide application prospects in optically controlled phased array radar.

Key words optical communications; optical multi-beam synthetic system; differential true time delay network; micro-optical structure

收稿日期: 2016-12-01; 收到修改稿日期: 2017-01-03

作者简介: 丁志丹(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: zhidan1018@163.com

导师简介: 蔡海文(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事单频激光技术和光电子技术等方面的研究。

E-mail: hwcai@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: fyang@siom.ac.cn

1 引 言

在近代战争中,雷达是空战、陆战和海战中极为重要的作战软武器,在其几十年的发展历程中,始终存在着雷达与反雷达的斗争^[1]。基于传统电移相器的相控阵雷达通常会受到天线阵列孔径效应的限制,存在信号带宽小和波束偏移的问题,限制了其在广播、通信和远距离传感等方面的应用^[2]。为了克服这些问题和获得大瞬时带宽的宽带波束,各国研究人员提出了基于光子学的波束形成技术。相比于电学系统,光控多波束形成系统的体积更小,质量更轻。此外,基于光子学的波束形成技术的抗电磁干扰能力强,且控制部分远离天线,极大地提高了雷达和使用人员的生存能力。

1985年,Gardone^[3]提出了光纤真时延波束形成的思想,其方法是将微波信号调制在光纤上,用光纤作为实时延迟线替代电移相器。采用光纤真时延对光载射频信号进行移相,可以在瞬时大带宽信号下实现信号无失真地传输,同时能保证波束合成时的频率无关性。近年来,光纤技术在波束形成及相控阵雷达中的应用得到美欧军方的重视,国外许多大学和公司也对该应用领域进行了大量的研究,并在一些关键技术方面取得了实质性突破。基于光纤真时延的波束带宽能达到 100 GHz,可覆盖微波范围的绝大部分频段^[4];此外,在整个雷达频段,光纤传输损耗比电移相器系统的传输损耗低很多,非常有利于雷达信号的远距离传输和对雷达信号的控制。在光纤真时延网络被提出之后,许多基于光学真时延但采用其他光学结构的光控多波束形成技术相继被提出,例如采用光波导^[5]、光开关^[6]、硅基液晶^[7]以及光纤光栅技术^[8]等实现固定延时的时延产生,以及基于可调谐激光器和色散光学器件(例如光子晶体光纤^[9]、啁啾光纤光栅^[10]等)的连续可调的时延产生。后者可以实现任意方位角指向的波束发射和接收,还可通过控制工作在单边带偏振调制的偏振状态来实现任意相位的产生,从而产生连续的时延^[11]。

在文献^[12]的基础上,提出了一种基于微光学结构的差分真时延网络和二维天线的多波束形成系统。首先使用微光学校镜阵列实现光学的差分真时延,从而实现波束指向角的连续调节,并通过优化的时延结构参数来获得良好的幅相一致性,再利用二维天线阵列结构代替一维天线阵列压窄天线栅瓣,最终实现了波束指向更精确、栅瓣被抑制的多波束形成方向图。

2 实验原理

2.1 真时延波束形成原理

线性阵列天线示意图如图 1 所示,其中 d 为相邻天线单元间距。入射的波束与法线之间的夹角为 θ ,当波束到达各天线单元时,各天线单元之间会产生光程差或者时延差,即各天线单元处的波束存在相位差,此时必须通过一定的时延或相位补偿才能在阵列输出端实现同相叠加。

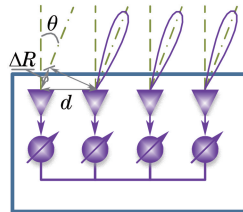


图 1 线性阵列天线示意图

Fig. 1 Diagram of linear array antenna

根据相邻波束光程差 ΔR 、相邻天线单元间距 d 、波束指向角 θ' 之间的几何关系 $\Delta R = d \cdot \sin \theta$,可得

$$\theta' = \arcsin(\Delta R / d). \tag{1}$$

基于真时延技术的波束形成系统可将天线单元之间波束光程差对应的时间延迟在真时延单元中补偿回来。相邻天线单元的时间延迟 $\Delta\tau$ 与 ΔR 的关系为

$$\Delta\tau = \frac{\Delta R}{c} = \frac{d \sin \theta'}{c}, \tag{2}$$

式中 c 为传输介质中的光速。对于第 i 个天线单元来说,相对于某参考天线单元 1 的时间延迟 $\Delta\tau_i$ 为

$$\Delta\tau_i = (i - 1) \frac{\Delta R}{c} = (i - 1) \frac{d \sin \theta}{c}. \quad (3)$$

若在真时延网络中对第 i 号天线单元进行相当于 $-\Delta\tau_i$ 的真时延补偿,便可在输出端形成多波束的同相叠加。

为了获得在考虑真时延补偿后天线阵列的波束结果,假设入射波束为单频信号 ν ,入射角为 θ ,波束形成系统的真时延补偿量是按照入射角为 θ_0 设计的,于是入射波束在经过具有 N 个天线单元的波束形成系统后合成波束,则相应的方向图可以表示为

$$s(\theta, t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) = \sum_{i=1}^N A \cos \left\{ 2\pi f \left[t + \frac{(i-1)d(\sin \theta - \sin \theta_0)}{c} \right] \right\} = A \cos \left[2\pi f t + \frac{(N-1)\beta}{2} \right] \frac{\sin(N\beta/2)}{\sin(\beta/2)}, \quad (4)$$

式中 $\beta = \frac{2\pi d(\sin \theta - \sin \theta_0)}{\lambda}$, $s_i(t)$ 为第 i 个阵列单元所对应的单元天线的方向图, λ 为波长, t 为时间, A 为幅度, f 为频率。波束形成系统的方向系数可以定义为

$$D(\theta) = \frac{\sin(N\beta/2)}{\sin(\beta/2)} = \left| \frac{\sin [N\pi d(\sin \theta - \sin \theta_0)/\lambda]}{\sin [\pi d(\sin \theta - \sin \theta_0)/\lambda]} \right|. \quad (5)$$

由(5)式可知,当 $\theta = \theta_0$ 时, $D(\theta) = N$,表明当光程差引起的时间差等于波束形成系统在设计波束方向 θ_0 上人为插入的时间差时,各天线单元的输出信号便可实现同相叠加,从而得到单元电平输出信号 N 倍的输出;当 $\theta = \theta_0 + (2m+1)\pi/N$ (m 为整数) 时, $D(\theta)$ 取得极大值,其中最大二阶波瓣位置对应的角度和主瓣位置对应的角度的差值 $\Delta\theta = 3\pi/N$,其值为 $2/(3\pi)$ 倍的最大主瓣值;当 $D(\theta) = N/\sqrt{2}$ 时,输出信号的功率为波束指向最大时功率的一半,由此可得波束方向图半功率点宽度。设 $\theta_1 = \theta_0 + (1/2)\Delta\theta_{1/2}$,则 $D(\theta_1) = (N/\sqrt{2})$, $\Delta\theta_{1/2}$ 为波束半功率点宽度。

由(5)式推导可知,当 $D(\theta_1) = N/\sqrt{2}$ 时, $\sin [N\pi d(\sin \theta_1 - \sin \theta_0)/\lambda] = 1.39$,由此可求得方向图半功率点宽度 $\Delta\theta_{1/2}$ 为

$$\Delta\theta_{1/2}(\text{rad}) = \frac{1}{\cos \theta_0} \times \frac{0.88\lambda}{Nd}. \quad (6)$$

由(6)式可知,当天线个数 N 增大时,波束宽度将变窄;天线间距越大,波束宽度越窄。

当真时延补偿量引起的相位差与相邻天线单元间光程差引起的相位差为 $2m\pi$ (m 为整数) 时,波束方向图将出现最大值。当 $m=0$,波束不会出现栅瓣,此时波束指向角为 θ_{\max} ,因此出现栅瓣时的波束指向角 θ_2 满足

$$\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_2 - \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_{\max} = \pm 2m\pi. \quad (7)$$

当 $\sin \theta_2 > 1$ 时,(7)式不成立,因此当波束扫描至 θ_{\max} ,仍不出现栅瓣的条件为

$$d < \frac{\lambda}{1 + |\sin \theta_{\max}|}. \quad (8)$$

由(8)式可知,当频率为 6 GHz、 θ_{\max} 为 34.5° 时,天线间距应小于 31.92 mm,此时波束方向图才不会出现栅瓣。

2.2 微光学阵列真时延多波束形成原理

为了演示微光学阵列真时延多波束形成的原理,将 8 个 Vivaldi 天线两两合束以构成 4 个天线单元,如图 2 所示,然后利用这 4 个天线单元构成线性天线阵列,并合成 4 个不同指向角的多波束。由于每个指向角的波束需要 4 个天线单元的信号来合成,而每个天线单元需要一个不同的时延补偿值,因此需要一个具有 16 个不同时延值的光学真时延网络(OTTD)。

OTTD 由微光学校镜阵列利用堆栈集成技术构成,其结构如图 3 所示。该时延网络主要是将入射的 4 个不同波长的光信号重新组合,经过 4 个不同的时延光路,形成 4 个指向角不同的波束。4 个天线单元不同

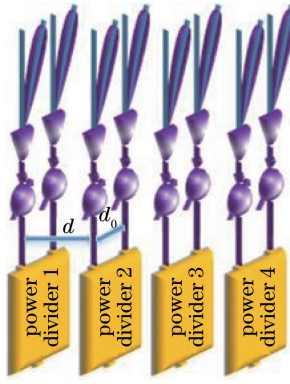


图 2 组阵后的天线阵列示意图

Fig. 2 Diagram of arranged antenna array

波长的射频信号通过光纤准直器变成 4 束平行光, 4 束平行光进入时延网络, 每束光经偏振分束器后分成 4 路光, 最后得到 16 束激光, 16 束激光经过时延网络后具有不同的真时延值, 最后分别进入 4 个光电探测器 (从左到右依次为 PD1、PD2、PD3、PD4), 每个探测器上接收 4 个不同波长的激光 (即来自 4 个天线单元的射频信息), 从而合成 4 个不同指向角的波束。时延网络的具体光路如图 4 所示, 以 λ_1 为例, 同一波长的激光在水平方向 (Y 方向) 上经偏振分束器分成如图 4(a) 所示的 4 路激光, 实际光路如图 4(b) 所示, 左起第 1 个输出光进入 PD1, 以此类推。进入 PD1 的 4 路光称为第 1 组, 进入 PD2 的 4 路光称为第 2 组, 依次类推分别称为第 3 组、第 4 组。PD1 和 PD2 所对应的前两排棱镜间距和后两排棱镜间距分别为 d_1 和 d_2 , 同样地, PD3 和 PD4 对应的前两排棱镜间距和后两排棱镜间距分别为 d'_1 和 d'_2 。从图 4 可以看出, 第 1 组的 4 路光中相邻波长的光程差为 $(d_1 - d_2)$, 其余 3 组中相邻波长的光程差分别为 $(d_2 - d_1)$ 、 $(d_1 - d'_2)$ 和 $(d'_2 - d_1)$ 。在实际结构中, d_1 为固定值, d_2 和 d'_2 可以根据不同的指向角要求进行配置, 并且通过连续调节 d_2 和 d'_2 的值可实现真时延值的连续变化。波束指向角和时延的关系可表示为

$$\theta = \begin{cases} \arcsin [2(d_1 - d_2)/d], & 1^{\text{th}} \text{ group} \\ -\arcsin [2(d_1 - d_2)/d], & 2^{\text{nd}} \text{ group} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\theta = \begin{cases} \arcsin [2(d_1 - d'_2)/d], & 3^{\text{rd}} \text{ group} \\ -\arcsin [2(d_1 - d'_2)/d], & 4^{\text{th}} \text{ group} \end{cases}. \quad (10)$$

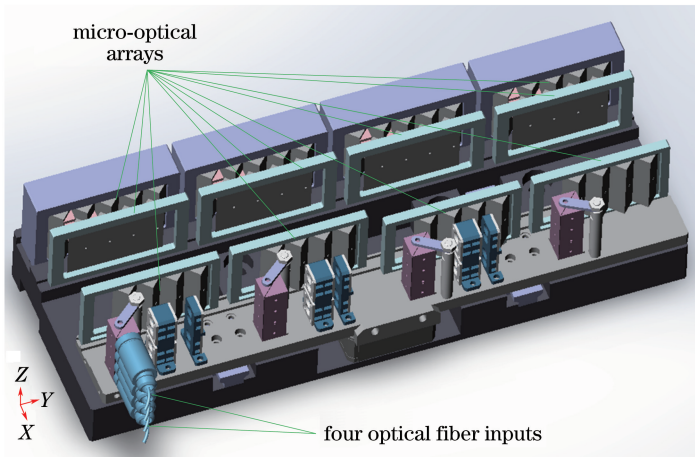


图 3 微光学棱镜阵列构成的真时延网络结构示意图

Fig. 3 Diagram of true time delay network structure diagram comprised of micro-optical prism arrays

在天线和时延网络的基础上, 利用完整的电光-光电转换链路搭建了光学多波束形成系统, 原理如图 5 所示。天线阵列接收的信号分别经 4 个低噪声放大器 (LNA) 放大后调制到 4 路不同波长外调制发射机的电光调制器 (EOM) 上, 调制有射频 (RF) 信号的 4 路不同波长的光波信号经 4×1 密集波分复用器复用 (DWDM) 后, 再经光纤传输, 中途为了保证功率, 利用掺铒光纤放大器 (EDFA) 对光信号进行放大, 之后经解复用器进

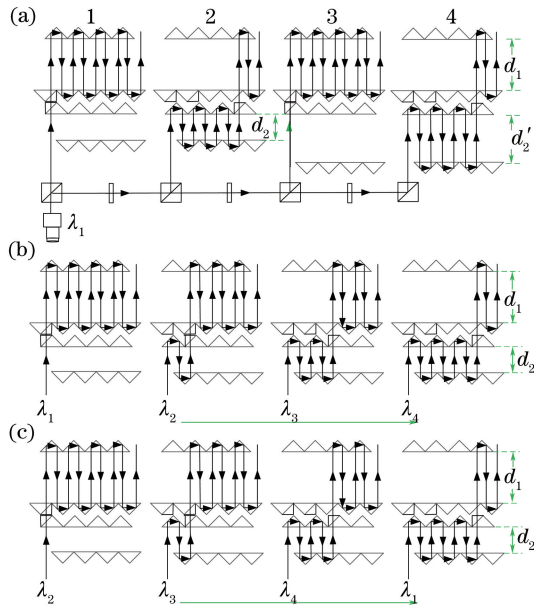
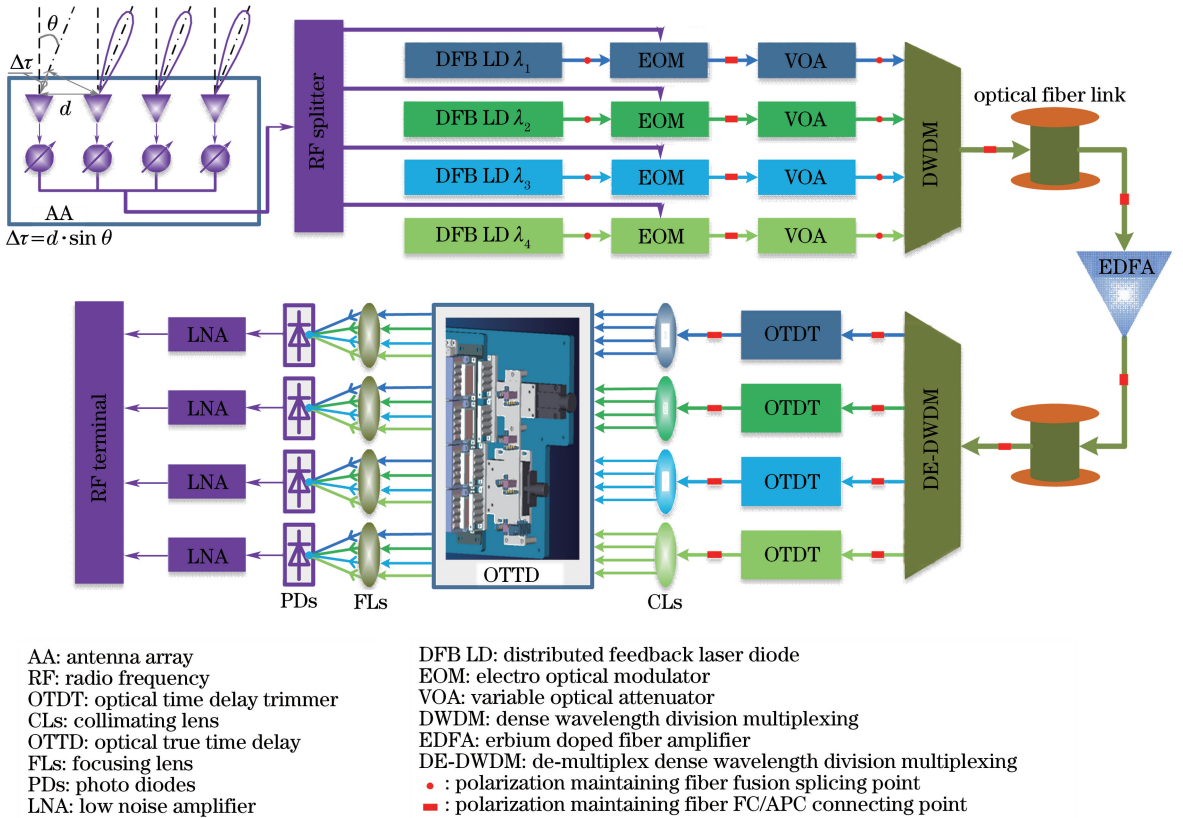


图 4 微光学棱镜阵列真时延网络的光路示意图。(a) Y 方向上波长为 λ_1 的激光光路；

(b) Z 方向进入 PD1 的第 1 组 4 路激光的光路；(c) Z 方向进入 PD2 的第 2 组 4 路激光的光路

Fig. 4 Light path diagrams of true time delay network based on micro-optical prism arrays. (a) Light path of laser at λ_1 in Y direction; (b) light paths of four lasers of the first set entering PD1 in Z direction; (c) light paths of four lasers of the second set entering PD2 in Z direction



AA: antenna array
RF: radio frequency
OTDT: optical time delay trimmer
CLs: collimating lens
OTTD: optical true time delay
FLs: focusing lens
PDs: photo diodes
LNA: low noise amplifier

DFB LD: distributed feedback laser diode
EOM: electro optical modulator
VOA: variable optical attenuator
DWDM: dense wavelength division multiplexing
EDFA: erbium doped fiber amplifier
DE-DWDM: de-multiplex dense wavelength division multiplexing
• : polarization maintaining fiber fusion splicing point
■ : polarization maintaining fiber FC/APC connecting point

图 5 光学多波束合成系统原理图

Fig. 5 Diagram of optical multi-beam synthetic system

行解复用,解复用的 4 路光分别经光时延调整器(OTDT)调整形成相同的延时,再依次输入 OTTD,形成 4 组激光输出,并分别经 4 块聚焦透镜聚焦后被 4 个光电探测器接收并进行光电转换,获得的电信号再经过低

噪声放大后进入射频处理终端,从而形成 4 个不同指向角的波束。

与其他产生真时延的技术相比,利用自由空间三维堆栈集成光学技术可实现光学多波束时延网络和对每路时延的精确调节,并且对环境温度的变化不敏感,非常适合于不同环境下的应用。基于时延调整器的时延产生作为一种时延控制技术,一个时延调整器只能产生一个时延值,为实现 4×4 结构的 16 个时延值,需要 16 个时延调整器,同理, 8×8 结构则需要 64 个时延调整器。因此,随着所需时延值数量的增多,基于时延调整器的时延网络系统复杂度和成本都会大幅增加,同时也降低了时延调整的灵活性。

3 实验结果

3.1 天线结构的影响

天线结构对系统方向图的影响因素主要包括天线单元个数、天线单元间距和天线单元方向图。这里所采用的天线组合为上下两两组合方式,在实际情况下,上下两天线间间距 d_0 。相对于远端射频信号而言,要远小于信号源到天线阵列处的距离,上下两个天线接收到射频信号的角度可视为相同,因此 d_0 对波束指向图基本无影响,在此不再具体分析。以下通过模拟仿真分析以上三个要素对系统方向图的影响规律。

首先,假设天线单元方向图理想,射频信号频率为 6 GHz,所需波束指向为 $\pm 11^\circ$ 和 $\pm 34.5^\circ$ 。当天线单元数为 4 个,天线单元间间距分别为 20, 29, 39 mm 时的方向图仿真结果如图 6(a) 所示;当单元数改为 8 个时,天线单元间间距分别为 20, 29, 39 mm 时的方向图仿真结果如图 6(b) 所示。

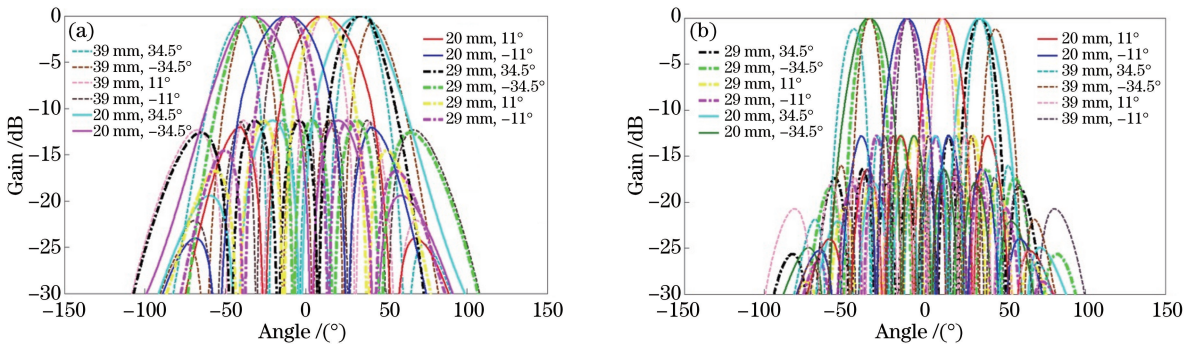


图 6 天线为(a) 4 个和(b) 8 个时的系统方向图

Fig. 6 System directional diagrams when number of antennas is (a) four and (b) eight

由图 6 可知,当天线单元间距相同时,改变天线个数,波束指向角保持不变,但是 8 天线结构波束的 3 dB 带宽明显窄于 4 天线结构,且波束指向更能准确判断。天线单元间间距的增大使得波束宽度变窄,同时也会出现栅瓣。图中当天线单元间距为 39 mm、波束指向为 $\pm 34.5^\circ$ 时,4 天线和 8 天线均出现了栅瓣。经计算可知,当射频信号频率为 6 GHz、波束指向为 34.5° 时,天线单元间距大于 31.92 mm 时会出现栅瓣,造成波束指向无法判定。因此,为避免栅瓣产生,天线单元间距应小于 31.92 mm。但是天线单元间距越小,波束宽度越宽,使得判定波束指向会产生一定误差。因此,天线单元间距也不宜过小,取值应略小于 31.92 mm。

以上分析天线数和天线单元间距对方向图的作用规律时,默认各天线本身方向图理想,但实际上,各天线因制造工艺水平有限,其自身方向图并不理想,并且略有差异,而且当天线数增加时,各天线的方向图差异也会增大。为了进一步减小天线方向图的差异程度,可以考虑将 8 天线两两组合,以减小天线本身方向图对系统方向图波束性能的劣化程度。为验证该方案的可行性,实验测得当射频信号的频率为 2 GHz 和 5 GHz 时,单根天线和两根天线组合功分之后的天线方向图如图 7 所示。由图 7 可知,在 2 GHz 频点处,经过功分的 5 dB 带宽比单个天线的 5 dB 带宽更宽;同时,当频率为 5 GHz、扫描角范围为 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 时,方向图中曲线更为平坦,对判断波束指向角的影响更小。因此,为获得更好的系统波束方向图,经综合判断,最终选择天线单元间距为 29 mm、并含功分器的 8 天线结构。

3.2 主要系统参数

实验中所采用器件的主要参数为:天线单元间距 $d_0 = 49$ mm, $d = 29$ mm;低噪声放大器的增益为 44 dB;4 路分布式反馈半导体激光器波长分别为 1549.92, 1551.72, 1552.52, 1553.33 nm,功率约为 14 dBm;

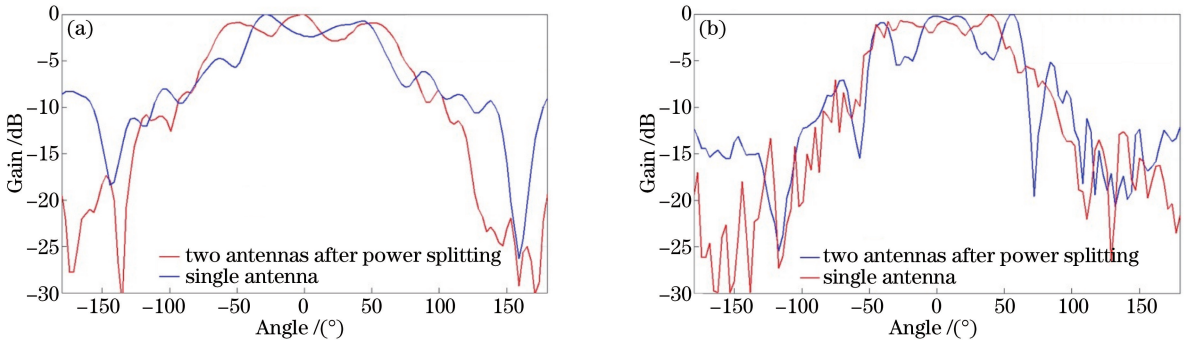


图 7 信号频率为(a) 2 GHz 和(b) 5 GHz 时单个天线和两根天线组合功分后的天线方向图

Fig. 7 Antenna directional diagrams of single antenna and two antennas after power splitting when signal frequency is (a) 2 GHz and (b) 5 GHz respectively

电光调制器的带宽为 12 GHz,半波电压约为 6.1 V,调制器工作在正线性点;波分复用器的通道间隔为 100 G;掺铒光纤放大器的增益为 20 dB,输出功率范围为 0~200 mW;光时延调整器的时延调整范围为 0~330 ps;光电探测器的带宽为 12.5 GHz;整个系统全部采用保偏光纤的全保偏结构。

3.2.1 时延值的测试方法及结果

在时延的测量中,先借助电光效应将宽带微波信号通过电光强度调制器调制到激光光波信号上,之后经过延时处理的调制宽带微波信号的光波由宽带光电探测器接收。宽带微波信号由矢量网络分析仪产生,通过矢量网络分析仪的一个端口经电光调制器调制到激光光波上面,将光电探测器接收的经延时处理的信号送入矢量网络分析仪的另一端口,从而可以得到链路的绝对时延值。光学多波束合成系统各通道实际时延量参数测试结果如表 1 所示,表中相对时延值均以各 PD 中 λ_1 的链路绝对时延值作为基准测得。由表 1 可知, λ_3 在 PD1 中的相对时延值比 λ_3 在 PD2 中的相对时延值大约 8.7 ps, λ_4 在 PD1 中的相对时延值比 λ_4 在 PD2 中的相对时延值大约 5 ps。理想状态下,同一波长在 PD1 和 PD2 中对应的相对时延值的大小应该相同,产生相对时延值偏差的原因是前 2 组光路较短,测量的绝对相位差较小,导致时延抖动在较小时延值内较为突出,测得的相对时延值偏差较大,最终使得波束合成时的波束指向将有小角度偏差。

表 1 光学多波束合成系统各路相对时延值

Table 1 Relative time delay of optical multi-beam synthetic system

ps

Wavelength	Relative time delay			
	PD1	PD2	PD3	PD4
λ_1	0	0	0	0
λ_2	19.6	-16.4	64.5	-61.2
λ_3	47.3	-38.6	125	-122
λ_4	66	-61	184	-186.7

3.2.2 光学多波束合成系统时延网络幅相特性

差分时延网络输出端为 4 个光电探测器,图 8 为各个探测器中不同通道链路对应的相对相位测量值,其中以通道 1 为参考。图 9 为进入探测器的各光束组的每个真时延通道之间在相同频率点的相对幅度值,同样是以通道 1 为参考。由进入同一探测器的 4 路经不同时延的光信号的幅度差可知,在 2~6 GHz 频率范围内,相同频率处的最大幅度差约为 3 dB。为使同一 PD 内各路通道之间的增益以及各 PD 之间的整体增益差异更小,可以通过微调时延网络中各通道相应的 1/2 波片来使各路的增益相当。

3.3 多波束形成性能

为验证所设计的光学多波束实现功能,在暗室中进行了接收模式下 2~6 GHz 频率范围内四指向波束的同时实验验证。接收模式下光学多波束合成系统在不同射频频率下实际测量所得和模拟所得的波束指向角如图 10 所示,由图可知,频率为 3.8 GHz 时,实际所测波束指向角的最大误差为 1.5°;频率为 4.9 GHz 时,实际所测波束指向角的最大误差仅为 1°,而且栅瓣已基本被抑制,指向精度更高,整体效果较好。指向角存在小角度的偏差,主要是由微光学元件的生产装配水平、器件参数不太理想所致。基于图中仿真和实验结

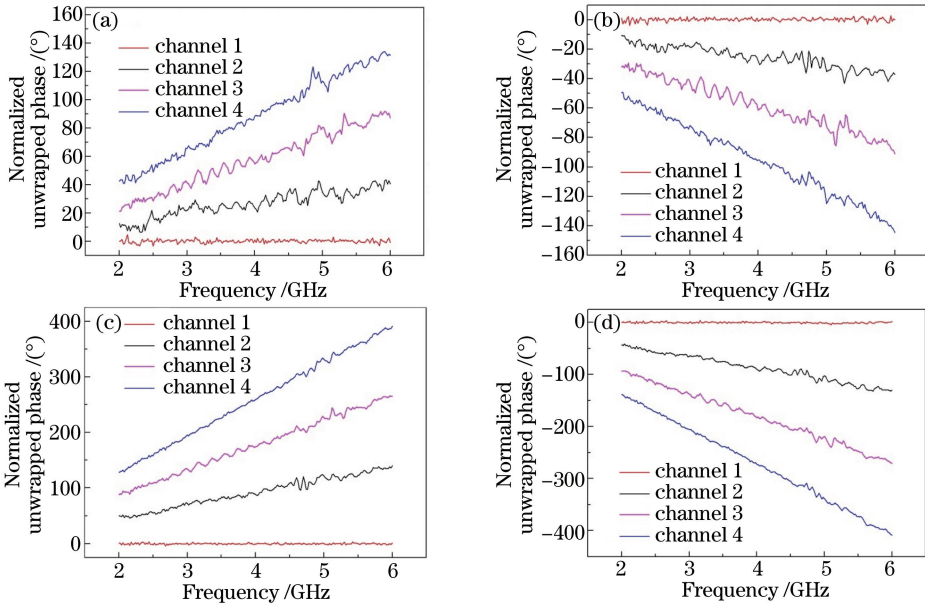


图 8 差分真时延网络中 4 组延时线组内相对相位值(以第 1 路为参考)。(a)进入 PD1 的 4 路激光；
(b)进入 PD2 的 4 路激光；(c)进入 PD3 的 4 路激光；(d)进入 PD4 的 4 路激光

Fig. 8 Relative phases of four group time delay lines in differential true time delay network with the first channel as reference. (a) Four lasers entering PD1; (b) four lasers entering PD2; (c) four lasers entering PD3; (d) four lasers entering PD4

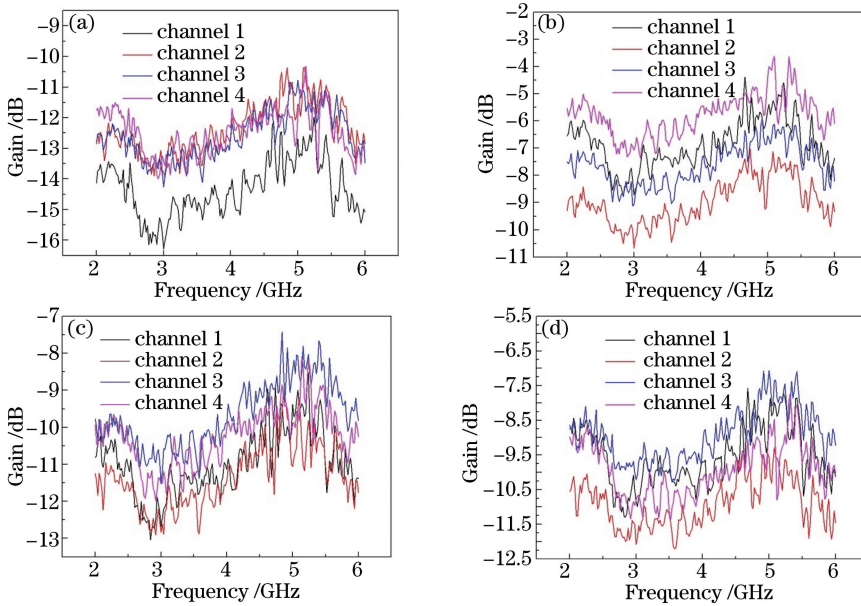


图 9 差分真时延网络中 4 组延时线组内相对幅度值。(a)进入 PD1 的 4 路激光；
(b)进入 PD2 的 4 路激光；(c)进入 PD3 的 4 路激光；(d)进入 PD4 的 4 路激光

Fig. 9 Relative amplitudes of four group time delay lines in differential true time delay network.

(a) Four lasers entering PD1; (b) four lasers entering PD2; (c) four lasers entering PD3; (d) four lasers entering PD4

果,可明确得到以下结论。

1) 实验结果与理论仿真结果基本一致,不同频率下各波束指向的理论仿真结果和微波暗室实验测试所得的波束指向角能够很好地吻合。实验测试所得的各波束副瓣及其附近电平变化趋势与理论仿真结果较好地吻合。该光控多波束天线可较好地实现 2~6 GHz 频率范围内无波束倾斜效应的波束指向控制。

2) 与前期实验结果^[12]相比,系统的波束形状较好。通过对天线端进行重新设计,并对时延部分幅相参数进行调整,各个链路的幅相一致性更趋理想,最终得到的波束指向角误差更小,波束栅瓣被抑制,波束已有

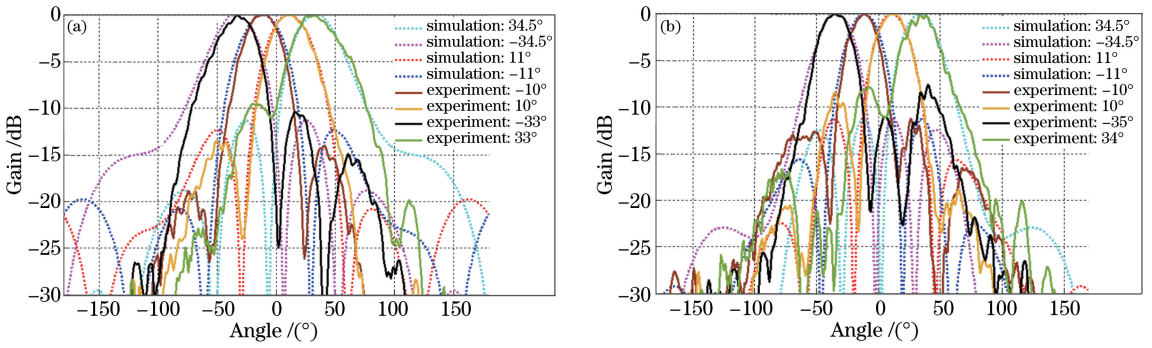


图 10 接收模式下光学多波束合成系统在不同射频频率下实际测量所得的波束指向角。(a) 3.8 GHz; (b) 4.9 GHz

Fig. 10 Beam steering angles of optical multi-beam synthetic system at different radio frequencies under receiving mode. (a) 3.8 GHz; (b) 4.9 GHz

明显改善。

3) 验证了波束指向角的频率无关性。波束指向角在不同频率下是相同的,这正是光学真时延波束形成相对于电移相器的优势。

4 结 论

在原有基于微光学器件光学真时延网络的多波束形成系统基础上,对系统中天线阵列的参数结构和时延网络的幅相一致性进行优化调整。通过减小天线之间的间距,使栅瓣得到抑制;在天线阵列中添加功分器并重新组阵,优化了天线单元的方向图;通过提高系统的幅相一致性,使同一输出的 4 路合成方向图更为精确,最终抑制了方向图在所有频点上的栅瓣,整体指向精度更精确,更符合实际条件的要求。

参 考 文 献

- [1] Jia Chunyan, Li Dongwen, Ye Lihua, *et al.* Phased array antenna and optical-controlled phased array antenna[J]. Chinese Journal of Electronic Devices, 2006, 29(2): 598-601.
贾春燕, 李冬文, 叶莉华, 等. 相控阵雷达与光控相控阵雷达[J]. 电子器件, 2006, 29(2): 598-601.
- [2] Wang Zhaoyong, Pan Zhengqing, Ye Qing, *et al.* Fast pattern recognition based on frequency spectrum analysis used for intrusion alarming in optical fiber fence[J]. Chinese J 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.
- [3] Cardone L. Ultra-wideband microwave beamforming technique[J]. Microwave Journal, 1985, 28(4): 121-123.
- [4] Nguyen L V T. Optical RF phase shifter design employing optical phase manipulation and coherent detection-part i: Concept proposal[J]. International Journal of Microwave and Optical Technology, 2011, 6(5): 301-309.
- [5] Fu Z, Li R, Chen R T. Compact broadband 5-bit photonic true-time-delay module for phased-array antennas[J]. Optics Letters, 1998, 23(7): 522-524.
- [6] 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.
- [7] Yi X, Huang T X H, Minasian R A. 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, Siahmakoun A. Multiple-beam fiber-optic beamformer with binary array of delay lines[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(12): 3262-3272.
- [9] 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.
- [10] Zhang Xin, Yang Zhi, Li Qianglong, *et al.* Research on temperature tuning properties of chirped fiber Bragg gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0505002.
张新, 杨直, 李强龙, 等. 啁啾光纤光栅的温度调谐特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0505002.
- [11] Zhang Y, Wu H, Zhu D, *et al.* An optically controlled phased array antenna based on single sideband polarization modulation[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 3761-3765.
- [12] Wang J, Hou P, Cai H, *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.