

文章编号: 2095-4980(2018)04-0637-08

基于集成光学的波束形成以及误差分析

王书楠¹, 余胜武¹, 杨飞², 王正生¹, 丁志丹²

(1.中国电子科技集团公司 第五十一研究所, 上海 201802; 2.中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201802)

摘要: 为了在系统设计中规避二维光子探测器(PD)阵列, 基于集成光学对从空间光角度实现时延网络以及波束形成原理进行研究, 通过集成光学空间棱镜组的方法进行光分束和合束, 并利用空间光探测器的低通滤波效果实现射频波束的相干合成等关键技术。采用数值仿真对影响波束合成的误差因素进行分析, 并与实测结果进行对比。仿真和实测结果相关误差会恶化波形质量和副瓣水平, 但仍能够在 $\pm 30^\circ$ 空域范围内和3:1的频域带宽内实现设计指向的同时四波束方向图。

关键词: 时延网络; 波束合成; 误差分析

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0637

Beam-forming based on integrated optics and error analysis

WANG Shunan¹, YU Shengwu¹, YANG Fei², WANG Zhengsheng¹, DING Zhidan²

(1.The 51th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201802, China;

2.Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201802, China)

Abstract: In order to avoid 2D Photo Detector(PD) array in system design, a research on the theory of time-delay network and beam-forming according to integrated optics based on the microwave optics is performed, in which lens group is utilized to divide and reform the light, and the low-pass character of the photo-detectors is adopted to realize the coherent reforming of Radio Frequency(RF) signals. Errors and their influence on beam-forming are simulated, and the results are compared with the measurements, which reveal that although the signal qualities and the side-lobe levels are decreased, a pattern of four beams in $\pm 30^\circ$ within 3:1 bandwidth is realized as designed.

Keywords: time-delay network; beam-forming; error analysis

针对下一代电子战装备, 根据作战需求研究换代技术特征, 并针对性地提出相应的研制目标。根据电子对抗领域所面临的使命任务的变化, 普遍认为下一代电子战装备应满足以下几个作战需求^[1-4]:

1) 必须能够适应现代多军兵种联合作战的复杂电磁环境, 能够以极高的空间、时间、幅度和频谱精确度遂行对敌的电磁压制任务, 从而减小对友方的电磁干扰。

2) 能够迎合电子装备、特别是机载电子装备的一体化潮流, 能够最大限度地适应灵活更换、综合复用的战术和技术要求。

3) 具备一定的自主作战能力, 能够在极小信息交换的条件下, 不需要操作员实时高频度操作就能自主地遂行预定作战任务, 能够在一定程度上自主地发现、识别数据库外的目标, 以适应无人机挂载的作战环境。

4) 能够支持多平台协同工作, 具备一定的自主信息交互能力。

综上所述, 下一代电子对抗装备至少应当具有以下技术特征:

1) 瞬时工作带宽必须覆盖现有和未来潜在威胁雷达的最大工作带宽, 从现役装备的几百兆赫兹提升到数GHz带宽; 最大工作带宽应能够覆盖所有潜在威胁的工作频段; 应具备副瓣侦察、副瓣干扰能力; 具备有跨代特征的分选技术能力以及与之相适应的参数测量能力和侦察系统架构。

2) 具备精确干扰能力, 即低副瓣窄波束定向干扰能力、更精确的时频追踪和引导能力、干扰功率精确控制能力、大线性动态低杂散精准频谱输出能力。

3) 具备新的硬件体系架构, 能够支持更灵活的模块化配置, 提供前端更灵活的配置更换和后端的综合复用。

要达到上述技术特征,基于微波光子技术的新型电子对抗系统构架可能是一种理想的选择^[5]。以光为载频的射频工作系统有极大的工作带宽,因而非常适合用于宽带系统的接收和发射处理。此外,基于光载波的传输体制有极低的传输损耗,因而非常适合用于时域信号处理,例如波束形成、大带宽大时长延时、宽带储频等。此外基于微波光子体制的宽带数据处理能够得到比较大的线性动态范围,可以以较低的杂散获得较高纯净度的输出频谱,有利于干扰频谱和干扰幅度的精确控制。最后,基于光体制的微波频率源可以在较高的频率上获得极低的相噪,能够用于大调谐带宽低相噪的本振源设计。

基于达曼光栅等集成光学器件的空间光相干光分束合束技术及多路时间延迟控制技术,已经应用于激光阵列波束合成技术当中^[6-10]。而随着微波光子技术的发展,将集成光学的相关技术应用于射频相控阵的波束形成网络中的工作也正在开展^[11-13]。与激光扫描阵列不同的是,射频相控阵所需实现的程差要大得多,各路时延路径中载波光的行程时间远大于其相干时间,要实现载波光量级的相位相干合成的难度是巨大的。常规的设计思路是将光载信号转化到射频域进行相干合成。这导致系统必须采用规模庞大的光子探测器(PD)阵列来实现二维光电转换,极大地增加了系统造价和设计复杂度。

事实上,通过适当的设计,要实现射频信号在光载波上的相干合成,并不需要实现载波光量级的相位相干合成。本文试图针对在基于集成光学的波束形成网络设计中,利用多路波分复用体制,实现光载波上的射频相干波束合成,以规避代价高昂的二维 PD 阵列设计,为系统的方案选择提供支撑和依据。

1 微波光子学波束形成原理

对于有 m 个天线单元输入, n 个波束形成输出的 $m \times n$ 的用于接收的波束形成网络,将其每个天线单元的输出等功率分配为 n 路,经过要求的时间延迟后,再将 m 个天线的第 q 路输出加以合成,从而构成第 q 个波束输出端口。这样共有 n 个波束输出端口,从而同时形成 n 个波束。如图 1 所示。

对于基于空间光传输的时延网络,其每个天线输入的射频信号,以不同波长的光载波进行调制,经过图 2 所示的波束形成网络后,聚焦到 n 个自由空间光探测器(PD),经光检波后合束形成波束输出。其中 PD 在链路中的作用为低通滤波,并定义 ω_{PD} 为 PD 的响应带宽。

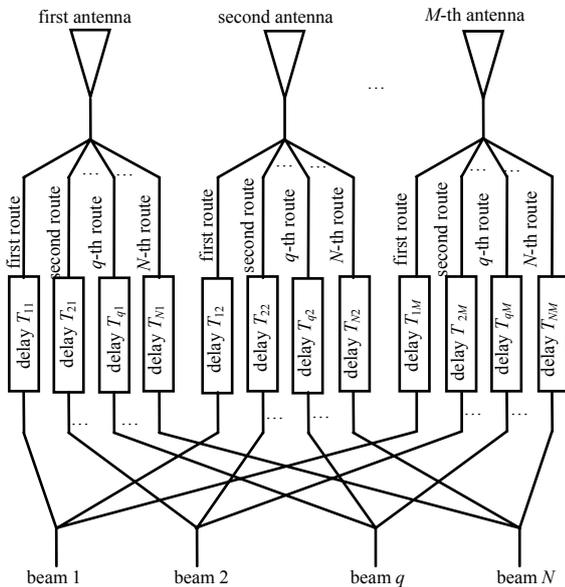


Fig.1 Principle of beam-forming
图 1 波束形成网络的基本原理

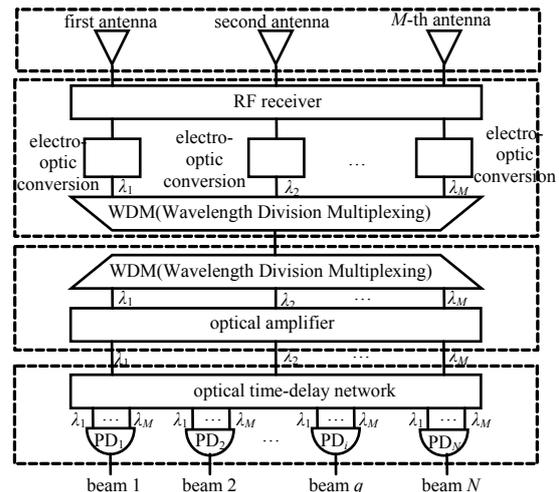


Fig.2 Architecture of beam-forming network based on optical controlling
图 2 基于光控的波束形成网络系统组成

2 基于光载波的射频多波束合束机理研究

首先限定链路模型的调制解调方式为强度调制直接检波(Intensive Modulation-Direct Detection, IMDD)。定义第 p 路光载波信号频率为 ω_{cp} , 射频调制信号频率为 ω_m , 且 $\omega_m < \omega_{PD}/2 \ll \omega_{cp}$; 以四进四出的网络为例; 其信号简图如图 3 所示。

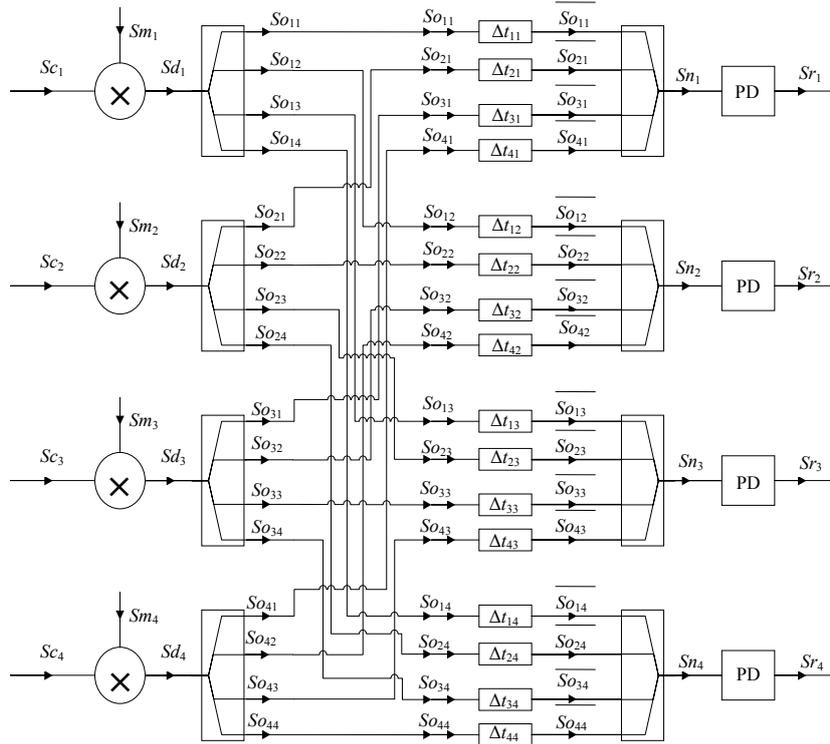


Fig.3 Signal flow model of optic RF beam-forming network based on IMDD
图 3 基于 IMDD 的光载射频波束形成网络信号流图模型

信号输入端第 p 路光载波信号可表示为：

$$S_{cp} = \text{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_{cp} t + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \quad (1)$$

第 p 个天线端口输入的射频调制信号可表示为：

$$S_{mp} = \text{Re} \left(\tilde{A} \exp \left(j \left(\omega_m t + \phi_{mp} \right) \right) \right) \quad (2)$$

式中： \tilde{A} 为射频调制信号的复振幅，它包含射频信号到达天线阵时的初相，及低频信号对射频信号的幅度、频率或相位的调制。如果忽略天线及射频通道间的误差，复振幅对于各路天线接收到的信号而言是一致的； ϕ_{mp} 为天线阵中第 p 个天线所处的空间位置相对于参考坐标系原点的路程差(时延差)引起的相位差。

$$\phi_{mp} = p \times k_m D \sin \theta_m \quad (3)$$

式中： D 为射频天线阵列的单元间距； θ_m 为射频信号来波方向； $k_m = \frac{\omega_m}{c}$ 为射频信号的自由空间波数。为便于分析，这里仅考虑一维线阵的情况。

在式(1)和式(2)中，由于频率不同，时间分辨力也不同，因而二者要求的采样周期量级也是不同的。前者为快时间，以 $\frac{1}{10\omega_c}$ 为采样周期量级。后者为慢时间，以 $\frac{1}{10\omega_m}$ 为采样周期量级。

电光调制通常采用幅度调制或相位调制 2 种方法。本网络中采用幅度调制。因此调制后第 p 路的信号可以表示为：

$$S_{dp} = \left(1 + m \times \text{Re} \left(S_{mp} \right) \right) \text{Re} \left(S_{cp} \right) = \left(1 + m \times \text{Re} \left(\tilde{A} \times \exp \left(j \left(\omega_m t + \phi_{mp} \right) \right) \right) \right) \cdot \text{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_{cp} t + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \quad (4)$$

式中 m 为调制系数。输入信号经过 n 路的分路后，信号形式基本不变。其中第 p 个输入端的第 q 路分路信号可以表示为：

$$S_{dpq} = IL_n \times S_{dp} \quad (5)$$

式中 IL_n 为 n 路分光的分路损耗及器件的插入相移。在忽略各路之间的一致性误差后， IL_n 的影响可以忽略。

定义延迟线网络中从第 p 个输入端到第 q 个输出端之间所要求的相对延迟时间为：

$$\Delta t_{pq} = \frac{\Delta L_e}{v_e} = \sqrt{\varepsilon_{re}} \frac{\Delta L}{c\sqrt{\varepsilon_{re}}} = \frac{pD\sin\theta_q}{c} \quad (6)$$

式中： θ_q 为第 q 个波束输出端口所要求的波束扫描角； ΔL_e 为传输介质中(分光镜、准直透镜、自由空间光路等)光信号传播的路径总长度； v_e 为在传输介质中的平均光速； ε_{re} 为各类传输介质的平均相对介电常数； c 为自由空间中的光速。

忽略式(5)中的分路损耗，经过所要求的时间延迟后，第 p 个天线输出的第 q 个延迟支路上获得的输出信号可以表示为：

$$\begin{aligned} S_{opq} &= \left(1 + m \times \operatorname{Re} \left(\tilde{A} \cdot \exp \left(j \left(\omega_m (t - \Delta t_{pq}) + \phi_{np} \right) \right) \right) \right) \cdot \operatorname{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_p \left((t - \Delta t_{pq}) + \phi(t)_{cpq} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \right) = \\ & \left(1 + m \cdot \operatorname{Re} \left(\tilde{A} \cdot \exp \left(j \left(\omega_m t - p \frac{\omega_m D \sin \theta_q}{c} + \phi_{np} \right) \right) \right) \right) \cdot \operatorname{Re} \left(\exp \left(j \left(\left(\omega_p t - p \frac{\omega_p D \sin \theta_q}{c} + \phi(t)_{cpq} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \right) = \\ & \left(1 + m \cdot \operatorname{Re} \left(\tilde{A} \cdot \exp \left(j \left(\omega_m t - p k_m D (\sin \theta_q - \sin \theta_m) \right) \right) \right) \right) \cdot \operatorname{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_p t - p k_p D \sin \theta_q + \phi(t)_{cpq} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\phi(t)_{cpq}$ 是分路后各路之间的相对相位抖动，它是由于各种随机因素导致的随机过程。正是由于 $\phi(t)_{cpq}$ 的存在才导致各路光载波之间无法相干叠加。 $\phi(t)_{cpq}$ 自相关峰的平均半高宽 T_ϕ 正比于载波光的相干时间 $T_c = \frac{1}{\delta B}$ ，其中 δB

为激光器的线宽所对应的谱宽度，对于锁模光纤激光器而言通常为数十 kHz 到数十 MHz 之间。定义 $T_\phi = \frac{\kappa}{\omega_c}$ ， κ

为远大于 1 的常系数。在 T_ϕ 持续的时间内，近似认为 $\phi(t)_{cpq}$ 为不变量。在超出 T_ϕ 间隔的时间采样量级上，其可以表达为在 $0:360^\circ$ 内均匀分布的时变随机量：

$$\phi(t)_{cpq} = \operatorname{random}(t) \times 2\pi \quad (8)$$

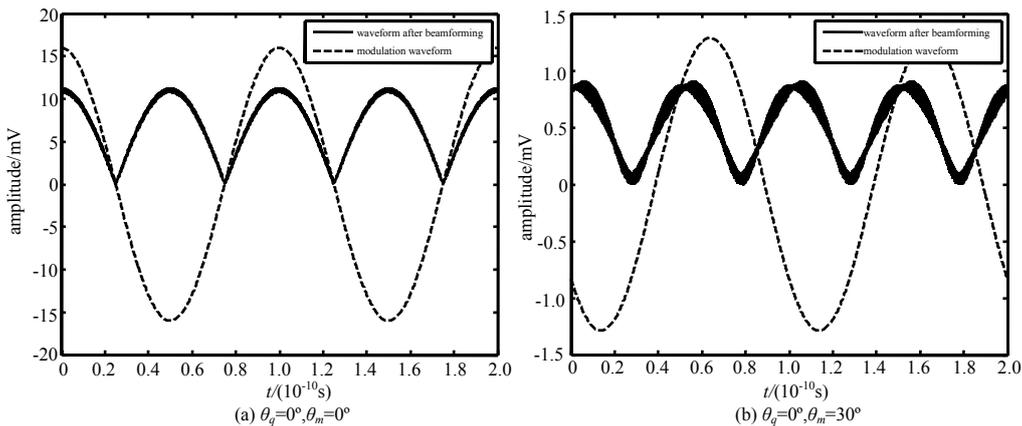
第 q 个波束输出端的 m 个延迟支路经过聚焦后，在 PD 上形成叠加信号 S_{nq} ：

$$\begin{aligned} S_{nq} &= \sum_p \operatorname{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_p t - p k_p D \sin \theta_q + \phi(t)_{cpq} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) + m \cdot |\tilde{A}| \cdot \sum_p \operatorname{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_m t - p k_m D (\sin \theta_q - \sin \theta_m) + \phi_A \right) \right) \right) \cdot \\ & \operatorname{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_p t - p k_p D \sin \theta_q + \phi(t)_{cpq} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

忽略式(9)中第 1 项的基波及第 2 项的调制系数和复振幅引入的幅度和相位，信号部分为：

$$\begin{aligned} S_q &= \sum_p \operatorname{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_m t - p k_m D (\sin \theta_q - \sin \theta_m) \right) \right) \right) \cdot \operatorname{Re} \left(\exp \left(j \left(\omega_p t - p k_p D \sin \theta_q + \phi(t)_{cpq} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) = \\ & \operatorname{Re} \left\{ \exp(j\omega_m t) \cdot \sum_p \left(-\sin \left(\omega_p t - p k_p D \sin \theta_q + \phi(t)_{cpq} \right) \cdot \exp \left(-p \cdot j k_m D (\sin \theta_q - \sin \theta_m) \right) \right) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

至此，表达式很难再进行解析形式的简化。当然也可以通过时频变换来进一步推导，本文选择采用数值仿真的形式来进一步模拟。将上述格式代入到程序中进行仿真，得到合成前后的信号波形，其结果如图 4 所示。



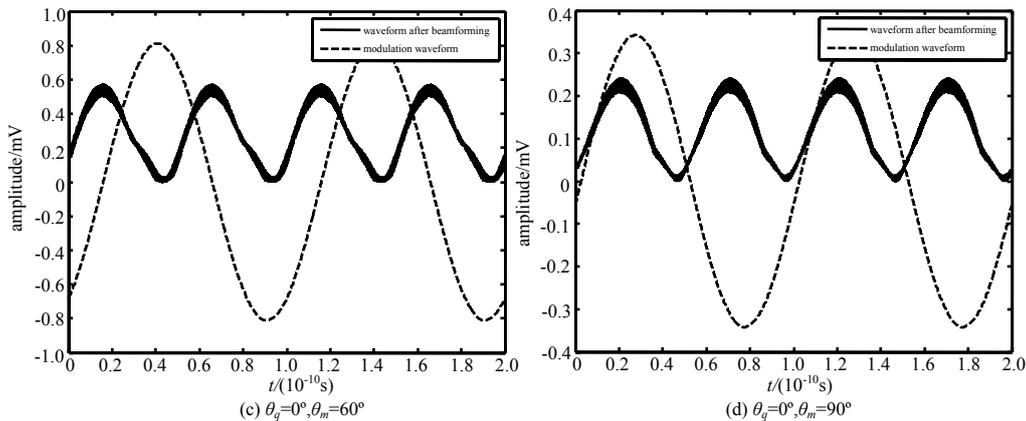


Fig.4 Waveform overlay results in the consequence of different noises and delays
图4 不同噪声及延时条件下的波形叠加计算结果

从结果来看,光载射频信号经直接幅度调制后叠加,再经检波后能够有效形成相位叠加,但可能会引入高次谐波或纹波,并造成波形的畸变。

3 光控多波束网络误差分析

基于光控波束形成网络系统的组成框图大致如图2所示。当形成的波束为等间隔时,时延网络按照与波束形成的关系,其大致可以分成3个部分,分别是光分束之前、光时延网络、合束之后。3个部分中引入的误差对波束形成的影响各不相同。

3.1 光分束前各个通道引入的通道间误差分析

光分束之前的部分,大体包括天线阵、射频前端、电光转换、波分复用与解波分复用、光放大器、光分束器。其引入的误差大致包括四类:一是由于各个通道增益损耗不均衡带来的非频变的恒定幅度误差,二是由于各个通道电长度不一致带来的线性相位误差(或者说是恒定的时间误差),三是有源器件自身带来的时变误差,四是由于通道的幅频、相频特性不平坦带来的频变误差。

理论上讲,前两类误差可以通过对前端的精确校正加以消除,但因为种种实际条件的限制,这类误差很难消除干净,因此通常会存在参与的误差。

第3类误差通常是由于器件性能随时间的变化而带来的。在射频系统中,通常经过一段时间的稳定,这类误差会限制在一个较小的幅度内,但对于光控网络,由于高精度光源通常通过反馈环进行精确的环境温度控制,在某些特殊情况下或剧烈的环境变换条件下,锁相环失锁会导致频率的大幅度漂移,从而带来器件性能的大幅度变化,在这种情况下,误差将是不可控的。此外,机械环境和热环境的变化还有可能引起其他器件不易预测的性能变化,从而引入一些较大范围的误差变化。这类误差理论上通过实时校正可以加以消除,但受限于一些实际条件,实时校正对这类误差的校正能力是受限制的。

第4类误差是由于系统频率响应关系的非线性造成,其可能是传输线在结构上的不连续性导致在特定频点或频率段附近的谐振和纹波造成,也可能是寄生电容或寄生电感造成,也可能是传输结构由于设计局限在频段高端或低端的性能衰落造成,或者是匹配不理想引起。理论上,如果各个通道的幅频响应曲线与相频响应曲线一致,这种幅频频响曲线的不平坦并不会对波束形成造成影响,因而也不会构成误差。但实际上,这种频响曲线的变化通常不会平缓,有时相当急剧。急剧的变化曲线会使微小的频率响应差异带来巨大幅相差异,从而造成不可忽略的通道间误差。对第4类误差,除了划分为细小的频段加以矫正之外,别无善策。

光分束前各个通道之间的误差在分束之前是互相独立、不相关的,但随着分束和之后的合束,各个通道的误差会影响到每个波束输出端口,从而对每个波束造成影响。这一误差不能够在数字接收机上以线性无关的校正方式加以校正。在实际系统中,光分束前典型的通道间误差是由电光转换模块引入的。

理论上讲,光时延网络是个无源线性传输系统,其只会造成由于各个通道电长度不一致带来的线性相位误差。这类误差通过精心矫正可以消除。但实际上,由于加工精确度等问题,这类误差很可能是无法消除的。此外,由于光路的复用问题,不同光路引入的损耗不同,其必然带来幅度衰减的不均衡,这种不均衡会在波束形成中带

来很大影响。最后在合束时，由于空间光探测器对不同光路的响应不同，也会带来极大的幅度不均衡，从而引入较大误差。

而这些误差最终都会影响到后端波束形成的质量。实际上，这些误差可以统一为波束合成前幅度和相位的误差，因此，本文针对幅度和误差对波束形成的影响进行相应的仿真。

3.2 光控波束形成网络幅相误差仿真

当整个系统没有误差时，前端光学多波束时延网络形成的波束以及其 3 dB 宽度如图 5 所示。

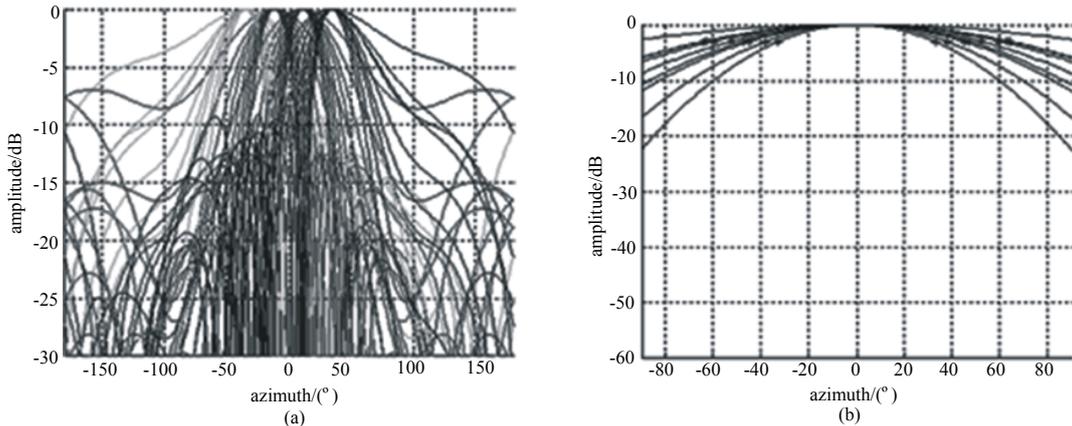


Fig.5 (a) Beam pattern with a frequency interval of 500 MHz in 2-6 GHz; (b) 3 dB beam width

图 5 (a)为 2~6 GHz 以 500 MHz 为间隔 4 个波束的方向图; (b)为 2~6 GHz 波束的 3 dB 波束宽度

可以看出波束的指向基本一致且质量较好，但是在 2 GHz 的波束宽度较宽，以及在 5.5 GHz 和 6 GHz 处存在较大的负瓣。下面将针对天线前端、时延网络分别进行仿真和分析。

1) 天线前端幅度相位误差对波束质量的影响

在仿真中只加入天线前端误差，图 6 分别为天线前端幅度和相位对波束质量的影响，可以看出，随着误差的不断加大，波束的副瓣水平将随之上升，且波束指向也有一定的位移。

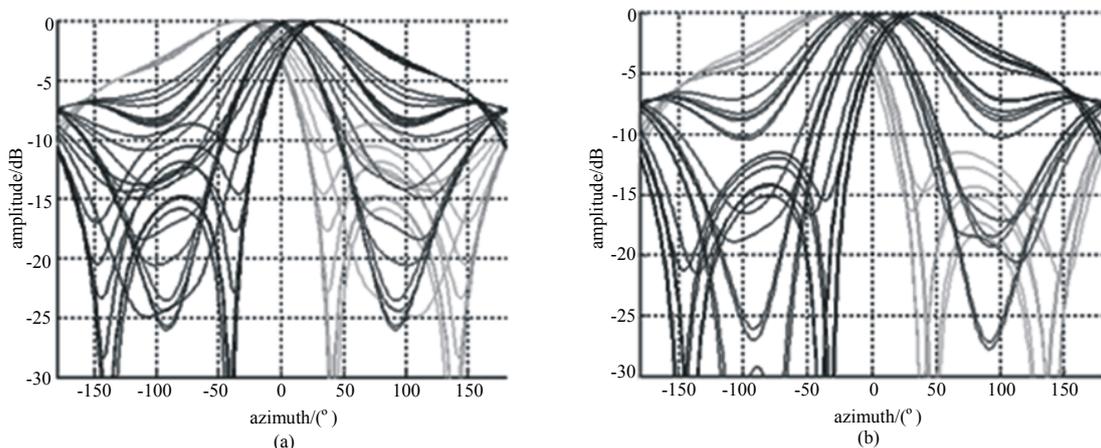


Fig.6 (a) Beam pattern with antenna front amplitude errors changing from ± 1 dB to ± 10 dB in 2 GHz;

(b) beam pattern with antenna front phase errors changing from $\pm 5^\circ$ to $\pm 30^\circ$ in 2 GHz

图 6 (a)为天线前端在 2 GHz 处幅度误差从 ± 1 dB 变化到 ± 10 dB 时以 1 dB 为间隔波束的变化曲线;

(b)为天线前端在 2 GHz 处相位误差从 $\pm 5^\circ$ 变化到 $\pm 30^\circ$ 时以 5° 为间隔波束的变化曲线

2) 时延网络中幅度相位误差对波束质量的影响

当在仿真中只加入波束时延网络中的误差时，图 7 分别为天线前端幅度和相位对波束质量的影响，可以看出时延网络中，幅度不一致性对副瓣的影响更大，而相位的一致性则对波束指向的影响更大。

为了验证仿真结论，将仿真结果与系统实测结果进行对比，如图 7 所示。需要注意的是，由于实测时选取的坐标系与仿真时的坐标系不同，二者的坐标对称反转。对比图 7(a),(b)中各主瓣和主要副瓣的指向和相对关系，可以说明仿真结果与实测结果基本吻合。

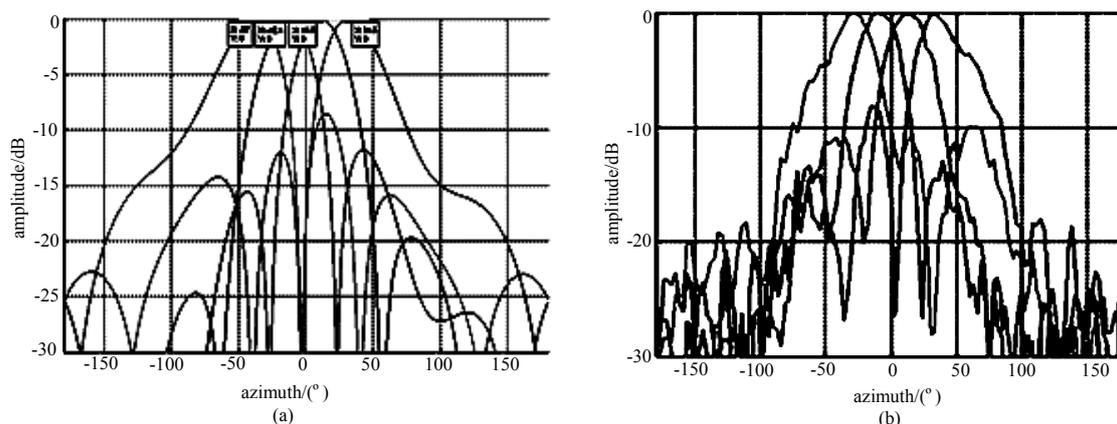


Fig.7 (a) Simulated pattern of the beam-forming network in 4 GHz;
(b) measured pattern of the beam-forming network in 4 GHz

图7 (a) 波束形成网络在4 GHz时的仿真方向图; (b) 波束形成网络在4 GHz时的实测方向图

仿真和实测结果均表明,光控波束形成网络系统中的有源器件引入的误差及光载波滤波后留下的高次谐波或纹波,会在一定程度上降低波形质量,恶化方向图的副瓣水平,但不会影响主波束的波束指向。根据本文仿真结果,设计的四波束光控波束形成网络能够在 $\pm 30^\circ$ 空域内和3:1的频段范围内形成预期的同时多波束方向图。

4 结论

本文主要基于微波光子学原理,提出了一种基于集成光学的波束形成工程实现方法,并对其原理和波束合成等关键技术进行研究与突破,通过数值仿真的方法对影响波束形成的因素进行分析,并与最终的实测结果进行对比。仿真和实测结果均表明,光控波束形成网络系统中的有源器件引入的误差及光载波滤波后留下的高次谐波或纹波,会在一定程度上降低波形质量,恶化方向图的副瓣水平,但不会影响主波束的波束指向。根据本文仿真结果设计的四波束光控波束形成网络能够在 $\pm 30^\circ$ 空域内和3:1的频段范围内形成预期的同时多波束方向图。可以看出,该方法具有工程实现的可能性和价值。

参考文献:

- [1] URI Shatit. 未来的机载电子战——通过作战使用与功能的集成增强能力[J]. 蒋盘林,陈鼎鼎,译. 通信对抗, 2015, 34(3):55-57,63. (URI Shatit. Future airborne EW:enhancing capabilities through operational and functional convergence[J]. Translated by JIANG Panlin,CHEN Dingding. Communication Countermeasures, 2015,34(3):55-57,63.)
- [2] 余强,毕大平,沈爱国,等. ELINT/ESM系统与有源对抗技术的发展现状综述[J]. 航天电子对抗, 2014,30(6):57-61. (YU Qiang,BI Daping,SHEN Aiguo,et al. Review of ELINT/ESM system and active countermeasures' development situation[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2014,30(6):57-61.)
- [3] 周波,戴幻尧,乔会东,等. 从美军ARC项目看雷达电子战发展趋势[J]. 飞航导弹, 2015(2):56-60. (ZHOU Bo,DAI Huanyao,QIAO Huidong,et al. The development tendency of radar electronic warfare viewed from Adaptive Radar Countermeasures(ARC) project of DARPA[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015(2):56-60.)
- [4] 刘强,刘向君,周建平. 外军潜艇电子侦察系统技术现状与发展探析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4): 541-546,551. (LIU Qiang,LIU Xiangjun,ZHOU Jianping. Current status and development trend of electronic reconnaissance system for foreign submarine[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):541-546,551.)
- [5] 王书楠,杨建华,周仁江,等. 微波光子技术在电子战中的可能应用和发展[J]. 电子对抗, 2014(4):18-23. (WANG Shunan,YANG Jianhua,ZHOU Renjiang,et al. The future application and developments of microwave photonics on EW[J]. Electronic Warfare, 2014(4):18-23.)
- [6] LI Bing,YAN Aimin,LIU Liren,et al. Efficient coherent beam combination of two-dimensional phase-locked laser arrays[J]. Journal of Optics, 2011,13(5):055706-1-055710-5.
- [7] LI Bing,YAN Aimin,LYU Xiaoyu,et al. Improvement of combining efficiency of coherent beam combination from phase-locked laser array by Dammann grating[C]// Proc.SPIE. 8130,Laser Beam Shaping XII,81300U. San Diego,CA,USA:SPIE, 2011. DOI:10.1117/12.892652.

- [8] LI B,DAI E,YAN A,et al. Simulations of conjugate Damman grating based 2D coherent solid-state laser array combination[J]. Optics Communications, 2013,290(3):126–131.
- [9] LI B,ZHI Y,SUN J,et al. Design and sub-beam phase measurement of Damman grating with three-phase array output[J]. Optics Letters, 2013,38(15):2663–2665.
- [10] SUN Jianfeng,WANG Lijuan,HOU Peipei,et al. Differential time delay line network for optical controlled beam forming[C]// Proc.SPIE.8843, Laser Beam Shaping XIV,88430M. San Diego,CA,USA:SPIE, 2013,8843(1):88430M–88430M-7. DOI: 10.1117/12.2022990.
- [11] WANG Jian,HOU Peipei,CAI Haiwen,et al. Continuous angle steering of an optically-controlled phased array antenna based on differential true time delay implemented by micro-optical components[J]. Optics Express, 2015,23(7):9432–9439.
- [12] 王建,蔡海文,侯培培,等. 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[J]. 光子学报, 2015,44(11): 132–138. (WANG Jian,CAI Haiwen,HOU Peipei,et al. Optical multi-beam formation technology of broadband phased array antenna based on stack integrated micro-optical components[J]. Acta Photonica Sinica, 2015,44(11):132–138.)
- [13] 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系统[J]. 中国激光, 2017,44(4):1–15. (DING Zhidan,YANG Fei,CAI Haiwen,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):1–15.)

作者简介:



王书楠(1977–), 男, 郑州市人, 高级工程师, 主要研究方向为电子对抗技术及微波射频技术.email:wang.sn@163.com.

余胜武(1988–), 男, 湖南省新化市人, 工程师, 主要研究方向为数字信号处理技术.

杨 飞(1985–), 男, 重庆市人, 副研究员, 主要研究方向为光纤光栅、单频激光器、光纤时频传递等微波光子技术.

王正生(1979–), 男, 河北省青县人, 高级工程师, 主要研究方向为雷达有源干扰技术.

丁志丹(1991–), 男, 江苏省泰兴市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波光子技术.

(上接第 629 页)

作者简介:



杨 勇(1992–), 男, 四川省南充市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信. email:18030859683@163.com.

史晓荻(1993–), 男, 河北省张家口市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信.

夏文龙(1976–), 男, 成都市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为无线通信、软件无线电和智能硬件.

郭庆功(1967–), 男, 新疆维吾尔自治区伊犁自治州人, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为微波技术应用.