

研究论文

宽带相控阵雷达中光控波束形成通道非一致性影响研究

田朝辉, 张业斌*, 戴泽璟, 王润, 王凯

摘要 针对宽带相控阵雷达系统的波束形成需求, 光控波束形成技术通过动态调控光束的相位分布实现无机械扫描, 具有高精度、快速响应和集成化等优势, 在雷达、通信、电子战等多个领域展现出广泛的应用潜力。作为光控相控阵波束形成系统中的重要一环, 光学真延时通道的幅度和延时精度对雷达的波束质量有着直接的影响。光延时线除了引入不同随机的幅度和延时不一致性, 同时会引入系统固有误差。通过分析相控阵的原理, 仿真了幅度 ± 2 dB和延时精度 ± 3 ps误差下对相控阵系统波束形成的影响。结果表明, 在30 dB通道加权下其副瓣抑制降低13 dB, 波束宽度展宽, 波束指向也偏离了设计值。同时分析了基于色散原理的延时线架构中的非线性色散的累积效应造成的波束畸变影响, 并构建了验证系统, 测试结果表明其与仿真结果一致。

关键词 相控阵雷达; 波束形成; 光控真延时; 通道不一致

雷达系统作为战争中获取情报信息的重要装备, 其性能优越与否直接关系到战争的胜负。相控阵技术在军事电子系统中的应用显著提升了其反应速度、目标刷新频率以及多目标跟踪识别能力, 因此, 在现代军事和航天领域得到广泛应用。但近年来传统相控阵雷达的不足随着军事对抗的升级, 以及空间电磁环境的日益复杂化, 逐渐显露出来^[1], 要求有较大瞬时工作宽带的相控阵雷达, 以获得较高的抗干扰性能, 分辨率更强, 辨识能力更强, 多目标跟踪识别能力更强。同时在进行大角度扫描时也会因传统相控阵雷达的渡越时间和孔径效应而限制瞬时带宽^[2]。

微波光子技术是利用光子技术对微波和毫米波信号进行生成、处理和传输的技术, 因其具有大带宽、低损耗、抗干扰、高密度等优势, 在理论研究、器

件研发、关键技术突破和系统应用等方面取得显著进展, 在第5/6代移动通信技术(5G/6G)通信、雷达探测、卫星通信等领域发挥了重要作用, 数十年来, 其相关成果已成功实现应用。光控相控阵雷达通过光学真延时技术^[3], 克服了波束偏斜问题, 可在宽扫描角下支持超过60 GHz的大带宽, 显著提升雷达分辨率与多目标成像能力^[4-5]。光延时线是实现光控波束形成的关键器件, 按其原理和结构特性分类如下。

1) 通过光开关切换不同光程的延时线。延时线可以使不同长度的光纤或者不同长度的波导等, 通过多位光开关切换实现延时的选择, 具有结构简单、延时量可调节的特点。例如, 可使用磁光开关选择不同长度的光纤实现大延时量延时线, 亦可选用不同长度的硅条实现高精度的延时选择。此类延时线受限于开关消光比, 更多开关级联带来的串扰会降低光波束形成的质量^[6]。

中国电子科技集团公司第三十八研究所, 合肥 230088

收稿日期: 2025-06-13; 修回日期: 2025-10-04

基金项目: 国家自然科学基金重大科学仪器专项(62127805)

作者简介: 田朝辉, 工程师, 研究方向为微波光子学, 电子信箱: tanzhaohui@163.com; 张业斌(通信作者), 正高级工程师, 研究方向为微波光子学, 电子信箱: wzhangyebin@163.com

引用格式: 田朝辉, 张业斌, 戴泽璟, 等. 宽带相控阵雷达中光控波束形成通道非一致性影响研究[J]. 科技导报, 2026, 44(6): 94-99;
doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.06.00059

2) 基于色散原理的延时线。如色散光纤、光纤光栅或色散波导,通过调节激光器波长改变光信号群速度,实现延时调节。这种延时线的原理是利用材料的光电效应、热光效应或者载流子色散效应等原理,可以实现材料色散或者波导色散,同时此类延时线也伴有缺点,较大的色散往往伴随着信号的畸变,使其工作带宽受到限制,很难应用于高速系统,并且该方法所实现的延时量较小,无法适用于大阵面系统。此外受限于激光器波长稳定性,导致延时量的波动,进而影响系统指标^[7]。

3) 基于光电效应的延时线。此类延时线通过改变介质的有效折射率进而调节延时。如利用光子晶体波导的慢光效应,通过调节波导结构参数或温度特性实现高精度延时调谐,具有集成度高、瞬时带宽大的优势。该方法的局限性比较大,因为介质的有效折射率与器件材料折射率以及波导结构有关,延时调节范围同样很小,由于其介质本身的光学吸收损耗,导致应用具有一定的局限性^[8]。

光相控阵雷达中基于光真延时技术,极大地拓宽了相控阵雷达的工作带宽。然而,工程化的光学相控阵系统中,不可避免地会存在幅度相位误差。系统各通道间的幅度和相位的不一致性来源于各通道间的响应度差别、各通道插损不一致,波分复用系统中通道间插损的不一致性,以及复用放大时光放大器的增益不平坦等。此外,环境因素(如温度、振动的变化)的波动会影响材料的折射率,导致光信号在传输过程中的相位发生改变。系统中幅度相位与理论不一致性的存在,会严重损害光学相控阵的性能,使波束指向偏离预期方向,降低波束的扫描精度,导致系统对目标的定位出现偏差;同时,还会造成主瓣增益下降,使信号的强度减弱,影响雷达系统的探测距离;旁瓣电平升高,增加了杂波干扰,降低了系统的信噪比和抗干扰能力,对系统的性能和可靠性产生负面影响。本文针对光控相控阵多波束形成系统中各通道幅度相位不一致性带来的影响开展了理论分析和实验验证。

1 光控相控阵多波束形成系统的基本原理

光学相控阵多波束形成系统主要由多波长激光

器阵列产生多路不同波长的光载波信号,经光纤送至电光调制器。电光调制器对各天线单元接收的射频信号进行电光转换,实现射频信号对光载波的幅度调制。多路不同波长的光信号经过波分复用为1路,通过1路光纤传输,经光放大器后送至光分束器,将波分复用后的光信号共分为 n 路,传输至光延时网络按照波束指向进行光学真延时处理。每路光信号中不同波长的光在光延时网络中能被独立控制不同的延时量,基于这个原理也就实现了阵列系统不同单元的真延时处理,每路光信号中不同波长的光经光探测器一同转化为电信号,因此,同一阵面上可以同步产生多个互不干扰的波束,每个波束拥有独立的指向,实现了同时 n 个波束的形成(图1)。

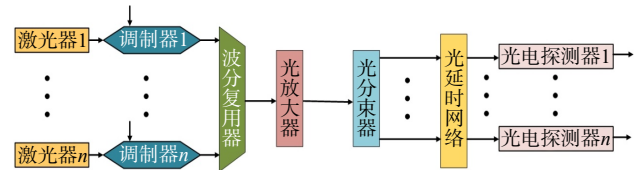


图1 光控相控阵多波束形成系统原理

通过改变波束中各通道间的相位差 ϕ_n ,可以实现波束指向的控制。当需要将波束指向某个特定角度 θ 时,根据光程差与相位差的关系,计算出每个通道所需的相位变化量,通过控制光延时网络实现相应的相位调整。例如,对于均匀线性阵列,相邻辐射单元之间的相位差 $\nabla\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta$,其中 d 是相邻辐射单元的间距, λ 是光载射频信号的波长。通过精确设置每个辐射单元的相位差,使得在角度 θ 方向上形成该方向的波束。

如图2所示,假设均匀线阵包含 N 单元,单元间距为 d ,波长为 λ 。在理想情况下,远场辐射方向图可表示为

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n e^{j\left(\phi_n + \frac{2\pi nd}{\lambda} \sin\theta\right)} \quad (1)$$

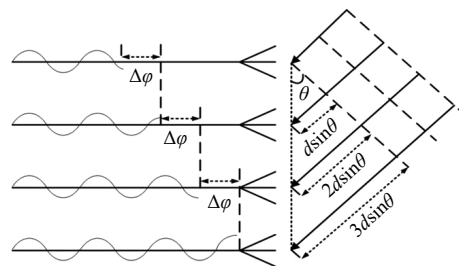


图2 波束指向与相位差之间的关系示意

式中, a_n 和 φ_n 分别表示第 n 个单元的幅度和相位调节量, θ 为接收波束角度。

光延时网络在波束成形中具有重要的作用, 不仅能够控制波束的指向, 还能通过调整幅度和相位来改变波束的形状。具体可以通过以下方法来实现。(1) 主瓣宽度和旁瓣电平控制。通过调整不同辐射单元的幅值和相位分布, 波束的主瓣宽度可以改变, 主瓣宽度减小可以增加方向性, 而主瓣变宽可以通过调整幅值分布来减小旁瓣的电平。使用切比雪夫加权函数对幅度进行加权, 可以有效地减少旁瓣电平, 从而提高波束的方向性。(2) 调整相位实现波束聚焦或扩宽。改变相位分布可以直接影响波束的形状。通过优化相位分布, 可以使波束更集中, 从而提高能量集中程度; 或者适应不同应用场景的需要, 通过调整相位分布展宽波束, 这种方法对于需要对波束形状进行灵活调整的场合尤为适用。(3) 对称调整。不对称地波束形状可以通过不对称的调整相位和幅度来实现, 这在一些特殊的应用中尤为有用, 例如, 通信系统或者雷达系统需要特定的覆盖范围。可见, 通过联合控制幅度和相位, 光延迟网络可以实现精确调整波束形状, 在不同场景下满足需求。

按照实验实际数据进行仿真, 具体包括: 频率 10~18 GHz, 通道数 16, 波束数量 16, 扫描角范围 $\pm 45^\circ$, 相邻辐射单元的间距 $d=9$ mm, 无幅度相位误差, 幅度 30 dB 泰勒加权。图 3 是不同频率光控相控阵波束指向方向。

由图 3 可知, 波束指向角与频率无关, 表明不存在波束偏斜现象, 这证明基于光控扫描的阵列天线可应用于宽带场景。无幅度相位误差情况下, 副瓣抑制达到 30 dB。

2 光控相控阵多波束形成系统幅度和相位误差分析及仿真

实际光控相控阵多波束形成系统中, 各通道间的幅度和相位往往与理论设计存在偏差, 这些误差主要源于 2 个方面: 首先, 由器件制造指标带来的不一致性, 此类误差呈现显著的随机特性, 在实际生产中难以完全规避; 其次, 来自系统的固有误差。该误差主要包括以下 3 点: 其一, 在基于光开关级联的可调延

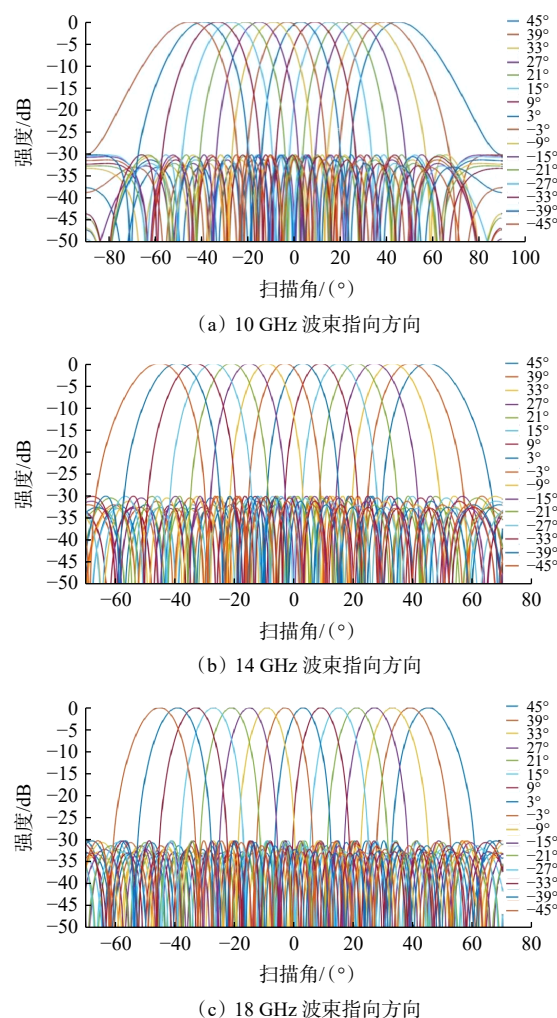


图 3 不同频率光控相控阵波束指向方向

时网络中, 光开关并非处于理想的“0”和“1”状态, 随着延时量的增加和精度要求的提升, 串扰效应将显著增加, 导致阵列方向性严重劣化^[9]; 其二, 波分系统中光放大器对不同波长的非平坦增益特性, 会引发幅度失配; 其三, 基于色散原理的延时线结构中, 非线性色散的累积效应将造成波束畸变。这些固有误差难以完全消除, 需要通过方案优化来最小化其对系统性能的影响。

2.1 器件随机误差分析仿真

考虑到实际系统中幅度误差和相位误差同时存在, 使其对波束形成的质量产生更为复杂的影响。为了深入分析这些误差带来的影响, 设第 n 通道的幅度变为 $A_0 + \nabla A_n$, 其中 A_0 是各通道的初始幅值, ∇A 为幅度误差值, 相位变为 $\varphi_n + \nabla \varphi_n$, 其中 $\nabla \varphi_n$ 为相位误差值, 也是一个随机变量。此时, 远场某点处的合成电场强度 $E(\theta)$ 为

$$E(\theta)' = \sum_{n=1}^N (A_0 + \nabla A_n) e^{i(\varphi_n + \nabla \varphi_n)} \quad (2)$$

根据实际情况,不同通道的光器件累计插损不一致性为 ± 1 dB,经光电转换后,射频幅度不一致性为 ± 2 dB。同时,各通道相位误差假设为 ± 3 ps,仿真 $d=9$ mm、18 GHz 频率、 9° 指向的波束如图4所示。该误差下16波束方向图如图5所示。

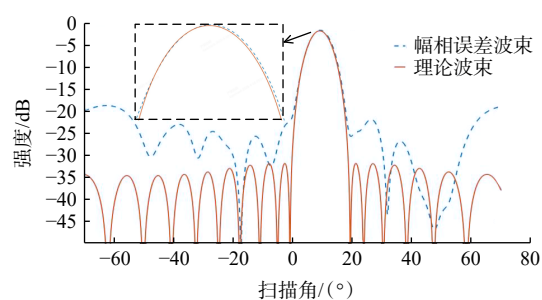


图4 18 GHz 频率随机误差下 9° 指向方向

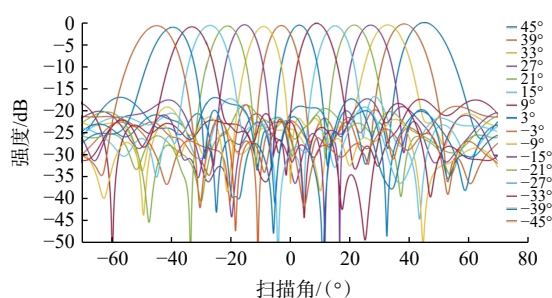


图5 18 GHz 频率随机误差下16波束指向方向

仿真结果可以看出,对于旁瓣电平,幅度误差和相位误差的同时影响会导致其增大12.7 dB。这是因为幅度误差在旁瓣区域引入额外的电场分量,相位误差破坏旁瓣区域的干涉相消条件,两者共同作用,使得旁瓣电平升高的幅度更为明显。在雷达系统中,旁瓣电平的大幅升高会导致杂波干扰增强,降低雷达对目标的检测能力,容易产生误判和漏判。

在仿真过程中,综合分析发现,相位误差是导致波束指向偏差的主要因素,但幅度误差也会通过与相位误差的相互作用对波束指向产生一定的间接影响。当相位误差使得波束指向发生偏差时,幅度误差会进一步改变各辐射单元在新指向方向上的合成电场强度的相对大小,从而对波束指向的准确性产生微调。在一个光学相控阵系统中,若随机相位误差导致波束指向偏离目标方向一定角度,此时随机幅度误差

会使得部分辐射单元在偏离后方向上的电场强度增强或减弱,进而影响波束的最终指向,使得波束指向与理想指向的偏差进一步增大或减小,具体取决于幅度误差和相位误差的大小分布情况。

2.2 系统误差分析仿真

本研究只分析基于色散原理的延时线架构中的系统误差,非线性色散的累积效应将造成波束畸变。这些固有误差难以完全消除,需要通过方案优化来最小化其对系统性能的影响。

色散延时架构中通过利用高色散介质(如色散光纤、光子晶体波导等)对不同波长光的群速度差异,在通道间引入需求的相对延时差,从而将波束控制在所要的指向。假设第 i 阵元的延时量为

$$\Delta t_i = D(\lambda_i) \cdot L \cdot \Delta \lambda_i \quad (3)$$

式中, $D(\lambda_i)$ 为波长相关的色散系数, L 为介质长度, $\Delta \lambda_i$ 为波长偏移量^[10]。理想情况下,若色散系数 $D(\lambda)$ 为常数 D_0 (线性色散),则延时量与波长变化呈线性关系,波束指向 θ 可通过线性相位分布计算

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c \cdot D_0 \cdot L \cdot \Delta \lambda}{d}\right) \quad (4)$$

式中, D_0 为基准波长 λ_0 处的色散系数, d 为阵元间距, c 为光速^[9]。

然而,实际色散介质中, $D(\lambda)$ 通常与波长有关。以相对色散斜率(S)表征色散系数的非线性

$$D(\lambda) = D_0(1 + S \cdot (\lambda - \lambda_0)) \quad (5)$$

式中, $S = \frac{1}{D_0} \frac{\partial D}{\partial \lambda}$,描述色散系数随波长的变化率^[11]。非线性项 $S \cdot \Delta \lambda$ 的积累会导致延时量与波长的非线性偏差,进而引起波束指向误差和方向图畸变。

此时,波束指向公式修正为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c \cdot D_0(1 + S \cdot \Delta \lambda) \cdot L \cdot \Delta \lambda}{d}\right) \quad (6)$$

该公式表明,非线性误差累积会导致:(1)波束指向偏移。实际指向角偏离理论线性预测值;(2)波束展宽与旁瓣抬升。方向图主瓣宽度增加,旁瓣电平升高,降低分辨率和抗干扰能力^[12]。

根据实际情况,不同通道的光器件累计插损不一致性为 ± 1 dB,经光电转换后,射频幅度不一致性为 ± 2 dB。同时,按照上述色散原理,仿真 $d=9$ mm、18 GHz 频率、16波束方向,其中调制器输出端按照 45° 指向的延时配相至理论值一致,其余各通道按照色散介质

的色散系数选取不同长度色散介质长度,结果如图6所示。

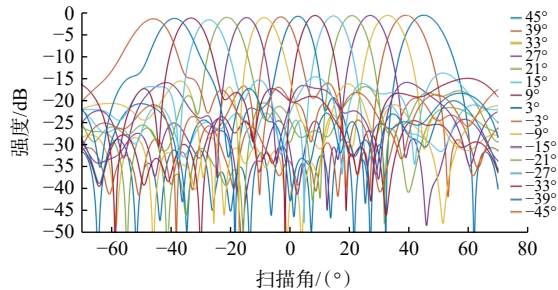


图6 18GHz 频率系统误差下 16 波束指向方向

仿真结果可以看出 45°波位的波束质量较好,随之非线性项 $S \cdot \Delta\lambda$ 的积累会导致延时量与波长的非线性偏差越来越大,故 45°到-45°波位的波束质量越来越差,旁瓣电平增大 15 dB 以上。

在主瓣增益方面,幅度误差和相位误差都会导致主瓣增益下降,且两者的综合作用会使主瓣增益下降得更为明显。幅度误差通过改变各辐射单元的幅度,使得合成电场强度的幅值减小,从而降低主瓣增益;相位误差破坏了各辐射单元间的相位一致性,导致干涉效果变差,同样降低主瓣增益。

波束宽度也会受到幅度和相位误差的综合影响。虽然波束宽度主要由阵列的物理尺寸和波长决定,但幅度和相位误差会改变主瓣的能量分布,使得主瓣能量相对分散,从而导致波束宽度略有增加。当幅度和相位误差较大时,主瓣能量分散加剧,波束宽度的增加更为明显,降低了波束的指向精度和分辨率。在雷达的目标检测中,波束宽度的增加可能导致对目标的定位精度下降,无法准确识别目标的形状和位置。

3 多波束光控相控阵形成系统实验研究

本实验参数具体包括:采用 16 频率 200 GHz 间隔激光器,即通道数 16,波束数量 16,扫描角范围 $\pm 45^\circ$,基于色散原理的延时线架构的光控相控阵多波束形成系统,原理如图1所示。通过仪器分别测试记录每个波束中每个通道的幅度和相位值,计算此波束的指向方向,同理共得出 16 个波束的方向。图7是实验测得的波束指向方向。

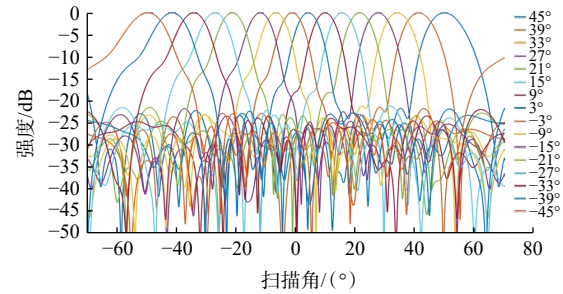


图7 实验测得的波束指向方向

实验结果可以看出,随着扫描角度的变化,波束畸变越来越明显,具体包括波束展宽、副瓣电平升高、指向角度偏移设计值,在-45°时畸变最严重,符合 2.2 节的仿真分析。此系统在实际应用中会极大地影响雷达的功能。

根据 2.2 节提到的理论分析,对色散延时网络进行了补偿校正。校正后的实验结果如图8所示。根据结果可以得出,通过对每个通道的非线性延时校正后,波束不再有畸变产生。由于实验中无法对每个波束每个通道的幅度进行校正,校正后的实验结果波束副瓣抑制无法达到理论值,但每个波束的副瓣抑制得到较好提高。

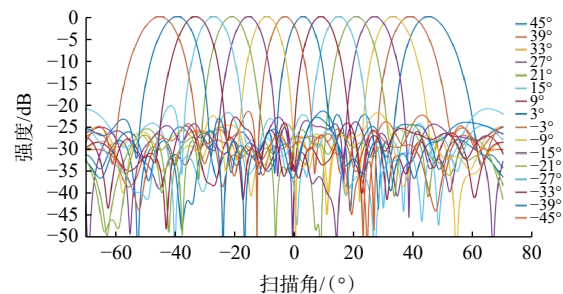


图8 色散延时网络进行补偿校正后实验测得的波束指向方向

4 结论

通过理论推导、实验验证及案例分析,探讨了幅度延时误差对光控相控阵多波束形成系统的影响。通过计算仿真剖析了随机幅度相位误差和系统幅度相位误差综合作用对波束形成性能指标的影响机制。理论推导表明,它们共同作用,以主瓣增益下降、旁瓣电平升高、波束指向偏差为特征,对波束形成性能产生严重影响。实验建立了光控相控阵多波束形成系统,验证了系统误差对波束形成的影响,并通过

理论指导实现对系统的改进。这些实验结果为理论分析提供了有力支持,同时也为实际光学相控阵系统的性能优化提供了重要的参考依据。

参考文献(References)

- [1] He J W, Dong T, Xu Y. Review of photonic integrated optical phased arrays for space optical communication[J]. IEEE Access, 2020, 8: 188284–188298.
- [2] Heck M J R. Highly integrated optical phased arrays: Photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering[J]. Nanophotonics, 2017, 6(1): 93–107.
- [3] Zhao S, Chen J Y, Shi Y C. All-solid-state beam steering via integrated optical phased array technology[J]. Micromachines, 2022, 13(6): 894.
- [4] Zhang W, Meiguni J, Sun Y, et al. Electromagnetic transmit array with optical control for beamforming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(6): 5481–5486.
- [5] 潘时龙, 张亚梅. 微波光子雷达及关键技术[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 36–52.
- [6] Kato T, Minoshima K. Optical phased array using phase-controlled optical frequency comb[J]. Optics, 2024, 5(3): 51–53.
- [7] 胡哲峰. 基于波长转换和色散的全光可调延时线及其应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [8] 潘玲. 基于光子晶体波导的低损耗慢光研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [9] Zheng P F, Xu X M, Lin D D, et al. A wideband 1×4 optical beam-forming chip based on switchable optical delay lines for Ka-band phased array[J]. Optics Communications, 2021, 488(6): 12864–12864.
- [10] Schaffer C. Influence of crosstalk in switchable optical time-delay networks for microwave array antennas[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(8): 1519–1521.
- [11] 刘昂, 邵光灏, 翟计全, 等. 基于亚波长步进光延时线的雷达宽带波束形成技术[J]. 光子学报, 2022, 51(3): 0306001.
- [12] Van Acoleyen K, Rogier H, Baets R. Two-dimensional optical phased array antenna on silicon-on-Insulator[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13655.

Research on the impact of optical-controlled beamforming channel inconsistencies in broadband phased-array radar

TIAN Chaohui, ZHANG Yebin*, DAI Zejing, WANG Run, WANG Kai

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

Abstract To meet the needs of beamforming in broadband phased-array radar systems, optical beamforming technology achieves mechanical-scan-free operation by dynamically controlling the phase distribution of optical beams. It offers many advantages such as high precision, rapid response, and integration, demonstrating broad application potential across radar, communications, electronic warfare, and other fields. As a critical component in optical phased-array beamforming systems, the amplitude and time-delay accuracy of optical true-time-delay channels directly impact radar beam quality. Optical delay lines not only introduce different random amplitude and time delay inconsistencies, but also introduce inherent errors of the system. By analyzing the principles of phased arrays, the effect of ± 2 dB amplitude and ± 3 ps delay errors on beamforming was simulated. The result shows that the sidelobe suppression degrades by 13 dB under 30 dB channel weighting, beamwidth broadens, and the beam pointing deviates from the design value. Additionally, the beam distortion caused by accumulated nonlinear dispersion effect in dispersion-based delay line architectures is analyzed. The test system is constructed, and the tested results are consistent with the simulated results.

Keywords phased-array radar; beamforming; optical-controlled true-time-delay; channel inconsistency ●



(责任编辑 王微)