光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022051802

基于微波光子收发共用真时延网络的相控阵波束合成

张业斌*，王　凯，田朝晖

（中国电子科技集团公司第三十八研究所，合肥 230088）

摘　要： 针对相控阵雷达宽带宽角波束扫描普遍存在的孔径渡越和波束倾斜的问题，提出了一种基于微波光子技术的相控阵波束形成网络系统，该系统采用收发共用的延时方式，在保证收发波束指向高度一致的同时也减少了系统的设备量。建立了16通道的收发共用的波束扫描系统进行实验验证，实现了X频段范围内的±30°的收发波束扫描，不存在波束倾斜现象，接收和发射波束指向高度一致，结合雷达系统分时收发工作的特点，可有效提升相控阵雷达系统的扫描探测能力。

关键词： 微波光子；相控阵；波束形成；真时延

中图分类号： TN958　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0609－04

Phased Array Beam-Forming Based on T-R Community Microwave Photonic True Time Delay Network

ZHANG Yebin, WANG Kai, TIAN Chaohui

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

Abstract: Due to the restriction of aperture effect and the beam deviation, it is the common problem for phased array radar to get wide instantaneous bandwidth under wide scan scope. In this paper, a phased array beam forming system based on the microwave photonic technology was proposed, which can keep high consistency between the beam-pointing of receiving and transmitting modes and reduce the number of devices. The 16 channels T-R community beam scanning system was built and tested. The experimental results show the system can realize beaming scanning under the wide scope of ±30° without beam deviation at X-band, and the beam-pointing of receiving and transmitting is highly consistent. Combined with the time-sharing receiving and transmitting characteristic of the radar system, the scanning and detection capability of the phased array radar system can be effectively improved.

Key words: microwave photons; phased array; beam forming; true time delay

0　引言

在传统相控阵系统中[1]，天线波束扫描是通过调整辐射单元之间的相位关系来实现的，然而用微波元器件实现相控阵天线单元的全电子控制系统还存在着许多问题[2-4]。首先，用微波技术实现的移相器本身复杂性很高，且微波移相器自身的损耗（尤其在毫米波段）和重量也是制约相控阵雷达性能的重要因素。其次，相控阵是通过控制信号的相位来延迟信号，这导致不同频率的信号即使有相同的相位延迟却有不同的时间延时，从而传统相控阵天线在宽带信号的情况下存在波束指向偏斜的问题，从而导致传统相控阵雷达技术无法获得大瞬时信号带宽，直接影响雷达对目标的分辨、识别和成像能力的提升。

近年来，微波光子技术[5-11]被广泛应用于雷达、通信及电子战系统中，通过在光域进行实时延迟的方法补偿孔径渡越时间，可实现相控阵雷达的宽带

收稿日期：2022－05－18.

基金项目：安徽省自然科学基金项目(2008085QF315).

* 通信作者：张业斌　E-mail：wzhangyebin@163.com

宽角扫描;同时,光学真延时传输具有损耗低、频带宽、抗电磁干扰等固有优势,因此,可满足现代战争对雷达全方位、高性能的发展要求,成为相控阵雷达发展的一个重要方向。

目前微波光子波束合成技术[12-15]主要有基于色散延时和基于长度延时两种体制。基于色散延时体制微波光子波束合成一般采用光纤作为延时单元,利用色散效应对不同波长激光信号延时的不同来实现天线单元对应通道信号延时。基于色散光纤技术实现延时处理的系统设备量需求小,不同指向的波束通过不同长度的色散光纤即可实现,相对系统控制简单。

1 波束形成网络设计

本文提出一种基于微波光子真时延网络的相控阵波束合成方法,通过收发共用一套延时网络,采用色散延时体制,结构紧凑,减少了设备量,可有效提升相控阵系统的精确扫描能力以及环境适应能力。

图 1 所示为用于相控阵雷达系统的收发共用微波光子波束形成系统的原理结构图。当相控阵系统工作在接收模式时,从天线阵面接收到的阵列信号经过收发开关切换下行到相应的光接收调制模块,分别进行光调制,不同通道调制的光载波的波长不同,以便于后续进行多通道合束。每个通道经过调制后的光信号经过对应的光环形器后,继续下行经过光延时模块,光延时模块采用开关级联的光纤长度控制,根据波束的指向对光纤延时模块进行控制,使得合束后的光信号经过不同长度的色散光纤真时延,之后经过环形器后,再进行光电转换成射频信号,即为接收波束合成后的射频信号。

当相控阵系统工作在发射模式时,射频信号源输出的射频信号通过光发射调制器调制在光载波上,发射信号的光载波为多个波长通过波分复用器合路在一起的光信号,调制后的光信号再经过光环形器上行输入光延时模块中,经过对应长度的光纤延时后,再经过波分复用器,然后各通道的光信号再通过光环形器上行输出到对应的光探测器中,实现调制光信号转换成射频信号输出。该射频信号在分别通过天线收发前端中的收发切换开关后激励相应的天线阵列单元进行电磁场辐射,从而在空间形成发射波束。

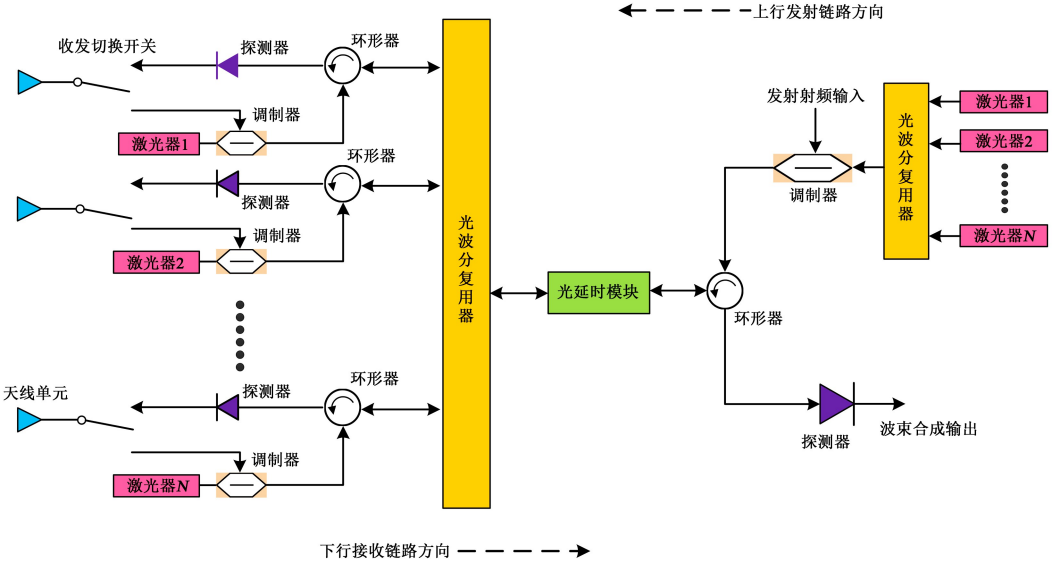


图 1 相控阵雷达系统的收发共用微波光子波束形成系统的原理结构图

其中基于开关级联的光纤延时网络,通过级联光开关的开关切换状态来选择切换光信号的行进路径,使其根据波束指向进行相应的光纤延时,设形成波束的指向角为 θ,则对应相邻通道之间的延时为

$$\Delta\tau = \frac{d\sin\theta}{c} \tag{1}$$

其中,d 为相控阵天线阵面相邻天线单元的间距,c 为光在真空中传播的速度。

则第 N 个通道相对第一个通道的延时量为

$$\Delta\tau_N = (N-1)\frac{d\sin\theta}{c} \tag{2}$$

同时相控阵系统需要在一定的空域范围内进行

扫描，将整个扫描范围划分成 M 个波位，再根据波束指向的需要进行切换。因此至少需要 M 个延时状态可供切换，对应第 N 个通道的延时切换步进至少为

$$\Delta\tau_N = 2(N-1)\frac{d\sin\theta_{\max}}{Mc} \tag{3}$$

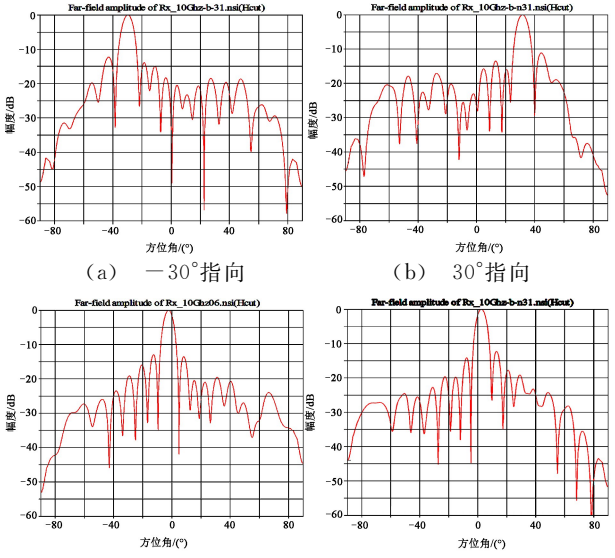
其中，$\theta_{\max}$ 为扫描的最大角度。

因此需要根据相控阵系统的总体波位 M 来设计延时模块的级联光开关的个数，以及每级级联光纤的长度，从而保证整个相控阵系统能够根据实际应用需要实现在整个空域范围内的快速切换扫描。

2　波束形成系统验证和结果分析

我们建立了一个 16 通道的 X 波段的收发共用的微波光子真时延网络的相控阵波束合成系统进行测试验证。下行链路中，16 路射频信号经过光开关后通过马赫曾德尔调制器分别对光载波信号进行调制，16 路的马赫曾德尔调制器通过控制偏置电压使其均工作在线性工作点。16 个通道中的激光器的输出光在波的波长互异，在实验上从第 1 个通道至第 16 个通道的激光波长按照序列依次递增 1.6 nm。系统中延时网络采用的是 4 bit，一共 16 个波位，通过式(3)根据相控阵系统的空域扫描范围和波位设计可计算出相应每段色散延迟光纤的长度，要实现最大扫描角度为±60°范围的波束扫描，需要延时通道的最大延时量为 952.6 ps，波分复用器为 16 路输入合一输出，16 路输入的通带分别与 16 路光载波信号的中心波长相对应，光电探测器的 3 dB 工作带宽大于 20 GHz。在上行链路中，射频信号源产生的射频信号同样经过马赫曾德尔调制器进行外调制，并同样工作在线性工作点。调制后的上行光信号经过共用的延时网络延时后通过光电探测器分别转换成射频信号。在实验中，在控制 16 路通道之间的延时的同时，还需要控制 16 路通道中的光插损，来保证通道之间的幅度一致性，从而在形成接收或者发射波束时，才能达到较好的波束主副瓣的抑制比，保证更多的能量落在主瓣内，以提升相控阵系统的探测威力，同时可以减少副瓣接收杂散信号的干扰，避免雷达系统的虚警。

图 2 所示为通过对延时网络的光延时的切换，实现的 16 通道形成的归一化的±30°、±2°波束指向下的方向图。在实验中对通道间的幅度和延时均进行了调节控制，形成波束的主副瓣抑制比在法向时约为 13 dB。相对在波束指向角度位 30°偏离法向时，其主副瓣抑制比相对有所下降，并且主瓣的波束宽度相对法向的波束宽度也发生相应的展宽，这主要是多通道信号相干叠加曲线所致。

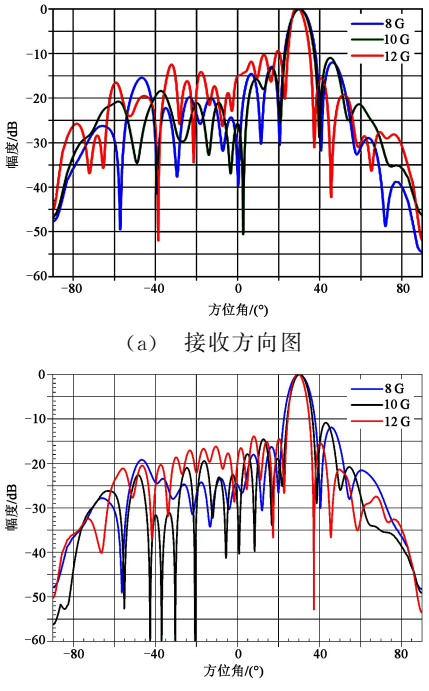


(a)　−30°指向　(b)　30°指向

(c)　−2°指向　(d)　2°指向

图 2　工作频点 10 GHz 下系统不同波束指向下的方向图

图 3 所示为在 X 波段不同的射频频点工作下，同样的延时控制下的波束指向对比图，从图中可以看出，由于系统采用的是光纤真时延，当波束指向−31°时在宽带不同频点下的波束指向一致，说明系统具备在宽的瞬时带宽下工作的能力，不会发生因



(a)　接收方向图

(b)　发射方向图

图 3　8～12 G 宽带内波束指向同为−31°时的方向图

波束指向随着工作频率的变化而导致偏移波束倾斜的现象。

3 结束语

本文介绍了一种基于微波光子真时延网络的相控阵波束合成方法，建立了16通道的收发共用的波束扫描系统进行实验验证，实验结果表明该系统可实现X波段范围内－30°～＋30°空域范围内的无波束倾斜扫描。随着光控波束形成技术在电子装备中应用推广的加快，高稳定性、高精度和小型化目前仍然是其真正走向实用化需要突破的瓶颈。本文提出的采用收发共用色散延时网络的光控形成方法，使系统结构更加紧凑，十分适合宽带以及超宽带的相控阵系统的波束形成和扫描，有望解决相控阵系统宽带宽角扫描和工程化的难题。

参考文献：

[1] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京：国防工业出版社，2006.
Zhang G Y. Phased Array Radar System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

[2] Brookner E. Practical Phased-Array Antenna Systems[M]. Norwood. MA: Artech House, 1991.

[3] 孙红兵，李树良，王 琦，等. 相控阵雷达天线延时技术的发展[J]. 微波学报，2021，37(5)：9-15.
Sun H B, Li S L, Wang Q, et al. True time delay technique application in phased array antenna[J]. J. of Microwaves, 2021, 37(5): 9-15.

[4] Ng W, Walston A, Tangonan G, et al, The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay[J]. J. of Lightwave Technol., 1991, 9(9): 1124-1131.

[5] Yao J. Microwave photonics[J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27(3): 314-335.

[6] Ghelfi P, Laghhezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. Nature, 2014, 507(7492): 341-345.

[7] Ghelfi P, Laghhezza F, Scotti F, et al. Photonics for radar operating on multiple coherent bands[J]. J. of Lightwave Technol., 2016, 34(2): 500-507.

[8] Mckinney J. Photonics illuminates the future of radar[J]. Nature, 2014, 507(7492): 310-312.

[9] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photon., 2019, 13: 80-90.

[10] Gao H, Deng Y, Zhang J, et al. Analysis and prospects of phased array radar based on microwave photonics[J]. J. of Radars, 2019, 8(2): 251-261.

[11] Pan S, Zhang Y. Microwave photonic radars [J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(19): 5450-5484.

[12] Ye X, Zhang F, Pan S. Optical true time delay unit for multi-beamforming[J]. Opt. Express, 2015, 23(8): 10002-10008.

[13] Chen M, Subbaraman H, Chen R. Photonic crystal fiber beamformer for multiple X-band phased-array antenna transmissions[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2008, 20(5): 375-377.

[14] Tsokos C, Mylonas E, Groumas P, et al. Optical beamforming network for multi-beam operation with continuous angle selection [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 31(2): 177-180.

[15] Ye X, Zhang F, Pan S. Compact optical true time delay beamformer for a 2D phased array antenna using tunable dispersive elements[J]. Opt. Lett., 2016, 41(17): 3956-3959.

作者简介：

张业斌(1988－)，男，安徽省无为市人，博士，高级工程师，主要研究方向为微波光子技术。