微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022022201

宽带恒定束宽光学多波束形成技术研究

何梓昂，徐嘉鑫，周　涛*，殷　杰

（电子信息控制重点实验室，成都 610036）

摘　要： 随着电子技术的发展，恒定束宽波束形成技术在应对复杂电磁环境的宽带侦察系统中得到了广泛应用。文章研究了恒定束宽宽带光学多波束形成的原理，给出了利用窗函数获得实现恒定束宽的子带加权矩阵的方法，提出宽带恒定束宽光学多波束形成的系统方案，并通过仿真验证了所提方法可以形成方向性较好的宽带恒定束宽波束方向图。

关键词： 光学多波束形成；恒定束宽；窗函数；宽带电子侦察

中图分类号： TN971　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0051－05

Study on Wideband Constant Beamwidth Optical Multi-Beam Forming Technologies

HE Ziang，XU Jiaxin，ZHOU Tao，YIN Jie

（Key Laboratory of Electronic Information Control，Chengdu 610036，CHN）

Abstract： With the development of electronic technology，constant beamwidth beam forming techniques are widely applied in electronic reconnaissance system in complex electromagnetism environments. In this article，the principles of wideband constant beamwidth optical multi-beam forming are introduced，the method is introduced for obtaining the sub-frequency band weighting matrix for shaping frequency invariant beam pattern by means of window functions，and the system design scheme of wideband constant beamwidth optical multi-beam forming is proposed. Simulation results demonstrate that the proposed method can form the pattern with constant beamwidth and better direction.

Key words： optical multi-beam forming；constant beamwidth；window function；wideband electronic reconnaissance

0　引言

阵列宽带、超宽带雷达的广泛应用对电子对抗侦察形成了严峻挑战。特别是要实现对其快速、连续、大范围和长时间的侦察与监视，往往需要侦察系统在空域、频域上宽开，并具有近实时的处理能力。超宽带信号除了频谱范围宽以外，信号的有效辐射功率较低且大都是时敏信号，此时为了实现高概率截获必须要求系统具有大的瞬时带宽和空域覆盖范围以及较高的灵敏度。现阶段，可同时获得宽域覆盖和高灵敏度的主要技术手段是多波束技术。

多波束形成网络(MBFN)已经广泛应用于电子对抗侦察系统，它是对不同阵元接收到的到达方向不同的信号进行幅度和相位加权，使得同方向到达信号在预期波束形成方向上同相矢量相加，获得最大的输出，提升侦察信号的信噪比。目前实现多波束的常用技术主要有以下几种：透镜馈电多波束技术(Rotman透镜、R-2R和R-KR透镜)、矩阵网络馈电多波束技术(Butler矩阵、Blass矩阵)和数字多波束技术(DBF)。在波束形成技术方面，已经有基于微波光子技术的宽带光学多波束形成技术方案，其充分发挥了光在宽带、高速、并行和小巧方面的特点，可以很好地实现对宽带雷达信号的保真传输，有望成为实现宽带信号侦察系统在带宽、灵敏度、空域覆盖等问题的解决方案。光学多波束采用真实时间延迟实现波束形成，具有宽带指向一致性特点，同时

收稿日期：2022－02－14.

*通信作者：周　涛　E-mail：zhj_zht@163.com

存在主瓣波束随不同频率宽度不同的局限性。波束宽度的抖动使处于主瓣宽度内却又不在波束指向中心上的目标信号产生失真，这种失真将对雷达信号的能量接收、参数测量、目标识别、宽带测向等产生影响[1-2]。这对面向宽带侦察的光学多波束系统是不利的，因此恒定束宽波束形成是宽带光学多波束形成、宽带波束域高分辨率测角需要解决的重要问题。

1 光学多波束形成基本原理及频率相关特性

对于一个由 N 单元组成的均匀分布线阵(ULA)，设天线单元间距为 d。则其阵列方向图可表示为[3]

$$|F(\theta)|=\frac{\sin\frac{N}{2}(kd\sin\theta-\Delta\phi)}{\sin\frac{1}{2}(kd\sin\theta-\Delta\phi)} \tag{1}$$

式中，$k=2\pi f/c$，可以看出波束最大值出现在 $kd\sin\theta-\Delta\phi=0$ 处，即：

$$\Delta\phi=kd\sin\theta=2\pi fd\sin\theta/c \tag{2}$$

此时波束指向 θ 变换可得：$\Delta\phi=\omega d\sin\theta/c$，其中 ω 为微波角频率，$\omega=2\pi f$。由上式可知，对于固定的相移量 $\Delta\phi$，当射频频率改变 $\Delta\omega$ 时波束的指向也会随之发生偏斜，产生附加的指向误差 $\Delta\theta$：

$$\Delta\theta=\mathrm{tg}\,\theta(\Delta\omega/\omega) \tag{3}$$

这将导致在方向 θ 上天线增益下降，产生波束“偏斜”现象，这也是限制多波束系统的瞬时带宽的根本原因。但是，通过分析式(2)可知，如果对天线阵中每个单元接收到的宽带信号中的所有频率均引入固定的延时 $\Delta\tau_i$：

$$\Delta\tau_i=d\sin\theta/c \tag{4}$$

由于 $\Delta\phi=2\pi f\Delta\tau_i$，则无论信号结构组成如何，$kd\sin\theta-\Delta\phi=0$ 恒成立，波束指向保持恒定。图 1 给出了一个 32 元阵在给定阵元间距和固定时间延迟时，天线阵在不同频率情况下的方向图。

从图 1 中可以看出，在延时量固定的条件下波束指向是一个和频率无关的量，也就是说此时多波束系统的理论带宽可以无限大，从而在根源上解决了多波束系统瞬时带宽受限的问题。

同时，从式(1)～(2)不难看出，在不对阵元输出进行任何加权处理的情况下，基阵的指向性图将是输入信号频率 f 的函数。这表明对不同频率的输入信号，除在波束主轴方向外，基阵作为空间滤波器将提供不同的增益，进而使输出信号波形发生畸变。

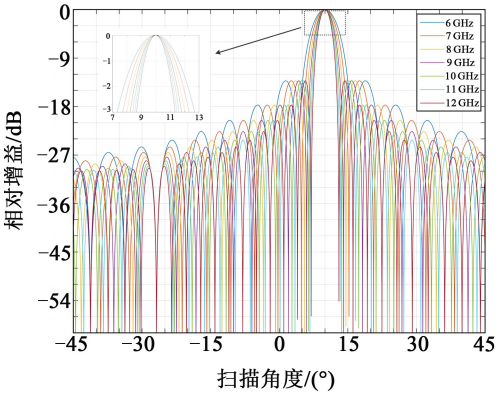


图 1 基于真实时间延迟方法的波束方向图

2 恒定束宽光学波束形成

2.1 基本原理

从理想连续线阵(如图 2)出发，以求获得离散阵元响应与阵指向性图之间的关系。当辐射源位置满足远场条件时，连续线阵的输出可以表示为

$$I(f,\theta)=\int_{-\infty}^{+\infty}s(x,f,\theta)\rho(x,f)\mathrm{d}x \tag{5}$$

式中，$s(x,f,\theta)$为外部激励信号，$\rho(x,f)$为线阵灵敏度分布函数，θ 为平面波入射方向与天线阵法线间的夹角。

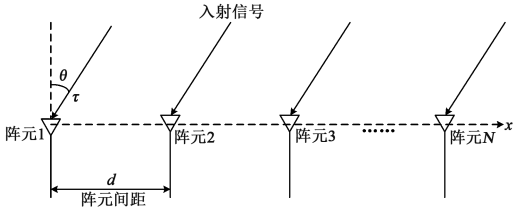


图 2 等间距线阵示意图

在远场条件下，由于天线阵受平面波激励，因此式(5)可进一步表示为

$$I(f,\theta)=\int_{-\infty}^{+\infty}\rho(x,f)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi fx\sin\theta/c}\mathrm{d}x \tag{6}$$

当 $\rho(x,f)$有如下形式时：

$$\rho(x,f)=fG(xf) \tag{7}$$

式(6)可以记为

$$I(\theta)=\int_{-\infty}^{+\infty}fG(xf)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi fx\sin\theta/c}\mathrm{d}x=\int_{-\infty}^{+\infty}G(\xi)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\xi\sin\theta/c}\mathrm{d}\xi \tag{8}$$

式(6)表明只要 $\rho(x,f)$满足式(7)，则连续线阵的输出将与入射辐射源的频率无关，即阵的输出波束

指向性图满足束宽恒定。

如果用 N 个在 x 轴上等间距布设的阵元去近似连续线阵，则由式(5)，可得离散线阵输出 $I(f,\theta)$ 的级数求和表示[4]：

$$I(f,\theta)=\sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2}\rho(n,f)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi fnd\sin\theta/c} \tag{9}$$

若 $\rho(n,f)$ 类似式(7)，即：

$$\rho(n,f)=fG(nf) \tag{10}$$

则：

$$I(\theta)=\sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2}G(\xi_n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\xi_n d\sin\theta/c} \tag{11}$$

以下称 $G(\xi_n)$ 为阵元响应函数。

由式(11)可以看出：只要适当选取阵元响应函数 $G(\xi_n)$ 便可保证阵列输出的波束宽度不随频率变化而变化，且 $G(\xi_n)$ 可以看作是对以频率 f 和空间位置坐标 x 为变量的连续函数 $\rho(x,f)$ 的采样。

一般构成基阵的所有阵元具有相同的物理特性，要获得满足式(10)的响应函数，必须对各阵元的输出信号进行加权处理，其权系数满足 $\boldsymbol{w}_n(f)=G(\xi_n)$[5]。形成恒定束宽波束的关键问题就归结为适当选取 $\rho(x,f)$，然后对其进行采样获得加权系数矩阵 $\boldsymbol{w}_n(f)$[6]。

2.2　恒定束宽加权矩阵计算方法

对于侦察系统工作频段内不同频率的信号来说，接收阵的孔径长度是变化的。为了使不同频率上设计的波束有相同的主瓣波束宽度，需要对不同频率设计相应的权值。对均匀线阵(ULA)来说，可以采用窗函数方法来计算权值[7-8]，同时可以根据系统需要控制旁瓣水平。利用窗函数方法计算宽带恒定束宽权值的步骤是[9]：

第一步：在侦察系统工作频段内均匀选择 L 个子带频率，表示为 f_l。用 f_0 和 f_{L-1} 分别对应侦察频段的下限和上限频率。

第二步：对应下限频率 f_0，设定旁瓣级为 b。用窗函数法计算频率 f_0、旁瓣级 b 情况下均匀线列阵的权值和对应的主瓣波束宽度。

第三步：对其他子带频率 f_l，通过设定低于 b 的旁瓣级，使主波束展宽。通过迭代过程，不断降低设定的旁瓣级，计算当前子带的主瓣波束宽度。当求得的波束宽度与频率下限波束宽度间的误差小于预设值时，迭代结束，此时得到的权值为子带频率 f_l 实现恒定束宽加权的权值。

可以采用的窗函数有凯塞(Kaiser)窗、切比雪夫窗等，用上述步骤方法，通过控制旁瓣级，获得不同子带频率的加权系数矩阵。

2.3　恒定束宽光学多波束系统实现方案

恒定束宽光学多波束系统包括以下几个部分：宽带天线阵、射频前端、电光转换、光学多波束形成网络、光电转换部件等。其工作原理框图如图 3 所示。

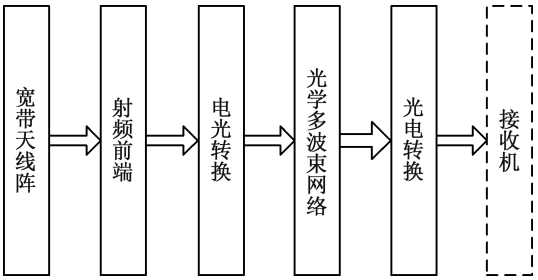


图 3　恒定束宽光学多波束原理框图

当光学多波束系统工作时，首先将天线阵列截获的射频信号通过射频前端进行低噪声放大，电光转换部件将经过放大后的宽带射频信号转换成光信号，然后经过具有真实延时(OTTD)功能的光学多波束形成网络进行信号分配、延时、加权等过程，形成预定波束指向和波形特征的多波束，最后经过光电转换变成射频信号送入宽带接收机进行后续侦察处理。

恒定束宽光学多波束系统就是根据上述基本原理，利用光学方法实现对射频信号的精确时间延迟，从而达到超宽带信号的波束形成。本质上通过微波光子手段构建空域 FIR 滤波器，其中通过光纤延迟线等真实时间延迟实现宽带波束的高指向一致性，幅度加权实现波束主瓣和副瓣特征。恒定束宽的加权系数主要通过两种途径实现：通过均衡等手段使得射频前端的幅频特性满足加权的参数需求或者设计电光转换通道的响应曲线满足其加权的参数需求。每一个通道均需要专门设计。

3　仿真分析

仿真中做如下假设：32 通道均匀线阵，阵元间距 15 mm，系统工作频段频率范围为 6～12 GHz，波束设计指向为 0°方向。在参数设计时，将工作频段平均分成 61 个子带，使用凯塞窗(见图 4)和切比雪夫窗函数获得子带的加权系数。

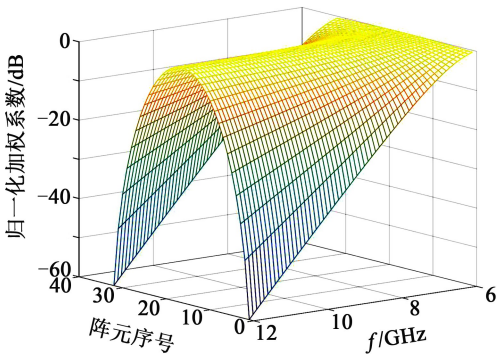
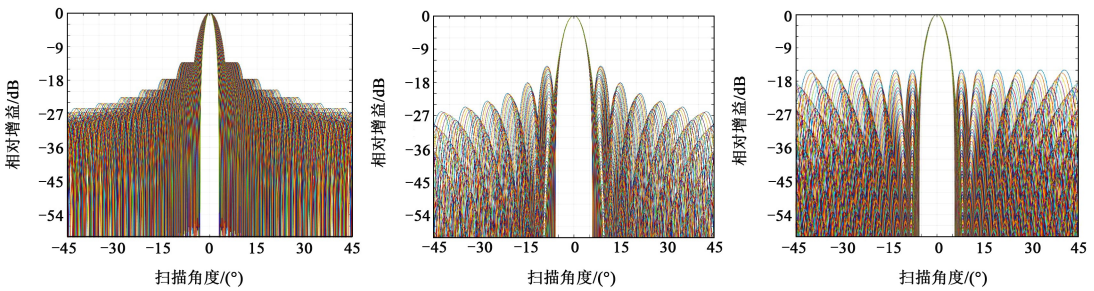


图 4 凯塞窗获得子带加权系数

为便于比较，将使用不同加权系数获得的波束方向图数据示于图 5。

通过对比分析图 5 中的子图，并依据表 1 提供的数据，可以看出：在使用由矩形窗获得的固定权值时，所形成的波束宽度是明显随频率变化的，而在使用由窗函数获得的加权矩阵时，波束宽度随频率变化的特征不明显，近似实现恒定束宽。



(a) 矩形窗 (b) 凯塞窗 (c) 切比雪夫窗

图 5 运用不同窗函数权值获得的波束方向图

表 1 波束宽度($BW_{-3\,dB}$)比较

f/GHz		6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12
$BW_{-3\,dB}$/(°)	矩形窗	5.28	4.88	4.52	4.22	3.96	3.72	3.52	3.34	3.18	3.02	2.88	2.76	2.64
	切比雪夫窗	5.48	5.44	5.4	5.34	5.26	5.18	5.1	5.04	4.96	4.88	4.8	4.72	4.68
	凯塞窗	5.34	5.2	5.2	5.2	5.2	5.16	5.16	5.14	5.12	5.12	5.12	5.08	5.06

4 结论

本文根据光学波束形成理论分析了光学多波束形成具有指向不随频率变化而波束宽度随频率变化的特点，利用窗函数方法获得恒定束宽光学多波束形成加权矩阵，提出宽带恒定束宽光学多波束形成方案，该方案与宽带电子侦察系统匹配，可以获得较好的恒定束宽特性，并通过仿真验证，具有一定的工程实用性。

随着微波、光电子器件技术的发展以及加工工艺的进步，贴近工程实际应用的加权系数设计方法可望解决光学波束宽度随频率变化的问题。可以预见在不久的将来，宽带恒定束宽光学多波束技术将在宽带电子侦察领域尤其是在车载、机载、卫星等平台广泛应用。

参考文献：

[1] 周 涛，范保华，陈吉欣. 光学波束形成技术对超宽带信号的传输特性分析[J]. 半导体光电，2010，31(3)：450-454.
Zhou Tao，Fan Baohua，Chen Jixin. Analysis of transmission characteristics of UWB signal using optical beam forming[J]. Semiconductor Optoelectronics，2010，31(3)：450-454.

[2] 白 梅. 宽带恒定束宽波束形成方法研究[D]. 成都：电子科技大学，2008.
Bai Mei. Research on broadband constant beamwidth beamforming method[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technol. of China，2008.

[3] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京：国防工业出版社，1994.
Zhang Guangyi. Phased Array Radar System[M]. Beijing：National Defence Industry Press，1994.

[4] Ward D B，Kennedy R A，Williamson R C. Theory and design of broadband sensor arrays with frequency invariant far-field beam patterns[J]. The J. of the Acoustical Society of America，1995，97(2)：1023-1034.

[5] 王大成，郭丽华，丁士圻. 基于矢量水听器阵的恒定束宽波束形成器的原理与设计[J]. 声学技术，2004，24(1)：205-209.
Wang Dacheng，Guo Lihua，Ding Shiqi. Beamformer with frequency invariant beam pattern using vector hydrophone arrays and its design[J]. Technical Acoustics，2004，24(1)：205-209.

[6] 唐建生，孙　超. 时域宽带恒定束宽波束形成器的优化设计[J]. 信号处理，2006，22(6)：805-809.
Tang Jiansheng，Sun Chao. Optimum design on time domain broadband beamformer with constant beamwidth[J]. Signal Processing，2006，22(6)：805-809.

[7] 张保嵩，马远良. 宽带恒定束宽波束形成器的设计与实现[J]. 应用声学，1999，18(5)：29-33.
Zhang Baosong，Ma Yuanliang. Design and implementation of wideband constant beamwidth beamforming[J]. J. of Appl. Acoustics，1999，18(5)：29-33.

[8] 杨益新，孙　超，马远良. 宽带低旁瓣时域波束形成[J]. 声学学报，2003，28(4)：331-338.
Yang Yixin，Sun Chao，Ma Yuanliang. Broadband low-sidelobe beamforming in time domain[J]. Acta Acustica Sinica，2003，28(4)：331-338.

[9] 苏　为，黄建国，连　明. 均匀线列阵时域宽带波束形成方法研究[J]. 计算机仿真，2009，26(1)：317-319.
Su Wei，Huang Jianguo，Lian Ming. A constant width beamfoming method for linear unitary array[J]. Computer Simulation，2009，26(1)：317-319.

作者简介：

何梓昂(1982—)，男，四川省巴中市人，硕士，高级工程师，研究方向为电子战系统总体技术、微波光子处理；

周　涛(1978—)，男，陕西省汉中市人，博士，研究员，研究方向为电子战系统总体技术、微波光子处理。