

·信号与信息处理·

频率不变波束形成技术的研究进展

刘芳¹, 卢野², 王冬霞¹

(1. 辽宁工业大学 电子与信息工程学院, 辽宁 锦州 121000; 2. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 频率不变波束形成(FIB)技术可以在所有频率范围内不失真地接收到来自空间某一方向的宽带信号。文中综述了频率不变波束形成技术的研究进展, 主要包括基础的采样率法、贝塞尔函数法、新型傅里叶变换法和同心圆阵列方法等。分析了相关的波束形成原理, 比较了其特点, 最后得出了相关结论。

关键词: 宽带信号; 频率不变波束形成; 阵列信号处理

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255-(2012)02-0053-05

Research Progress of Frequency Invariant Beamforming Technology

LIU Fang¹, LU Ye², WANG Dong-xia¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121000, China;

2. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The frequency invariant beamforming (FIB) technology can receive the broadband signals from a certain direction without distortion. The research progress of the frequency invariant beamforming technology are reviewed, including basic sampling rate method, Bessel function method, new Fourier Transform method, concentric ring array method, etc. The principle of the related beamforming is analyzed, its features are compared and the related conclusions are drawn.

Key words: broadband signal; frequency invariant beaming; array signal processing

波束形成技术作为阵列信号处理中的一种基本方法, 已经得到了广泛而深入的研究, 并且在舰船、航天器、地震勘探、天文以及医学诊断等多个国民经济和国防技术领域得到了应用^[1]。

然而, 早期波束形成技术的研究主要是针对窄带信号。随着阵列信号处理应用范围的推广, 当目标源为地震信号、语音信号以及宽带声纳信号等宽带信号时, 波束形成性能退化。如图1所示, 当目标源信号为宽带信号时, 在信号不同频率处的系统响应差异不能忽视, 即阵列在不同频率处具有不同增益, 进而导致输出波形的失真^[2]。通常情况下带宽越宽, 失真也会越严重。于是, 国内外学者开展了宽带

波束形成方法的研究^[3,4]。

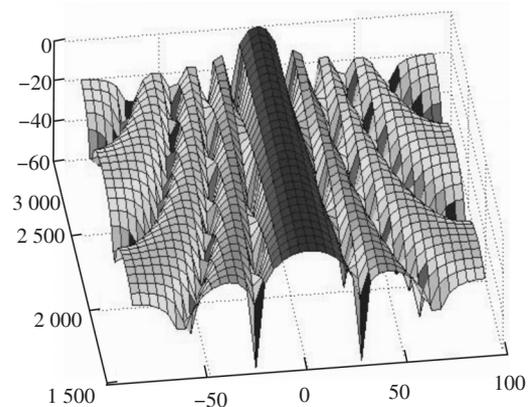


图1 经典波束形成的阵列波束图

收稿日期: 2012-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(60901063); 辽宁省杰出人才支持计划项目(LJQ2011066); 辽宁省教育厅项目(2009A354)

作者简介: 刘芳(1987-), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为阵列信号处理理论与应用; 卢野(1980-), 男, 辽宁锦州人, 工程师, 研究方向为自动控制技术与应用; 王冬霞(1975-), 女, 辽宁海城人, 教授, 硕士研究生导师。研究方向为阵列处理、语音处理、图像处理与通信技术。

频率不变波束形成(FIB)作为宽带波束形成方法的一种,能够在特定频带内保持形成的波束大致相同(如图2所示),即在所有频率范围内不失真地接收宽带信号。研究表明,在超声波探测、地震勘探,特别是水声通信和信号频谱检测中,FIB技术非常实用^[5-8]。

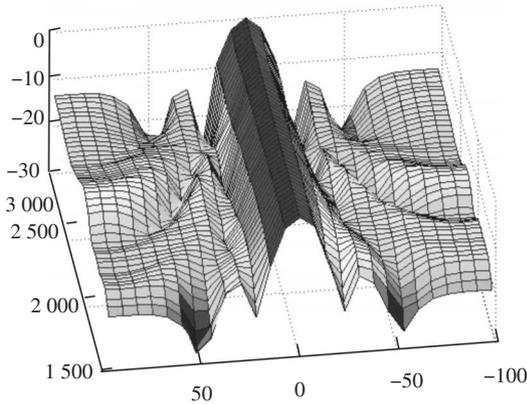


图2 FIB技术的阵列波束图

比较图1和图2,可以看出FIB技术能够较好地接收所需且具有不同频率的期望信号。因此,开展FIB技术的研究具有非常重要的意义。典型FIB技术包括:贝塞尔函数法、采样率法、傅里叶变换法和同心圆阵法等。

1 FIB技术

1.1 贝塞尔函数法

基于贝塞尔函数的FIB方法是通过实际中的一个真实阵列,经过变换在各个频率段处得到对应的虚拟阵列,令这些虚拟阵列具有相近的波束图,从而就能够实现阵列在接收宽带信号时保持波束图基本不变。

其基本的设计思路是:根据参考频率处的阵列流型,对宽带信号的频率范围内的每个频率点都构造出一个虚拟阵列,将阵列在各个频率点处接收到的数据进行变换,使虚拟阵列形成相同的信号流型,进而使各个子阵的波束方向图也都相同。

以均匀的线性阵列为例, $s(t)$ 为入射方向为 θ 的远场信号,线性均匀阵列由 M 个阵元构成,阵元间距为 $d = \lambda/2$, λ 是信号的波长。如果令最左端的传感器作为参考,那么所有阵元的阵列输出可以写成

$$Y_0 = \sum_{k=1}^M \omega_k g_0 e^{-j2\pi f(k-1)d \sin \theta / c} = W^H A(f, \theta) \quad (1)$$

其中, W^H 为权向量, $A(f, \theta)$ 为阵列流型向量, g_0 为来波的复振幅, ω_k 为第 k 个阵元的权值,如果在权值 ω_k 中补偿信号的时延,就能够得到阵列的指向 β 方向的波束图

$$G(\theta, f, \beta) = \left| \frac{\sin(M\pi f d \sin \theta / c - \pi f d \sin \beta / c)}{M \sin(\pi f d \sin \theta / c - \pi f d \sin \beta / c)} \right| \quad (2)$$

从式(2)可以看出波束图依赖于频率 f ,而权系数与 f 并没有关系。因此就能够利用贝塞尔函数的变换得到各个虚拟子阵的阵列流型。当参考频率为 f_0 时,可以得到阵列的输出为

$$X(f_0) = W^H A(f_0, \theta) = W^H J(f_0) \cdot P(\theta) \quad (3)$$

其中, $J(f_0)$ 是由第一类贝塞尔函数^[9]组成的矩阵,由以上公式能够推出任意频率分量 f_j 处所对应的阵列输出为

$$X(f_j) = W^H A(f_j, \theta) = W^H J(f_j) \cdot P(\theta) \quad (4)$$

如果有一个矩阵 $T(f_j)$ 能使 $J(f_0) = T(f_j)J(f_j)$,那么为了使所有子阵形成的波束方向图和参考频率处的波束图相同,就应该令任意虚拟子阵列的输出与参考子阵列的输出相同,也就是对每个频率分量的输出变换进行加权,即令其最终的输出为

$$Y(f_j) = W^H T(f_j) J(f_j) \cdot P(\theta) = W^H J(f_0) \cdot P(\theta) = W^H A(f_0, \theta) = X(f_0) \quad (5)$$

从上述内容可以看出,贝塞尔函数法首先要选择阵列的中心阵元为参考阵元,且接收信号的最低频率作为参考频率。然后根据期望得到的波束图设计参考频率处的波束图,再将信号带宽内的各个频率点处的阵列流型进行变换,得到虚拟阵列的输出,继而得到各个频率点处的波束方向图,并使其都大致相同。

这种方法利用已有的窄带信号阵列处理算法,降低了宽带信号阵列处理过程的复杂性,能够比较容易地应用于实际的工程实施中,但是缺陷是运算过程相对复杂。

1.2 采样率法

一个线性连续阵列孔径对入射角为 θ 的平面波的响应可以写成

$$r(\theta, f) = \int_0^{X_{\max}} e^{j2\pi f x c^{-1} \sin \theta} \rho(x, f) dx \quad (6)$$

其中, $\rho(x, f)$ 是孔径照度, 是关于阵元位置 x 和频率 f 的一个连续函数, c 是平面波的传播速度。当 $x > x_{\max}$ 时假设 $\rho(x, f) = 0$, x_{\max} 是阵元的最大位置。如果式(6)中的孔径照度有 $\rho(x, f) = fG(xf)$ 且 $G(\cdot)$ 为一个任意的绝对可积函数, 那么宽带阵列孔径的响应就会保持不变。因此这样一个 FIB 滤波器可以分为两部分: (1) 初级滤波器响应 $H_x(f) = G(xf)$; (2) 和阵元位置无关的次级滤波器响应 f 。所以 FIB 的结构框图如图 3 所示。

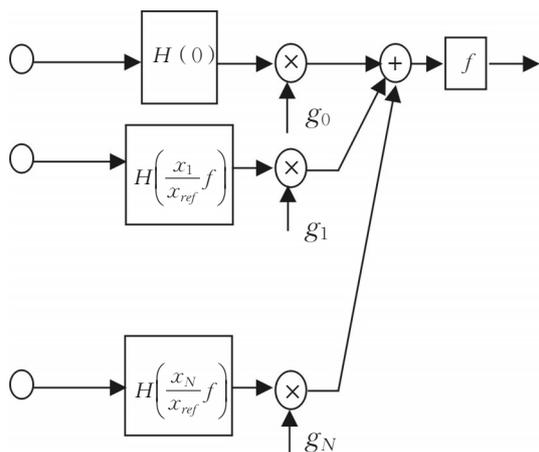


图3 线性 FIB 系统框图

其中 FIB 初级滤波器的最重要的一个属性就是频率扩张^[10], 这意味着从一个单独的参考频率响应就可以推导出所有的初级滤波器, 因此所有的初级滤波器系数也可以由单独的一组系数得到。目前主要有两种方法能够构造初级滤波器, 分别是多速率法和单一速率法。通过实验可以发现, 这两种初级滤波器的设计方法都能够实现输出波束图的频率不变, 相比之下多速率法需要比较少的滤波器系数, 但同时也要要求相对更高的采样率。

1.3 傅里叶变换法

Wei Liu 等人提出了阵列空间和时间参数之间的傅里叶变换关系^[11-13], 进而从期望得到的频率不变波束图出发, 采用一系列替换和一个反傅里叶变换来完成频率不变波束形成器的设计。

对于阵元以相等间距 Δx 均匀分布的线性阵列, 假设角频率为 ω 的平面波从角度 θ 入射, 那么阵列的波束响应就可表示为

$$P(\omega, \theta) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} D(m\Delta x, \omega) e^{-j\frac{\omega \sin \theta m \Delta x}{c}} \quad (7)$$

令 $\omega_1 = (\omega \sin \theta \Delta x / c)$, 得到

$$P(\omega_1, \omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} D(m\Delta x, \omega) e^{-jm\omega_1} \quad (8)$$

为了避免产生混叠, 根据空间采样定理^[14] 必须有 $\Delta x < \lambda_{\min} / 2$, 其中 λ_{\min} 是最大期望频率 ω_{\max} 所对应的波长。因此对于离散传感器阵列的设计步骤描述如下:

步骤 1: 给出一个期望的频率不变波束图 $F(\sin \theta)$, 用 $\sin \theta = (\omega_1 c / \omega \Delta x)$ 进行替换, 得到

$$P(\omega_1, \omega) = \begin{cases} F\left(\frac{c\omega}{\omega\Delta x}\right) & |\omega_1| \leq \left|\frac{\omega\Delta x}{c}\right| \cap \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \\ A(\omega_1) & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $A(\omega_1)$ 是一个任意函数, 理论上可以任意取值而不影响波束图, 但是 $A(\omega_1)$ 的选择将会影响函数的平滑程度, 通常情况下会选择令它的值等于 0。

步骤 2: 对 $P(\omega_1, \omega)$ 进行关于频率 ω_1 的一次一维反傅里叶变换, 就能得到在位置 $m\Delta x, m = \dots -1, 0, 1, \dots$ 上的阵元的期望频率响应 $D(m\Delta x, \omega)$ 。假设阵元数目为 M , $D(m\Delta x, \omega)$ 可以通过离散反傅里叶变换 (IDFT) 近似得到。然后可以用一个窗函数将得到的 $D(m\Delta x, \omega)$ 根据阵元数目截短。

这种方法适用于任何期望的频率不变波束图 $F(\sin \theta)$ 。它的设计简单, 便于推广到多维情况, 但是在频率较低的部分性能会有所下降。

1.4 同心圆阵法

圆形阵列可以由一个圆环或者多个同心圆环组成, 后者通常被称为同心圆环阵列 (CRA)^[15], Chan 和 Chen 提出了一种基于均匀同心圆环阵列 (UCCA) 的数字波束形成器^[16-18], 其基本原理是将接收到的信号转换为相位模式, 然后通过使用数字波束形成或者补偿网络的方法来去除单独的相位模式对频率的依赖。

含有 P 个圆环的 UCCA 频率不变波束形成器的结构框图如图 4 所示。经过适当的变频, 低通滤波和采样之后, 阵列第 P 个圆环接收到的采样信号可以表示为一个向量, 也叫做在采样点处的一次快拍。每个快拍都是对一系列傅里叶系数的反傅里叶变换 (IDFT), 而每个系数则称为相位模。随后每个相位模会经过滤波器来进行滤波或者补偿。

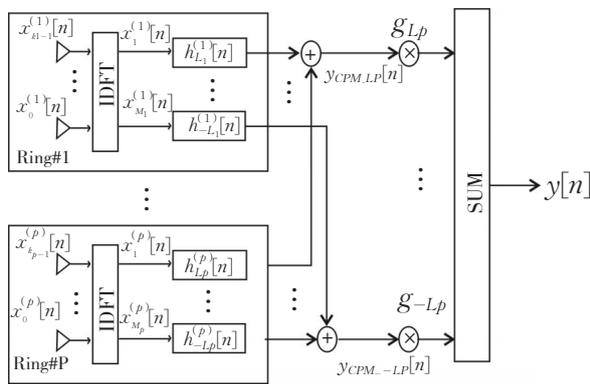


图4 P环UCCA的FIB框图

将补偿后的信号输入自适应波束形成网络,就能够形成整个自适应UCCA频率不变波束形成的输出。由于补偿后的相位模信号在所需要的频段上几乎是频率不变的,因此在其后的自适应波束形成网络中只需要很少的抽头来提取所需信号和抑制干扰。也就是说,波束形成网络的工作原理和窄带波束形成器是相同的。

为了补偿相位模式对频率的依赖性,这种方法会将IDFT输出的每个分支进行滤波,然后乘以变化的波束形成器加权,最终形成波束形成器的输出。而为了获得波束形成器的空时传递函数,必须假设只有一个源信号 $s(n)$ 。然后对快拍和波束形成器输出进行离散时间傅里叶变换(DTFT),通过比较这两个变换就可以得到UCCA第P个圆环的空时响应。这个空时响应是一个关于 ϕ 和 ω 的函数,那么如果要实现频率不变的波束图,它就应该与频率 ω 无关。

在一个UCCA中,外圆环比内圆环有更多的相位模,为了方便起见,通常假设所有圆环的权重都是相同的。综合以上过程,再利用Jacobin Anger展开式^[19]和贝塞尔函数的特性,就能最终得到频率不变的波束形成结果。

这种方法的核心思想是通过使用数字波束形成网络来补偿单个相位模对频率的依赖性,此外它还含有一系列的自适应系数,可以根据环境进行自适应的波束形成。和传统的不采用补偿网络的宽带波束形成器相比,这种自适应的UCCA频率不变波束形成器不仅提高了收敛速度,而且在算法复杂度和稳态误差上也有很大的改善。

2 结束语

文中综述了几种经典的频率不变波束形成技术。这些技术分别基于一维线阵和多维阵列。由于线性阵列结构简单易于操作,所以大部分FIB方法都是在一维阵列上实现的。而多维阵列天线如同心圆阵等,由于其有较宽的角度扫描范围并且可以在一定程度上节省和利用空间^[20],故在舰船、航天器和无线通信等领域都有着广泛的应用。

参考文献

- [1] Harry L, Van Trees. Optimum Array Processing[M]. New York: Wiley,2002: 2-9.
- [2] Ma M T. Theory and applications of antenna arrays[M].New York: Wiley, 1974: 73-177.
- [3] Brandstein M, Ward D. Microphone Arrays: Signal processing techniques and applications[M]. Berlin: Springer, 2001: 3-17.
- [4] 鄢社锋, 马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 163-193.
- [5] Ward D B, Kennedy R A, Williamson R C. FIR filter design for frequency invariant beamformers[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1996,3(3): 69-71.
- [6] Ward D B, Kennedy R A, Williamson R C. Theory and design of broadband sensor arrays with frequency invariant far-field beam patterns [J]. J Acoust. Soc. Amer, 1995, 97 (2): 1023-1034.
- [7] Ning Xie, Hui Wang, Hongwei Liu. Broadband Frequency Invariant Beamformer [C]// Wireless Pers Commun. LLC: Springer Science & Business Media, 2010: 107-114.
- [8] Do Hong T, Russer P. Signal processing for wideband smart antenna array applications[J]. IEEE microwave magazine, 2004,72(9): 57-67.
- [9] Arfken G B, H J Weber. Mathematical Methods for Physicists[M]. 4th ed. Amsterdam, the Netherlands: ELSEVIER ACADEMIC Press, 2005: 366-369.
- [10] Parks T W, Burrus C S. Digital filter design[M]. New York: Wiley, 1987: 983-995.
- [11] Wei Liu, Stephan Weiss. Frequency invariant beamforming for two-dimensional and three-dimensional arrays[J]. Signal Processing, 2007, 87(11): 2535-2543.
- [12] Wei L, Weiss S. Design of frequency invariant beamformers for broadband arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 855-860.
- [13] Wei Liu, Stephan Weiss. A new Class of Broadband Arrays with Frequency Invariant Beam Patterns[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 50(1):185-188.
- [14] Pillai S U. Array Signal Processing[M]. New York: Spring-

er, 1993: 254–267.

- [15] Yunhong L, Ho K C, Kwan C. Array pattern synthesis with frequency invariant property for concentric ring array[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54 (2): 780–784.
- [16] Chan S C, Chen H H. Uniform concentric circular arrays with frequency – invariant characteristics–Theory, design, adaptive beamforming and DOA estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007,55(1):165–177.
- [17] Chen H H, Chan S C, Ho K L. Adaptive beamforming using frequency invariant uniform concentric circular arrays[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Pa-

pers, 2007, 54(2): 1938–949.

- [18] Chen H H, Chan S C. Theory and design of uniform concentric circular arrays with frequency invariant characteristics [C]/ in Proc. IEEE ICASSP, 2005: 805–808.
- [19] Abhayapala T D, Bhatta H. Coherent Broadband Source Localization by Modal Space Processing [C]/ IEEE.10th International Conference on Telecommunications, 23 Feb– 1 March, 2003: 1617–1623.
- [20] Wang B H, Guo Y, Wang Y L, et al. Frequency-invariant pattern synthesis of conformal array antenna with low cross-polarisation[J]. Microwaves, Antennas & Propagation, IET, 2008, 2: 442–450.

(上接第33页)

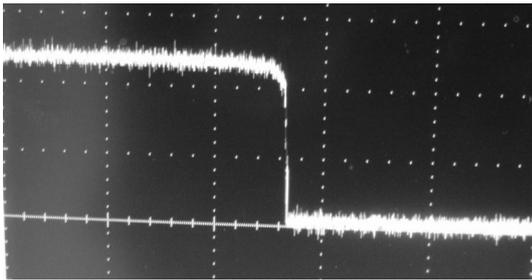


图6 光栅零位信号波形图

机频率值设置实验。当调用归零和复位子程序时,要考虑转台旋转找到零点与复位位置的精度和运行快慢,经过反复实验,确定执行归零和复位子程序时,电机频率为500 Hz。执行选支子程序时,由于输出不同波长电机运转步数差值很大,考虑到选支精确性和速度的需求,经反复实验,确定调用光栅选支子程序时,电机运行频率为126 Hz。

(4)光栅选支系统运行性能实验。经反复实验,硬件器件与电路均未出现发热和坏损现象,软件系统的功能指标均满足,表明系统软、硬件设计精确、稳定、可靠。实验结果表明,系统能实现精准、快速的光栅选支谱线输出,整个调谐系统运行稳定,激光波长再现性好。用CO₂光谱仪和光子牵引探测器得到波长与能量分布如图7。

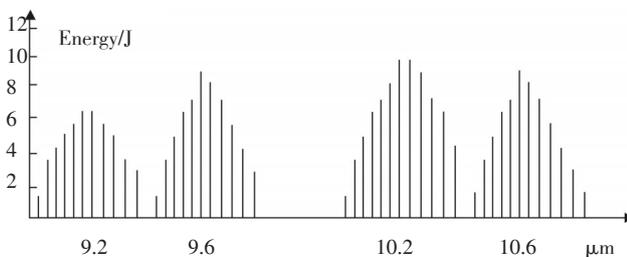


图7 TEA CO₂激光器光栅调谐选支输出谱线

4 结 论

成功研制了稳定、可靠的TEA CO₂激光器光栅调谐选支系统,可实现精准、快速的光栅选支谱线输出,通过实验表明,光栅调谐选支系统具有光栅零位信号精度高、波长调谐输出速度快、系统运行稳定、结构简单和使用方便等优点。

参考文献

- [1] A J Beaulieu. Transversely Excited Atmospheric Pressure CO₂ Lasers[J]. Appl.Phys.Lett.,1970, 16(12):504–505.
- [2] 赵凯华,钟锡华.光学(下册)[M].北京:北京大学出版社,2001:18–27.
- [3] 曾泳淮.关于平面反射是闪耀光栅问题的讨论[J].大学化学,1997,10:47–49.
- [4] Chris Palmer. Diffraction Grating Handbook[S].6th Edition. Newport Corporation, 2005.
- [5] T M Hard. Laser Wavelength Selection and OutPut Coupling by a Grating[J]. APPI.Opt., 1970, 9(8):1825–1830.
- [6] 陈春雨.可调谐折叠腔TEA CO₂激光器实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [7] 蔡伯荣,王瑞丰,程泽东,等.激光器件[M].长沙:湖南科学技术出版社,1983.
- [8] 董句.TEA CO₂激光器可调谐输出及自动控制研究[D].武汉:华中科技大学,2001:10.