

基于 Laguerre 滤波器等价设计的 IIR 宽带波束形成

刘成城¹, 刘亚奇¹, 赵拥军¹, 杨 静^{1,2}

(1. 信息工程大学导航与空天目标工程学院, 河南郑州 450001; 2. 72495 部队通信科, 河南郑州 450001)

摘要: 常规 IIR 宽带波束形成器可以获得比 FIR 宽带波束形成器更好的性能,但其需要多极点的自适应调整过程,存在稳定性无法保证,计算复杂度较高等问题.本文提出一种新的基于 IIR 滤波器的宽带波束形成算法.该算法基于高阶 Laguerre 宽带波束形成器,利用双线性变换和函数束方法设计相应的低阶等价 IIR 宽带波束形成器.仿真实验及理论分析表明,该方法无需常规 IIR 宽带波束形成器的多极点自适应调整过程,在保证算法稳定性的同时,减少了计算复杂度,并提高了输出信干噪比(SINR).

关键词: 宽带波束形成; Laguerre 滤波器; 双线性变换; 函数束

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)02-0399-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.02.030

A Novel IIR Wideband Beamforming Algorithm Based on the Equivalent Design of Laguerre Filter

LIU Cheng-cheng¹, LIU Ya-qi¹, ZHAO Yong-jun¹, YANG Jing^{1,2}

(1. School of Navigation and Aerospace Object Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Automation Station, Unit 72495, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Conventional broadband beamforming structures make use of finite-impulse-response(FIR) filters in each channel. It has been proven that the optimal frequency-dependent array weightings of broadband beamformers could be better approximated by infinite-impulse-response(IIR) filters. However, some potential problems, such as stability monitoring and the high computational complexity, of the IIR filters due to the adaptive algorithm required to adjust the poles make the implementation of the IIR beamformers difficult. In this paper, a novel broadband IIR beamformer is proposed to solve these problems. Based on the high order Laguerre beamformer, an equivalent lower order IIR beamformer is designed by using the method of bilinear transformation and pencil-of-functions. The simulations illustrate that without the process of adjusting the poles, the proposed method can ensure the stability, reduce the computational complexity and improve the output SINR.

Key words: wideband beamforming; Laguerre filter; bilinear transformation; pencil-of-functions

1 引言

作为阵列信号处理的研究热点和难点之一,宽带波束形成已广泛应用于通信、声呐、雷达以及地震勘探等众多国民经济领域^[1~3].两种最基本的 FIR 波束形成器分别为 Frost 波束形成器^[4]和广义旁瓣对消(Generalized Sidelobe Canceller, GSC)波束形成器^[5].它们在每个阵元后面连接预延迟补偿和一组抽头延迟线((Tapped Delay-Lines, TDL),以更好地抑制干扰和随机噪声.

随着处理带宽越来越宽, FIR 宽带波束形成方法需要较长长度的抽头延迟线以获取期望的输出信干噪比(Signal to Interference-plus-Noise Ratio, SINR)^[6],但大量的

抽头延迟线组将降低自适应权系数求解的收敛速度、增加计算复杂度.为此,文献[7]利用波束空间技术以提高算法的收敛速度,但波束空间的主波束和副波束的设计需要较大的计算量.文献[8]基于子带滤波器设计,利用子带宽带波束形成技术提高了收敛速度,降低了计算量.文献[9]在 GSC 结构中引入频率不变约束,降低了计算量,但文献[7~9]均没有减少权系数的维数.为了大幅减少权系数的维数,文献[10]首次提出利用 IIR 滤波器代替宽带波束形成器中的 FIR 滤波器,在 GSC 结构下给出三种 IIR 宽带波束形成器,并证明了同等条件下 IIR 宽带波束形成器的性能优于 FIR 滤波器.文献[11]通过理想滤波器去极点的设计来降低 IIR 滤波器的阶

数.文献[12]将 IIR 滤波器与 FIR 扇形滤波器相结合,有效地应用于部分自适应阵列中.文献[13]提出基于 TDL 形式的 IIR 宽带波束形成算法,该算法在每个阵元上连接预延迟补偿和一组类 TDL 形式的 IIR 滤波器,并结合约束和无约束最小均方误差(LMS)算法求解最优系数矢量.基于文献[13],文献[14]进一步给出了二阶 IIR 单元下的宽带波束形成,并利用高斯牛顿迭代算法提高了算法的收敛速度.文献[10~14]提出的 IIR 宽带波束形成器输出 SINR 较高且抗干扰性能较好,但 IIR 滤波器需要进行多极点的自适应调整,稳定性得不到保证.为此,Saeid R.S.等人提出了一种基于 Laguerre 滤波器的类 TDL 形式宽带波束形成器^[15].与传统 IIR 滤波器相比,Laguerre 滤波器既保持了 FIR 滤波器的稳定性,又具有 IIR 滤波器较长的记忆深度.另外,Laguerre 宽带波束形成器仅需线下求解一个极点,避免了多极点的自适应调整过程,保证稳定性的同时降低了计算量.Laguerre 滤波器的性能取决于其唯一的自由参数(单极点)及截断误差的大小,但低阶的 Laguerre 波束形成器并不能提供理想的 SINR.

基于高阶的 Laguerre 宽带波束形成器,本文首先利用双线性变换方法,定义 s 平面到 z 平面的映射关系式,得到 s 域上 Laguerre 系数的表达式;然后通过函数束方法推导 R 阶 IIR 滤波器系数在 s 域上的表达式,并利用 z 域逆变换得到 IIR 滤波器的传递函数;最后构造 $R+1$ 阶的 TDL 形式的级联型 IIR 宽带波束形成器结构,实现宽带波束形成,并给出仿真实验与结果分析.

2 模型

时域 Frost 宽带波束形成器的结构如图 1(a) 所示,假设 P 个远场宽带信号以方位角 θ 入射到一均匀直线阵,阵元数为 M ,每个阵元所接延迟线的抽头个数为 J ,则波束形成器的输出为

$$y(n) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(n) \quad (1)$$

其中, $(\cdot)^H$ 表示矢量共轭转置,权矢量 $\mathbf{w} = [w_{1,1}, w_{2,1}, \dots, w_{M,J}]^T$, $(\cdot)^T$ 为转置, $\mathbf{x}(n)$ 为 $MJ \times 1$ 维阵列接收矢量.

当已知期望信号来向和带宽而参考信号未知时,采用线性约束最小方差(Linearly Constrained Minimum Variance, LCMV)准则,Frost 宽带波束形成问题可以表示为

$$\min \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w}, \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{C}^H \mathbf{w} = \mathbf{g} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}(n) \mathbf{x}^H(n)]$ 为阵列接收数据协方差矩阵, \mathbf{g} 可以表示为 $J \times 1$ 维的阵列响应向量,满足某一元素为 1,其它元素为 0; \mathbf{C} 为 $MJ \times J$ 维约束矩阵

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_M & \mathbf{0}_M & \cdots & \mathbf{0}_M \\ \mathbf{0}_M & \mathbf{I}_M & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_M & \mathbf{0}_M & \cdots & \mathbf{I}_M \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, \mathbf{I}_M 和 $\mathbf{0}_M$ 分别为 $M \times 1$ 维全 1、全 0 矢量.

最优权矢量的自适应求解过程如下

$$\begin{cases} \mathbf{w}(n+1) = \mathbf{P}[\mathbf{w}(n) - \mu y(n) \mathbf{x}(n)] + \mathbf{f} \\ \mathbf{w}(0) = \mathbf{f} \end{cases} \quad (4)$$

其中, μ 为迭代步长, $\mathbf{f} = \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{g}$, $\mathbf{P} = \mathbf{I} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T$.

3 Laguerre 波束形成器

如图 1(b) 所示, IIR 宽带波束形成器利用一阶或二阶的 IIR 滤波器单元代替抽头延迟线. IIR 滤波器单元可以表示为

$$G_j(z) = \frac{z^{-1}}{1 - a_j z^{-1}} \quad \text{or} \quad \frac{z^{-1}}{1 - a_{j,1} z^{-1} - a_{j,2} z^{-2}}, \quad (5)$$

$$j = 1, 2, \dots, J-1$$

通过式(5)构造新的协方差矩阵,并利用式(4)求解最优权矢量,实现宽带波束形成.易知,此类 IIR 波束形成器需要多极点的自适应调整过程,计算复杂度高且稳定性较差.文献[15]利用单极点 Laguerre 滤波器设计宽带波束形成器,避免了多极点的自适应调整,稳定性较好.该方法具体的结构如图 1(c) 所示,下面将介绍 Laguerre 波束形成器的设计方法^[15].

Laguerre 函数通常可以定义为

$$L_k(z, b) = \sqrt{1 - b^2} \frac{(z^{-1} - b)^k}{(1 - bz^{-1})^{k+1}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

其中, b 为单极点且满足 $|b| < 1$. 传递函数 $H(z)$ 可以表示为

$$H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k(b) L_k(z, b) \quad (7)$$

其中, $\alpha_k(b)$ 为 Laguerre 系数,可以通过下式进行求解

$$\begin{aligned} \alpha_k(b) &= \langle H(z) L_k(z, b) \rangle \\ &= \frac{1}{2\pi j} \oint_C H(z) L_k(z^{-1}, b) z^{-1} dz \end{aligned} \quad (8)$$

为了实现宽带波束形成,假设目标滤波器 $H_{bp}(z)$ 为一个理想带通滤波器

$$H_{bp}(z) = \begin{cases} z^{-\tau}, & e^{jw_1} < z < e^{jw_2}, e^{-jw_2} < z < e^{-jw_1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

对 Laguerre 函数进行 J 阶的截断处理

$$\hat{H}(z) = \sum_{k=0}^J \alpha_k(b) L_k(z, b) \approx H_{bp}(z) \quad (10)$$

令 $\hat{H}(z)$ 逼近于 $H_{bp}(z)$, 求解最优单极点 b_{opt} , 然后利用图 1(c) 中 Laguerre 函数构造新的协方差矩阵,并通过式(4)得到最优解权矢量.

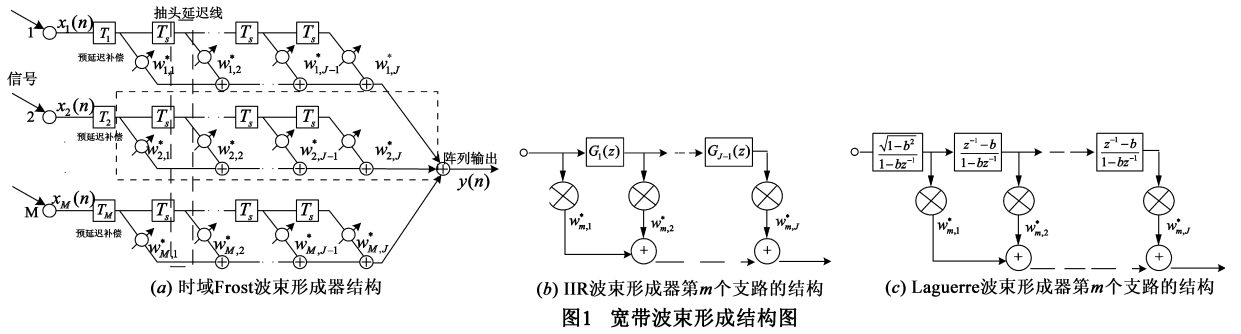


图1 宽带波束形成结构图

4 新的 IIR 宽带波束形成器

为了减少 Laguerre 滤波器的截断误差和获得更优的单极点,本文选取阶数 J (通常取 $J \geq 30$), 并利用文献[15]方法设计 Laguerre 波束形成器. 下面将基于此高阶波束形成器, 利用双线性变换与函数束方法设计等价的低阶 IIR 波束形成器.

定义 s 平面到 z 平面的映射关系为

$$s = \frac{1-bz}{z-b} \quad (11)$$

则 Laguerre 系数 α_k 在 s 平面上表示为

$$G_0(s) = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k s^{-k} = \sqrt{1-b^2} \frac{s}{s+b} H\left(\frac{s+b}{1+bs}\right) \quad (12)$$

式(12)中的内积运算可以在时域或 Laguerre 系数域内等价实现.

$$\langle H, H \rangle = \langle G_0, G_0 \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k^2 \quad (13)$$

为了寻找 $G_0(s)$ 的等价表达式, 本文提出一种函数束方法以最小化转化误差. 选择新的 IIR 滤波器阶数为 R (通常取 $R \leq J$), 定义 $G_j(s)$ 如下:

$$G_j(s) = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{k+j} s^{-k} = \alpha_j + \alpha_{1+j} s^{-1} + \alpha_{2+j} s^{-2} + \dots, \quad j = 0, 1, \dots, R \quad (14)$$

则优化问题可以表示为

$$\begin{cases} \min \| E(s) \|^2 \\ \text{s.t. } E(s) = \sum_{j=0}^R c_j G_j(s) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $c_R = 1$. 易知, 优化问题等价于利用不同的 $G_j(s)$, $j = 0, 1, \dots, R$ 近似表示 $G_0(s)$. 通过求解一组经典的线性问题得到最优系数 c_j , 线性问题表示如下:

$$\psi \mathbf{a} = -\mathbf{b} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{a} = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{R-1}]^T$, ψ 为一个 $R \times R$ 维的 Gram 矩阵且由一组内积 $\psi_{i,j} = \langle G_i, G_j \rangle$, $i, j = 0, 1, \dots, R-1$ 组成, $\mathbf{b} = [\psi_0 \ \psi_{1,R} \ \dots \ \psi_{R-1,R}]^T$. 由式(13)可知, $\psi_{i,j}$ 仅与 Laguerre 系数有关.

$$\psi_{i,j} = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{k+i} \alpha_{k+j} \quad (17)$$

$$\psi_{i,j} = \psi_{i-1,j-1} - \alpha_{i-1} \alpha_{j-1}, \quad i, j = 1, \dots, R \quad (18)$$

观察式(12)和式(14), $G_j(s)$ 与 $G_0(s)$ 的关系可以表示为

$$G_j(s) = G_0(s) s^j - \sum_{k=0}^{j-1} \alpha_k s^{j-k}, \quad i, j = 1, \dots, R \quad (19)$$

将式(19)代入式(15), 推导出 $G_0(s)$ 新的表达式为

$$G_0(s) = \frac{\sum_{j=1}^R c_j \sum_{k=0}^{j-1} \alpha_k s^{j-k} + E(s)}{\sum_{j=0}^R c_j s^j} \quad (20)$$

经观察可知, 系数 c_j 通过式(16)和最小化 $\| E(s) \|^2$ 求解, 因此可以将 $\tilde{G}_0(s)$ 近似表示为

$$\tilde{G}_0(s) = \frac{\sum_{j=1}^R c_j \sum_{k=0}^{j-1} \alpha_k s^{j-k}}{\sum_{j=0}^R c_j s^j} \quad (21)$$

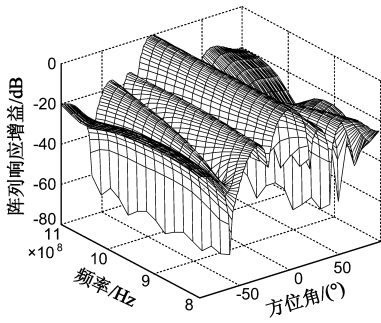
对式(21)进行 $z = \frac{s+b}{1+bs}$ 的逆变换, 则 IIR 滤波器的传递函数 $\tilde{H}(z)$ 为

$$\tilde{H}(z) = \sqrt{1-b^2} \frac{z}{z-b} \tilde{G}_0\left(\frac{z-b}{1-bz}\right) \quad (22)$$

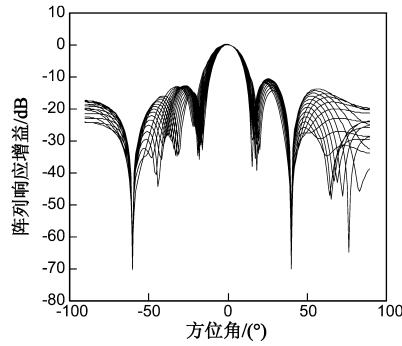
通过式(22)构造 $R+1$ 阶的 TDL 形式的级联型 IIR 宽带波束形成器, 可以线下获取各级联单元上的零、极点. 利用各级联单元上的零、极点构造新的阵列接收数据协方差矩阵, 最后通过 LCMV 准则式(4), 实现宽带波束形成.

5 仿真分析

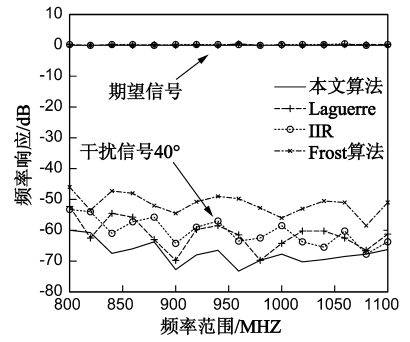
考虑一阵元数为 8 的均匀直线阵, 选取 IIR 和 Laguerre 滤波器阶数均为 8, Frost 抽头延迟线的抽头个数为 15, 期望信号来向为 0° , 两个干扰信号分别来自于 40° 和 -60° . 期望信号和干扰信号的最低频率 $f_l = 800\text{MHz}$, 带宽为 $B = 300\text{MHz}$, 选取离散频率点数为 16. 阵元间距取期望信号最高频率对应波长的一半, 信干比均为 -40dB , 信噪比为 10dB , 迭代次数为 2000, 每次均做 100 次蒙特卡罗实验.



(a) 三维波束图



(b) 二维波束图



(c) 频率响应

图2 阵列响应方向图

实验1 阵列响应性能

从图2(a)和图2(b)可以看出,本文算法波束主波束可以准确地指向期望信号方向,并在两个干扰方向上形成了很深的零陷.图2(c)给出了本文算法、文献[15]中的Laguerre波束形成器、文献[14]中一阶极点IIR波束形成器及Frost算法的期望信号及40°入射干扰信号在不同频率下阵列响应的变化.从图中可以看出,所有算法均可以在期望方向得到较好的频率响应,性能相差无几.但本文算法可以在方位角为40°的干扰方向上形成最深的零陷,Laguerre波束形成器与一阶IIR波束形成器抗干扰性能相当,但Frost算法的抗干扰性能明显较差.

实验2 输出性能分析

假设迭代次数为100~3500,其他仿真条件不变.比较本文算法、Laguerre波束形成器、一阶极点IIR波束形成器及Frost算法在不同迭代次数下输出SINR的变化.

从图3可以看出,随着迭代次数的增加,所有算法的输出SINR均不断增加.因为本文算法是基于高阶Laguerre波束形成器的等价变换,零极点的计算可以线下完成,所以收敛速度较快,且输出SINR在整个迭代范围内高于其他三种算法,而一阶IIR波束形成器中基于牛顿迭代方法的极点自适应调整过程导致该算法不仅收敛速度较慢,而且在迭代次数小于1000次时,输出SINR低于Frost算法.

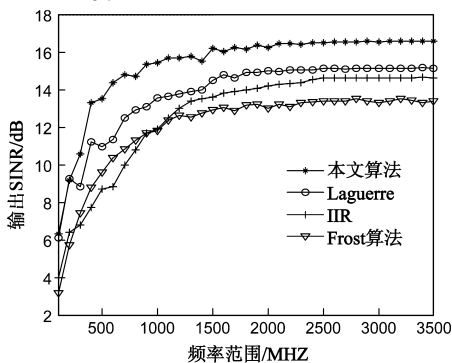


图3 随迭代次数增加时算法输出性能

实验3 随SNR增加输出性能分析

假设SNR从-10dB增加到35dB,迭代次数为3500,其他仿真参数不变.比较本文算法、Laguerre波束形成器、一阶极点IIR波束形成器及Frost算法在不同SNR条件下输出SINR的变化.

从图4可以看出,随着SNR的增加,所有算法的输出SINR均不断增加,而本文算法的输出SINR高于其他三种算法.当算法均收敛至最优解时,Laguerre波束形成器的输出SINR与一阶IIR波束形成器性能相当.但与Frost算法相比,三种基于IIR滤波器的宽带波束形成器输出SINR均有提高.因此,在稳定性得到保证的条件下,基于IIR滤波器设计的宽带波束形成器性能将优于同阶数的基于FIR滤波器设计的自适应波束形成器.

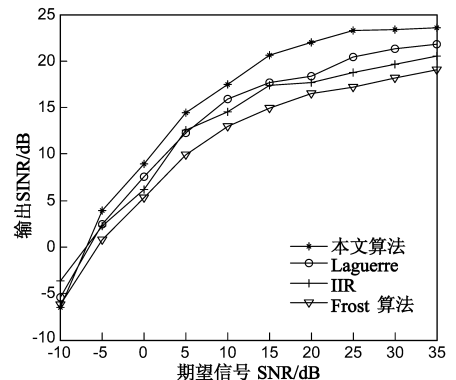


图4 SNR增加时算法输出性能

实验4 计算复杂度分析

信噪比为10dB,迭代次数为2000,仅考虑乘法计算量,求逆运算计算复杂度约为 $O(K^3)$,其中 K 为矩阵维数.Frost算法的计算量主要是求解最优权值时式(4)产生的乘法计算量,每次迭代时计算复杂度可以表示为 $L_F(M, J) = M^2 J^3 + 2M J^3 + 3M^2 J^2 + O(J^3) + M J^2$.本文算法、Laguerre波束形成器和常规极点IIR波束形成器均需要式(4)的计算过程. N_b 表示IIR波束形成器中极点个数,各算法的计算量及输出SINR如表1所示:

表 1 各算法的计算复杂度

算法类型	权值数量	计算复杂度/ 每次迭代	输出 SINR/dB
Frost	$64(M=8, J=8)$	$L_f(M, J)$	6.70
Frost	$120(M=8, J=15)$	$L_f(M, J)$	13.21
一阶 IIR	$71(M=8, J=8, N_b=J-1)$	$L_f(M, J) + O(M^3 N_b^3)$	14.46
二阶 IIR	$77(M=8, J=8, N_b=2J-2)$	$L_f(M, J) + O(M^3 N_b^3)$	15.37
Laguerre	$64(M=8, J=8)$	$L_f(M, J) + 2MJ + 3M$	14.98
本文算法	$64(M=8, J=8)$	$L_f(M, J) + 4MJ + 3M$	16.22

由表 1 可知,同等条件下,一阶和二阶的 IIR 波束形成器需要额外对多极点自适应求解,所以它们的权值数量和计算复杂度均较大,其中二阶 IIR 波束形成器的权值数量和计算复杂度最大,但与一阶 IIR 波束形成器相比,输出 SINR 的提高并不明显;本文算法是基于高阶 Laguerre 波束形成器的等价变换,极点的求解可以线下完成,其求解过程并不参与自适应权矢量的计算,所以本文算法和 Laguerre 波束形成器的权值数量相同,计算复杂度相当,但与传统 IIR 波束形成器相比,权值数量和计算复杂度较小,且本文算法的输出 SINR 最高;Frost 算法的权值数量和计算复杂度最小,但它需要较长的延迟线长度才可以获取期望的 SINR.

6 结论

本文基于高阶的 Laguerre 波束形成器,利用双线性变换和函数束方法,设计与 Laguerre 波束形成器等价的低阶 IIR 波束形成器.该方法依赖于 Laguerre 波束形成器的设计,可以看成是 Laguerre 波束形成器与 IIR 滤波器的等价变换.与传统 IIR 和 Laguerre 波束形成器相比,本文提出的 IIR 宽带波束形成器有如下优点:(1)避免了传统 IIR 滤波器多极点的自适应调整过程,在线下直接求解多极点,保证了算法的稳定性;(2)降低了 Laguerre 波束形成器的阶数,降低了权矢量的维数和计算复杂度;(3)基于高阶 Laguerre 波束形成器的等价设计方法,减少了实际应用中截断量化误差,提高了波束形成器的输出性能.

参考文献

- [1] Liu W, Weiss S. Wideband Beamforming: Concepts and Techniques[M]. Chichester, U. K: Wiley, 2010. 13 – 35.
- [2] 范展;梁国龙.基于凸优化的最小旁瓣恒定束宽时域宽带波束形成[J].电子学报,2013,41(5):943 – 949.

- Fan Zhan, Liang Guo-long. Broadband beamforming with minimum sidelobe and constant beamwidth based on convex optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(5): 943 – 949. (in Chinese)
- [3] 陈文俊,王建,聂在平.数字阵列天线接收通道宽带信号校准与波束形成技术研究[J].电子学报,2013,41(3):582 – 587.
- Chen Wen-jun, Wang Jian, Nie Zai-ping. Study on the calibration of receiving channels and the beamforming technology for wideband digital array antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 582 – 587. (in Chinese)
- [4] O L Frost III. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1972, 60(8): 926 – 935.
- [5] L J Griffiths, C W Jim. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(1): 27 – 34.
- [6] F W Vook, R T Compton. Bandwidth performance of linear adaptive arrays with tapped delay-line processing[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1992, 28(3): 901 – 908.
- [7] T Sekiguchi, Y Karasawa. Wideband beamspace adaptive array utilizing FIR fanfilters for multibeam forming[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2000, 48(1): 277 – 284.
- [8] W Liu, S Weiss, L Hanzo. A subband-selective broadband GSC with cosine-modulated blocking matrix[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2004, 52(3): 813 – 820.
- [9] W Liu, S Weiss, L Hanzo. A generalized sidelobe canceller employing two-dimensional frequency invariant filters[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2005, 53(7): 2339 – 2343.
- [10] R P Gooch, J J Shynk. Wideband adaptive array processing using pole-zero digital filters[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1986, 34(3): 355 – 367.
- [11] C N Adkins, J J Turtora. A broadband beam former with pole-zero unconstrained jammer rejection in linear arrays[J]. IEEE Trans Signal Process, 1996, 44(2): 438 – 441.
- [12] M Ghavami, R Kohno. Recursive fan filters for a broadband partially adaptive antenna[J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48(2): 185 – 188.
- [13] H Duan, B P Ng, C M See. A new broadband beamformer using IIR filters[J]. IEEE Signal Process. Lett, 2005, 12(11): 776 – 779.
- [14] H Duan, B P Ng, C M S See, J Fang. Broadband beamforming using TDL-form IIR filters[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2007, 55(3): 990 – 1003.
- [15] Saeid R Seydnejad, Reza Ebrahimi. Broadband beamforming using Laguerre filters[J]. Signal Processing, 2012, 92(1): 1093 – 1100.

作者简介



刘成城 男,1986年9月出生于江苏省东台市.讲师,主要从事阵列信号处理、电子对抗等方面的研究工作.

E-mail: luckylcc079@126.com



赵拥军 男,1964年11月出生于河南省新乡市.信息工程大学教授,博士生导师,《电子测量与仪器学报》编委,中国电子学会电子测量与仪器分会委员,中国电子学会高级会员,中国图像图形学会会员.主要从事雷达与信息信号处理、空间目标探测与定位、电子对抗等方面的研究工作.

E-mail: zhaoyjzz@163.com

刘亚奇 男,1990年9月出生于河南省商丘市.硕士研究生,主要从事阵列信号处理方面的研究工作.

E-mail: skylar1235@126.com

杨静 女,1986年10月出生于河南省南阳市.硕士,工程师.主要从事通信与信息信号处理、电子对抗等方面的研究工作.

E-mail: yangjing1028@126.com