



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109655801 A
(43)申请公布日 2019. 04. 19

(21)申请号 201811349313.2

(22)申请日 2018.11.14

(71)申请人 上海无线电设备研究所
地址 200090 上海市杨浦区黎平路203号

(72)发明人 李亚军 王卓群 郭冬梅 王树文

(74)专利代理机构 上海元好知识产权代理有限公司 31323

代理人 张妍 刘琰

(51)Int. Cl.
G01S 7/41(2006.01)

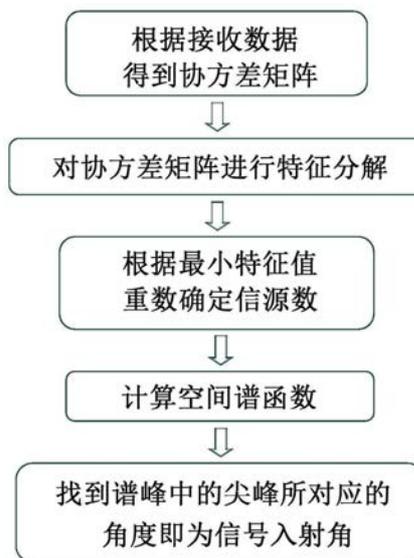
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,包含:S1、根据雷达导引头的接收数据得到协方差矩阵;S2、利用改进的ESPRIT算法对协方差矩阵进行特征值分解,具体为:S21、对协方差矩阵进行广义特征值变换,使Lanczos算法收敛于最小特征值;S22、采用Lanczos算法,通过多次迭代对协方差矩阵进行变换,得到三对角矩阵;S23、采用带原点位移的QR算法,对三对角矩阵进行特征值分解,得到最小特征值;S3、根据最小特征值的重数确定信源数;S4、计算空间谱函数;S5、找到空间谱函数的谱峰所对应的角度,即为信号入射角度。本发明在天线孔径有限的情况下实现主波束内多个目标的分辨,有效减少计算量,提高处理速度。



1. 一种基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,其特征在于,包含以下步骤:

S1、根据雷达导引头的接收数据得到协方差矩阵;

S2、利用改进的ESPRIT算法对协方差矩阵进行特征值分解;具体为:

S21、对协方差矩阵进行广义特征值变换,使Lanczos算法收敛于最小特征值;

S22、采用Lanczos算法,通过多次迭代对协方差矩阵进行变换,得到三对角矩阵;

S23、采用带原点位移的QR算法,对三对角矩阵进行特征值分解,得到最小特征值;

S3、根据最小特征值的重数确定信源数;

S4、计算空间谱函数;

S5、找到空间谱函数的谱峰所对应的角度,即为信号入射角度。

2. 如权利要求1所述的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,其特征在于,所述的S1和S2中,均采用多处理器进行并行处理。

3. 如权利要求2所述的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,其特征在于,所述的S21中,具体包含以下步骤:

所述的协方差矩阵为 $M \times M$ 阶的非对称矩阵A和B,其广义特征值的分解可表示为:

$$Ax = \lambda Bx \quad (1)$$

通过变换矩阵A得到:

$$A^{-1}Bx = (1/\lambda)x \quad (2)$$

其中,式(2)中变换后的特征值与式(1)中原来的特征值互为倒数。

4. 如权利要求3所述的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,其特征在于,所述的S22中,具体包含以下步骤:

选取两个双正规化单位向量 w_1 和 v_1 ,使得 $w_1^H B v_1 = 1$;

设定 α_j 、 β_j 和 δ_j 分别为构成三对角矩阵T的系数,且当 $j=1$ 时, $\delta_1 w_0 = 0$, $\beta_1 v_0 = 0$;

当 $j=1, 2, \dots, n$ 且 $n \leq M$ 时,采用Lanczos算法进行以下迭代计算:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{j+1} &= A^{-1} B v_j - \alpha_j v_j - \beta_j v_{j-1} \\ \bar{w}_{j+1} &= A^{-H} B^H w_j - \alpha_j w_j - \delta_j w_{j-1} \\ \alpha_j &= w_j^H B A^{-1} B v_j \\ \delta_{j+1} &= |\bar{w}_{j+1}^H B \bar{v}_{j+1}|^{1/2} \\ \beta_{j+1} &= \delta_{j+1} \text{sign}(\bar{w}_{j+1}^H B \bar{v}_{j+1}) \\ v_{j+1} &= \bar{v}_{j+1} / \delta_{j+1} \\ w_{j+1} &= \bar{w}_{j+1} / \beta_{j+1} \end{aligned} \quad (3)$$

当完成 n 次迭代计算之后,得到 n 个Lanczos向量对 $A^{-1}B$ 进行双正交变换,从而得到 n 阶三对角矩阵T为:

$$T = W^H A^{-1} B V;$$

$$W^H = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]^H;$$

$$V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n];$$

$$W^H V = I;$$

其中, I 表示单位矩阵;并据此计算得到三对角矩阵 T 为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_2 & & & \\ \delta_2 & \alpha_2 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & \delta_n & \alpha_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,三对角矩阵 T 的系数 α_j 、 β_j 和 δ_j 通过上述式(3)计算得到。

5.如权利要求4所述的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,其特征在于,所述的S22中,进一步包含正交化处理,确保迭代过程中向量 \mathbf{v}_{j+1} 和 \mathbf{w}_{j+1} 的正交性。

6.如权利要求5所述的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,其特征在于,所述的S22中,采用施密特正交化方法进行正交化处理,具体为:

设定门限为 ε ;

设定迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 为:

$$\begin{cases} m_{ij} = \mathbf{w}_i^H \mathbf{B} \mathbf{v}_{j+1} \\ n_{ij} = \mathbf{v}_i^H \mathbf{B} \mathbf{w}_{j+1} \end{cases};$$

当本次迭代计算中的迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 小于等于 ε 时,继续进行迭代计算;当本次迭代计算中的迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 大于 ε 时,对向量 \mathbf{v}_{j+1} 、 \mathbf{w}_{j+1} 进行正交化处理得到:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{j+1} \leftarrow \mathbf{v}_{j+1} - \sum_{i=1}^j m_{ij} \mathbf{v}_i \\ \mathbf{w}_{j+1} \leftarrow \mathbf{w}_{j+1} - \sum_{i=1}^j n_{ij} \mathbf{w}_i \end{cases}.$$

7.如权利要求4所述的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,其特征在于,所述的S23中,具体为:对三对角矩阵 T 进行多次平面旋转变换,产生三对角矩阵序列 $\{T_k\}$,进行多次迭代使 T_k 趋于对角阵 Σ ,其中,对角阵 Σ 的主对角线上的元素即为三对角矩阵 T 的最小特征值。

基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种雷达导引头的测角方法,具体是指一种基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,属于相控阵雷达导引头的测角技术的技术领域。

背景技术

[0002] 目前,末制导雷达已从机械扫描逐步发展到相控阵体制。相控阵雷达的导引头是精确制导的研究热点及发展趋势,成为未来导引头发展的主要方向之一,是新一代导引头的标志(多采用有源相控阵体制)。

[0003] 数字阵列雷达导引头是现有的模拟相控阵雷达导引头的后续发展方向。数字阵列雷达导引头取消了模拟相控阵雷达导引头的模拟移相器单元、功分网络和差器等部件,采用全数字接收方式将微波信号转换为数字信号。不同于传统的单脉冲测角技术无法实现和波束主瓣内多目标分辨的问题,数字阵列雷达导引头能够通过阵列信号处理中的角度超分辨估计技术,从而实现同波束内多目标的分辨,并突破了瑞利极限的约束条件,提高导引头对编队入侵目标、拖曳式干扰目标、密集目标的分辨能力,避免传统机扫和模拟相控阵导引头的测角体制无法测量波束内单个以上目标角度的缺陷,显著提高雷达导引头的作战性能和抗干扰能力。

[0004] 多重信号分类(MUSIC)算法和旋转不变(ESPRIT)算法是较为典型的空谱估计方法,这两种算法的提出大大推动了空谱估计算法的发展。然而这两种算法在实际相控阵雷达导引头的应用中存在计算量大、不适于实时处理、以及单次快拍条件下估计精度不高的问题。为了解决这些问题,并行化高效空谱估计算法就成为了阵列信号测向技术领域的研究热点之一。

[0005] 以MUSIC算法和ESPRIT算法为代表的特征分解类算法具有较高的角度分辨力和分辨精度。但由于这类算法均需要进行特征分解,在实现过程中计算量较大,从而限制了其在对实时性要求较高的场合的应用。MUSIC算法计算空谱需要进行特征分解,并对方向矢量进行扫描。ESPRIT算法由于不需要进行方向矢量的扫描即可求得信号的入射方向,计算量相对于MUSIC算法要小一些。但由于要进行一次特征分解和一次广义特征分解,ESPRIT算法的计算量仍然很大,现有的系统处理速度很难满足实际应用的需要。因此,ESPRIT算法的快速实现对于促进该算法的广泛应用有着十分重要的意义。

[0006] 专利申请CN201310300941.2,公布了一种基于ESPRIT算法的机载雷达近程杂波抑制方法,主要解决机载雷达非正侧视阵由于近程杂波导致STAP处理杂波抑制性能下降的问题。本发明能够有效地抑制近程杂波,提高了空时自适应处理的性能,可用于对机载雷达非正侧视阵近程杂波的抑制。

[0007] 专利申请CN201610905419.0,公布了一种通用基于扩展ESPRIT技术的空谱估计方法,该方法利用输出的角度估值以及对应的特征值就可以计算出新定义的通用ESPRIT空谱,并且当且仅当在真实信号入射角度处该通用ESPRIT空谱具有一个谱峰,因此在参数空间中搜索通用ESPRIT空谱的谱峰就能得到空间信号的波达方向估计。

[0008] 论文《一种基于ESPRIT的改进算法》中,不需要对来波信号的协方差矩阵进行广义特征值分解,就可以实现对目标波达方向的高分辨估计,理论分析和仿真结果证明了该改进算法的有效性和可行性。

[0009] 论文《一种基于广义特征向量的改进ESPRIT测向算法》中,充分利用了信号子空间的旋转不变特性,通过利用信号子空间与阵列流形的关系进行波达方向估计,实验证明该算法能够在保持小计算量的优势下达到与MUSIC算法相近的性能。

[0010] 论文《一种改进的二维ESPRIT算法》中,针对二维旋转不变子空间算法在求解信号时协方差矩阵存在阵列冗余问题,提出一种改进后的二维ESPRIT算法。该算法利用阵列结构原理构造2个互相关矩阵,然后由合并的特殊大矩阵进行奇异值分解来估计信号子空间,最后利用2D-ESPRIT方法实现二维测向。该算法估计精度高,计算量小,通过空间平滑后既能对相干信号进行估计,也能同时估计非相干信号。

[0011] 基于上述,本发明提出一种基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,以解决现有技术中存在的缺点和限制,并且该方法尚未被相关专利或论文公开。

发明内容

[0012] 本发明的目的是提供一种基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,在天线孔径有限的情况下实现主波束内多个目标的分辨,有效减少计算量,提高处理速度。

[0013] 为实现上述目的,本发明提供一种基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,包含以下步骤:

[0014] S1、根据雷达导引头的接收数据得到协方差矩阵;

[0015] S2、利用改进的ESPRIT算法对协方差矩阵进行特征值分解;具体为:

[0016] S21、对协方差矩阵进行广义特征值变换,使Lanczos算法收敛于最小特征值;

[0017] S22、采用Lanczos算法,通过多次迭代对协方差矩阵进行变换,得到三对角矩阵;

[0018] S23、采用带原点位移的QR算法,对三对角矩阵进行特征值分解,得到最小特征值;

[0019] S3、根据最小特征值的重数确定信源数;

[0020] S4、计算空间谱函数;

[0021] S5、找到空间谱函数的谱峰所对应的角度,即为信号入射角度。

[0022] 所述的S1和S2中,均采用多处理器进行并行处理。

[0023] 所述的S21中,具体包含以下步骤:

[0024] 所述的协方差矩阵为 $M \times M$ 阶的非对称矩阵A和B,其广义特征值的分解可表示为:

$$[0025] \quad Ax = \lambda Bx \quad (1)$$

[0026] 通过变换矩阵A得到:

$$[0027] \quad A^{-1}Bx = (1/\lambda)x \quad (2)$$

[0028] 其中,式(2)中变换后的特征值与式(1)中原来的特征值互为倒数。

[0029] 所述的S22中,具体包含以下步骤:

[0030] 选取两个双正规化单位向量 w_1 和 v_1 ,使得 $w_1^H B v_1 = 1$;

[0031] 设定 α_j 、 β_j 和 δ_j 分别为构成三对角矩阵T的系数,且当 $j=1$ 时, $\delta_1 w_0 = 0$, $\beta_1 v_0 = 0$;

[0032] 当 $j=1, 2, \dots, n$ 且 $n \leq M$ 时,采用Lanczos算法进行以下迭代计算:

$$\begin{aligned}
\bar{\mathbf{v}}_{j+1} &= \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{v}_j - \alpha_j \mathbf{v}_j - \beta_j \mathbf{v}_{j-1} \\
\bar{\mathbf{w}}_{j+1} &= \mathbf{A}^{-\text{H}} \mathbf{B}^{\text{H}} \mathbf{w}_j - \alpha_j \mathbf{w}_j - \delta_j \mathbf{w}_{j-1} \\
\alpha_j &= \mathbf{w}_j^{\text{H}} \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{v}_j \\
\delta_{j+1} &= \left| \bar{\mathbf{w}}_{j+1}^{\text{H}} \mathbf{B} \bar{\mathbf{v}}_{j+1} \right|^{1/2} \\
\beta_{j+1} &= \delta_{j+1} \text{sign}(\bar{\mathbf{w}}_{j+1}^{\text{H}} \mathbf{B} \bar{\mathbf{v}}_{j+1}) \\
\mathbf{v}_{j+1} &= \bar{\mathbf{v}}_{j+1} / \delta_{j+1} \\
\mathbf{w}_{j+1} &= \bar{\mathbf{w}}_{j+1} / \beta_{j+1}
\end{aligned} \tag{3}$$

[0034] 当完成n次迭代计算之后,得到n个Lanczos向量对 $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ 进行双正交变换,从而得到n阶三对角矩阵T为:

$$[0035] \quad \mathbf{T} = \mathbf{W}^{\text{H}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{V};$$

$$[0036] \quad \mathbf{W}^{\text{H}} = [\mathbf{w}_1 \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n]^{\text{H}};$$

$$[0037] \quad \mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n];$$

$$[0038] \quad \mathbf{W}^{\text{H}} \mathbf{V} = \mathbf{I};$$

[0039] 其中,I表示单位矩阵;并据此计算得到三对角矩阵T为:

$$[0040] \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_2 & & & \\ \delta_2 & \alpha_2 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & \beta_n & \\ & & & \delta_n & \alpha_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

[0041] 其中,三对角矩阵T的系数 α_j 、 β_j 和 δ_j 通过上述式(3)计算得到。

[0042] 所述的S22中,进一步包含正交化处理,确保迭代过程中向量 \mathbf{v}_{j+1} 和 \mathbf{w}_{j+1} 的正交性。

[0043] 优选的,采用施密特正交化方法进行正交化处理,具体为:

[0044] 设定门限为 ε ;

[0045] 设定迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 为:

$$[0046] \quad \begin{cases} m_{ij} = \mathbf{w}_i^{\text{H}} \mathbf{B} \mathbf{v}_{j+1} \\ n_{ij} = \mathbf{v}_i^{\text{H}} \mathbf{B} \mathbf{w}_{j+1} \end{cases};$$

[0047] 当本次迭代计算中的迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 小于等于 ε 时,继续进行迭代计算;当本次迭代计算中的迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 大于 ε 时,对向量 \mathbf{v}_{j+1} 、 \mathbf{w}_{j+1} 进行正交化处理得到:

$$[0048] \quad \begin{cases} \mathbf{v}_{j+1} \leftarrow \mathbf{v}_{j+1} - \sum_{i=1}^j m_{ij} \mathbf{v}_i \\ \mathbf{w}_{j+1} \leftarrow \mathbf{w}_{j+1} - \sum_{i=1}^j n_{ij} \mathbf{w}_i \end{cases}。$$

[0049] 所述的S23中,具体为:对三对角矩阵T进行多次平面旋转变换,产生三对角矩阵序列 $\{\mathbf{T}_k\}$,进行多次迭代使 \mathbf{T}_k 趋于对角阵 Σ ,其中,对角阵 Σ 的主对角线上的元素即为三对角矩阵T的最小特征值。

[0050] 综上所述,本发明所提供的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,采用并行处理,通过Lanczos算法,将协方差矩阵转换为三对角矩阵,并使用带原点位移的

QR算法对其进行特征分解,使得特征分解时QR迭代的次数大大减小,在天线孔径有限情况下能够实现主波束内多个目标的分辨,在一定信噪比情况下有效分辨目标和测量目标到达角度。

[0051] 经过理论分析和仿真实验表明,本发明能大大减小ESPRIT算法本身的计算量,同时通过并行处理也能提高ESPRIT算法的处理速度,为ESPRIT算法的实时应用提供了良好的理论基础。

附图说明

[0052] 图1为本发明中的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法的流程图;

[0053] 图2为本发明中的对改进前后的ESPRIT算法的DOA估计偏差随信噪比变化的比较示意图;

[0054] 图3为本发明中的对改进前后的ESPRIT算法的DOA估计均方误差随信噪比变化的比较示意图;

[0055] 图4为本发明中的对改进前后的ESPRIT算法的运算量随循环迭代次数变化的比较示意图;

[0056] 图5为本发明中的对改进前后的ESPRIT算法的运算量随阵元数变化的比较示意图。

具体实施方式

[0057] 以下结合图1~图5,通过优选实施例对本发明的技术内容、构造特征、所达成目的及功效予以详细说明。

[0058] 如图1所示,为本发明所提供的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,包含以下步骤:

[0059] S1、根据雷达导引头的接收数据得到协方差矩阵;

[0060] S2、利用改进的ESPRIT算法对协方差矩阵进行特征值分解;具体为:

[0061] S21、对协方差矩阵进行广义特征值变换,使Lanczos算法收敛于最小特征值;

[0062] S22、采用Lanczos算法,通过多次迭代对协方差矩阵进行变换,得到三对角矩阵;

[0063] S23、采用带原点位移的QR(正交三角)算法,对三对角矩阵进行特征值分解,得到最小特征值;

[0064] S3、根据最小特征值的重数确定信源数;

[0065] S4、计算空间谱函数;

[0066] S5、找到空间谱函数的谱峰所对应的角度,即为信号入射角度。

[0067] 所述的S1和S2中,均采用多处理器进行并行处理。

[0068] 所述的S21中,具体包含以下步骤:

[0069] 所述的协方差矩阵为 $M \times M$ 阶的非对称矩阵A和B,其广义特征值的分解可表示为:

$$[0070] \quad Ax = \lambda Bx \quad (1)$$

[0071] 为使后续对于特征值的计算均适用于复数域,通过变换矩阵A得到:

$$[0072] \quad A^{-1}Bx = (1/\lambda)x \quad (2)$$

[0073] 其中,式(2)中变换后的特征值与式(1)中原先的特征值互为倒数。

[0074] 由于后续采用的Lanczos算法是收敛于式(1)中的模最大的特征值,而经过上述的特征值变换后,Lanczos算法将收敛于式(2)中的模最小的特征值。

[0075] 所述的S22中,具体包含以下步骤:

[0076] 选取两个双正规化单位向量 w_1 和 v_1 ,使得 $w_1^H B v_1 = 1$;其中,上标符号H表示共轭转置;

[0077] 设定 α_j 、 β_j 和 δ_j 分别为构成三对角矩阵T的系数,且当 $j=1$ 时, $\delta_1 w_0 = 0$, $\beta_1 v_0 = 0$;

[0078] 当 $j=1, 2, \dots, n$ ($n \leq M$),采用Lanczos算法进行以下迭代计算:

$$\begin{aligned}
 \bar{v}_{j+1} &= A^{-1} B v_j - \alpha_j v_j - \beta_j v_{j-1} \\
 \bar{w}_{j+1} &= A^{-H} B^H w_j - \alpha_j w_j - \delta_j w_{j-1} \\
 \alpha_j &= w_j^H B A^{-1} B v_j \\
 \delta_{j+1} &= |\bar{w}_{j+1}^H B \bar{v}_{j+1}|^{1/2} \\
 \beta_{j+1} &= \delta_{j+1} \text{sign}(\bar{w}_{j+1}^H B \bar{v}_{j+1}) \\
 v_{j+1} &= \bar{v}_{j+1} / \delta_{j+1} \\
 w_{j+1} &= \bar{w}_{j+1} / \beta_{j+1}
 \end{aligned} \tag{3}$$

[0080] 当完成n次迭代计算之后,得到n个Lanczos向量对 $A^{-1}B$ 进行双正交变换,从而得到n阶三对角矩阵T为:

$$[0081] \quad T = W^H A^{-1} B V;$$

$$[0082] \quad W^H = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]^H;$$

$$[0083] \quad V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n];$$

$$[0084] \quad W^H V = I;$$

[0085] 其中,I表示单位矩阵;并据此计算得到三对角矩阵T为:

$$[0086] \quad T = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_2 & & & \\ \delta_2 & \alpha_2 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & \beta_n \\ & & & \delta_n & \alpha_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

[0087] 其中,三对角矩阵T的系数 α_j 、 β_j 和 δ_j , $j=1, 2, \dots, n$ ($n \leq M$)可通过上述式(3)计算得到。

[0088] 在完成这个步骤将协方差矩阵变换为三对角矩阵之后,对三对角矩阵进行特征分解的运算量,将会比对原先的协方差矩阵直接进行特征分解的运算量要小很多。

[0089] 所述的S22中,由于存在舍入误差,在迭代过程中向量 v_{j+1} 和 w_{j+1} 的正交性会逐渐丧失,因此需要进一步进行正交化处理。

[0090] 在本发明的优选实施例中,采用Gram-Schmidt(施密特)正交化方法进行正交化处理,具体为:

[0091] 设定门限 ϵ ,本实施例中优选取值 $\epsilon = 10^{-3}$;

[0092] 设定迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 为:

$$[0093] \quad \begin{cases} m_{ij} = w_i^H B v_{j+1} \\ n_{ij} = v_i^H B w_{j+1} \end{cases};$$

[0094] 当本次迭代计算中的迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 小于等于 ε 时,无需进行正交化处理,可继续进行迭代计算;当本次迭代计算中的迭代系数 m_{ij} 、 n_{ij} 大于 ε 时,需对 v_{j+1} 、 w_{j+1} 进行正交化处理,重新赋值为:

$$[0095] \quad \begin{cases} v_{j+1} \leftarrow v_{j+1} - \sum_{i=1}^j m_{ij} v_i \\ w_{j+1} \leftarrow w_{j+1} - \sum_{i=1}^j n_{ij} w_i \end{cases} \circ$$

[0096] 所述的S23中,具体包含以下步骤:

[0097] 根据S22中的式(3)和式(4)得到的三对角矩阵 T ,使用带原点位移的QR算法对其进行特征值分解,用以减速收敛,有效减小QR算法的迭代次数;这里所述的QR算法是指通过将矩阵分解成一个正规正交矩阵 Q 和一个上三角形矩阵 R 来进行特征值分解;

[0098] 选取数列 $\{\mu_k\}$;

[0099] 构造数列 $\{T_k\}$,具体为:设 $T_1 = T \in R^{M \times M}$,对 $T_k - \mu_k I$ 进行QR分解得: $T_k - \mu_k I = Q_k R_k$,据此构造一新矩阵: $T_{k+1} = R_k Q_k + \mu_k I = Q_k^H T_k Q_k$;令 $\bar{R} = R_k \dots R_2 R_1$, $\bar{Q} = Q_1 Q_2 \dots Q_k$,则有 $T_{k+1} = \bar{Q}^H T \bar{Q}$;

[0100] 其中, μ 选取 $\begin{bmatrix} \alpha(n-1, k) & \delta(n-1, k) \\ \beta(n-1, k) & \alpha(n-1, k) \end{bmatrix}$ 中最靠近 $\alpha(n, k)$ 的特征值,即:

$$[0101] \quad \mu(n, k) = \alpha(n, k) + \varphi - \text{sign} \varphi \sqrt{\varphi^2 + \beta(n-1, k) \delta(n-1, k)};$$

[0102] 其中, $\varphi = (\alpha(n-1, k) - \alpha(n, k))/2$;矩阵 Q_k 中,除了第 (i, i) , $(i, i+1)$, $(i+1, i)$ 和 $(i+1, i+1)$ 个元素外,其是一个单位矩阵,这四个元素按照下式选取:

$$[0103] \quad Q_{(k, i)}^H = \begin{vmatrix} c & t^* \\ s & c \end{vmatrix}$$

[0104] 根据上述对三对角矩阵 T 进行多次平面旋转变换而产生三对角矩阵序列 $\{T_k\}$,并进行多次迭代后,使得 T_k 趋于对角阵 Σ ,则对角阵 Σ 的主对角线上的元素即为三对角矩阵 T 的最小特征值。

[0105] 对于本发明所述的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,按照上述步骤进行仿真分析。如图2和图3所示,分别为仿真分析对改进前后的ESPRIT算法的DOA(波达方向)估计精度,随信噪比变化情况而进行的比较示意。图2给出了阵元数为9,快拍数为256,循环迭代次数为30次时,入射角为 10° 的信号DOA估计偏差随信噪比的变化情况。图3给出了阵元数为9,快拍数为256,循环迭代次数为30次时,入射角为 10° 的信号DOA估计均方误差随信噪比的变化情况。从图2和图3可以看出,改进后的ESPRIT算法的DOA估计精度比原ESPRIT算法的要稍低,在信噪比较低的情况下更明显,但是还是能基本满足实际的应用需求。

[0106] 如图4和图5所示,分别为仿真分析对改进前后的ESPRIT算法的计算量的比较示意。图4给出了阵元数为16,快拍数为20时,改进前后的ESPRIT算法的运算量与循环迭代次数之间的关系。图5给出了迭代次数为30,快拍数为20时,改进前后的ESPRIT算法的运算量与阵元数之间的关系。从图4和图5可以看出,随着循环迭代次数和阵元数的增加,计算量均

有迅速增加的趋势,但是,改进后的ESPRIT算法的运算量明显小于原ESPRIT算法的计算量,并且能够达到运算量降低一个数量级左右。

[0107] 综上所述,本发明所提供的基于双环圆阵的雷达导引头高效空间谱的测角方法,采用并行处理,通过Lanczos算法,将协方差矩阵转换为三对角矩阵,并使用带原点位移的QR算法对其进行特征分解,使得特征分解时QR迭代的次数大大减小,在天线孔径有限情况下能够实现主波束内多个目标的分辨,在一定信噪比情况下有效分辨目标和测量目标到达角度。

[0108] 经过理论分析和仿真实验表明,本发明能大大减小ESPRIT算法本身的计算量,同时通过并行处理也能提高ESPRIT算法的处理速度,为ESPRIT算法的实时应用提供了良好的理论基础。

[0109] 尽管本发明的内容已经通过上述优选实施例作了详细介绍,但应当认识到上述的描述不应被认为是对本发明的限制。在本领域技术人员阅读了上述内容后,对于本发明的多种修改和替代都将是显而易见的。因此,本发明的保护范围应由所附的权利要求来限定。

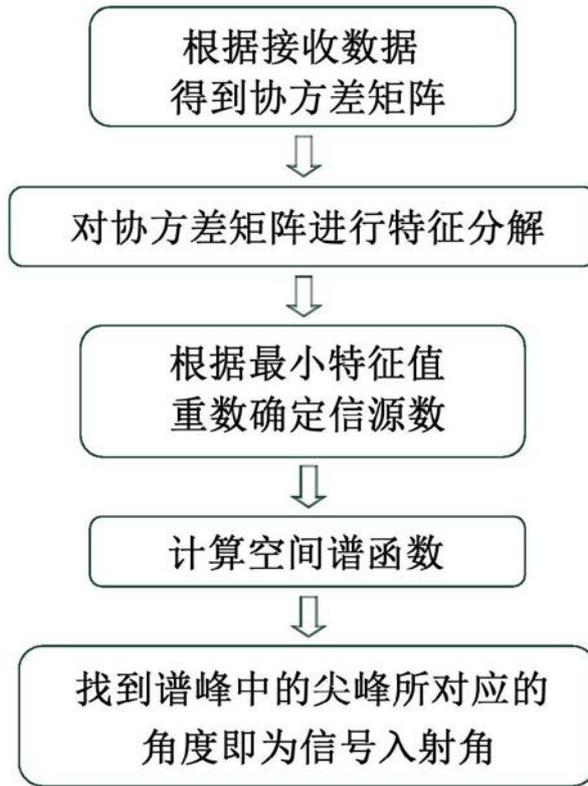


图1

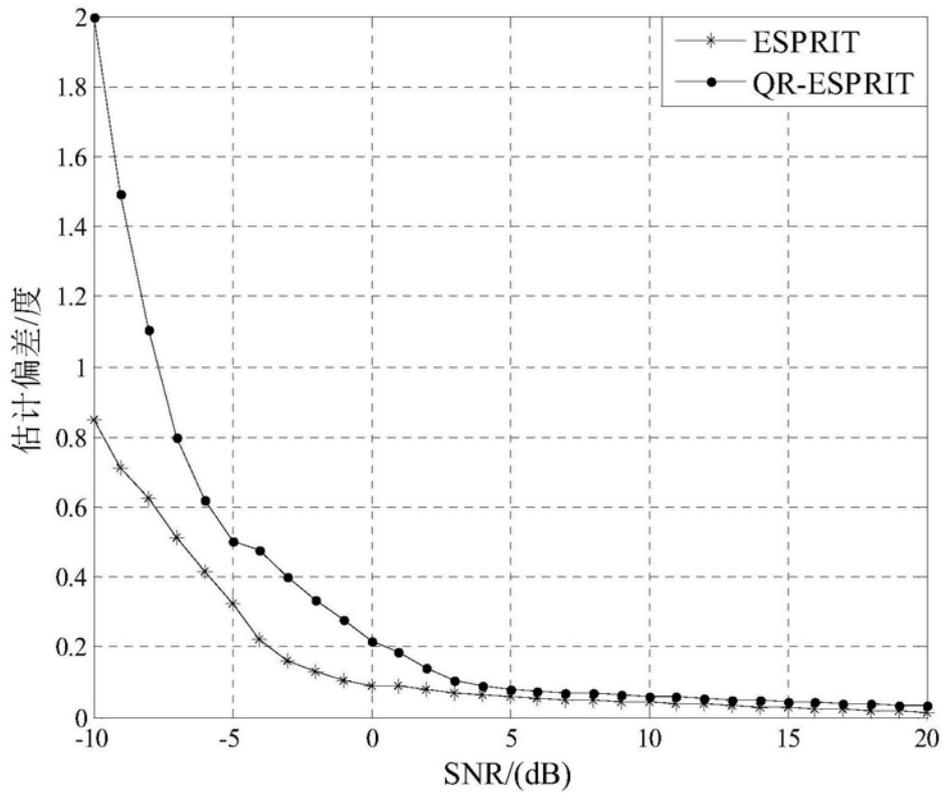


图2

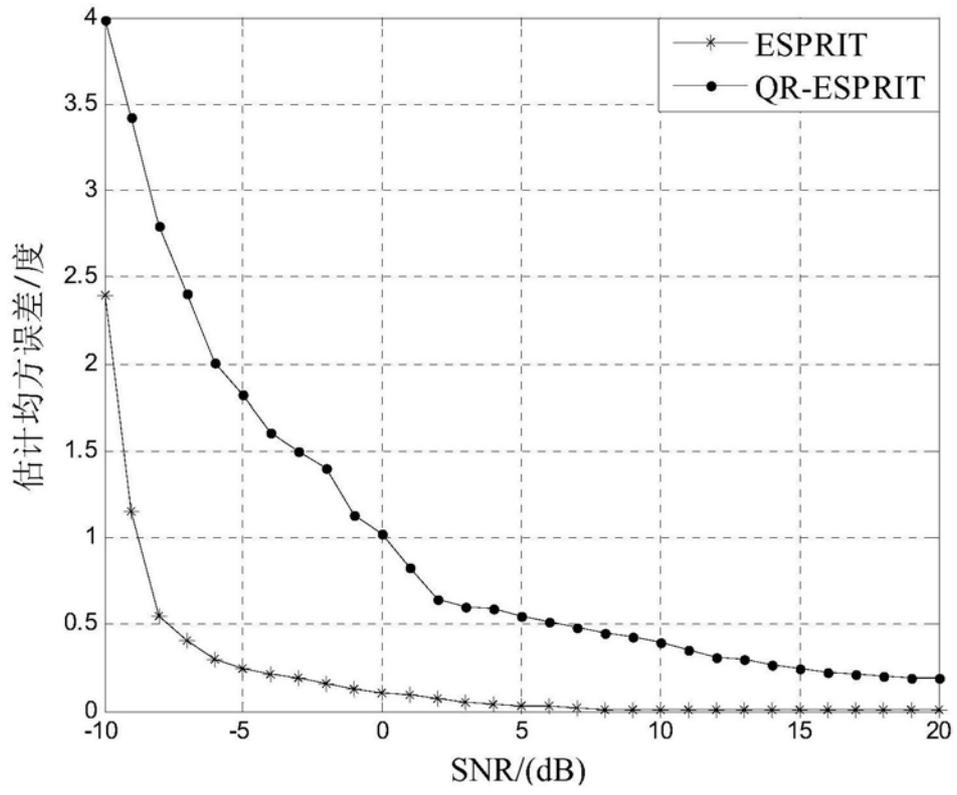


图3

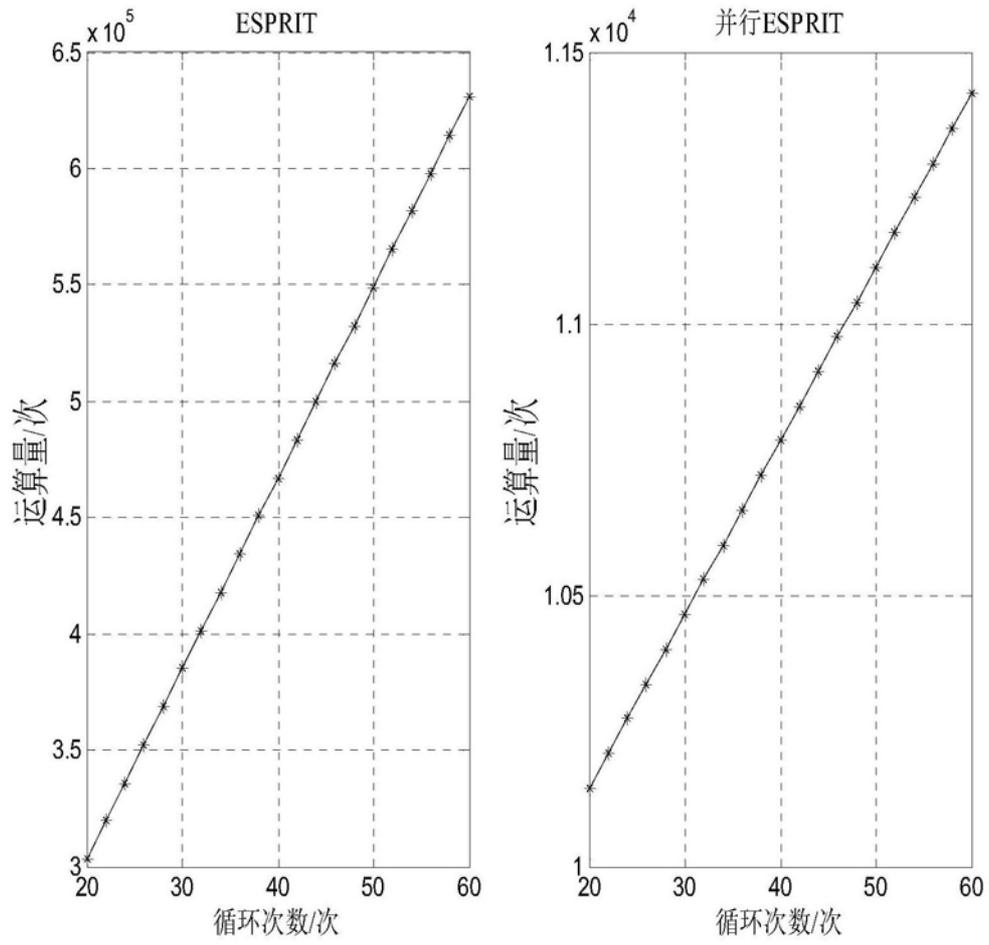


图4

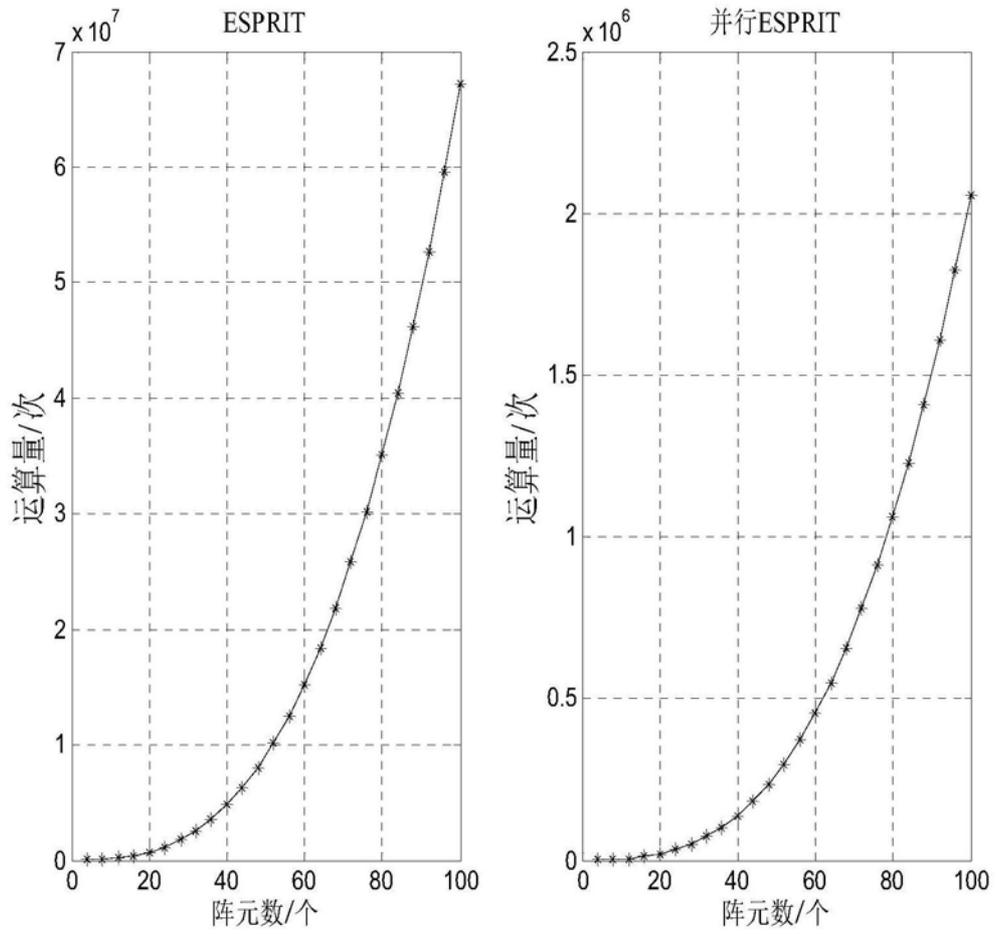


图5