

复合式均匀圆阵提高相关信号 DOA 估计性能¹

何山红 谢继东*

(南京电子技术研究所 南京 210013)

*(南京邮电学院通信工程系 南京 210003)

摘要: 为使均匀圆阵能进行相关信号的全方位 DOA 估计及提高系统性能, 论文利用基于自适应天线理论方向图综合技术的子阵构成复合式测向均匀圆阵, 再运用混合 DOA 估计方法进行 DOA 估计。仿真结果证明复合式测向均匀圆阵在一定程度上使分布区域较广的相关信号的 DOA 估计成为可能; 增加了可检测的信源数目; 提高了系统抗干扰能力及分辨率, 使系统判模糊能力增强、稳健性能增加。

关键词: 复合式圆阵, 自适应天线理论, 方向图综合, DOA 估计, 混合法

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)04-0580-06

A Compound Circular Array for Performance Improvement of DOA Estimation for Coherent Signals

He Shan-hong Xie Ji-dong*

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

*(Dept of Comm. Eng., Nanjing Univ. of Posts and Telecomn, Nanjing 210003, China)

Abstract In order to achieve circular array estimate for the DOA of coherent signals in all orientation and to improve the performances, a new estimation method is proposed in this paper. The method combines the hybrid DOA estimation algorithm and the compound circular array formed by sub-arrays that use the pattern synthesis technique based on adaptive array theory. Simulation results indicate that the new method makes the DOA estimation possible for coherent signals in all orientation in some degree. It also increases the number of estimated coherent signals, and improves the ability of resisting interference and resolution. Therefore the ambiguity is reduced and the robust is enhanced accordingly.

Key words Compound circular array, Adaptive array theory, Pattern synthesis, DOA estimation, Hybrid method

1 引言

均匀圆阵具有能实施全方位测向, 测向精度随方位角变化不明显, 中间可加校正元进行系统校正, 互耦对称等特点, 这些都是线阵无法比拟的, 但它不能直接进行相关信号的 DOA 估计, 需在空间内将其转换成虚拟线阵^[1,2]。但信号不在同一变换区域时无法实施阵列转换; 模式空间内的 DOA 估计^[3-5]可实现全方位相关信号的 DOA 估计, 但需大量接收通道, 逼近误差及微小的通道误差都将使系统失效。均匀圆阵的相关信号全方位 DOA 估计一直是难以解决的问题, 且测向系统的稳健性能也一直制约着 DOA 估计工程化的进程。

RELAX 算法利用二维搜索可进行信号波前及 DOA 估计, 所需阵元数目远远少于常规 DOA 估计算法, 对误差的敏感程度低于常规 DOA 估计算法, 但分辨率较低。本文利用子阵构成复合式测向圆阵, 首先选取每个子阵中的一个阵元组成均匀圆阵运用 RELAX 算法进行 DOA 的粗略估计; 再利用 RELAX 算法估计得到的信号波前及 DOA 估计和基于自适应天线理论的阵列方向图综合技术对子阵进行方向图综合, 先抑制部分信号, 再对其余区域在波束域内进行虚拟

¹ 2002-11-24 收到, 2003-05-27 改回

阵列转换后, 利用 SWEDE 算法结合空间平滑进行 DOA 估计。重复上述过程可以得出所有信号的 DOA 估计。仿真结果证明复合式均匀圆阵很大程度上提高了 DOA 估计系统性能。

2 工作原理

2.1 SWEDE 算法结合空间平滑实施相关信号的 DOA 估计

前后向空间平滑^[6]是相关信号 DOA 估计的预备内容, 将前、后向平滑后的信号协方差矩阵取平均得到

$$R_s^{bf} = \frac{1}{2}(R_s^f + R_s^b) \quad (1)$$

R_s^f 及 R_s^b 分别为前、后向平滑后的信号协方差矩阵。SWEDE 算法^[7]在构造信号及噪声子空间时仅需对信号协方差矩阵进行简单的线性分块处理, 构造出矩阵 $W = H(R_s^{bf})$, H 为构造函数, 再选取列满秩矩阵 D , 构造出矩阵 $V = W \times D$, 最小化下式即可求出信号来波方向 θ_a :

$$f(\theta) = \alpha^H(\theta_a) \cdot \Pi_v \cdot \alpha(\theta_a) \quad (2)$$

其中 $\Pi_v = V \cdot (V^H \cdot V)^{-1} \cdot V^H$ 。相对于常规 DOA 估计算法, SWEDE 算法可以避免求解噪声子空间时特征分解所带来的巨大运算量, 更适合在线处理。对噪声特性要求也较低, 圆阵相关信号的 DOA 估计一般情况下都得进行转换处理, 导致噪声特性复杂化, SWEDE 算法相对于其他算法可以较好地适应这一特性。

2.2 虚拟阵列转换

圆阵的阵列流形不是 Vandermonde 矩阵, 必须通过虚拟阵列转换到线性结构后才能进行前、后向空间平滑。同时虚拟阵列转换在一定程度上也可以提高分辨率。假设信号数据协方差矩阵为 R_S , 噪声数据协方差矩阵为 R_N , 真实阵列的阵列流形矩阵为 A , 虚拟阵列与真实阵列之间的变换矩阵为 B , 则虚拟阵列的数据协方差矩阵 \hat{R} 为

$$\hat{R} = B \cdot (A \cdot R_S \cdot A^H + R_N) \cdot B^H = B \cdot A \cdot R_S \cdot A^H \cdot B^H + B \cdot R_N \cdot B^H \quad (3)$$

从式 (3) 看出, 当环境噪声为白噪声时, 通过虚拟阵列转换后, 原阵列接收的白噪声变成了色噪声。此种情况下, SWEDE 算法相对于常规 MUSIC 算法可以使系统抗噪声能力得到加强, 限于篇幅, 此处不再给出仿真对比结果。

若半径为 4λ 的 5 单元均匀圆阵存在 3 个等功率相关信号 (入射角度分别为 8° , 14° , 60°), 信噪比为 60dB, 变换到阵元数为 16, 阵元间距为 0.5λ 的虚拟均匀线阵, 前、后向空间平滑时子阵数目取 14, 变换区域取 $0^\circ - 20^\circ$, 区域等分数取 40, 共取 500 次快拍利用 SWEDE 算法计算出的空间谱曲线如图 1 曲线 1。从图 1 曲线 1 看出, 由于信号不在同一变换区域, 内插阵列失效。若将变换区域扩大为 $0^\circ - 60^\circ$, 图 1 曲线 2 显示由于插值区域过大, 内插阵列同样失效。设采用某种方法将信号 3 完全去掉或减弱 30dB, 变换区域取 $5^\circ - 15^\circ$ 。或者将信号 1, 2 区域所有信号减弱 30dB, 变换区域取 $55^\circ - 70^\circ$ 。图 1 曲线 3, 4 分别显示信号 1, 2 及信号 3 均清晰可辨。利用阵列方向图综合、抑制部分信号 (暂设为虚假干扰信号) 时分方式工作在波束域可以实施圆阵相关信号的全方位高分辨 DOA 估计。

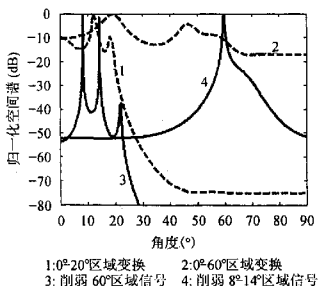


图 1 不同情况下的空间谱估计

图 1 不同情况下的空间谱估计

2.3 基于自适应阵列原理的子阵构成复合式测向圆阵

圆阵的特殊性导致许多波束形成理论都无法应用, 自适应阵列可以对干扰信号形成零点, 而对信号区域形成主波束, 反过来利用自适应阵列原理进行方向图综合可以实现波瓣控制^[6], 能适应于各种形状阵列。由自适应阵列原理, 按照下述权矢量 w 加权后可形成干扰信号的零点和主信号的最大点。

$$w = \phi_{\mu}^{-1} \cdot U_d^* \quad (4)$$

其中 $\phi_{\mu} = E\{X_{\mu}^* X_{\mu}^T\}$, X_{μ} 系所有干扰信号, U_d 系所需信号的阵列流形。在阵列自由度满足的情况下, 可以形成所需方位零点及主波束, 实际上, 由于多径等其他因素, 不可避免地存在许多微弱干扰信号, 干扰信号数目远远多于阵元数目, 且分布规律随机。阵列方向图综合的目的既希望将虚假干扰信号足够抑制, 又希望尽量抑制由多径等引起的干扰信号, 得以进行阵列方向图包络综合。在整个区域内引入若干非相关的干扰信号, 由自适应阵列原理, 干扰信号越强, 零深就越低。通过多次循环, 不断修改主波束范围及调整干扰信号电平值, 最终方向图可以收敛于一个最佳包络图。

在 DOA 估计接收通道不增多的情况下, 利用上述综合过程通过幅相加权的方法形成多个子阵作为 DOA 估计的阵元, 在子阵波束域通过时分方式在不同的信号区域进行 DOA 估计可以实现全方位相关信号的 DOA 估计。系统组成如图 2 所示:

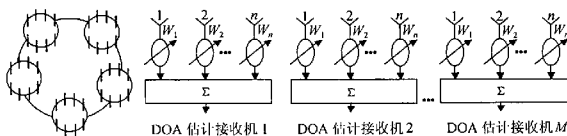


图 2 复合式 DOA 估计均匀圆阵构成示意图

图 3 显示采用半径为 2λ 的均匀 32 元圆阵为实现 2.2 节例子而进行方向图综合分别得到的两个阵列方向图, 综合时以虚假干扰信号电平值低于主瓣电平 -55dB , 其余旁瓣区域低于主瓣电平 -15dB 为优化目标, 从图 3 看出, 不但虚假干扰信号得到了抑制, 旁瓣区域信号也得到了较好地抑制。利用自适应阵列原理的方向图综合可根据 DOA 估计需要灵活、快速地形成所需信号零点及方向图包络。

2.4 RELAX 算法进行信号的粗略估计

利用波束形成技术全方位扫描是近似得到所有目标分布的一种方法, 但不能同时得到所有目标的分布信息, 且受波束形状制约, 容易形成虚假目标。RELAX 算法是常用的一种数学处理方法, 也可以应用于 DOA 估计^[9], 它既能解决非相关信号, 也能解决相关信号的 DOA 估计问题。它无须利用信号的协方差矩阵, 对快拍数目要求不如常规算法多, 要求接收通道数目也不如常规算法多, 相对而言分辨率较低。但相对于波束扫描测向系统分辨率要高的多, 能同时实现多目标测向。估计的空间谱形状及信号波前能作为识别信号特征的信息, 估计的信号波前及 DOA 估计也是阵列方向图综合的前提条件。2.2 节例子在每个子阵中选取同样位置的一个阵元构成半径为 2λ 的 5 元均匀测向圆阵, 信号数目设为 3, 全方位搜索 (0.5° 搜索步进) 估计出的 DOA 值分别为 $11^\circ, 60^\circ, 170.5^\circ$ 。 170.5° 区域的信号波前过于低下, 可以判断为虚假信号, 没有得出正确的 DOA 估计。将其中相隔很近的两个信号 ($8^\circ, 14^\circ$) 看成是一个信号, 信号数目设为 2, 全方位重新搜索, 可以近似得出信号方位为 $\theta_1 = 11^\circ, \theta_2 = 60^\circ$ 及相应的信号波前。利用 RELAX 算法估计得到的信号波前将 60° 区域信号剔除。运用 2.1 和 2.2 节内容进行 DOA 估计的结果示于图 4, 从图 4 看出, 由于 RELAX 算法估计出的信号波前精度不够, 选择的被削弱信号削弱程度不够, 不能运用 2.1 和 2.2 节内容得出正确的 DOA 估计。此时在子阵波束域的两个区域分别运用上述方法进行 DOA 估计, 重复两次可以得到所有信号的 DOA 估计。

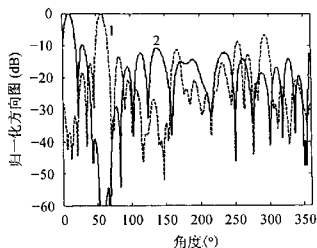
1: 抑制 8° - 14° 区域信号的波束形成2: 抑制 60° 区域信号的波束形成

图3 基于自适应理论的圆阵波束形成

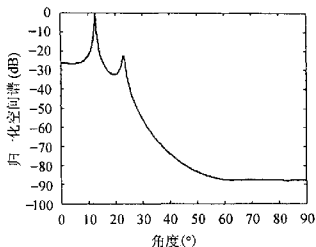


图4 利用 RELAX 算法削减部分信号后的 DOA 估计

3 性能及特性分析

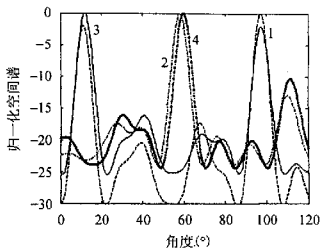
上述分析过程已清楚看出利用混合 DOA 估计算法, 结合基于自适应天线理论的波束形成技术, 一定程度上使分布区域较广的相关信号的 DOA 估计成为了可能。这是最大的贡献。同时它还可以在如下几个方面提高 DOA 估计系统性能。

3.1 增加可检测的信源数目

按照直线阵相关信号 DOA 估计阵元数目和信号数目须满足的相对关系, 如有 4 个相关信号分别从 8° , 14° , 55° , 85° 方向入射, 最理想的情况下, 阵元数目最少也得大于 6。但在上述每个子阵中选取同样位置的一个阵元构成半径为 2λ 的 5 元均匀圆阵, 利用 RELAX 算法可以得出 3 个信号 (近似将信号 1 和 2 看成一个信号) 的 DOA 估计分别为 11° , 54° , 84.5° 。再利用上述分析过程可以得出所有信号的 DOA 估计。模式空间内的 DOA 估计实际上也是一种阵列转换, 它通过 DFT 变换, 将阵元空间内的均匀圆阵变换到模式空间内的均匀线阵。相应地可以利用 DOA 估计方法进行相关信号的 DOA 估计。2.2 节例子采用半径为 2λ 的 5 元均匀圆阵, 相位模式数目取 12, 子阵阵元数目取 12, 经计算利用前后向空间平滑再加上 SWEDE 方法至少需要 31 个阵元才能得出正确的 DOA 估计。而采用上述复合式均匀圆阵只需 5 个阵元即可。

3.2 辅助判相位模糊, 减少误判现象

DOA 估计对误差敏感的特性一直是制约 DOA 估计理论工程化的主要因素, 它不但影响测向精度, 加上圆阵固有的相位模糊特性, 一定误差情况下极有可能发生误判现象^[10]。复合均匀圆阵可以灵活选取阵列口径大小, 一定程度上可以避免模糊现象发生, 同时还可以通过选取不同口径的阵列起到辅助判模糊的功能。波束形成技术也可以起到辅助判模糊的功能。举例如下: 半径为 2λ 的 5 元均匀圆阵, 2 个等功率相关信号, 信号 1, 2 入射角度分别为 12° , 60° , 在信噪比 $\text{SNR}=10\text{dB}$, 50 次快拍时, 图 5 曲线 1, 2 分别给出了运用 RELAX 算法计算得到的信号 1, 2 的空间谱曲线。从图 5 曲线 1 看出: 信号 1 (12°) 误判到 97° , 从图 5 曲线 2 看出信号 2 测向角度为 57.5° 。利用子阵的方向图综合将主波束分别指向信号 1 空间谱中的两个主要峰值点 (97° , 12°) 附近区域, 借助于波束域实际接收电平可以正确判定信号 1 所在区域。将信号 1 搜索范围设定为 $0^{\circ}-40^{\circ}$ 范围区域后重新利用 RELAX 算法计算出的空间谱曲线分别示于图 5 曲线 3, 4。从图 5 曲线 3, 4 看出: 波束域辅助判模糊的功能不但正确得到了信号 1 的正确估计, 同时也提高了信号 2 的测向精度 (从以前估计出的 57.5° 变化到了 60°)。



1:发生模糊时的信号1 2:发生模糊时的信号2
3:未发生模糊时的信号1 4:未发生模糊时的信号2

图5 RELAX算法得到的信号空间谱曲线

3.3 抗外界干扰能力增强, 测向精度提高

为比较阵元域及波束域系统抗外界干扰信号的能力, 2.2节阵列2个等功率相关信号(分别从 8° 及 14° 入射), 设在 $40^\circ - 100^\circ$ 范围内等间距存在60个相关干扰信号, 每个天线上接收到的干扰信号电平相对于主信号电平的比值在 $[-\infty, \delta]$ 范围内随机分布, 表1给出了快拍数取100, 阵元域及图3所示波束域内的系统测向精度随干扰信号最大值变化的统计结果。从中看出, 复合均匀圆阵具有较强的抗外界干扰能力, 同样情况下可以提高测向精度。

表1 不同干扰情况下阵元域、波束域测向精度

最大干扰电平 δ (dB)	-26	-30	-37	-40	-42	-46	-57	-60	-62	-66	-74	-80	-82
阵元域测向精度($^\circ$)	1.69	1.67	1.70	1.60	1.56	1.33	0.38	0.18	0.26	0.37	0.43	0.44	0.44
波束域测向精度($^\circ$)	0.90	0.25	0.09	0.35	0.38	0.42	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44

3.4 通道误差情况下的系统稳健性能分析及对比

系统误差是影响与制约DOA估计系统性能的主要因素之一, 不同DOA估计方法的误差分析是相当复杂的。为比较文中阵元域、波束域及模式空间内系统对误差的敏感程度, 下面以通道误差为例简要给出阵元域及波束域、模式空间内阵列转换后的信号协方差矩阵随通道误差变化的表达式, 并给出相应的DOA估计结果。

设通道误差矩阵

$$G = \text{diag}(g_1 e^{j\phi_1}, g_2 e^{j\phi_2}, \dots, g_N e^{j\phi_N}) \quad (5)$$

设阵列噪声为空时平稳白噪声, G 阵元域内阵列转换后的信号协方差矩阵由式(3)得

$$R = T \cdot G \cdot A \cdot R_S \cdot A^H \cdot T^H + T \cdot \delta_n^2 \cdot I \cdot T^H \quad (6)$$

T 为转换矩阵, A 为圆阵的阵列流形。波束域内的子阵列信号输出:

$$y = G \cdot H \cdot S + n, \quad H = \sum_{i=1}^M \tilde{B}_i, \quad \tilde{B}_i = (b(i, 1), b(i, 2), \dots, b(i, d)) \quad (7)$$

$b(i, d)$ 为子阵列阵列流形矢量。波束域阵列转换后的信号协方差矩阵:

$$R = T \cdot A \cdot G \cdot H \cdot R_S \cdot (T \cdot A \cdot G \cdot H)^H + T \cdot A \cdot \delta_n^2 \cdot (T \cdot A)^H \quad (8)$$

模式空间内阵列转换后的信号输出

$$x = T \cdot (AS + n) = T \cdot A \cdot S + T \cdot n = \tilde{A} \cdot S + T \cdot n \quad (9)$$

其中 $T = J^{-1} F^H / N$, $F^H = [\omega_{-M} \dots \omega_{+M}]$, $\omega_m = [1, e^{-j2\pi m/N}, \dots, e^{-j2\pi m(N-1)/N}]^T$

$$J = \text{diag}[j^{-M} J_{-M}(-\beta), j^{-M+1} J_{-M+1}(-\beta), \dots, j^M J_M(-\beta)]$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} e^{-jM\theta_1} & e^{-jM\theta_2} & \dots & e^{-jM\theta_d} \\ e^{-j(M-1)\theta_1} & e^{-j(M-1)\theta_2} & \dots & e^{-j(M-1)\theta_d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{jM\theta_1} & e^{jM\theta_2} & \dots & e^{jM\theta_d} \end{bmatrix}$$

计入通道误差则模式空间内的信号协方差矩阵:

$$R = T \cdot G \cdot A \cdot R_S \cdot A^H \cdot G^H \cdot T^H + T \cdot \delta^2 \cdot I \cdot T^H \quad (10)$$

由式(6), 式(8)及式(10)看出: 3种情况下的通道误差及随机噪声对信号协方差的影响是不同的。表2给出2.2节阵列2个等功率相关信号(分别从 10° 及 13° 入射), 不考虑随机噪声, 通道相位误差在 $[-\delta, +\delta]$ 范围内随机分布情况下的测向精度。从中看出: 波束域内相对于阵元域内测向系统抗通道误差的能力要强, 但相对于相位模式空间内的DOA估计抗通道误差的能力要差, 但相位模式空间内的DOA估计是以牺牲大量DOA估计接收机为代价的。

表2 不同通道误差下降元域、波束域、模式空间测向精度(×表示误判)

最大相位误差 $\times 10^{-3}$ ($^\circ$)	600	500	400	300	100	80	60	40	20	10	8	6
模式空间测向精度 ($^\circ$)	×	0.37	0.21	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
阵元域测向精度 ($^\circ$)	×	×	×	×	×	×	0.60	0.32	0.10	0.06	0.05	0.00
波束域测向精度 ($^\circ$)	×	×	×	×	0.56	0.37	0.13	0.05	0.02	0.01	0.00	0.0

4 结论

混合DOA估计算法结合复合式测向均匀圆阵, 充分利用了RELAX算法及SWEDE算法和基于自适应天线理论的方向图综合技术的特点, RELAX算法得到的信号波前及DOA估计为子阵方向图综合提供了前提条件, 基于自适应天线理论的方向图综合技术方便、灵活的特点使其更适合与DOA估计理论相结合应用于圆阵测向系统, SWEDE算法较好地适应了圆阵DOA估计噪声的特征。复合式均匀圆阵便于非同一直换区域的相关信号进行虚拟阵列转换, 一定程度上使全方位信号的DOA估计成为了可能, 增加了可检测的信源数目, 可灵活选择阵列口径大小及波束辅助判模糊的功能进一步加强了阵列的稳健性能、抗外界干扰及系统误差的能力增强、测向精度及分辨率得到了提高, 很大程度上改善了相关信号均匀圆阵DOA估计的性能。

参 考 文 献

- [1] Reddy K M, Reddy V U. Analysis of interpolated arrays with spatial smoothing. *Signal Processing*, 1996, 54(4): 261-272.
- [2] Friedlander B, Weiss A J. Direction finding using spatial smoothing with interpolated arrays. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1992, 28(2): 574-587.
- [3] Eiges R, Griffiths H D. Mode-space spatial spectral estimation for circular arrays. *IEE Proc.-Radar, Sonar, Navig.*, 1994, 141(6): 300-306.
- [4] Mati W, Jacob S. Direction finding of coherent signals via spatial smoothing for uniform circular arrays. *IEEE Trans. on AP*, 1994, 42(5): 613-619.
- [5] Tewfik A H, Hong W. On the application of uniform linear array bearing estimation techniques to uniform circular arrays. *IEEE Trans. on SP*, 1992, 40(4): 1008-1011.
- [6] Shan T, Wax M, Kailath T K. On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals. *IEEE Trans. on ASSP*, 1985, 33(4): 806-811.
- [7] Eriksson A, Stoica P, Soderstrom T. On-line subspace algorithms for tracking moving sources. *IEEE Trans. on SP*, 1994, 42(5): 2319-2329.
- [8] Olen C A, Compton Jr. R T. A numerical pattern synthesis algorithm for arrays. *IEEE Trans. on AP*, 1990, 38(10): 1666-1676.
- [9] Li J, Zheng D, Stocia P. Angle and waveform estimation via RELAX. *IEEE Trans. on AES*, 1997, 39(10): 1077-1087.
- [10] 何山红, 朱旭东. 宽频带干涉仪测向圆阵中的互耦效应. *电波科学学报*, 2002, 17(5): 543-548.

何山红, 男, 1973年生, 工程师, 在职硕士生, 从事于宽频带天线设计、阵列天线信号处理和数值电磁场计算。
 谢继东, 男, 1956年生, 教授, 主要研究方向为天线理论及卫星通信系统。