

估计的问题,这也是雷达、声呐等许多领域的重要问题之一。DOA 估计的基本问题是确定同时处在空间中某一区域内多个感兴趣的信号的空间位置,即各个信号到达阵列参考阵元的方向角,简称波达方向。估计的分辨率取决于阵列长度,阵列长度确定后,其分辨率也就确定了,称为瑞利限。超瑞利限的方法称为超分辨率方法。

最早的超分辨 DOA 估计方法是著名的 MUSIC 算法(以及其改进算法^[50-54])和 ESPRIT 算法,它们同属特征结构的子空间方法。子空间方法建立在这样一个基本观察之上:若传感器数比信源数多,则阵列数据的信号分量一定位于一个低秩的子空间,在一定条件下,这个子空间将唯一确定信号的波达方向,并且可以使用数值稳定的奇异值分解精确地确定波达方向。由于把线性空间的概念引入到了 DOA 估计中,因此子空间方法实现了波达方向估计分辨率的突破。近年来,科技人员从各个方面发展和完善了子空间方法。一些学者提出加权子空间拟合方法^[55-59],该方法根据一些准则构造子空间的加权矩阵,并重新拟合子空间,以达到某种性能指标的最优。但是,加权子空间拟合方法在构造加权矩阵时,需要参数寻优,因此计算复杂、通用性差。殷勤业等提出了波达方向矩阵法^[60],此方法先根据阵列输出的协方差矩阵的性质构造波达方向矩阵,然后对波达方向矩阵进行特性分解,可以直接获得空间谱的全部信息,从而完全避免了多项式搜索,减小了计算量。另外,此方法属于二维参数估计方法,可以同时估计信号的二维方向角。波达方向矩阵法由于具有计算量小、参数能够自动匹配等特点,引起了人们的重视。文献[61-62]利用波达方向矩阵法,实现了信号频率和波达方向的同时估计。但是,波达方向矩阵法也存在一些缺点,如不允许任意两个信源有相同的二维方向角,否则算法将出现病态,该问题被称为“角度兼并”问题。因此,金梁和殷勤业提出了时空 DOA 矩阵方法^[63-64],该方法在保持原波达方向矩阵法无须搜索二维谱峰和参数自动配对等优点的基础上,利用阵元输出之间的互相关关系将空域的阵列观测数据变换到时空域,解决了“角度兼并”问题,并且适用于阵元排列不规则的阵列。

基于高阶累积量的空间谱估计方法。由于高阶累积量对高斯噪声不敏感,因此有一些学者利用阵列输出的高阶累积量(通常是四阶累积量)代替二阶累积量进行空间谱估计^[65-66]。利用高阶累积量估计空间谱的好处是合成阵列的阵元数较实际阵元数多,即具有阵列扩展特性。但是,高阶累积量对非高斯噪声无能为力,并且计算量较大。

基于周期平稳性的空间谱估计方法。大部分人造信号具有周期平稳性,具有相同循环频率的信号有可能循环相关,具有不同循环频率的信号循环互相关为零。Gardner 首先用循环互相关矩阵代替互相关矩阵,通过信号子空间拟合进行波达方向估计^[67],此方法的主要优点是抑制干扰信号和噪声能力强,具有信号选择能力,并可增加阵列容量。目前,在雷达系统中,随着反隐身要求及对目标高分辨率要求的不断提高,窄带信号的假设已经不符合实际情况。谱相关空间拟合方法^[68]较好地解决了宽带问题。SC-SSF 方

法先通过对阵列各阵元输出信号进行循环自相关运算,得到一个基于循环自相关的信号模型,然后利用 MUSIC 算法实现对信源的波达方向估计。文献[69]在此基础上将该方法扩展到相干源的波达方向估计中。文献[70]将循环谱进行加权处理,得到了基于循环平稳特性的源信号到达角估计方法。文献[71]提出了基于循环互相关的非相干源信号方向估计方法。这些方法都是对谱相关空间拟合方法的改进。金梁等经过进一步研究,提出了广义谱相关子空间拟合 DOA 估计方法^[72],此方法将主要的循环平稳 DOA 估计方法统一起来,并揭示它们之间的内在联系。循环平稳 DOA 估计方面的新研究成果仍在不断出现^[73-74]。

基于空时频三维子空间的空间谱估计方法。随着阵列信号处理理论研究的不断深入,非平稳信号的波达方向估计成为阵列信号处理领域研究的重点内容。在实际应用中,许多典型信号是非平稳的或谱时变的,而传统的子空间波达方向估计方法是针对平稳信号的。因此,利用传统的子空间波达方向估计方法对非平稳信号进行 DOA 估计,显然存在先天性不足。在许多场合中,信号的一些先验知识是可以利用的。那么,如何利用信号的一些先验知识在空时频三维子空间内对信号进行处理是国内外阵列信号处理领域研究的热点问题^[75-80]。将一维时域信号映射到二维时频域中,能够在空时频三维空间中更精细、更准确地刻画和反映非平稳信号的特征和细节。利用时变滤波等方法,将一些在低维空间中难以区分,但具有不同时频特征的信号加以分离,同时有效地抑制干扰,可使得 DOA 估计方法具有信号选择性及更高的分辨率、更强的抑制干扰信号和噪声的能力。此方法适用于平稳信号和非平稳信号的 DOA 估计。

分布式信源的空间谱估计方法。在阵列成像、声源定位、海下回波探测、对流层和电离层无线电传播、低仰角雷达目标跟踪、移动通信等领域,目标信源具有分布特性。例如,在移动通信中,移动信源周围的局部散射使得同一个信源发出的信号可以通过不同的途径和角度到达接收阵列。这时,信源已不是点信源,它通常被认为是具有分布特性的角度扩展信源。基于点信源假设的高分辨 DOA 估计方法,由于未能考虑信源的空间分布信息,所以当点信源假设不再成立时,其 DOA 估计性能急剧下降。因此,扩展信源的波达方向估计也是国内外阵列信号处理领域的研究热点^[81-82]。文献[83-85]基于局部角度扩展信源的协方差矩阵模型,提出了最大似然估计方法及其简化方法。也有研究人员基于子空间思想,提出了适用于局部角度扩展信源的伪子空间加权算法^[86]和单次快拍的局部散射源参数估计算法^[87]。对多个扩展信源的情况,一些学者也提出一些方法,如基于 ESPRIT 的方法^[88]和基于协方差匹配的方法^[89]。

二维 DOA 估计。二维 DOA 估计一般采用 L 型阵列、交叉十字阵列和面阵等实现二维参数的估计。二维 DOA 估计方法包括最大似然法^[90]、二维 MUSIC 算法^[91-92]、二维 ESPRIT 算法^[93]、传播算子方法^[94-95]、高阶累积量方法^[96]和波达方向矩阵法^[60]等。

Clark 和 Scharf 于 1991 年提出了二维最大似然法^[90], 依据最大似然准则对阵列的输出数据进行时空二维处理, 以实现二维参数的估计。Wax 等^[91]提出了二维 MUSIC 算法; Hua 等^[92]提出了基于 L 型阵列的二维 MUSIC 算法。二维 MUSIC 算法是二维 DOA 估计的典型算法, 该算法可以产生渐近无偏估计, 但要在二维参数空间搜索谱峰, 计算量相当大, 限制了其在实际中的应用。Zoltowski 等^[93]提出的二维 Unitary ESPRIT 算法和二维 beamspace ESPRIT 算法将复矩阵运算转化为实矩阵运算, 降低了运算复杂度。文献[94]将传播算子方法和 ESPRIT 算法结合, 给出了一种快速的空间二维参数估计算法, 该算法无须进行任何搜索, 直接给出闭式解。文献[95]提出了基于传播算子的低复杂度二维角度估计算法, 该算法无须进行特征值分解, 具有线性复杂度。文献[96]提出了一种利用高阶累积量来实现方位角和仰角估计的方法, 该方法适用于一般的阵列几何结构, 复杂度较高。殷勤业等^[60]提出了一种波达方向矩阵法, 该方法通过对波达方向矩阵进行特征值分解, 直接得到信源的方位角与仰角, 无须进行任何谱峰搜索, 计算量小, 参数自动配对。波达方向矩阵法的缺点是需要通过双平行线阵等特殊的、规则的阵列才能实现二维 DOA 估计, 并存在“角度兼并”问题。在波达方向矩阵法的基础上, 金梁和殷勤业提出了时空 DOA 矩阵方法^[63-64], 该方法在保持原波达方向矩阵方法优点的前提下, 不需要双平行线阵, 解决了“角度兼并”等问题。MIMO 雷达目标定位问题也可表征为二维 DOA 估计问题^[97]。

阵列近场信源定位。空间信源定位根据空间中信源到阵列的距离不同可分为远场信源定位和近场信源定位。远场信源, 即信源位于阵列的远场或弗朗霍夫 (Fraunhofer) 区域, $r \gg 2D^2 / \lambda$, 其中 r 为信源到阵列参考阵元的距离, D 为阵列孔径, λ 为信号波长。由电波传播理论可知, 信源的波前曲率可忽略不计, 信源信号在空间中传播时可以看作平行波。因此, 远场信源定位是指信源的 DOA 估计。对于近场信源而言, 当信源到阵列的距离满足 $0.62(D^3 / \lambda)^{1/2} \leq r \leq 2D^2 / \lambda$ 时, 信源位于阵列的菲涅耳 (Fresnel) 区域, 信源信号到达阵列的波前时呈现球面式波形, 不能再近似为平面波, 故将其称为近场信源。当信源处于阵列的 Fresnel 区域, 即近场区域时, 空间信源定位问题不仅与信源的 DOA 有关, 还与信源到阵列的距离有关。近场信源模型既包括信源的 DOA 信息又包括距离信息, 能够更加准确地描述信源在空间中的具体位置。Swindlehurst 和 Kailath 提出了基于最大似然的近场信源参数估计方法^[98], 该方法具有优异的统计特性, 参数估计精度高, 但该方法需要对一个高度非线性的代价函数进行高维度搜索, 因此计算量巨大。Huang 和 Barkat 证明了信号子空间和噪声子空间的正交性在近场信源定位问题中依然成立^[99], 并且将远场的 MUSIC 算法推广至近场, 提出了近场信源参数估计中经典的二维 MUSIC (2D-MUSIC) 算法, 该算法需要在角度和距离两个维度中对全局空域空间谱进行搜索, 从而可以得到近场信源的角度和距离参数的估计, 参数估计精度高, 但由