

空间谱估计测向中通道失配与 阵元间互耦的一次性补偿

杨超 阮颖铮

(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

摘要 在空间谱估计测向系统中,各接收通道中的幅相失配和天线阵元间的互耦是导致测向精度和分辨率下降的主要原因.本文分析了这两种因素影响测向系统性能的机制,提出了一种可一次性补偿接收通道的幅相失配和阵元间互耦的有效方案.

关键词 测向,通道失配,阵元间互耦,补偿

1 引言

自 MUSIC 法^[1]为代表的空间谱估计测向技术问世以来,一直受到国内外学术界的高度重视.经过十多年的探讨和研究,人们已揭示出这类算法的许多优良性能,诸如高精度、超高分辨率等.在算法的理论研究和实验系统的实现中,人们发现测向系统中各接收通道的幅度和相位不一致性以及天线阵中阵元间存在的电磁耦合严重地影响着测向的精度和分辨率.如果从硬件上对它们补偿,代价是昂贵的.因此通过改进算法,从软件上补偿这两种因素的影响正成为一研究热点.但是,目前人们只是相互独立地补偿上述两种因素的影响^[2,3].而通道失配和阵元互耦在实际的测向系统中往往同时存在.因此本文提出了一种通道失配和阵元互耦的一次性补偿方案,使测向精度和分辨率得到了较大的改善.

2 问题描述

设有 D 个处于天线阵远场的窄带信号入射到阵元间距为 d 的 M 元均匀直线阵上,则第 m 个阵元的输出为

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^D s_k(t) a_m(\theta_k) + n_m(t), \quad (m = 1, 2, \dots, M), \quad (1)$$

式中 $n_m(t)$ 为第 m 个阵元和相应接收通道中的均值为零、方差为 σ^2 的复高斯白噪声; $s_k(t)$ 为第 k 个信号到达天线阵参考点的复包络; $a_m(\theta_k)$ 为第 m 个阵元对单位强度的第 k 个信号的响应.

$$a_m(\theta_k) = \exp[-j(2\pi/\lambda)(m-1)d \cos \theta_k], \quad (2)$$

将(1)式写成向量形式,有

1993-10-14 收到, 1994-01-17 定稿

杨超 男, 1964 年生, 博士生, 研究方向为自适应天线、微带天线和空间谱估计测向.

阮颖铮 男, 1939 年生, 授教, 博士生导师, 现从事天线、电磁理论、目标特性等科研和教学工作.

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t), \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) &= [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T, \\ \mathbf{S}(t) &= [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T, \\ \mathbf{N}(t) &= [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T, \\ \mathbf{A} &= [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_D)], \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{a}(\theta_i), (i = 1, 2, \dots, D)$ 是与来自 θ_i 方向信号对应的方向向量, 即 $\mathbf{a}(\theta_i) = [a_1(\theta_i), a_2(\theta_i), \dots, a_M(\theta_i)]^T$, 上标 T 表示向量的转置。

由于通道失配和阵元间互耦是各通道和天线阵的固有特性, 与来波信号无关。所以在计入通道幅相失配和阵元间互耦后, (3)式将变成

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{\Gamma}_2 \mathbf{A} \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t), \quad (4)$$

式中 $\mathbf{\Gamma}_1$ 和 $\mathbf{\Gamma}_2$ 是通道幅相不一致性和天线阵元间互耦引入的误差因子, $\mathbf{\Gamma}_2$ 实际上是对阵元负载阻抗 Z_L 归一化的阻抗矩阵 \mathbf{Z}_0 之逆^[3], \mathbf{Z}_0 可表示成

$$\mathbf{Z}_0 = \begin{bmatrix} 1 - \frac{Z_{11}}{Z_L} & \frac{Z_{12}}{Z_L} & \dots & \frac{Z_{1M}}{Z_L} \\ \frac{Z_{21}}{Z_L} & 1 + \frac{Z_{22}}{Z_L} & \dots & \frac{Z_{2M}}{Z_L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Z_{M1}}{Z_L} & \frac{Z_{M2}}{Z_L} & \dots & 1 + \frac{Z_{MM}}{Z_L} \end{bmatrix}.$$

设第 m 通道相对于第 1 通道的失配系数为 $\alpha_m = g_m e^{i\phi_m}, (m = 2, 3, \dots, M), \alpha_1 = 1$ 。因此 $\mathbf{\Gamma}_1$ 可表示成

$$\mathbf{\Gamma}_1 = \text{diag}[1, g_2 e^{i\phi_2}, \dots, g_M e^{i\phi_M}].$$

由 (4) 可知, 通道失配和阵元互耦的影响可归结为对信号方向向量的改变, 即由原来的 $\mathbf{a}(\theta_i)$ 变成 $\mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{Z}_0^{-1} \mathbf{a}(\theta_i)$ 。

通过对阵列输出相关矩阵 $\mathbf{R} = E[\mathbf{Y}(t)\mathbf{Y}^H(t)]$ 的特征分解可推得

$$(\mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{Z}_0^{-1} \mathbf{A})^H \mathbf{e}_i = 0, \quad (i = D+1, D+2, \dots, M). \quad (5)$$

(5)式表明, 由与 $M-D$ 个最小特征值 σ^2 对应的最小特征向量 \mathbf{e}_i 构成的噪声子空间 \mathcal{Q}_N 与 $\mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{Z}_0^{-1} \mathbf{A}$ 的列向量正交。由于 \mathbf{R} 是埃尔米特矩阵, 所以它的各特征向量相互正交。而 \mathbf{R} 的特征方程的解又是唯一的。这样, 来波信号就归结为对应的特征值和特征向量。因此与各信号对应的方向向量所张成的子空间恰与信号子空间 \mathcal{Q}_s 重合。根据信号子空间与噪声子空间正交这一事实, 并且由于通道幅相失配和阵元互耦的影响, 与 \mathcal{Q}_N 正交的是 $\mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{Z}_0^{-1} \mathbf{a}(\theta_i), (i = 1, 2, \dots, D)$, 而不是理想情况下 (即不存在幅相失配和忽略阵元互耦) 的 $\mathbf{a}(\theta_i)$, 因此空间谱函数构造

$$P(\theta) = 1 / \|\mathbf{E}_N^H \mathbf{\Gamma}_1 \mathbf{Z}_0^{-1} \mathbf{a}(\theta)\|^2, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{E}_N = [\mathbf{e}_{D+1}, \mathbf{e}_{D+2}, \dots, \mathbf{e}_M]$ 是 \mathbf{R} 的最小特征向量为列构成的矩阵, 上标 H 表示矩阵的复共轭转置。

3 考虑互耦时的通道失配估计

对于测向系统中使用的天线阵, 通常可通过理论计算或实际测量获得较精确的阵元

自阻抗 (Z_{ii}) 和互阻抗 (Z_{ij}), 因而也就求得了阻抗矩阵 Z_0 。然而各通道的幅相失配却不易测得(特别是相位失配)。下面我们提出了一种在考虑阵元间互耦时的通道幅相失配估计方法。

设有一处于已知方向 θ_1 上的校正信号源, 对 R 作特征分解后, 其特征值 λ_i 和相应的特征向量 e_i 满足

$$(1) \lambda_i > \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_M = \sigma^2; \quad (7)$$

$$(2) E_N^H \Gamma_1 Z_0^{-1} a(\theta_1) = 0, \quad (8)$$

式中 $E_N = [e_2, e_3, \dots, e_M]$ 和 $a(\theta_1)$ 均已知, 且 $e_i = [e'_{i1}, e'_{i2}, \dots, e'_{iM}]^T$, ($i = 2, 3, \dots, M$)。令

$$Z_0^{-1} a(\theta_1) = [b_1, b_2, \dots, b_M]^T,$$

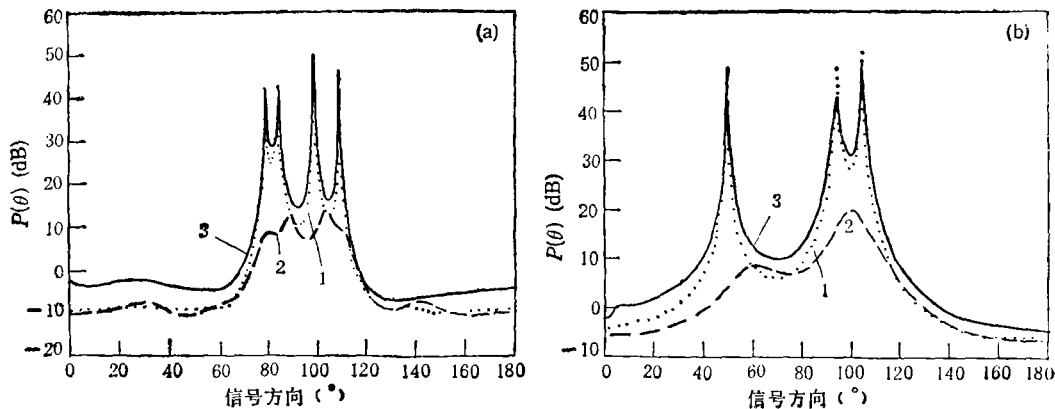
(8)式可整理成

$$\begin{bmatrix} e'_{22} & e'_{23} & \dots & e'_{2M} \\ e'_{32} & e'_{33} & \dots & e'_{3M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e'_{M2} & e'_{M3} & \dots & e'_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_2 \alpha_2 \\ b_3 \alpha_3 \\ \vdots \\ b_M \alpha_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e'_{21} b_1 \\ -e'_{31} b_1 \\ \vdots \\ -e'_{M1} b_1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中上标*表示复共轭。解此方程组可求得 α_m , ($m = 2, 3, \dots, M$), 从而估计出 Γ_1 。然后再根据(6)式, 就可同时消除通道幅相失配和阵元间互耦的影响, 实现通道失配和阵元间互耦的一次性补偿。为了避免近场的球面波前问题, 可将校正源配置在线阵的延长线上。另外文献[2]也证明了在此方向上即使校正源存在方向上的偏差, 对 Γ_1 的估计也有着很高的精度, 即 $\theta_1 = 0^\circ$ 是校正源的最佳方向。

4 模拟结果

由于中心馈电的垂直极化半波偶极子天线的互耦分析和自(互)阻抗的计算已较为成



(a) 四个信号 (SNR 均为 25dB) 来自 $80^\circ, 85^\circ, 100^\circ$ 和 110° 方向

($M = 8, d/\lambda = 0.5$)

(b) 三个信号 (SNR 均为 30dB) 来自 $50^\circ, 95^\circ$ 和 105° 方向

($M = 6, d/\lambda = 0.25$)

图 1 通道失配和阵元间互耦的影响以及补偿后 MUSIC 算法的空间谱与理想情况下的比较

曲线 1: 理想情况 曲线 2: 通道失配和阵元间互耦的影响 曲线 3: 补偿后情况

熟^[4], 因此本文将均匀直线阵的阵元取成垂直极化半波偶极子天线。在模拟计算中, 阵元半径为 0.001λ ; 阵元的负载阻抗 Z_L 为 Z_0^* ; 阵列对信号的采样数为 300; 噪声取成均值为零、方差为 1 的复高斯白噪声; 通道失配系数设为 $\alpha_m = 1.2e^{j10^\circ}$, ($m = 2, 3, \dots, M$); 校正源信号的信噪比 (SNR) 为 30dB。

由图 1 可以看出, 通道失配和阵元间互耦的影响较严重地造成了测向误差和分辨率的下降。补偿后的空间谱曲线接近理想情况的空间谱曲线。

5 结束语

影响空间谱估计测向性能的因素较多, 问题也比较复杂。本文主要是基于相关矩阵特征结构的分析, 研究了测向系统中两个主要误差因素——通道失配和阵元间互耦对测向性能的影响, 并根据它们使测向性能下降的机制, 提出了一种可一次性对其补偿的有效方案。这样, 在不需要增加硬件设备的条件下, 就可实现对通道失配和阵元互耦的补偿, 较大地改善了测向的精度和分辨率。

参 考 文 献

- [1] Schmidt R O. IEEE Trans. on AP, 1986, AP-34(3):276—280.
- [2] 李全力, 肖先赐. 电子学报, 1991, 19(2): 123—125.
- [3] 杨 超, 邱文杰. 电子科技大学学报, 1992, 21(3): 259—263.
- [4] 谢处方, 邱文杰编著. 天线原理与设计, 西安: 西安电子科技大学出版社, 1985, 36—40.

SIMULTANEOUS COMPENSATION FOR CHANNEL MISMATCHING AND MUTUAL COUPLING IN SPATIAL ESTIMATION

Yang Chao Ruan Yingzheng

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract The performance of the high resolution direction finding technique based on the spatial spectrum estimation is severely suffered with channel mismatching and mutual coupling between elements in arrays. In this paper, the mechanism of performance degradation due to above mentioned factors is analysed, and an effective method of compensation for channel mismatching and mutual coupling is proposed.

Key words Direction-finding, Channel mismatching, Mutual coupling, Compensation