

一种基于孤立源的近场互耦校准方法¹

邱晓晖

(南京航空航天大学电子工程系 南京 210016)
(东南大学毫米波国家重点实验室 南京 210018)

摘 要 本文提出一种适用于均匀线阵的互耦校准方法。该方法只需用一个位于近场的已知源即能实现有效校准,并可推广应用于均匀圆阵。同时,文中还讨论了校准源的位置误差对校准的影响,并分析了校准源应选取的最佳方位。最后,对新方法进行了仿真验证。

关键词 阵列信号处理,校准,互耦

中图分类号 TN911.7, TN951

1 引 言

与传统的到达角(AOA)估计方法相比,尽管现代超分辨估计方法具有分辨率高的优点,但由于只适用于一些特殊场合,在实际应用中局限性较大。比如,当天线阵阵元间的间距不够大时,阵元间的耦合加强,如果不进行适当补偿,则会引起 AOA 估计性能的严重下降^[1,2],这一直是学者们所关注的问题。目前,人们提出许多解决途径^[3,4],其中以 B. Fredlander^[4]提出的最具代表性。该方法可以在均匀线阵或圆阵的互耦未知的情况下获得 AOA 估计。但它存在两个无法克服的困难,其一是校准源的数目必需随阵元数目的增加而增加,其二是所采用的迭代算法的收敛速度很慢,致使计算量很大。

本文针对上述问题提出一种简便的互耦校准方法,新方法只需一个位于近场的已知校准源就可得到阵列的互耦矩阵,而且该方法无需迭代,运算量大大降低。

2 阵列互耦的近场单源校准

2.1 互耦矩阵的引入

考虑均匀线阵由 M 个阵元组成,探测到 N 个信号源,阵列的输出向量为 $\mathbf{X}(t)$,即

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{V}(t), \quad (1)$$

其中 $\mathbf{V}(t)$ 是噪声向量, $\mathbf{S}(t)$ 是信号向量, \mathbf{A} 是方向矢量 $\mathbf{a}(\theta_n)$, $n = 1, 2, \dots, N$ 构成的矩阵。互耦矩阵 \mathbf{C} 在天线各阵元间不存在互耦时为一单位矩阵。

一旦天线阵出现互耦,如不进行适当补偿而直接采用 MUSIC 等方法进行 AOA 估计,估计效果就会受到影响,甚至于无法估计。补偿或校准的实质就是消除互耦矩阵 \mathbf{C} 的影响或事先对 \mathbf{C} 进行估计。

¹ 1997-04-22 收到, 1997-10-10 定稿
东南大学毫米波国家重点实验室开放课题基金资助

2.2 利用近场孤立校准源进行互耦校准

考虑到控制近场信号源的位置相对容易, 为估计互耦矩阵 \mathbf{C} , 我们在近场引入一个位置矢量为 \mathbf{p} 的校准源, 如图 1 所示。假设校准时, 在阵列的探测范围内只有一个校准源存在, 则方向矢量矩阵 \mathbf{A} 为一矢量, 即

$$\mathbf{A} = \mathbf{a}(\theta_p) = [a_1(\theta_p) a_2(\theta_p) \cdots a_m(\theta_p)]^T, \quad (2)$$

其中 $a_m(\theta_p), m = 1, 2, \cdots, M$ 可表示为

$$a_m(\theta_p) = \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda} (|\mathbf{p} - \mathbf{l}_m| - |\mathbf{p}|)]. \quad (3)$$

上式中 λ 为信号波长, \mathbf{l}_m 是第 m 个阵元的位置矢量。信号的相关矩阵为

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{A}^H \mathbf{C}^H + \sigma_V^2 \mathbf{I}. \quad (4)$$

因为只有一个信源, 所以相关矩阵 \mathbf{R}_x 的特征值为 $\lambda_1 > \lambda_2 = \cdots = \lambda_M = \sigma_V^2$, 相应的特征向量为 $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \cdots, \mathbf{D}_M$ 。对于噪声子空间, 应有

$$\mathbf{E}_V^H \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta_p) = \mathbf{0}, \quad (5)$$

其中, $\mathbf{E}_V = [\mathbf{D}_1 \mathbf{D}_2 \cdots \mathbf{D}_M]$ 。

一般情况下, 均匀线阵的互耦矩阵 \mathbf{C} 是 Toplitz 矩阵^[4], 其第一行元素包含了所有的未知量。如果将互耦矩阵 \mathbf{C} 第一行对应的行向量用 \mathbf{c} 表示, 并假设各阵列单元自身的耦合系数为 1, 那么

$$\mathbf{c} = [1 \ c_2 \ c_3 \ \cdots \ c_M]^T. \quad (6)$$

可以证明^[4], $\mathbf{C} \mathbf{a}(\theta_p)$ 等效作

$$\mathbf{C} \mathbf{a}(\theta_p) = \mathbf{Q}(\theta_p) \mathbf{c}, \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (5) 式, 得

$$\mathbf{E}_V^H \mathbf{Q}(\theta_p) \mathbf{c} = \mathbf{0}. \quad (8)$$

\mathbf{E}_V 和 $\mathbf{Q}(\theta_p)$ 分别由噪声空间和方向矩阵决定, 均为已知, 所以根据最小二乘原理矢量的最佳估计可以由 (8) 式求出。进而, 可以得到对互耦矩阵 \mathbf{C} 的估计。对于不相干情况, 利用所估计出的互耦矩阵 $\hat{\mathbf{C}}$, 可以得到修正后的 MUSIC 算法, 其 AOA 估计公式为

$$\hat{\theta}_n = \arg \max_{\theta} (1 / \|\mathbf{E}_V^H \hat{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta)\|^2). \quad (9)$$

(9) 式即为用近场孤立源进行互耦校准的 AOA 估计方法。

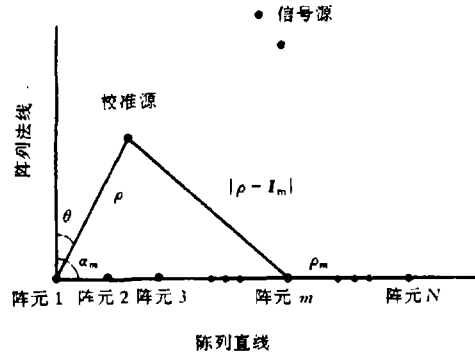


图 1 均匀线阵的近场单一源互耦校准示意图

可以证明, 该方法同样适用于均匀圆阵情况。

3 均匀线阵互耦校准源的最佳位置

校准源的位置误差将引起互耦矩阵 C 的估计误差。下面分析校准源的不同位置对 AOA 估计的影响。

尽管校准源位于阵列近场内, 但我们仍可以假设 $|l_m| \ll |p|$, 因此 $|p - l_m|$ 可以简化为

$$|p - l_m| \approx \rho - \rho_m \sin \theta + (\rho_m^2 / 2\rho) \cos^2 \theta, \quad (10)$$

上式中 (ρ, θ) 、 (ρ_m, α_m) 分别是图 1 中校准源、第 m 个阵元的极坐标, 对于均匀线阵, $\alpha_m = 90^\circ$ 。显然, (ρ, θ) 的误差将使 A 发生变化, 进而造成 C 的估计偏差。为使估计偏差最小, (ρ, θ) 应满足使 $\|\partial \mathbf{a}(\theta_p) / \partial \rho\|^2 + \|\partial \mathbf{a}(\theta_p) / \partial \theta\|^2$ 最小。因为

$$\|\partial \mathbf{a}(\theta_p) / \partial \rho\|^2 + \|\partial \mathbf{a}(\theta_p) / \partial \theta\|^2 = \sin^2 \theta \cdot \sum_{m=1}^M T_m, \quad (11)$$

其中 T_m 是 $\rho_m, \alpha_m, \rho, \theta$ 的函数, 因此, 当 $\theta = \pm 90^\circ$ 时 (11) 式达到最小。可见, 位置最佳的校准源应与线阵阵元分布在同一直线上, 此时近场校准源与远场情况等效。

4 计算机仿真结果

均匀线阵的阵元数为 10, 互耦矩阵非零, 两个等强度目标分别位于 20° 和 30° 方向上, 仿真时采用的信噪比为 10dB。图 2 给出了直接采用 MUSIC 方法估计的 AOA 结果, 两个目标根本无法区分, 图 3 给出了采用本文方法后的 AOA 估计结果, 其结果显著优于图 2 结果, 两个目标清楚分开, 而且两峰值基本对准 20° 和 30° 位置。

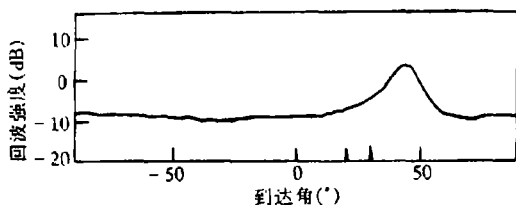


图 2 无互耦校准的 AOA 估计结果

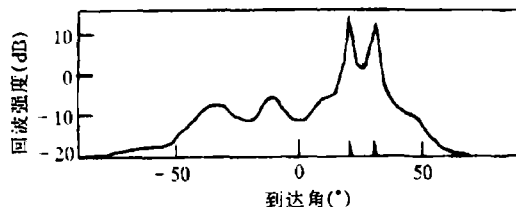


图 3 含近场孤立源互耦校准的 AOA 估计结果

为考察不同校准源位置对估计效果的影响, 令近场校准源在方位上存在 3.5° 的位置误差。采用新的互耦校准方法的 AOA 估计结果示于图 4 中。实线对应校准源置于 $\theta = 90^\circ$ 附近, 虚线对应 $\theta = 40^\circ$ 附近。可见, 前者优于后者。这证实了本文的分析结论。

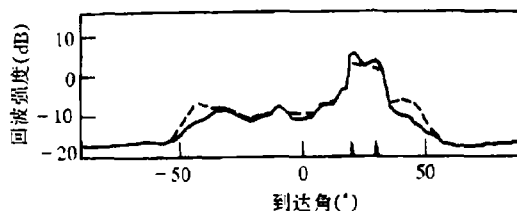


图 4 近场校准源位置不同对 AOA 估计的影响 (— 校准源位于 $\theta = 90^\circ$ 附近, --- 校准源位于 $\theta = 40^\circ$ 附近)

5 结 论

本文提出一种新的阵列互耦校准方法。与现有方法相比,该方法只需用位于近场的一个已知源、而不需用过多的校准源即可实现校准。同时,处理过程无需迭代,既简单又有效。此外,当校准源置于合适位置时,即使存在位置误差,仍可以获得较好的校准效果。仿真结果进一步验证了上述结论。

参 考 文 献

- [1] Roller C, Wasykiwskyi W. Effects of mutual coupling on super resolution DF in linear arrays. International Conference on Radar'89, France: 1989, 556-562.
- [2] Weiss A J, Friedlander B. Mutual coupling effects on phase-only direction finding. IEEE Trans. on AP, 1992, AP-40(5): 535-541.
- [3] Yeh C C, Leou M L, Ucci D R. Bearing estimations with mutual coupling present. IEEE Trans. on AP, 1989, AP-37(10): 1332-1335.
- [4] Friedlander B, Weiss A J. Direction finding in the presence of mutual coupling. IEEE Trans. on AP, 1991, AP-39(3): 273-284.

A MUTUAL COUPLING CALIBRATION BASED ON A SINGLE SOURCE IN NEAR FIELD

Qiu Xiaohui

(Dept. of Electron. Eng., Nanjing Univ. of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210018)

Abstract In this paper a mutual coupling calibration method suitable for uniform linear arrays is presented where only one known calibration source in the near field is necessary for effective calibration, which can be extended to the case of uniform circular arrays. The paper has also discussed the position error influence of the source on the calibration., and the optimum azimuth of the source is analyzed. Finally some simulation results are given to show the advantages of the new method.

Key words Array signal processing, Calibration, Mutual coupling

邱晓晖: 女, 1968年生, 讲师, 从事阵列信号处理、雷达成象等方面研究。