

高分辨率宽带相干信号波达方向的高效估计¹

雷中定 黄绣坤 张树京*

(北方交通大学信息所 北京 100044)

*(上海铁道大学电信系 上海 200331)

摘要 本文给出了一种用于多源宽带相干信号波达方向 (DOA) 估计的快速算法。它是基于信号子空间技术, 通过截取中心窄带频段数据并进行空间平滑来获得对方向的高效估计。文中最后通过计算机仿真, 与 CSM 方法进行了比较, 验证了本算法的快速、高分辨率等优良性能。

关键词 波达方向 (DOA), 相干信号, 宽带信号, 阵列信号处理

中图分类号 TN911.7

1 引言

随着通信信号处理的高精尖技术的发展, 越来越需要快速准确地估计空间宽带信号源的到达波方向 (DOA) 及其空间分布。信号子空间相关方法 (CSM)^[1] 是由 Wang 和 Kaveh 提出的一种有效宽带高分辨估计方法, 它采用离散傅氏变换将宽带阵列数据分解为若干窄带数据, 经过一种“聚焦” (focusing) 矩阵将不同频带下的方向阵变换到同一参考频带下, 再来估计 DOA。采用这种方法有两个好处: 首先, 由于它对不同频带所对应的信号空间作的是相关处理, 使得聚焦后的矩阵即使在信号源完全相干的情况下, 也能保持满秩。其次, 它的分辨率及算法复杂性都有较大改善。但是, 在采用这种算法构造聚焦矩阵时, 为了获得有关源信号方向角的初始信息, 而不得不进行耗时的预处理, 大大增加了运算负荷; 而且当信号来自于多个组群时, 预处理及聚焦阵变得很复杂, 有效性降低, 从而严重影响估计的计算速度及分辨率。

鉴于 CSM 方法存在的问题, 许多改进的算法以及类似于 CSM 的其他形式的方法不断出现^[2-6], 它们从预处理估计精度、聚焦矩阵的构造方法等方面作了不同程度的改进, 但是大多数在运算量方面没有多大的改善, 仍是以较大的运算量作为代价换得性能的改善。然而, 算法的时效性在雷达、声纳的运动目标定位, 军事打击, 移动通信, 实时通信等许多实际应用中是至关重要的, 有时甚至起着决定性的作用, 因而如何高效快速地获得宽带相干源的 DOA 估计同时保持对源信号的高分辨率将是一个十分重要而有意义的课题。本文正是基于上述考虑, 给出了一种便于实时处理的宽带相干源 DOA 估计的高效快速算法。本算法是通过直接截取包含所有方向信息的中心窄带并同时利用阵列空间组合来实现的, 其特点是低时耗, 高分辨。

2 快速算法模型

假设 D 个宽带源信号分别以不同的方向辐射到 M 元宽带传感器阵列, 源信号为远场平面波, 并具有相同带宽及中心频率 f_c , 附加宽带噪声与源信号互相独立并具有已知谱密度矩阵 (σ^2 可以未知), 阵列输出首先经过离散傅氏变换后可以分解为 J 个窄带形式的输出。当 J 取奇数时, $j = (J + 1)/2$ 所对应的窄带的中心频率恰好是宽带源的中心频率 f_c , 此时

$$\mathbf{x}(k, f_c) = \mathbf{A}(f_c)\mathbf{s}(k, f_c) + \mathbf{N}(k, f_c), \quad (1)$$

其中方向阵 $\mathbf{A}(f_c)$ 的第 i 列为

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}_i, f_c) = [e^{j2\pi f_c \mathbf{r}_i \mathbf{Z}_1/c}, e^{j2\pi f_c \mathbf{r}_i \mathbf{Z}_2/c}, \dots, e^{j2\pi f_c \mathbf{r}_i \mathbf{Z}_M/c}]^T, \quad (2)$$

¹ 1996-10-10 收到, 1997-10-10 定稿
国家自然科学基金资助项目 69372021

\mathbf{r}_i 为从参考阵元指向第 i 个源的单位方向矢量, \mathbf{Z}_m 为第 m 个阵元相对于参考点的坐标向量, c 为源信号的波速。

$\mathbf{A}(f_c)$ 是一个以 f_c 为中心的窄带方向阵, 其中仅有一个变化参量即方向矢量, 这个方向矢量包含着我们对感兴趣的所有方向信息, 因而通过提取中心频率附近的窄带方向阵 $\mathbf{A}(f_c)$ 中的方向信息即可获得宽带 DOA 的估计。

我们采用空间平滑技术^[7]来处理关于 f_c 的 M 维阵列数据, 首先将数据划分为 L 个 p 维的数据组, 即将阵列 $\{1, \dots, p\}$ 的数据形成第一组, 阵列 $\{2, \dots, p+1\}$ 的数据形成第二组, 共可得到 $L = M - p + 1$ 个组合。用 $\mathbf{x}_i(k, f_c)$ 来表示第 i 组数据, 即

$$\mathbf{x}_i(k, f_c) = \mathbf{A}_i(f_c)\mathbf{s}(k, f_c) + \mathbf{N}_i(k, f_c). \quad (3)$$

于是第 i 个数据组的空间协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{A}_i(f_c)\mathbf{R}_{SS}\mathbf{A}_i^H(f_c) + \beta\sigma^2\mathbf{I}, \quad (4)$$

其中 β 为功率补偿因子, σ^2 为噪声功率, \mathbf{I} 为 $p \times p$ 维单位矩阵, 且

$$\mathbf{R}_i = \beta E[\mathbf{x}_i(k, f_c)\mathbf{x}_i^H(k, f_c)], \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{SS} = \beta E[\mathbf{s}(k, f_c)\mathbf{s}^H(k, f_c)]. \quad (6)$$

对于均匀线性阵列, 有^[7]

$$\mathbf{A}_i(f_c) = \mathbf{A}_1(f_c)\mathbf{B}^{(i-1)}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \text{diag}(e^{-j2\pi f_c d \sin \theta_1/c}, \dots, e^{-j2\pi f_c d \sin \theta_D/c}), \quad (8)$$

其中 $\mathbf{B}^{(i-1)}$ 表示矩阵 \mathbf{B} 的 $(i-1)$ 次幂。于是利用 (4) 式和 (7) 式得

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}} &= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{R}_i = \mathbf{A}_1(f_c)\bar{\mathbf{R}}_S\mathbf{A}_1^H(f_c) + \sigma^2\mathbf{I}, \\ \bar{\mathbf{R}}_S &= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{B}^{(i-1)}\mathbf{R}_{SS}(\mathbf{B}^H)^{(i-1)}. \end{aligned} \quad (9)$$

可以证明^[7]对于任意相干信号 $\bar{\mathbf{R}}_S$ 是满秩的, 因而利用 (9) 式可得到宽带相干源的 DOA 估计。

3 计算机仿真和性能研究

仿真实验中取 $M = 16$ 的等间隔线形阵列, 此阵列的瑞利角分辨的极限值为 7.4° 。源信号在时间上是平稳的零均值带限高斯过程, 具有相同的中心频率 $f_0 = 100\text{Hz}$ 和相同的带宽 40Hz 。阵列噪声 $n(t)$ 是平稳的零均值带限 (具有与前述信号相同的带宽) 高斯过程, M 个阵元的噪声 $N_m(t) (m = 1, \dots, M)$ 之间相互独立, 且具有相同的统计特性, 另外它们与信号也是统计独立的。在每个阵元上的采样频率取为 80Hz , 总的观测时间为 $T_0 = 51.2\text{s}$, 将 T_0 分为 $K = 64$ 段, 对每一段通过不加窗的 FFT, 阵列输出被分解成 $J = 33$ 个窄带频率分量, 其中 $j = 17$ 处即为中心频段 f_c 段, 构成 $\mathbf{x}(f_c)$ 的数据是由相对于 f_c 处的 $K = 64$ 次快拍组成的。功率补偿因子 $\beta = 64$ 。三个源信号 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 和 $s_3(t)$ 分别从角度 $\theta_1 = 30.0^\circ$ 、 $\theta_2 = 33.0^\circ$ 和 $\theta_3 = 80.0^\circ$ 辐射在阵列上, 具有信噪比 $\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = 15\text{dB}$ 及 $\text{SNR}_3 = 10\text{dB}$ 。第二个源信号 $s_2(t)$ 是第一个

源信号 $s_1(t)$ 的延时, 即 $s_2(t) = s_1(t - t_0)$, 其中 $t_0 = 0.125\text{s}$; 第三个源信号 $s_3(t)$ 与 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 互不相关。入射波的最小角度间隔 $\Delta\theta = 3.0^\circ$, 低于瑞利角分辨极限的一半。

为了便于比较, 我们在图 1 中同时给出了用 CSM 方法和本文快速算法进行 DOA 估计的估计结果。其中的 CSM 方法, 先是运用传统的加窗傅里叶方法进行预处理, 得到了初

始角度 33.2° 和 78.6° , 它们被用作 CSM 方法的预估值; 对于快速算法, 阵列数据被划分为 $p = 8$ 维进行空间平滑处理。从图 1 中的估计结果可以看出, 对于来自于两个不同组群的 3 个源信号, CSM 方法已经不能够得到有效的估计, 而本文快速算法仍具有较高的分辨率。这是由于 CSM 方法在对多个组群的信号空间进行聚焦时, 其聚焦的有效性大大降低, 从而使得其分辨率下降; 而本文快速算法不受多个组群的影响, 因此仍保持着高分辨率。

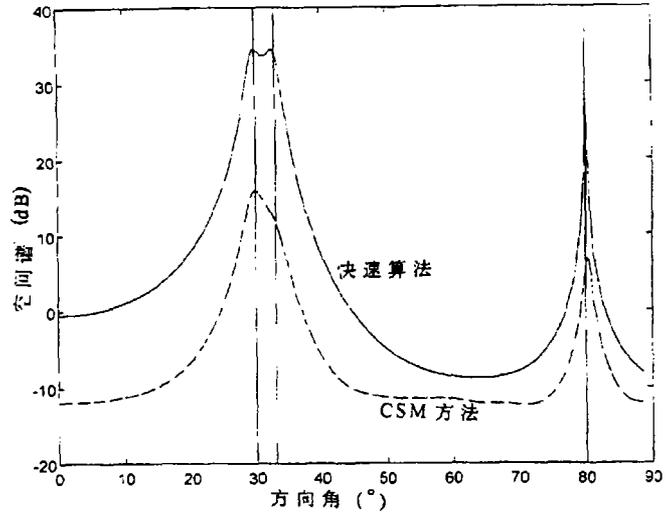


图 1 三个信源号 ($\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 33^\circ$, $\theta_3 = 80^\circ$) 分别通过 CSM 方法和本文快速算法处理后的空间谱比较

表 1 不同方法估计三个宽带信号源时的性能比较
($\theta_1 = 30.0^\circ$, $\theta_2 = 33.0^\circ$, $\theta_3 = 80.0^\circ$ 运行 10 次)

	CSM 方法	本文的快速算法
平均估计角度	无法分辨 θ_1 和 θ_2 , $\hat{\theta}_3 = 80.8^\circ$	$\hat{\theta}_1 = 29.8^\circ$, $\hat{\theta}_2 = 32.8^\circ$, $\hat{\theta}_3 = 80.0^\circ$
预处理耗时 (s)	6690	无
DOA 估计耗时 (s)	247	10
平均总运算时间 (s)	6937	10

在 CSM 方法的估计过程中, 预处理过程相当耗时, 聚焦过程同时也对运算量有一定程度的增加, 这使得 CSM 方法的运算时效比较低。而本文快速算法由于是仅针对一个频段的数据进行运算, 而且不需要经过预处理过程, 因而能达到高效实时处理。在表 1 中, 我们列出了本文快速算法与 CSM 算法在时间性能及分辨率性能上的比较 (进行 10 次运算后的平均结果, 机型为 AcerMate 486g/75/8M)。从表中可见, 本快速算法的总估计时间仅为 CSM 方法的 1/700, 而且具有比 CSM 更高的估计角分辨率, 显示了本文算法的超高分辨率和快速实时的特点。

4 结论

本文提出的方法是一种利用信号子空间技术进行宽带相干信号源 DOA 估计的快速算法。本文算法仅采用了中心窄带频段数据进行估计, 使得估计的运算量大大减小, 仅仅相当于窄带估计方法的运算量, 从而为实现宽带相干信号 DOA 估计的实时处理提供了可能; 而且, 由于中心频段的窄带数据包含了所有方向角的准确信息, 并且不存在分段估计后带来的谱峰偏移的负影响, 因而估计是高分辨率的; 同时, 空间平滑技术的结合使用, 使得即使在完全相干源的环境下, 也能获得超高分辨率的快速 DOA 估计。

另外需要指出, 由于舍弃其他频段数据损失了信号功率, 使得快速算法在低信噪比环境下的稳定性降低。如能充分利用其他频段数据又能做到高分辨低时耗, 将为此领域带来更大的突破, 这也将是本文的继续研究方向。

参 考 文 献

- [1] Wang H, Kaveh M. Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wideband sources. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1985, ASSP-33(4): 823-831.
- [2] Hung H, Kaveh M. Focusing matrices for coherent signal-subspace processing. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1988, ASSP-36(8): 1272-1281.
- [3] Krolik J, Swingler D N. Focused wide-band array processing via spatial resampling. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1990, ASSP-38(2): 356-360.
- [4] Doron M A, Weiss A J. On focusing matrices for wide-band array processing. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1992, ASSP-40(6): 1295-1302.
- [5] Friedlander B, Weiss A J. Direction finding for wide-band signals using an interpolated array. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(4): 1618-1634.
- [6] Valaee S, Kabal P. Wideband array processing using a two-sided correlation transformation. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(1): 160-172.
- [7] Shan T J, Wax M, Kailath T. On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1985, ASSP-33(4): 806-811.

A FAST ALGORITHM FOR DIRECTION-OF-ARRIVAL
ESTIMATION OF WIDE-BAND COHERENT SOURCES

Lei Zhongding Huang Xiukun Zhang Shujing*

*(Inst. of Information Science, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)***(Dept. of Telecomm., Shanghai Tiedao University, Shanghai 200331)*

Abstract A fast direction-of-arrival (DOA) estimation algorithm is proposed that applies to coherent wide-band emitter signals impinging on an uniform linear array. This algorithm, where spatial smoothing technique is employed, is based on obtaining the array manifold of a desired narrow-band covering the center frequency of the whole wide-band. The fast algorithm, which has super-resolution, leads to the realization of real-time bearing estimation of multiple coherent wide-band sources. Simulations are presented with comparison to coherent signal-subspace method (CSM).

Key words DOA, Coherent signal, Wide-band signal, Array signal processing

雷中定: 男, 1969年生, 博士, 研究兴趣有阵列信号处理, 空间谱估计, 移动通信, 网络技术等。
黄绣坤: 女, 1932年生, 教授, 研究领域为随机信号处理, 高阶谱, 空间谱, 时频分析等。
张树京: 男, 1932年生, 教授, 研究领域为多媒体通信, 移动通信, 信息论, 医学信号处理等。