

基于平面旋转的信号二维参数快速跟踪

栗 欣¹, 陈天麒², 李立萍²

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 电子科技大学电子工程系, 成都 610054)

摘 要: 阵列入射信号时变参数的联合跟踪, 是我军在现代电子战中进行有效电子防御和进攻时需要解决的首要问题. 本文针对非时变参数估计方法不能适应时变参数跟踪的问题, 首先讨论了 ESPRIT 类特征值问题的转化和子空间递推更新的可行性, 然后以平面旋转 (Givens rotation) 为基础推导了关键变量的直接更新关系, 最后采用多维参数方程并行计算的方式实现了信号二维时变参数的快速跟踪. 计算机模拟结果证实了所述方法的有效性.

关键词: 阵列信号; 子空间更新; 平面旋转; 联合参数跟踪

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 09-0062-04

Fast Tracking 2-D Parameters of Signals Based on Plane Rotation

SU Xin¹, CHEN Tian-qi², LI Li-ping²

(1. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Dept. of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: Jointly tracking the time-varying parameters of array incident signals is the chief problem that our troops efficiently carry out electronic defense and offense in modern electronic war (EW). Aiming at the problem that the methods to estimate time-invariant parameters don't adapt themselves to the situation to track time-varying parameters, this paper has probed into the method to jointly track time-varying parameters of array signals based on the plane rotation (Givens rotation). The computer simulation results proved the effectivity of proposed method.

Key words: array signal; subspace update; plane rotation; jointly tracking parameters

1 引言

基于子空间状况的高分辨阵列信号处理方法, 近年来受到了极大的关注并得到了迅速的发展. 其原因是, 这些方法针对阵列采样数据矩阵所形成的协方差矩阵进行 EVD (Eigenvalue decomposition) 或 SVD (Singular value decomposition) 后, 可以得到子空间的有关信息, 由此获得的信号参数的高分辨估计值, 能为军事和民用装备提供高质量的目标引导数据. 通常, 这种估计是假设入射信号的参数固定不变或在对其进行估计的整个时间范围内是衡定的, 通过对一段时间内采样得到的数据进行“批处理”来得到信号参数的估计值. 当入射信号的参数在对其进行估计的时间范围内发生显著变化, 即入射信号参数时变时, 所用方法的性能将明显下降或失效. 有鉴于此, 能够对时变参数进行“跟踪”的方法被相继提出, 并用于克服“批处理”方法所面临的难题. 其中, “自适应子空间跟踪”方法以其跟踪效果较好和对于“批处理”方法优点的继承而取得了较快的进展. 在该研究领域里, De Groat 与 Roberts^[1]开发了数值平稳的特征结构秩 1 递推更新算法, Dowling 等人^[2]提出了一种基于 TQR (Transposed QR) 的迭代框架并进行了信号瞬时频率或方位的跟踪, Strobach^[3]则利用传统 ESPRIT 方法的

简洁性, 结合平面旋转 (Givens rotation) 操作, 提出了一种非迭代的信号一维参数的快速递推跟踪方法.

针对大多数方法中只研究了对单个参数的跟踪问题, 并考虑到这些方法中的搜索过程的计算量问题, 以及实际需要的多参数联合跟踪方法国内外尚未见研究报道, 本文以平面旋转 (Givens rotation) 为基础, 借助 QR 分解进行子空间更新, 在 ESPRIT 框架中将多维参数方程并行计算方式引入跟踪过程, 提出了一种基于平面旋转的入射信号时变频率和方位二维参数联合快速跟踪方法.

2 ESPRIT 特征值问题的转化

如图 1, 在两个均匀线阵的阵列臂上, 分别将 $L+1$ 个阵元划分成两个均由 L 个阵元构成的平移子阵, 两阵列臂夹角为已知 ($0^\circ < \theta < 90^\circ$). 同一阵列臂上, 令 t 时刻两个子阵接收到的 M 个信号所形成的快拍矢量分别为,

$$x_1(t) = A_1 s(t) + n_{x1}(t), y_1(t) = A_{1-1} s(t) + n_{y1}(t) \quad (1)$$

和

$$x_2(t) = A_2 s(t) + n_{x2}(t), y_2(t) = A_{2-2} s(t) + n_{y2}(t) \quad (2)$$

其中, A_1 和 A_2 是阵列响应矩阵, $s(t)$ 是信号矢量, $n_{x1}(t)$ 和

收稿日期: 1999-06-21; 修回日期: 2000-04-08

基金项目: 原电子工业部预研基金 (No. 28.5.3.3)

$n_{y1}(t)$ 、 $n_{x2}(t)$ 和 $n_{y2}(t)$

分别是两阵列上统计独立的噪声矢量, 它们与信号不相关, \mathbf{I}_1 和 \mathbf{I}_2 是未知的对角矩阵。

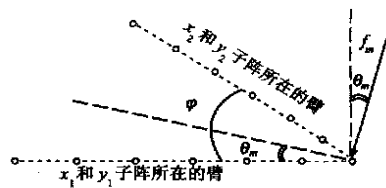


图 1 采用的阵列结构

由式 (1)、(2) 形成的 ESPRIT 广义特征值问题可以转化成标准特征值问题^[3]。

$$\text{令 } \mathbf{W}_1 = \mathbf{Q}_{x1}^H \mathbf{V}_{y1} \mathbf{R}_{x1}^{-1}, \mathbf{W}_2 = \mathbf{Q}_{x2}^H \mathbf{V}_{y2} \mathbf{R}_{x2}^{-1} \quad (3a)$$

其中, \mathbf{Q}_{xi} 、 \mathbf{R}_{xi} 为观测空间基矢量 \mathbf{V}_{xi} (\mathbf{V}_{yi} 与 \mathbf{V}_{xi} 同性) 的 QR 分解, $i = 1, 2$ 。

$$\text{于是有 } \mathbf{J}_1 = \mathbf{W}_1 \mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2 = \mathbf{W}_2 \mathbf{J}_2 \quad (3b)$$

其中, $\mathbf{J}_1 = \mathbf{R}_{x1} \mathbf{T}_1, \mathbf{J}_2 = \mathbf{R}_{x2} \mathbf{T}_2$, \mathbf{T}_1 和 \mathbf{T}_2 分别为子空间旋转子。

\mathbf{W}_1 、 \mathbf{W}_2 的复特征值的相角即包含了所求信号的参数。

3 子空间的递推更新

按照递推更新的顺序, 将“上次的”基矩阵^[3] $\mathbf{V}_{z1}(t-1)$ 、 $\mathbf{V}_{z2}(t-1)$ 的估计 $\hat{\mathbf{V}}_{z1}(t-1)$ 、 $\hat{\mathbf{V}}_{z2}(t-1)$ 作为“数据压缩子”而应用到“本次的”输入数据矢量 $\mathbf{z}_1(t)$ 、 $\mathbf{z}_2(t)$ 上,

$$\mathbf{h}_1(t) = \hat{\mathbf{V}}_{z1}^H(t-1) \mathbf{z}_1(t), \mathbf{h}_2(t) = \hat{\mathbf{V}}_{z2}^H(t-1) \mathbf{z}_2(t) \quad (4)$$

于是, $\mathbf{z}_1(t)$ 和 $\mathbf{z}_2(t)$ 的补为,

$$\bar{\mathbf{z}}_1(t) = \mathbf{z}_1(t) - \hat{\mathbf{V}}_{z1}(t-1) \mathbf{h}_1(t), \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{z}}_2(t) = \mathbf{z}_2(t) - \hat{\mathbf{V}}_{z2}(t-1) \mathbf{h}_2(t)$$

实际基矩阵 $\mathbf{V}_{z1}(t)$ 、 $\mathbf{V}_{z2}(t)$ 的估计 $\hat{\mathbf{V}}_{z1}(t)$ 、 $\hat{\mathbf{V}}_{z2}(t)$ 可经子空间旋转更新,

$$\mathbf{L}_{\hat{\mathbf{V}}_{z1}(t)}, \mathbf{q}_1(t) = \mathbf{L}_{\hat{\mathbf{V}}_{z1}(t-1)}, \bar{\mathbf{z}}_1(t) \mathbf{J} \mathbf{G}^H(t), \quad (6)$$

$$\mathbf{L}_{\hat{\mathbf{V}}_{z2}(t)}, \mathbf{q}_2(t) = \mathbf{L}_{\hat{\mathbf{V}}_{z2}(t-1)}, \bar{\mathbf{z}}_2(t) \mathbf{J} \mathbf{G}^H(t)$$

其中, $\bar{\mathbf{z}}_1(t) = \mathbf{z}_1(t) - \hat{\mathbf{V}}_{z1}(t-1) \mathbf{h}_1(t)$, $\bar{\mathbf{z}}_2(t) = \mathbf{z}_2(t) - \hat{\mathbf{V}}_{z2}(t-1) \mathbf{h}_2(t)$ 是归一化矢量补, $\mathbf{G}(t)$ 为子空间旋转子。于是有,

$$\hat{\mathbf{V}}_{z1}(t) = \hat{\mathbf{V}}_{z1}(t-1) \mathbf{I}_1(t) + \mathbf{z}_1(t) \mathbf{h}_1^H(t), \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{V}}_{z2}(t) = \hat{\mathbf{V}}_{z2}(t-1) \mathbf{I}_2(t) + \mathbf{z}_2(t) \mathbf{h}_2^H(t)$$

$$\bar{\mathbf{R}}_1(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1(t-1) + (1 - \rho_1) \mathbf{h}_1(t) \mathbf{h}_1^H(t) \\ (1 - \rho_1) \mathbf{z}_1(t) \mathbf{h}_1^H(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\bar{\mathbf{R}}_2(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2(t-1) + (1 - \rho_2) \mathbf{h}_2(t) \mathbf{h}_2^H(t) \\ (1 - \rho_2) \mathbf{z}_2(t) \mathbf{h}_2^H(t) \end{bmatrix}$$

其中, 数据协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_1(t)$ 、 $\bar{\mathbf{R}}_2(t)$ 有“三角加秩 1”类型的结构, 它还原到三角形式可以用多重西平面旋转来实现。

4 关键变量的直接更新

$$\text{令 } \hat{\mathbf{V}}_{z1}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{x1}(t) \\ \mathbf{V}_{y1}(t) \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{V}}_{z2}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{x2}(t) \\ \mathbf{V}_{y2}(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

于是由 $\mathbf{V}_{x1}(t)$ 、 $\mathbf{V}_{x2}(t)$ 的 QR 分解和式 (3a) 得

$$\mathbf{W}_1(t) = \mathbf{Q}_{x1}^H(t) \mathbf{V}_{y1}(t) \mathbf{R}_{x1}^{-1}(t),$$

$$\mathbf{W}_2(t) = \mathbf{Q}_{x2}^H(t) \mathbf{V}_{y2}(t) \mathbf{R}_{x2}^{-1}(t) \quad (10)$$

为了避免上述式子中的运算量, 实现直接更新, 现将矢量 $\bar{\mathbf{z}}_1(t)$ 、 $\bar{\mathbf{z}}_2(t)$ 分割如下,

$$\bar{\mathbf{z}}_1(t) = \begin{bmatrix} \bar{z}_{x1}(t) \\ \bar{z}_{y1}(t) \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{z}}_2(t) = \begin{bmatrix} \bar{z}_{x2}(t) \\ \bar{z}_{y2}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

结合式 (7) 有,

$$\mathbf{V}_{x1}(t) = \mathbf{V}_{x1}(t-1) \mathbf{I}_1(t) + \bar{z}_{x1}(t) \mathbf{I}_1^H(t), \quad (12a)$$

$$\mathbf{V}_{x2}(t) = \mathbf{V}_{x2}(t-1) \mathbf{I}_2(t) + \bar{z}_{x2}(t) \mathbf{I}_2^H(t)$$

$$\mathbf{V}_{y1}(t) = \mathbf{V}_{y1}(t-1) \mathbf{I}_1(t) + \bar{z}_{y1}(t) \mathbf{I}_1^H(t), \quad (12b)$$

$$\mathbf{V}_{y2}(t) = \mathbf{V}_{y2}(t-1) \mathbf{I}_2(t) + \bar{z}_{y2}(t) \mathbf{I}_2^H(t)$$

其中式 (12a) 可被表为,

$$\mathbf{Q}_{x1}(t) \mathbf{R}_{x1}(t) = \mathbf{Q}_{x1}(t-1) \mathbf{R}_{x1}(t-1) \mathbf{I}_1(t) + \bar{z}_{x1}(t) \mathbf{I}_1^H(t) \quad (13a)$$

$$\mathbf{Q}_{x2}(t) \mathbf{R}_{x2}(t) = \mathbf{Q}_{x2}(t-1) \mathbf{R}_{x2}(t-1) \mathbf{I}_2(t) + \bar{z}_{x2}(t) \mathbf{I}_2^H(t) \quad (13b)$$

定义

$$\mathbf{h}_{x1}(t) = \mathbf{Q}_{x1}^H(t-1) \bar{z}_{x1}(t), \mathbf{h}_{x2}(t) = \mathbf{Q}_{x2}^H(t-1) \bar{z}_{x2}(t) \quad (14)$$

$$\bar{z}_{x1}(t) = \bar{z}_{x1}(t) - \mathbf{Q}_{x1}(t-1) \mathbf{h}_{x1}(t), \quad (15)$$

$$\bar{z}_{x2}(t) = \bar{z}_{x2}(t) - \mathbf{Q}_{x2}(t-1) \mathbf{h}_{x2}(t)$$

$$\bar{\mathbf{z}}_1(t) = \begin{bmatrix} \bar{z}_{x1}(t) \\ \bar{z}_{y1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{x1}(t) \\ \bar{z}_{x1}(t) \mathbf{I}_1^{-1}(t) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\bar{\mathbf{z}}_2(t) = \begin{bmatrix} \bar{z}_{x2}(t) \\ \bar{z}_{y2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{x2}(t) \\ \bar{z}_{x2}(t) \mathbf{I}_2^{-1}(t) \end{bmatrix}$$

$$\text{于是有 } \bar{z}_{x1}(t) = \bar{z}_{x1}(t) - \mathbf{Q}_{x1}(t-1) \mathbf{h}_{x1}(t) \quad (17a)$$

$$\bar{z}_{x2}(t) = \bar{z}_{x2}(t) - \mathbf{Q}_{x2}(t-1) \mathbf{h}_{x2}(t) \quad (17b)$$

将上式代入式 (13) 有,

$$\mathbf{Q}_{x1}(t) \mathbf{R}_{x1}(t) = [\mathbf{Q}_{x1}(t-1), \bar{\mathbf{z}}_1(t) \mathbf{J}] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{x1}(t-1) \mathbf{I}_1(t) + \mathbf{h}_{x1}(t) \mathbf{I}_1^H(t) \\ \bar{z}_{x1}(t) \mathbf{I}_1^H(t) \end{bmatrix} \quad (18a)$$

$$\mathbf{Q}_{x2}(t) \mathbf{R}_{x2}(t) = [\mathbf{Q}_{x2}(t-1), \bar{\mathbf{z}}_2(t) \mathbf{J}] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{x2}(t-1) \mathbf{I}_2(t) + \mathbf{h}_{x2}(t) \mathbf{I}_2^H(t) \\ \bar{z}_{x2}(t) \mathbf{I}_2^H(t) \end{bmatrix} \quad (18b)$$

这样, 可以得到关键变量的更新关系如下

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{x1}(t) & \mathbf{I}_{x1}(t) \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{I}_{x1}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{G}_x(t) \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{x1}(t-1) & \mathbf{h}_{x1}(t) \\ \mathbf{0}^T & \bar{z}_{x1}(t) \end{bmatrix} \mathbf{G}_x^H(t) \quad (19a)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{x2}(t) & \mathbf{I}_{x2}(t) \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{I}_{x2}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{G}_x(t) \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{x2}(t-1) & \mathbf{h}_{x2}(t) \\ \mathbf{0}^T & \bar{z}_{x2}(t) \end{bmatrix} \mathbf{G}_x^H(t) \quad (19b)$$

$$[\mathbf{Q}_{x1}(t), \mathbf{q}_{x1}(t)] = \mathbf{L}_{\mathbf{Q}_{x1}(t-1)}, \bar{\mathbf{z}}_1(t) \mathbf{J} \mathbf{G}_x^H(t) \quad (20a)$$

$$[\mathbf{Q}_{x2}(t), \mathbf{q}_{x2}(t)] = \mathbf{L}_{\mathbf{Q}_{x2}(t-1)}, \bar{\mathbf{z}}_2(t) \mathbf{J} \mathbf{G}_x^H(t) \quad (20b)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{w1}(t) & \mathbf{Q}_{x1}^H(t) \mathbf{V}_{y1}(t) \\ \mathbf{q}_{x1}^H(t) \mathbf{V}_{y1}(t) & \mathbf{q}_{x1}^H(t) \mathbf{V}_{y1}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{G}_x(t) \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{w1}(t-1) & \mathbf{q}_{x1}^H(t-1) \\ \mathbf{H}_{w1}(t-1) & \mathbf{q}_{x1}^H(t-1) \end{bmatrix} \mathbf{G}_x^H(t) \quad (21a)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{w2}(t) & \mathbf{Q}_{x2}^H(t) \mathbf{V}_{y2}(t) \\ \mathbf{q}_{x2}^H(t) \mathbf{V}_{y2}(t) & \mathbf{q}_{x2}^H(t) \mathbf{V}_{y2}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{G}_x(t) \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{w2}(t-1) & \mathbf{q}_{x2}^H(t-1) \\ \mathbf{H}_{w2}(t-1) & \mathbf{q}_{x2}^H(t-1) \end{bmatrix} \mathbf{G}_x^H(t) \quad (21b)$$

由 $\mathbf{W}_1(t) = \mathbf{H}_{w1}(t) \mathbf{R}_{x1}^{-1}(t)$ 、 $\mathbf{W}_2(t) = \mathbf{H}_{w2}(t) \mathbf{R}_{x2}^{-1}(t)$, 即

可得到快速更新后的 $W_1(t)$ 、 $W_2(t)$ 。

5 信号瞬时参数的获取

5.1 确定信号瞬时数目

设式(1)(用式(2)也可)定义的快拍矢量在时刻 $t-1$ 和 t 之间有 N 个样本矢量存在,则由它们可构成 t 时刻前相应的数据协方差矩阵,

$$R_{x1,x1}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1(t_i) x_1^H(t_i) \quad (22)$$

当 $t-1$ 和 t 之间的时间足够短时,包含在 $R_{x1,x1}(t)$ 中的信号数目值,可以作为 t 时刻的信号数目近似值。在 t 时刻采用 AIC 方法^[4](Akaike's information criterion),即可获得信号的瞬时数目。

$$\text{设 } AIC(k_t) = -2 \lg f(X_1(k_t)/Q(k_t)) + 2k_t(2L - k_t) \quad (23)$$

其中, $k_t = 0, 1, \dots, L-1$ ($k_t - k_t$) 为信号可能的瞬时数目, L 为子阵列阵元数目, $X_1(k_t) = (x_1(t_1), x_1(t_2), \dots, x_1(t_N))$ 为观测数据, $Q(k_t)$ 为参数空间 $Q(k_t)$ 的估值, $f(X_1(k_t)/Q(k_t))$ 为概率密度函数。

则 $AIC(M) = \min(AIC(0), AIC(1), \dots, AIC(L-1))$ (24)
其中, $\min(\cdot)$ 为求最小值操作, $AIC(M)$ 确定了 t 时刻下信号的瞬时数目 M 。

5.2 获得关键变量的特征结构

$$\begin{cases} f_m(t) = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{-\angle(D_{2m}(t)) + (d_2/d_1) \cos \angle(D_{1m}(t))}{d_2 \sin}}^2 + \left(\frac{\angle(D_{1m}(t))}{d_1} \right)^2 \\ m(t) = \sin^{-1} \left(\frac{\angle(D_{1m}(t))}{2 f_m(t) d_1} \right) \end{cases} \quad (28)$$

其中, $m = 1, 2, \dots, M$, c 为信号传播速率, d_1 、 d_2 分别为阵列上下两臂的阵元间距, $0^\circ < \leq 90^\circ$, $\angle(\cdot)$ 表示求幅角运算。

5.4 提取瞬时频率和方位真实值

在实际情况下,因来自 $W_j(t)$ 的特征值矩阵 $D_j(t)$ 的主对角元 $D_{jm}(t)$, $j = 1, 2$, $m = 1, 2, \dots, M$ 是独立计算出来的,而信号真实参数应通过正确对应的主对角元间的联立方程组求解来获得,故必须从配对主对角元后的所有被计算出的信号瞬时频率和方位预估计值中提取出真实值。

采用文献[6]中提出的方法,在获得信号瞬时数目的情况下,可将式(22)中的观测数据空间划分为信号子空间和噪声子空间。它们所张的子空间应有如下关系^[5],

$$\text{space}[E_s] \perp \text{space}[E_n] \quad (29)$$

其中, $\text{space}[E_s]$ 为信号子空间, $\text{space}[E_n]$ 为噪声子空间。

在时刻 $t-1$ 和 t 之间时间足够短的条件下,由式(1)所确定的阵列响应矩阵 A_1 与 E_s 所张的空间是一致的,这样有

$$\text{space}[A_1] \perp \text{space}[E_n] \quad (30)$$

也就是说, A_1 的列所张的子空间与噪声子空间正交。

由此,信号瞬时频率和方位真实值 $\bar{f}_m(t)$, $\bar{m}(t)$, 可通过使下式左端的值为最大的检验过程获得,

$$P(\bar{f}_m(t), \bar{m}(t)) = \frac{1}{a^H(\bar{f}_m(t), \bar{m}(t)) E_n} \quad (31)$$

其中, \cdot 为求范数运算, $a(\bar{f}_m(t), \bar{m}(t))$ 为 A_1 的一个列

由式(24)确定的信号瞬时数目 M , 可以从“本次的”关键变量 $W_1(t)$ 、 $W_2(t)$ 中分离出阶数为 $M \times M$ 的主变量。再分解出它们的各个特征量,以便得到信号在“本次的”瞬时参数。

设 $D_1(t)$ 、 $D_2(t)$ 和 $U_1(t)$ 、 $U_2(t)$ 分别为主变量 $W_1(t)$ 、 $W_2(t)$ 的特征值和特征矢矩阵,于是,

$$W_1(t) = U_1(t) D_1(t) U_1^H(t), \quad (25)$$

$$W_2(t) = U_2(t) D_2(t) U_2^H(t)$$

若 $D_{1m}(t)$ 、 $D_{2m}(t)$, $m = 1, 2, \dots, M$, 分别为 $D_1(t)$ 、 $D_2(t)$ 的主对角元,则有,

$$D_1(t) = \text{diag}(D_{11}(t), D_{12}(t), \dots, D_{1M}(t)), \quad (26)$$

$$D_2(t) = \text{diag}(D_{21}(t), D_{22}(t), \dots, D_{2M}(t))$$

其中, $\text{diag}(\cdot)$ 表示形成对角矩阵操作。

5.3 计算瞬时频率和方位预估计值

将式(26)中的两组主对角元俩俩对应组成二元一次方程组,

$$\begin{cases} D_{1m}(t) = \exp(i(2 f_m(t) d_1 \sin(m(t)/c))) \\ D_{2m}(t) = \exp(i(-2 f_m(t) d_2 \sin(-m(t)/c))) \end{cases} \quad (27)$$

其中, c 为信号传播速率, d_1 、 d_2 分别为阵列上下两臂的阵元间距, $0^\circ < \leq 90^\circ$ 。分别求解上式中各方程组,即可得到瞬时频率和方位的预估计值为

矢量, $m = 1, 2, \dots, M$ 。

6 计算机仿真结果

6.1 仿真环境

如图1,设两个均匀线阵上的各子阵列元数为6,阵列两臂之间的夹角取已知值 83° (此为在 $0^\circ < \leq 90^\circ$ 中任取的值),在阵列平面上入射的是2个窄带非相干信号,信号频率上限确定为0.5GHz,信噪比为10dB。两阵列臂上的阵元间距分别为,下臂处 $1/3$ 最小波长,上臂处 $1/4$ 最小波长。两信号的频率和方位分5段变化,包括了缓变和跃变的可能情况。所得仿真结果如图2、图3和图4。

6.2 结果讨论

由图2、图3可见,算法对于阵列入射信号时变频率和方位联合跟踪是有效的。当信号频率和方位出现跃变时,算法能在短暂的偏离之后重新紧跟上去,说明算法对于恶劣信号环境有良好的适应性。从图4可以看出,频率离差在1MHz以内(跃变时除外),方位离差在0.05度以内(跃变时除外),算法对于阵列入射信号瞬时频率和方位联合跟踪的精度较高。从以上各图可以看出,当时间指标上升到800以后,跟踪曲线变得平滑起来并与理论曲线距离恒定,说明算法计算过程随着时间的增长是趋于稳定的,没有误差量的持续累积存在。

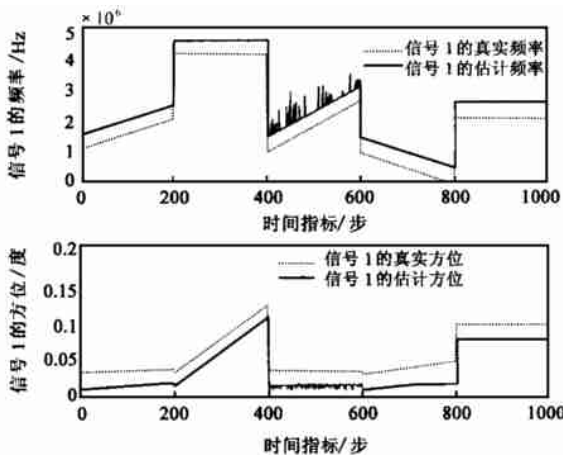


图2 对信号1的频率和方位跟踪结果

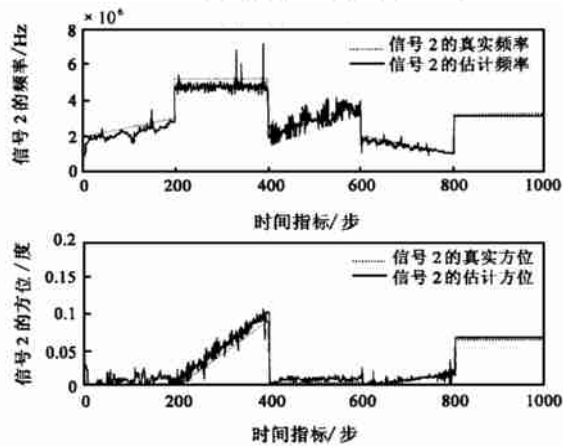


图3 对信号2的频率和方位跟踪结果

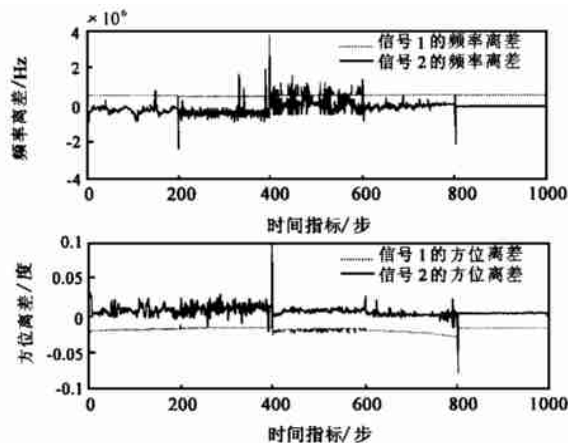


图4 信号频率和方位跟踪误差

7 结束语

阵列入射信号时变多参数的联合跟踪,在军事和民用装备上有着极其重要与广泛的应用前景。国内外研究者在阵列入射信号时变参数跟踪方面,已作出了一系列卓有成效的工作。但因多参数联合跟踪方法研究具有相当的困难度和

繁杂性,使得人们在这一领域中还有许多研究工作要做。有鉴于此,我们以平面旋转(Givens rotation)为基础,借助QR分解进行子空间更新,将ESPRIT框架引入信号多参数的跟踪过程,进行了基于平面旋转的阵列入射信号时变频率和方位的联合快速跟踪方法研究,并用计算机模拟结果证实了所述方法的有效性。本文所做工作在阵列入射信号多参数联合跟踪领域属于开拓性的,希望能以此对国内外这一领域的研究工作起到抛砖引玉的推动作用。

参考文献:

- [1] R. D. De Goat, R. A. Roberts. Efficient, numerically stabilized rank-one eigenstructure updating [J]. IEEE Trans., 1990, ASSP-38(2): 301 - 316.
- [2] E. M. Dowling, L. P. Ammann, R. D. De Goat. A TQR-iteration based adaptive SVD for real time angle and frequency tracking [J]. IEEE Trans., 1994, SP-42(4): 914 - 926.
- [3] P. Strobach. Fast recursive subspace adaptive ESPRIT algorithms [J]. IEEE Trans., 1998, SP-46(9): 2413 - 2430.
- [4] M. Wax, T. Kailath. Detection of signals by information theoretic criteria [J]. IEEE Trans., 1985, ASSP-33(4): 387 - 392.
- [5] R. O. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans., 1986, AP-34(3): 276 - 280.
- [6] Ge Lijia, Chen Tianqi, Huang Xiangfu. Simultaneous frequency and direction estimation from parallel-array data [J]. IEE Proc.-Radar, Sonar, Navig., 1995, 142(1): 6 - 10.
- [7] Su Xin, Chen Tianqi. Simultaneously Estimating Frequency and Direction of Coherent Signal via an Array Triplet in Motion. Signal Processing IX-Theories and Applications [C]. Proc. of EUSIPCO-98, Rhodes, Greece, 1998: 217 - 220.

作者简介:



栗欣 1997年毕业于电子科技大学通信与电子系统专业,获工学硕士学位,1999年毕业于电子科技大学电路与系统专业,获工学博士学位。现为清华大学信息与通信工程博士后流动站研究人员。主要研究领域包括移动通信、软件无线电、阵列信号处理、自适应信号处理及其在电子对抗与民用通信系统中的应用。已在国内外学术刊物和学术会议上发表论文20余篇。



陈天麒 电子科技大学教授,博士生导师,电子工程学院常务副院长,电子工程研究所所长。中国电子学会高级会员,四川省电子学会电子战专业委员会副主任委员。长期从事电路、信号和系统方面的研究工作,在国内外学术刊物及学术会议上发表过论文70余篇,主持省部级科研课题10余项,有6项获省部级科技进步二、三等

等奖。