

基于单快拍极化平滑处理的 DOA 跟踪算法

虞飞* 陶建武

(空军航空大学航空控制工程系 长春 130022)

摘要: 该文研究了基于电磁矢量传感器阵列的相干信号波达方向(DOA)跟踪问题。首先,对一种增强阵列有效孔径的单快拍极化平滑估计算法(SSPSA)的解相干性能进行了分析,此算法可以用于相干信号的 DOA 快速估计。在此基础上,提出了一种基于迭代的相干信号 DOA 跟踪算法,此算法无需奇异值分解和矩阵求逆运算,具有较快的跟踪速度。仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 电磁矢量传感器阵列; 相干信号; 平移不变特性; 极化平滑算法; 子空间跟踪

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)03-0749-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00417

DOA Tracking of Coherent Signals Based on Single Snapshot Polarization Smoothing Algorithm

Yu Fei Tao Jian-wu

(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: The Direction-Of-Arrival (DOA) tracking of coherent signals is researched based on polarization vector-sensor array. The decorrelative performance of a Single Snapshot Polarization Smoothing Algorithm (SSPSA), which is available for the fast estimation of DOA in multipath environment, is analyzed. The algorithm can improve the effective array aperture. Then a subspace tracking algorithm of coherent sources is presented based on iteration. The iterated algorithm has higher tracking speed and requires neither the eigen-decomposition into signal/noise subspace nor the inverse operation of matrix. Simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Electromagnetic vector-sensor array; Coherent signals; Shift invariance property; Polarization smoothing; Subspace tracking

1 引言

近年来,基于电磁矢量传感器阵列采用子空间技术的DOA估计算法已经被广泛的研究^[1-3],它们仅适用于不相干信号。但在实际环境中,由于多径传播等因素的影响,相干信号是普遍存在的。为了利用子空间技术估计相干信号的DOA,首先需要用预处理方法来恢复信号协方差矩阵的秩^[4],使其大于或等于相干信号数。文献[5]基于电磁矢量传感器阵列提出了一种极化平滑算法(PSA),并利用MUSIC算法实现对相干信源DOA的估计。其优点是阵列的空间孔径没有损失,并且适合任何类型的多分量电磁矢量传感器,但是该算法需要2维角度搜索,运算量较大,且采用的是多次采样数据,需要很大的数据存储空间。文献[6]提出了一种改进的空间平滑算法,此算法的优点是提高了阵列有效孔径,且仅

利用单快拍接收数据。但该算法是基于标量传感器均匀线阵提出的,在实际应用中其定向性能远不如矢量传感器阵列,要求传感器个数也较多,不适合物理空间受限的场合。为此,文献[7]基于电磁矢量传感器阵列,将文献[6]中提出的改进空间平滑算法向极化域扩展,提出了一种单快拍极化平滑估计算法(SSPSA),此算法不仅适合任何类型的多分量电磁矢量传感器,还避免了角度搜索,而且可获得比PSA算法更大的阵列有效孔径,能够得到更高的DOA估计分辨率。同时该算法仅采用单快拍数据,既节省了数据存储空间,又非常适合于快变相干信号的实时平滑处理。本文对SSPSA算法的解相干性能进行了详细的分析,得出了该算法能够处理的相干信源数目所满足的约束条件,并提出了进一步的改进方法。

由于实际应用中,目标(如飞机等)通常是移动的,需要对其方向进行准确的跟踪估计。为了解决方向跟踪问题,近年来,子空间跟踪技术^[8,9]得到了

2011-05-02 收到, 2011-11-17 改回

国家自然科学基金(60872088, 61172126)资助课题

*通信作者: 虞飞 yufei19871128@163.com

广泛的研究,但这些算法不适用于相干信号的场合。目前国内外对子空间跟踪类算法的研究主要是基于标量传感器阵列,而基于矢量传感器阵列的跟踪问题研究相对较少。文献[10]研究了利用叉乘(cross product)算法对电磁波的跟踪问题,但该方法仅适用于单信号源情形。为此,文献[7]将单快拍极化平滑估计算法应用于目标跟踪场合,提出了多个相干信号 DOA 批处理跟踪算法。但考虑到在批处理算法中包含奇异值分解和矩阵求逆运算,计算量可观,本文提出了一种基于幂方法^[1]的迭代跟踪算法,在保持较高跟踪精度的同时,缩短了估计时间,使算法的实时性更强。

2 阵列模型

对于完全极化电磁波,电磁矢量传感器的空间响应矢量可参照文献[5]。假定一个中心对称的均匀线性阵列含有 L 个电磁矢量传感器,并且阵元在空间以坐标原点为参考点,沿着 x 轴正方向排列,则第 l 个阵元的空间相移因子为

$$q_l(\theta, \phi) = e^{j\frac{2\pi(l-1)\Delta}{\lambda}u} = e^{j(l-1)\mu}, \quad l = 1, \dots, L \quad (1)$$

其中 λ 是信号的波长, Δ 表示两个相邻阵元间距, $u = \sin\theta \cos\phi$ 表示信号的方向余弦, $\theta \in (-\pi/2, \pi/2]$ (从 Z 轴测量)和 $\phi \in [0, 2\pi)$ 分别表示入射波的俯仰角和方位角。 $\mu = 2\pi\Delta u/\lambda$ 表示相邻阵元接收信号相位延迟。

考虑 K 个远场的窄带平面波信号从不同方向入射到此阵列。在 t 时刻(单次观测),整个阵列的 $6L \times 1$ 维输出矢量为

$$\mathbf{z}(t) = \sum_{k=1}^K [\mathbf{q}(\theta_k, \phi_k) \otimes \mathbf{A}(\theta_k, \phi_k)] \mathbf{p}_k s_k(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

式中 \otimes 表示 Kronecker 积, $\mathbf{q}(\theta_k, \phi_k) = [q_1(\theta_k, \phi_k), \dots, q_L(\theta_k, \phi_k)]^T$, $(\cdot)^T$ 表示矩阵转置, $\mathbf{A}(\theta_k, \phi_k) \mathbf{p}_k$ 表示电磁矢量传感器对第 k 个信号的空间响应矢量^[5], $s_k(t)$ 表示第 k 个信号的复包络, $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_{6L}(t)]^T$ 为阵列的 $6L \times 1$ 维加性白噪声矢量。

3 单快拍极化平滑估计算法

将阵列各矢量阵元方向相同且类型相同的接收分量写在一起,则阵列的 $6L \times 1$ 维输出矢量 $\mathbf{z}(t)$ 可以划分为 6 个 $L \times 1$ 维的子阵,即

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_j(t) &= \sum_{k=1}^K [\mathbf{q}(\theta_k, \phi_k) \otimes \mathbf{A}_j(\theta_k, \phi_k)] \mathbf{p}_k s_k(t) + \mathbf{n}_j(t) \\ &= \mathbf{Q} \mathbf{Y}_j \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_j(t), \quad j = 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{A}_j(\theta_k, \phi_k)$ 是矩阵 $\mathbf{A}(\theta_k, \phi_k)$ 的第 j 行,定义矩阵: $\mathbf{Q} = [\mathbf{q}(\theta_1, \phi_1), \dots, \mathbf{q}(\theta_K, \phi_K)]$, $\mathbf{Y}_j = \text{diag}[y_{1j}, \dots, y_{Kj}]$ 。

矢量传感器第 j 个分量对应的 $L \times 1$ 维噪声分量 $\mathbf{n}_j(t)$ 定义为

$$\mathbf{n}_j(t) = \mathbf{J}_j \mathbf{n}(t) \quad (4)$$

其中 $\mathbf{J}_j = [\mathbf{0}_{L, L \times (j-1)} \quad \mathbf{I}_L \quad \mathbf{0}_{L, L \times (6-j)}]$, $j = 1, \dots, 6$ 。由文献[7]中的推导过程,我们可以构造一个增广矩阵 \mathbf{Z}_{aug}

$$\mathbf{Z}_{\text{aug}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{ss} \\ \mathbf{\Pi}_L \mathbf{Z}_{ss}^* \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{\text{aug}} \mathbf{B} + \mathbf{N}_{\text{aug}} \quad (5)$$

这里, $\mathbf{Z}_{ss} = \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda} \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{N}_s$, 其中, $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}[s_1(t), \dots, s_K(t)]$, $\mathbf{P} = \text{diag}[\mathbf{p}_1^T, \dots, \mathbf{p}_K^T]$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^T(\theta_1, \phi_1) & \dots & \mathbf{A}_6^T(\theta_1, \phi_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_1^T(\theta_K, \phi_K) & \dots & \mathbf{A}_6^T(\theta_K, \phi_K) \end{bmatrix}$, $\mathbf{N}_s = [\mathbf{n}_1(t), \mathbf{n}_2(t), \dots, \mathbf{n}_6(t)]$ 为噪声矩阵; $\mathbf{\Pi}_L$ 为 $L \times L$ 维的置换矩阵,其反对角元素均为 1,其他为 0, $(\cdot)^*$ 表示复共轭运算, $\mathbf{A}_{\text{aug}} \in \mathbf{C}^{2L \times 2K}$ 是中心对称阵列的方向矩阵。换句话说,我们构造了一个虚拟增广阵列,增广阵列方向矩阵 \mathbf{A}_{aug} 满足平移不变特性

$$\mathbf{J}_{\text{aug}}^{(1)} \cdot \mathbf{A}_{\text{aug}} \cdot \mathbf{\Phi}_o = \mathbf{J}_{\text{aug}}^{(2)} \cdot \mathbf{A}_{\text{aug}} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{J}_{\text{aug}}^{(i)} = \mathbf{I}_2 \otimes \mathbf{J}_i$, $i = 1, 2$, $\mathbf{J}_1 = [\mathbf{I}_L \quad \mathbf{0}_{L \times 1}]$, $\mathbf{J}_2 = [\mathbf{0}_{1 \times 1} \quad \mathbf{I}_L]$, $l = L - 1$, $\mathbf{\Phi}_o$ 为一个 $2K \times 2K$ 维对角阵,经推导可知,其对角线元素为

$$\mathbf{\Phi}_o = \text{diag}[e^{j\mu_1} \quad e^{j\mu_1}, \dots, e^{j\mu_K} \quad e^{j\mu_K}] \quad (7)$$

对矩阵 \mathbf{Z}_{aug} 进行奇异值分解,其 $2K$ 个最大奇异值所对应的左奇异向量可构成矩阵 \mathbf{U}_{aug} ,根据信号子空间原理可得, $\mathbf{U}_{\text{aug}} \mathbf{T} = \mathbf{A}_{\text{aug}}$, \mathbf{T} 是一个非奇异矩阵,代入式(6)得

$$\mathbf{J}_{\text{aug}}^{(1)} \cdot \mathbf{U}_{\text{aug}} \cdot \mathbf{\Psi} = \mathbf{J}_{\text{aug}}^{(2)} \cdot \mathbf{U}_{\text{aug}} \quad (8)$$

其中 $\mathbf{\Psi} = \mathbf{T} \mathbf{\Phi}_o \mathbf{T}^{-1}$ 。通过最小二乘(LS)方法求出矩阵 $\mathbf{\Psi}$,进而得到 $\mu_{ki} = \arg(\text{eig}(\mathbf{\Psi}))$, $k = 1, \dots, K$, $i = 1, 2$,根据式(7),则第 k 个信号的相位延迟为 $\mu_k = (\mu_{k1} + \mu_{k2})/2$,再根据式(1)求出 t 时刻各个信号方向余弦的估计值 $\hat{u}_k(t)$ 。

下面对 SSPSA 算法的解相干性能进行分析。考虑到分析数据矩阵 \mathbf{Z}_{aug} 和 \mathbf{Z}_{ss} 是一致的,为简便起见,现从数据矩阵 \mathbf{Z}_{ss} 分析。由文献[7]可得 $\mathbf{Z}_{ss} = \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda} \mathbf{D} + \mathbf{N}_s$, 其中,矩阵

$$\mathbf{D} = [\text{Vec}(\mathbf{Y}_1) \quad \text{Vec}(\mathbf{Y}_2) \quad \dots \quad \text{Vec}(\mathbf{Y}_6)] \quad (9)$$

这里 $\text{Vec}(\cdot)$ 为矩阵向量化算子。故改进的接收数据协方差矩阵为

$$E\{\mathbf{Z}_{ss} \mathbf{Z}_{ss}^H\} = \mathbf{Q} \underbrace{E\{\mathbf{\Lambda} \mathbf{D} \mathbf{D}^H \mathbf{\Lambda}^H\}}_{\hat{\mathbf{R}}_s} \mathbf{Q}^H + \underbrace{E\{\mathbf{N}_s \mathbf{N}_s^H\}}_{\hat{\mathbf{R}}_n} \quad (10)$$

由 K 个相干信号的复包络 $s_k(t)$, $k = 1, \dots, K$ 构成

的对角阵 \mathbf{A} 可进一步表示成 $\mathbf{A} = \text{diag}[g_1, \dots, g_K] \mathbf{s}_1(t) = \mathbf{G} \mathbf{s}_1(t)$, 式中, g_k 为非零复常数。则改进的信号协方差矩阵为

$$\bar{\mathbf{R}}_s = \frac{\sigma_s^2}{6} \mathbf{C} \mathbf{C}^H \quad (11)$$

其中 $\sigma_s^2 = E\{s_1(t)s_1^*(t)\}$, $\mathbf{C} = \mathbf{G} \mathbf{D}$ 。结合式(10)和式(11)易知, 改进的信号协方差矩阵的秩为 $\text{rank}\{\bar{\mathbf{R}}_s\} = \text{rank}\{\mathbf{D}\}$ 。根据式(9)以及 $y_{kj} = \mathbf{A}_j(\theta_k, \phi_k) \mathbf{p}_k$ 可知, $\text{rank}\{\mathbf{D}\}$ 由信号的方向角和极化参数 (γ, η) 为其极化参数决定。对于所有信号 $k = 1, \dots, K$, 当 $\theta_k \neq 0$ 且 $\gamma_k \neq n\pi/2 (n = 0, 1)$ 时, 矩阵 \mathbf{D} 列满秩, 故 $\text{rank}\{\bar{\mathbf{R}}_s\} = \min\{K, 6\}$; 当 $\theta_k = 0$ 时, $\text{rank}\{\bar{\mathbf{R}}_s\} = \min\{K, 4\}$; 当 $\gamma_k = 0$ 时, $\text{rank}\{\bar{\mathbf{R}}_s\} = \min\{K, 5\}$; 当 $\gamma_k = \pi/2$ 且 $\theta_k \neq 0$ 时, $\text{rank}\{\bar{\mathbf{R}}_s\} = \min\{K, 5\}$ 。所以, 要使平滑后的信号协方差矩阵的秩大于或等于相干信号个数 K , 需满足条件 $K \leq 6$ 。另外, 采用基于特征结构的 DOA 估计方法还要求子阵的阵元数满足 $L - 1 \geq K$ 。综合这两个约束条件, 得出 SSPSA 算法能够处理的相干信源数 K 满足如下约束:

$$K \leq \min(6, L - 1) \quad (12)$$

这也说明 SSPSA 算法最多可以对 6 个相干信号进行预处理。我们可以构造一个新的数据矩阵 $\mathbf{Z}_{\text{aug}}^{\text{FB}} = [\mathbf{Z}_{\text{aug}} \quad \mathbf{I}_{2L} \mathbf{Z}_{\text{aug}}^* \quad \mathbf{I}_{6}]$ 代替 SSPSA 算法中的 \mathbf{Z}_{aug} 同样可以求得信号子空间, 这种方法可称为前后向单快拍极化算法 (FB-SSPSA)。同理可以求出 FB-SSPSA 算法能够处理的相干信源数满足约束条件 $K \leq \min(12, L - 1)$, 从而最多能处理 12 个相干信号。

4 基于单快拍极化平滑处理的跟踪算法

考虑到 SSPSA 算法仅使用一次观测快拍, 文献[7]将 SSPSA 算法应用于快变相干信号的解相干处理, 给出多个相干信号 DOA 批处理跟踪算法。由于批处理跟踪算法是将单快拍极化平滑估计算法直接向动态推广获得的, 跟踪精度主要取决于极化平滑估计算法的估计精度, 因此只需要进行一步估计算法即可收敛。但我们还可以发现, 批处理跟踪算法在每次循环时都要进行计算量较大的奇异值分解和求逆运算。为了增强算法实时性, 本文提出一种基于迭代的跟踪算法, 从而避免了奇异值分解和矩阵求逆运算。

4.1 基于迭代的跟踪算法

对于 K 个远场窄带相干信号, 考虑方向余弦估计 $\hat{u}(t)$ 随时间 t 变化的跟踪情况。因为批处理跟踪算法的第(3)步在更新信号子空间时需要将 $\mathbf{Z}_{\text{aug}}(t)$ 进行奇异值分解, 计算量较大。为了减小计算量, 本文提出了基于幂方法^[11]的增广矩阵 $\mathbf{Z}_{\text{aug}}(t)$ 奇异值分

解的迭代算法, 简称迭代跟踪算法, 其具体步骤如下:

- (1) $\mathbf{A}(t) = [\mathbf{Z}_{\text{aug}}(t) \mathbf{Z}_{\text{aug}}^H(t)] / 6$;
- (2) $\bar{\mathbf{W}}(t) = (\mathbf{A}(t))^n \bar{\mathbf{W}}_m(t-1)$;
- (3) $m = m + 1$;
- (4) $\bar{\mathbf{W}}(t) \Rightarrow \mathbf{Q}(t) \mathbf{R}(t)$;
- (5) $\bar{\mathbf{W}}_m(t) = \mathbf{Q}(t)$ 的前 $2K$ 列;
- (6) 确定一个收敛判断条件 (如 $|\bar{\mathbf{W}}(t) - \bar{\mathbf{W}}(t-1)| \leq 10^{-2}$ 等), 若收敛则继续下一步, 否则转到第(2)步;
- (7) $\mathbf{U}_{\text{aug}}(t) = \bar{\mathbf{W}}_m(t)$ 。

初始化: $m = 0$, $n = 1$, $\bar{\mathbf{W}}(0) = [\mathbf{e}_1 \dots \mathbf{e}_{2K}]$, 式中 \mathbf{e}_i 表示单位矢量, 除它的第 i 个元素为 1 外, 其他都为 0。事实上, $\bar{\mathbf{W}}(0)$ 只要是由 $2K$ 个线性无关的列向量构成的矩阵即可, 只是收敛速度不同。 m 表示算法在当前 t 时刻达到收敛要求所需的迭代次数。

批处理跟踪算法的第(4)步需要做矩阵求逆运算。迭代跟踪算法中改用正则方程组方法^[12]求解 Ψ , 避免了矩阵求逆运算。

在迭代跟踪算法的第(2)步中矩阵左乘时加上 n 次幂是为了加快收敛速度, 减少迭代次数, n 越大, 收敛越快, 通常可以取 $n = 1$, 文献[13]中的仿真及性能分析也已经证明了这种迭代跟踪算法具有较好的收敛性能。我们以 $|\bar{\mathbf{W}}(t) - \bar{\mathbf{W}}(t-1)|$ 作为评价指标, 通过一系列仿真实验验证了迭代跟踪算法的确具有较好的收敛性, 由于篇幅有限, 相应的仿真结果略去。

4.2 计算量分析与比较

设 MDN 表示复数乘和除的次数, 现结合批处理跟踪算法^[7]和迭代跟踪算法的主要区别, 即奇异值分解和最小二乘法来比较两种算法的计算量。在批处理跟踪算法的每一次估计中, 计算 $\mathbf{Z}_{\text{aug}}(t)$ 的奇异值分解需要 $\eta_1 = 2 \times (2L)^3 + (2L)^2 \times 6$ 次 MDN^[12]; 计算 $\mathbf{U}_1^H(t) \mathbf{U}_1(t)$ 需要 $2K \times 2(L-1) \times 2K$ 次 MDN, 对其求逆需 $2(2K)^3 / 3$ 次 MDN, 计算 $(\mathbf{U}_1^H(t) \mathbf{U}_1(t))^{-1} \mathbf{U}_1^H(t)$ 需要 $(2K)^2 \times 2(L-1)$ 次 MDN, 计算 $(\mathbf{U}_1^H(t) \mathbf{U}_1(t))^{-1} \cdot \mathbf{U}_1^H(t) \mathbf{U}_2(t)$ 需 $(2K)^2 \times 2(L-1)$ 次 MDN, 因此求解 $\Psi(t)$ 共需要 $\eta_2 = 24K^2(L-1) + 16K^3 / 3$ 次 MDN。故在批处理算法中(3)步和(4)步所需 MDN 次数近似为

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = 16L^3 + 24L^2 + 24K^2(L-1) + \frac{16}{3} K^3 \quad (13)$$

同理分析, 计算出基于迭代的跟踪算法所需的 MDN 次数大致为

$$\bar{\eta} = 24L^2K + 24L^2 + \frac{2K^4}{3} + K^3(4L - \frac{4}{3}) - 8LK^2 \quad (14)$$

考虑约束条件式(12),并根据式(13)和式(14)可知在相同的阵元个数和相干信号数条件下,迭代跟踪算法的运算量要低于批处理跟踪方法,尤其是当阵元个数 L 增加时,迭代跟踪算法的优势更加明显。

5 仿真实验

考虑一个中心对称矢量传感器阵列由5个均匀排列在 x 轴上的电磁矢量传感器构成,相邻两个阵元的间距取为波长的一半,则由式(1)可得第 k 个信号的方向余弦估计为 $\hat{u}_k = \hat{\mu}_k/\pi$ 。考虑窄带相干信号个数 $K=2$,相干系数 $g = \exp(j\pi/6)$ 。

实验 1 假设两个等功率电磁波入射到阵列,且阵列对空间信号单次采样,信号的角度参数 (θ, ϕ) 分别为 $(50^\circ, 70^\circ)$, $(15^\circ, 110^\circ)$,极化参数 (γ, η) 分别为 $(50^\circ, 30^\circ)$, $(30^\circ, 45^\circ)$,信噪比取为 $\text{SNR}=10$ dB。基于SSPSA算法^[7],本文的FB-SSPSA算法和极化平滑估计算法^[5](PSA)分别进行200次Monte-Carlo仿真实验。图1中给出了信号方向余弦估计 \hat{u} 的均方根误差(RMSE)随传感器个数的变化曲线。

在图1中,可以看出方向余弦估计 \hat{u} 的RMSE随着传感器个数的增加而变小,3种估计算法中,FB-SSPSA算法的估计精度总体上是最高。另外,

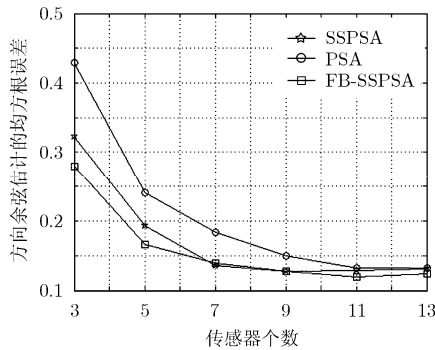


图1 方向余弦估计的RMSE随传感器个数的变化曲线

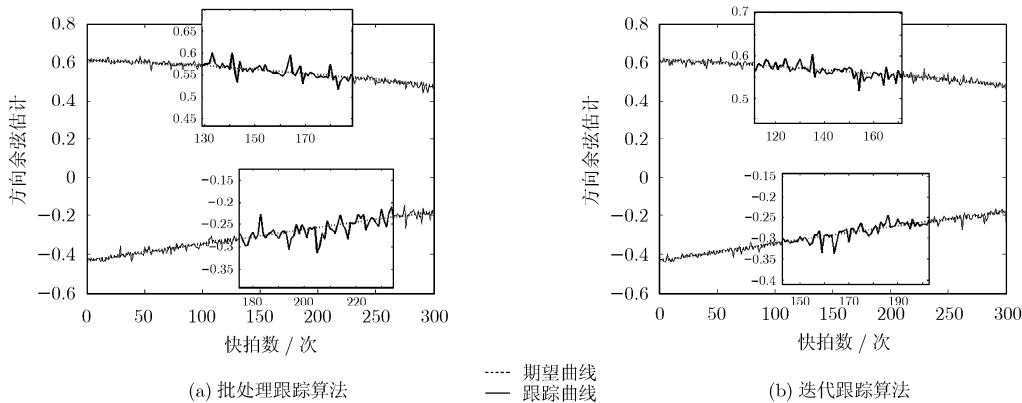


图2 相干信号的方向余弦的跟踪情况

SSPSA算法的RMSE曲线始终位于PSA算法的RMSE曲线下,这说明在运用相同数量的阵元条件下,SSPSA算法的估计精度高于PSA算法的估计精度。

实验 2 假设两个等功率窄带相干信号入射到上述阵列,且阵列对空间信号单次采样,信号源相对于阵列的初始俯仰角为 $\theta = [45^\circ - 60^\circ]$,初始方位角为 $\phi = [30^\circ - 60^\circ]$ 。信号源移动的角度变化律分别为 $\theta_1 = 45^\circ - t \times 0.05^\circ$, $\theta_2 = -60^\circ + t \times 0.05^\circ$, $\phi_1 = 30^\circ - t \times 0.05^\circ$, $\phi_2 = 60^\circ + t \times 0.05^\circ$ 。考虑到完全极化波的极化椭圆具有恒定的极化参数,这里假设两相干信号的极化参数 (γ, η) 分别为 $(50^\circ, 30^\circ)$, $(30^\circ, 45^\circ)$ 。采样次数(快拍数)为300次。信噪比取为 $\text{SNR}=15$ dB。基于批处理跟踪算法^[7]和迭代跟踪算法分别进行10次Monte-Carlo仿真实验,方向余弦估计的平均值随快拍数变化曲线如图2所示。

从图2的仿真结果可以看出,当信噪比一定时,批处理跟踪算法和迭代跟踪算法的跟踪性能都很好,跟踪过程非常稳定,跟踪估计值的精度都非常高。

6 结论

本文对增强阵列有效孔径的单快拍极化平滑估计算法的解相干性能进行了分析,该算法非常适合于快变相干信号的实时平滑处理。在此基础上,本文提出了基于迭代的相干信号DOA跟踪算法,此算法无需奇异值分解和矩阵求逆运算,计算量小,具有较快的跟踪速度。仿真结果表明:单快拍极化平滑估计算法具有较好的估计精度;基于迭代的跟踪算法在保持良好的跟踪精度的同时,计算量低于基于批处理跟踪算法。

参考文献

- [1] 崔伟, 陶建武, 徐惠斌. 极化信号波达方向估计算法[J]. 兵工学报, 2010, 31(7): 982-986.
Cui Wei, Tao Jian-wu, and Xu Hui-bin. A new estimation algorithm of direction-of-arrival [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(7): 982-986.
- [2] He J and Liu Z. Computationally efficient 2D direction finding and polarization estimation with arbitrarily spaced electromagnetic vector sensors at unknown locations using the propagator method [J]. *Digital Signal Processing*, 2009, 19(3): 491-503.
- [3] Korso M N, Boyer R, Renaux A, *et al.* Statistical resolution limit of the uniform linear cogenerated orthogonal loop and dipole array [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(1): 425-431.
- [4] Choi Yang-ho. ESPRIT-based coherent source localization with forward and backward vectors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(12): 6416-6420.
- [5] Rahamim D, Tabrikian J, and Shavit R. Source localization using vector sensor array in a multipath environment[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(11): 3096-3103.
- [6] Thakre A, Haardt M, and Giridhar K. Single snapshot spatial smoothing with improved effective array aperture[J]. *IEEE Signal Processing Letter*, 2009, 16(6): 505-509.
- [7] Yu Fei and Tao Jian-wu. Direction finding and subspace tracking of coherent signals based on single snapshot polarization smoothing algorithm [C]. 2011 International Conference on Computer, Electrical, and Systems Sciences, and Engineering, Guangzhou, China, Apr. 17-18, 2011: 248-251.
- [8] 杨雪亚, 陈柏孝, 朱根生. 基于实值特征子空间迭代的 DOA 估计算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2010, 37(2): 242-247.
Yang Xue-ya, Chen Bai-xiao, and Zhu Gen-sheng. Novel method for DOA estimation of coherent signals by eigen-subspace iteration [J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(2): 242-247.
- [9] Golan S M, Gannot S, and Cohen I. Subspace tracking of multiple sources and its application to speakers extraction[C]. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, Sheraton Dallas Hotel, Dallas, Texas, USA, Mar. 14-19, 2010: 201-204.
- [10] Nehorai A and Tichavsky P. Cross-product algorithm for source tracking using an EM vector sensor[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(10): 2863-2867.
- [11] Toshihisa Tanaka. Fast generalized eigenvector tracking based on the power method [J]. *IEEE Signal Processing Letters*. 2009, 16(11): 969-972.
- [12] Golub G H and Van Loan C F. *Matrix Computation*[M]. Third Edition, Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press, 1996: 448-460.
- [13] 张陆游, 张永顺, 杨云. 基于阵列虚拟平移的快速解相干幂迭代算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 252-255.
Zhang Lu-you, Zhang Yong-shun, and Yang Yun. Fast de-correlation power iterative algorithm based on array virtually removing [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(2): 252-255.

虞飞: 男, 1987年生, 硕士, 研究方向为阵列信号处理。

陶建武: 男, 1959年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事阵列信号处理及应用、非平稳信号处理等方面的研究工作。