

文章编号: 1000-6893(2002) 04-0373-04

增益幅度不同时信号二维方向角和多普勒频率的盲估计

陶建武¹, 石要武², 常文秀²

(1. 空军第二航空学院, 吉林 长春 130022)

(2. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130025)

BLIND ESTIMATION OF 2D ANGLE AND DOPPLER FREQUENCY FOR SIGNALS WITH SENSOR GAIN UNCERTAINTIES

TAO Jian-wu¹, SHI Yao-wu², CHANG Wen-xiu²

(1. The Second Aeronautical Institute of Air Force, Changchun 130022, China)

(2. The Communication Academy, Jilin University, Changchun 130025, China)

摘要: 在各阵元增益幅度不一致的条件下, 提出了一种起伏目标的二维方向角和多普勒频率盲估计的新方法。此方法在各阵元增益幅度不一致的条件下, 仍可获得很好的估计性能, 并能应用于各个信号的频率相同的场合。且具有对噪声不敏感, 不需进行谱峰搜索, 适用范围广等特点。仿真结果表明了此算法的有效性。

关键词: 增益幅度; 二维方向角和频率估计; 空时波达矩阵; 盲估计

中图分类号: V 243 文献标识码: A

Abstract: A new blind estimate of 2D angle and Doppler frequency for fluctuating target signals was proposed with sensor gain uncertainties. The model of fluctuating target signals incident was on an L-shaped uniform linear array, and the space-time DOA matrix of signals was deduced. The azimuths, elevations and Doppler frequencies of the fluctuating target signals with unknown array manifold due to uncertainties of array elements were calculated. When the gain of array elements is not accordant, the performance of this method also is better. This method can completely resolve the 2D-angle estimate of multiple narrow-band signals even with the same Doppler frequency each other. The Gaussian noises in signal sources are efficiently suppressed. This method is computationally efficient with a comparatively high resolution, and the estimations of azimuths, elevations and Doppler frequencies are automatically paired without spectral search. Simulations were presented to show the capabilities of this method.

Key words: sensor gain; three-dimensional parameter estimation; space-time DOA matrix; blind estimates

近年来, 用阵列信号处理技术实现对远场信号的波达方向(DOA)和频率估计一直是人们研究的热点之一^[1-6]。许多学者提出了性能各异的算法, 如最大似然法、多信号分类法(MUSIC)^[1]、旋转不变技术的参数估计法^[2,3]和 DOA 矩阵法^[4,5]等, 但是, 这些方法一是只能对信号的二维参数进行估计, 二是当存在信号模型误差时, 估计性能恶化, 甚至得不到正确的估计结果。而对于 PD 雷达来说, 需要估计回波信号的多普勒频率、方位角和俯仰角三维参数, 只有已知这三维参数, 才能完全确定目标的空间方位和速度。在实际应用中不可避免地存在模型误差的扰动, 因此, 在信号模型存在误差的情况下, 三维参数估计方法的研究越来越得到人们的重视。一些学者采用 DOA

矩阵, 提出了三维参数的估计方法^[6]。但是, 此方法具有一个严格的限制, 即各个信号的频率不能相同, 否则, 就发生“频率兼并”现象, 导致估计的失效。另外, 这些估计方法是在理想模型条件下得到的, 极小的模型误差也可能导致估计算法的性能大大下降。

1 信号模型

假设一个 N 元阵列在空间以 L 形排列, 见图 1, 图中, θ 为目标方位角; ϕ 为目标俯仰角; ψ 为锥角; $d = \lambda/2$ (λ 为工作波长)。在一个相关时间内, 每个阵元接收 K 个相关脉冲串, 假设总共有 M 个相关时间段, 共有 D 个目标信号, 分别来自于 $(\theta_1, \phi_1), \dots, (\theta_D, \phi_D)$ 方向, 其多普勒频率为 f_{d1}, \dots, f_{dD} 。用 $x_{n,k}(m)$ 表示在第 m 个相关时间内第 n 个阵元接收的第 k 次回波, 以第 1 个阵元的第 1 次回波为参考点, 则

$$x_{n,k}(m) = \prod_{i=1}^D s_i(m) g_n \exp \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} (n-1) \cos \Psi_i \right] \exp \left[j \frac{2\pi}{f_r} (k-1) f_{di} \right] + \xi_{n,k}(m) \quad (1)$$

(n = 1, 2, \dots, N-1; k = 1, 2, \dots, K)

$$x_{N,k}(m) = \prod_{i=1}^D s_i(m) g_N \exp \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \Phi_i \right] \exp \left[j \frac{2\pi}{f_r} (k-1) f_{di} \right] + \xi_{N,k}(m) \quad (2)$$

(k = 1, 2, \dots, K)

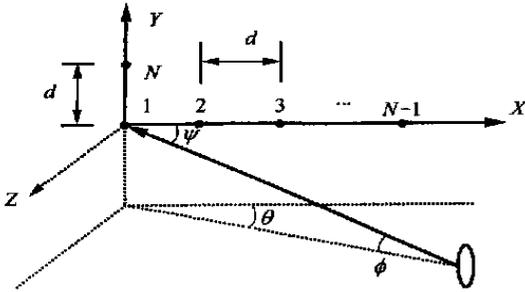


图1 L形均匀线阵阵列结构

Fig. 1 An L-shaped uniform linear array

式中: $s_i(m)$ 是第 i 个目标信号的复包络。假设各个阵元增益幅度不一致, 以第 1 个阵元为参考点, 其增益 g_1 可取 1, 第 n 个阵元的增益幅度可记为 $|g_n| = 1 + \Delta n$, 其相移 $\arg(g_n) = 0$; f_r 为脉冲重复频率; $\xi_{n,k}(m)$ 为接收机加性噪声。用 N 维矢量 $X^k(m)$ 表示第 m 个相关时间内第 k 次回波的阵列数据矢量 ($k = 1, 2, \dots, K$) 则

$$X^k(m) = A \Gamma^{(k-1)}(f_d) S(m) + \xi^k(m) \quad (3)$$

式中: $X^k(m) = [x_{1,k}(m), x_{2,k}(m), \dots, x_{N,k}(m)]^T$; $\xi^k(m) = [\xi_{1,k}(m), \xi_{2,k}(m), \dots, \xi_{N,k}(m)]^T$; $S(m) = [s_1(m), s_2(m), \dots, s_D(m)]^T$; A 是 $N \times D$ 维矩阵, $A = [a^1 \dots a^D]$ 称为方向矩阵; $a^i = [a^{1i} \dots a^{Ni}]^T$ 是 N 维矢量, 称为导向矢量。

$$a_{n,i} = g_n \exp \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} (n-1) \cos \Psi_i \right] \quad (4)$$

(n = 1, 2, \dots, N-1)

$$a_{N,i} = g_N \exp \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \Phi_i \right] \quad (5)$$

$$\Gamma(f_d) = \text{diag} \left[\exp \left[j \frac{2\pi f_d d_1}{f_r} \right], \dots, \exp \left[j \frac{2\pi f_d d_D}{f_r} \right] \right] \quad (6)$$

按通常的做法, 做假设: 信号源数 D 已知, D 个信号 s_1, \dots, s_D 互不相关。噪声 $\xi_{n,k}(m)$ 为零均值, 方差 σ^2 的互不相关的高斯白噪声, 与各个信号源 $s_i(m)$ 之间互不相关。

关于模型作一点说明, 由于目标是起伏的, 相关脉冲串不会太长, 但相关区间数一般很大。因此, 认为 $M \gg K$ 。

2 信号二维方向角和多普勒频率的估计

为了估计方向矩阵 A , 构造如下两个矩阵

$$R_{x_{n,k} x_{N,k}}(m) = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} x_{n,k}(m) x_{N,k}^*(m) = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} \left\{ \prod_{i=1}^D s_i(m) a_{n,i} \exp \left[j \frac{2\pi}{f_r} (k-1) f_{di} \right] + \xi_{n,k}(m) \right\} \left[\prod_{i=1}^D s_i^*(m) a_{N,i}^* \exp \left[-j \frac{2\pi}{f_r} (k-1) f_{di} \right] + \xi_{N,k}^*(m) \right\} = \prod_{i=1}^D \left[\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} s_i(m) s_i^*(m) \right] \cdot a_{N,i}^* a_{n,i} + \sigma^2 \delta(n-N) = \prod_{i=1}^D [R_{s_i s_i}(m) a_{N,i}^* a_{n,i} + \sigma^2 \delta(n-N)] \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

其中: $R_{s_i s_i}(m) = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} s_i(m) s_i^*(m) \quad (8)$

$$R_{x_{n,k^2} x_{(k+1)}}(m) = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} x_{n,k}(m) x_{2,(k+1)}^*(m) = \prod_{i=1}^D [R_{s_i s_i}(m) a_{2,i}^* a_{n,i} \exp \left[j \frac{2\pi f_d d_i}{f_r} \right] + \prod_{i=1}^D [R_{s_i s_i}(m) a_{N,i}^* a_{n,i} \frac{a_{2,i}^*}{a_{N,i}} \exp \left[j \frac{2\pi f_d d_i}{f_r} \right]] \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

令: $R_X(m) = [R_{x_{1,k} x_{N,k}}(m) \dots R_{x_{n,k} x_{N,k}}(m) \dots R_{x_{N,k} x_{N,k}}(m) - \sigma^2]^T$

$$R_Y(m) = [R_{x_{1,k^2} x_{(k+1)}}(m) \dots R_{x_{n,k^2} x_{(k+1)}}(m) \dots R_{x_{N,k^2} x_{(k+1)}}(m)]^T$$

$$R_S(m) = [R_{s_1 s_1}(m) a_{N1}^* \dots R_{s_D s_D}(m) a_{ND}^*]^T$$

则式(7)、式(9)的矩阵形式为

$$R_X(m) = A R_S(m) \quad (10)$$

$$R_Y(m) = A \Phi R_S(m) \quad (11)$$

其中 Φ 为 $D \times D$ 对角矩阵

$$\Phi = \text{diag} \left[\frac{a_{21}^*}{a_{N1}^*} \exp \left[j \frac{2\pi f_d d_1}{f_r} \right], \dots, \frac{a_{2D}^*}{a_{ND}^*} \exp \left[j \frac{2\pi f_d d_D}{f_r} \right] \right] =$$

$$\frac{g_{2i}^*}{g_N^*} \text{diag} \left\{ \exp \left[j \left(-\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \Psi_i + \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \Phi_i + \frac{2\pi f_d d_i}{f_r} \right) \right], \dots, \exp \left[j \left(-\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \Psi_D + \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \Phi_D + \frac{2\pi f_d d_D}{f_r} \right) \right] \right\}$$

$$\left. \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi + \frac{2\pi f_{di}}{f_r} \right\} \quad (12)$$

将 M 个相关时间段的组成矩阵, 得

$$X = [R_x(1) \quad R_x(2) \quad \dots \quad R_x(M)] \quad (13)$$

$$Y = [R_y(1) \quad R_y(2) \quad \dots \quad R_y(M)] \quad (14)$$

由式(10)、式(11)得

$$X = AS, Y = A\Phi S \quad (15)$$

其中:

$$S = [R_s(1) \quad R_s(2) \quad \dots \quad R_s(M)] \quad (16)$$

定义时空 DOA 矩阵为

$$R_{rs} = YX^{-1} \quad (17)$$

其中: X^{-1} 是 X 的一种广义逆, 而

$$X^{-1} = X^H (XX^H)^{-1} \quad (18)$$

定理 1^[4]: 若 A 与 S 满秩, Φ 无相同的对角元素, 则时空 DOA 矩阵 R_{rs} 的 D 个非零特征值等于 Φ 中 D 个对角元素, 而且这些特征值对应的特征向量等于相应导向矢量, 即

$$R_{rs}A = A\Phi \quad (19)$$

因此, 对 R_{rs} 做特征分解可以得到 A 和 Φ . 从 A 和 Φ 可以估计信号的二维方向角和多普勒频率。

(1) 信号的二维方向角的估计 由上述可知, A 和 S 是满秩矩阵, Φ 无相同的对角元素, 满足定理 1 的条件, 对 R_{rs} 进行特征值分解, 即

$$R_{rs} = \sum_{i=1}^D \lambda_i V_i V_i^H \quad (20)$$

其中: Φ 的对角元素 Φ_i 等于 R_{rs} 的特征值 λ_i , 而方向矩阵 A 的第 i 列向量 a_i 等于该特征值所对应的特征向量 $V_i = [v_{1,i} \quad v_{2,i} \quad \dots \quad v_{N,i}]$, $i = 1, 2, \dots, D$. 即

$$a_{n,i} = g_n \exp \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} (n-1) \cos \Psi_i \right] = v_{n,i} \quad (n = 1, 2, \dots, N-1) \quad (21)$$

$$a_{N,i} = g_N \exp \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi_i \right] = v_{N,i} \quad (22)$$

由于方向角的估计只与取特征向量 V_i 的相角有关, 且各阵元增益的相移都为零, 取 $n = 2$, 从式(21)、式(22)得

$$\Psi_i = \arccos \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \arg(v_{2,i}) \right] \quad (23)$$

$$\phi_i = \arcsin \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \arg(v_{N,i}) \right] \quad (24)$$

因为 $\cos \Psi_i = \cos \theta_i \cos \phi_i$ (25)

所以 $\theta_i = \arccos[\cos \Psi_i / \cos \phi_i]$ (26)

$$\Phi_i = \frac{g_N^*}{g_N} \exp \left[j \left[\frac{-2\pi d}{\lambda} \cos \Psi_i + \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi_i + \frac{2\pi f_{di}}{f_r} \right] \right] = \lambda_i \quad (27)$$

且各阵元增益的相移都为零, 所以

$$f_{di} = \frac{f_r}{2\pi} \left[\arg(\lambda_i) + \frac{2\pi d}{\lambda} (\cos \Psi_i - \sin \phi_i) \right] \quad (28)$$

称这种三维参数估计方法为三维时空 DOA 矩阵方法, 由于导向矢量未精确已知, 因此这种估计方法是盲的。该方法无需谱峰搜索, 也不存在参数配对问题。由于 A 是 $N \times D$ 维矩阵, 所以在保证定理 1 中 A 满秩的条件下, 最多可估计 $N - 1$ 个信号的三维参数。由式(12)可知, 由于不同目标的方位角、俯仰角和多普勒频率不可能全相同, Φ 矩阵的各个对角元素不可能相同, 因而, R_{rs} 具有不同特征值, 与不同特征值对应的特征向量是线性独立, 这就保证 A 矩阵和 S 矩阵是满秩, 从而彻底解决了“频率兼并”现象, 即当各个目标多普勒频率相同时, Φ 矩阵的各个对角元素都相同, 与相同特征值对应的各个特征向量有可能线性相关, 因而, 无法估计出各个目标的二维方向角, 估计方法失效, 这种现象称为“频率兼并”现象。另外, 由式(10)、式(11)可知, $R_x(m)$ 和 $R_y(m)$ 不含噪声项, 这是因为对于白噪声 $\xi_{n,k}(m)$, 时空变换将其变为零。因此, 此方法对噪声不敏感, 具有良好的抗噪能力。由于信号的二维方向角和多普勒频率的估计只取决于波达矩阵 R_{rs} 的特征值和特征向量的相位, 而与各个阵元增益幅度无关, 因此, 当各个阵元增益幅度不一致时, 此方法仍然有效。

3 计算机仿真

考虑图 1 所示的阵列, 取脉冲重复频率 $f_r = 300\text{Hz}$, 相干脉冲数 $K = 2$, 相干区间数目 $M = 512$, 各个阵元增益幅度误差 Δv_i 的方差为 9%。2 个目标的信噪比相同, 都为 10dB, 2 个目标的俯仰角、方位角和多普勒频率参数分别为 $(12^\circ, 221^\circ, 102\text{Hz})$ 和 $(15^\circ, 224^\circ, 102\text{Hz})$, 即频率存在兼并的情况。采用本文提出的方法对这 3 个参数进行估计, 图 2 给出了 30 次独立实验结果。由图 2 可见, 本方法可以将 2 个目标分开, 若增加相干脉冲数 K 时, 平滑噪声相关性效果好, 估计值的精度会更高。为了说明各个阵元增益幅度不一致对估计算法的影响, 图 3 给出了增益幅度不一致性与估计均方根差的仿真结果, 其中, 实线为本文

方法,虚线为传统方法^[6]。从图3可见,与传统方法相比,本文方法对增益幅度不一致性不敏感。

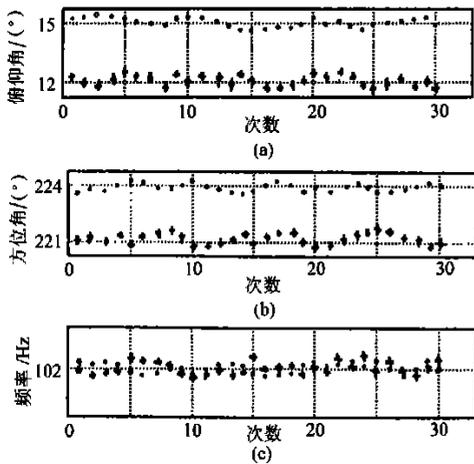


图2 3个参数估计的仿真结果

(a) 俯仰角估计; (b) 方位角估计; (c) 多普勒频率估计

Fig. 2 The simulative results for estimate of 2D angle and Doppler frequency

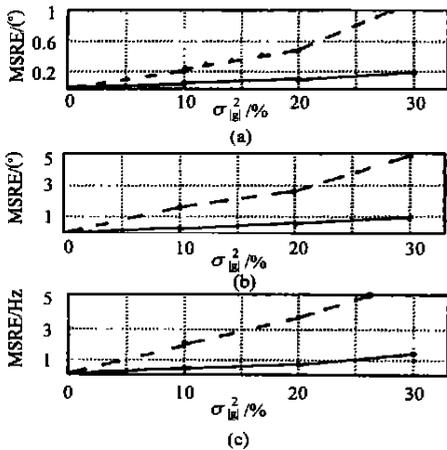


图3 增益幅度不一致性与估计均方根差的仿真结果

(a) 俯仰角估计; (b) 方位角估计; (c) 多普勒频率估计

Fig. 3 The simulative results for discord of gain and estimate MSRE

4 结论

针对L形均匀线阵,在各阵元增益幅度不一致的条件下,提出了一种信号的二维方向角和多普勒频率盲估计的新方法,特点如下:

(1) 充分利用了信号的时域和空域特性,从而实现信号的二维方向角和多普勒频率的同时估计,这是以往的大多数估计算法所达不到的。

(2) 在各阵元增益幅度不一致的条件下,仍

可对信号的二维方向角和多普勒频率进行估计。

(3) 彻底解决了所谓的“频率兼并”问题,使估计算法的应用范围扩大。

(4) 在未精确已知阵列流形条件下,实现信号三维参数的估计,因此,它是一种盲估计,且对噪声不敏感,具有良好的抗噪能力。

(5) 无需谱峰搜索和参数配对,且除了估计出信号的二维方向角和多普勒频率外,还可以由式(4)、(5)得到各阵元的增益 g_n ,这在阵列校正中是十分有用的。

(6) 当各阵元相位不一致时,可采用总体最小二乘法(TLS)对信号的二维方向角和多普勒频率进行估计。

参 考 文 献

- [1] Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans on SP, 1986, 34(3): 267-280.
- [2] Paulraj A, Roy R, Kailath T. A subspace rotation approach to signal parameter estimation [J]. Proc of IEEE [C]. 1986, 74(7): 1044-1046.
- [3] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameter Via rotational invariance technique [J]. IEEE Trans on AS-SP, 1989, 37(7): 984-995.
- [4] 金梁, 殷勤业. 时空 DOA 矩阵方法 [J]. 电子学报, 2000, 28(6): 8-12.
- [5] Yin Q, Newcomb R, Zou L. Estimating 2-D angle of arrival via two parallel linear arrays [A]. Proc IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing [C]. 1989, 3: 2803-2806.
- [6] Zoltowski M D, Mathews C P. Real-time frequency and 2-D angle estimation with sub-Nyquist spatio-temporal [J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42(10): 2781-2794.

作者简介:



陶建武(1959-) 男,空军第二航空学院副教授,硕士,吉林大学通信工程学院博士生,主要从事雷达信号的波达方向估计,容错处理及时一频分析等,曾获军队科技进步奖三项,发表论文20多篇。电话:0431-6958404。Email: taojw@263.net。

石要武(1954-) 男,吉林大学通信工程学院教授,博士生导师,主要从事非平稳信号分析与处理,混沌中信号的检测与处理等,曾获省部级科技进步奖四项,发表论文200多篇,其中进入EI及ISTP检索的论文20多篇。电话:0431-5705725。Email: shiyw@jlu.edu.cn。

(责任编辑:俞敏)