

# 圆形传感器阵列运动多目标 2D-DOA 估计

曹国侯, 宁强

(成都军区工程科研设计所, 昆明 650222)

**摘要:**针对雷场低空运动多目标方向角估计中, 现有算法需要设置立体传感器阵列, 且估计精度还不能满足实战化要求等问题, 提出了基于圆形传感器阵列的运动多目标二维波达方向估计方法; 该方法用向量来表示方向角, 采用独立分量分析算法, 并结合波束形成算法, 实现运动多目标方向角估计; 场地实验表明: 该方法能够准确地识别运动多目标的数目, 其二维波达方向估计精度比基于小波加权的相关时延算法要好, 为提高雷场运动多目标识别率和定位精度提供了新的技术途径。

**关键词:** DOA 估计; 运动多目标; 独立分量分析; 圆型阵列

**本文引用格式:** 曹国侯, 宁强. 圆形传感器阵列运动多目标 2D-DOA 估计[J]. 兵器装备工程学报, 2016(1): 78-81.

**Citation format:** CAO Guo-hou, NING Qiang. 2D-DOA Estimation of Moving-Target Based on Round Sensor Array[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(1): 78-81.

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2016)01-0078-04

## 2D-DOA Estimation of Moving-Target Based on Round Sensor Array

CAO Guo-hou, NING Qiang

(Chengdu Military Area Engineering Institute of Scientific Research and Engineering Design, Kunming 650222, China)

**Abstract:** For moving multi-target direction angle estimation of the minefield, the exiting algorithms need to set up the three-dimensional sensor array, and the resolution is not good enough. A new method was proposed to estimate the 2D-DOA of the moving multi-target based on the round sensor array. The method combined with the independent component analysis algorithm and the beam-forming algorithm, using vector to represent the direction angle, which can estimate the 2D-DOA of the targets. The field experiments show that the method plays better than the cross correlation algorithm of 2D-DOA estimation, and provides a new way for improving the minefield movement targets identification and positioning precision.

**Key words:** DOA estimation; moving multi-target; independent component analysis; round sensor

雷场运动多声源目标的二维波达方向(Direction of Arrival, DOA)估计算法有多种, 如波束形成算法、MUSIC 算法、ESPRIT 算法等, 都需要设置立体传感器阵列, 且估计精度还不能满足实战化要求。对于传感器阵列, 随机布设传感器阵列可以实现多目标 2D-DOA 估计, 但需要传输大量数据, 对网络通信能力要求较高, 能量消耗大, 且估计精度受传感器分布及其与目标相对位置影响<sup>[1]</sup>。十字型立体阵列冗余度小, 具有分维特性, 通过增加阵列尺寸可以提高方位角和俯仰角的估计精度, 但程度有限, 因为方位角估计精度会随俯仰角角度的增大而提高, 但俯仰角角度增大其自身的估计精

度又降低了<sup>[2-3]</sup>。

针对以上问题, 提出采用独立分量分析 (Independent Component Analysis, ICA) 算法和波束形成算法, 借助平面 6 元圆形均布传感器阵列, 以提高雷场运动多目标 2D-DOA 估计能力。

### 1 信号模型

$M$  元圆形均布传感器阵列半径为  $R$ , 阵列中心位于坐标原点, 如图 1 所示。

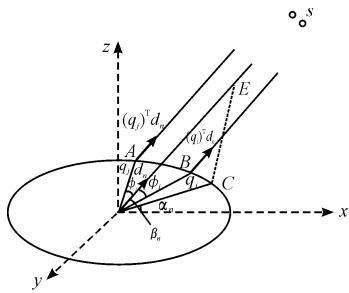


图1 多目标2D-DOA估计模型

声源目标数目为  $N(M \geq N)$ , 其二维方向角为  $(\alpha_n, \beta_n)$ , 其中  $\alpha_n$  为方位角,  $\beta_n$  为俯仰角,  $n = 1, 2, \dots, N$ .  $t$  时刻传感器采样信号为

$$X[t] = A[t]S[t] + v[t] \quad (1)$$

式(1)中:  $S[t]$  是目标源信号,  $A[t]$  是由传输信道等决定的混合矩阵,  $v[t]$  是环境及系统噪声. 采样信号经白化预处理后:

$$Z[t] = T[t]A[t]S[t] \quad (2)$$

式(2)中:  $T[t]$  为白化矩阵.

由于混合矩阵  $A[t]$  未知, 无法从观测信号直接获得源信号, 需要构造分离矩阵  $W$ , 使得:

$$Y[t] = WZ[t] = WAT[t]S[t] = \hat{S}[t] \quad (3)$$

那么  $Y[t]$  就是对目标源  $S[t]$  的一种估计<sup>[4-5]</sup>.

## 2 多目标2D-DOA估计算法

采用单位向量  $q_m$  来表示信号源的方位角, 向量  $d_n$  表示传感器位置(如图1所示), 那么:

$$q_n = [\cos\beta_n \cos\alpha_n, \cos\beta_n \sin\alpha_n, \sin\beta_n] \quad (4)$$

各传感器相对于阵列中心的时间延迟为

$$\tau_{n,i} = d_i^T \cdot \frac{q_n}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \|d_i\| \cdot \|q_n\| \cos\phi_{n,i} \quad (5)$$

式(5)中:  $c$  为声速,  $i, j = 1, 2, \dots, m$ .

各传感器相对阵列中心的延迟信号可以表示为

$$x_{n,i}(t - \tau) = m(t) e^{j\omega t} e^{-j\omega \tau} = m(t) e^{j\omega t} \xi_{n,i} \quad (6)$$

式(6)中:  $\xi_{n,i} = e^{\frac{2\pi}{\lambda} \|d_i\| \cdot \|q_n\| \cos\phi_{n,i}}$ .

由于主要研究源信号的方向角, 经预处理后的  $\tilde{A}$  可视为源信号的导向矢量矩阵, 即:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \theta_{1,1} & \theta_{1,2} & \cdots & \theta_{1,M-1} & \theta_{1,M} \\ \theta_{2,1} & \theta_{2,2} & \cdots & \theta_{2,M-1} & \theta_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{N-1,1} & \theta_{N-1,2} & \cdots & \theta_{N-1,M-1} & \theta_{N-1,M} \\ \theta_{N,1} & \theta_{N,2} & \cdots & \theta_{N,M} & \theta_{N,M} \end{bmatrix} \quad (7)$$

又因:

$$(W[t]T[t])^{-1} = A[t] \quad (8)$$

那么:

$$e^{\frac{2\pi}{\lambda} \|d_i\| \cdot \|q_n\| \cos\phi_{n,i}} = (W[t]T[t])_{n,i}^{-1} \quad (9)$$

考虑到  $q_m$  是单位矩阵, 即  $\|q_m\| = 1$ , 当确定传感器位置

$d_i$  后, 可以得到  $\phi_{n,i}$ , 同理可计算出  $\phi_{n,i}$  ( $i, j$  为相邻传感器)。

从图1中, 还可以得到  $\phi_{n,i}, \phi_{n,j}$  与  $\alpha_n, \beta_n$  存在如下关系:

$$\cos\alpha_n \times \cos \frac{4\pi}{M} + \sin\alpha_n \times \sin \frac{4\pi}{s} = \frac{\cos\phi_{1,n}}{\cos\beta_1} \quad (10)$$

$$\cos\alpha_n \times \cos \frac{2\pi}{M} + \sin\alpha_n \times \sin \frac{2\pi}{s} = \frac{\cos\phi_{2,1}}{\cos\beta_n} \quad (11)$$

式(10)、(11)中:  $M$  为传感去个数. 代入传感器向量可以计算出第  $n$  个目标的2D-DOA估计  $(\hat{\alpha}_n, \hat{\beta}_n)$ <sup>[6]</sup>.

## 3 DOA估计优化算法

可以假设在足够短的时间内, 目标是匀速直线运动的,  $\phi_{nk}$  和  $\varphi_{nk}$  是第  $n$  个目标在采样时刻  $t$  时的实际方位角和俯仰角。

图2中  $\alpha_{nk}$  为实际方位角  $\phi_{nk}$  的估计值,  $\beta_{nk}$  为实际俯仰角  $\varphi_{nk}$  的估计值;  $\nu_{nk}$  为目标飞行速度, 若目标在同一高度飞行时,  $\nu_{nk} = [\nu_{nzk} \ \nu_{nyk} \ \nu_{nz}]^T$ , 否则  $\nu_{nk} = [\nu_{nzk} \ \nu_{nyk} \ \nu_{nz}]^T$ ; 足够短时间内目标运动轨迹可以认为是直线  $P_0P_{nk}$ ,  $AB$  是其延长线;  $EF$  是  $AB$  在  $XOY$  平面上的投影,  $OD \perp EF, P_{nk}D \perp EF$ , 则:

$$\varphi_{nk} = \alpha_{nk} + \tilde{e}_{\phi k} \quad (12)$$

$$\varphi_{nk} = \beta_{nk} + \tilde{e}_{\phi k} \quad (13)$$

式(12)、(13)中:  $\tilde{e}_{\phi k}$  和  $\tilde{e}_{\phi k}$  为估计误差。

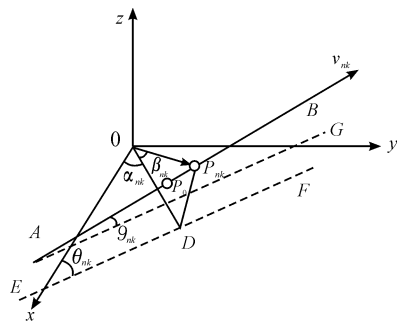


图2 目标方向角关系

对式(12)两边取正弦得到:

$$\sin\varphi_{nk} \cdot \cos\alpha_{nk} - \cos\phi_{nk} \cdot \sin\alpha_{nk} = 0 \quad (14)$$

令目标  $n$  在采样点  $k$  时的坐标为  $p_{nk} = [x_{nk} \ y_{nk}]$ , 则有:

$$x_{nk} = \sqrt{x_{nk}^2 + y_{nk}^2} \cos\alpha_{nk} \quad (15)$$

$$y_{nk} = \sqrt{x_{nk}^2 + y_{nk}^2} \sin\alpha_{nk} \quad (16)$$

将式(16)代入(14)得到:

$$(\sin\phi_{nk} - \cos\phi_{nk})p_{nk} = \sqrt{x_{nk}^2 + y_{nk}^2} \sin\tilde{e}_{\phi k} \quad (17)$$

在足够短的时间内, 直升机匀速从  $P_{n0}$  运动到  $P_{nk}$ , 则:

$$P_{nk} = k \cdot t \cdot \nu_{nk} + p_{n0} \quad (18)$$

式(18)中:  $t$  为采样间隔。

将式(17)代入式(18)得到:

$$(k \cdot t \cdot \sin\phi_{nk} - k \cdot t \cdot \cos\phi_{nk})\nu_{nk} =$$

$$(\sin\phi_{nk} - \cos\phi_{nk})p_{nk} + \sqrt{x_{nk}^2 + y_{nk}^2} \sin\tilde{e}_{\phi k} \quad (19)$$

联立从  $P_{n0}$  到  $P_{nk}$  的方程, 并以矩阵形式表示为

$$C_{nk} \cdot \nu_{nk} = D_{nk} \cdot P_{n0} + E_{nk} \quad (20)$$

其中:

$$C_{nk} = \begin{bmatrix} t \sin \phi_{n1} & -t \sin \phi_{n1} \\ \vdots & \vdots \\ t \sin \phi_{nk} & -t \sin \phi_{nk} \end{bmatrix}$$

$$D_{nk} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{n1} & -\sin \phi_{n1} \\ \vdots & \vdots \\ \cos \phi_{nk} & -\sin \phi_{nk} \end{bmatrix}$$

且  $C_{nk}$ 、 $D_{nk}$  均为  $k \times 2$  阶矩阵;  $E_{nk}$  为  $1 \times k$  阶误差矩阵。

此时,若  $(C_{nk}^T C_{nk})$  可逆,则方程(20)的最小二乘解为

$$v_{nk} = L_{nk} P_{n0} = (C_{nk}^T C_{nk})^{-1} C_{nk}^T D_{nk} P_{n0} \quad (21)$$

式(21)中:  $L_{nk}$  为  $2 \times 2$  阶矩阵。

$$\text{令: } L_{nk} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix}, P_{n0} = \sqrt{x_{n0}^2 + y_{n0}^2} \begin{bmatrix} \cos \alpha_{n0} \\ \sin \alpha_{n0} \end{bmatrix}, \text{代入式}$$

(20),则:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{nxk} \\ \hat{v}_{nyk} \end{bmatrix} = \sqrt{x_{n0}^2 + y_{n0}^2} \begin{bmatrix} l_{11} \cos \alpha_{n0} & l_{12} \sin \alpha_{n0} \\ l_{21} \cos \alpha_{n0} & l_{22} \sin \alpha_{n0} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\theta_{nk} = \arctan\left(\frac{\hat{v}_{nxk}}{\hat{v}_{nyk}}\right) = \frac{l_{21} \cos \alpha_{n0} + l_{22} \sin \alpha_{n0}}{l_{11} \cos \alpha_{n0} + l_{12} \sin \alpha_{n0}} \quad (23)$$

那么,优化后的方位角为

$$\tilde{\alpha}_{nk} = \frac{\pi}{2} - \theta_{nk} \quad (24)$$

## 4 场地实验

实验在某孤岛上进行,场地开阔,待测目标为国产某型直升机,6个 MK224 型声传感器组成的圆形均布传感器阵列,半径为 1 m,采样频率为 8 kHz。由于直升机机载定位设备精度不能满足实验要求,而加装 GPS 定位系统又无法实现与地面同步比对,选用高精度激光测距仪来测定直升机高度、距离等信息,其采样频率为 1 kHz,测程范围 5 ~ 2 000 m。试验场地布置示意图如图 3 所示。

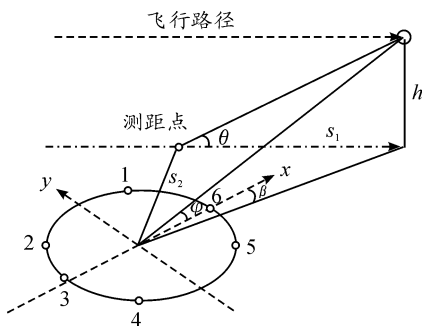


图3 场地实验设置示意图

标定激光测距机和传感器阵列位置后,激光测距仪记录数据与传感器阵列估计值换算关系为

$$\text{方位角: } \alpha = \arctg\left(\frac{s_1}{s_2}\right) - \frac{\pi}{6} \quad (25)$$

$$\text{俯仰角: } \beta = \arctg\left(\frac{h}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}\right) - \frac{\pi}{6} \quad (26)$$

为了检测本文算法的 2D-DOA 估计性能,结合直升机巡

航实际和现场条件,设定直升机分别以 4 种不同状态飞行,其速度/高度分别为:(50 km/h,50 m)、(50 km/h,150 m)、(150 km/h,50m)和(150 km/h,150m)。实验共测得数据 46 组,其中完整数据 33 组。图 4 为第 1 组(50 km/h,50 m)采样信号局部。

由于场地实验只有一个目标,通过设置阈值 tol 引入两组已知噪声,以检验本文方法对多目标 2D-DOA 估计能力,其分离输出如图 5 所示。

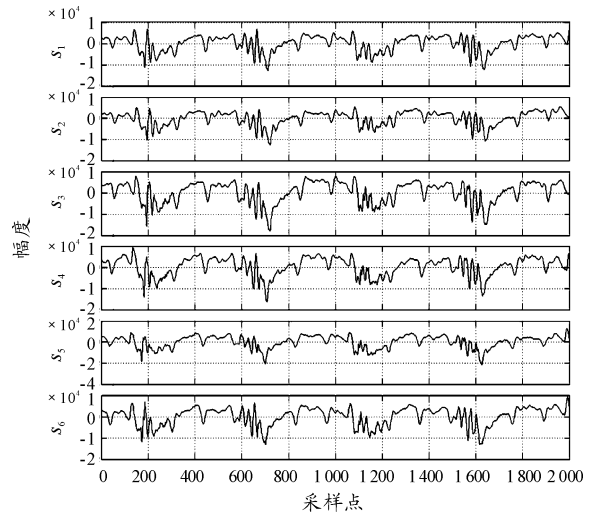


图4 第1组采样信号局部( $t:300\ 000 \sim 302\ 000$ )

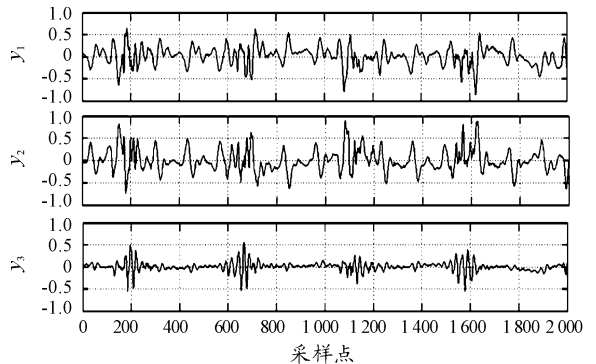


图5 第1组分离输出局部( $t:300\ 000 \sim 302\ 000$ )

在  $t = 300\ 500$  时混合-分离复合矩阵  $C$  为

$$C(300\ 500) = \begin{bmatrix} 0.017\ 2 & \underline{0.253\ 3} & -0.00\ 9 \\ 0.305\ 8 & -0.057\ 7 & \underline{0.870\ 3} \\ 0.212\ 9 & \underline{2.871\ 5} & 0.094\ 6 \end{bmatrix} \quad (27)$$

式(27)中下划线表示每行中绝对值最大的元素。

若  $Y(t)$  为源信号的一种估计,则满足式:

$$Y(t) = C(t)S(t) = W(s)T(t)A(t)S(t) \quad (28)$$

联合式(27)和式(28)可以得到(保留两位小数):

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.002s_1 + 0.25s_2 \\ -0.31s_1 - 0.58s_2 + 0.87s_3 \\ 0.21s_1 + 2.87s_2 + 0.09s_3 \end{pmatrix} \quad (29)$$

矩阵  $C$  每一行中的最大绝对值都远大于第二大绝对值,即  $Y$  中每一路输出中只有一个源信号占主要成分。

由式(9)~(11)、(24)可以得到目标的2A-DOA估计值,如表1所示。表1还比较了激光测距仪记录、本文算法和基于小波加权的相关时延估计算法,可以看出:

表1 2D-DOA估计比较

算法		50 km/h、50 m	50 km/h、150 m	150 km/h、50 m	150 km/h、150 m
		本文算法	$\alpha$	63.53°	65.57°
	$\beta$	26.86°	20.59°	71.04°	64.17°
相关时延估计算法	$\alpha$	63.40°	66.18°	-31.47°	-32.44°
	$\beta$	21.06°	22.72°	79.95°	72.04°
激光测距仪测量值	$\alpha$	65.10°	67.10°	-34.55°	-37.36°
	$\beta$	24.30°	23.30°	74.61°	68.03°

两种算法都对直升机飞行速度很敏感,受飞行高度影响相对较小。在直升机巡航速度为50 km/h,高度为50 m时,DOA估计效果最佳,本文算法方位角误差1.57°,俯仰角误差2.56°,基于小波加权的相关时延估计算法方位角误差1.7°,俯仰角误差为3.24°,本文算法更准确。

当直升机巡航速度为150 km/h,高度为50 m时,两种算法DOA估计误差都迅速增大,本文算法方位角误差为2.87°,俯仰角误差3.57°;基于小波加权的相关时延估计算法方位角误差3.08°,俯仰角误差为5.34°,本文算法相对更准确。

当直升机巡航速度为150 km/h,高度为150 m时,两种算法的DOA估计精度都较低,本文算法方位角误差为4.15°,俯仰角误差3.96°;基于小波加权的相关时延估计算法方位角误差4.92°,俯仰角误差为4.01°。

当直升机巡航速度为50 km/h,高度为150 m时,基于小波加权的相关时延估计算法精度更高。

由于直升机巡航速度快,激光测距仪记录数据非常有限,采用分离输出和源信号的一致性程度间接检验其它时刻的2D-DOA估计情况。通过计算混合信号及其差分混合矩阵的相关矩阵,以ICA各输出分量对应的最大相关系数为指标来判断分离结果与源信号的一致性<sup>[7]</sup>。从第1组分离结果( $k:300\ 000 \sim 302\ 000$ )中随机抽取100点分离结果,其分离信号互相关系数取均值:  $|r_{w_i \hat{w}_i} - 1|_{100} < 0.04$ ,可以认为本文ICA算法对低空运动声源分离结果与信号源是一致的,表明其DOA估计结果是可信的。

数值模拟表明:当目标重叠时本文方法也能有效分辨目标数目,并估计2D-DOA,如图6所示(主频为1 Hz,采样频率为100 Hz)。

造成本文算法2D-DOA估计误差的原因有:目标是运动的,而声音传播需要时间,使得DOA估计值要比实际方位滞后;同时,本文算法是对短时长内目标真实方位角均值的一种估计,还不是严格意义上的实时估计。

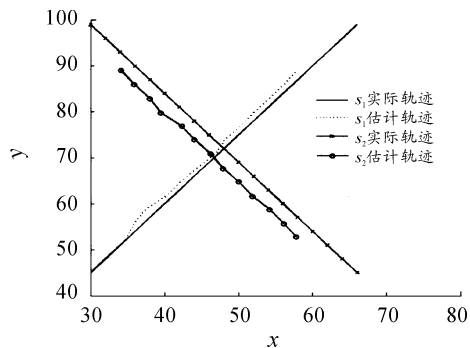


图6 2个目标飞行轨迹交叉时的DOA估计

## 5 结论

本文提出了基于圆形传感器阵列的运动多目标二维波达方向估计方法。该方法用向量来表示方向角,采用独立分量分析算法,并结合波束形成算法,实现运动多目标方向角估计。场地实验表明:该方法对雷场低空运动多目标二维波达方向估计能力比基于小波加权的相关时延算法要好,为提高雷场运动多目标识别率和定位精度提供了新的技术途径。然而,受条件限制,场地试验中目标数只有一个,且激光测距仪记录数据有限,使得对本文方法的验证还不够充分,需要进一步深入和完善。同时,雷场必须具备应对多种类型目标的能力,因此,在下一步工作中,研究能够同时估计多种类型目标DOA的方法是很有必要的。

## 参考文献:

- [1] MASNADI A M, BANANI A. Separation and tracking of maneuvering sources with ICA and particle filters using a new switching dynamic model [C]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46 (3): 988 - 1005.
- [2] 张小飞,徐大专. 均匀阵中盲联合角度和时延估计方法[J]. 通信学报, 2006(12): 55 - 60.
- [3] 刘凯国. 反直升机地雷声定向技术试验研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2011.
- [4] CHRISTIAN M. Coviello. Source separation and tracking for time varying systems[D]. The Pennsylvania State University, the Graduate School, 2005.
- [5] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 宁强. 基于ICA的雷场多目标方位角(DOA)估计[D]. 南京: 解放军理工大学, 2013.
- [7] 姚志湘, 蹇丽华, 刘煊彬. 多变量统计分析中独立变量数目的判定方法[J]. 华南理工大学(自然科学版), 2007(1): 123 - 128.