

基于旋转干涉仪圆阵化的多目标参数估计新算法

辛金龙^{*①} 廖桂生^① 杨志伟^① 解 虎^②

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

摘 要: 针对现有的长基线旋转干涉仪存在相位模糊,且不能对多个同频、同时到达的目标信号进行角度估计问题,该文提出一种基于旋转干涉仪虚拟圆阵化的多目标波达参数估计新算法。该方法首先将旋转干涉仪采样得到的两通道数据进行共轭相乘操作,获得虚拟圆阵信号;然后采用波束空间变换法将虚拟圆阵数据从阵元空间转换到波束空间,得到虚拟线阵数据序列;最后在实波束域上实现多目标 2 维角度无模糊估计。相比于传统旋转干涉仪方法而言,所提方法在不增加接收通道的同时,能够实现多目标角度的无模糊测量。仿真实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 多目标参数估计; 旋转干涉仪; 虚拟圆阵; 波束空间转换; 相位解模糊

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)02-0486-07

DOI: 10.11999/JEIT170217

Multiple Source Parameter Estimation for Rotating Interferometer Using Circular Array Processing

XIN Jinlong^① LIAO Guisheng^① YANG Zhiwei^① XIE Hu^②

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Xi'an Branch, China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: Focus on the problem of phase ambiguity and the issue that it is impossible to estimate the unambiguous angles of multiple sources with the same frequency and time of arrival. An approach for multiple sources parameters estimation with rotating interferometer using virtual circular array processing is proposed in this paper. Firstly, the virtual circular array data is constructed by taking conjugate multiplication of the two channel data received by the rotating interferometer. Then, the virtual linear array data is obtained by employing beamspace transformation, which performs mapping from element-space to beamspace domain. Finally, the unambiguous angles of the multiple emitters are achieved in beamspace domain. Compared with conventional rotating interferometer methods, the proposed method can deal with the problem of unambiguous Direction Of Arrival (DOA) estimation of multiple emitters with only two receiving channels. The validity of the proposed method is verified by the simulation results.

Key words: Multiple source parameter estimation; Rotating interferometer; Virtual circular array; Beamspace transformation; Unwrap phase ambiguity

1 引言

辐射源的 DOA 估计一直以来是人们研究的热点。常见的阵列测角方法包括波束形成算法、Capon 算法及子空间类算法,其中波束形成算法测角精度受瑞利限的限制,Capon 算法及子空间类算法虽然能够突破瑞利限制,具有高精度的角度估计能力,但是运算量大、实时性较差,尤其是对星载测角定

位系统而言,该类算法的工程应用面临更多技术挑战。

基于相位干涉技术的 DOA 估计方法具有精度高、实时性好等优点,在无线电探测、侦察、监视、预警等领域具有重要而广泛的应用^[1]。干涉仪基线越长,测角精度越高,当基线长度大于信号半波长时,相位差测量会出现模糊从而导致测向模糊,因此需要解相位模糊。一类解模糊方法是利用干涉仪多基线组合的方法^[2-8],该类方法利用多组基线之间的特定几何关系实现解模糊,但此类方法的系统复杂性高;另一类方法是基于旋转干涉仪的测角方法^[9-14],该类方法利用旋转基线干涉仪在不同转角下测量的模糊相位差序列来估计来波方向,能有效解决无模糊视角范围和测角精度之间的矛盾问题,并且系统的复杂性较低,但是该类算法多数只适用于单个目标的测量,没有考虑多目标的参数估计。

收稿日期: 2017-03-17; 改回日期: 2017-11-13; 网络出版: 2017-12-11

*通信作者: 辛金龙 lixd12@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671352, 61231017), 国家青年科学基金(61501471), “认知无线电与信息处理”教育部重点实验室基金(CRKL160206)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671352, 61231017), The National Science Foundation for Young Scientists of China (61501471), The Foundation of Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, Ministry of Education (CRKL160206)

文献[9]利用地球同步卫星上的旋转基线测量的模糊相位差对单目标方位和俯仰角进行估计，给出了原理性的解模糊方法。文献[10,11]给出了单个目标情况下相位差解模糊的具体方法，但是没有考虑多目标的情况。文献[12]直接利用旋转基线旋转过程中的多次测量得到的模糊相位差进行辐射源定位，同样没有考虑多目标的情况。文献[13]分析了旋转长基线测向的两类相位差观测模型，并推导了单个目标条件下的无模糊测向条件。文献[14]通过对旋转干涉仪测量得到的模糊相位差进行两次转换，得到信号频谱矢量，最后通过分解频谱矢量得到多个目标 2 维角度估计，该方法能够解决旋转干涉仪对到达时间存在差异的多目标无模糊测角的问题，但是仍然无法解决多个同频、同时刻到达的目标无模糊角度测量的问题。

针对上述问题，本文提出一种基于旋转干涉仪虚拟圆阵化的多目标参数估计算法。该方法首先将旋转干涉仪采样得到的两通道数据进行共轭相乘操作，获得虚拟圆阵信号；然后采用波束空间变换法将虚拟圆阵数据从阵元空间转换到波束空间，得到虚拟线阵数据序列；最后在实波束域上实现多目标 2 维角度无模糊估计。相比于传统旋转干涉仪方法而言，所提方法系统简单，只需要两个数据接收通道即可实现多个目标角度的无模糊测量。仿真实验验证了所提方法的有效性。

2 问题描述

2.1 系统模型

旋转干涉仪阵列结构示意图如图 1 所示， z 轴指向天线视线方向；旋转天线绕 z 轴在平面 xoy 内运动。设基线长度为 L ，其旋转角速度为 ω_r 。入射信号俯仰角为 $\beta \in [0, \pi/2)$ ，表示和 z 轴正方向的夹角；方位角为 $\alpha \in [0, 2\pi)$ ，表示从 x 轴正方向按逆时针方向旋转的角度。在旋转过程中，两天线间接收信号的相位差随之变化。

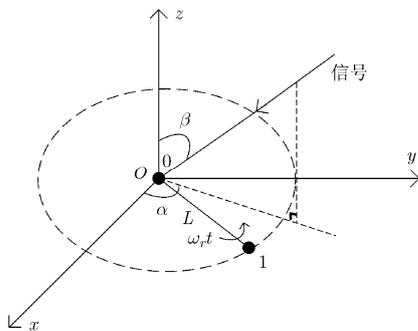


图 1 旋转干涉仪阵列结构示意图

如图 1 所示，假设场景中信号源为远场信号，以阵元 0 作为相位参考中心，则两阵元接收到的信号可以表示为

$$x_0(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t) + n_0(t) \quad (1)$$

$$x_1(t) = \sum_{i=1}^P s_i(t) e^{j\phi_i(t)} + n_1(t) \quad (2)$$

其中， $s_i(t), i = 1, 2, \dots, P$ 表示信号源， $n_0(t), n_1(t)$ 分别为阵元 0 和阵元 1 接收到的加性高斯噪声， $\phi_i(t)$ 为 t 时刻阵元 1 相对于参考阵元 0 接收信源 i 引起的传播相位差，具体形式如式(3)：

$$\begin{aligned} \phi_i(t) &= (2\pi L \sin \beta_i / \lambda) \cos(\omega_r t - \alpha_i) \\ &= \phi_{i \max} \cos(\omega_r t - \alpha_i) \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $\phi_{i \max} = 2\pi L / \lambda \sin \beta_i$ ， ω_r 为基线旋转角速度， λ 为电磁波的波长， β_i, α_i 分别为信源 i 的入射俯仰角和方位角。

2.2 传统测角算法

传统的旋转干涉仪无模糊测角原理是通过干涉仪基线的旋转，在不同观测时刻形成多个不同的基线，利用这些基线测得的相位差序列的余弦特性来估计目标角度信息，算法步骤如下：

步骤 1 通过干涉仪的旋转获得不同转角下的有模糊的相位差序列；

步骤 2 利用数字积分方法对模糊相位差序列进行恢复，得到全相位差变化曲线，如图 2；

步骤 3 提取全相位差变化曲线的幅度信息，利用幅度信息得到目标俯仰角的估计，通过与天线旋转参考信号比相求出目标方位角度。

3 圆阵化的多目标无模糊测角算法

观测场景中存在多个同频、同时刻到达的目标信号时，对于不同目标信号，两阵元相位差 $\phi_i(t)$ 具有式(3)的形式。干涉仪旋转过程中，相位差随时间变化，可以得到式(4)的矢量形式：

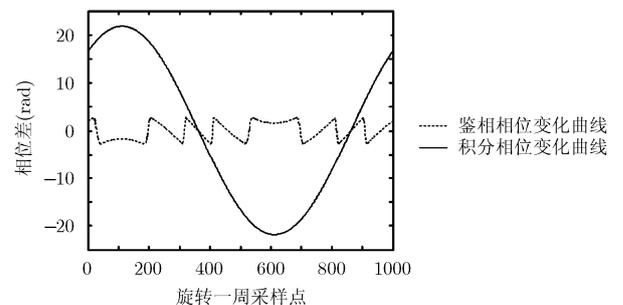


图 2 积分相位变化曲线与鉴相相位变化曲线

$$\mathbf{W}' = \mathbf{a}(\beta_i, \alpha_i) = \begin{pmatrix} e^{j2\pi L \sin \beta_i \cos(\omega_r t_1 - \alpha_i)/\lambda} \\ e^{j2\pi L \sin \beta_i \cos(\omega_r t_2 - \alpha_i)/\lambda} \\ \vdots \\ e^{j2\pi L \sin \beta_i \cos(\omega_r t_n - \alpha_i)/\lambda} \end{pmatrix} \quad (4)$$

可以看出, 式(4)与均匀圆阵的阵列流形矢量具有相同的结构。基于相位差变化的这一特性, 对于干涉仪旋转过程中采样得到的两通道数据进行预处理, 构造虚拟圆阵数据, 利用圆阵相关算法进行多目标角度的无模糊测量。

同时, 由于构造数据是干涉仪在不同转角下的采样数据, 即不同时刻的采样数据, 因此要求多目标信号的包络在采样时间内不变。因此, 本文考虑的信号形式是恒包络调制信号。

3.1 数据构造

假设场景中存在 P 个互不相关的远场信号, t 时刻阵元 0 跟阵元 1 接收数据形式如式(1)和式(2)所示, 对两阵元接收数据做共轭相乘操作得到新的数据:

$$y(t) = x_1(t)x_0^*(t) = \sum_{i=1}^P |s_i|^2 e^{j\phi_i(t)} + \sum_{i,j=1, i \neq j}^P s_i s_j^* e^{j\phi_i(t)} + \sum_{i=1}^P s_i n_0^* e^{j\phi_i(t)} + \sum_{i=1}^P s_i^* n_1 + n_1 n_0^* \quad (5)$$

其中, 式(5)中的第 2 项为不同信号间的交叉项, 第 3、第 4 项为信号与噪声的交叉项, 第 5 项为阵元间接收噪声的交叉项。

由式(5)可以看出, 旋转干涉仪两通道接收数据取共轭相乘操作之后, 除了信号的自项相乘之外, 还会带来信号间的交叉项, 在后面的分析及仿真试验中将会对交叉项的影响进行说明。

考虑到旋转干涉仪的多快拍采样, 假设旋转干涉仪工作模式为步进采样, 即旋转基线每转过一定角度, 对数据进行采样, 然后再旋转到下一采样位置。将旋转干涉仪旋转一周不同时刻两通道采样数据进行共轭相乘操作, 得到虚拟圆阵数据:

$$\mathbf{Y} = [y(t_1) \ y(t_2) \ \cdots \ y(t_N)]^T \quad (6)$$

其中, $y(t_n)$ 由 t_n 时刻对应旋转角度下采样数据构造得到。

3.2 角度估计方法

对于多目标的角度估计, 本文利用实波束域上的 2 维 MUSIC 算法进行角度估计。其基本处理流程^[15]为: 首先对预处理数据进行波束空间转换, 即将数据由阵元空间转换到波束空间, 得到虚拟线阵数据; 然后计算数据的协方差矩阵, 并对协方差矩

阵进行实特征空间分解, 得到信号子空间和噪声子空间; 最后根据特征子空间对目标进行 2 维角度搜索, 得到多目标角度的无模糊测量。

3.2.1 波束空间转换 波束空间转换是利用相位模式激励技术将空间阵元变换合成一个或几个波束, 再利用合成的波束数据进行 DOA 估计。

将旋转干涉仪旋转一周预处理后数据重写为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{S}} + \tilde{\mathbf{N}} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{A} = \text{diag}[\mathbf{a}(t_1) \ \mathbf{a}(t_2) \ \cdots \ \mathbf{a}(t_N)]$ 为维数 $N \times NP$ 的对角化阵列流形, $\mathbf{a}(t_n) = [e^{j2\pi L \sin \beta_1 \cos(\omega_r t_n - \alpha_1)/\lambda} \ e^{j2\pi L \sin \beta_2 \cos(\omega_r t_n - \alpha_2)/\lambda} \ \cdots \ e^{j2\pi L \sin \beta_P \cos(\omega_r t_n - \alpha_P)/\lambda}]^T$ 为 t_n 采样时刻各目标相位差响应组成的行向量; $\tilde{\mathbf{S}} = [\tilde{s}_1(t_1) \ \tilde{s}_2(t_1) \ \cdots \ \tilde{s}_P(t_1) \ \cdots \ \tilde{s}_1(t_N) \ \tilde{s}_2(t_N) \ \cdots \ \tilde{s}_P(t_N)]^T$ 为维数 $NP \times 1$ 的构造数据的信号列向量, $\tilde{s}_i(t_n) = |s_i(t_n)|^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^P s_i(t_n) \cdot s_j^*(t_n)$ 为信源 i 在 t_n 采样时刻对应的构造信号; $\tilde{\mathbf{N}} = [\tilde{n}(t_1) \ \tilde{n}(t_2) \ \cdots \ \tilde{n}(t_N)]^T$ 为维数 $N \times 1$ 的各采样时刻与噪声相关的交叉项组成的列向量, $\tilde{n}(t_n) = \sum_{i=1}^P s_i(t_n)n_0^*(t_n) + \sum_{i=1}^P s_i^*(t_n)n_1(t_n) + n_1(t_n) \cdot n_0^*(t_n)$ 为 t_n 采样时刻对应的构造噪声。

对虚拟圆阵数据进行波束空间转化, 得到波束空间采样数据:

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{F}_r^H \mathbf{Y} = \mathbf{B}\tilde{\mathbf{S}} + \mathbf{F}_r^H \tilde{\mathbf{N}} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{B} = \mathbf{F}_r^H \mathbf{A}$, \mathbf{F}_r^H 为波束形成矩阵。

由文献[15]波束空间转换可知, 经波束转换矩阵转换, 各目标方位角 α_p 具有范德蒙矩阵形式, 而俯仰角 β_p 按对称幅度衰减的形式变化。因此, 可以在波束域上对目标 2 维角度进行估计。

3.2.2 角度估计 计算波束域数据协方差矩阵:

$$\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{Y}}} = E[\tilde{\mathbf{Y}}\tilde{\mathbf{Y}}^H] = \mathbf{B}\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{S}}}\mathbf{B} + \sigma_{\tilde{\mathbf{N}}}\mathbf{I} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{S}}} = E[\tilde{\mathbf{S}}\tilde{\mathbf{S}}^H]$ 为构造数据信号的协方差矩阵; $\sigma_{\tilde{\mathbf{N}}}$ 为等效噪声功率。

对 $\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{Y}}}$ 作实值特征分解, 得到信号子空间和噪声子空间, 分别表示如式(10):

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S} &= [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \cdots \ \mathbf{u}_P] \\ \mathbf{G} &= [\mathbf{u}_{P+1} \ \mathbf{u}_{P+2} \ \cdots \ \mathbf{u}_{M+1}] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, M 为模式激励的最大模式数。

由噪声特征矢量和信号矢量的正交关系, 得到阵列空间谱估计:

$$P(\beta, \alpha) = \frac{1}{\mathbf{b}^T(\beta, \alpha) \mathbf{G} \mathbf{G}^T \mathbf{b}(\beta, \alpha)} \quad (11)$$

综上所述，所提算法处理流程图如图3所示。

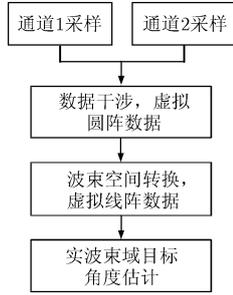


图3 算法处理流程图

3.3 性能分析

3.3.1 交叉项影响分析

将式(5)中交叉项表示为

$$\Sigma = \sum_{i,j=1, i \neq j}^P s_i s_j^* e^{j\phi_i(t)} + \sum_{i=1}^P s_i n_0^* e^{j\phi_i(t)} + \sum_{i=1}^P s_i^* n_1 + n_1 n_0^* \quad (12)$$

取共轭相乘操作后会带来不同信号、信号与噪声、不同阵元接收噪声间的交叉项，下面从统计特性上对交叉项进行分析。

假设各信源为互不相关的恒定包络调制信号，阵元接收的噪声为零均值的高斯白噪声，且不同阵元、不同时刻接收到的噪声互不相关，彼此独立，与各信号源不相关。

构造虚拟圆阵数据的协方差矩阵表示为

$$\mathbf{R}_Y = E[\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H] \triangleq \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^H \quad (13)$$

根据假设条件，数据协方差矩阵 \mathbf{R}_Y 对角线元素具有如下统计特性：

$$r_{n,n} = \sum_{i=1}^P |s_i|^4 + \sum_{i,j=1, i \neq j}^P |s_i|^2 |s_j|^2 \left(1 + e^{j(\phi_i(t_n) - \phi_j(t_n))}\right) + \sum_{i,j=1, i \neq j}^P s_i s_i^* s_j^* s_j e^{j(\phi_i(t_n) - \phi_j(t_n))} + n \quad (14)$$

式中， n 为噪声项。

非对角线元素统计特性如式(15)：

$$r_{m,n} = \sum_{i=1}^P |s_i|^4 e^{j(\phi_i(t_m) - \phi_i(t_n))} + \sum_{i,j=1, i \neq j}^P |s_i|^2 |s_j|^2 e^{j(\phi_i(t_m) - \phi_j(t_n))} + \sum_{i,j=1, i \neq j}^P (s_i s_i^* s_j^* s_j + s_i^* s_i s_j s_j^*) e^{j(\phi_i(t_m) - \phi_j(t_n))} \quad (15)$$

可以看出，构造数据的协方差矩阵存在不同信号间、信号与噪声间的交叉项，对于噪声水平而言，

信号与噪声间的交叉项使噪声整体水平抬高；而信号间的交叉项会使信号水平提高。进一步，式(14)中交叉项 $\sum_{i,j=1, i \neq j}^P |s_i|^2 |s_j|^2$ 可以积累，会在各目标位置处形成峰值，而 $\sum_{i,j=1, i \neq j}^P |s_i|^2 |s_j|^2 e^{j(\phi_i(t_n) - \phi_j(t_n))}$ 及 $\sum_{i,j=1, i \neq j}^P s_i s_i^* s_j^* s_j e^{j(\phi_i(t_n) - \phi_j(t_n))}$ 的相位随时间非线性变化，无法进行积累。因此，相对于信号源自项 $\sum_{i=1}^P |s_i|^4$ 而言，信号增益变大，有利于提高目标检测性能。

3.3.2 信源数估计分析 本文算法对基线长度为 L 的干涉仪在旋转一周内的 N 点采样数据，进行虚拟圆阵化，通过波束空间转换，在波束域实特征分解算法进行 DOA 估计。虚拟阵元数 N' 与基线长度 L 的关系为

$$N' > 2M = 2 \times \left\lfloor \frac{2\pi L}{\lambda} \right\rfloor \quad (16)$$

其中， $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整， M 为模式激励的最大模式数，这一约束条件与奈奎斯特采样定理等价^[15]。当虚拟阵元数满足上述条件后，阵列可分辨目标个数不再随阵元数增多而增加。

利用波束空间实特征值分解算法进行 DOA 估计，取波束空间相关矩阵实部进行特征分解处理，相当于转换到波束空间前，在阵元空间进行了一次前后向平滑，因此，该方法所能处理的信号源个数为 $P < M$ 。

4 实验仿真

本节通过仿真实验对所提方法多目标参数估计性能进行分析，并将其参数估计性能与旋转干涉仪方法进行比较。

仿真实验 1 入射信号频率 1.2 GHz，旋转干涉仪两阵元间距 $L = 10\lambda$ ，场景中设置两个信号源，俯仰角和方位角分别为 $[20^\circ, 60^\circ]$ 和 $[50^\circ, 130^\circ]$ ，信噪比为 5 dB。基线旋转频率 $f_r = 10$ Hz，旋转一周内采样点数 150 点，快拍数为 50。

通过仿真有无信号间交叉项的对比试验来说明交叉项的影响，其中图 4(a)为存在信号间交叉项时的检测结果，图 4(b)为不存在信号间交叉项时的检测结果。

由图 4 仿真结果可以看出，所提方法能实现多个目标的无模糊测角；并且，存在信号间交叉项时，由于信号间交叉项在各目标真实方向处能够形成峰值，目标检测性能更好。

仿真实验 2 入射信号频率 1.2 GHz，两阵元间距 $L = 10\lambda$ ，目标俯仰角和方位角分别为 $[20^\circ, 60^\circ]$ 。干涉仪基线旋转频率 $f_r = 10$ Hz，旋转一周内采样

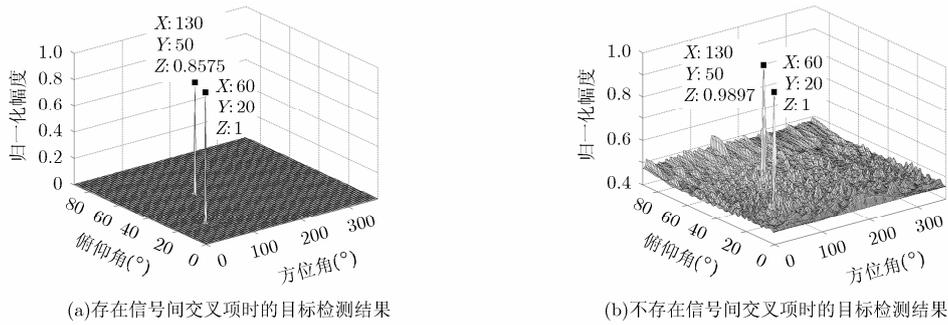


图4 目标检测结果图

点数 150 点, 快拍数为 50, 蒙特卡洛试验次数为 500, SNR 取值区间为 $[-9, 15]$ dB, 间隔为 3 dB, 比较所提方法与旋转干涉仪方法的测角精度。图 5 为所提方法与旋转干涉仪方法俯仰测向和方位测向均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)随信噪比的变化关系。

由图 5 仿真结果可以看出, 随着信噪比的增大, 俯仰测向和方位测向的均方根误差逐渐减小。在 $\text{SNR} < 6$ dB 时, 旋转干涉仪方法测向性能较差, 具体原因是低信噪比下旋转干涉仪输出相位误差较大, 导致测角误差较大; 所提方法对旋转一周的采样数据进行相参处理, 虚拟口径等效变大, 测角精度较高。

为进一步说明虚拟口径的变化对测角精度的影响, 下面对所提方法在不同转角下的测角精度进行仿真分析, 其中目标 SNR 取值区间为 $[0, 15]$ dB, 间隔为 3 dB, 其他仿真参数保持不变, 虚拟采样点位置分别取 $1/8$ 周、 $1/4$ 周、1 周。图 6 给出了所提方法在不同转角下测角精度性能曲线的比较结果。

由图 6 仿真结果可以看出, 虚拟采样点转过的角度增大, 等效虚拟口径变大, 测角精度提高。同时, 比较图 5 传统旋转干涉仪性能曲线, 可以发现所提方法能够有效提高低信噪比条件下的测角精度。

设定测向误差在 $\pm 1^\circ$ 内为正确解模糊, 定义如

式(17)所示的正确解模糊概率 P :

$$P = \frac{\text{CUA}}{\text{Mt}} \times 100\% \quad (17)$$

式中, Mt 为给定的 Monte-Carlo 实验次数, CUA 为在给定实验次数中的正确解模糊次数。分析所提方法与旋转干涉仪正确解模糊概率随信噪比变化情况。

仿真实验 3 入射信号频率 1.2 GHz, 两阵元间距 $L = 10\lambda$, 目标信号俯仰角、方位角分别为 $[20^\circ, 60^\circ]$ 。干涉仪基线旋转频率 $f_r = 10$ Hz, 旋转一周内采样点数 150 点, 快拍数为 50, 蒙特卡洛试验次数为 500, SNR 取值区间为 $[-9, 30]$ dB, 间隔为 3 dB。所提方法与旋转干涉仪方法正确解模糊概率变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 所提方法在较低的信杂比下能够达到 100% 的正确解模糊概率; 而旋转干涉仪方法在 $\text{SNR} \geq 6$ dB 时才能达到 100% 的正确解模糊概率, 这是由于对旋转一周采样数据进行相参处理, 等效虚拟口径变大, 测角精度提高, 因此所提方法在低信噪比条件下具有更好的解模糊能力。

5 结束语

本文提出了一种基于旋转干涉仪虚拟圆阵化的多目标参数估计算法。实验仿真分析表明, 在低信噪比条件下所提方法参数估计精度及解模糊能力均

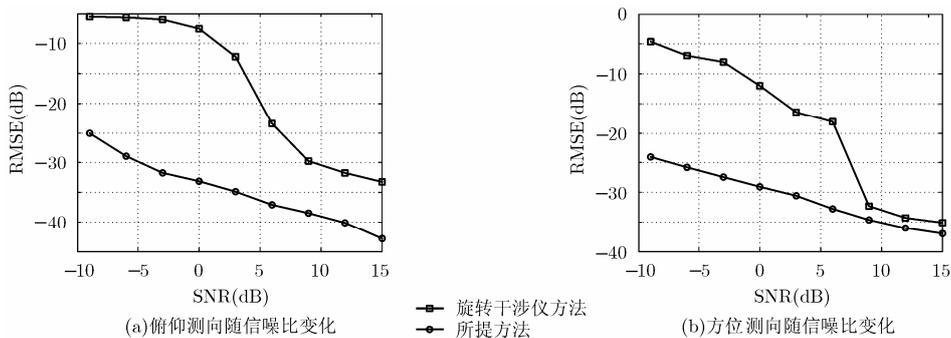
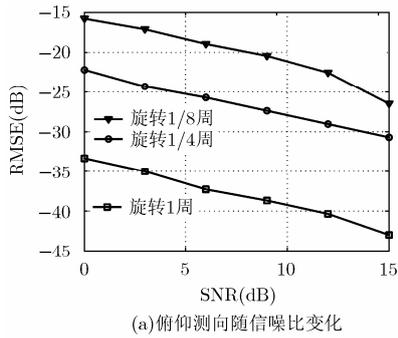
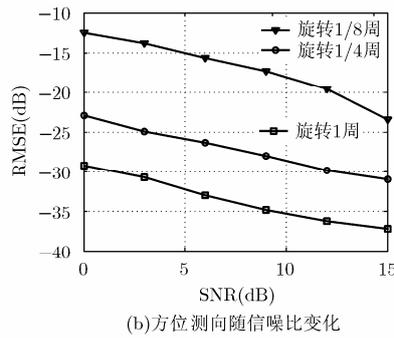


图5 俯仰、方位测向均方根误差随信噪比变化关系图



(a) 俯仰测向随信噪比变化



(b) 方位测向随信噪比变化

图6 所提算法在不同旋转角度下的测角精度比较

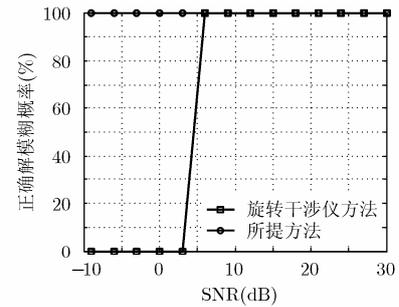


图7 正确解模糊概率随信噪比变化曲线

优于传统旋转干涉仪方法，并且所提方法系统结构简单，只需两个数据接收通道即可实现多个同频、同时到达目标角度的无模糊测量。不过，目前仅考虑了干涉仪平台与目标之间相对静止的情况，对于星载干涉仪平台，由于卫星的高速运动，会导致观测时间内干涉仪平台与目标角度发生变化，因此需要考虑卫星平台运动带来的影响，该问题将是我們下一步需要重点开展的工作。

参考文献

- [1] DYBDAL B. Monopulse resolution in interferometer[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1986, 22(1): 177-183. doi: 10.1109/TAES.1986.310752.
- [2] 周亚强, 皇甫堪. 噪声条件下数字多基线相位干涉仪解模糊问题[J]. *通信学报*, 2005, 26(8): 16-21. doi: 10.3321/j.issn.1000-436X.2005.08.003.
ZHOU Yaqiang and HUANGFU Kan. Solving ambiguity problem of digitized multi-baseline interferometer under noisy circumstance[J]. *Journal on Communications*, 2005, 26(8): 16-21. doi: 10.3321/j.issn.1000-436X.2005.08.003.
- [3] 龚亨钰, 袁俊泉, 苏令华. 基于相位干涉仪阵列多组解模糊的波达角度估计算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(1): 55-59.
GONG Xiangyi, YUAN Junquan, and SU Linghua. A multi-pare unwrap ambiguity of interferometer array for estimation of direction of arrival[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(1): 55-59.
- [4] MACPHIE R H and YOON T H. On using the compound interferometer to obtain the power pattern of a conventional receiving array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10): 3356-3359. doi: 10.1109/TAP.2009.2029380.
- [5] 周欢, 李海涛, 陈少伍, 等. 多基线组合求解深空航天器载波相位模糊方法[J]. *宇航学报*, 2015, 36(8): 947-953. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.08.012.
ZHOU Huan, LI Haitao, CHEN Shaowu, et al. Resolving carrier phase ambiguity of deep space with combination of multi-baseline[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(8): 947-953. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.08.012.
- [6] LEE J H, LEE J H, and WOO J M. Method for obtaining three- and four-element array spacing for interferometer direction-finding system[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 897-900. doi: 10.1109/LAWP.2015.2479224.
- [7] DOAN S V, VESELY J, JANU P, et al. Algorithm for obtaining high accurate phase interferometer[C]. 26th International Conference on Radioelektronika, Košice, Slovak Republic, 2016: 433-437. doi: 10.1109/RADIOELEK.2016.7477374.
- [8] DOAN S V, VESELY J, JANU P, et al. Optimized algorithm for solving phase interferometer ambiguity[C]. 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, Poland, 2016: 1-6. doi: 10.1109/IRS.2016.7497353.
- [9] KAWASE S. Radio interferometer for geosynchronous satellite direction finding[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2007, 43(2): 443-449. doi: 10.1109/TAES.2007.4285345.
- [10] 司伟建, 程伟. 旋转干涉仪解模糊方法研究及实现[J]. *火箭与制导学报*, 2010, 30(3): 199-202. doi: 10.3969/j.issn.1673-9728.2010.03.059.
SI Weijian and CHENG Wei. Study on solving ambiguity method of rolling interferometer and implementation[J]. *Journal of Projectile, Rockets, Missile and Guidance*, 2010, 30(3): 199-202. doi: 10.3969/j.issn.1673-9728.2010.03.059.
- [11] 刘鲁涛, 司锡才. 开环旋转相位干涉仪 DOA 算法分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(5): 419-424. doi: 10.3969/j.issn.1009-3443.2011.05.003.
LIU Lutao and SI Xicai. Analysis of DOA algorithm by open loop method of rotating phase interferometer system[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 12(5): 419-424. doi: 10.3969/j.issn.1009-3443.2011.05.003.
- [12] 李腾, 郭福成, 姜文利. 基于旋转干涉仪模糊相位差的多假设 NLS 定位算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(4): 956-961. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00699.

- LI Teng, GUO Fucheng, and JIANG Wenli. Multiple hypothesis NLS location algorithm based on ambiguous phase difference measured by a rotating interferometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 956–961. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00699.
- [13] 张敏, 郭福成, 李腾, 等. 旋转干涉仪测向方法及性能分析[J]. *电子学报*, 2013, 41(12): 2422–2429. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.016.
- ZHANG Min, GUO Fucheng, LI Teng, *et al.* A direction finding method and analysis based on the rotated long baseline interferometer[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(12): 2422–2429. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.016.
- [14] LIU Zhangmeng and GUO Fucheng. Azimuth and elevation estimation with rotating long-baseline interferometers[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(9): 2405–2419. doi: 10.1109/TSP.2015.2405506.
- [15] MATHEWS C P and ZOLTOWSKI M D. Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(9): 2395–2407. doi: 10.1109/78.317861.
- 辛金龙: 男, 1988年生, 博士生, 研究方向为无源定位技术、阵列信号处理.
- 廖桂生: 男, 1963年生, 教授, 主要研究方向为自适应信号处理、信号检测与估计、智能天线信号处理技术.
- 杨志伟: 男, 1980年生, 副教授, 主要研究方向为阵列信号处理、地面动目标检测、极化处理.
- 解 虎: 男, 1987年生, 博士后, 主要研究方向为阵列信号处理、空时自适应信号处理.