

# 基于信噪比估计和矢量平均的干涉仪抗噪声测向方法

郭东亮<sup>1,2</sup> 黄超<sup>1</sup> 李中华<sup>3</sup> 张铁军<sup>3</sup>

(1. 中山大学公共实验教学中心, 广州, 510006; 2. 国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室, 广州, 510310; 3. 中山大学信息科学与技术学院, 广州, 510006)

**摘要:** 针对低信噪比条件下干涉仪测向准确度低的问题, 提出了一种基于信噪比估计和相位差矢量平均的自适应测向方法。本文方法通过对多次测量的相位差复数矢量求平均来提高相位差的测量精度和稳定性, 从而提高测向性能。提出的自适应准则通过估计来波信噪比, 可快速确定不同信噪比下矢量平均所需样本量, 使处理后信号达到设定信噪比阈值, 获得稳定的测向准确度。分析了信噪比阈值对本方法测向性能的影响。本文方法计算复杂性小, 对测向实时性影响小。理论分析和仿真结果表明: 本方法在低信噪比条件下可以达到很高的测向准确度, 对低信噪比条件下的测向性能改善明显。

**关键词:** 干涉仪; 测向; 信噪比; 矢量平均

**中图分类号:** TN911.7 **文献标志码:** A

## Noise-Robust Interferometer Direction Finding Method Based on SNR Estimation and Vector Averaging

Guo Dongliang<sup>1,2</sup>, Huang Chao<sup>1</sup>, Li Zhonghua<sup>3</sup>, Zhang Tiejun<sup>3</sup>

(1. Public Experimental Teaching Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510006, China; 2. Key Laboratory of Technology for Safeguarding of Maritime Rights and Interests and Application, SOA, Guangzhou, 510310, China; 3. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510006, China)

**Abstract:** Aiming at the low accuracy of interferometer direction finding (DF) with low signal-to-noise ratio (SNR), a new adaptive direction finding method is proposed based on SNR estimation and phase-difference vector averaging. This method can enhance the accuracy and stability of the phase-difference measurement through multiple measuring and averaging the phase-difference complex vectors, which can improve the performance of the direction finding. The proposed adaptive criterion can estimate SNR of the arrival signal and quickly determine the required sample size, therefore adjust the sample size adaptively at different SNRs and obtain the stable accuracy of DF. The effect of SNR threshold on the performance of the proposed method is analyzed. The method holds a low computational complexity and has little influence on real-time of DF. Theoretical analysis and simulation results reveal that the method can achieve high accuracy even under very low SNR conditions, and improve the DF performance obviously.

**Key words:** interferometer; direction finding; signal-to-noise ratio; vector averaging

## 引 言

无线电测向技术在导航、探测和电子对抗等民用和军事领域有着广泛应用,干涉仪测向具有测向精度和灵敏度高、实时性好等优点。但是,干涉仪在低信噪比下测向准确度大大降低,无法满足实际应用要求。针对这一问题,国内外很多学者展开了研究。文献[1]研究了测量噪声条件下相关干涉仪的测向偏差和测向误差均方根值,研究了3种主流算法在白高斯噪声下的测向性能,给出了低信噪比下测向偏差和均方根误差的仿真结果,并与克拉美-罗界(Cramer-rao bound, CRB)进行了对比。文献[2]研究了余弦函数法的测向性能,用微扰法推导了性能界,结论与文献[1]基本一致。文献[3]针对低信噪比条件下相关干涉仪测向误差大的问题提出了一种基于相位差矢量累积的测向处理算法,通过多次测量相位差矢量并进行累积,获得在低信噪比条件下的测向性能改善。文献[4]提出一种改善低信噪比下干涉仪性能的方案,在数字鉴相器中引入移动平均处理(Moving average processor, MAP)方法,提高了测向性能。文献[5]针对水声信号测向提出一种基于声强几何平均的改进算法,获得测向性能改进。但是文献[3~5]的测量次数或数据处理的区间都是固定的,实际无线信道具有时变性,信噪比高时上述方法会浪费计算量,信噪比低时又无法满足要求,因此,需要一种自适应准则进行调整。

由于干涉仪测向首先测量处于噪声干扰中的信号在天线阵各阵元间的相位差,再进行信号处理得到来波入射角,因此相位差的准确度和稳定度直接影响测向性能,本文提出一种基于信噪比估计和相位差矢量平均的自适应测向方法,通过对多次测量的相位差复数矢量求平均来提高相位差的测量精度和稳定性,从而提高测向性能。提出的自适应准则可以在不同信噪比下自适应地调整矢量求均的样本量,该算法处理耗时少,对测向实时性影响小。

## 1 信号模型

设天线阵列由  $M$  个阵元组成,接收远场窄带信号,来波信号的复包络形式为

$$\begin{cases} s(t) = u(t) e^{j(\omega_0 t + \varphi(t))} \\ s(t - \tau) = u(t - \tau) e^{j(\omega_0 (t - \tau) + \varphi(t - \tau))} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u(t)$  为接收信号幅度;  $\varphi(t)$  为接收信号相位;  $\omega_0$  为接收信号频率;  $\tau$  为时延,由于窄带信号的包络变化缓慢,有

$$\begin{cases} u(t - \tau) \approx u(t) \\ \varphi(t - \tau) \approx \varphi(t) \end{cases} \quad (2)$$

由式(1,2)有

$$s(t - \tau) \approx s(t) e^{-j\omega_0 \tau} \quad (3)$$

第  $m$  个阵元的接收信号为

$$x_m(t) = g_m s(t - \tau_m) + n_m(t) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中:  $g_m$  为第  $m$  个阵元的增益;  $n_m(t)$  为第  $m$  个阵元在  $t$  时刻的噪声;  $\tau_m$  为信号到达第  $m$  个阵元时相对参考阵元的时延。于是有

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 e^{-j\omega_0 \tau_1} \\ g_2 e^{-j\omega_0 \tau_2} \\ \vdots \\ g_M e^{-j\omega_0 \tau_M} \end{bmatrix} [s(t)] + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

即

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta) \cdot \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{X}(t)$  为阵列数据矢量;  $\mathbf{N}(t)$  为阵列噪声数据矢量, 噪声为加性高斯白噪声 (Additive white Gaussian noise, AWAN), 各阵元间噪声相互独立, 噪声与信号也相互独立;  $\mathbf{S}(t)$  为空间信号矢量; 方位角  $\theta$  为待测参数,  $\mathbf{A}(\theta)$  为阵列流型。

干涉仪一般采用均匀圆阵 (Uniform circular array, UCA) 测向, 图 1 所示为典型的 5 阵元均匀圆阵。对于一个确定入射角的空间来波, 从均匀圆阵天线对的移相组合中可以得到若干个相位差, 如对于 5 阵元均匀圆阵, 5 个阵元两两组合, 共有  $C_5^2 = 10$  种情况, 应用中选取其中一部分组合, 设天线阵元数为  $M$ , 则选择  $K$  种组合 ( $K \leq C_M^2$ ),  $K$  个相位差构成一个  $K$  维相位差向量  $\boldsymbol{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_K\}$ , 相位差由鉴相器测得。鉴相技术分模拟鉴相和数字鉴相两种, 相对数字鉴相, 模拟鉴相技术的突出优点是处理速度快、适应信号的频率高, 因此在工程中得到广泛应用, 适于短时测向或信号频率很高的场合; 而数字鉴相处理速度较慢, 受采样频率的限制, 目前基本工作于 1 GHz 频率以下, 本文的研究针对采用模拟鉴相技术的干涉仪测向体制。

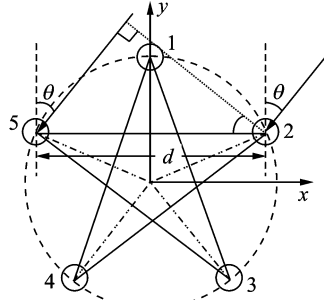


图 1 5 阵元均匀圆阵

Fig. 1 UCA consisting of five sensors

## 2 抗噪声测向方法及分析

### 2.1 抗噪声测向方法

噪声的矢量表示为  $n(t) = A_n e^{j\varphi_n}$ , 其中,  $A_n$  服从正态分布,  $\varphi_n$  服从  $[-\pi, \pi]$  上的均匀分布。实际接收信号含有信号分量和噪声分量, 其矢量表示为

$$\mathbf{X} = A_s e^{j\varphi_s} + A_n e^{j\varphi_n} \quad (7)$$

式中:  $A_s$  和  $\varphi_s$  分别为信号分量的幅度和相位;  $A_n$  和  $\varphi_n$  分别为噪声分量的幅度和相位。

噪声矢量使实际接收信号矢量偏离了真实信号矢量, 当信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) 较高时, 噪声矢量的影响小, 当 SNR 较低时, 噪声矢量的影响大, 表现在接收信号的幅度和相位受噪声恶化而不稳定。干涉仪利用不同阵元接收信号的相位差来进行测向, 因此在低信噪比下用被噪声恶化后的相位差进行干涉仪测向, 测向误差会大大增加。为解决该问题, 用低信噪比下多次测量得到的信号幅度和相位差构造相位差复数矢量

$$\mathbf{X}_{mi} = A_{mi} e^{j\varphi_{mi}} \quad i = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

式中:  $A_{mi}$  为第  $m$  路信号第  $i$  次测量的幅度值;  $\varphi_{mi}$  为第  $m$  路信号第  $i$  次测量与参考信号的相位差;  $N$  为测量次数;  $K$  为相位差矢量维数。对  $N$  次测量的相位差矢量  $\mathbf{X}_{mi}$  进行累积平均, 得到的结果为

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_{mi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{msi} e^{j\varphi_{msi}} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{mni} e^{j\varphi_{mni}} \quad (9)$$

若单次测量方差为  $\sigma^2$ , 对 AWGN 噪声, 方差也是噪声功率。经  $N$  次累积平均后噪声功率为

$$D\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_{mi}\right) = \frac{1}{N^2} [D(\mathbf{X}_{m1}) + D(\mathbf{X}_{m2}) + \dots + D(\mathbf{X}_{mN})] \quad (10)$$

因为  $D(\mathbf{X}_{m1}) = D(\mathbf{X}_{m2}) = \dots = D(\mathbf{X}_{mN}) = \sigma^2$ , 所以

$$D\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_{mi}\right) = \frac{1}{N^2} N \sigma^2 = \frac{1}{N} \sigma^2 \quad (11)$$

即  $N$  次平均后噪声功率降为原来的  $\frac{1}{N}$ , 而信号功率不变, 故 SNR 提高为原来的  $N$  倍。由于噪声的随机性和有用信号的确定性, 经过  $N$  次相位差矢量累积平均后, 抑制了噪声分量, 信噪比得到提高。对  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_{mi}$  求相角即可得到所需相位差

$$\varphi_m = \text{angle} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_{mi} \right] \quad m = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

式中:  $\text{angle}(\cdot) = \arctan \left[ \frac{\text{Im}(\cdot)}{\text{Re}(\cdot)} \right]$  为取相位函数。

## 2.2 自适应调整矢量平均样本量

由于无线信道的时变性和测试环境的差异性, 设置固定的矢量平均样本数  $N$  不能提供满意的性能, 在高信噪比下会浪费计算量、降低实时性, 低信噪比下又无法满足要求, 因此, 需要一种自适应准则去动态调整  $N$ 。

设期望处理后信噪比为  $\text{SNR}_{th}$ , 估计出当前信噪比  $\text{SNR}_E$ , 由于处理后信噪比  $\text{SNR}_p \propto N$ , 计算  $\frac{\text{SNR}_{th}}{\text{SNR}_E} = \eta$ , 若  $\eta > 1$ , 令  $N \geq \lceil \eta \rceil$  ( $\eta$  值向上取整), 即可满足  $\text{SNR}_p \geq \text{SNR}_{th}$ ; 若  $\eta \leq 1$ , 说明已满足  $\text{SNR}_p \geq \text{SNR}_{th}$ 。

目前, SNR 估计算法主要有最大似然、基于统计量和谱分析法 3 类<sup>[6-8]</sup>。最大似然法精度高, 但需要周期地发送训练序列, 与无线电测向这种无源测向方式不一致; 基于统计量的方法需要较大的数据样点才能实现 SNR 的精确估计, 此外, 需要对接收信号的各种参数有精确了解, 不适合非协作通信; 谱分析方法实现简单, 可通过 FFT 实现, 而且不需要先验信息, 可用于非协作通信下的 SNR 估计。

文献[8]提出一种谱分析类 SNR 估计算法, 该算法通过计算接收信号的功率谱密度、估计信号带宽以及在噪声频带上估计噪声功率, 可估计出 SNR。该算法的优点是不需要任何先验信息, 并且在低信噪比下估计性能降低很少。仿真结果表明, 当 FFT 样点超过 256 时, 在信噪比区间  $[0, 20]$  dB 内, 该方法的估计标准差在 0.2 dB 以内。

## 2.3 信噪比阈值

信噪比阈值  $\text{SNR}_{th}$  的选取将影响算法的计算量和性能。  $\text{SNR}_{th}$  过低会导致性能下降, 过高会改善算法性能, 但会增大计算量。现定性分析  $\text{SNR}_{th}$  与测向性能和计算量的关系。

性能方面, 由于处理后信噪比  $\text{SNR}_p \geq \text{SNR}_{th}$ , 所以  $\text{SNR}_{th}$  选取越高则测向性能越好, 测向误差随  $\text{SNR}_{th}$  单调下降, 逼近 CRB。

计算量方面, 设  $\text{SNR}_{th1} = a \cdot \text{SNR}_{th2}$ ,  $a \in \mathbf{R}^+$ , 则  $\frac{\text{SNR}_{th1}}{\text{SNR}_E} = \eta_1 = \frac{a \text{SNR}_{th2}}{\text{SNR}_E} = a \eta_2$ , 样本数  $N_1 = \lceil \eta_1 \rceil$ ,  $N_2 = \lceil \eta_2 \rceil$ , 而  $\eta_1 = a \eta_2$ , 可知, 当  $\text{SNR}_E < \text{SNR}_{th1}$  且  $\text{SNR}_E < \text{SNR}_{th2}$ , 有  $N_1 = \lceil \eta_1 \rceil \approx a \lceil \eta_2 \rceil = a N_2$ , 即  $N \propto \text{SNR}_{th}$ , 大的阈值所增加的计算量是更多矢量累加的计算量, 后续信号处理相同, 在 CPU 或 DSP 条件下, 增加的计算量很小; 当实际信噪比较高时, 由于  $\eta_1 \leq 1$  且  $\eta_2 \leq 1$ , 所需样本数相同。

综上所述, 本文提出的自适应抗噪声测向方法如下: (1) 估计来波信噪比  $\text{SNR}_E$ ; (2) 计算  $\frac{\text{SNR}_{th}}{\text{SNR}_E} = \eta$ , 取矢量平均样本数  $N \geq \lceil \eta \rceil$ ; (3) 构造相位差复数矢量并求均值, 对均值矢量求相角, 即为所需相位差; (4) 将相位差输入测向算法进行测向。

## 3 仿真实验与性能分析

将本文提出的算法应用于相关干涉仪, 相关干涉仪的测向原理是对系统测得的相位差矢量与系统

原始相位差矢量样本进行相似性度量,最相似的样本对应的入射角为来波入射角的估计值,进行插值处理可进一步提高测向精度。根据相似性度量准则的不同,主要有3种主流测向算法:相关系数法<sup>[9,10]</sup>、最小二乘法<sup>[11]</sup>和余弦函数法<sup>[12]</sup>。选择性能最好的余弦函数法作实验对比,其代价函数为

$$J(\theta) = \sum_{m=1}^K [\cos\hat{\varphi}_m \cos\phi(\theta)_m + \sin\hat{\varphi}_m \sin\phi(\theta)_m] = \sum_{m=1}^K \cos(\hat{\varphi}_m - \phi(\theta)_m) \quad (13)$$

式中: $\hat{\varphi}_m$ 为测得的相位差; $\phi(\theta)_m$ 为在 $\theta$ 方向的原始相位差样本; $K$ 为相位差矢量的维数; $J(\theta)$ 为代价函数。

采用5阵元均匀圆阵如图1所示,直径1.5 m,选取5个天线对1-3,2-4,3-5,4-1,5-2对应的相位差构成相位差矢量(矢量维数 $K=5$ )。样本数据库方位角的采样间隔为 $5^\circ$ ,入射信号方位角为 $45.3^\circ$ ,信号载频100 MHz,采样频率400 MHz。蒙特卡洛独立实验次数为1 000次。测向角的均方根误差定义为

$$\text{RMSE}(\hat{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (\hat{\theta}_i - \theta)^2}, \text{ 其中, } L \text{ 为独立实验次数, } \hat{\theta}_i \text{ 为第 } i \text{ 次测量值, } \theta \text{ 为入射角理论值。}$$

### 3.1 测向误差随信噪比的变化

为考察测向方法的抗噪声性能,在SNR变化时,将本文算法与余弦函数法算法<sup>[12]</sup>和文献[3]算法比较。文献[3]中的矢量累积次数分别设置为10,20,30次。本文算法的信噪比阈值设为 $\text{SNR}_{\text{th}} = 20 \text{ dB}$ ,实验结果如图2所示。从图2可以看出,原算法测向在低信噪比时误差较大,矢量累积算法随着累积次数的增加,测向误差趋于减小,累积30次相对累积20次的性能改善小于累积20次相对累积10次的性能改善,这与式(11)的结论一致,

即  $\text{RMSE}(\hat{\theta}) \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ 。本文算法测向的均方根误差

小于 $0.15^\circ$ ,测向误差随SNR降低增加很小,测向性能稳定。

表1是实验中自适应算法的矢量求平均样本数。由表1可见,本实验中信噪比估计的误差较小,自适应算法得出的测量样本数与理论推算值接近。

表1 矢量求平均样本数( $\text{SNR}_{\text{th}} = 20 \text{ dB}$ )

Tab.1 Number of samples for vector averaging ( $\text{SNR}_{\text{th}} = 20 \text{ dB}$ )

SNR/dB	SNR(比值)	理论 $N$ 值	$\text{SNR}_E$ (比值)	$\eta$	样本数 $N$
0	1.00	100	0.96	104.17	105
2	1.59	63	1.53	65.36	66
4	2.51	40	2.62	38.24	39
6	3.98	26	4.81	20.81	21
8	6.31	16	6.74	14.83	15
10	10.00	10	8.09	12.35	13
12	15.85	7	13.35	7.49	8
14	25.12	4	23.63	4.23	5
16	39.81	3	34.18	2.93	3
18	63.10	2	68.86	1.45	2
20	100.00	1	96.34	1.04	2

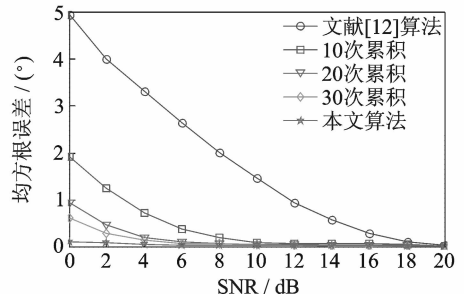


图2 测向角均方根误差随信噪比的变化

Fig.2 RMSE of the measured angle varies with SNR

### 3.2 信噪比阈值对测向性能的影响

为考察信噪比阈值  $SNR_{th}$  对本文算法测向性能的影响, 设信噪比阈值  $SNR_{th}$  分别取 10, 15 和 20 dB, 实验结果如图 3 所示。由图 3 可知:  $SNR_{th}$  取 10 dB 时, 当 SNR 小于 10 dB, 其测向均方根误差从  $1.7^\circ$  左右随 SNR 增大而缓慢下降, 当 SNR 超过 10 dB, 与文献[12]算法性能曲线几乎重合, 该实验结果与自适应算法相符, 即自适应算法控制接收信噪比等于或略超过 10 dB, 当实际 SNR 超过 10 dB 时, 自适应控制条件自动满足, 故与文献

[12]算法性能一致; 同理,  $SNR_{th}$  取 15 dB 时, 当 SNR 小于 15 dB, 其测向均方根误差从  $0.5^\circ$  左右随 SNR 增大而缓慢下降, 当 SNR 超过 15 dB, 与文献[12]算法性能曲线几乎重合; 而  $SNR_{th}$  取 20 dB 时, 测向均方根误差从  $0.15^\circ$  左右随 SNR 增大而缓慢下降, 在 SNR 处于  $0\sim 20$  dB 区间内均获得良好的测向性能。

仿真实验采用 Matlab R2009a 软件, 在 CPU 主频 2.4 GHz, 内存 2 GB 环境下, 文献[11]算法平均耗时 2.6 ms, 本文方法耗时为: 若取  $SNR_{th} = 10$  dB, 平均增加耗时为 0.4 ms; 若取  $SNR_{th} = 15$  dB, 平均增加耗时为 0.6 ms; 若取  $SNR_{th} = 20$  dB, 平均增加耗时为 0.8 ms。仿真结果表明, 本文方法对测向实时性影响小。

## 4 结束语

本文提出了一种基于信噪比估计和矢量平均的干涉仪抗噪声测向方法, 通过构造相位差复数矢量并对其求平均值, 可精确计算出相位差, 提高了相位差测量的精度和稳定性, 从而提高了测向性能。提出的自适应准则通过估计来波信噪比, 可快速确定不同信噪比下矢量平均所需样本量, 使处理后信号达到设定信噪比阈值。仿真实验表明: 本文算法在低信噪比条件下可以达到很高的测向准确度, 增加的计算复杂性小, 对实时性影响小。与现有方法相比, 该方法对低信噪比条件下的测向性能改善明显, 可用于对远距离微弱信号的测向。

### 参考文献:

- [1] Wei Hewen, Shi Yungang. Performance analysis and comparison of correlative interferometers for direction finding [C]// 2010 IEEE 10th International Conference on Signal Processing (ICSP). Beijing, China: IEEE, 2010: 393-396.
- [2] Qin Ling, Jia Kexin, He Zishu. Performance analysis of correlative interferometer direction finder using cosine function [C]// 2010 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS). Chengdu, China: IEEE, 2010: 1-4.
- [3] 张智锋, 乔强. 低信噪比下相关干涉仪测向处理方法[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(6): 103-106.  
Zhang Zhifeng, Qiao Qiang. Direction finding processing method of correlation interferometer under low SNR [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(6): 103-106.
- [4] Yang H J, Kwag Y K. Performance enhancement of direction finding for multiple baseline interferometry [C]// 2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). Seoul, Korea: IEEE, 2011: 1-4.
- [5] Jie Shi, Yang Yu. Direction estimation algorithm and its improved method based on a tri-axial vector sound intensity array [C]// 2013 5th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Hong Kong, China: IEEE, 2013: 481-484.
- [6] 张金成, 彭华. 一种鲁棒的基于子空间分解的盲信噪比估计方法[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(5): 609-614.  
Zhang Jincheng, Peng Hua. Robust blind SNR estimation method based on subspace decomposition [J]. Journal of Data Ac-

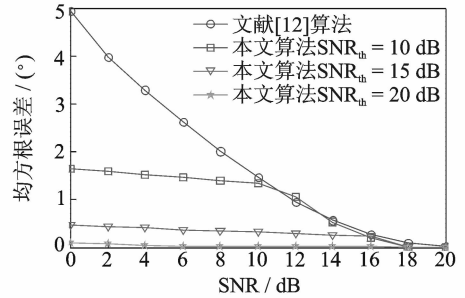


图 3 均方根误差随信噪比阈值的变化

Fig. 3 RMSE of the measured angle varies with  $SNR_{th}$

quisition and Processing, 2011, 26(5): 609-614.

- [7] 韩博,吴杰,许华.一种基于高阶统计信息的信噪比估计改进算法[J].数据采集与处理,2012,27(5):576-580.  
Han Bo, Wu Jie, Xu Hua. Improved SNR estimation algorithm of higher-order statistics[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(5): 576-580.
- [8] 孙钢灿,安建平,杨杰,等.非协作通信中的信噪比估计算法[J].北京理工大学学报,2009,29(8):708-712.  
Sun Gangcan, An Jianping, Yang Jie, et al. Signal and noise ratio estimation method in non-cooperative communication[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(8):708-712.
- [9] An X, Feng Z, Wang W, et al. A single channel correlative interferometer direction finder using VXI receiver [C]// Proc International Conference on Microwave and Milimeter Wave Technology. Beijing, China; IEEE, 2002: 1158-1161.
- [10] Park C S, Kim D Y. The fast correlative interferometer direction finder using I/Q demodulator [C]//Proc Asia-Pacific Conference on Communications. Busan, Korea; IEEE, 2006: 1-5.
- [11] Balogh L, Kollar I. Angle of arrival estimation based on interferometer principle [C]// Proc IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. Budapest, Hungary; IEEE, 2003: 219-223.
- [12] 魏合文,王军,叶尚福.一种基于余弦函数的相位干涉仪阵列 DOA 估计算法[J].电子与信息学报,2007,29(11):2665-2668.  
Wei Hewen, Wang Jun, Ye Shangfu. An algorithm of estimation direction of arrival for phase interferometer array using cosine function[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(11): 2665-2668.

#### 作者简介:



**郭东亮**(1976-),男,博士,讲师,研究方向:射频与模拟电路、非线性电路与系统,E-mail: guodl@mail.sysu.edu.cn.



**黄超**(1958-),男,助理工程师,研究方向:无线电技术及电子电路。



**李中华**(1977-),男,副教授,研究方向:物联网技术与云计算应用、大数据技术与智能城市应用。



**张铁军**(1969-),男,博士,讲师,研究方向:无线通信。

