

# 协同相干两点源比幅测角性能分析

汪兵, 杨益川, 丁怀, 夏碧君, 朱磊, 邓明龙

(电磁空间安全全国重点实验室, 四川成都 610036)

**摘要:** 针对协同相干多/两点源场景下比幅单脉冲测角的性能分析问题, 本文在两点源比幅测角一般模型基础上给出了相干两点源的比幅测角表达式, 并分析了3种典型情况; 然后, 推导了比幅测角误差与同步相位差误差和系统误差的理论关系, 并给出了测角误差的准确度模型; 最后, 通过数字仿真实验给出了两点源信号的同步相位差、功率比、信号角度等因素对比幅测角结果、测角误差及其准确度的影响. 结果表明: 比幅测角结果受相干两点源同步相位、功率比等因素的影响较大, 测角结果可能位于两信号角度之间也可能位于两信号角度之外; 系统和信号的误差越小, 测角误差模型越准确; 信号工作频率越高, 对时间同步要求越高. 本文完善了两点源场景下比幅测角理论, 为测角性能分析、测角系统方案优化等提供理论依据.

**关键词:** 相干两点源; 单脉冲雷达; 比幅测角; 性能分析; 误差准确度

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)05-1379-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240474

## Performance Analyses of Amplitude-Comparison Direction-Finding Under Cooperative Coherent Dual Sources

WANG Bing, YANG Yi-chuan, DING Huai, XIA Bi-jun, ZHU Lei, DENG Ming-long

(National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Chengdu, Sichuan 610036, China)

**Abstract:** This paper focuses on the problem of the amplitude-comparison direction-finding (DF) system of the monopulse radar under the scene of cooperative coherent dual sources. The authors describe the general model of the amplitude-comparison DF system and analyze three typical cases. And then, the theoretical errors and their accuracies of the estimated angle, which are caused by the system errors and the synchronous phase difference error, are derived. Finally, the numerical simulations are provided to analyze the influences of the signals' parameters to the estimated angle, including the synchronous phase difference, the power ratio and the signals' angles. The errors of estimated angle and their accuracies are also provided. The results illuminate that the estimated angle is between the angles of the dual sources, the smaller the errors the more accurate the error models of the estimated angle and the higher the working frequency the more rigorous the time synchronous demand. This paper can fill up some gaps of the DF theory under the condition of dual sources and also provide some guidance for the performance analyses and the optimizations of the scheme for the DF system.

**Key words:** coherent dual sources; monopulse radar; amplitude-comparison DF; performance analyses; error's accuracy

### 1 引言

在雷达、电子战等领域中, 角度信息是系统不可或缺的重要信息<sup>[1,2]</sup>. 单脉冲测角技术具有较强的实时性、角度跟踪能力, 且对传统干扰具有较强的抗干扰能力<sup>[3]</sup>, 在电子侦察、导弹制导、角度追踪等方面被广泛应用和研究<sup>[1,4-8]</sup>. 典型的单脉冲测角方法包括振幅法和相位法, 其中, 比幅测角由于其结构简单、灵敏度高、信号处理量小、测角速度快、技术成熟等优势而得到了广泛研究和

应用<sup>[1,5,9-12]</sup>.

在理想单点源信号环境下, 单脉冲测角在技术分类、雷达体制、测角误差和精度等方面受到了广泛关注. 在测角分类和雷达体制方面, 文献[1,5,9,10]给出了比幅单脉冲测角的分类以及直接比幅法、相位法和差波束法等测角技术的基本原理. 基于传统天线的比幅测角系统被扩展到基于DBF(Digital Beam Forming)的数字比幅测角系统, 并给出了工程参数选取准则<sup>[11]</sup>. 针对部分相关MIMO(Multiple Input Multiple Output)体制雷达及相控阵

雷达体制,文献[12]给出了比幅单脉冲方法的理论测角性能.文献[13]针对外辐射源雷达系统,提出了一种八单元均匀圆阵的比幅测角方法,给出了测角修正方法.文献[14,15]在给出相邻比幅测角的数学模型基础上,分析了波束宽度、天线张角、信噪比等对比幅测角性能的影响.在误差和精度方面,文献[16]基于多波束比幅测角侦察系统原理的基础,研究了天线、微波、接收机引起的测角误差,同时给出了工程应用的建议.文献[17]基于数字阵列系统,对比分析了单脉冲直接比幅和相位干涉仪的测角精度,为数字阵列测角方案选择提供了依据.

在实际战场环境中,以美军“狼群”为代表的无人分布式协同有意干扰、多雷达协同等装备被大量使用<sup>[10,18-24]</sup>,使得电磁信号环境呈现出分布式多点源协同相干和非相干的数学特性.由于在雷达主瓣波束范围内,协同相干两点源的普遍存在性(如交叉眼、双机协同等<sup>[20,21,25-28]</sup>)以及两点源测角的数学分析的操作性,使相干两点源的单脉冲测角受到了高度关注<sup>[6,8,20,21,25,26]</sup>.针对诱饵式相干两点源,文献[29]分析了比相被动雷达导引头测角的基本公式,并通过仿真分析了相位差的影响,最后还开展了实测数据分析.文献[30]针对两点源有源诱饵情况,建立了雷达导引头接收信号的数学模型,然后采用数字仿真的方法分析了两点源的信号幅度、相位差及多普勒频差对雷达导引头振幅和差测角的影响.文献[6]推导了振幅和差测角的误差,仿真表明了最大测角误差的条件是两点源反相 $180^\circ$ .文献[7]在考虑目标回波信号条件下,推导给出了振幅和差测角公式,并通过仿真分析了幅度、相位等因素对测角的影响.上述文献主要针对和差波束和比相体制,对相干两点源的测角进行研究.虽然振幅和差波束测角与直接比幅测角具有一定的统一性,但具体形式和性能影响仍有较大差异性而不能直接利用<sup>[31]</sup>.综上,对协同相干两点源信号比幅测角性能及其误差分析方面还缺少完善的理论推导和深入的分析,有必要开展深入研究,为测角性能分析、测角系统方案优化等提供技术参考.

本文针对协同相干两点源下比幅测角问题,首先给出比幅测角的系统组成、基本原理,并基于高斯方向图推导相干两点源比幅测角模型及其典型情况;然后,给出比幅测角的系统误差及其一阶近似的准确度公式,分析测角误差与同步相位差误差的关系;最后,设计数字仿真试验,分析相干两点源信号同步相位差、功率比、信号角度等因素对比幅测角的影响;分析系统误差、同步相位差误差对测角误差的影响以及近似误差的准确度.仿真结果表明:比幅测角结果是两点源信号的相位差、功率比、信号角度、系统参数等参数的综合函数;测角结果可能位于两信号角度之外,也可能位于两信号角度之间.

## 2 相干两点源比幅测角模型

考虑典型两天线组成的单脉冲比幅测角系统的方位平面<sup>[2,15]</sup>(多天线系统可按照测角区域划分成多个两天线系统,对俯仰平面的测角同理可得),2个天线的方向图相同且左右对称,在空间上互相叠交(左侧天线标识为天线1,右侧天线标识为天线2).令两天线的等强信号轴向指向 $\theta_0$ ,两天线的中心指向与等强信号方向的夹角相等且绝对值为 $\theta_\Delta$ ,天线的半功率波束宽度为 $\theta_{0.5}$ .令空间中存在2个目标或辐射源 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ ,且与测角系统的等信号轴形成的夹角分别为 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ ,具体场景如图1所示.

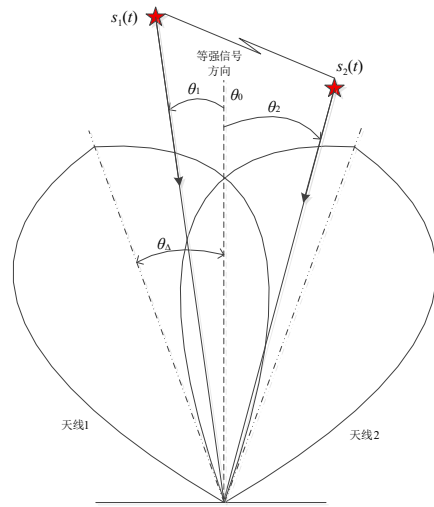


图1 比幅测角波束以及两点源的位置关系

考虑交叉眼干扰、分布式协同探测等场景,通过协同控制技术产生相干两点源信号 $s_i(t), i=1,2$ .两点源经空间传播,到达比幅测角系统的天线口面处为

$$x_i(t) = a_i e^{j\phi_i} = a_i e^{j(2\pi f_i t + \phi_i)}, i=1,2 \quad (1)$$

其中, $a_i$ 为信号幅度, $\phi_i=2\pi f_i t + \phi_i$ 为信号相位, $f_i$ 为信号频率, $\phi_i$ 为信号的初始相位.对于协同相干两点源信号 $x_i(t)$ ,当两信号参数满足:频率相同( $\Delta f=f_1-f_2=0$ )、时间精确同步( $\Delta t=0$ )且具有确定的初相差 $\phi_0$ ,此时两信号同步相位差为固定值 $\phi_0=\phi_2-\phi_1$ .

令比幅测角系统的等信号方向指向 $\theta_0=0$ ,两天线的方向图 $F_m(\theta), m=1,2$ ,可表示为<sup>[2,7]</sup>

$$\begin{aligned} F_1(\theta) &= F(\theta_\Delta + \theta) \\ F_2(\theta) &= F(\theta_\Delta - \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

基于两点源信号模型 $x_i(t)$ 与天线方向图 $F_m(\theta)$ ,比幅测角系统两个天线的接收信号 $y_m(t)$ 可写为<sup>[7]</sup>

$$\begin{cases} y_1(t) = \sum_{i=1}^2 F_1(\theta_i) x_i(t) = \sum_{i=1}^2 F(\theta_\Delta + \theta_i) a_i e^{j\phi_i} \\ y_2(t) = \sum_{i=1}^2 F_2(\theta_i) x_i(t) = \sum_{i=1}^2 F(\theta_\Delta - \theta_i) a_i e^{j\phi_i} \end{cases} \quad (3)$$

需要说明的是,理论接收信号应该包含接收机热噪声  $n_1(t)$  和  $n_2(t)$ . 但由于本文重点针对两点源信号对测角的影响分析,同时借鉴公开文献的处理方式<sup>[4,7]</sup>,本文暂不考虑噪声,以简化相关处理.

假设两个通道的处理具有一致性,即两天线接收的信号  $y_m(t)$  经过检波、对数放大等处理后,比幅输出  $u$  为<sup>[1,15]</sup>

$$u = \ln \frac{\sum_{i=1}^2 F(\theta_{\Delta} + \theta_i) a_i e^{j\phi_i}}{\sum_{i=1}^2 F(\theta_{\Delta} - \theta_i) a_i e^{j\phi_i}} \quad (4)$$

由比幅测角的原理可知,在测得比幅输出  $u$  条件下,基于接收天线方向图函数  $F_m(\theta)$ ,即可反解出信号角度估计值  $\hat{\theta}$ <sup>[19]</sup>:

$$\hat{\theta} = f(u) \quad (5)$$

其中,函数  $f(\cdot)$  是天线方向图  $F_m(\theta)$  的函数.

$$\hat{\theta} = \gamma_0 u = \gamma_0 \ln \left[ \frac{\left( e^{k(\theta_{\Delta} + \theta_1)^2} \right)^2 + \left( \chi e^{k(\theta_{\Delta} + \theta_2)^2} \right)^2 + 2e^{k(\theta_{\Delta} + \theta_1)^2} \sqrt{\chi} e^{k(\theta_{\Delta} + \theta_2)^2} \cos(\phi_0)}{\left( e^{k(\theta_{\Delta} - \theta_1)^2} \right)^2 + \left( \chi e^{k(\theta_{\Delta} - \theta_2)^2} \right)^2 + 2e^{k(\theta_{\Delta} - \theta_1)^2} \sqrt{\chi} e^{k(\theta_{\Delta} - \theta_2)^2} \cos(\phi_0)} \right] \quad (8)$$

其中,系数  $\gamma_0 = \gamma/2$ ,  $\phi_0 = \phi_1 - \phi_2$  为相干两点源同步相位差,  $\chi = a_2^2/a_1^2$  为两点源信号的功率比. 从式(8)可以看出,相干两点源的比幅输出  $u$  与单点源情况不同,从而影响测角结果. 对上式进行简单推导,可以得出如下典型情况.

(1) 当仅存在点源  $x_1(t)$  时,即  $\chi=0$ , 测角估计值为点源  $x_1(t)$  所在的角度  $\theta_1$ , 即

$$\hat{\theta} = \gamma_0 \ln \left[ \frac{\left( e^{k(\theta_{\Delta} + \theta_1)^2} \right)^2}{\left( e^{k(\theta_{\Delta} - \theta_1)^2} \right)^2} \right] = \theta_1 \quad (9)$$

当只存在点源  $x_2(t)$  时,同理可得.

(2) 当相干两点源在同一角度时,即  $\theta_1 = \theta_2$ , 测角估计值为

$$\hat{\theta} = \gamma_0 \ln \left[ \frac{\left( e^{k(\theta_{\Delta} + \theta_1)^2} \right)^2}{\left( e^{k(\theta_{\Delta} - \theta_1)^2} \right)^2} \right] = \theta_1 \quad (10)$$

(3) 当两点源对称激励时,即  $\theta_1 = -\theta_2$  且  $\chi=1$ , 测角结果指向中心, 即

$$\hat{\theta} = \gamma_0 u = 0 \quad (11)$$

### 3 相干两点源比幅测角误差分析

上文在理想情况下分析了两点源测角情况,而实际中系统设计和两点源信号不可避免地存在误差,本

显然,只有在确定天线方向图时,才能给出比幅值与测角结果的对应关系. 由于阵列 DBF、宽带螺旋天线等常用天线方向图可使用高斯函数进行较好的近似,且广泛应用在大量的研究分析中<sup>[5,11,17]</sup>. 因此,本文也假设比幅测角系统的天线方向图为高斯函数,即

$$F(\theta) = \exp(k\theta^2) \quad (6)$$

其中,  $k = -k_0/(0.5\theta_{0.5})^2$ ,  $k_0$  为比例常数.

对于单点源信号,比幅测角的理论结果  $\hat{\theta}$  可写为<sup>[15]</sup>

$$\hat{\theta} = f(u) = \gamma u \quad (7)$$

其中,系数  $\gamma = 1/(4k\theta_{\Delta})$  (当比幅测角系统设计确定后,系数  $\gamma$  就确定). 从式(6)可以看出,比幅测角值是比幅值  $u$  的一次函数,只要测得  $u$  就可以估计信号角度  $\hat{\theta}$ . 在实际工程应用中,还可将测角估计值与比幅结果关系做成对应表,通过查表的方式快速获取角度估计值<sup>[31]</sup>.

对于两点源情况,将式(4)和式(6)代入式(7)中,经过一定的化简,比幅测角的估计值可写为式(8):

节将分析系统误差和同步相位差误差对比幅测角误差及其准确度的影响.

#### 3.1 系统误差

对于系统误差,考虑波束指向误差  $\Delta\theta_{\Delta}$  和半功率波束宽度误差  $\Delta\theta_{0.5}$  两个方面,暂不考虑随机误差. 假设通道误差为 0, 即比幅误差  $\Delta u$  主要由点源信号误差引起.

对式(8)中的  $\theta_{0.5}$  和  $\theta_{\Delta}$  进行全微分,可得:

$$d\hat{\theta} = -\frac{\theta_{0.5} u}{16k_0 \theta_{\Delta}} d\theta_{0.5} + \frac{(\theta_{0.5})^2 u}{32k_0 \theta_{\Delta}^2} d\theta_{\Delta} \quad (12)$$

将式(12)写为增量形式:

$$\Delta\hat{\theta} = -\frac{\theta_{0.5} u}{16k_0 \theta_{\Delta}} \Delta\theta_{0.5} + \frac{(\theta_{0.5})^2 u}{32k_0 \theta_{\Delta}^2} \Delta\theta_{\Delta} \quad (13)$$

式(13)表明,测角误差  $\Delta\hat{\theta}$  是波束宽度、波束指向、比幅值的函数. 当给定测角误差需求时,可求解得到对系统误差的要求. 进一步,对比单点源情况下的系统误差分析结果可知<sup>[15]</sup>,在比幅值一定时,式(13)与单点源情况具有一致的数学形式. 因此,为了分析方便,后续系统误差的分析仅针对单点源情况.

根据泰勒展开原理,函数  $f(x)$  的增量形式  $\Delta f(x)$  可表示为

$$\Delta f(x) = f^{(1)}(x_0) \Delta x + \dots + \frac{f^{(i)}(x_0)}{(n-1)!} (\Delta x)^n + R_n(x) \quad (14)$$

其中,  $f^{(i)}(x_0)$  为  $f(x)$  在  $x_0$  处的  $i$  阶导数,  $R_n(x)$  为余项.

对比泰勒展式可知,测角误差式(13)是其一阶泰

勒展式近似,其存在高阶项的截断误差  $\Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}}$ . 对于波束指向误差  $\Delta\theta_\Delta$  和半功率波束宽度误差  $\Delta\theta_{0.5}$ , 其截断误差分别为

$$\begin{cases} \Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}} = \left| -\frac{u}{32k_0\theta_\Delta}(\Delta\theta_{0.5})^2 \right| \\ \Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}} = \left| -\frac{(\theta_{0.5})^2 u}{32k_0\theta_\Delta^3}(\Delta\theta_\Delta)^2 + \dots \right. \\ \left. + \frac{(\theta_{0.5})^2 u(-1)^{n-1}}{32k_0(n-1)!}\theta_\Delta^{-(n+1)}(\Delta\theta_\Delta)^n \right| \end{cases} \quad (15)$$

随着近似阶数的增加,高阶余项的影响将越小. 因此,本文利用二阶项来分析截断误差,评估一阶近似式(13)的准确度,即

$$\begin{cases} \Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}} = \left| -\frac{u}{32k_0\theta_\Delta}(\Delta\theta_{0.5})^2 \right| \\ \Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}} \approx \left| -\frac{(\theta_{0.5})^2 u}{32k_0\theta_\Delta^3}(\Delta\theta_\Delta)^2 \right| \end{cases} \quad (16)$$

从式(16)可知,截断误差是波束指向误差  $\Delta\theta_\Delta$  和半功率波束宽度误差  $\Delta\theta_{0.5}$  的二次函数. 当系统误差较大时,截断误差将增大,此时基于一阶近似的系统误差模型的准确性将降低. 在给定截断误差  $\Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}0}$  的约束下,系统误差需满足关系为

$$\begin{cases} \Delta\theta_{0.5} < \left| -\frac{\Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}0}32k_0\theta_\Delta}{u} \right|^{1/2} \\ \Delta\theta_\Delta < \left| -\frac{\Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}0}32k_0\theta_\Delta^3}{(\theta_{0.5})^2 u} \right|^{1/2} \end{cases} \quad (17)$$

### 3.2 同步相位误差

从理论式(8)可以看出,两点源信号的功率比、信号角度和同步相位差这三种误差都会导致比幅值误差  $\Delta u$ , 进而产生测角误差. 由于对相位的精确控制难度大,且误差更容易产生(两点源时间同步误差  $\Delta t$ 、初相误差  $\Delta\phi_0$ 、频率误差等因素均会引起),因此,同步相位差误差  $\Delta\phi_0$  是一个非常重要的误差来源. 因此,本节重点分析同步相位差误差  $\Delta\phi_0$  对测角误差的影响,功率比误差  $\Delta\chi$  和信号角度误差  $\Delta\theta_2$  的影响分析同理可得.

鉴于两点源信号的对称性,同时为了简化分析,假设点源信号  $s_1(t)$  的各参数不存在误差,对式(8)中的同步相位差  $\Delta\phi_0$  进行微分计算,并表示成增量形式为

$$\Delta\hat{\theta} = \gamma_0 \left[ \frac{D \sin(\phi_0)}{C + D \cos(\phi_0)} - \frac{B \sin(\phi_0)}{A + B \cos(\phi_0)} \right] \Delta\phi_0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{其中, } A &= \left( e^{k(\theta_\Delta + \theta_1)^2} \right)^2 + \left( \chi e^{k(\theta_\Delta + \theta_2)^2} \right)^2, B = 2e^{k(\theta_\Delta + \theta_1)^2} \sqrt{\chi} e^{k(\theta_\Delta + \theta_2)^2}, \\ C &= \left( e^{k(\theta_\Delta - \theta_1)^2} \right)^2 + \left( \chi e^{k(\theta_\Delta - \theta_2)^2} \right)^2, D = 2e^{k(\theta_\Delta - \theta_1)^2} \sqrt{\chi} e^{k(\theta_\Delta - \theta_2)^2}. \end{aligned}$$

令  $\Delta\hat{\theta} = 0$ , 可得:

$$\begin{cases} \phi_0 = 0, \pi \\ \chi = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式(19)表明,当  $\phi_0 = 0, \pi$  时,比幅测角取得极值. 该结论也说明:交叉眼干扰 ( $\phi_0 = \pi$ ) 可以使得比幅测角偏差最大,该结论与和差波束测角的结论一致<sup>[6]</sup>. 当  $\chi = 0$  时,即仅存在点源  $s_1(t)$ , 测角结果为  $\hat{\theta} = \theta_1$ , 此时相位差的误差不影响测角误差.

在给定  $\Delta\hat{\theta}$  时,对  $\Delta\phi_0$  的要求为

$$\Delta\phi_0 \leq \frac{\Delta\hat{\theta}}{\gamma_0 \left[ \frac{D \sin(\phi_0)}{C + D \cos(\phi_0)} - \frac{B \sin(\phi_0)}{A + B \cos(\phi_0)} \right]} \quad (20)$$

同理,为了评估误差的一阶近似式(18)的准确度,利用二阶项来分析截断误差  $\Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}}$ , 即式(21). 当截断误差给定时  $\Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}} = \Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}0}$ , 对  $\Delta\phi_0$  的要求为式(22).

$$\Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}} = \left| \frac{\gamma_0 (\Delta\phi_0)^2}{2} \left\{ D \frac{\cos(\phi_0) - \sin(\phi_0)}{[C + D \cos(\phi_0)]^2} - B \frac{\cos(\phi_0) + \sin(\phi_0)}{[A + B \cos(\phi_0)]^2} \right\} \right| \quad (21)$$

$$\Delta\phi_0 \leq \sqrt{\frac{2\Delta\hat{\theta}_{\text{trunc}0}}{\gamma_0 \left\{ \left| D \frac{\cos(\phi_0) - \sin(\phi_0)}{[C + D \cos(\phi_0)]^2} - B \frac{\cos(\phi_0) + \sin(\phi_0)}{[A + B \cos(\phi_0)]^2} \right| \right}}} \quad (22)$$

利用式(20)和式(22),可得对同步相位差误差的设计需求.  $\Delta\phi_0$  的来源主要为信号  $s_2(t)$  的频率、同步时间、初相等的误差. 考虑到初相的相位误差可通过校准等手段来改善,对于  $t=0$  时,频率误差的影响为  $2\pi t \Delta f = 0$ . 下面主要考虑时间同步误差的影响.

对  $\phi_0$  的同步时间  $t$  求微分,并写为增量形式为

$$\Delta\phi_0 = 2\pi f_2 \Delta t \quad (23)$$

在同步相位差误差  $\Delta\phi_0$  的设计需求下,可得到对时间同步误差  $\Delta t$  的设计需求为

$$\Delta t = \frac{\Delta\phi_0}{2\pi f_2} \quad (24)$$

从式(24)可以直观看出,在给定同步相位差误差的需求下,信号的工作频率越高,对时间的同步误差的

要求越高.

### 4 仿真分析

本节将首先设计典型仿真试验场景和参数;然后,通过数值仿真试验分析协同相干两点源比幅测角的性能及其误差.

#### 4.1 仿真场景和参数设置

令比幅测角系统的天线方向图满足高斯特性,其比例常数  $k_0=0.35$ , 天线半功率波束宽度  $\theta_{0.5}=30^\circ$ , 等信号的轴向  $\theta_0=0^\circ$ , 两天线的中心指向与等信号轴向夹角  $\theta_\Delta=20^\circ$ . 设信号 1 为参考信号, 以到达天线口面的时间为基准,  $x_1(t)$  为简单脉冲信号, 中频  $f_1=20$  MHz, 初相  $\varphi_1=10^\circ$ , 信号入射角度  $\theta_1=10^\circ$ , 幅度  $a_1=1$ . 信号  $x_2(t)$  的基本参数与  $x_1(t)$  相同, 但是其信号角度  $\theta_2$ 、信号初相  $\varphi_2$ 、信号幅度  $a_2$  为变量.

#### 4.2 同步相位差与功率比对测角的影响

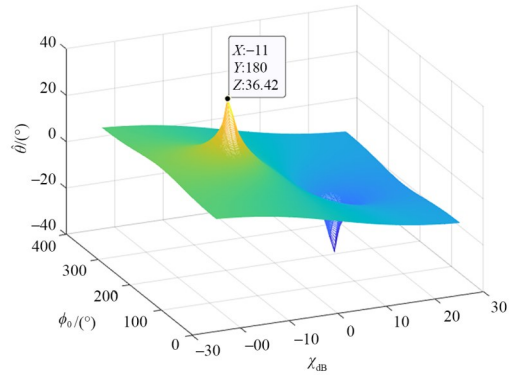
设信号  $x_2(t)$  的角度  $\theta_2=-10^\circ$ , 即与信号  $x_1(t)$  对称分布. 图 2 给出了相干两点源的相位差  $\phi_0$ 、功率比  $\chi_{dB}$  (定义  $\chi_{dB}=10\lg\chi$ ) 对比幅测角  $\hat{\theta}$  的影响, 其中, 图 2(a) 为三维结果图, 图 2(b) 为剖面等高线图. 从图 2 可以看出, 随着  $\chi_{dB}$  增大, 比幅测角结果呈现反对称关系; 在  $\chi_{dB} \geq 0$  时, 测角结果位于  $\theta_2$  一侧, 反之在  $\theta_1$  一侧, 即测角结果偏向高能量信号一侧; 当同步相位差  $\phi_0=180^\circ$ , 功率比  $\chi_{dB}=-11$  时, 测角结果取得最小值  $\hat{\theta} \approx -36^\circ$ , 测角结果位于两点源角度之外.

对上面的三维图进行剖面分析, 见图 3. 可以看出 (由于对称关系, 仅给出  $\chi_{dB} \geq 0$  的情况), 在给定功率比条件下, 随着同步相位差  $\phi_0$  的增大, 测角结果  $\hat{\theta}$  先减小再增大, 且在  $\phi_0=180^\circ$  时, 测角结果达到极小值. 在同步相位差小于某一个值时 (仿真中  $\phi_0 < 110^\circ$ ), 测角结果位于两点源之间, 且逐渐靠近  $\theta_2$ . 存在一个临界功率比  $\chi_{dB0}$ , 当功率比  $\chi_{dB} \geq \chi_{dB0}$  时, 测角结果将有可能位于两点源角度之外, 即  $\hat{\theta} > \theta_2$ ; 且  $\chi_{dB}$  大于临界值  $\chi_{dB0}$  越多, 测角结果在两点源之外对应的  $\phi_0$  范围就越大, 如  $\chi_{dB}=25$  时, 在  $\phi_0 \in [110^\circ, 250^\circ]$  的范围内, 比幅测角结果都在两点源之外; 当功率比  $\chi_{dB}$  进一步增大时, 测角结果又逐渐靠近  $\theta_2$ .

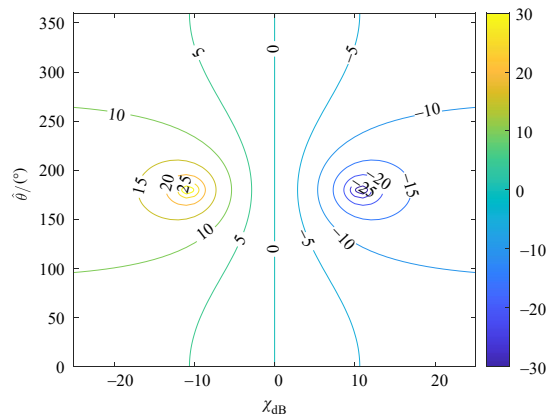
#### 4.3 信号角度与功率比对测角的影响

下面分析信号角度  $\theta_2$  和功率比  $\chi_{dB}$  对比幅测角  $\hat{\theta}$  的影响. 当给定  $\chi_{dB}=0$  时, 同步相位差  $\phi_0$  对比幅测角的影响见图 4. 可以看出, 多条曲线相对集中在  $\phi_0=0^\circ$  对应的曲线附近, 且在  $\theta_2=-10^\circ, 10^\circ$  处相交; 在给定  $\theta_1$  时, 测角结果随  $\theta_2$  的增大而增大. 对于  $\phi_0 \leq 90^\circ$ , 比幅测角结果始终位于两点源的角度之间; 当  $\phi_0=180^\circ$  时, 测角结果集中在  $0^\circ$  附近, 当  $\theta_2 \geq 0^\circ$  时, 测角结果将在两点源的角度之外.

对于  $\phi_0=0^\circ$ , 不同功率比  $\chi_{dB}$  对比幅测角的影响见



(a) 三维图



(b) 等高线图

图 2 给定  $\theta_2=-10^\circ, \phi_0$  与  $\chi_{dB}$  对  $\hat{\theta}$  的影响

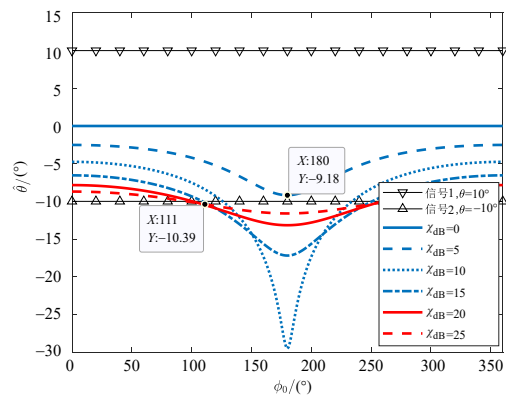


图 3 给定  $\chi_{dB} \in \{0, 5, 10, 15, 20, 25\}$  和  $\theta_2=-10^\circ, \phi_0$  与  $\hat{\theta}$  的关系

图 5. 可以看出, 测角结果随  $\theta_2$  的增大而增大, 且都集中在两点源的角度之间. 当  $\chi_{dB}$  增大时, 测角结果向  $\theta_2$  靠近, 即测角结果偏向信号能量较大所在的角度. 当两点源空间角度相同时, 即  $\theta_2=\theta_1$ , 测角结果为确定值  $\theta_1$ , 该结论与理论分析一致.

对于  $\phi_0=180^\circ$ , 不同功率比  $\chi_{dB}$  对比幅测角的影响见

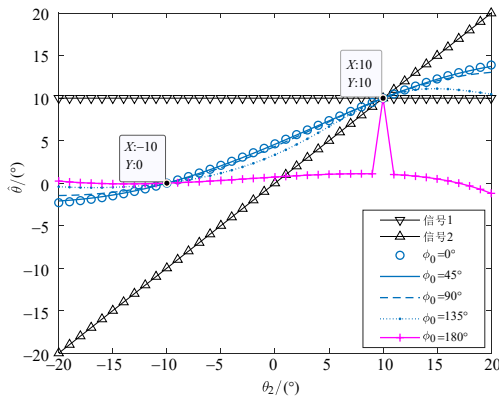


图4 给定 $\theta_1=10^\circ$ 和 $\phi_0 \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ\}$ ,  $\theta_2$ 与 $\hat{\theta}$ 的关系

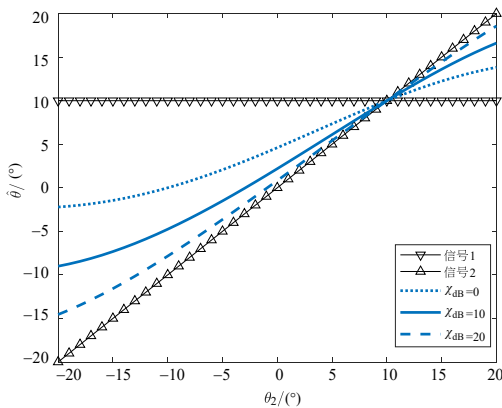


图5 给定 $\phi_0=0^\circ$ 和 $\chi_{dB} \in \{0, 10, 20\}$ ,  $\theta_2$ 与 $\hat{\theta}$ 的关系

图6. 可以看出, 当 $\chi_{dB}=0$ 时, 测角结果 $\hat{\theta}$ 为等信号轴方向, 且不随 $\theta_2$ 的变化而产生较大变化. 当 $\theta_2$ 增加时, 测角结果将先减小再增大, 同时极小值可能超出两点源的角度范围, 且功率比越高该极小值越小, 超出两点源夹角时的 $\theta_2$ 分布范围越广.

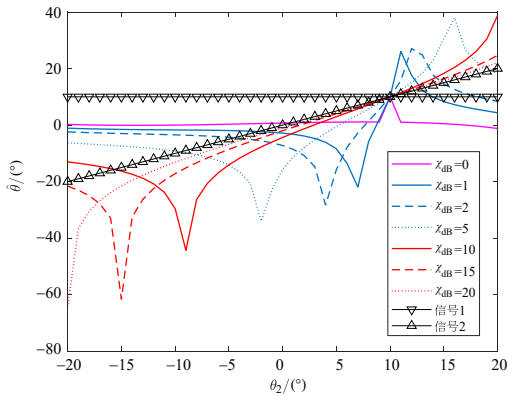


图6 给定 $\phi_0=180^\circ$ 和 $\chi_{dB} \in \{0, 5, 10, 15, 20\}$ ,  $\theta_2$ 与 $\hat{\theta}$ 的关系

#### 4.4 误差分析

##### 4.4.1 系统误差

由于在比幅值一定时, 相干两点源与单点源条件

下系统误差的影响具有一致的数学形式, 因此, 对系统误差的仿真分析主要考虑单点源 $x_2(t)$ 情况. 由于比幅测角系统的单元天线方向图具有对称性, 因此, 只需分析范围 $\theta_2 \in [0, \theta_\Delta]$ 即可. 同时, 为了研究测角误差 $\Delta\hat{\theta}$ 的准确度, 定义截断误差 $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$ 为近似误差 $\Delta\hat{\theta}$ (由式(13)给定)与仿真误差 $\Delta\hat{\theta}_{mc}$ 的差,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$ 越小则近似公式越准确.

$$\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}} = \Delta\hat{\theta}_{trunc} = |\Delta\hat{\theta}_{mc} - \Delta\hat{\theta}| \quad (25)$$

对于半功率波束宽度误差 $\Delta\theta_{0.5} \in \{0.1^\circ, 0.5^\circ\}$ , 测角误差 $\Delta\hat{\theta}$ 随信号角度 $\theta_2$ 的变化关系见图7. 可以看出, 测角误差 $\Delta\hat{\theta}$ 随 $\theta_2$ 的增大而增大, 且满足线性关系; 对比 $\Delta\theta_{0.5}=0.1^\circ$ 和 $\Delta\theta_{0.5}=0.5^\circ$ 两条曲线, 可以看出 $\Delta\theta_{0.5}=0.1^\circ$ 越大, 曲线的斜率越大, 导致的测角误差也越大; 当 $\theta=0^\circ$ 时, 测角误差相等且为0.

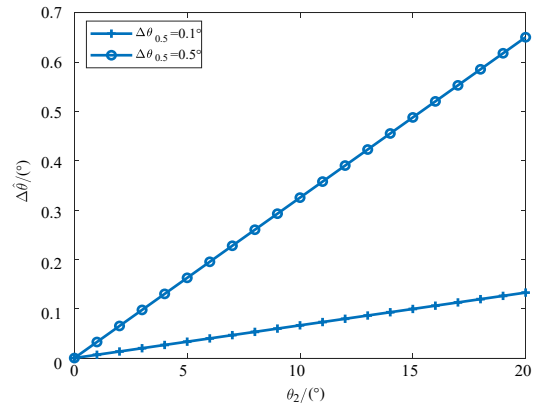


图7 给定 $\Delta\theta_{0.5} \in \{0.1^\circ, 0.5^\circ\}$ ,  $\Delta\hat{\theta}$ 与 $\theta_2$ 的关系

其次, 分析半功率波束宽度误差 $\Delta\theta_{0.5}$ 导致的测角误差的截断误差 $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$ . 给定信号角度 $\theta_2 \in \{0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ\}$ ,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$ 随半功率波束宽度误差 $\Delta\theta_{0.5}$ 变化的关系见图8. 可以看出,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$ 随误差 $\Delta\theta_{0.5}$ 的增大而增大. 当 $\Delta\theta_{0.5} \leq 2^\circ$ 且 $\theta_2 \leq 20^\circ$ 时, 测角误差的截断误差( $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}} < 0.09^\circ$ )的近似结果较准确. 另一方面, 在相同误差 $\Delta\theta_{0.5}$ 的条件下, 截断误差随信号角度 $\theta_2$ 的增大而增大; 只有在 $\theta_2=0^\circ$ 时, 理论结果与仿真结果的差为0.

同理, 在给定波束宽度误差 $\Delta\theta_\Delta \in \{0.1^\circ, 0.5^\circ\}$ 情况下, 测角误差 $\Delta\hat{\theta}$ 随信号角度 $\theta_2$ 的变化关系见图9. 可以看出, 测角误差 $\Delta\hat{\theta}$ 随 $\theta_2$ 的增大而增大, 且满足线性关系, 同时 $\Delta\theta_{0.5}$ 越大, 曲线的斜率越大, 带来的测角误差也越大; 当 $\theta_2=0^\circ$ 时, 测角误差相等且为0.

对于信号角度 $\theta_2 \in \{0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ\}$ ,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$ 随波束指向误差 $\Delta\theta_\Delta$ 变化的关系见图10. 可以看出,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$ 随误差 $\Delta\theta_\Delta$ 的增大而增大. 当 $\Delta\theta_\Delta \leq 2^\circ$ 且 $\theta_2 \leq 20^\circ$ 时, 测角误差的截断为 $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}} < 0.2^\circ$ . 另一方面, 在相同误差 $\Delta\theta_{0.5}$ 的条件下, 截断误差随信号角度 $\theta_2$ 的增大而增大; 在 $\theta_2=0^\circ$ 时, 理论结果与仿真结果的差为0.

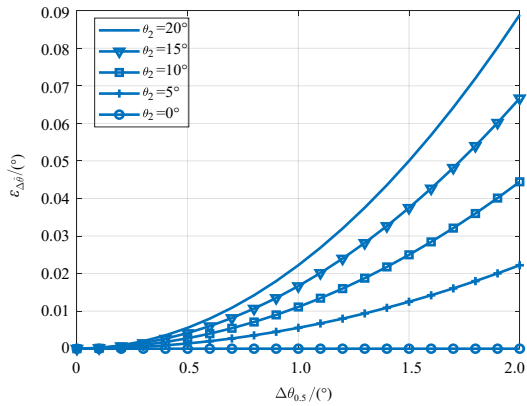


图8 给定  $\theta_2 \in \{0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ\}$ ,  $\varepsilon_{\Delta\theta}$  与  $\Delta\theta_{0.5}$  的关系

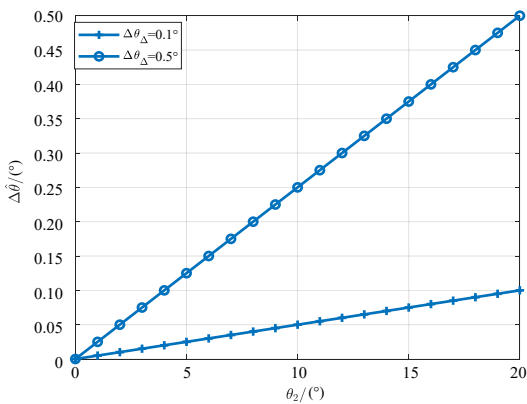


图9 给定  $\Delta\theta_{\Delta} \in \{0.1^\circ, 0.5^\circ\}$ ,  $\Delta\hat{\theta}$  与  $\theta_2$  的关系

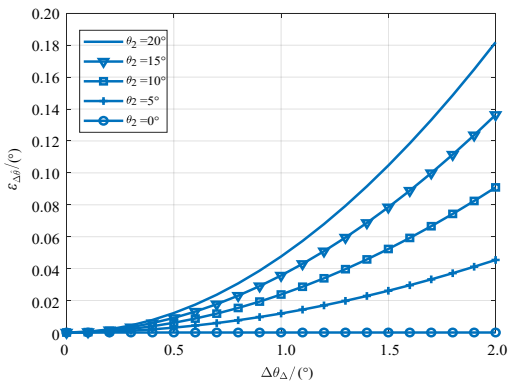


图10 给定  $\theta_2 \in \{0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ\}$ ,  $\varepsilon_{\Delta\theta}$  与  $\Delta\theta_{\Delta}$  的关系

#### 4.4.2 同步相位差误差

接下来,分析同步相位差的误差对测角误差的影响.令  $\theta_2 = -\theta_1 = -10^\circ$ ,同步相位差的误差  $\Delta\phi_0 = 1^\circ$ ,测角误差  $\Delta\hat{\theta}$  随功率比  $\chi_{dB}$ 、同步相位差  $\phi_0$  变化的关系见图11.可以看出,测角误差是功率比和同步相位差的函数,呈现双峰的变化趋势.具体来看,当  $\chi_{dB} = 0$  时(两点源信号对称),测角误差为0,且不随相位差的变化而变化;当功率比  $\chi_{dB} = \pm 11$ ,相位差  $\phi_0 = 175^\circ$  时,测角误差取得最大值.

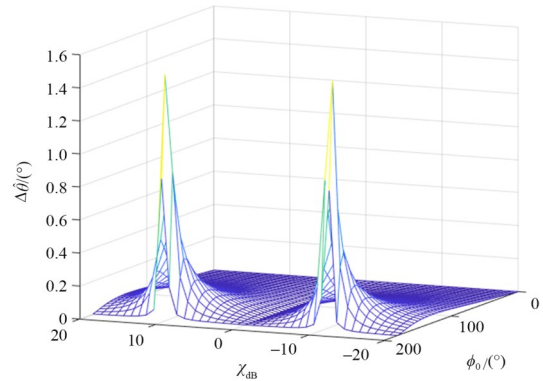


图11 在  $\Delta\phi_0 = 1^\circ$  下,  $\chi_{dB}$  和  $\phi_0$  对  $\Delta\hat{\theta}$  的影响

同理,定义截断误差  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  为近似误差  $\Delta\hat{\theta}$  与仿真误差  $\Delta\hat{\theta}_{mc}$  的差.可知,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  越小则近似公式越准确.

$$\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}} = \Delta\hat{\theta}_{trunc} = \left| \Delta\hat{\theta}_{mc} - \Delta\hat{\theta} \right| \quad (26)$$

对于功率比  $\chi_{dB} = 3$ ,测角误差随相位差的变化关系见图12.可以看出,不同  $\phi_0$  下,  $\Delta\phi_0$  越大,则  $\Delta\hat{\theta}$  越大;在  $\Delta\phi_0$  给定时,  $\Delta\hat{\theta}$  随  $\phi_0$  先增大再减小,在  $\phi_0 \leq 60^\circ$  范围内,  $\Delta\hat{\theta}$  随  $\phi_0$  的变化影响较小(斜率较小);在  $\phi_0 = [0^\circ, 180^\circ]$  时,测角误差取得最小值  $\Delta\hat{\theta} = 0$ .另一方面,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  随  $\phi_0$  的变化关系见图13.可以看出,  $\Delta\phi_0$  越大,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  越大;同时,随  $\phi_0$  的增大,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  先增大再减小然后再增大,出现2个极小值  $\phi_0 \in \{0^\circ, 140^\circ\}$ .从测角误差的大小以及近似准确度来看,  $\phi_0 = 0^\circ$  时可以取得较小误差和较准确的近似结果.

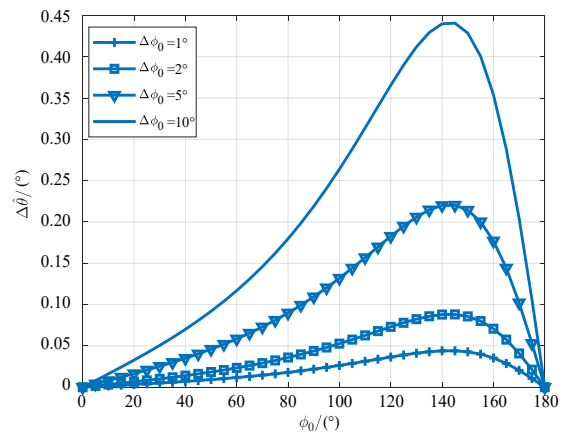


图12 给定  $\Delta\phi_0 \in \{1^\circ, 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ\}$ ,  $\phi_0$  与  $\Delta\hat{\theta}$  的关系

另一方面,在给定  $\phi_0 = 30^\circ$  的条件下,  $\Delta\hat{\theta}$  随功率比的变化关系见图14.可以看出,对于不同的功率比,同步相位差误差越大,测角误差越大;在相位差误差给定时,测角误差随功率比先增大再减小;当  $\chi_{dB} = 0$  时,测角误差取得最小值.同时,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  随  $\chi_{dB}$  的变化关系见图15.可以看出:  $\Delta\phi_0$  越大,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  越大,测角误差的近似越不准确;在

$\Delta\phi_0 \leq 30^\circ$  时,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}} \leq 0.25^\circ$ , 测角误差的近似较准确. 综上, 从测角误差的大小以及近似准确度来看,  $\Delta\phi_0 \leq 30^\circ$  时可以取得较小误差和准确的近似结果.

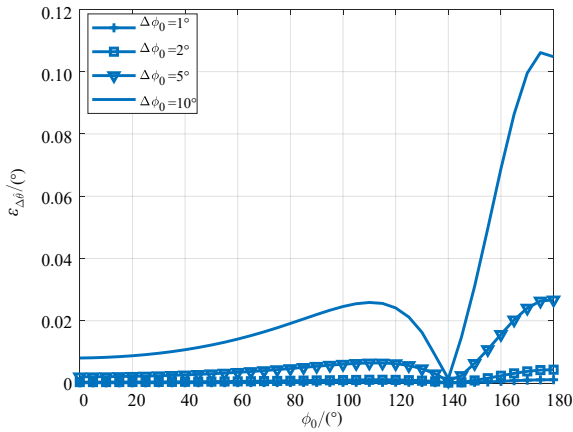


图 13 给定  $\Delta\phi_0 \in \{1^\circ, 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ\}$ ,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  与  $\phi_0$  的关系

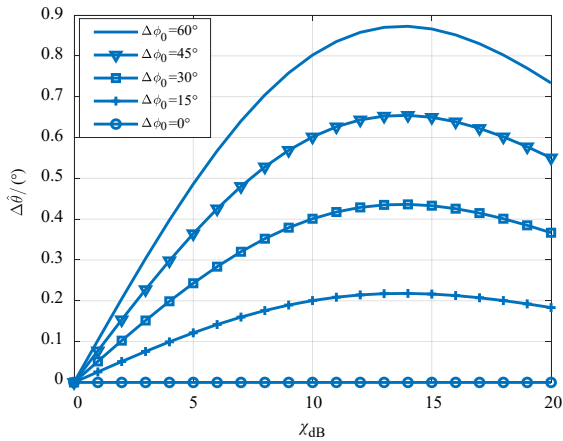


图 14 给定  $\Delta\phi_0 \in \{0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ\}$ ,  $\chi_{dB}$  与  $\Delta\hat{\theta}$  的关系

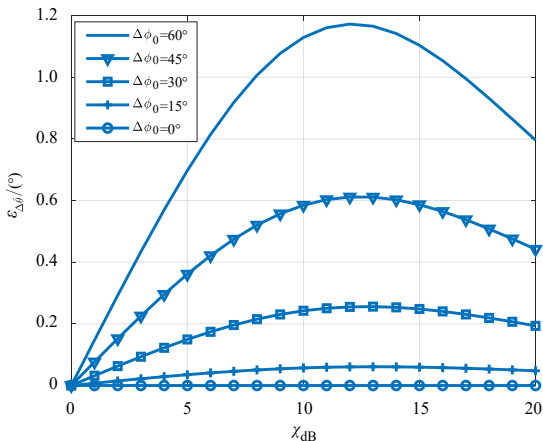


图 15 给定  $\Delta\phi_0 \in \{0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ\}$ ,  $\chi_{dB}$  与  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  的关系

令  $\chi_{dB}=3$ , 相位差误差  $\Delta\phi_0$  与测角误差  $\Delta\hat{\theta}$  的关系见图 16. 可以看出,  $\Delta\hat{\theta}$  随  $\Delta\phi_0$  的增大而增大, 且满足线性

关系. 对比不同  $\phi_0$  对应的几条曲线, 可以看出,  $\phi_0$  越大, 曲线的斜率越大, 带来的测角误差也越大; 当  $\theta=0^\circ$  时, 测角误差相等且为 0. 同时,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  随  $\Delta\phi_0$  的变化关系见图 17. 可以看出,  $\Delta\phi_0$  越大,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  越大, 测角误差  $\Delta\hat{\theta}$  的近似分析越不准确; 在  $\Delta\phi_0 \leq 30^\circ$  时,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  值较小, 测角误差  $\Delta\hat{\theta}$  的近似准确度较高; 同时,  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  随  $\Delta\phi_0$  增大的曲率较小, 即测角误差  $\Delta\hat{\theta}$  对  $\Delta\phi_0$  较不敏感. 因此, 要使得测角误差减小, 需要保证  $\Delta\phi_0 \leq 30^\circ$  且越小越好.

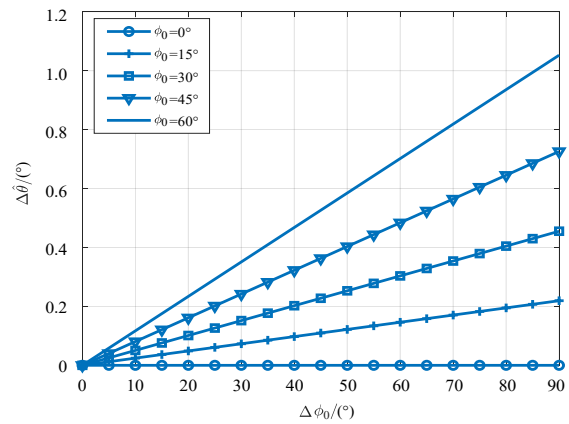


图 16 给定  $\phi_0 \in \{0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ\}$ ,  $\Delta\phi_0$  与  $\Delta\hat{\theta}$  的关系

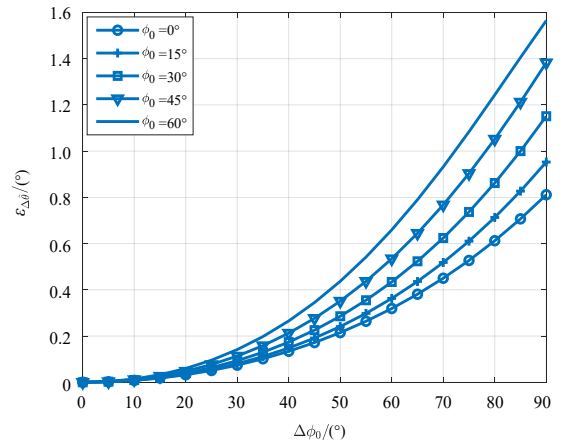


图 17 给定  $\phi_0 \in \{0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ\}$ ,  $\Delta\phi_0$  与  $\varepsilon_{\Delta\hat{\theta}}$  的关系

从同步相位差误差对测角误差的影响分析可知, 测角误差是同步相位差  $\phi_0$  及其误差  $\Delta\phi_0$ 、功率比  $\chi_{dB}$  的综合函数. 在  $\phi_0 \leq 60^\circ$  且  $\chi_{dB} \leq 10$  时, 在  $\Delta\phi_0 \leq 30^\circ$  范围内测角误差较小, 且测角误差的近似准确度较高. 下面针对  $\Delta\phi_0 \leq 30^\circ$ , 分析两点源信号的时间同步约束. 信号时间同步误差  $\Delta t$  与同步相位差误差  $\Delta\phi_0$  的关系见图 18. 可以看出,  $\Delta t$  越大,  $\Delta\phi_0$  越大, 且呈线性关系; 信号频率越高, 时间同步误差导致的同步相位差误差越大. 对于 400 MHz 的信号,  $\Delta\phi_0 \leq 30^\circ$  要求的时间同步误差为  $\Delta t \leq 0.2$  ns; 而对于 1 GHz 的信号, 要求的时间同步误差则为  $\Delta t \leq 0.08$  ns, 即低频对同步误差的要求更低.

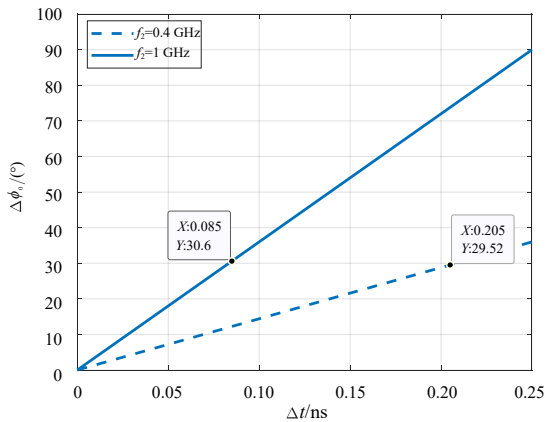


图 18 给定频率  $f \in \{0.4, 1\}$  GHz,  $\Delta t$  与  $\Delta\phi_0$  的关系

## 5 结论

本文针对协同相干两点源场景下比幅测角的性能分析问题,给出了比幅测角的系统组成和基本原理,并基于高斯方向图给出相干两点源比幅测角模型并分析了3种典型情况,在此基础上推导了比幅测角的系统误差、信号相位差误差引起的测角误差及其近似准确度.理论和仿真结果表明:在测角机理方面,比幅测角是协同相干两点源相位差、功率比、信号角度等的综合函数,在相位差接近  $180^\circ$  时,测角结果更有可能超出两信号角度之外;在相位差接近  $0^\circ$  时,测角结果更可能位于两信号角度之间.在误差分析方面,系统误差和同步相位差误差越小,测角误差越小,在同步相位差误差  $\Delta\phi_0 \leq 30^\circ$  时,可以取得较小的测角误差和较高的近似准确度,相同的相位差误差条件下,信号频率越大,时间同步误差的设计需求越高.

## 参考文献

- [1] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 第5版. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
DING L F, GENG F L, CHEN J C. Radar Principles[M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)
- [2] 郭福成, 樊昀, 周一宇, 等. 空间电子侦察定位原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.  
GUO F C, FAN Y, ZHOU Y Y, et al. Localization Principles in Space Electronic Reconnaissance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [3] SEIFER A D. Monopulse-radar angle tracking in noise or noise jamming[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(3): 622-638.
- [4] 陈安娜. 对单脉冲雷达的相干两点源干扰机理研究[J]. 航空兵器, 2007, 14(2): 7-11.  
CHEN A N. Study of monopulse radar coherent dual-source interference mechanism[J]. Aero Weaponry, 2007, 14(2): 7-11. (in Chinese)
- [5] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
ZHANG G Y, ZHAO Y J. Phased Array Radar Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [6] 李相平, 赵腊, 胡磊. 相干两点源对反舰导弹导引头的干扰研究[J]. 制导与引信, 2008, 29(3): 48-52.  
LI X P, ZHAO L, HU L. A study on the coherent dual point-source interference to the antiship missile seeker[J]. Guidance & Fuze, 2008, 29(3): 48-52. (in Chinese)
- [7] 刘恩凯, 何梅昕. 相干双点源干扰下的单脉冲雷达测角误差研究[J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(4): 20-23, 41.  
LIU E K, HE M X. Research into angle measurement error of monopulse radar under coherent two-point resource jamming[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019, 42(4): 20-23, 41. (in Chinese)
- [8] 马佳智, 施龙飞, 徐振海, 等. 单脉冲雷达多点源参数估计与抗干扰技术进展[J]. 雷达学报, 2019, 8(1): 125-139.  
MA J Z, SHI L F, XU Z H, et al. Overview of multi-source parameter estimation and jamming mitigation for monopulse radars[J]. Journal of Radars, 2019, 8(1): 125-139. (in Chinese)
- [9] 王玉涛. 单脉冲测角技术及工程实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.  
WANG Y T. Monopulse Angle Measurement Technology and Its Engineering Realization[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)
- [10] 赵英博. 干扰条件下的雷达目标测角方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.  
ZHAO Y B. Research on Angle Measurement Method of Radar Target Under Jamming Condition[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [11] 马银玲, 毛秀丽. 基于DBF的比幅测向方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(2): 91-93.  
MA Y L, MAO X L. Research into amplitude comparison DF method based on DBF[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014, 37(2): 91-93. (in Chinese)
- [12] 程增飞, 赵永波, 李慧, 等. 部分相关MIMO雷达比幅单脉冲测角性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 1979-1984.  
CHENG Z F, ZHAO Y B, LI H, et al. Angle estimation performance analysis of amplitude comparison mono-pulse for partially correlated MIMO radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(9): 1979-1984. (in Chinese)

- [13] 吕小永, 王俊, 焦雪. 外辐射源雷达中基于八单元均匀圆阵天线的测角方法[J]. 电子学报, 2015, 43(10): 2022-2027.  
LÜ X Y, WANG J, JIAO X. A DOA finding method in passive radar using an 8-element uniform circular array[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10): 2022-2027. (in Chinese)
- [14] 王敬强, 骆鲁秦, 张晓杰. 机载雷达告警系统对敌雷达测向性能分析[J]. 电子科技, 2011, 24(7): 39-41, 71.  
WANG J Q, LUO L Q, ZHANG X J. Performance analysis of the airborne radar warning system[J]. Electronic Science and Technology, 2011, 24(7): 39-41, 71. (in Chinese)
- [15] 李鹏, 武胜波. 比幅法测向及其误差分析[J]. 电子元器件应用, 2009, 11(10): 89-92.  
LI P, WU S B. The tional direction and its error analysis[J]. Electronic Components for Their Applications, 2009, 11(10): 89-92.
- [16] 陈旭, 糜坤年. 多波束比幅测向系统测向误差分析[J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(2): 35-38.  
CHEN X, MI K N. Direction finding error analysis of multi-beam amplitude-comparison direction finding system[J]. Shipboard Electronic Counter Measure, 2019, 42(2): 35-38. (in Chinese)
- [17] 范忠亮, 胡元奎. 阵列单脉冲比幅和干涉仪测向精度比较[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(4): 434-436, 442.  
FAN Z L, HU Y K. Direction-finding precision comparison between monopulse amplitude comparison and interferometer in array system[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(4): 434-436, 442. (in Chinese)
- [18] 赵英俊, 李荣锋, 王永良, 等. 基于主瓣多径干扰抑制的米波雷达测角方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 51-55.  
ZHAO Y J, LI R F, WANG Y L, et al. Angles measurement of meter-wave radars by mainlobe multipath jamming suppression[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 51-55. (in Chinese)
- [19] 汪兵, 赵耀东, 郑坤, 等. 同时同频多源信号对比幅测向的影响分析[J]. 电子信息对抗技术, 2020, 35(3): 12-17.  
WANG B, ZHAO Y D, ZHENG K, et al. Analysis of the influences on amplitude comparison direction-finding of simultaneous multiple source signals under common-frequency[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2020, 35(3): 12-17. (in Chinese)
- [20] 施龙飞, 李艳斌, 葛蕾, 等. 两点源角度拖引干扰方法研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(2): 238-244.  
SHI L F, LI Y B, GE L, et al. Angle pull-off jamming method based on the two-spot model[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(2): 238-244. (in Chinese)
- [21] 杨立明, 吕涛, 陈宁. 相干两点源对比相单脉冲测角的干扰机理分析[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(3): 209-212.  
YANG L M, LV T, CHEN N. Analysis of interference elements of coherent dual-sources to phase-comparison angle tracking of monopulse[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(3): 209-212. (in Chinese)
- [22] 李栋, 孟进, 刘永才, 等. 交叉眼技术对主被动复合单脉冲雷达测角的干扰效果分析[J]. 雷达学报, 2022, 11(4): 705-712.  
LI D, MENG J, LIU Y C, et al. Effect of cross-eye jamming on the active-passive composite monopulse radar[J]. Journal of Radars, 2022, 11(4): 705-712. (in Chinese)
- [23] 崔积丰, 徐红青. 舰载分布式无人机电子干扰系统研究[J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(6): 13-18, 26.  
CUI J F, XU H Q. Research into electronic jamming system of shipborne distributed UAV[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2016, 39(6): 13-18, 26. (in Chinese)
- [24] 周治宇, 饶彬, 谢晓霞. 对 LFM-PC 雷达的分布式合成欺骗干扰效果分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(1): 24-29.  
ZHOU Z Y, RAO B, XIE X X. Analysis of the effect on distributed synthetic deception jamming to LFM-PC radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(1): 24-29. (in Chinese)
- [25] 穆富岭, 周经伦, 罗鹏程. 两点源干扰下的反辐射导弹误差距离进一步探讨[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 1665-1668.  
MU F L, ZHOU J L, LUO P C. Further discussion on error distance of ARM disturbed by dual point-source[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 1665-1668. (in Chinese)
- [26] 刘松杨, 董春曦, 董阳阳, 等. 旋转的正交多点源反向交叉眼干扰分析[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(6): 1424-1430.  
LIU S Y, DONG C X, DONG Y Y, et al. Analysis of rotating orthogonal multiple elements retrodirective cross-eye jamming[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(6): 1424-1430. (in Chinese)
- [27] 王彩云, 何志勇, 宫俊. 多干扰机反向交叉眼干扰分析[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1457-1463.

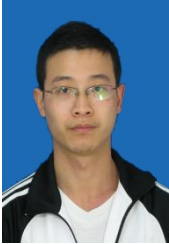
WANG C Y, HE Z Y, GONG J. Analysis of retro-directive cross-eye jamming for multiple elements[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(7): 1457-1463. (in Chinese)

- [28] 周亮, 刘永才, 孟进, 等. 两源交叉眼与多源线阵交叉眼的干扰性能分析[J]. 电子学报, 2021, 49(12): 2289-2298. ZHOU L, LIU Y C, MENG J, et al. Interference performance analysis of two source retro-directive cross-eye jamming and multi-source linear array retro-directive cross-eye jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(12): 2289-2298. (in Chinese)
- [29] 曲志昱, 司锡才, 谢纪岭. 相干源诱偏下比相被动雷达导引头测角性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(5): 824-827. QU Z Y, SI X C, XIE J L. Analysis of phase-comparison

passive-radar-seeker angle measurement with decoy of coherent source[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(5): 824-827. (in Chinese)

- [30] 刘庆云, 黄海涛, 杨新国. 雷达诱饵干扰对单脉冲雷达测角输出随机性的影响[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(2): 26-29. LIU Q Y, HUANG H T, YANG X G. On randomness of indicated angle of monopulse radar jammed by radar decoy[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2017, 33(2): 26-29. (in Chinese)
- [31] 石荣, 刘江. 单脉冲雷达测向与电子侦察测向的模型统一性分析[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(4): 28-32. SHI R, LIU J. Unity analysis on direction finding models for monopulse radar and electronic reconnaissance[J]. Fire Control Radar Technology, 2018, 47(4): 28-32. (in Chinese)

#### 作者简介



汪 兵 男, 1987年6月出生于四川省眉山市. 现为电磁空间安全全国重点实验室高级工程师, 博士. 主要研究方向为雷达信号处理、电子对抗技术.  
E-mail: mbingwang\_1030@163.com



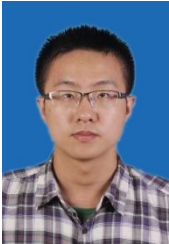
夏碧君 女, 1990年8月出生于四川省内江市. 现为电磁空间安全全国重点实验室高级工程师. 主要研究方向为阵列信号处理、副瓣干扰技术.  
E-mail: xiabijun1990@163.com



杨益川 男, 1988年1月出生于云南省昭通市. 现为电磁空间安全全国重点实验室高级工程师, 博士. 主要研究方向为传感器资源管理技术.  
E-mail: ynztyangyichuan@sina.com



朱 磊 男, 1993年2月出生于四川省泸州市. 现为电磁空间安全全国重点实验室工程师. 主要研究方向为雷达信号处理.  
E-mail: zhulei6@cetc.com.cn



丁 怀 男, 1989年8月出生于安徽省黄山市. 现为电磁空间安全全国重点实验室高级工程师, 博士. 主要研究方向为雷达信号处理、电子对抗技术.  
E-mail: 351019403@qq.com



邓明龙 男, 1994年11月出生于四川省成都市. 现为电磁空间安全全国重点实验室工程师, 博士. 主要研究方向为阵列信号处理.  
E-mail: dengminglong@126.com