

## 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

李栋 孟进\* 刘永才\* 周亮 苏彬彬

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室 武汉 430033)

**摘要:** 交叉眼技术是一种通过相干多点辐射源诱使单脉冲雷达测角偏差的电子对抗技术。面对攻防双方激烈对抗的复杂电磁环境,采用主被动复合单脉冲雷达测角是现代末制导雷达提高抗干扰能力的发展趋势之一。该文以主被动复合单脉冲雷达为干扰对象,建立了交叉眼干扰数学模型,通过对比交叉眼技术对抗主动单脉冲测角和被动单脉冲测角的干扰效果,揭示了交叉眼技术对主被动复合单脉冲雷达的影响机理。该研究成果可为干扰与抗干扰的合理应用提供理论规律和仿真数据。

**关键词:** 电子战; 雷达对抗; 主被动复合雷达; 交叉眼; 单脉冲技术

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2022)04-0705-08

**DOI:** 10.12000/JR22048

**引用格式:** 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. doi: 10.12000/JR22048.

**Reference format:** LI Dong, MENG Jin, LIU Yongcai, *et al.* Effect of cross-eye jamming on the active-passive composite monopulse radar[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(4): 705–712. doi: 10.12000/JR22048.

## Effect of Cross-eye Jamming on the Active-passive Composite Monopulse Radar

LI Dong MENG Jin\* LIU Yongcai\* ZHOU Liang SU Binbin

(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Cross-eye jamming is an electronic countermeasure technology used to cause angular deviation of monopulse radar via multiple coherent sources. Despite a complex electromagnetic environment, using active-passive composite monopulse radar is a development trend for improving the anti-interference ability of modern terminal guidance radar. A mathematical model of cross-eye jamming considering the active-passive composite monopulse radar is established. The influence mechanism of cross-eye jamming on the active-passive composite monopulse radar is revealed by comparing the effect of active and passive monopulse radar systems on angle measurement. Furthermore, the results can provide theoretical guidance and simulation data to reasonably apply Electronic Countermeasures (ECMs) and Electronic Counter-Countermeasures (ECCMs).

**Key words:** Electronic warfare; Radar countermeasure; Active-passive composite radar; Cross-eye jamming; Monopulse technique

收稿日期: 2022-03-20; 改回日期: 2022-06-16; 网络出版: 2022-07-08

\*通信作者: 孟进 mengjinemc@163.com; 刘永才 leo\_nudt@163.com

\*Corresponding Authors: MENG Jin, mengjinemc@163.com; LIU Yongcai, leo\_nudt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(62001498)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62001498)

责任编辑: 陈伯孝 Corresponding Editor: CHEN Baixiao

### 1 引言

单脉冲测角技术利用和差波束测量目标角度,具有较强的抗干扰能力,广泛应用于现代末制导雷达<sup>[1,2]</sup>。针对单脉冲雷达的电子对抗技术是电子战领域的重、难点问题之一<sup>[3]</sup>。交叉眼技术利用近似等幅反向的两点或多点辐射源人为地制造角闪烁现象,对单脉冲雷达形成角度维干扰<sup>[4-6]</sup>,是对抗单脉冲雷达的电子对抗技术之一。

现有文献普遍将主动或被动单脉冲雷达作为相

互独立的两个研究对象<sup>[7-9]</sup>, 分别研究交叉眼技术对二者之一的干扰效果。交叉眼技术的早期研究主要以角闪烁理论<sup>[10,11]</sup>为基础, 采用线性拟合<sup>[12]</sup>等方法对单一雷达干扰场景进行近似建模。文献<sup>[13-18]</sup>从反向天线结构的角度出发, 对主动单脉冲雷达测角的交叉眼干扰效果进行了严谨的数学推导, 其中, 文献<sup>[17]</sup>对主动雷达信号和干扰信号传播等全过程建模并提出了扩展分析法, 文献<sup>[18]</sup>利用扩展分析法进一步完善了目标回波下的干扰模型。文献<sup>[19]</sup>针对两个相干辐射源对被动单脉冲雷达测角的干扰效果进行了建模分析。

现代战场电磁环境复杂多变, 末制导雷达的抗干扰性能面临更高的要求。主被动复合制导技术是末制导雷达提升抗干扰性能的发展趋势之一<sup>[20,21]</sup>, 能实现主动模式和被动模式的性能互补, 获得更优越的抗干扰性能。当主被动复合制导技术的两种模式并行工作时, 交叉眼干扰机接收主动雷达发射信号, 经调制和转发后形成的干扰信号可同时对主动雷达和被动雷达产生影响。传统交叉眼干扰理论已不能准确描述针对主被动复合单脉冲雷达的干扰过程。为了揭示交叉眼技术对主被动复合单脉冲雷达的干扰效能, 亟需将主动单脉冲雷达和被动单脉冲雷达视为一个整体。

本文以主被动复合单脉冲雷达为干扰对象, 建立了交叉眼干扰数学模型, 简要回顾了交叉眼技术干扰主动单脉冲测角的精确分析方法和近似分析方法, 讨论了交叉眼技术干扰被动单脉冲测角的精确分析方法和近似分析方法, 分析了干扰效果的影响因素。结合仿真分析, 对比交叉眼技术对抗主动单脉冲测角和被动单脉冲测角的干扰效果, 揭示各种影响因素对主被动复合雷达测角的影响机理。该研究成果旨在为干扰与抗干扰的合理应用提供理论规律和仿真数据。

## 2 研究场景描述

反向交叉眼干扰被认为是一种能够克服严苛的幅相误差容限、走向实用化的技术方案<sup>[3]</sup>。本文重点研究反向交叉眼技术, 暂不考虑非反向交叉眼技术<sup>[13]</sup>。

主被动复合制导主要有同控式<sup>[21]</sup>和切换式<sup>[22]</sup>两种。切换式主被动复合雷达主动测角受干扰后可切换至被动测角, 交叉眼干扰机在未接收到雷达发射信号的情况下保持静默, 可避免成为信标。因此, 本文主要研究同控式主被动复合单脉冲雷达(下文简称主被动复合雷达)在主动测角和被动测角并行工作时的场景, 此时交叉眼干扰信号可同时作用于

两种测角模式。

主动单脉冲雷达指向性强、探测精度高<sup>[21]</sup>, 其天线波束范围较窄; 被动单脉冲雷达覆盖范围广、作用距离远, 其天线波束范围较宽。本文假设主被动复合雷达分别采用和差波束比相法<sup>[17]</sup>和干涉仪侧向原理<sup>[23]</sup>实现主动单脉冲测角和被动单脉冲测角。

图1为主被动复合雷达的交叉眼干扰场景模型, 其中, 交叉眼干扰机位于雷达天线的远场<sup>[17]</sup>。主动单脉冲雷达天线和被动单脉冲雷达天线分别由黄色圆形和蓝色三角形表示, 假设两者处于同一平面, 且孔径间距分别为 $d_{r1}$ 和 $d_{r2}$ , 并假设 $d_{r2} < d_{r1}$ 。 $r$ 为干扰距离,  $d_c$ 为干扰机天线基线长度,  $\theta_r$ 为雷达视轴方向(图中橙色虚线箭头方向)相对于交叉眼干扰机中心的转角(简称雷达视角),  $\theta_e$ 为交叉眼干扰机视轴相对于雷达天线基线中心的转角,  $\theta_s$ 为交叉眼天线相对于雷达天线基线中心的半张角(简称半张角),  $\theta_i$ 为雷达指示角,  $\theta_s$ 为雷达测角偏差。如图1所示, 当交叉眼干扰机中心位于雷达视轴方向上方时, 定义 $\theta_r > 0^\circ$ 。反之,  $\theta_r < 0^\circ$ 。

## 3 主动测角模式干扰效果分析

关于交叉眼技术对主动测角模式的干扰效果可利用现有研究成果进行分析, 主要包括扩展分析法<sup>[17]</sup>和线性拟合法<sup>[12]</sup>, 简要介绍如下。

### 3.1 精确分析

扩展分析法<sup>[17]</sup>指出, 在不考虑目标回波的情况下, 和差波束比相单脉冲测角法所得雷达指示角 $\theta_i$ 可表示为

$$\tan \left[ \beta \frac{d_{r1}}{2} \sin(\theta_i) \right] = \frac{\sin(2k_{s1}) + \sin(2k_{c1}) G_C}{\cos(2k_{s1}) + \cos(2k_{c1})} \quad (1)$$

其中,  $\beta = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$ 为雷达信号的波长, 并且

$$k_{s1} = \beta \frac{d_{r1}}{2} \sin(\theta_r) \cos(\theta_e) \quad (2)$$

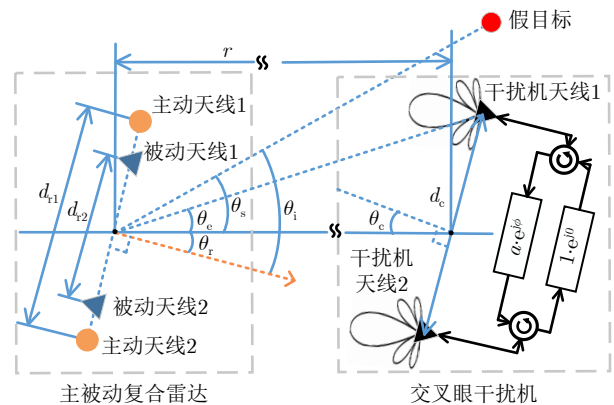


图 1 主被动复合雷达干扰场景模型

Fig. 1 The jamming model of active-passive composite radar

$$k_{c1} = \beta \frac{d_{r1}}{2} \cos(\theta_r) \sin(\theta_e) \quad (3)$$

$G_C$ 定义为交叉眼增益(本文称 $G_C$ 为主动交叉眼增益,以示区分)。假设交叉眼干扰机的幅值比 $a$ 和相位差 $\phi$ ,则

$$G_C = \frac{1 - a^2}{1 + a^2 + 2a \cos(\phi)} \quad (4)$$

### 3.2 近似分析

当交叉眼干扰机处于雷达视轴附近时,雷达视轴 $\theta_r$ 和半张角 $\theta_e$ 都很小,则式(1)可化简为

$$\theta_i \approx \theta_r + \theta_e G_C \quad (5)$$

该方法所得近似解与线性拟合法所得近似解一致<sup>[13]</sup>。根据图1关系可知,主动雷达测角偏差 $\theta_s$ 约为 $\theta_e G_C$ 。

## 4 被动测角模式干扰效果分析

为了准确描述交叉眼技术对被动测角的干扰过程,4.1节首先根据“接收-调制-转发”过程对干扰信号进行建模;4.2节基于干涉仪测向法对被动

单脉冲雷达指示角精确分析;4.3节利用近似求解法对被动单脉冲雷达指示角进一步简化,并进行有效性验证。

### 4.1 干扰信号建模

根据图1干扰场景可知,交叉眼干扰机天线1和天线2与雷达视轴夹角 $\theta_r + \theta_e$ 和 $\theta_r - \theta_e$ 可近似等于干扰机两天线与雷达天线沿雷达视轴方向的夹角。假设主被动复合雷达在主动测角模式下的发射信号为 $A_0 P_a(\theta)$ ,其中, $A_0$ 是发射信号功率, $P_a(\theta)$ 是主动雷达天线方向图。交叉眼干扰机天线1和天线2方向上的雷达信号分别为 $A_0 P_a(\theta_r + \theta_e)$ 和 $A_0 P_a(\theta_r - \theta_e)$ 。

交叉眼干扰机对上述雷达信号接收、调制和转发,天线1和天线2发射的干扰信号 $J_1$ 和 $J_2$ 分别为

$$J_1 = A_0 P_a(\theta_r - \theta_e) P_c(\theta_c - \theta_e) P_c(\theta_c + \theta_e) \quad (6)$$

$$J_2 = a e^{j\phi} A_0 P_a(\theta_r + \theta_e) P_c(\theta_c + \theta_e) P_c(\theta_c - \theta_e) \quad (7)$$

其中, $P_c(\theta)$ 是交叉眼干扰机天线方向图。因此,由被动雷达天线1和天线2接收后的信号分别为

$$\begin{aligned} S_1 &= J_1 e^{-j\beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r + \theta_e)} P_p(\theta_r + \theta_e) + J_2 e^{-j\beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r - \theta_e)} P_p(\theta_r - \theta_e) \\ &= A_0 P_a(\theta_r - \theta_e) P_c(\theta_c - \theta_e) P_c(\theta_c + \theta_e) P_p(\theta_r + \theta_e) \\ &\quad \times \left( e^{-j\beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r + \theta_e)} + a \frac{P_a(\theta_r + \theta_e) P_p(\theta_r - \theta_e)}{P_a(\theta_r - \theta_e) P_p(\theta_r + \theta_e)} e^{j\phi} e^{-j\beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r - \theta_e)} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S_2 &= J_1 e^{j\beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r + \theta_e)} P_p(\theta_r + \theta_e) + J_2 e^{j\beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r - \theta_e)} P_p(\theta_r - \theta_e) \\ &= A_0 P_a(\theta_r - \theta_e) P_c(\theta_c - \theta_e) P_c(\theta_c + \theta_e) P_p(\theta_r + \theta_e) \\ &\quad \times \left( e^{j\beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r + \theta_e)} + a \frac{P_a(\theta_r + \theta_e) P_p(\theta_r - \theta_e)}{P_a(\theta_r - \theta_e) P_p(\theta_r + \theta_e)} e^{j\phi} e^{j\beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r - \theta_e)} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $P_p(\theta)$ 是被动雷达天线方向图。

### 4.2 精确分析

被动单脉冲雷达的干涉仪测向原理如图2所示,天线1和天线2将所接收信号送至鉴相器进行比相,利用接收信号相位差 $\phi_{21}$ 可得雷达指示角 $\theta_i$ 为

$$\theta_i = \arcsin \left( \frac{\phi_{21}}{\beta d} \right) \quad (10)$$

根据式(8)和式(9),被动雷达两天线接收的干扰信号相位差 $\phi_{21}$ 为

$$\tan(\phi_{21}) = \frac{\text{Im} \left( \frac{S_2}{S_1} \right)}{\text{Re} \left( \frac{S_2}{S_1} \right)} = \frac{b^2 \sin(2k_{s2} - 2k_{c2}) + 2b \cos(\phi) \sin(2k_{s2}) + \sin(2k_{s2} + 2k_{c2})}{b^2 \cos(2k_{s2} - 2k_{c2}) + 2b \cos(\phi) \cos(2k_{s2}) + \cos(2k_{s2} + 2k_{c2})} \quad (11)$$

其中,定义 $b$ 为复合幅值比, $p_a$ 和 $p_p$ 分别为主动增益比和被动增益比,存在如下关系

$$b = a p_a p_p = a \frac{P_a(\theta_r + \theta_e) P_p(\theta_r - \theta_e)}{P_a(\theta_r - \theta_e) P_p(\theta_r + \theta_e)} \quad (12)$$

且

$$p_a = \frac{P_a(\theta_r + \theta_e)}{P_a(\theta_r - \theta_e)} \quad p_p = \frac{P_p(\theta_r - \theta_e)}{P_p(\theta_r + \theta_e)} \quad (13)$$

联合式(10)和式(11),被动雷达指示角 $\theta_i$ 为

$$\tan[\beta d_{r2} \sin(\theta_i)] = \tan(\phi_{21}) = \frac{b^2 \sin(2k_{s2} - 2k_{c2}) + 2b \cos(\phi) \sin(2k_{s2}) + \sin(2k_{s2} + 2k_{c2})}{b^2 \cos(2k_{s2} - 2k_{c2}) + 2b \cos(\phi) \cos(2k_{s2}) + \cos(2k_{s2} + 2k_{c2})} \quad (14)$$

其中

$$k_{s2} = \beta \frac{d_{r2}}{2} \sin(\theta_r) \cos(\theta_e) \quad (15)$$

$$k_{c2} = \beta \frac{d_{r2}}{2} \cos(\theta_r) \sin(\theta_e) \quad (16)$$

由于式(14)形式较为复杂且影响因素众多,难以直观揭示被动雷达指示角的一般规律。因此,下文对式(14)进行近似处理,以便简化分析。

### 4.3 近似分析

假设式(14)中所有三角函数角度值均较小,即  $\sin(2k_{s2}) \rightarrow 2k_{s2}$ ,  $\cos(2k_{s2}) \rightarrow 1$ ,  $\sin(2k_{s2} + 2k_{c2}) \rightarrow 2k_{s2} + 2k_{c2}$ ,  $\cos(2k_{s2} - 2k_{c2}) \rightarrow 1$ ,  $\cos(2k_{s2} + 2k_{c2}) \rightarrow 1$ ,  $\sin(2k_{s2} - 2k_{c2}) \rightarrow 2k_{s2} - 2k_{c2}$ , 且  $\tan(\beta d_{r2} \sin(\theta_i)) \rightarrow \beta d_{r2} \theta_i$ , 其中符号  $\rightarrow$  表示趋近, 可得  $\theta_i$  的近似表达式为

$$\theta_i \approx \theta_r + \frac{1 - b^2}{b^2 + 2b \cos(\phi) + 1} \theta_e = \theta_r + G_P \theta_e \quad (17)$$

其中, 定义  $G_P$  为被动交叉眼增益, 且

$$G_P = \frac{1 - b^2}{1 + b^2 + 2b \cos(\phi)} \quad (18)$$

根据图1关系可得, 被动雷达测角偏差  $\theta_s$  约为  $\theta_e G_P$ 。

该近似分析成立基于如下假设: 干扰距离远大于干扰机天线间距 ( $r \gg d_c$ ), 即  $\theta_e$  远小于 1 弧度; 干扰机位于雷达视轴附近, 即  $\theta_r$  远小于 1 弧度; 雷达指示角  $\theta_i$  较小。这意味着近似分析在雷达视轴偏离干扰机或较大指示角度等情况下的准确性不能保证。因此, 为验证上述分析准确性, 并确定其适用场景, 绘制被动雷达指示角  $\theta_i$  曲线如图3所示, 其中  $\theta_i$  的精确解和近似解分别由式(14)和式(17)解得, 且分别用实线和星号表示。图3干扰场景及参数设置与5.2节相同, 在此不再赘述。

分析图3可知: (1) 近似简化后的被动模式雷达指示角  $\theta_i$  与精确解基本吻合。该结果表明对  $\theta_i$  的简化分析不局限于雷达正对干扰机, 也可适用于雷达视轴偏离干扰机(如雷达视角  $\theta_r$  在  $\pm 15^\circ$  范围内时)或较大指示角度(如  $\theta_i$  在  $\pm 15^\circ$  范围内时), 同时可说明利用被动交叉眼增益  $G_P$  描述被动测角模式干扰效果的可行性; (2) 当复合幅值比  $b$  越趋近于 1 且相位差  $\phi$  越趋近  $180^\circ$  时, 被动雷达测角偏差  $\theta_s$  越大, 干扰效果越明显。

## 5 主被动复合测角干扰效果对比分析

5.1节对主动测角和被动测角干扰效果的影响

因素归纳和对比, 5.2节通过典型案例仿真, 进一步揭示各因素对主被动复合雷达测角的影响机理。

### 5.1 干扰效果的影响因素分析

由式(1)和式(17)可知, 当主被动复合雷达与交叉眼干扰机相对位置确定时, 主动模式雷达指示角主要取决于  $G_C$ , 被动模式雷达指示角主要取决于  $G_P$ 。这意味着利用交叉眼增益描述主被动复合雷达测角干扰效果是可行的。

由式(4)可知,  $G_C$  仅由幅值比  $a$ 、相位差  $\phi$  决定, 因此控制干扰信号近似等幅反向可使主动模式产生测角偏差。与  $G_C$  不同, 被动交叉眼增益  $G_P$  除了受  $a, \phi$  影响外, 还与主动增益比  $p_a$  和被动增益比  $p_p$  存在非线性关系。 $p_a$  的物理含义为主动雷达天线在交叉眼干扰机天线1和天线2方向上 ( $\theta_r \pm \theta_e$ ) 的增益比;  $p_p$  的物理含义为被动雷达天线在交叉眼干扰机天线2和天线1方向上 ( $\theta_r \mp \theta_e$ ) 的增益比。由于被动干涉仪天线波束宽度一般远大于主动雷达天线波束宽度, 假设被动干涉仪天线在干扰机两天线方向上的增益近似相同, 即  $p_p = 1$ , 只考虑主动雷达天线在干扰机天线1和天线2的方向上的增益  $P_a(\theta_r \pm \theta_e)$

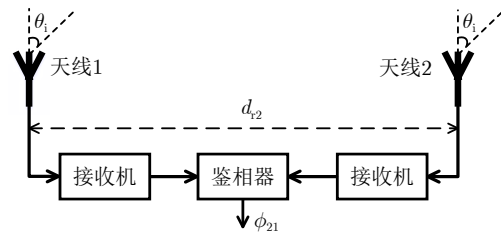


图 2 干涉仪测向示意图

Fig. 2 Diagram of interferometer

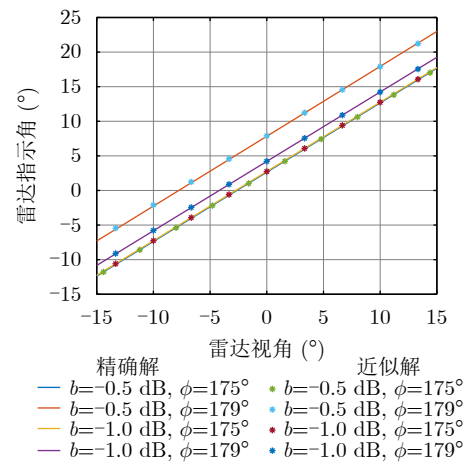


图 3 被动雷达指示角  $\theta_i$  的近似解验证

Fig. 3 Verification of approximate solution of  $\theta_i$  for passive radar



对干扰效能的影响。在  $P_a(\theta)$  形式确定的条件下,  $p_a$  仅由  $\theta_r$  和  $\theta_e$  决定。由图1中关系可知, 半张角  $\theta_e$  为

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{d_c \cos(\theta_c)}{2r + d_c \sin(\theta_c)}\right) \quad (19)$$

由式(19)可知,  $\theta_e$  与干扰距离  $r$  相关。

综上所述, 除交叉眼幅值比  $a$ 、相位差  $\phi$  以外, 干扰距离  $r$ 、雷达视角  $\theta_r$  是影响主被动复合测角干扰效果的重要因素。

### 5.2 仿真分析

结合5.1节分析, 利用高斯函数对主动雷达天线方向图  $P_a(\theta)$  进行建模, 以期达到  $P_a(\theta_r \pm \theta_e)$  随  $\theta_r$  或  $r$  变化的目的, 从而揭示  $\theta_r$  和  $r$  对干扰效果的影响机理。

参考文献[13], 本文设置仿真参数如下: 主被动复合单脉冲雷达工作在X波段, 主动雷达天线孔径间距  $d_{r1} = 2.54\lambda$ , 被动雷达天线孔径间距  $d_{r2} = 0.5\lambda$ , 干扰距离  $r$  为1 km, 交叉眼干扰机天线基线长度  $d_c$  为10 m, 干扰机视轴相对于雷达基线中心的转角  $\theta_c$  为  $30^\circ$ 。

#### 5.2.1 不同雷达视角下的干扰参数容限

雷达视角  $\theta_r$  的方向决定主动雷达天线在干扰机天线1的方向上的增益  $P_a(\theta_r + \theta_e)$  和天线2的方向上的增益  $P_a(\theta_r - \theta_e)$  间的相对关系, 从而决定雷达主动增益比  $p_a$  大于、小于或等于1, 例如图1中  $\theta_r > 0$  时,  $P_a(\theta_r + \theta_e) < P_a(\theta_r - \theta_e)$ ,  $p_a < 1$ 。

为进一步分析雷达视角对主被动复合雷达测角的参数容限的影响, 考虑交叉眼干扰机位于雷达视轴方向上方、正对、下方3种典型场景, 分别对应雷达视角  $\theta_r$  大于0、等于0、小于0。取  $p_a$  为0.8, 1.0和1.2分别代表上述3种场景, 作交叉眼增益等高线图如图4所示。

分析图4可知: (1)  $G_P$  与  $G_C$  等高线图类似, 均

为近似椭圆曲线, 且均能达到一定的干扰效果。例如, 要实现大于等于4的增益, 则应控制  $a$  和  $\phi$  在最外侧等高线内; (2) 不同的是,  $G_C$  不随  $\theta_r$  变化, 而  $G_P$  对应的幅值比  $a$  的容限范围随着  $\theta_r$  的改变会上、下平移。原因在于: 由5.1节分析可知,  $G_C$  仅与  $a$  和  $\phi$  相关, 而  $G_P$  除了与  $a$  和  $\phi$  相关外, 还受  $\theta_r$  影响, 具体表现为  $b \rightarrow 1$  且  $\phi \rightarrow \pi$  时, 干扰效能最优, 由式(12)可知, 为保持  $b \rightarrow 1$ ,  $a$  需补偿  $p_a$  引起的变化。(3) 当干扰机中心正对主被动雷达视轴时,  $p_p = 1$  且  $p_a = 1$ , 此时  $G_C$  与  $G_P$  相等, 交叉眼干扰对主动单脉冲雷达测角和被动单脉冲雷达测角的干扰效果相同。

#### 5.2.2 不同雷达视角下的交叉眼增益

设置  $\phi$  为  $179^\circ$ ,  $a$  分别为 -2 dB, -1 dB 和 -0.5 dB, 被动交叉眼增益  $G_P$  和主动交叉眼增益  $G_C$  分别如图5(a)实线和点划线所示, 其中  $G_C$  为定值, 分别为 8.7, 17.0, 31.8; 设置  $a$  为 -0.5 dB,  $\phi$  分别为  $175^\circ$ ,  $177^\circ$ ,  $179^\circ$ ,  $G_P$  和  $G_C$  分别如图5(b)实线和点划线所示, 其中  $G_C$  为定值, 分别为 10.5, 19.0, 31.8。

分析可知: (1) 与  $G_C$  为定值的情况不同,  $G_P$  随着  $\theta_r$  的变化存在波动, 尤其是当  $G_P = 0$  时,  $\theta_r$  的微小变化会引起  $G_P$  剧烈变化。以  $a$  为 -0.5 dB,  $\phi$  为  $179^\circ$  为例, 当  $\theta_r$  约为  $-2.3^\circ$ ,  $G_P$  为0, 雷达趋向目标方向移动, 一旦  $\theta_r$  变化,  $G_P$  剧烈变化, 造成雷达指示偏差。(2)  $G_P$  反向时对应的  $\theta_r$  仅与  $a$  有关。具体表现为  $a$  越趋近于 0 dB,  $G_P$  反向时对应的雷达视角  $\theta_r$  越趋近于  $0^\circ$ 。也就是说, 干扰信号幅值越一致, 雷达视轴中心或附近对应的被动测角偏差变化越剧烈, 导致雷达无法正常测向。(3)  $\phi$  越趋近  $180^\circ$ , 由黄色局部图可以看出  $G_P$  位于两虚线之间时对应的雷达视角的范围越小, 且  $G_P$  反向变化越剧烈, 对应的干扰效果越好。

综上, 结合以上仿真分析可知, 给定交叉眼幅

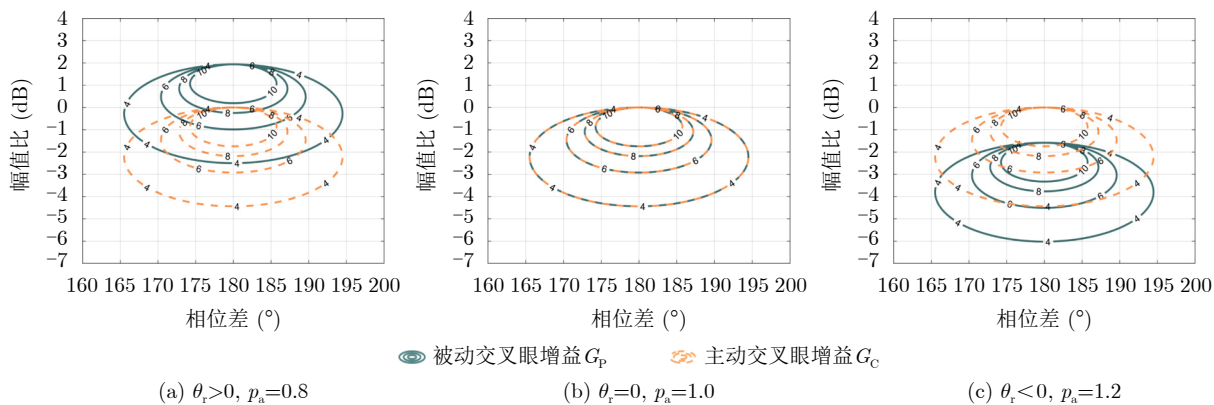


图4 不同雷达视角  $\theta_r$  下的交叉眼增益等高线  
Fig. 4 Contours of cross-eye gain at different  $\theta_r$

值比 $a$ 和相位差 $\phi$ 后,主动交叉眼增益为定值,而被动交叉眼增益随雷达视角而改变。动态作战场景下,干扰信号越趋近于等幅反向,被动测角偏差在雷达视轴附近时变化越剧烈,直接影响雷达信息融合与决策,进而导致雷达失准。

### 5.2.3 不同干扰距离下交叉眼增益

取 $a$ 为 $-1$  dB,  $\phi$ 为 $179^\circ$ , 绘制不同 $r$ 下的交叉眼增益曲线如图6所示, 其中 $G_C$ 和 $G_P$ 分别用点划线和实线表示。

当雷达视角在 $\pm 15^\circ$ 范围内时, 与 $r$ 为 $1$  km时 $G_C$ 和 $G_P$ 存在明显差异不同, 当 $r$ 为 $20$  km时,  $G_P \approx G_C$ 。该现象原因为:

(1) 当 $r$ 较远时(例如 $r$ 为 $20$  km),  $\theta_e$ 趋近于零, 主动雷达天线在干扰机两天线方向上的增益近似相等,  $p_a$ 近似为定值 $1$ , 此时 $G_P \approx G_C$ , 交叉眼对主被动复合雷达测角可形成较为稳定的测角误差。

(2) 缩小 $r$ (例如 $r$ 为 $1$  km),  $\theta_e$ 增大。当主动雷达天线在干扰机两天线方向上增益的差异不可忽略时,  $p_a$ 随雷达视角 $\theta_r$ 变化, 此时 $G_P$ 随 $\theta_r$ 变化, 交叉眼对主

动和被动两种测角模式下的干扰效果存在明显差异, 被动测角偏差随雷达天线指向改变且存在剧烈变化。

### 5.2.4 主被动雷达指示角对比分析

取 $a$ 为 $-1$  dB,  $\phi$ 为 $179^\circ$ , 绘制主被动雷达指示角如图7所示, 其中式(1)所得主动雷达指示角和式(14)所得被动雷达指示角分别用点划线和实线表示, 红色虚线代表雷达指示角与雷达视角相等, 即雷达未受干扰正常指向时的情况。

经分析可知, 当雷达视角在 $\pm 15^\circ$ 范围内时, 在上述幅相参数下, 交叉眼技术对主被动雷达均能造成一定的干扰:

(1) 主动雷达指示角偏差最大可达 $20^\circ$ , 且指示角 $\theta_i$ 恒不为 $0^\circ$ , 即主动雷达不能锁定目标;  $\theta_i$ 在雷达视角约为 $\pm 11^\circ$ 时存在反向变化, 是由于主动天线第一波束零点引起的<sup>[13]</sup>。

(2) 被动雷达指示角偏差最大可达 $15^\circ$ , 且存在反向剧烈变化, 尤其是当指示角 $\theta_i$ 为 $0$ 时,  $\theta_i$ 的微小变化会引起 $\theta_r$ 剧烈变化, 从而影响雷达决策。

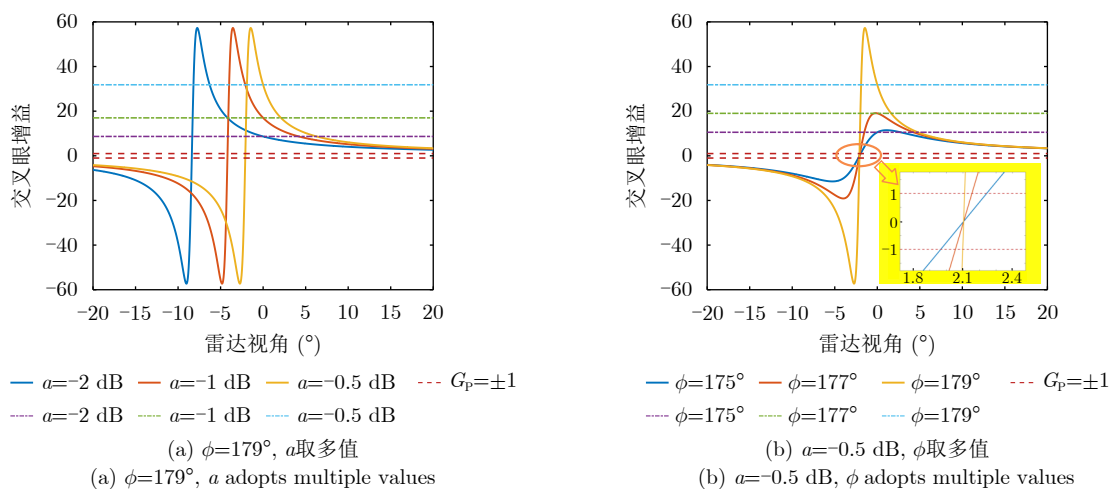


图 5 交叉眼增益随雷达视角 $\theta_r$ 变化

Fig. 5 Variation of cross-eye gain with  $\theta_r$

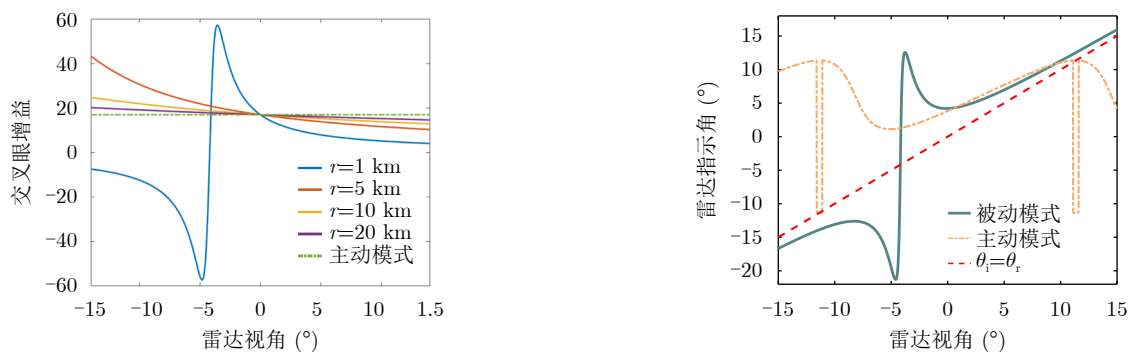


图 6 不同干扰距离 $r$ 下的干扰效果对比

Fig. 6 Comparison of jamming effects at different  $r$

图 7 主被动雷达指示角 $\theta_i$ 对比

Fig. 7 Comparison of active and passive radar indicating angles  $\theta_i$

## 6 结论

本文以主被动复合单脉冲雷达为干扰对象,建立了交叉眼干扰数学模型,对比分析了交叉眼干扰技术对主动单脉冲雷达测角和被动单脉冲雷达测角的干扰效果。理论推导和仿真分析表明:

(1) 交叉眼技术对主被动雷达均可达到一定的欺骗效果,且随着干扰距离减小,欺骗效果差异变大。以交叉眼幅值比为 $-1$  dB、相位差为 $179^\circ$ 为例,当雷达天线在 $\pm 15^\circ$ 范围内扫描时,主动雷达指示角恒不为 $0^\circ$ ,进而导致雷达失锁;被动雷达指示角随雷达指向存在反向剧烈变化,难以形成稳定测向。

(2) 被动雷达测角偏差随雷达视角波动现象是由不同雷达视角对应天线方向增益的差异导致的。在雷达视轴正对干扰机条件下,交叉眼技术对主动测角和被动测角干扰效果相同。

(3) 干扰信号越趋近于等幅反向,雷达视轴附近的被动测角偏差变化越剧烈,干扰成功率越高。

## 参 考 文 献

- [1] LEE S H, LEE S J, CHOI I O, *et al.* ICA-based phase-comparison monopulse technique for accurate Angle estimation of multiple targets[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(3): 323–331. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0156](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0156).
- [2] SHERMAN S M and BARTON D K. Monopulse Principles and Techniques[M]. Boston, London: Artech House Publishers, 2011: 1–13.
- [3] 刘天鹏, 魏玺章, 刘振, 等. 交叉眼干扰研究综述[J]. *雷达学报*, 2019, 8(1): 140–153. doi: [10.12000/JR19013](https://doi.org/10.12000/JR19013).  
LIU Tianpeng, WEI Xizhang, LIU Zhen, *et al.* Overview of cross-eye jamming research[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 140–153. doi: [10.12000/JR19013](https://doi.org/10.12000/JR19013).
- [4] FALK L. Cross-eye jamming of monopulse radar[C]. International Waveform Diversity and Design Conference, Pisa, Italy, 2007: 209–213.
- [5] NERI F. Anti-monopulse jamming techniques[C]. 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Belem, Brazil, 2001: 45–50.
- [6] NERI F. Introduction to Electronic Defense Systems[M]. Boston, London: Artech House, 2006: 373–487.
- [7] 刘天鹏. 多源反向交叉眼干扰技术研究[D]. [博士论文], 国防科技大学, 2016: 34–38.  
LIU Tianpeng. Research on multiple-element retrodirective cross-eye jamming[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2016: 34–38.
- [8] LIU Tianpeng, LIAO Dongping, WEI Xizhang, *et al.* Performance analysis of multiple-element retrodirective cross-eye jamming based on linear array[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(3): 1867–1876. doi: [10.1109/TAES.2015.140035](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140035).
- [9] LIU Songyang, DONG Chunxi, XU Jin, *et al.* Analysis of rotating cross-eye jamming[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 939–942. doi: [10.1109/LAWP.2014.2387423](https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2387423).
- [10] STRATAKOS Y, GEROULIS G, and UZUNOGLU N. Analysis of glint phenomenon in a monopulse radar in the presence of skin echo and non-ideal interferometer echo signals[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2005, 19(5): 697–711. doi: [10.1163/1569393053305008](https://doi.org/10.1163/1569393053305008).
- [11] DUNN J H, HOWARD D D, and KING A M. Phenomena of scintillation noise in radar-tracking systems[J]. *Proceedings of the IRE*, 1959, 47(5): 855–863. doi: [10.1109/JRPROC.1959.287280](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1959.287280).
- [12] SHERMAN S M. Complex indicated angles applied to unresolved radar targets and multipath[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, AES-7(1): 160–170. doi: [10.1109/TAES.1971.310264](https://doi.org/10.1109/TAES.1971.310264).
- [13] DU PLESSIS W P. A comprehensive investigation of retrodirective cross-eye jamming[D]. [Ph. D. dissertation], University of Pretoria, 2010: 20–95.
- [14] DU PLESSIS W P, ODENDAAL J W, and JOUBERT J. Experimental simulation of retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 734–740. doi: [10.1109/TAES.2011.5705704](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5705704).
- [15] DU PLESSIS W P, ODENDAAL J W, and JOUBERT J. Tolerance analysis of cross-eye jamming systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 740–745. doi: [10.1109/TAES.2011.5705705](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5705705).
- [16] 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. doi: [10.11999/JEIT150919](https://doi.org/10.11999/JEIT150919).  
LIU Songyang, DONG Chunxi, DONG Yangyang, *et al.* Analysis of rotating orthogonal multiple elements retrodirective cross-eye jamming[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(6): 1424–1430. doi: [10.11999/JEIT150919](https://doi.org/10.11999/JEIT150919).
- [17] PLESSIS W P D, ODENDAAL J W, and JOUBERT J. Extended analysis of retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(9): 2803–2806. doi: [10.1109/TAP.2009.2027353](https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2027353).
- [18] DU PLESSIS W P. Platform skin return and retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 490–501. doi: [10.1109/TAES.2012.6129650](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6129650).
- [19] 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.

doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.05.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.05.012).

QU Zhiyu, SI Xicai, and XIE Jiling. Analysis of phase-comparison passive-radar-seeker angle measurement with decoy of coherent source[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(5): 824-827. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.05.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.05.012).

[20] 高烽. 雷达导引头概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 303-323.

GAO Feng. Introduction to Radar Seeker[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 303-323.

[21] 王卫, 陆伟宁, 唐莽, 等. 主被动复合体制反舰导弹导引头干扰技术研究[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(6): 18-22. doi: [10.16328/j.htdz8511.2020.06.004](https://doi.org/10.16328/j.htdz8511.2020.06.004).

WANG Wei, LU Weining, TANG Mang, et al. Jamming technology for the active-passive anti-ship missile seeker[J].

*Aerospace Electronic Warfare*, 2020, 36(6): 18-22. doi: [10.16328/j.htdz8511.2020.06.004](https://doi.org/10.16328/j.htdz8511.2020.06.004).

[22] 李相平, 李世忠, 张刚, 等. 反舰导弹毫米波主被动复合制导导引头设计探讨[J]. 现代电子技术, 2008, 31(3): 43-45. doi: [10.3969/j.issn.1004-373X.2008.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-373X.2008.03.014).

LI Xiangping, LI Shizhong, ZHANG Gang, et al. Passive compound guidance detection unit design study of certain mould air to ship missile seeker[J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, 31(3): 43-45. doi: [10.3969/j.issn.1004-373X.2008.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-373X.2008.03.014).

[23] 陈涛, 郭立民, 潘大鹏, 等. 被动雷达宽带数字接收机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021: 117-128.

CHEN Tao, GUO Limin, PAN Dapeng, et al. Passive Radar Broadband Digital Receiver Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021: 117-128.

### 作者简介



李 栋(1997-), 男, 山东潍坊人, 博士生。2020年在西安理工大学电子信息学院获得学士学位。主要研究方向为电子对抗。



周 亮(1989-), 男, 湖北黄冈人, 博士。现为海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室助理研究员。主要研究方向为电子对抗。



孟 进(1977-), 男, 河南南阳人, 博士生导师。2006年在海军工程大学电气工程学院获得博士学位, 现为海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室教授。主要研究方向为电磁攻防。目前已发表论文160余篇, 出版著作2部,



苏彬彬(1990-), 男, 山东滨州人。2020年获英国兰卡斯特大学计算机与通信学院博士学位, 现为海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室助理研究员。主要研究方向为电子对抗。

专利40余项。以主要完成人获国家科技进步奖等10项。国家杰出青年基金获得者, 入选国家“万人计划”科技创新领军人才、国家百千万人才工程。获求是杰出青年实用工程奖/成果转化奖、国务院政府特殊津贴专家等学术荣誉。



刘永才(1988-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士。2017年在国防科技大学电子科学与工程学院获得博士学位, 现任海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室助理研究员。主要研究方向为电子对抗。

(责任编辑: 于青)