

考虑目标回波的两点源反向交叉眼干扰建模

周亮* 孟进 吴灏 刘永才 刘伟

(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: 单脉冲雷达广泛用于导弹末制导以对飞机、舰船目标实施精确打击。针对单脉冲雷达抗干扰性强的特点,该文采用交叉眼对单脉冲雷达进行干扰,在考虑交叉眼的反向天线结构下,基于雷达方程、单脉冲雷达测角原理,以比相单脉冲雷达为干扰对象,对隔离目标回波和考虑目标回波下的两点源反向交叉眼干扰进行建模,基于线性拟合的分析方法得到了两点源反向交叉眼参数与单脉冲雷达指示角的一般性公式。并通过案例仿真探讨了干扰机功率、信号相位差、信号幅值比及目标回波相位等参数对单脉冲雷达角度欺骗效果的影响。结果表明:干扰机发射的两路信号相位差越接近 180° ,幅值比越接近1,干扰机对单脉冲雷达角度欺骗效果越好;在JSR(干信比)为10~25 dB之间时,随着干扰机功率的增大,相同干扰效果下干扰机参数容限越宽松;受目标回波相位变化影响,两点源交叉眼干扰效果不稳定;数学模型与单脉冲雷达接收机仿真模型结果一致。该文研究可为飞机、舰船搭载反向交叉眼干扰机设计提供参考。

关键词: 单脉冲雷达; 反向交叉眼; 干扰机; 角度欺骗; 干信比; 线性拟合分析

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)04-0816-06

DOI: 10.11999/JEIT180482

Interference Modeling of Two Point Source Retrodirective Cross-eye Considering Target Echo

ZHOU Liang MENG Jin WU Hao LIU Yongcai LIU Wei

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

Abstract: In view of the strong anti-jamming capability of monopulse radar, the cross eye is used to interfere with monopulse radar. Monopulse radar is widely used in missile terminal guidance for precise attack on aircraft and ship targets. Based on the radar equation and the principle of monopulse radar angle measurement, the retrodirective cross-eye interference of the isolated target and the two point source under the target echo are modeled. Based on the analysis method of linear fitting, the general formula of two source reverse cross eye parameters and monopulse radar indicating angle are obtained. The influence of jammer power, signal phase difference, signal amplitude ratio and echo signal phase on the angle deception effect of monopulse radar is discussed through case simulation. The results show that: The phase difference of the two signals emitted by the jammer is closer to 180° and the amplitude ratio is closer to 1, the better the angle deception effect of the jammer is to the monopulse radar; with the increase of jammer power, the parameter tolerance of jammers is more relaxed when JSR (10~25 dB) is increased; and due to the influence of target echo phase, the jamming effect of jammer is unstable; the mathematical model is consistent with the simulation model of monopulse radar receiver. This study can provide reference for the design of reverse cross eye jammers for aircraft and ships.

Key words: Monopulse radar; Retrodirective cross-eye; Jammer; Angle deception; Jammer-to-Signal Ratio (JSR); Linear fitting analysis

收稿日期: 2018-05-21; 改回日期: 2018-12-06; 网络出版: 2018-12-20

*通信作者: 周亮 zh2013141@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(71801220, 61801502)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (71801220, 61801502)

1 引言

单脉冲雷达通过和差波束来测量目标距离和角度, 具有较强的抗干扰能力, 被广泛用于导弹末制导系统以对飞机、舰船等目标实施精确打击。如何应对导弹威胁, 采用电子手段对导弹末制导电磁传感器实施攻击, 使其无法准确跟踪目标是当前电子战领域研究的热点问题。

针对单脉冲雷达干扰的问题, 国内外学者从噪声压制和欺骗等方面展开了大量的研究。由于导弹末制导雷达采用宽带跳频以及被动跟踪等抗干扰技术, 采用噪声压制手段技术实现难度较大^[1,2]。大量学者采用欺骗的方法对单脉冲雷达干扰进行了研究^[3,4]。交叉眼干扰依据单脉冲雷达测角原理, 对单脉冲雷达进行角度欺骗干扰, 被认为是当前对单脉冲雷达最有效的干扰方式之一^[5]。文献^[6,7]基于角闪烁理论对交叉眼干扰进行了数学建模。文献^[8]考虑了目标回波下, 对两点源交叉眼进行了数学建模, 讨论了干扰机参数设置对干扰效果的影响。以上文献对交叉眼数学建模研究均未考虑交叉眼天线的反向结构, 亦未给出交叉眼干扰的一般公式。文献^[9]对反向天线结构的交叉眼干扰和非反向天线结构的交叉眼干扰效果进行了比较。文献^[5,10,11]在考虑隔离目标回波下, 对正交旋转的反向交叉眼干扰进行了建模, 分析了旋转角对交叉眼干扰机参数容限的影响。文献^[12,13]在隔离目标回波下, 研究了线性阵反向交叉眼干扰机的参数容限。文献^[14,15]在隔离目标回波下, 对多环路反向交叉眼干扰进行了建模, 分析了圆形阵干扰机的参数容限。文献^[16]在文献^[14]的基础上, 讨论了圆形阵交叉眼干扰机的基线长度对干扰机参数容限的影响。文献^[17]在文献^[16]的基础上, 对基线长度补偿对交叉眼干扰效果进行了研究。文献^[18,19]对考虑目标回波下的两环路和多环路线性反向交叉眼干扰的参数容限进行了研究。以上对考虑目标回波下的研究均未考虑目标回波相位变化对交叉眼干扰效果的影响, 且未对数学模型推导结果进行验证。

本文以比相单脉冲雷达为干扰对象, 基于雷达方程、单脉冲测角原理对目标回波下两点源反向交叉干扰进行了严格的数学推导, 采用线性拟合的分析方法得到了反向交叉眼增益、目标回波与雷达指示角间的一般性公式。通过案例仿真, 对比了考虑目标回波和隔离目标回波下反向交叉眼干扰机的参数容限, 讨论了目标回波相位和功率等因素对干扰效果的影响。研究结果可为对抗以单脉冲雷达制导的精确制导武器提供思路, 为设计反向交叉眼干扰机提供理论参考。

2 问题描述

反向交叉眼干扰机与单脉冲雷达位置关系如图1所示。交叉眼干扰机的反向天线结构如图2所示。单脉冲雷达发射的电磁信号抵达干扰机接收天线 R_1, R_2 后, 干扰机对接收到的信号调制后经发射天线 J_1, J_2 发射。单脉冲雷达接收到信号后, 通过比较接收信号相位差对雷达指向进行调整, 直至单脉冲雷达差通信信号为0时锁定搜索目标。图1中黑色实心方框表示单脉冲雷达指向的视在假目标。

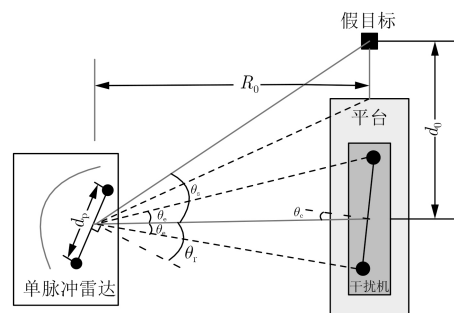


图1 雷达与干扰机相对位置

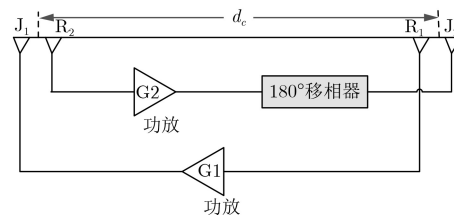


图2 交叉眼干扰机的反向天线结构

3 考虑目标回波下反向交叉眼干扰建模

通过隔离目标回波下单脉冲雷达指示角建模推导, 干扰机两路信号幅值比为 $(1, \alpha)$ ($\alpha \leq 1$), 由于干扰机相对单脉冲雷达距离较远, 干扰机两天线到单脉冲雷达中心距离近似相等, 因此干扰机两路信号达到单脉冲雷达天线阵面的强度比依旧为 $(1, \alpha)$ 。假设在雷达天线阵面接收端处, 目标回波最大强度较干扰机回波强度 $(1, \alpha)$ 中较大者的比值为 α_s , 则干扰机两路发射信号、目标回波信号到达单脉冲雷达天线阵面的幅值比可表示为 $(1, \alpha, \alpha_s)$, 故单脉冲雷达接收到的干信比为干扰机最大功率与目标回波功率在单脉冲雷达天线阵面前的功率比值, 为

$$JSR = 1/\alpha_s^2 \quad (1)$$

依据单脉冲雷达工作原理, 其和通道和差通道接收到的信号分别为

$$\left. \begin{aligned} r_{\Sigma}^m(t) &= (1 + \alpha e^{j\phi} + \alpha_s e^{j\phi_s}) \varepsilon(s) \\ r_{\Delta}^m(t) &= \left[\frac{F_{\Delta}(\theta_1)}{F_{\Sigma}(\theta_1)} + \frac{F_{\Delta}(\theta_2)}{F_{\Sigma}(\theta_2)} \alpha e^{j\phi} \right. \\ &\quad \left. + \frac{F_{\Sigma}(\theta_r) F_{\Delta}(\theta_r)}{F_{\Sigma}(\theta_1) F_{\Sigma}(\theta_2)} \alpha_s e^{j\phi_s} \right] \varepsilon(s) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon(s)$ 为单脉冲雷达天线接收到的干扰机发射信号, θ_1, θ_2 为发射机天线 J_1, J_2 与单脉冲雷达中心法线方向的夹角, θ_r 为单脉冲雷达与干扰机中心连线的方位角, ϕ 为干扰机两路信号相位差, ϕ_s 为目标回波相位。

从图1得知, θ_1, θ_2 与 θ_r, θ_e 之间的关系为 $\theta_1 = \theta_r + \theta_e, \theta_2 = \theta_r - \theta_e$, 其中, θ_e 为干扰天线相对于雷达视轴的半张角, 而单脉冲雷达天线的和、差方向图函数分别为 $F_{\Sigma}(\theta) = \cos\left[\beta \frac{d_p}{2} \sin \theta\right] P_r(\theta)$, $F_{\Delta}(\theta) = j \sin\left[\beta \frac{d_p}{2} \sin \theta\right] P_r(\theta)$, 令 $k_1 = \beta d_p \sin \theta_r \cdot \cos \theta_e$, $k_2 = \beta d_p \cos \theta_r \sin \theta_e$, $k_3 = \beta d_p \sin \theta_r$, 其中 β 为玻尔兹曼常数, $\beta = 2\pi/\lambda$ 。采用三角函数中差化积公式, 式(2)中差通道部分可写为

$$\begin{aligned} r_{\Delta}^m(t) &= j \left\{ \left[\sin k_1 + \sin k_2 \right] + \left[\sin k_1 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sin(k_2) \right] \alpha e^{j\phi} + \left[\sin k_3 \right] \alpha_s e^{j\phi_s} \right\} \\ &\quad / \left[\cos k_1 + \cos k_2 \right] \varepsilon(s) \end{aligned} \quad (3)$$

依据单脉冲雷达测角原理, 单脉冲雷达指示角为雷达接收和信号与差信号比值的虚部, 联合式(2)和式(3), 可得雷达单脉冲比为

$$\begin{aligned} M_J &= \Im \left[\frac{r_{\Delta}^m(t)}{r_{\Sigma}^m(t)} \right] \approx \frac{\sin k_1}{\cos k_1 + \cos k_2} \\ &\quad + \frac{\sin k_2}{\cos k_1 + \cos k_2} \\ &\quad \cdot \Re \left[\frac{1 - \alpha e^{j\phi}}{(1 + \alpha e^{j\phi} + \alpha_s e^{j\phi_s})} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)化简用到了 $k_1 \approx k_3$, 由于 θ_e 值极小, 因此 $k_1 \approx k_3$ 。

k_1, k_2 等是干扰机与雷达位置之间关系的变量, 在使用期间无法改变, 而 $\Re[(1 - \alpha e^{j\phi}) / (1 + \alpha e^{j\phi} + \alpha_s e^{j\phi_s})]$ 与干扰机发射的幅值比和相位差相关, 表征了反向交叉眼干扰机的性能, 本文将此定义为交叉眼干扰增益 G_e 。又 $M_J = \tan(\beta(d_p/2) \sin \theta_i)$, 由于单脉冲雷达指向性强, 因此雷达天线 3 dB 波束较窄, 故 θ_r, θ_e 的值均极小, 因此 k_1, k_2 值均较小, $\sin k_1 \rightarrow k_1, \sin k_2 \rightarrow k_2, \cos k_1 \rightarrow 1, \cos k_2 \rightarrow 1$,

因此依据式(4)可得到单脉冲雷达指示角为

$$\sin \theta_i \approx \frac{\sin \theta_r \cos \theta_e}{2} + \frac{\cos \theta_r \sin \theta_e}{2} G_e \quad (5)$$

进一步简化可得到雷达指示角为

$$\theta_i \approx \theta_r + \theta_e G_e \quad (6)$$

式中, $\theta_e = \arctan\left(\frac{d_c \cos \theta_c}{2r}\right)$, 其中 θ_c 为干扰机旋转角, d_c 为干扰机两发射天线之间的距离, r 为干扰机中心与雷达之间的距离。

通过式(6)可知, 没有交叉眼干扰时, $\theta_i = \theta_r$, 雷达指示角为实际目标位置, 导致雷达指示角偏差的为反向交叉眼干扰增益 G_e 。令 $\alpha_j \cdot e^{j\phi_j} = \frac{\alpha_s \cdot e^{j\phi_s}}{1 + \alpha \cdot e^{j\phi}}$, 则

$$G_e = \frac{(1 - \alpha^2) [1 + \alpha_j \cos \phi_j] - 2\alpha \alpha_j \sin \phi \sin \phi_j}{(1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \phi) (1 + \alpha_j^2 + 2\alpha_j \cos \phi_j)} \quad (7)$$

下面分别计算隔离目标回波下和不隔离目标回波下的反向交叉眼干扰增益。

(1) 隔离目标回波下的反向交叉眼干扰增益: 在隔离目标回波下, 单脉冲雷达接收到的干扰信号为反向交叉眼干扰机发射的两路信号, 此时相当于目标回波信号幅度 $\alpha_s = 0$, 因此隔离目标回波下反向交叉眼干扰增益为

$$G_c = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \phi} \quad (8)$$

(2) 考虑目标回波下的反向交叉眼干扰增益: 由于雷达目标相对雷达视线的姿态角变化, 目标反射回波相位在 $(0, 2\pi)$ 范围内随机变化^[19], 因此考虑目标回波下的反向交叉眼干扰增益 G_e 是一个随 ϕ_j 变化的值。下面依次对 ϕ_j 变化时反向交叉眼干扰增益中值、最小值和最大值进行求解。

(a) 反向交叉眼干扰增益中值: 根据文献[18,19]可知, 对于形式为 $f = \frac{k_1 + k_2 \cos \theta + k_3 \sin \theta}{k_4 + k_5 \cos \theta + k_6 \sin \theta}$, f 的中值为 $f_m = k_1/k_4$, 结合式(7)可得考虑目标回波下反向交叉眼干扰机 G_e 的中值为

$$G_{em} = G_c \frac{1}{1 + \alpha_j^2} = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \phi + \alpha_s^2} \quad (9)$$

(b) 反向交叉眼干扰增益最大值和最小值: 通过文献[18,19]可知, 对于表达式为 $f = \Re \left[\frac{c + jd}{a + jb} \right]$

$\cdot \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 + \alpha_s^2}$, f 的最小值和最大值表达式为 $f_{\max, \min} = \frac{ac + bd \pm \alpha_s \sqrt{c^2 + d^2}}{a^2 + b^2 - \alpha_s^2}$, 因此, 反向交叉

眼增益的最小值和最大值为

$$G_{e(\max, \min)} = \frac{1 - \alpha^2 \pm \alpha_s \sqrt{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos \phi}}{1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \phi - \alpha_s^2} \quad (10)$$

4 仿真分析

4.1 仿真参数

假设某单脉冲雷达工作频率为4 GHz, 天线孔径间距为 2.54λ , 两点源反向交叉眼干扰机发射天线 J_1, J_2 的间距为10 m, 干扰机天线中心与雷达天线中心直线距离为1 km, 干扰机天线中心相对雷达的转角为 30° , 干扰机天线中心与雷达视轴夹角 θ_t 为 0° 。下面分别对考虑目标回波下反向交叉眼干扰效果影响因素进行分析。

4.2 目标回波相位对反向交叉眼干扰效果的影响

由于反向交叉眼增益随目标回波相位变化, 对在交叉眼干扰总增益中值、最小值和最大值下不同干信比的值进行计算, 当 $\phi = 175^\circ, \alpha = 0.90$ 时, 交叉眼增益随JSR(干信比)变化如图3所示。从图3可知, 交叉眼增益中值随干信比的增大变化较为平稳。由于目标回波相位仅在某一时刻为固定值, 在一段时间内为随机值, 依据文献[20]可知, 目标回波相位随机性是因为雷达视线姿态角的变化, 若不考虑雷达视线姿态角变化及目标运动对回波相位的影响, 在一个雷达信号周期内, 则可假设目标回波相位在一个信号周期内将从 $0 \sim 2\pi$ 均匀变化。以随干信比变化的交叉眼增益中值为对象, 对于干信比20 dB下不同幅值比和相位差下的交叉眼增益进行计算, 其在一个信号周期内交叉眼增益随时间变化如图4所示。

分析图4中交叉眼增益随时间变化可知, 交叉眼增益随时间起伏较大, 当 $\phi \rightarrow 180^\circ, \alpha \rightarrow 1$ 时, 其对应的交叉眼增益随时间起伏更大。因此, 受目标回波的影响, 两点源反向交叉眼对单脉冲雷达不能形成稳定的干扰。

4.3 干扰功率对反向交叉眼干扰增益的影响及模型验证

由于式(6)推导过程存在近似, 因此依据文献[21]

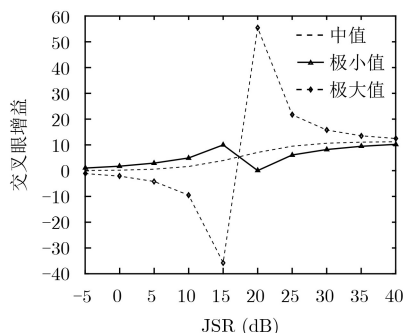


图3 $\phi = 175^\circ, \alpha = 0.90$ 不同增益值下交叉眼增益随干信比变化

建立单脉冲雷达接收机仿真模型, 对式(6)近似误差进行评估。当干扰机两路信号为 $\phi = 170^\circ, \alpha = 0.95$ 时, 式(6)、接收机仿真模型输出角以及信号实际入射角随目标回波相位变化如图5所示。由于交叉眼增益起伏较大, 后面以交叉眼增益的中值为例, 对不同干信比下交叉眼增益中值变化和参数容限展开分析。交叉眼干扰机增益中值随JSR变化如图6所示。

分析图5中可知, 式(6)与单脉冲仿真模型计算结果一致, 因此本文数学模型推导正确。分析图6中不同幅值比和相位差下交叉眼增益中值随JSR变化可知, 除 $\phi = 180^\circ, \alpha = 0.95$ 的交叉眼增益中值随JSR变化曲线以外, 其余情况下交叉眼增益随JSR变化曲线走势为: 在干信比为 $-5 \sim 10$ dB时, 交叉

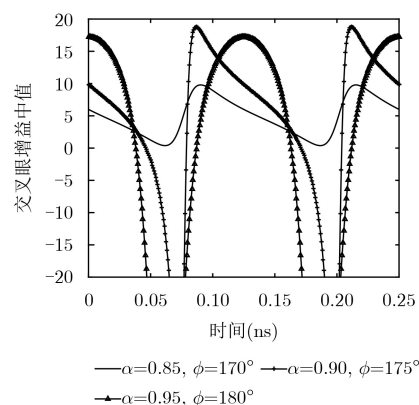


图4 交叉眼增益随时间变化

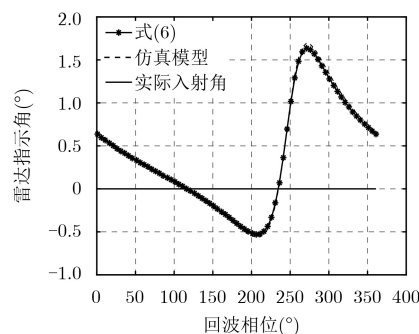


图5 不同模型下雷达指示角随回波相位的变化

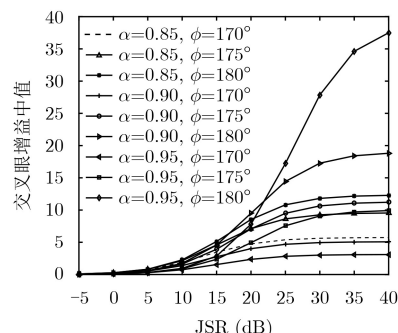


图6 交叉眼增益中值随干信比变化

眼增益随干信比变化较为缓慢；在JSR为10~25 dB时，交叉眼增益随JSR变化较快；而当JSR大于25 dB后，交叉眼增益中值随干信比的增长变化较为缓慢。因此，交叉眼干扰机在一定范围内提高功率，能使干扰机的干扰效果得到明显提升。

4.4 参数容限等高线图

从图6可知，若JSR过小，则干扰机并不能对单脉冲雷达进行有效的角度欺骗，在JSR大于10 dB时，交叉眼干扰增益随JSR变化较为敏感，因此本文选取JSR分别在15 dB, 20 dB, 25 dB下，对不同交叉眼干扰增益的参数容限进行计算，其结果如图7

所示。

分析图7中不同JSR下干扰机的参数容限可知，JSR越小，同样的干扰效果对干扰机参数容限要求越高。对比分析图7中不同JSR下等高线中心位置变化可得：当JSR从10 dB变化到25 dB时，等高线中心不断上移。这是因为在低的JSR下，干扰信号幅值相对回波信号幅值较小，回波信号占主体地位。而随着JSR的提高，干扰信号的幅值比目标回波信号幅值大很多，相对于目标回波信号，单脉冲雷达接收到的干扰信号占主体地位。故提高干扰机两路信号幅值比能显著增大交叉眼干扰增益。

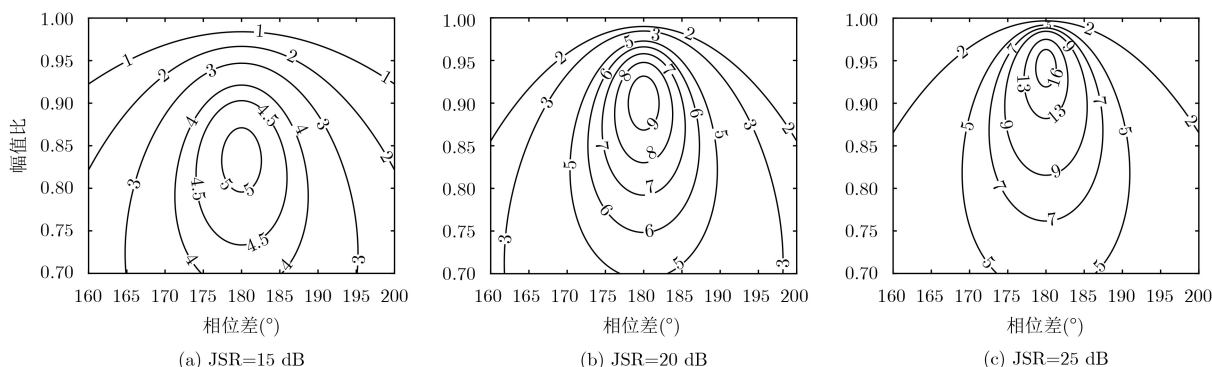


图7 不同干信比下对干扰机参数容限

5 结束语

本文基于雷达方程、单脉冲雷达测角原理对隔离目标回波和考虑目标回波下的两点源反向交叉眼干扰进行了数学推导，建立了考虑目标回波下的反向交叉眼干扰数学模型。通过案例对反向交叉眼干扰效果影响因素进行了分析，分析结果可得到如下结论：

(1)干信比小于10 dB或大于25 dB时，干扰机对单脉冲雷达角度诱骗效果随干扰机发射的两路信号幅值比变化不敏感，且干扰效果有限。因此干扰机功率或转发增益应合理设置，在追求干扰效果的同时，兼顾干扰机功率指标限制。

(2)干信比为10~25 dB时，相同干扰效果下，干信比越大，其幅值比和相位差等参数容限越宽松。

(3)由于目标回波的影响，交叉眼干扰对单脉冲雷达的欺骗角并不是稳定值，可考虑与拖引干扰联合，隔离目标回波，使干扰机对单脉冲雷达形成稳定的角度欺骗。

(4)数学模型结果与单脉冲雷达仿真模型结果一致，本文研究可为舰载或机载两点源反向干扰机设计提供参考。

参考文献

- [1] SHERMAN S M. Monopulse Principles and Techniques[M]. Second Ed., Dedham Ma Artech House Inc P, 2011: 283-284.
- [2] 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).
- [3] 赵珊珊, 张林让, 李强, 等. 分布式多站雷达转发式欺骗干扰研究[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 138-143. doi: [10.11999/JEIT160118](https://doi.org/10.11999/JEIT160118).
ZHAO Shanshan, ZHANG Linrang, LI Qiang, *et al.* Research on repeater jamming against distributed multiple-radar system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 138-143. doi: [10.11999/JEIT160118](https://doi.org/10.11999/JEIT160118).
- [4] 李永祯, 胡万秋, 陈思伟, 等. 有源转发式干扰的全极化单脉冲雷达抑制方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(2): 276-282. doi: [10.11999/JEIT140146](https://doi.org/10.11999/JEIT140146).
LI Yongzhen, HU Wanqiu, CHEN Siwei, *et al.* Active repeater jamming suppression using polarimetric monopulse radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 276-282. doi: [10.11999/JEIT140146](https://doi.org/10.11999/JEIT140146).

- [5] 刘松杨, 董春曦, 朱颖童, 等. 基于角度参数特定边界值的旋转交叉眼干扰容限研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 906–912. doi: [10.11999/JEIT150903](https://doi.org/10.11999/JEIT150903).
LIU Songyang, DONG Chunxi, ZHU Yingtong, *et al.* Tolerance analysis of rotating cross-eye jamming based on angle factor specific boundary value[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 906–912. doi: [10.11999/JEIT150903](https://doi.org/10.11999/JEIT150903).
- [6] SHERMAN S M. Complex indicated angles applied to unresolved radar targets and multipath[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(1): 160–170. doi: [10.1109/TAES.1971.310264](https://doi.org/10.1109/TAES.1971.310264).
- [7] FALK L. Cross-eye jamming of monopulse radar[C]. Proceedings of the IEEE Waveform Diversity and Design Conference, Pisa, Italy, 2007: 209–213.
- [8] CAO Fei, LIU Qingyun, and WU Fan. The cross-eye jamming mathematical modeling[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 344: 125–128. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.344](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.344).
- [9] 王建路, 戴幻尧, 张扬, 等. 反向交叉眼干扰特性建模与仿真[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(5): 471–477. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2016.05.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2016.05.004).
WANG Jianlu, DAI Huanyao, ZHANG Yang, *et al.* Analysis of cross-eye jamming characteristic with reverse structure[J]. *Radar Science and Technology*, 2016, 14(5): 471–477. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2016.05.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2016.05.004).
- [10] LIU Songyang, DONG Chunxi, ZHU Yingtong, *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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.05](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.05).
WANG Caiyun, HE Zhiyong, and GONG Jun. Analysis of retro-directive cross-eye jamming for multiple elements[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(7): 1457–1463. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.05](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.05).
- [14] PLESSIS W P D. Cross-eye gain in multiloop retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(2): 875–882. doi: [10.1109/TAES.2016.140112](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.140112).
- [15] LU Jianrong, LIU Tianpeng, LIU Zhen, *et al.* Analysis of multi-loop retrodirective cross-eye jamming system for large platform[C]. Progress in Electromagnetics Research Symposium, Petersburg, Russia, 2017: 565–572.
- [16] PLESSIS W P D. Analysis of path-length effects in multi-loop cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(5): 2266–2276. doi: [10.1109/TAES.2017.2690538](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2690538).
- [17] PLESSIS W P D. Path-length compensation in multi-loop retrodirective cross-eye jamming[OL]. <https://www.researchgate.net/publication/320281324>. 2018.
- [18] LIU Tianpeng, LIU Zhen, LIAO Dongping, *et al.* Platform skin return and multiple-element linear retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(2): 821–835. doi: [10.1109/TAES.2016.140949](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.140949).
- [19] PLESSIS W P D. 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).
- [20] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 112.
HUANG Peikang, YIN Hongcheng, and XU Xiaojian. Radar Target Characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 112.
- [21] 张娇云. 单脉冲雷达导引头建模与仿真研究[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2006.
ZHANG Jiaoyun. The study on modeling and simulation of monopulse radar seeker[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2006.

周 亮: 男, 1989年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电磁干扰与防护、装备综合保障。

孟 进: 男, 1977年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁干扰与防护。

吴 灏: 男, 1988年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为人工智能。

刘永才: 男, 1989年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电子战。

刘 伟: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为电子战。