

# 基于转发路径优化的交叉眼干扰结构

吕元杰, 白渭雄, 付孝龙, 万鹏程

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 为了降低因路径引起的波程差,提出一种基于转发路径优化的交叉眼干扰结构。通过分析交叉眼信号传播路径,建立干扰信号传播路径模型。在雷达来波方向偏离交叉眼干扰天线中垂线的条件下,改变交叉眼双环路接收天线和发射天线位置,可以有效减小干扰距离较远时因波程差造成的相位变化,提高交叉眼干扰效果。仿真结果表明:在该结构下,交叉眼干扰与雷达的距离越远,波程差越小;雷达来波方向偏离交叉眼干扰天线中垂线越严重,波程差越小;当交叉眼干扰距离雷达较远( $r > 3$  km)时,交叉眼天线中垂线附近波程差即可忽略,使干扰信号到达雷达时的相位差能够满足干扰要求。

**关键词** 单脉冲雷达;交叉眼干扰;波程差;转发路径优化

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.02.007

**中图分类号** TP957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)02-0042-05

## Cross-Eye Jamming Structure Based on Forwarding Path Optimization

LYU Yuanjie, BAI Weixiong, FU Xiaolong, WAN Pengcheng

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In order to reduce the wave path difference, a Cross-eye jamming structure is proposed based on forwarding path optimization. An interference signal propagation path model is established by analyzing Cross-eye signal propagation path. Under condition of radar arrival direction deviating the perpendicular bisector of Cross-eye jamming antenna, through changing the location of double loops crossing receiving antenna and transmitting antenna, the phase changes caused by wave path-difference when interference distance is far away could be reduced and Cross-eye interference effect could be improved. The following conclusions are demonstrated by the simulation results: the farther the distance between Cross-eye jamming structure and radar is, the smaller the wave path difference is; the bigger the angle of radar incoming wave direction measured from the perpendicular direction of the Cross-eye jamming structure is, the smaller the wave path difference is; the wave path difference can be ignored when the Cross-eye jamming structure based on forwarding path optimization is far away from the jammed radar ( $r > 3$  km), where the phase difference satisfies the jamming requirement.

**Key words:** mono-pulse radar; Cross-eye jamming; wave path difference; forwarding path optimization

单脉冲测角技术具有测角速度快、抗角度干扰能力强等优点,因此对单脉冲跟踪系统进行角

**收稿日期:** 2018-09-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(61701527)

**作者简介:** 吕元杰(1987—),男,山西忻州人,硕士生,主要从事信息对抗理论与技术研究。E-mail:295227046@qq.com

**引用格式:** 吕元杰,白渭雄,付孝龙,等.基于转发路径优化的交叉眼干扰结构[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(2):42-46.  
LYU Yuanjie, BAI Weixiong, FU Xiaolong, et al. Cross-Eye Jamming Structure Based on Forwarding Path Optimization[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(2): 42-46.

度干扰一直是电子对抗领域研究的热点问题。交叉眼干扰技术是针对单脉冲跟踪系统实施角度欺骗的一种重要手段,作为新一代电子战技术,欧美等国已经率先对其进行了研究,甚至将其认为新一代战机的标志<sup>[1-3]</sup>。

交叉眼干扰包含一对相干反向转发环路(通常由反向天线构成),其中一支环路有 $180^\circ$ 移相器,相干不同相信号会使回波信号相位波前发生畸变,导致雷达的跟踪电路中出现明显的角度误差<sup>[4-5]</sup>。交叉眼干扰技术虽然主要用于自卫,但它属于电子攻击范畴<sup>[6-7]</sup>。由于模拟器件很难满足交叉眼干扰在实战中所需的条件,所以这种干扰在20世纪发展较为缓慢,随着数字器件的快速发展,特别是数字射频存储器的出现,交叉眼技术才得以应用<sup>[8-10]</sup>。交叉眼实施干扰时,只有到达雷达的干扰信号为等幅、反相信号才能保证交叉眼干扰的有效实施<sup>[11-12]</sup>。如果路径不同,波程差会引起到达雷达的信号出现相位差,从而影响交叉眼干扰效果。由于飞机在飞行过程中很难将干扰天线始终对准雷达,因此会使干扰天线中垂线与雷达有一定角度,从而很难消除引入的波程差。

目前已有许多学者对交叉眼干扰原理进行深入分析研究,包括交叉眼干扰信号与载机回波信号间多普勒频差关系<sup>[13]</sup>、交叉眼干扰对雷达和通道信号的影响、振幅比与欺骗角度的关系<sup>[14]</sup>等,但没有从信号传播路径对干扰效果进行分析。文献<sup>[15]</sup>提出了多阵元交叉眼角度欺骗的改进算法,能够有效改善交叉眼干扰的稳定性和准确性,增加干扰范围,但增加了设备量,对数据处理能力提出更高要求;文献<sup>[16]</sup>分析比较了交叉眼结构与反交叉眼结构特性,但并未从传播路径进行分析说明;文献<sup>[17]</sup>提出一种交叉眼干扰技术的新方法,但是并未解决干扰天线偏离雷达时相位差稳定性的问题。

因此本文根据交叉眼干扰原理,从干扰路径入手分析,得到干扰信号传播路径与干扰天线相对雷达偏离角度的关系,提出一种基于转发路径优化的交叉眼干扰结构。

## 1 交叉眼干扰信号传播路径模型

为保证交叉眼干扰有效实施,要求被干扰雷达天线接收到的干扰信号相位差稳定保持在 $180^\circ$ 附近<sup>[18]</sup>。如果交叉眼两路反相干扰信号在传播过程中由于路径不同,会在被干扰雷达天线阵面出现波

程差<sup>[19]</sup>,导致两干扰信号的相位差偏离 $180^\circ$ ,这就使得交叉眼干扰效果大大降低,甚至会起到“信标”的作用<sup>[20]</sup>。

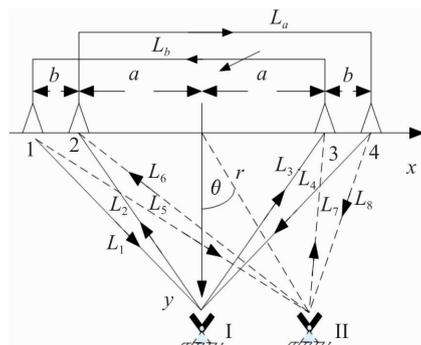


图1 传播路径模型

图1中雷达I的来波方向位于交叉眼干扰天线的中垂线上,雷达向左天线辐射的信号经过传播路径 $L_2$ 到达左天线,再经过电长度为 $L_a$ 的电路到达右天线,右天线信号被雷达接收需经过传播路径 $L_4$ ,信号的整个传播路径为 $L_A=L_2+L_a+L_4$ ,同理可得另一路信号的传播路径为 $L_B=L_3+L_b+L_1$ 。由对称性可知 $L_1=L_4$ 和 $L_2=L_3$ ,因此只要保证 $L_a=L_b$ 就能够保证传播路径 $L_A=L_B$ 。当雷达位于位置II时,来波方向偏离交叉眼天线中垂线方向,存在一个夹角,方向为偏离y正方向 $\theta$ 的位置。发射天线1和4分别位于x轴的 $-(a+b)$ 和 $a+b$ 位置,接收天线2和3分别位于x轴的 $-a$ 和 $a$ 位置,单脉冲雷达位于原点,相距距离为 $r$ 。信号的传播路径分别为 $L_A=L_6+L_a+L_8$ , $L_B=L_7+L_b+L_5$ 。

由图1中几何关系知道,雷达坐标为:

$$x_r = r \sin \theta \quad (1)$$

$$y_r = r \cos \theta / 4 \quad (2)$$

4条传播路径 $L_5, L_6, L_7$ 和 $L_8$ 的长度分别为:

$$L_5 = \sqrt{(r \sin \theta + a + b)^2 + r^2 \cos^2 \theta} \quad (3)$$

$$L_6 = \sqrt{(r \sin \theta + a)^2 + r^2 \cos^2 \theta} \quad (4)$$

$$L_7 = \sqrt{(r \sin \theta - a)^2 + r^2 \cos^2 \theta} \quad (5)$$

$$L_8 = \sqrt{(r \sin \theta - a - b)^2 + r^2 \cos^2 \theta} \quad (6)$$

在保证电长度 $L_a=L_b$ 前提下,总的传播路径 $L_A$ 和 $L_B$ 只与 $L_5+L_7$ 和 $L_6+L_8$ 有关。设2路信号传播路径波程差为 $\Delta$ ,即:

$$\Delta = L_7 + L_5 - L_6 - L_8 \quad (7)$$

如果 $\Delta=0$ ,那么传播路径的一致性就能保证,否则将不能保证,也就无法满足交叉眼干扰的要求。根据战斗机装备的交叉眼干扰设备的典型参数,令 $a=7.4$  m, $b=0.1$  m,即翼展为15 m。对 $\Delta$ 的仿真结果见图2~4。

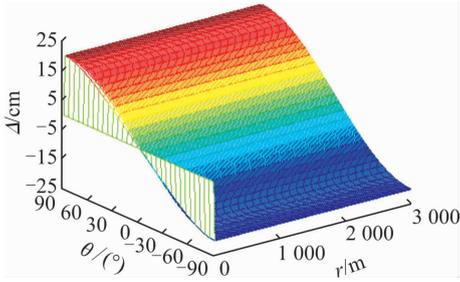


图2 波程差与距离和角度的关系

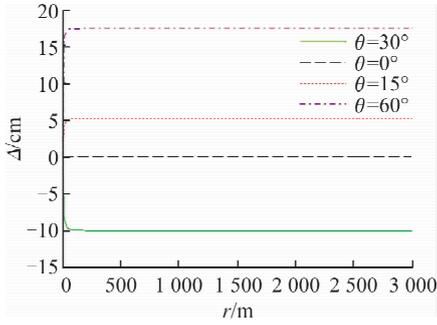


图3 波程差与距离的关系

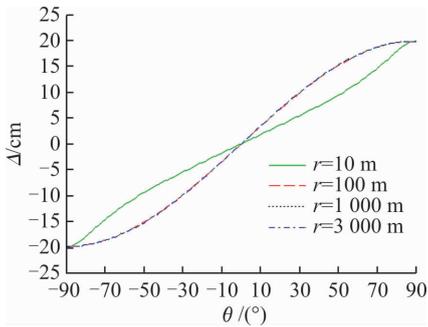


图4 波程差与角度的关系

从图3中可看出,除在 $\theta=0^\circ$ 时(雷达位于干扰天线中垂线上) $\Delta=0$ ,在其他位置上均有 $\Delta \neq 0$ 。当距离较小( $r < 5$  m)时, $\Delta$ 较小;当距离较远时, $\Delta$ 将保持不变,但其值随偏离角度的增大而增大。

图4中 $r \geq 100$  m的3条曲线几乎完全重合,说明在距离较远时 $\Delta$ 仅与角度有关。 $\Delta$ 的值对角度的变化很敏感,其值随着角度偏离中垂线而增大,呈现出近似正弦函数的状态。其实当距离较远时,有:

$$L_5 - L_6 \approx b \sin \theta \quad (8)$$

$$L_7 - L_8 \approx b \sin \theta \quad (9)$$

于是有:

$$\Delta \approx 2b \sin \theta \quad (10)$$

这说明 $\Delta$ 与天线间隔和与雷达的角位置有关,而与距离无关(距离较远时)。

雷达和导弹导引头为了获得较好的角度分辨率和距离分辨率,通常信号的波长都比较短,大多制导雷达工作在X波段,先进的导弹在末制导段采用毫

米波主动制导。根据上面的分析,在雷达偏离交叉眼中垂线 $1^\circ$ 时,2路信号的波程差相差0.4 cm,足以引起相位变化。

## 2 转发路径优化的交叉眼干扰结构

交叉眼干扰设备距离雷达足够远时,保持原两环路收发天线间隔不变,即实际位置关系满足 $L_a = L_b$ ,式(8)和(9)相减等于零,即:

$$(L_5 - L_6) - (L_7 - L_8) = (L_5 + L_8) - (L_6 + L_7) = 0 \quad (11)$$

此时两路信号的波程差为:

$$\Delta = L_5 + L_8 - L_6 - L_7 \quad (12)$$

利用图1传播路径模型,交换两环路天线3和4的位置,结构见图5,天线3变为D的位置,天线4变为C的位置,两天线间距离保持不变,此时式(1)~(7)的关系成立,从而式(11)成立。此时信号传播路径发生变化:

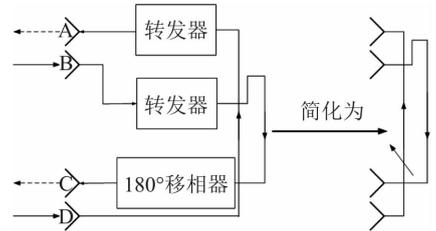


图5 路径优化交叉眼结构

$$L_A = L_5 + 2L_a + 2L_b + L_8 \quad (13)$$

$$L_B = L_6 + 2L_a + L_7 \quad (14)$$

为保持两路径的相等,应增加路径 $L_b$ 电路长度 $2L_b$ ,使传播路径 $L_A$ 和 $L_B$ 保持相等。

假设雷达发射信号为 $s(t)$ ,载波频率 $f_c$ ,则交叉眼干扰2路接收天线接收到的雷达信号分别为:

$$s_{L_5}(t) = \frac{\eta \lambda s(t) e^{j\omega_d t} e^{-jkL_5}}{4\pi L_5} \quad (15)$$

$$s_{L_7}(t) = \frac{\eta \lambda s(t) e^{j\omega_d t} e^{-jkL_7}}{4\pi L_7} \quad (16)$$

式中: $k = \frac{2\pi f_c}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ , $c$ 为光速; $\omega_d$ 为载机相对于雷达运动所产生的多普勒频移; $\eta$ 为交叉眼干扰设备天线增益。交叉眼干扰设备两天线发射信号分别为:

$$s_{F_8}(t) = \beta s_{L_5}(t) e^{-j\Phi_D} \quad (17)$$

$$s_{F_6}(t) = \beta s_{L_7}(t) e^{-j\Phi_D} e^{j\Delta\Phi} \quad (18)$$

式中: $\Phi$ 为天线电长度所引起的相移; $\beta$ 为干扰信号增益; $\Delta\Phi = \pi$ 。

干扰信号到达雷达天线处信号可表示为:

$$s_{L_8}(t) = \frac{s_{F_8}(t) e^{j\omega_d t} e^{-jkL_8}}{\sqrt{4\pi L_8}} \quad (19)$$

$$s_{L_6}(t) = \frac{s_{F_6}(t) e^{j\omega_d t} e^{-jkL_6}}{\sqrt{4\pi L_6}} \quad (20)$$

进一步可得:

$$s_{L_8} = \frac{\beta\eta\lambda e^{-j\Phi_D} e^{2j\omega_d t} s(t)}{(4\pi)^{3/2} L_5 L_8} e^{-jk(L_5+L_8)} \quad (21)$$

$$s_{L_6} = \frac{\beta\eta\lambda e^{-j\Phi_D} e^{2j\omega_d t} s(t)}{(4\pi)^{3/2} L_6 L_7} e^{j\Delta\Phi} e^{-jk(L_6+L_7)} \quad (22)$$

比较(21)、(22)两式可知,与距离有关的因子 $L_5 L_8$ 、 $L_6 L_7$ 只影响雷达接收到干扰信号的幅度,而与相位相关的 $e^{-jk(L_5+L_8)}$ 与 $e^{-jk(L_6+L_7)}$ 相等,因此能够保证到达雷达干扰信号相位差稳定。

### 3 仿真实验与分析

基于图 5 路径优化交叉眼干扰结构,利用原公式对此结构性能进行仿真实验。参数设置为:载机翼展 15 m,两环路电气长度 15 m,发射天线 A 到接收天线 D 的距离为 15 m,接收天线 B 到发射天线 C 的距离为 14.8 m,接收天线 A 到发射天线 B 的距离为 10 cm,被干扰雷达来波方向与干扰天线中垂线夹角分别为 $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 和 $60^\circ$ ,载机从被干扰雷达坐标原点远离雷达至 3 km 处,即载机距离变化范围为 $0\sim 3$  km。从图 6 中可以看出,交叉眼干扰距离雷达越近,波程差越大,随着距离的增大,波程差 $\Delta$ 减小,在 3 km 处 $\Delta$ 只有 0.012 5 cm;在 4 个典型角度下,即偏差角越大, $\Delta$ 越小。

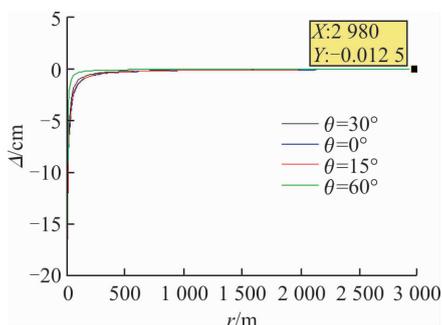


图 6 优化结构的波程差与距离的关系

模型数据不变,设置载机距离雷达 10 m、100 m、1 000 m 和 3 000 m,载机从 $-90^\circ\sim 90^\circ$ 运动,得到波程差与角度的相对关系。从图 7 中可以看出,雷达来波方向与干扰天线中垂线夹角越小, $\Delta$ 越大;随着偏差角增大, $\Delta$ 减小;载机距离雷达越远, $\Delta$ 越小。这说明在远距离实施交叉眼干扰时,这种路径

优化的交叉眼干扰结构能够满足干扰的要求,而且雷达偏离交叉眼干扰天线越严重, $\Delta$ 越小。

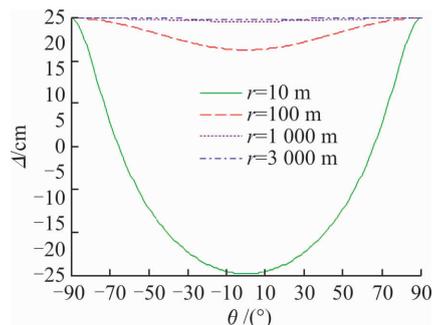


图 7 优化结构的波程差与角度的关系

### 4 结语

本文从交叉眼干扰路径分析,提出一种路径优化的交叉眼干扰结构。首先对干扰传播路径分析建模,得出两环路在电路径相同的前提下,当交叉眼干扰与雷达距离足够远,波程差只与相对角度有关,在此基础上得到路径优化的交叉眼干扰结构。仿真结果显示,该结构在距离较远时,相比于原结构,波程差受距离影响减小,角度偏差越大,波程差越小,能较好解决因偏差角引起的波程差。但是这种结构并不能用于近距离的自卫干扰,因为近距离施放干扰时,波程差不为零,而且伴随距离和角度的变化很严重,有待于在后续工作中进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 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 & Electronics, 2017, 39(7): 1457-1463. (in Chinese)
- [2] PLESSIS W P D, ODENDAAL J W, JOUBERT J. Tolerance Analysis of Cross-Eye Jamming Systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2010, 47(1):740-745.
- [3] PLESSIS W D. Cross-eye Gain in Multiloop Retrodirective Cross-eye Jamming[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2016, 52(2): 875-882.
- [4] PLESSIS W P D. A Comprehensive Investigation of Retrodirective Cross-eye Jamming[D]. Hatfield: University of Pretoria, 2010.
- [5] PLESSIS W P D, ODENDAAL J W, JOUBERT J. Extended Analysis of Retrodirective Cross-Eye Jam-

- ming[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2009, 57(9):2803-2806.
- [6] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 27-31.  
ZHAO G Q, Principle of Radar Countermeasure[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999: 27-31. (in Chinese)
- [7] SPEZID A E. Electronic Warfare Systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2002, 50(3):633-644.
- [8] RIGELSFORD J. Introduction Airborne Radar [J]. Sensor Review, 2002, 22(3):265-266.
- [9] FALK L. Cross-eye Jamming of Monopulse Radar [C]// Waveform Diversity and Design Conference International. [S. l.]:IEEE, 2007:209-213.
- [10] LIU T, LIAO D, WEI X, et al. Performance Analysis of Multiple-Element Retrodirective Cross-eye Jamming Based on Linear Array[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2015, 51 ( 3 ): 1867-1876.
- [11] LIU T, WEI X, LI L. Multiple-Element Retrodirective Cross-Eye Jamming against Amplitude-Comparison Monopulse Radar[C]// International Conference on Signal Processing. [S. l.]:IEEE, 2015.
- [12] PLESSIS W P, ODENDAAL J W, JOUBERT J. Experimental Simulation of Retrodirective Cross-Eye Jamming[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(1):734-740.
- [13] 曹菲, 刘庆云, 辛增献. 交叉眼干扰数学建模[J]. 现代雷达, 2013, 35(6):69-72.  
CAO F, LIU Q F, XIN Z X. Mathematical Modeling of Cross-Eye Jamming[J]. Modern Radar, 2013, 35 (6):69-72. (in Chinese)
- [14] 付孝龙, 白渭雄, 杨忠, 等. 交叉眼干扰分析及实施方法[J]. 现代防御技术, 2016, 44(3):121-126.  
FU X L, BAI W X, YANG Z, et al. Analysis and Implementation of Cross-Eye Jamming [J]. Modern Defence Technology, 2016, 44(3):121-126. (in Chinese)
- [15] 黄庆东, 张林让, 卢光跃. 一种改进的交叉眼角度欺骗技术[J]. 通信技术, 2009, 42(8):73-75.  
HUANG Q D, ZHANG L R, LU G Y. An Improved Cross-Eye Angular Deception Jamming Technique[J]. Communications Technology, 2009, 42(8):73-75. (in Chinese)
- [16] 王建路, 戴幻尧, 张杨, 等. 反向交叉眼干扰特性建模与仿真分析[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(5): 471-477.  
WANG J L, DAI H Y, ZHANG Y, et al. Analysis of Cross-Eye Jamming Characteristic with Reverse Structure[J]. Radar Science and Technology, 2016, 37(5): 471-477. (in Chinese)
- [17] 王慧萍, 张友益. 一种交叉眼干扰技术实现的新方法[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(6):23-25.  
WANG H P, ZHANG Y Y. A New Method to Realize Cross-Eye Jamming Technique[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2007, 30(6):23-25. (in Chinese)
- [18] HARWOOD N M, DAWBER W N, KING D J, et al. Multiple-Element Cross-Eye[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2007, 1(1):67-73.
- [19] PLESSIS W P D. Platform Skin Return and Retrodirective Cross-eye Jamming[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2012, 48 ( 1 ): 490-501.
- [20] LIU S, DONG C, XU J, et al. Analysis of Rotating Cross-Eye Jamming[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14:939-942.

(编辑: 徐敏)