基于单脉冲和差信号矢量的交叉眼 干扰辨别方法

牟成虎,陈 铖,李 森,赵权睿,徐 敏 (上海无线电设备研究所,上海 201109)

摘 要:针对交叉眼干扰对单脉冲雷达测角的影响,分析了交叉眼干扰信号在单脉冲和差通道中的信号矢量情况,提出了基于单脉冲和差信号矢量的交叉眼干扰辨别方法。经仿真分析表明:该方法能够有效辨别交叉眼干扰。
 关键词:单脉冲雷达;和差信号矢量;交叉眼干扰;干扰辨别;幅度方向图;相位方向图
 中图分类号:TN 974
 文献标志码:A
 DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2023.04.003

Discrimination Method of Cross-Eye Jamming Interference Based on Monopulse Radar Sum-Difference Signal Vectors

MOU Chenghu, CHEN Cheng, LI Sen, ZHAO Quanrui, XU Min (Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In view of the effect of cross-eye jamming interference on monopulse radar angle measurement, the monopulse radar sum-difference signal vectors are analyzed. A discrimination method for cross-eye jamming interference based on monopulse radar sum-difference signal vectors is proposed. The simulation analysis shows that this method can effectively discriminate cross-eye jamming interference.

Key words: monopulse radar; sum-difference signal vector; cross-eye jamming interference; jamming discrimination; amplitude pattern; phase pattern

0 引言

战场环境日益复杂,常态化高强度多样式干扰 是未来战场环境的主要特征^[1],特别是交叉眼等角 度干扰出现后对单脉冲雷达测角产生严重影响。 交叉眼干扰是一种专门针对单脉冲角跟踪系统设 计的角度欺骗干扰,主要用在飞机、舰船等武器平 台上对来袭的雷达末制导导弹进行角度诱偏^[2]。随 着交叉眼干扰技术的不断成熟和应用,将使单脉冲 雷达导引头的作战效能大幅降低。

国内外大量文献研究了交叉眼干扰的实现方 法和干扰效能。文献[3-10]对交叉眼干扰进行了建 模和数学分析;文献[11-17]分析了"交叉眼"干扰的 效能;文献[18]研究了在靶机上加装交叉眼干扰设 备的方法;文献[19]研究了交叉眼干扰设备在飞机 上的布局。

在交叉眼干扰对抗方面国内的研究相对较少。 文献[20]指出"交叉眼"干扰对利用和通道定向的雷 达(如圆锥扫描雷达)不具有干扰作用;文献[21]指 出可以利用这一点作为交叉眼干扰对抗的一种措 施;但是圆锥扫描雷达受目标起伏影响测角性能差, 已经被单脉冲测角雷达取代。文献[22-23]指出长基 线交叉眼干扰可以利用其传输延时对干扰信号予以 剔除,并未给出具体分析。文献[24]指出可以利用 和通道信号最大值对应角度与单脉冲雷达比幅测角 所得角度位置进行交叉眼干扰识别,但并未深入分 析其对抗效果。文献[25]给出了基于 MIMO技术的 交叉眼干扰对抗方法,该方法利用理想交叉眼干扰 信号叠加损失进行干扰抑制,该方法在非理想交叉 眼干扰情况下对抗性能下降。文献[26]给出了基于

收稿日期:2021-10-27; 修回日期:2022-05-15

作者简介:牟成虎(1980-),男,硕士,研究员,主要研究方向为相控阵雷达导引头。

单脉冲三维成像的抗交叉眼干扰方法,该方法依赖 于高距离分辨能力和高精度测角能力,处理和计算 量较大,在噪声和干扰影响下工程应用困难。本文 从交叉眼干扰对单脉冲和差信号矢量的影响出发, 提出了一种基于单脉冲和差信号矢量的交叉眼干扰 判别方法,该方法处理简单、计算量小,是一种对抗 交叉眼干扰的实用技术。

1 交叉眼干扰的机理

交叉眼干扰一般有两对天线,分别安装在机翼 两端或船舶的头尾及两舷,利用左收右发、右收左 发的交叉收发方式实现干扰路径的抵消^[27]。由于 难以解决同时收发工作时收发天线之间的隔离度 问题,以及校准两对天线信号的传输电缆、处理电 路的信号幅相差异困难,目前交叉眼干扰一般采用 收发分时方式工作,并利用环形器使用两个天线实 现交叉收发,如图1所示。



Fig. 1 Schematic diagram of the principle of Cross-Eye jamming interference

单脉冲雷达天线 S1、S2辐射的信号,经干扰机 天线 J1接收后,进行信号放大,通过180°移相后经天 线 J2辐射出去;同样 J2接收的信号经环形器进入放 大器 2,最后通过天线 J1辐射出去。电缆的收发是互 易的,因此采用2个天线实现交叉眼干扰的方法,在 实验室对交叉眼干扰进行标校后,在使用安装时可 适当延长电缆 L1、L2以适应飞机或舰船的安装尺寸 需求,且不改变实验室标校的性能。这种方法使交 叉眼干扰从理论走向工程^[28],并逐渐实用化。

两干扰天线辐射的信号在空间中形成类似差 方向图的空间信号,方向图的零深位置对准单脉冲 雷达接收天线S1、S2的相位中心,如图2(幅度方向 图)、图3(相位方向图)所示。单脉冲雷达接收天线 S1、S2如同在交叉眼干扰形成的方向图中的两个接 收点,获取单脉冲合成前的目标回波信号和干扰信 号。图中,A、B为单脉冲雷达天线S1、S2接收到的 干扰信号的幅度; Ψ_1 、 Ψ_2 为单脉冲雷达天线S1、S2 接收到的干扰信号的相位。



图2 理想交叉眼干扰的幅度方向图





图3 理想交叉眼干扰的相位方向图

Fig. 3 Schematic diagram of the phase pattern of ideal Cross-Eye jamming interference

单脉冲雷达接收信号可表示为

$$\begin{cases} S_1(t) = A e^{i\phi_1} x(t) \\ S_2(t) = B e^{i\phi_2} x(t) \end{cases}$$
(1)

式中: $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 分别为雷达天线 S1、S2 接收到的 信号;x(t)为射频信号。

单脉冲雷达形成的和差单脉冲信号为

$$\begin{cases} S_{\Sigma}(t) = S_{1}(t) + S_{2}(t) \\ S_{\Delta}(t) = S_{1}(t) - S_{2}(t) \end{cases}$$
(2)

式中: $S_{s}(t)$ 为单脉冲雷达和路信号; $S_{\Delta}(t)$ 为单脉冲 雷达差路信号。由式(1)、式(2)可得

$$\begin{cases} S_{\Sigma}(t) = A e^{j\phi_1} x(t) + B e^{j\phi_2} x(t) \\ S_{\Delta}(t) = A e^{j\phi_1} x(t) - B e^{j\phi_2} x(t) \end{cases}$$
(3)

对于理想的交叉眼干扰,其形成的方向图可使 接收到的信号满足 $A=B_{\chi}\phi_1=\phi_2+180^\circ$,此时和路 信号 $S_{\Sigma}(t)=0$,差路信号 $S_{\Delta}(t)=2Ae^{i\phi_1}x(t)$ 。于 是,用差信号幅度 $|S_{\Delta}(t)|$ 比和信号幅度 $|S_{\Sigma}(t)|$ 进行 单脉冲测角时得到极大角误差,实现理想的交叉眼 干扰角度欺骗。

2 目标回波单脉冲和差信号矢量

在没有交叉眼干扰时,假设目标为点目标(远 距时目标可等效为点目标),则目标反射回波经单 脉冲雷达天线接收后,2个天线接收信号一般满足:

$$A \approx B$$

$$\psi_2 - \psi_1 = \frac{2\pi D}{\lambda} \sin(\Delta\theta)$$
(4)

式中:D为单脉冲雷达天线S1与S2的间距;λ为单脉冲雷达工作波长;Δθ为目标相对天线法向的偏离 角(角误差)。

令 $\vec{S}_1 = Ae^{i\vec{\nu}_1}$ 、 $\vec{S}_2 = Be^{i\vec{\nu}_2}$,用信号矢量绘制和差 单脉冲信号关系如图4所示。图中: \vec{S}_2 为和信号矢 量; \vec{S}_{Δ} 为差信号矢量。从图中可以看出,在A = B的 情况下和信号矢量与差信号矢量相互垂直,即一般 和路信号与差路信号相位相差90°。



图 4 目标回波和差信号矢量图 Fig. 4 Schematic diagram of the sum-difference signal vectors of the target echoes

在对目标回波进行单脉冲测角时,一般要先将 差路信号移相90°,使差路信号矢量与和路信号矢量 平行,即差路信号与和路信号相位相同或相差180°。 然后进行差路信号矢量幅度与和路信号矢量幅度 相比获得测角信息。当差路信号与和路信号相位 相同时,测角结果为正值;当差路信号与和路信号相位 相位相差180°时,测角结果为负值。由上分析可以 看出,对目标回波的差路信号矢量旋转90°后与和路 信号矢量之间的夹角在非常小的范围内。

3 交叉眼干扰信号的和差信号矢量

存在交叉眼干扰时,和差单脉冲雷达天线接收 得到的信号矢量如图5所示。



图 5 交叉眼干扰和差信号矢量图



当 $A=B_{\chi}\phi_1=\phi_2+180^{\circ}$ 时,和信号矢量 \vec{S}_{Σ} 等于 零;差信号矢量 \vec{S}_{Δ} 不为零。通过差和比幅测角得到 极大角误差。由于交叉眼干扰天线J1、J2的方向 图、干扰吊舱透波罩的透波性能难以做到完全一 致,加上干扰设备处理电路中的延时差异和幅度差 异、移相器的控制精度,以及设备安装在飞机或轮 船后外场标校时的多路径影响等,交叉眼干扰难以 做到理想的等幅、反相,将导致交叉眼两个干扰天 线合成的方向图零深偏离单脉冲雷达2个接收天线 的相位中心,如图6~图7所示。



图6 不理想交叉眼干扰的幅度方向图

Fig. 6 Schematic diagram of the amplitude pattern of nonideal Cross-Eye jamming interference





Fig. 7 Schematic diagram of the phase pattern of nonideal Cross-Eye jamming interference

从图6、图7中可以看出,在交叉眼干扰无法形 成理想的等幅、反相时,将导致单脉冲雷达天线接 收到的信号幅度A、B差异增大,且两个天线接收到 的信号相位相差小于180°。此种条件下,得到和差 信号矢量如图8所示。



图 8 不理想交叉眼干扰和差信号矢量图



从图8中可以看出,和差信号的矢量不再相互 垂直。对交叉眼干扰信号的差路信号进行90°移相 后,不能使差路信号矢量与和路信号矢量平行,差 路信号矢量在垂直于和路信号矢量的方向上仍有 很大分量,如图9所示。



图 9 和信号矢量旋转90°后不理想交叉眼干扰和差信号矢 量图

Fig. 9 Schematic diagram of the sum-difference signal of non-ideal Cross-Eve jamming vectors interference when the sum signal vectors rotate 90°

此时差路信号矢量旋转90°后与和路信号矢量 之间的夹角较大。

根据以上分析,利用目标回波信号的差路信号 矢量旋转90°后与和路信号矢量之间夹角很小,而交 叉眼干扰信号的差路信号矢量旋转90°后与和路信 号矢量之间夹角较大这一特点,可以辨别所检测信 号是目标回波信号还是交叉眼干扰信号。

单脉冲雷达对于检测到的量测信号进行处理, 取出和路信号和差路信号,计算其差路信号矢量旋 转90°后与和路信号矢量的夹角。当2个矢量夹角 小于某一门限值 φ_A 时,判定为目标回波信号;当 2个矢量夹角大于某一门限 $\varphi_{\rm B}$ 时,判定为交叉眼干 扰信号。辨别门限 φ_{A} 和 φ_{B} 可以根据单脉冲雷达系 统的情况进行设计。

4 仿真验证情况

本节对目标回波的和差信号矢量情况、两点源 交叉眼干扰的和差信号矢量情况、多点源交叉眼干 扰的和差信号矢量情况进行仿真分析。

1) 目标回波的和差信号矢量情况。

假设弹目距离3km,单脉冲雷达接收天线S1、 S2间距0.2m,工作在X波段,单脉冲雷达接收天线 形成和差信号中幅度和相位均理想校准。目标回 波等效为点目标回波,目标角度偏离单脉冲雷达天 线法线方向0.2°。

在目标回波信噪比40dB情况下,对目标回波 进行100次仿真试验,仿真得到的差路信号矢量旋 转 90° 后 与 和 路 信 号 矢 量 的 夹 角 情 况 如 图 10 所示。



图 10 目标回波在 30 dB 和路信噪比时差路信号矢量旋转 90°后与和路信号矢量夹角

Fig.10 Angle between sum-difference signal vectors when the target echo SNR is at 30 dB and the difference signal vector is rotated 90°

从图 10 中可以看出,2 个信号矢量的夹角基本 在 0°~30°范围内,且大概率都在 20°以内。设置判 别为目标的门限为两矢量夹角小于 20°,判别为交叉 眼干扰的门限为两矢量夹角大于 25°。进行1000次 仿真并统计仿真结果,得到对目标的正确辨别概率 为 95.6%;目标误判为交叉眼干扰的概率为 0.8%。

2)两点源交叉眼干扰的和差信号矢量情况。

假设交叉眼干扰载机与单脉冲雷达距离3km, 干扰天线安装在载机的机翼两端,载机翼展9m,单 脉冲雷达接收天线S1、S2间距0.2m,单脉冲雷达和 干扰机工作在X波段。

对于理想的交叉眼干扰,其在单脉冲雷达附近 合成的幅度方向和相位方向如图11~图12所示。 根据交叉眼干扰与单脉冲雷达之间的距离,以及单 脉冲雷达两个接收天线之间的间距,可以计算得到 单脉冲雷达两个接收天线与目标点的连线张角为 0.0038°。理想的交叉眼干扰合成幅度方向图的零 点对准单脉冲雷达两个接收天线的相位中心。因 此,单脉冲接收天线在交叉眼干扰方向图中位于 -0.0019°和+0.0019°的角度位置。









图 12 理想交叉眼干扰相位方向图



从图 11~图 12 中可以看出,单脉冲雷达天线接收的两路信号幅度 A=B,相位相差 180°。

当交叉眼干扰两个天线的幅度相差为0.2 dB, 相位误差为3°时,其在单脉冲雷达附近合成的幅度 方向图和相位方向图如图13~图14所示。从图中 可以看出,单脉冲雷达天线接收的两路信号幅度相 差超过4 dB,相位相差达到80.6°。



图 13 交叉眼天线幅度差 0.2 dB、相位差 3°时合成的幅度方 向图





图 14 交叉眼天线幅度差 0.2 dB、相位差 3°时合成的相位方 向图

Fig.14 Phase pattern about Cross-Eye jamming when Cross-Eye antenna amplitude difference is 0.2 dB and phase difference is 3°

按照式(2)合成和差两路信号,并计算差路信号矢量旋转90°后与和路信号矢量的夹角,得到计算结果为48.6°,远远超过0°。

假设交叉眼干扰两个天线的幅度差在 0.1~ 0.5 dB范围内均匀随机分布,相位误差在 1°~5°范围 内均匀随机分布,干噪比约为40 dB,进行 100次仿真 试验,仿真得到的差路信号矢量旋转 90°后与和路信 号矢量的夹角情况如图15所示。从图15中可以看出两个矢量的夹角在10°~70°,且大概率在20°以上。



图 15 交叉眼天线随机幅度差、随机相位差时差路信号矢 量旋转90°后与和路信号矢量夹角

Fig.15 Angle between sum-difference signal vectors when the difference signal vector is rotated 90° and when the Cross-Eye jamming antenna amplitude difference and phase difference are random

对弹目距离2 km 和1 km 的情况进行仿真。此 时单脉冲雷达两个接收天线与目标点连线的夹角 分别为0.057°、0.011 5°,单脉冲雷达2个接收天线在 理想交叉眼干扰方向图的-0.002 9°、0.002 9°和 -0.005 7°、0.005 7°位置。同样假设交叉眼干扰两 个天线的幅度差在0.1~0.5 dB范围内随机分布,相 位误差在1°~5°范围内随机分布,干噪比40 dB,进 行100仿真试验,仿真结果如图16所示。



图 16 不同距离的交叉眼干扰差路信号矢量旋转 90°后与 和路信号矢量夹角

Fig.16 Angle between sum-difference signal vectors about different distances when the difference signal vector is rotated 90°

从图 16 中可以看出,弹目距离 2 km 和 1 km 时 两个矢量夹角大小相当,两个矢量的夹角分布在 10°~80°范围内,且大部分都在 20°以上。

同样设定两个矢量的夹角大于25°时,则判定为

交叉眼干扰;当两个矢量夹角小于20°时,判定为目标。进行1000次的仿真并统计仿真结果,对于两点源交叉眼干扰正确判别的概率达到87.4%,交叉眼干扰误判为目标的概率为4.3%。

3) 多源交叉眼干扰的和差信号矢量情况。

文献[29-31]对多源交叉眼干扰进行了建模分析,得出多源交叉眼干扰有更好的信号波前畸变效果,对干扰天线的幅度、相位误差容限更大,已成为 交叉眼干扰的新热点。下面以4源线阵交叉眼干扰 为例进行仿真。

假设4个交叉眼干扰的天线间距为3.5 m,即 4个天线之间最大间距为10.5 m,这复合一般战斗 机的翼展尺寸。交叉眼干扰载机与单脉冲雷达距 离3 km,单脉冲雷达接收天线S1、S2间距0.2 m,单 脉冲雷达和干扰机工作在X波段。

假设多源交叉眼干扰天线的幅度差在0.1~ 0.5 dB范围内随机分布,相位误差在1°~5°范围内随 机分布,干噪比40 dB,进行100仿真试验,仿真得到 的差路信号矢量旋转90°后与和路信号矢量的夹角 情况如图17所示。从图17中可以看出两个矢量的 夹角分布在25°~55°范围内。仍以两个矢量夹角大 于25°时判定为交叉眼干扰,小于20°时判定为目标。 统计1000次仿真情况,得到对4源线阵交叉眼干扰 正确判别的概率达到90.9%,交叉眼干扰误判为目 标的概率为0.9%。



图 17 4 点源交叉眼干扰存在随机幅相误差时差路信号矢 量旋转 90°后与和路信号矢量夹角

Fig.17 Angle between sum-difference signal vectors about 4 point Cross-Eye jamming when the difference signal vector is rotated 90° and antenna has amplitude and phase error

通过以上仿真分析可以看出,对于目标回波信 号,可以在大概率上正确判定为目标回波信号,只有 很小的概率会将目标信号误判为交叉眼干扰;对于两 电源或4电源交叉眼干扰信号,可以大概率正确判定 为干扰信号,只有极少概率会误判为目标回波信号。

5 结束语

交叉眼干扰是两点源相参干扰或多点源相参干 扰,其本质是使合成的雷达信号波前扭曲达到角度 欺骗干扰的效果。由于工程中难以实现理想的交叉 眼干扰信号,将导致单脉冲雷达接收天线中获取的 干扰信号幅度失衡,相位达不到正好180°翻转,最终 导致在单脉冲雷达接收的差路信号矢量旋转90°后 与和路信号矢量夹角变大。本文提出的基于单脉冲 和差信号矢量的交叉眼干扰辨别方法,就是利用了 这一特点。通过仿真分析验证了该方法对辨识两点 源及多点源交叉眼干扰的有效性。该方法不仅适用 于两点源、多点源相参角度欺骗干扰,对于末端目标 多散射点引起的角闪烁信号也有一定的适用性。

参考文献

- [1]侯凯宇,贺敏,金鹏飞.未来远程对空导弹发展思考[J].上海航天(中英文),2021,38(3):68-75.
- [2] 刘庆云,马亮."交叉眼"干扰在单脉冲雷达中表现特征 分析[J].航天电子对抗,2016,32(1):59-61.
- [3]魏征.单脉冲雷达干扰技术研究[J].电子世界,2013 (17):109-110.
- [4] 王建路,戴幻尧,张扬,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(5):471-477.
- [5]刘松杨.基于干扰平台旋转的反向交叉眼干扰研究 [D].西安:西安电子科技大学,2016.
- [6] LARS F. Cross-eye jamming of monopulse radar[C]// International Waveform Diversity and Design Conference, Pisa, Italy, 2007: 209-213.
- [7] 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):73-75,78.
- [8] 肖扬,罗明.多环路反向交叉眼干扰多普勒频率差研究 [J].雷达科学与技术,2021(6):661-668.
- [9] 杨会军, 王根弟. 基于 DRFM 的弹载自卫式单脉冲雷达干扰技术[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(1): 6-9.
- [10] CHEN J B, SHI Q Z, HUANG Z Y, et al. Performance analysis of multi-group three-tuple crosseye jamming [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022(1):80-90.
- [11] 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(4): 705-712.
- [12] 周伟江,秦大国,王雄.交叉眼干扰技术及干扰效果仿

真分析[J].火力与指挥控制,2022,47(1):115-120.

- [13] 王国伟,王红卫,吴笑天,等.交叉眼干扰对单脉冲测角 雷达的效果分析[D].第八届中国航空学会青年科技 论坛论文集.江门:中国航空学会,2018:1056-1063.
- [14]张伟,莫翠琼,陈秋菊,等."交叉眼"技术对角跟踪雷达导引头的干扰效果分析[J].航天电子对抗,2015,31
 (3):14-16,29.
- [15] 张福群,陈朝,杨华兵.基于干扰诱饵的反向交叉眼干 扰研究[J].空天预警研究学报,2022(3):189-194.
- [16] 顾力伟,刘咏,王坚.舰载平台交叉眼干扰设备作战应 用分析[J].舰船电子对抗,2020,43(5):1-7.
- [17] 熊波,曾鑫,卫永平.基于电磁场矢量合成的交叉眼干 扰效果评估[J].探测与控制学报,2016,38(3):32-34.
- [18] 李洪涛. 靶机加装交叉眼干扰设备的方法研究[D].
 2021年无人系统高峰论坛(USS 2021)论文集.长沙: 《无人系统技术》编辑部,2021:125-128.
- [19] 杨沛斌.张娜.基于作战效能评估的交叉眼干扰设备在 飞机上的布局[J].航空科学技术,2015,26(6):35-38.
- [20] SHANG Z G, BAI W X, FU X L. Analysis of Cross-Eye jamming [C]// International Proceedings of Computer Science & Information Tech. 2012;104-109.
- [21] 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.
- [22] 刘天鹏,魏玺章,刘振,等.交叉眼干扰研究综述[J]. 雷达学报,2019(1):140-153.
- [23] 卢建荣.分布式多源反向交叉眼干扰的关键技术研究 [D].长沙:国防科技大学,2017.
- [24] 高晓冬,郑鑫.防控导弹雷达导引头对抗美军机载典型 干扰措施探讨[J].制导与引信,2013,34(3):6-13.
- [25] 牟成虎,郑博,徐卉,等.基于 MIMO 技术的"交叉眼" 干扰对抗方法[J].制导与引信,2017,38(2):1-5.
- [26] 胡艳芳,陈伯孝,吴传章.基于单脉冲三维成像的抗交 叉眼干扰方法[J].系统工程与电子技术,2022,44(4): 1188-1194.
- [27] 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.
- [28] 王国伟,王红卫,张曦.多环路交叉眼干扰的波前相位 畸变研究[J].信号处理,2018,34(10):1188-1196.
- [29] 刘伟,孟进,周亮,等.矩形反向交叉眼干扰建模[J].系 统工程与电子技术,2019,41(11):2453-2459.
- [30] 刘芳,陈嘉贝,吕欢,等.新构型下多环路反向交叉眼干 扰分析[J].电子科学学报,2020(4):603-613.
- [31] 周亮,刘永才,孟进,等.两源交叉眼与多源线阵交叉眼 干扰的干扰性能分析[J].电子学报,2021,49(12): 2289-2298.