

旁瓣消隐系统检测损失问题研究

李一立, 陶建锋, 李兴成

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 雷达通常采用旁瓣消隐系统来抑制从旁瓣进入的脉冲式干扰,但SLB系统在抑制旁瓣干扰的同时,也会带来检测损失问题。针对这一问题,在建立SLB系统模型的基础上,对造成SLB系统检测损失的原理进行了研究,给出了SLB系统的检测损失概率的定义,推导了基于非中心 χ^2 分布的旁瓣消隐雷达检测损失概率计算公式,得出了影响SLB系统检测损失概率的主要因素有雷达检测门限、天线增益参数、消隐门限,平均信噪比的结论,并通过理论分析和仿真实验,具体分析了消隐门限不同取值对SLB系统检测损失概率的影响,确定了消隐门限值的最优解,能在保证对于干扰抑制的同时降低SLB系统的检测损失概率,最后通过仿真验证了结论的重要性。

关键词 旁瓣干扰;旁瓣消隐;检测损失概率;非中心 χ^2 分布

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.03.010

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)03-0045-05

Research on Detection-loss Probability of SLB System

LI Yili, TAO Jianfeng, LI Xingcheng

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

Abstract: In radar usually the side-lobe blanking system is adopted to eliminate pulse-type interference from side-lobe. But SLB system also results in detection-loss. In order to solve this problem, this paper establishes a model of SLB system, studies the cause of the detection-loss resulting from SLB system, gives the definition for the detection-loss probability and derives the equation of the detection-loss probability based on non-central chi-square distribution. The equation illustrates that the radar detection threshold, antenna gain parameters, blanking threshold, mean SNR all can influence the detection-loss probability. The theoretical analysis and simulation proves that different blanking thresholds will result in different outcomes. At last, fix on an optimum blanking threshold is fixed on to reduce the probability and eliminate interference well, and a simulation is done to verify the importance of the conclusion.

Key words: side-lobe interference; side-lobe blanking; detection-loss probability; non-central chi-square distribution

旁瓣消隐(Side-lobe Blanking, SLB)技术是一项重要的雷达抗干扰技术^[1-3],通过对主辅通道输出

收稿日期:2014-09-29

作者简介:李一立(1991-),男,江苏连云港人,硕士生,主要从事雷达信号处理建模与研究.E-mail:85624335@qq.com

引用格式:李一立,陶建锋,李兴成.旁瓣消隐系统检测损失问题研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(3):45-49. LI Yili, TAO Jianfeng, LI Xingcheng. Research on Detection-loss Probability of SLB System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(3): 45-49.

的对比,能有效抑制从旁瓣进入的脉冲式干扰。众多学者对旁瓣消隐技术的工作原理、工作性能进行了分析,但是他们主要讨论旁瓣消隐系统对雷达抗干扰能力的改善,比如干扰封闭概率、目标检测概率等,对 SLB 技术带来的检测损失鲜有探讨。然而在现代雷达信号处理中,雷达的检测损失有可能导致严重后果,

为了降低雷达因采用 SLB 系统带来的检测损失,本文探讨了检测损失发生的原理,给出了检测损失概率的定义,并通过理论分析和仿真实验分析如何降低检测损失发生的概率。

1 旁瓣消隐原理

典型的旁瓣消隐技术模型^[4]见图 1,模型采用主通道和辅助通道的两通道系统,其主通道输出为 U ,辅助通道输出为 V 。2 个通道都由收发天线、接收机、平方律检波器组成。其中主天线是定向天线,主瓣窄而副瓣较宽,而辅助天线采用的是全向天线,其增益(记作 G_a)要远低于主天线的主瓣增益(记作 G)而大于主天线的副瓣增益(记作 G_m)。为了后续讨论方便,我们将主辅天线的增益以主瓣增益进行归一化处理,辅助天线增益的归一化值定义为 $\omega^2 = G_a/G$,主天线旁瓣增益归一化值定义为 $\delta^2 = G_m/G$ 。辅助天线增益/主天线副瓣增益定义为 $\beta = G_a/G_m$,见图 2。

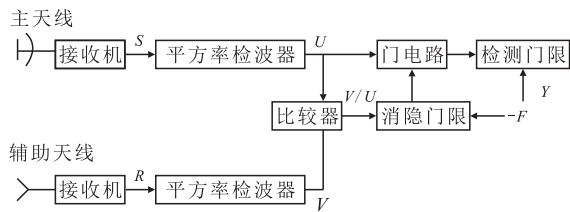


图 1 旁瓣消隐系统模型

Fig.1 Sidelobe blanking system model

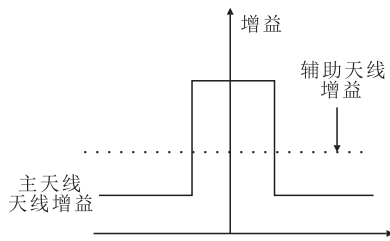


图 2 归一化天线增益模型

Fig.2 Simple antenna patterns

雷达工作时,将主通道的输出信号 U 、辅助通道输出 V 送入比较器进行比较,比较结果与消隐门限值 F 进行比较,当 $V/U > F$ 时,即主通道输出小于辅助通道输出时,系统就认为有干扰从雷达旁瓣进入,此时消隐逻辑将产生消隐脉冲控制选通电路

封闭主通道输出。当 $V/U < F$ 时,即主通道输出大于辅助通道输出时,主通道输出通过选通电路,进入信号处理环节。

2 旁瓣消隐系统检测性能分析

通常情况下,当比较器的输出大于消隐门限值 F 时,旁瓣消隐系统认为有干扰从雷达旁瓣进入,消隐逻辑将产生消隐脉冲控制选通电路封闭主通道输出。在没有干扰的情况下,如果辅助通道的噪声功率大于主通道的噪声加信号功率,主通道输出将被消隐,雷达丢掉对小目标检测显示的机会,造成目标回波丢失。这就是采用 SLB 系统造成的检测损失。在此,将检测损失的概念定义如下:当目标回波从主天线主瓣进入雷达系统时,其大于雷达检测门限,由于雷达系统采用了 SLB 技术,造成目标回波被错误消隐,这就是采用 SLB 造成的检测损失,而发生这种检测损失的概率称为检测损失概率。

下面通过推导检测损失概率公式,分析影响检测损失的参数,进而确定如何选择参数,降低旁瓣消隐技术带来的检测损失。

将主通道输出 U 和辅助通道输出 V 画成以 U 为横轴, V 为纵轴的直角坐标图。梅塞尔结构将其分为 3 个区域^[5]:首先根据封闭门限 F 将其分为 3 大部分,一个是 $V > FU$ 的部分,一个是 $V < FU$ 的部分。第 1 个区域对应着封闭区域 B,第 2 个区域根据门限值 Y 又分为 2 个子区域,零值区域 $N(U < Y)$,检测区域 $D(U > Y)$,见图 3。

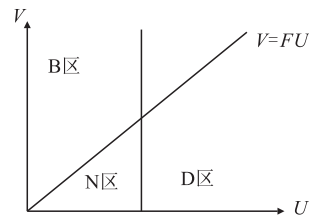


图 3 3 种假设示意图

Fig.3 Three defined regions of $U - V$ space

参考文献[6]在梅塞尔结构的基础上增加一个区域,将其划分为 4 个区域(见图 4):

- 1)检测区域 $D(V \leq FU$ 且 $U \geq Y$);
- 2)零值区 $N(V \leq FU$ 且 $U \leq Y$);
- 3)封闭区 $B1(V > FU$ 且 $U < Y$);
- 4)封闭区 $B2(V > FU$ 且 $U \geq Y$)。

零值区域 N 和检测区域 D 与梅塞尔结构一样,但是封闭区被分成了 2 个子区域: $B1$ 区($U < Y$), $B2$ 区($U > Y$)。位于 $B1$ 区时, $V > FU$, 封闭逻辑电路将雷达封闭,但是主通道的输出小于检测门

限,无论有无 SLB 电路,对雷达系统的检测都不会造成什么影响。当主辅通道信号落入 B2 区时, $V > FU$, 主通道信号将被封闭逻辑电路封闭,但是这个时候的主通道信号大于检测门限 ($U \geq Y$), 当信号是目标回波时,就会造成检测损失,当信号是干扰信号时,就是 SLB 进行了正确的封闭。

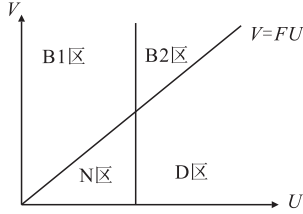


图 4 4 种假设示意图

Fig.4 Four defined regions of $U - V$ space

根据非中心 χ^2 分布定义, d 个均值为 m_k , 方差为 δ^2 的独立高斯随机变量, 其平方和服从自由度为 d 、非中心化参数为 λ 中心 χ^2 分布^[7-8]。其中 $\lambda = \sum_{k=1}^N m_k^2$ 。以 d 、 δ^2 、 λ 为参数的信号加噪声回波的概率密度函数是^[5]:

$$p(y) = \frac{1}{2\delta^2} \left(\frac{y}{\lambda}\right)^{(d-2)/4} e^{-(y+\lambda)/2\delta^2} I_{d/2-1} \left(\frac{\sqrt{y\lambda}}{\delta^2}\right), y \geq 0 \quad (1)$$

式中: y 为接收信号加噪声包络经过平方律检波器的输出; $I_{d/2-1}$ 为 $d/2 - 1$ 阶的第 1 类修正贝塞尔函数。

设 y_n 为第 n 个回波单元在接收机输出端的同相信号和正交信号的和, 那么 y_n 就服从自由度 $d = 2$ 的非中心 χ^2 分布。 $M_{1,n} = \sqrt{E_N} \cos(\theta)$, $M_{2,n} = \sqrt{E_N} \sin(\theta)$, 这里 θ 是随机相位。 E_N 是输出峰值功率。其非中心化参数为: $\lambda = M_{1,n}^2 + M_{2,n}^2 = E_N$ 。

同理, N 个不相关单元回波的平方和服从 $2N$ 个自由度、非中心化参数 $\lambda = \sum_{n=1}^N m_k^2$ 的非中心 χ^2 分布。对式(1)中 y , λ 以 $2\delta^2$ 归一化, 即 $x = \sum_{n=1}^N Y_n / 2\delta^2$, $\mu = \sum_{n=1}^N E_n / 2\delta^2$ 。 μ 是主通道信噪比, 辅助通道信噪比是 $\omega^2 \mu$ 。其概率密度函数:

$$p(x | N, \mu) = \left(\frac{X}{\mu}\right)^{(N-1)/2} e^{-(x+\mu)} I_{N-1}(2\sqrt{x\mu}), x \geq 0 \quad (2)$$

目标为非波动模型时, 其信噪比 μ 为定值, 用 P_{B2c} 表示其检测损失概率, 下标 c 表示非波动模型, P_{B2c} 的表达式为^[9]:

$$P_{B2c}(N, \mu, Y, \omega^2, F) = \int_Y^\infty p(U | N, \mu) \left[\int_{FU}^\infty p(V | N, \omega^2 \mu) dV \right] dU \quad (3)$$

式(3)是式(2)在图 4 中 B2 区上的双重积分。然而, 非波动模型对于目标回波的模拟是不可靠的,

当目标不是波动模型的时候, 其回波信噪比是波动的, 文献[10]提出了一种信噪比符合 GAMMA 模型的波动模型, 其概率密度函数为:

$$P_G(t | \eta, K) = \left(\frac{K}{\eta}\right)^K \frac{t^{K-1}}{\Gamma(K)} e^{-Kt/\eta}, x \geq 0, \eta \geq 0 \quad (4)$$

式中: η 是 N 个单元中总归一化功率水平的平均值, 也就是 N 个单元的平均信噪比; K 是波动参数; $\Gamma(K)$ 是伽马函数。对式(3)进行修正可得波动模型的检测概率为^[9]:

$$P_{SB2G}(N, \eta, Y, \omega^2, F, \dots) = \int_0^\infty P_{SB2C}(N, t, Y, \omega^2, F) P_G(t | \eta, K) dt \quad (5)$$

将式(3)、式(4)带入式(5)得:

$$P_{SB2G}(N, \eta, Y, \omega^2, F, K) = \frac{1}{(F+1)^N} \left(\frac{K/\eta}{1+\omega^2+K/\eta}\right)^K \sum_{i=0}^\infty \frac{\left(\frac{K/\eta}{1+\omega^2+K/\eta}\right)^i}{i!} \sum_{m=0}^{N+i-1} \frac{\left(\frac{F}{F+1}\right)^m}{m!} \sum_{z=0}^\infty \frac{\Gamma(N+m+z)\Gamma(K+i+z) \left(\frac{1/(F+1)}{1+\omega^2+K/\eta}\right)^z}{\Gamma(N+z)\Gamma(K)k!} \sum_{j=0}^{N+m+z-1} e^{-(F+1)Y} \frac{[(F+1)Y]^j}{j!} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出影响检测损失概率的主要因素有检测门限 Y 、天线增益参数 ω^2 、消隐门限 F , 平均信噪比 η 。

3 仿真分析

需要确定的参数有消隐门限 F 、检测门限 Y 、辅助天线归一化增益 ω 。根据 SLB 系统原理, ω 通常取 $-40 \sim 15$ dB。那么剩下的影响检测损失的因素就是消隐门限 F 、检测门限 Y , 平均信噪比 η 。

仿真 1: 验证不同消隐门限值 F 对检测损失概率的影响。横坐标为消隐门限值 F , 纵坐标为检测损失概率。蓝线对应 $N=4$, $\eta=10$ dB, $\omega^2=10e-8$, $Y=13.8155$, $K=2$; 红线对应 $N=1$, $\eta=10$ dB, $\omega^2=10e-8$, $Y=13.8155$, $K=2$ 。从图 5 可以看出, 随着 F 的增大, 检测损失概率在减小。理论上说, F 取的越大检测损失概率越小, 但是 SLB 是一个完整的系统, 检测损失概率只是其中需要考虑的一个方面, 还需要综合考虑 F 的取值对于其它性能的影响^[4]。因此需要对此综合考虑, 正常情况下, 检测损失概率处于 $0.0005 \sim 0.005$ 时, 即 F 在 $0.3 \sim 0.5$ 之间取值是可以接受的, 这样即可以保证检测损失较小也可以使得假目标概率不至于过大。

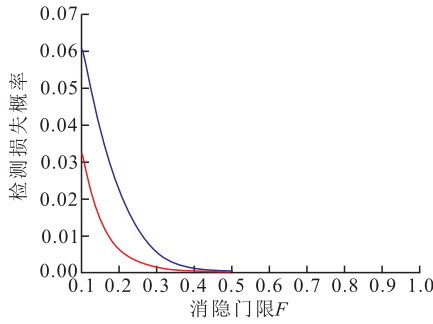


图5 不同 F 值的检测损失概率

Fig.5 Probability of detection-loss versus F

仿真 2:验证不同检测门限值对检测损失概率的影响,横坐标为检测门限值,纵坐标为检测损失概率。蓝线对应 $N=4, \eta=10\text{ dB}, \omega^2=10e-8, F=0.4, K=2$;红线对应 $N=1, \eta=10\text{ dB}, \omega^2=10e-8, F=0.4, K=2$ 。从图 6 可以看出,在确定的 F 值下,检测门限值增大,检测损失概率将减小,这是因为随着检测门限值的增大,即使没有 SLB 系统,可以通过检测门限进入接收机的信号也越来越少,这造成了雷达系统更大的检测损失,所以不能盲目的增加检测门限值,而是要综合考虑恒虚警及其他的因素。

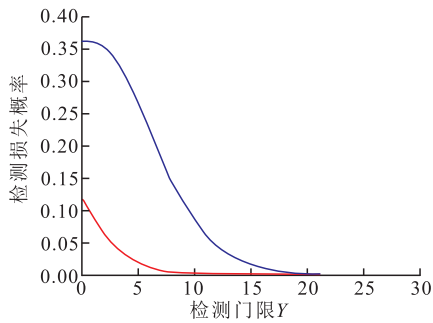


图6 不同检测门限值 Y 的检测损失概率

Fig.6 Probability of detection-loss versus Y

仿真 3:验证不同的信噪比对检测损失概率的影响,横坐标为信噪比,纵坐标为检测损失概率。蓝线对应 $N=1, \omega^2=10e-8, F=0.4, K=2, Y=13.8155$;红线对应 $N=1, \omega^2=10e-8, F=0.5, K=2, Y=13.8155$;绿线对应 $N=1, \omega^2=10e-8, F=0.6, K=2, Y=13.8155$ 。从图 7 中可以看出,在不同 SNR 条件下,检测损失概率会有一个最大值。但是目标回波的 SNR 是无法控制的。而检测损失概率对 F 的取值很敏感,在不同 F 取值的情况下,检测损失概率变化比较大,随着 F 的增大,检测损失概率减小,这意味着,从这一点上考虑,应使 F 越大越好,根据仿真 1 的结论,我们确定 F 在 $0.3\sim 0.5$ 之间。

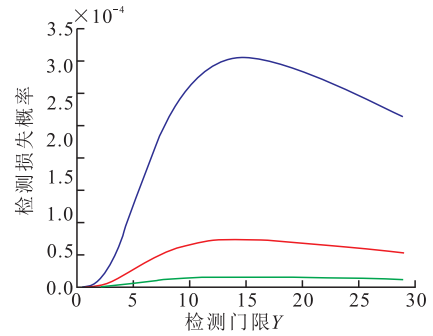


图7 不同信噪比的检测损失概率

Fig.7 Probability of detection-loss versus η

将上述所得的结论应用到 SLB 系统中,从图 8 上我们可以看出,在 $F=0.4$ 的时候,旁瓣干扰被很好地抑制,且目标信号得到了较好地保存,SLB 系统很好地实现了它的功能。

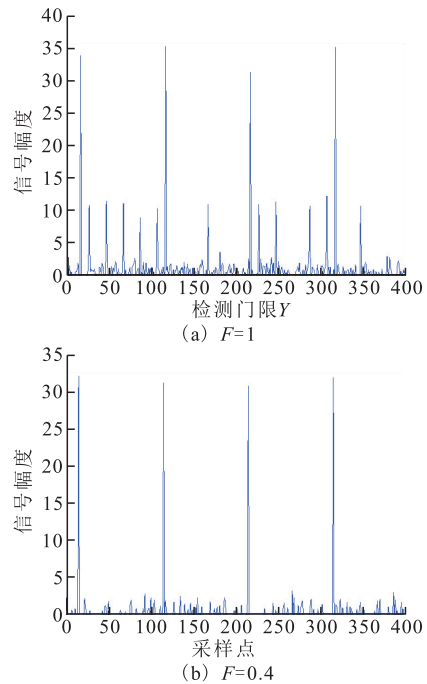


图8 F 不同取值情况下 SLB 系统输出

Fig.8 The different output of SLB at different F

4 结语

本文从 SLB 系统的原理出发,分析了采用 SLB 系统带来目标回波信号的检测损失问题,给出了检测损失概率得定义,通过对检测损失概率公式的推导,给出了基于非中心 χ^2 分布的 SLB 系统检测损失概率公式,进行了参数选择分析。最后通过仿真实验验证了结论的正确性,有一定的应用价值。

参考文献(References):

[1] 刘双青,蔡新举,占超.雷达抗干扰技术现状及发展趋势[J].舰船电子工程,2013,33(8):6-10.

- LIU Shuangqing, CAI Xinju, ZHAN Chao. Radar Anti-jamming Technology Status and Development Trend [J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(8): 6-10. (in Chinese)
- [2] 袁英,朱维.对旁瓣消隐雷达干扰的可行性分析[J].舰船电子对抗,2014,37(2):32-34.
YUAN Ying, ZHU Wei. Feasibility Discussion of Jamming Side-lobe Blanking Radar[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014, 37(2): 32-34. (in Chinese)
- [3] 陈霄恒.脉冲压缩雷达旁瓣匿影干扰技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.
CHEN Xiaoheng. Research on Jamming Techniques Against Pulse-compression Radar Using Sidelobe-Blanking[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [4] 陈伯孝.现代雷达系统分析与设计[M].西安:西安电子科技大学出版社,2012.
CHEN Boxiao. The Analysis and Design of Modern Radar[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [5] 周畅,朱振波,汤子跃.脉压雷达旁瓣匿影工作模式与抗干扰性能分析[J].航天电子对抗,2014,30(1):47-51.
ZHOU Chang, ZHU Zhenbo, TANG Ziyue. Study on Operating Model and Anti-jamming Performance of Side-Lobe Blanking in Pulse-compression Radar[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2014, 30(1): 47-51. (in Chinese)
- [6] 张绍璞.关于非中心 χ^2 分布性质的研究[J].天津科技大学学报,2009,24(1):75-78.
ZHANG Shaopu. Research about the Properties of Non-Central χ^2 Distribution[J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2009, 24(1): 75-78. (in Chinese)
- [7] De Maio A, Farina A, Gini F. Performance Analysis of the Sidelobe Blanking System for Two Fluctuating Jammer Model[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 1082-1091.
- [8] Shnidman D A. Side-lobe Blanking with Expanded Models [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 2011, 47(2): 790-805.
- [9] Shnidman D A. Generalized Radar Clutter Model[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 857-865.
- [10] Shnidman D A. Radar Detection Probabilities and Their Calculation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(3): 928-950.

(编辑:徐楠楠)