

匿影对脉冲侦收损失影响分析



扫码阅读全文

成伟兰*, 何纯全, 冯婷婷, 刘坚强

海军研究院, 北京 100161

摘要: [目的] 针对难以准确评估匿影对目标脉冲侦收影响的问题, 研究匿影引起的目标脉冲损失概率。 [方法] 分析匿影对目标脉冲分选的影响, 结合侦察设备信号分选方法, 确定目标脉冲损失判别准则; 研究不同时序下目标脉冲被匿影波门擦除后输出波形序列, 分析目标脉冲截余信号的变化规律, 推导周期匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率和目标周期脉冲损失概率、时变占空比匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率的表达式; 最后, 对比分析目标脉冲各损失概率的计算与仿真实验结果, 二者最大绝对偏差约为 5.8×10^{-4} , 可忽略不计。 [结果] 研究获得了目标脉冲损失概率和平均损失概率的数学模型, 并验证了模型的准确性。 [结论] 匿影对脉冲侦收损失影响的定量评估, 为准确分析匿影条件下脉冲侦收漏警率提供了输入, 也为侦察设备选用匿影措施决策提供了支撑。

关键词: 侦察; 匿影; 脉冲干扰; 信号分选; 损失概率; 数学模型

中图分类号: U665.26

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04408

0 引言

电磁环境效应是现代大型平台必须解决的关键问题, 其防护技术是其中研究热点之一^[1-2]。另一方面, 对于设计阶段未能解决的干扰问题, 通常在使用阶段采取一定技术管理措施, 匿影便是其中之一。若平台上同时配备大功率脉冲发射机(如雷达)和侦察设备时, 后者因为宽带接收, 极易受到前者的干扰, 引起漏报或误报问题。匿影作为一种抑制脉冲干扰的有效管理措施, 常用于抑制脉冲发射设备对同平台接收设备的干扰^[3-4]。所谓匿影, 是指在干扰脉冲持续期间控制接收设备, 使其不接收外来射频信号的技术措施。美军从上世纪 50 年代就开始在舰船上对雷达和侦察接收设备进行匿影, 以消除雷达间以及雷达对侦察接收设备的干扰^[5]。目前匿影相关技术和应用场景还在不断改进和拓展中^[6-11]。

侦察设备接受匿影管理时, 在数微秒或数十微秒内停止信号接收, 可能造成部分目标脉冲脉宽变窄甚至全部损失。脉冲宽度是信号分选依据参数之一, 匿影会导致目标脉冲损失, 引起侦察设备漏报, 因此其对侦察设备性能的影响引起了众多工程人员关注。田益明^[12]探讨了匿影对信号

侦收失败的影响, 按照剩余信号脉冲数小于最小脉冲数的侦收失败判定原则, 对匿影引起的侦收失败率进行仿真计算, 但未给出判定脉冲损失的判据以及脉冲损失概率。卢俊华^[13]针对特定脉冲环境密度示例, 统计分析匿影后平台所有目标脉冲宽度变化情况, 结合密集脉冲信号环境中脉冲丢失概率统计规律, 计算匿影条件下脉冲丢失概率变化情况, 得出匿影会增大侦察设备脉冲损失概率的结论。王强^[14-15]等分析了匿影对侦察设备有效工作比的影响。在评估匿影对具体目标脉冲信号分选所造成的损失方面, 目前尚未有相关报道。

为定量评估匿影波门对脉冲侦收的影响, 本文将分析匿影波门与目标脉冲不同时序关系下的脉冲脉宽变化规律, 结合信号分选原则, 建立目标脉冲各损失概率评估数学模型, 用以判断匿影是否导致侦察设备脉冲侦收漏警率过高、无法满足使用需求, 进而为匿影措施决策提供评估依据。

1 匿影对目标脉冲侦收的影响

1.1 匿影原理

匿影的基本思路是在干扰脉冲持续期间使接收设备停止接收外来射频信号, 一般通过匿影波

门实现。如图1所示,雷达对侦察设备造成干扰,需采取匿影措施予以解决。具体而言,在雷达发射脉冲期间输出匿影波门,使侦察设备在匿影波门内不接收目标脉冲,因此图1中侦察设备接收不到第1个目标脉冲,但第2个目标脉冲不受影响,可以正常接收。

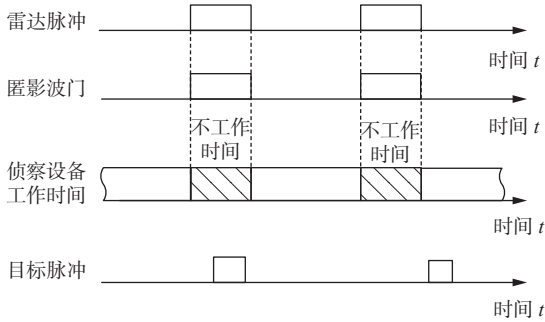


图1 侦察设备匿影工作原理

Fig. 1 Blanking principle of reconnaissance equipment

1.2 匿影对目标脉冲分选的影响

经匿影波门控制后,目标脉冲可能被完全擦除,或残留部分信号。以图2(a)中目标脉冲A为例,截余信号有2种可能:仅有1个残留信号,如图2(b)所示;有2个残留信号,分别位于原目标脉冲头部和尾部,如图2(c)所示。

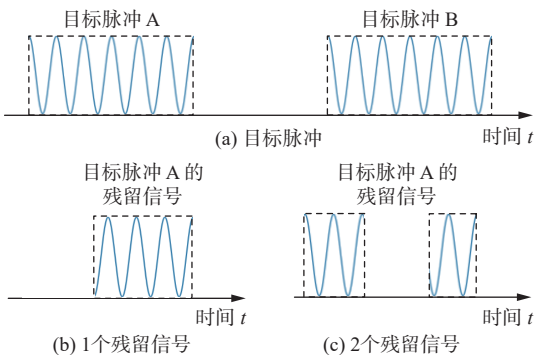


图2 目标脉冲及其被匿影波门擦除后的残留波形

Fig. 2 Target pulse and its residual waveform after blanking gate erasure

侦察设备对目标脉冲分选时,脉冲宽度是分选参数依据之一。通常预先设定脉宽划分界限,将目标脉冲脉宽与划分区间比对,并按其落入区间归入相应组别^[4]。因此,被完全擦除的目标脉冲及残留脉宽过短的信号将不能归入原目标脉冲对应组别,造成脉冲损失、侦收漏警率升高。

2 匿影引起的目标脉冲损失分析

2.1 目标脉冲损失判别准则及损失概率

为了判别目标脉冲是否损失,需要找出所属

脉宽区间的下限。将侦察设备进行信号分选的脉宽划分界限值按照从小到大的顺序排列,依次为 $\tau_{1_rc}, \tau_{2_rc}, \dots, \tau_{m_rc}, \tau_{m+1_rc}, \dots, \tau_{M_rc}$ 。若目标脉冲脉宽 $\tau_{tg} \geq \tau_{M_rc}$ 时,所属脉宽区间的下限 $\tau_{m_rc} = \tau_{M_rc}$ 。若目标脉冲脉宽 $\tau_{1_rc} \leq \tau_{tg} < \tau_{m_rc}$ 时,依据目标脉冲宽度 τ_{tg} ,由下式确定其所属脉宽区间的下限 τ_{m_rc} 。

$$\tau_{m_rc} \leq \tau_{tg} < \tau_{m+1_rc} \quad (1)$$

式中: τ_{m_rc} 为从小到大、信号分选的第 m 个脉宽划分界限,其中 m 为正整数; τ_{tg} 为目标脉冲的脉宽。

目标脉冲损失判别准则如下:

1) 脉宽小于脉宽最小划分界限 τ_{1_rc} 的目标脉冲,被匿影波门擦除后,剩余脉宽若小于侦察设备可识别的脉冲宽度,则判为损失。考虑到最严苛情况,也可只要目标脉冲与匿影波门出现重叠即判为损失。

2) 脉宽不小于脉宽最小划分界限 τ_{1_rc} 的目标脉冲将被归入 $[\tau_{m_rc}, \tau_{m+1_rc})$ 的组别;被匿影波门擦除后,若剩余脉宽小于 τ_{m_rc} ,则该目标脉冲不再归于原组别,并判为损失,否则判为未损失。

据此,将匿影引起的目标脉冲损失概率定义为

$$\delta = n/N \quad (2)$$

式中: δ 为匿影引起的目标脉冲损失概率; n 为匿影引起的目标脉冲损失数; N 为未匿影时目标脉冲总数。

2.2 目标脉冲损失概率评估数学模型

匿影波门的占空比既可固定也可时变,其由干扰脉冲决定。若干扰侦察设备的脉冲是周期信号,匿影波门呈周期性出现,占空比固定;若干扰脉冲重频变化,匿影波门占空比时变。若侦察设备受到多台脉冲发射设备干扰,需对各脉冲发射设备发送的匿影波门在时域内合并处理。控制侦察设备工作的匿影波门系合并所得脉冲,此时匿影波门的占空比随时间变化,不再固定不变。因此,匿影波门可分为固定占空比的周期匿影波门和时变占空比匿影波门两种类型。

2.2.1 周期匿影波门引起的目标脉冲损失概率

2.2.1.1 目标周期脉冲损失概率

对匿影波门和目标脉冲均为周期信号情况下的目标脉冲损失概率进行分析。周期匿影波门的脉冲重复周期为 T_{bk} ,脉宽为 τ_{bk} ;目标周期脉冲的脉冲重复周期为 T_{tg} ,脉宽为 τ_{tg} ;目标周期脉冲前沿领先于周期匿影波门前沿的时延(以下简称时延)为 ΔT ,如图3所示。

针对周期匿影波门和目标周期脉冲的重复周

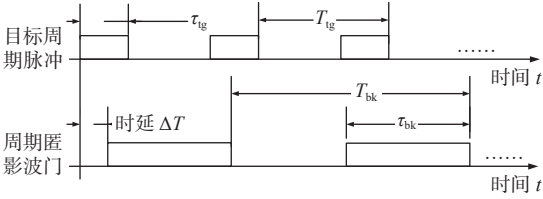


图 3 目标周期脉冲与周期匿影波门的时序关系示意图

Fig. 3 Timing relationship between target periodic pulse and periodic blanking gate

期、脉宽和时延上的数十种组合进行分类分析, 研究不同时序条件下目标脉冲经匿影波门擦除后的输出波形序列。

通过分析发现, 周期匿影波门下目标周期脉冲截余脉冲序列变化规律与时延 ΔT 相关, 时延不同, 截余脉冲序列及变化也不同。但时延 ΔT 一定时, 截余脉冲序列呈现周期性变化, 变化周期为目标脉冲、匿影波门的 2 个脉冲重复周期 T_{ig} 和 T_{bk} 的最小公倍数, 记为 T_{CM} 。针对上述每种时序, 计算 T_{CM} 长度内目标脉冲损失数量, 推导以下表达式: 1) 周期匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率和目标周期脉冲损失概率; 2) 时变占空比的匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率。最后, 经综合归纳得到评估数学模型。

1) 目标周期脉冲宽度小于脉宽最小划分界限。此时, 目标周期脉冲损失概率随时延变化, 以图 4 中所示基本单元为周期循环。

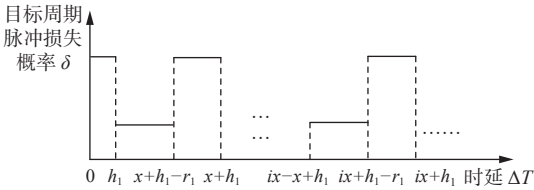


图 4 周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率 (\$\tau_{ig} < \tau_{1_{rc}}\$)

Fig. 4 Probability of target periodic pulse loss caused by periodic blanking gate (\$\tau_{ig} < \tau_{1_{rc}}\$)

令

$$h_1 = \tau_{dt} \bmod x \quad (3)$$

$$r_1 = (2\tau_{dt} - \tau_{ig} + \tau_{bk} \bmod T_{ig}) \bmod x \quad (4)$$

式中: τ_{dt} 为侦察设备能够识别的最小脉宽; \bmod 为求余运算符 ($a \bmod b$ 表示整数 a 除以整数 b 后所得余数); x 为 T_{bk} 和 T_{ig} 的最大公约数。

目标周期脉冲损失概率如式(5)和式(6)所示。

$$\delta = [\tau_{bk} + 2\tau_{dt} - \tau_{ig} - r_1 + x] / T_{bk}, \quad \Delta T \in [0, h_1] \cup (ix + h_1 - r_1, ix + h_1] \quad (5)$$

$$\delta = [\tau_{bk} + 2\tau_{dt} - \tau_{ig} - r_1] / T_{bk}, \quad \Delta T \in (ix - x + h_1, ix + h_1 - r_1] \quad (6)$$

式中, i 为正整数。

2) 目标周期脉冲宽度不小于脉宽最小划分界限。此时, 目标周期脉冲损失概率数学表达式分为 3 种情况:

若 $T_{bk} > T_{ig}$, 且满足 $\tau_{bk} < \tau_{ig}$ 及 $2\tau_{m_{rc}} \leq \tau_{ig} - \tau_{bk}$ 时,

$$\delta = 0 \quad (7)$$

若 $T_{bk} < T_{ig}$, 且满足 $0 \leq T_{bk} - \tau_{bk} < \tau_{m_{rc}}$ 时,

$$\delta = 100\% \quad (8)$$

其他情况下, 令

$$h_2 = \tau_{m_{rc}} \bmod x \quad (9)$$

$$r_2 = (2\tau_{m_{rc}} + \tau_{bk} \bmod T_{ig} - \tau_{ig}) \bmod x \quad (10)$$

则有:

(1) 若 $h_2 \geq r_2$ 时, 目标周期脉冲损失概率随时延变化, 以图 5(a) 中所示基本单元为周期循环, 表达式如式(11)和式(12)所示。

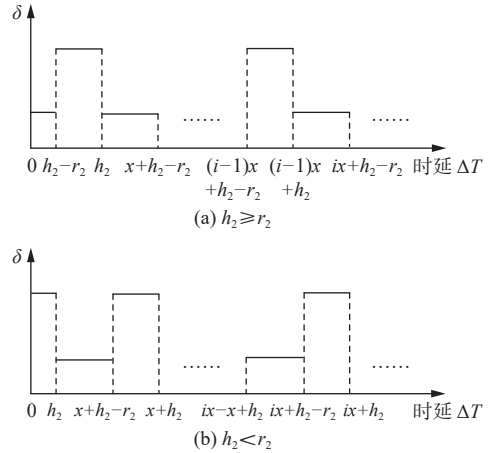


图 5 周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率 (\$\tau_{ig} \ge \tau_{1_{rc}}\$)

Fig. 5 Probability of target periodic pulse loss caused by periodic blanking gate (\$\tau_{ig} \ge \tau_{1_{rc}}\$)

$$\delta = [\tau_{bk} + 2\tau_{m_{rc}} - \tau_{ig} - r_2] / T_{bk}, \quad \Delta T \in [0, h_2 - r_2] \cup (ix - x + h_2, ix + h_2 - r_2] \quad (11)$$

$$\delta = [\tau_{bk} + 2\tau_{m_{rc}} - \tau_{ig} - r_2 + x] / T_{bk}, \quad \Delta T \in (ix - x + h_2 - r_2, ix - x + h_2] \quad (12)$$

(2) 若 $h_2 < r_2$ 时, 目标周期脉冲损失概率随时延变化, 以图 5(b) 中基本单元为周期循环, 表达如式(13)和式(14)所示。

$$\delta = [\tau_{bk} + 2\tau_{m_{rc}} - \tau_{ig} - r_2 + x] / T_{bk}, \quad \Delta T \in [0, h_2] \cup (ix + h_2 - r_2, ix + h_2] \quad (13)$$

$$\delta = [\tau_{bk} + 2\tau_{m_{rc}} - \tau_{ig} - r_2] / T_{bk}, \quad \Delta T \in (ix - x + h_2, ix + h_2 - r_2] \quad (14)$$

2.2.1.2 目标脉冲平均损失概率

由上可知, 针对周期匿影波门和目标周期脉

冲,目标脉冲损失概率随时延变化。由于时延具有随机性,工程上也关注平均损失概率,即目标脉冲损失概率在时延上的平均值。匿影波门出现时刻由干扰脉冲决定,目标脉冲出现时刻取决于目标发射脉冲的时机,二者相互独立,图1所示时延 ΔT 为随机变量且服从均匀分布,据此完成目标脉冲平均损失概率计算。

1) 目标脉冲宽度小于脉宽最小划分界限。匿影波门和目标脉冲均为周期信号,目标脉冲宽度小于信号分选脉宽最小划分界限时,计算得到目标周期脉冲平均损失概率 δ_{p_avg} 为

$$\delta_{p_avg} = (\tau_{bk} + 2\tau_{dt} - \tau_{tg})/T_{bk} \quad (15)$$

2) 目标脉冲宽度不小于脉宽最小划分界限。匿影波门和目标脉冲均为周期信号,目标脉冲宽度不小于信号分选脉宽最小划分界限时,计算得到目标周期脉冲平均损失概率 δ_{p_avg} 为

$$\delta_{p_avg} = \begin{cases} 0, & T_{bk} > T_{tg} \text{ 且 } \tau_{bk} < \tau_{tg} \text{ 及 } 2\tau_{m_rc} \leq \tau_{tg} - \tau_{bk} \\ 100\%, & T_{bk} < T_{tg} \text{ 且 } 0 \leq T_{bk} - \tau_{bk} < \tau_{m_rc} \\ (\tau_{bk} + 2\tau_{m_rc} - \tau_{tg})/T_{bk}, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

可见,不论目标脉冲宽度是否小于信号分选脉宽最小划分界限,目标周期脉冲平均损失概率均与自身占空比和重频无关。

对于重频参差、重频抖动、重频滑变的目标脉冲,可看作多个不同重频的目标周期脉冲组成。由于目标周期脉冲平均损失概率与自身占空比、重频无关,因此式(15)~式(16)不仅适用于目标周期脉冲,也适用于重频变化目标脉冲。

2.2.2 时变占空比匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率

时变占空比匿影波门可看作由数个不同占空比的子匿影波门组成,如图6所示,目标脉冲平均损失概率为各子匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率的加权和。

$$\delta_{g_avg} = \sum_{i=1}^Q \delta_{i_bk} \Delta t_{i_bk} / \Delta t_{ob} \quad (17)$$

式中: δ_{g_avg} 为时变占空比匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率; Q 为子匿影波门的个数; δ_{i_bk} 为

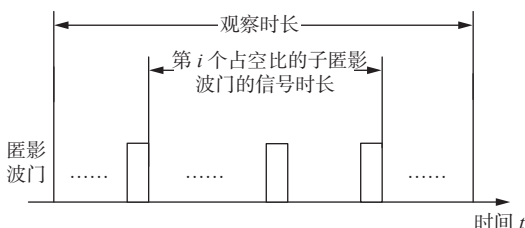


图6 时变占空比匿影波门

Fig. 6 Blanking gate with a time-varying duty cycle

第 i 个子匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率,可由式(15)~式(16)计算获得; Δt_{i_bk} 为第 i 个子匿影波门信号时长; Δt_{ob} 为观察时长。

3 仿真实验

为检验目标脉冲各损失概率数学模型是否正确,开展仿真实验,包括周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率及目标脉冲平均损失概率。时变占空比匿影波门引起的平均损失概率是否正确取决于周期匿影波门引起的平均损失概率数学模型的正确性。因此,仅需对周期匿影波门引起的损失概率和平均损失概率数学模型开展仿真实验。

采用 Python 语言及其 Numpy 库实现数值仿真。利用 Numpy 生成匿影波门与目标脉冲序列脉冲,仿真时长大于目标脉冲的重复周期 T_{tg} ,且大于匿影波门的脉冲重复周期 T_{bk} 最小公倍数的300倍。采用尺取法检查每个目标脉冲被匿影波门擦除的情况,结合损失判别准则,统计仿真时长内目标脉冲总数,完成目标脉冲损失概率和平均损失概率仿真计算。

3.1 目标周期脉冲损失概率仿真实验

针对周期匿影波门、目标周期脉冲,对不同前沿时延 ΔT 下的目标脉冲损失概率进行仿真计算。

目标脉冲宽度小于脉宽最小划分界限,即 $\tau_{tg} < \tau_{1_rc}$ 时,仿真输入参数和相应中间参数如表1所示。图7(a)为序列仿真时序,图7(b)为仿真结果与评估数学模型的计算结果比较。对于图7(b)中的仿真结果,若目标脉冲与匿影波门存在重叠,可判定为损失,即取 $\tau_{dt} = \tau_{tg}$;图7(b)中的计算结果系根据式(5)、式(6)和 $\tau_{dt} = \tau_{tg}$ 计算得到。仿真结果与计算结果的比较表明,二者的损失概率随时延变化的规律完全一致,最大绝对偏差约为 7.5×10^{-5} ,可忽略不计。

目标脉冲宽度不小于脉宽最小划分界限,即 $\tau_{tg} \geq \tau_{1_rc}$ 且 $h_2 \geq r_2$ 时,仿真输入参数和相应中间参数如表2所示。图8(a)为序列仿真时序,图8(b)为仿真结果与评估数学模型的计算结果比较。图8(b)中所示计算结果系根据式(11)和式(12)

表1 周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率仿真参数 ($\tau_{tg} < \tau_{1_rc}$)

Table 1 Simulation parameters for target periodic pulse loss probability caused by periodic blanking gate ($\tau_{tg} < \tau_{1_rc}$)

输入参数					中间参数		
T_{tg}	τ_{tg}	T_{bk}	τ_{bk}	τ_{dt}	x	r_1	h_1
/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs
30	0.1	20	2	0.1	10	2.1	0.1

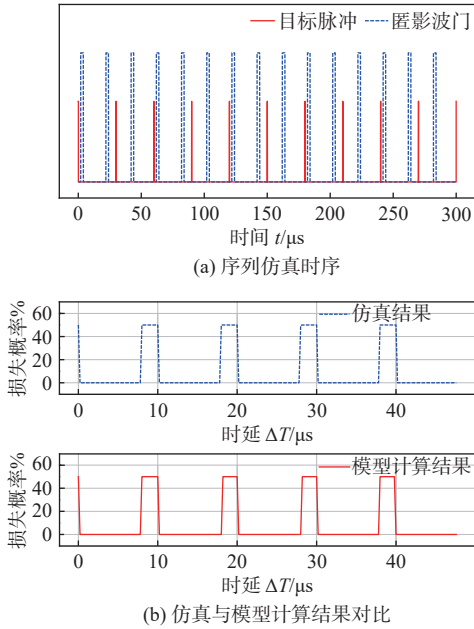


图 7 周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率仿真验证 ($\tau_{ig} < \tau_{1_{rc}}$)

Fig. 7 Simulation verification for target periodic pulse loss probability caused by periodic blanking gate ($\tau_{ig} < \tau_{1_{rc}}$)

表 2 周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率仿真参数 ($\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}, h_2 \geq r_2$)

Table 2 Simulation parameters for target periodic pulse loss probability caused by periodic blanking gate ($\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}, h_2 \geq r_2$)

输入参数					中间参数		
T_{ig}	τ_{ig}	T_{bk}	τ_{bk}	$\tau_{m_{rc}}$	x	r_2	h_2
/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs
150	6	190	8	5	10	2	5

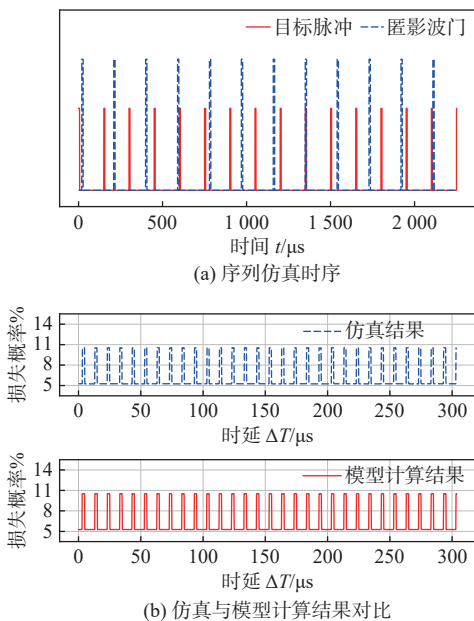


图 8 周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率仿真验证 ($\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}, h_2 \geq r_2$)

Fig. 8 Simulation verification for target periodic pulse loss probability caused by periodic blanking gate ($\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}, h_2 \geq r_2$)

计算得到。仿真结果与计算结果比较表明, 二者的损失概率随时延变化的规律完全一致, 最大绝对偏差约为 1.0×10^{-4} , 可忽略不计。

目标脉冲宽度不小于脉宽最小划分界限, 即 $\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}$ 且 $h_2 < r_2$ 时, 仿真输入参数和相应中间参数如表 3 所示。图 9(a) 为序列仿真时序, 图 9(b) 为仿真结果与评估数学模型的计算结果比较。图 9(b) 中所示计算结果系根据式 (13) 和式 (14) 计算得到。仿真结果与计算结果比较表明, 二者的损失概率随时延变化的规律完全一致, 最大绝对偏差约为 1.7×10^{-4} , 可忽略不计。

表 3 周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率仿真参数 ($\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}, h_2 < r_2$)

Table 3 Simulation parameters for target periodic pulse loss probability caused by periodic blanking gate ($\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}, h_2 < r_2$)

输入参数					中间参数		
T_{ig}	τ_{ig}	T_{bk}	τ_{bk}	$\tau_{m_{rc}}$	x	r_2	h_2
/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs	/μs
200	10	120	10	9	40	18	9

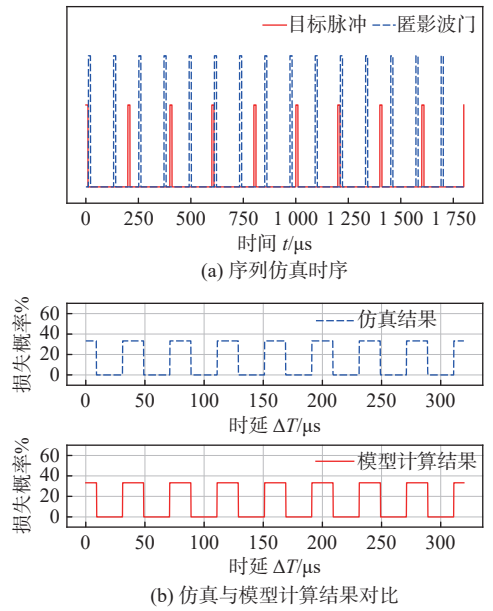


图 9 周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率仿真验证 ($\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}, h_2 < r_2$)

Fig. 9 Simulation verification for target periodic pulse loss probability caused by periodic blanking gate ($\tau_{ig} \geq \tau_{1_{rc}}, h_2 < r_2$)

由图 7~图 9 可知, 损失概率的仿真结果与模型计算结果偏差非常小, 分析发现这是由仿真计算的精度所致。周期匿影波门引起的目标周期脉冲损失概率评估数学模型准确有效。

3.2 目标脉冲平均损失概率仿真验证

周期匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率评估数学模型适用于目标周期脉冲、重频变化目

目标脉冲这两种脉冲的计算评估,其中后者由前者拓展得到,对后者进行仿真可验证评估数学模型的正确性。因此,本文以重频抖动目标脉冲为代表,开展了周期匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率仿真验证。

仿真时,通过改变匿影波门宽度 τ_{bk} 来改变占空比,采用蒙特卡罗仿真方法生成目标脉冲序列。

目标脉冲宽度小于脉宽最小划分界限,即 $\tau_{tg} < \tau_{1_rc}$ 时,仿真输入参数如表 4 所示,表中 J_{itter} 表示目标脉冲重频抖动率。图 10(a) 为仿真结果与评估数学模型的计算结果比较。对于图中仿真结果,若目标脉冲与匿影波门存在重叠,可判定为损失,即取 $\tau_{dt} = \tau_{tg}$; 图中计算结果系依据式 (15) 和 $\tau_{dt} = \tau_{tg}$ 计算得到。对比结果表明,二者的平均损失概率的最大绝对偏差约为 5.8×10^{-4} , 发生在占空比约为 17% 处。

表 4 周期匿影波门引起的重频抖动目标脉冲平均损失概率仿真输入参数 ($\tau_{tg} < \tau_{1_rc}$)

Table 4 Simulation parameters for the average loss probability of target pulse with repetition frequency jitter caused by periodic blanking gate ($\tau_{tg} < \tau_{1_rc}$)

$T_{tg}/\mu s$	$\tau_{tg}/\mu s$	$T_{bk}/\mu s$	$\tau_{dt}/\mu s$	$J_{itter}/\%$
180	0.2	100	0.2	10

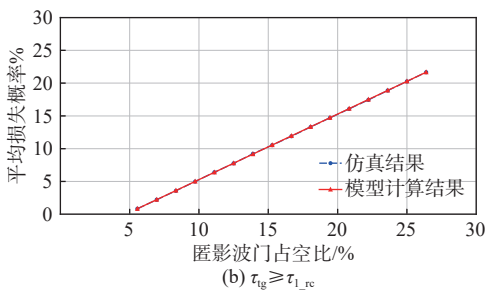
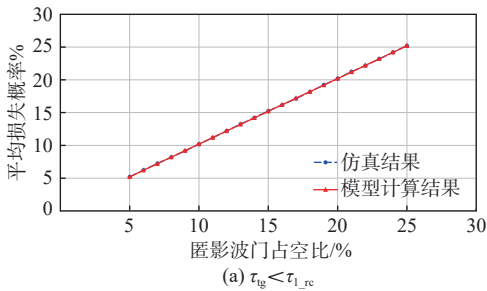


图 10 周期匿影波门引起的重频抖动目标脉冲平均损失概率仿真验证

Fig. 10 Simulation verification for the average loss probability of target pulse with repetition frequency jitter caused by periodic blanking gate

目标脉冲宽度不小于脉宽最小划分界限,即 $\tau_{tg} \geq \tau_{1_rc}$ 时,仿真输入参数如表 5 所示。图 10(b) 为仿真结果与评估数学模型的计算结果比较,图中计算结果系依据式 (16) 计算得到。对比结果表

明,二者的平均损失概率最大绝对偏差约为 2.8×10^{-4} , 发生在占空比约为 23% 处。

表 5 周期匿影波门引起的重频抖动目标脉冲平均损失概率仿真输入参数 ($\tau_{tg} \geq \tau_{1_rc}$)

Table 5 Simulation parameters for the average loss probability of target pulse with repetition frequency jitter pulse caused by periodic blanking gate ($\tau_{tg} \geq \tau_{1_rc}$)

$T_{tg}/\mu s$	$\tau_{tg}/\mu s$	$T_{bk}/\mu s$	$\tau_{m_rc}/\mu s$	$J_{itter}/\%$
270	21	360	20	5

由图 10 可知,平均损失概率的仿真结果与模型计算结果偏差非常小,分析发现该偏差主要由仿真计算精度决定,其量级在可接受范围内,可忽略不计。周期匿影波门引起的目标脉冲平均损失概率评估数学模型准确有效。

4 结 语

在复杂大型平台和同址系统中,因空间邻近和频谱冲突,侦察设备容易受到脉冲发射设备的干扰,常用匿影来抑制,但会损失目标脉冲,增大侦收漏警率,影响侦察设备对目标的侦察能力。侦察设备保持良好的目标侦察能力至关重要,影响到是否能够顺利遂行任务。本文提出的目标脉冲损失概率评估数学模型,实现了定量评估匿影导致的目标脉冲损失情况,可以为准确分析匿影条件下侦收漏警率提供输入,也为匿影措施的选用决策提供支撑。

参考文献:

- [1] 郑生全,蔡敬标,阮兵,等. 舰船装备强电磁环境保护技术综述 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(4): 1-19.
ZHENG S Q, CAI J B, RUAN B, et al. A review of strong electromagnetic environment protection technology for ship equipment[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(4): 1-19 (in Chinese).
- [2] 刘敏,蔡宗棋,卞立安,等. 基于高功率微波脉冲注入的氮化镓低噪声放大器效应研究 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(4): 32-42.
LIU M, CAI Z Q, BIAN L A, et al. Study on the effect of gallium nitride low noise amplifier based on high power microwave pulse injection[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(4): 32-42 (in both Chinese and English).
- [3] 邵文建,王传虎. 一种基于信道化的电磁兼容管控技术 [J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(1): 49-51.
SHAO W J, WANG C H. An electromagnetic compatibility management and control technology based on channelization[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2022, 45(1): 49-51 (in Chinese).

- [4] 徐亚光, 夏惠诚, 徐佳. 基于电磁兼容管控的舰艇编队防空作战效能评估 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32(11): 87–89.
XU Y G, XIA H C, XU J. Research on effectiveness evaluation of air defense of warship formation based on EMC management and control[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(11): 87–89 (in Chinese).
- [5] LAW P E Jr. Shipboard electromagnetics[M]. Boston : Artech House, Inc, 1987: 148-150.
- [6] 李力, 巩强, 唐凌. 雷达侦察设备的匿影设计 [J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(3): 22–25.
LI L, GONG Q, TANG L. Design of blanking in radar reconnaissance device[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(3): 22–25 (in Chinese).
- [7] 王有朝. 舰载雷达自适应匿影方法研究 [J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(6): 32–34, 38.
WANG Y C. Study of adaptive blanking method in shipborne radar[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2011, 34(6): 32–34, 38 (in Chinese).
- [8] CUCHO - PADIN G, WANG Y, LI E, et al. Radio frequency interference detection and mitigation using compressive statistical sensing[J]. Radio Science, 2019, 54(11): 986–1001.
- [9] ZHU Y B, HUANG S Q, GUO K, et al. An adaptive hybrid blanking algorithm to mitigate the DME pulse interference on BDS B2a receivers[J]. GPS Solutions, 2023, 27(4): 164.
- [10] PEREZ-PORTERO A, QUEROL J, CAMPS A, et al. RFI detection and mitigation for advanced correlators in interferometric radiometers. Remote Sensing, 2022, 14(18): 4672. DOI: 10.3390/rs14184672.
- [11] JARDAK N. Chirp interference mitigation in GNSS systems using chirp parameter estimation and pulse blanking[J]. IEEE Access, 2024, 12: 181617–181631.
- [12] 田益明. 匿影管理对舰载电子侦察装备影响的仿真 [J]. 系统仿真技术, 2018, 14(2): 123–126.
TIAN Y M. Simulation study on effect of blanking management on shipborne electronic reconnaissance equipment[J]. System Simulation Technology, 2018, 14(2): 123–126 (in Chinese).
- [13] 卢俊华. 电子支援 ESM 系统信号处理虚警分析 [J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(5): 4–8.
LU J H. Analysis of false alarm in signal processing of shipborne ESM system[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(5): 4–8 (in Chinese).
- [14] 王强, 黄暄. 舰船电磁环境对电子对抗系统作战性能的影响 [J]. 舰船科学技术, 2007, 29(3): 87–90, 93.
WANG Q, HUANG X. Influence of shipboard electromagnetic environment (EME) on EW system[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(3): 87–90, 93 (in Chinese).
- [15] 汤仕平, 张勇, 万海军, 等. 电磁环境效应工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 285.
TANG S P, ZHANG Y, WAN H J, et al. Electromagnetic environmental effects engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 285 (in Chinese).

Analysis of the impact of blanking on pulse loss in interception

CHENG Weilan*, HE Chunquan, FENG Tingting, LIU Jianqiang

Naval Research Academy, Beijing 100161, China

Abstract: [**Objective**] To accurately evaluate the impact of blanking on pulse interception, this study examines the loss probabilities of pulses caused by the blanking. [**Methods**] The influence of blanking on pulse sorting was analyzed. Based on the pulse sorting method used by reconnaissance equipment, the criteria for identifying the loss pulses were established. The output waveform of a pulse erased by the blanking gate was then examined under various time-sequence relationships between the pulse and the blanking gate, allowing the varying law of the residual pulse to be obtained. The expressions were derived for the average loss probabilities of the pulses and the loss probabilities of the periodic pulses both caused by the periodic blanking gates, as well as for the average loss probabilities of the pulses under blanking gates with time-varying duty cycles. Finally, each pulse loss probability was validated by comparing the calculation results with numerical simulation. The maximum absolute deviation between the two was approximately 5.8×10^{-4} , which is negligible. [**Results**] The mathematical models for the pulse loss probabilities and the average loss probabilities are obtained, and their accuracy has been verified. [**Conclusion**] The research provides a quantitative evaluation of the influence of the blanking on the loss of the intercepted pulse. It provides the input for accurately analyzing the missed alarm probability in pulse interception with the blanking gate and supports decision-making regarding the use of blanking measures.

Key words: reconnaissance; blanking; pulse interference; signal sorting; loss probability; mathematical models