

微波脉冲对导航接收机跟踪环路载噪比的影响*

赵敏, 周星, 陈亚洲

(陆军工程大学 石家庄校区, 河北 石家庄 050003)

摘要: 为了明确微波脉冲对导航接收机的最佳干扰参数, 通过对微波脉冲干扰下导航接收机跟踪环路相关处理的理论分析, 根据微波脉冲谱线、扩频码谱线以及相干积分时间三者之间的关系, 提出一种微波脉冲干扰分类方法, 推导了不同参数微波脉冲干扰下相关输出功率和载噪比, 并进行了试验验证。理论分析与试验结果表明, 当微波脉冲宽度大于等于扩频码周期且小于相干积分时间时, 进入相干积分器带宽内的多条微波脉冲谱线干扰某一条扩频码谱线, 该微波脉冲参数对导航接收机的干扰效果最佳, 且优于连续波干扰; 随着干扰谱线数量增多, 跟踪环路相关输出功率值增加, 载噪比减小, 干扰效果增强。

关键词: 导航接收机; 微波脉冲; 跟踪环路; 相关输出功率; 载噪比

中图分类号: TN965; TN972; TN787 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

文献标志码: A **文章编号:** 1001-2486(2023)04-196-09



听语音
聊科研
与作者互动

Effect of microwave pulse on the carrier-to-noise ratio of navigation receiver tracking loops

ZHAO Min, ZHOU Xing, CHEN Yazhou

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To clarify the optimal interference parameters of microwave pulses to navigation receivers, by analyzing theoretically the tracking loop correlation processing of navigation receiver under microwave pulse interference, a interference classification method was proposed on the basis of the relationship between microwave pulse spectral lines, spread spectrum code spectral lines and coherent integration time, the correlation output power and carrier-to-noise ratio under microwave pulse interference with different parameters was further derived, finally experimental verification was carried out. Theoretical analysis and experimental results show that when the microwave pulse width is greater than or equal to the spreading code period and less than the coherent integration time, a spreading code spectral line is interfered with multiple microwave pulse spectral lines which enters the bandwidth of the coherent integrator, the microwave pulse has the best interference effect on navigation receivers, and is better than continuous wave interference; with the increase of the number of interference spectral lines, the correlation output power is increased, the carrier-to-noise ratio is decreased, and the interference effect is enhanced.

Keywords: navigation receiver; microwave pulses; tracking loop; correlated output power; carrier-to-noise ratio

导航接收机是无人装备实施准确定位的关键组成部分,在无人装备中有着广泛地应用。由于卫星运行高度高,星上空间有限,发射到地球表面由导航接收机接收到的导航信号功率密度相对较低,较容易实现对导航信号的电磁干扰^[1]。随着高功率微波武器的出现和实际应用,微波脉冲对电磁敏感度较高的导航接收机构成了巨大威胁,严重制约着无人装备作战性能的发挥^[2-3]。

范宇清等^[4]基于场-路联合仿真给出了以微波源峰值功率为变量的导航接收机敏感器件损伤评价曲线;李冰等^[5]给出了单频连续波、脉冲

调幅和正弦调频信号干扰下电子系统的时间相关、带宽相关敏感类型以及最敏感信号;文献[6-9]分别揭示了带内和带外连续波对导航接收机的作用规律,提出可以通过载噪比跟踪门限值来评估导航系统是否定位,并指出导航接收机的跟踪环路是敏感薄弱环节。针对导航接收机的跟踪环路,文献[10-12]从载波和相位跟踪误差的角度仿真分析了不同类型电磁干扰对导航接收机跟踪性能的影响。考虑到不同参数电磁脉冲会对导航接收机产生不同的干扰效应,文献[13-18]提出了两种不同的电磁脉冲干扰分

* 收稿日期:2022-06-20

基金项目:国家部委基金资助项目(JCKYS2019DC1)

作者简介:赵敏(1985—),女,河北邯郸人,博士研究生,E-mail:zhao_min_2012@126.com;

陈亚洲(通信作者),男,江苏滨海人,教授,博士,博士生导师,E-mail:chen_yazhou@sina.com

类方法,一种是根据脉冲重复周期和扩频码周期的关系,另一种基于脉冲宽度、相干积分时间以及扩频码周期的关系;针对不同的分类分别推导了不同脉冲干扰下导航接收机相关输出功率表达式,仿真验证了理论的可行性,并分析了不同脉冲干扰对导航接收机的干扰效果。由于微波脉冲兼具连续波和电磁脉冲的双重特性,通过试验发现,微波脉冲对导航接收机的效应规律方面存在一定局限性。

本文根据微波脉冲谱线、扩频码谱线以及相干积分时间三者之间的关系,提出一种适用于微波脉冲的干扰分类方法,在此基础上推导了微波脉冲干扰下相关器输出的等效载噪比表达式,并结合试验研究验证理论分析的可行性。

1 理论分析

1.1 导航接收机信号捕获理论

自动增益控制 (automatic gain control, AGC) 电路通常位于导航接收机射频前端的最后一级,通过前期试验发现,载波频率为 S 波段、功率密度为 45 W/cm^2 、脉冲宽度分别为 100 ns 和 500 ns 时,单脉冲辐照下均不会对导航接收机产生明显的影响,但当重复频率提升至 50 Hz 和 100 Hz 时,导航接收机的载噪比瞬间出现大幅度下降,接收机定位失锁。通过计算发现,耦合的能量值未达到 AGC 电路的饱和值^[19],不会对射频前端的 AGC 电路造成阻塞效应和损伤效应,主要会对射频前端后级的捕获跟踪环路造成影响,而相关器输出功率是决定导航信号质量的关键因素^[13]。因此,可以通过不同脉冲重频 f_p 、脉宽 τ 和占空比 D 。微波脉冲干扰下导航接收机相关器输出功率来定量分析干扰效果,从而确定最佳干扰参数。在不考虑微波脉冲的上升沿和下降沿的情况下,微波脉冲可以简化为矩形脉冲信号调制连续波,微波脉冲干扰信号经过射频前端和模数转换 (analog to digital conversion, ADC) 后,到达相关器输入端处的数学表达式为:

$$I_p(nT_s) = \sqrt{P_j} \sum_{z=1}^{\infty} U(nT_s - zT) e^{j(2\pi f_j nT_s + \theta_j)} \quad (1)$$

式中: $U(nT_s)$ 是矩形脉冲信号, T_s 为采样时间; $T = 1/f_p$ 为脉冲重复周期,脉冲宽度 τ 为 $T \times D_c$; P_j 为微波脉冲功率密度, f_j 为微波脉冲的载波频率, θ_j 为微波脉冲载波相位。

在导航接收机相关器中,如图 1 所示,微波脉冲信号与本地产生的载波 $e^{j(2\pi \hat{f}_D nT_s + \hat{\theta})}$ 和粗捕获 (coarse acquisition, C/A) 码 $C(nT_s - \Delta\tau)$ 相乘,

实现载波剥离和码剥离,还原导航信号。

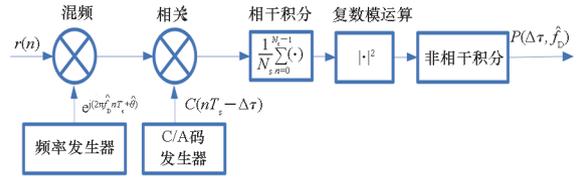


图 1 导航接收机相关器框图

Fig. 1 Block diagram of the navigation receiver correlator

为了提高导航接收机捕获弱信号的能力,本文所用北斗导航接收机采用相干积分和非相干积分叠加的方法减小相关值噪声,其中相干积分时间 $T_d = N_s T_s$, N_s 为积分时间内的采样数,非相干积分次数为 X ,此时相关器输出功率为:

$$P_1 = X \cdot \left| \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} \sqrt{P_j} \sum_{z=1}^{\infty} U(nT_s - zT) \cdot C(nT_s - \Delta\tau) e^{j(2\pi \Delta f_j nT_s + \Delta \theta_j)} \right|^2 \quad (2)$$

式中, $\Delta f_j = f_j - \hat{f}_D$ 和 $\Delta \theta_j = \theta_j - \hat{\theta}$ 分别为微波脉冲载波频率和相位与本地产生载波频率 \hat{f}_D 和相位 $\hat{\theta}$ 的估计误差。利用指数形式傅里叶级数将周期矩形脉冲信号展开,取近似且只保留主瓣频谱得:

$$\sum_{z=1}^{\infty} U(nT_s - zT) = \sum_{s=-N_u}^{N_u} u_s e^{j2\pi(s/T)nT_s} \quad (3)$$

式中, u_s 为傅里叶级数系数, N_u 为谱线数量。

将该矩形脉冲信号搬移到中心频率 f_j 处,得到周期微波脉冲的频谱,如图 2 所示。

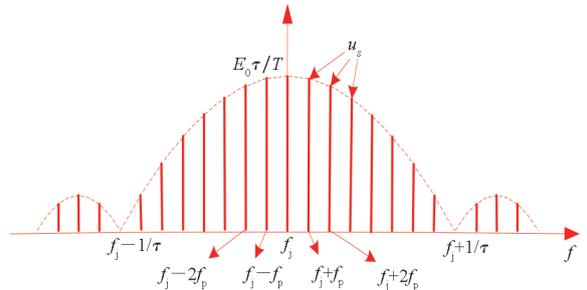


图 2 周期微波脉冲信号频谱图

Fig. 2 Periodic microwave pulse signal spectrum

从图 2 中可以看出,其包络为 sinc 函数,由频谱间隔为 f_p 的多条谱线组成,信号能量主要集中在主瓣内,主瓣频谱宽度为 $2/\tau$,所含谱线数 $2N_u$ 为 $2T/\tau$,中心谱线系数 u_0 为 $E_0 \tau/T$,其中, E_0 为微波脉冲幅值, τ/T 为脉冲占空比。

同理,周期 C/A 码也可以展开为:

$$\begin{aligned} C(nT_s - \Delta\tau) &= \sum_{i=-N_c}^{N_c} c_i e^{j2\pi(i/T_c)(nT_s - \Delta\tau)} \\ &= \sum_{i=-N_c}^{N_c} c_i e^{j2\pi(i/T_c)nT_s} \cdot e^{-j2\pi(\Delta\tau/T_c)i} \quad (4) \end{aligned}$$

式中, c_i 为傅里叶级数系数, 其频谱包络与微波脉冲类似, 均为 sinc 函数^[14], C/A 码码元周期为 $1/T_c$, 所含谱线数为 $2N_c$, 将式(3) 和式(4) 代入式(2), 当干扰频率估计误差 $\Delta f_j = (w/T_c) + \delta f_j$ 时(其中 w 代表第 w 条 C/A 码谱线), 相关器输出功率为:

$$P_1 = X \cdot P_j \cdot \left| \sum_{i=-N_c}^{N_c} \sum_{s=-N_u}^{N_u} u_s c_i e^{-j2\pi(\Delta\tau/T_c)i} \cdot \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} e^{j[2\pi(i/T_c + s/T + \Delta f_j)nT_s]} \right|^2 \cdot |e^{j\Delta\theta_j}|^2$$

$$= X \cdot P_j \cdot \left| \sum_{i=-N_c}^{N_c} \sum_{s=-N_u}^{N_u} u_s c_i e^{-j2\pi(\Delta\tau/T_c)i} \cdot \text{sinc}[\pi(i/T_c + s/T + w/T_c + \delta f_j)T_d] \right|^2 \quad (5)$$

从式(5) 中可以看出, C/A 码和微波脉冲的众多谱线均会影响相关器输出功率。当微波脉冲干扰信号谱线位于相干积分器带宽 $1/T_d$ 内, 则代表该条干扰谱线漏过相关处理, 从而对后续跟踪环路造成干扰, 若干扰谱线与最大幅值的 C/A 码谱线重合, 相关器的输出功率显著增加, 导航接收机受到较为严重的干扰。

1.2 微波脉冲干扰对导航接收机载噪比的影响

根据上述理论分析得知, 相关器输出功率与微波脉冲参数、干扰频偏、相干积分器带宽以及 C/A 码参数相关。因此, 根据 C/A 码、相干积分器和微波脉冲干扰信号三者频谱关系, 分成六种情况来定量分析相关器输出功率。

第一种情况: 微波脉冲宽度 τ 远大于相干积分时间 T_d 且微波脉冲间隔 $T - \tau$ 小于重新捕获时间 T_b , 此种情况下微波脉冲干扰、相干积分器和 C/A 码三者主瓣频谱包络如图 3 所示。

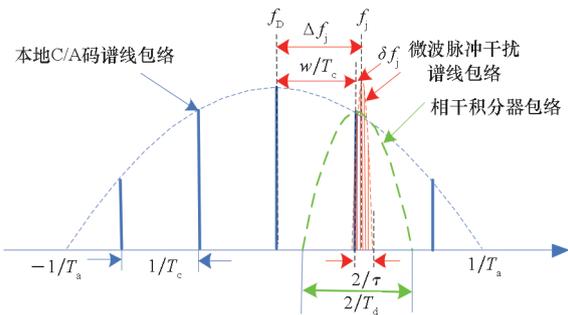


图 3 微波脉冲干扰、相干积分器和 C/A 码三者主瓣频谱的关系图($\tau \gg T_d$ 且 $T - \tau < T_b$)

Fig. 3 Microwave pulse, coherent integrator and C/A code signal spectrum when $\tau \gg T_d$ and $T - \tau < T_b$

从图 3 中可以看出, 微波脉冲干扰信号谱线的主瓣频谱宽度为 $2/\tau$, 相干积分器的频谱宽度为 $2/T_d$, 较窄的微波脉冲干扰信号主瓣频谱宽度

完全落入相干积分器频带内, 即所有的脉冲干扰谱线漏过相干积分器, 仅干扰了一条 C/A 码谱线。假设被干扰的谱线序号为 w , 如果 $i \neq -w$, 则干扰谱线将不能落入相干积分器主瓣带宽内, 此时相关器输出功率近似为 0; 将 $i = -w$ 代入式(5), 则相关器输出功率为:

$$P_1 = X \cdot P_j \left| \sum_{s=-N_u}^{N_u} u_s c_{-w} e^{j2\pi(\Delta\tau/T_c)w} \cdot \text{sinc}[\pi(s/T + \delta f_j)T_d] \right|^2 \tau \gg T_d \quad (6)$$

由于 C/A 码频谱具有对称性, 有 $c_w = c_{-w}$ 。考虑到所有脉冲干扰谱线都集中在相关积分器中, 即 $N_u/T \ll 1/T_d$, 因此式(6) 中的 s/T 可以忽略不计。式(6) 可简化为:

$$P_1 = X \cdot P_j \left| \sum_{s=-N_u}^{N_u} u_s c_w \text{sinc}(\pi\delta f_j T_d) \right|^2 \cdot |e^{j2\pi(\Delta\tau/T_c)w}|^2$$

$$= X \cdot P_j \cdot |c_w|^2 [\text{sinc}(\pi\delta f_j T_d)]^2 \sum_{s=-N_u}^{N_u} |u_s|^2 \quad (7)$$

脉冲功率谱密度是归一化的, 因此有 $\sum_{s=-N_u}^{N_u} |u_s|^2 = 1$, 相关器输出功率可进一步简化为:

$$P_1 = X \cdot P_j \cdot |c_w|^2 [\text{sinc}(\pi\delta f_j T_d)]^2 \quad (8)$$

对比式(8) 和文献[16] 推导的连续波相关器输出功率发现, 两者的相关器输出功率相同。

第二种情况: 微波脉冲宽度 τ 大于等于 C/A 码周期 T_c 且小于相干积分时间 T_d , 此种情况下上述三者主瓣频谱包络的关系如图 4 所示。

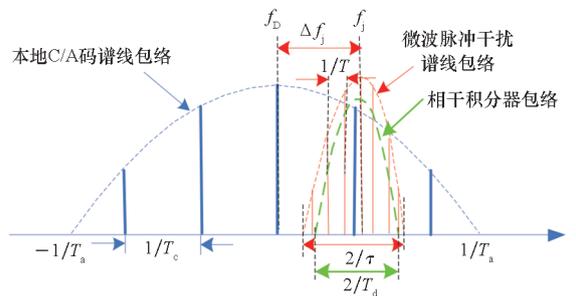


图 4 微波脉冲干扰、相干积分器和 C/A 码三者主瓣频谱的关系图($T_c \leq \tau < T_d$)

Fig. 4 Microwave pulse, coherent integrator and C/A code signal spectrum when $T_c \leq \tau < T_d$

由图 4 可以看出, 含中心谱线在内的多条脉冲干扰谱线干扰了第 w 条 C/A 码谱线, 脉冲干扰谱线的数量为 $2N_{cp} = 2T/T_d$, 即脉冲干扰谱线数由脉冲重复周期 T 和相干积分时间 T_d 决定。当相干积分时间 T_d 和脉冲宽度 τ 一定时, 脉冲重复频率 f_p 越小, 脉冲频谱间隔越窄, 脉冲干扰谱线数越多。此时相关器输出功率为:

$$P_1 = X \cdot P_j \cdot |c_w|^2 \sum_{s=-N_{ep}}^{N_{ep}} |u_s|^2 \left\{ \text{sinc} \left[\pi \left(\frac{s}{T} + \delta f_j \right) T_d \right] \right\}^2 \quad (9)$$

第三种情况:当脉冲重复周期 T 与 C/A 码周期 T_c 相近时,两者的频谱包络如图 5 所示。可以看出,微波脉冲和 C/A 码的频谱间隔相近,所有的 C/A 码谱线均可能被微波脉冲干扰谱线干扰,此时相关器输出功率为:

$$P_1 = X \cdot P_j \left| \sum_{i=-N_c}^{N_c} \sum_{s=-N_u}^{N_u} u_s c_{w+s} e^{j2\pi(\Delta\tau/T_c)(w+s)} \cdot \text{sinc} \left[\pi \left(\frac{-s}{T_c} + \frac{s}{T} + \delta f_j \right) T_d \right] \right|^2 \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,相关器输出功率涉及 c_{w+s} ,因此干扰频率的设置与前两种情况有所差异,这种情况下微波脉冲干扰谱线不再受 T_d 的限制都能起作用,微波脉冲干扰谱线包络不足以窄到被相干积分器包络覆盖,无论占空比如何,由于脉冲干扰谱线之间的频谱间隔接近于 C/A 码谱线,所有的干扰谱线都会对相关器的输出功率带来影响,这意味着相关器输出功率与占空比关系不大。

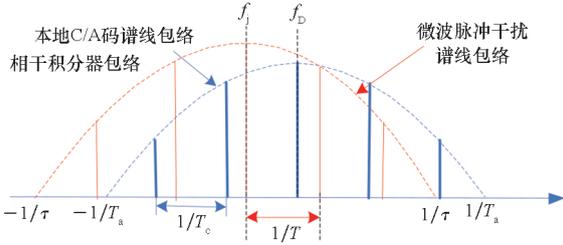


图5 C/A 码谱线和微波脉冲干扰信号谱线关系图 ($T_c \approx T$)

Fig. 5 Microwave pulse and C/A code signal spectrum when $T_c \approx T$

第四种情况:微波脉冲宽度 τ 小于 C/A 码周期 T_c 且大于等于码元宽度 T_a ,两者的频谱包络如图 6 所示。

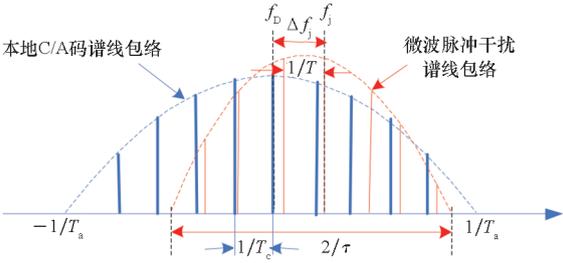


图6 C/A 码谱线和微波脉冲干扰信号谱线关系图 ($T_a \leq \tau < T_c$)

Fig. 6 Microwave pulse and C/A code signal spectrum when $T_a \leq \tau < T_c$

所有的脉冲干扰谱线干扰多条 C/A 码谱线。

受干扰的 C/A 码谱线数为 $2N_{ec} = 2T_c/\tau$ 。此时相关器输出功率为:

$$P_1 = X \cdot P_j \left| \sum_{i=-N_{ec}}^{N_{ec}} \sum_{s=-N_u}^{N_u} u_s c_i e^{-j2\pi(\Delta\tau/T_c)i} \cdot \text{sinc} \left[\pi \left(\frac{i}{T_c} + \frac{w}{T} + \frac{s}{T} + \delta f_j \right) T_d \right] \right|^2 \quad (11)$$

第五种情况:微波脉冲宽度 τ 小于 C/A 码码元宽度 T_a ,两者的频谱包络如图 7 所示。本地 C/A 码谱线包络落入了微波脉冲干扰谱线包络,微波脉冲重复频率 $1/T$ 略大于 C/A 码带宽 $1/T_c$,部分脉冲干扰谱线干扰了全部 C/A 码谱线,起干扰作用的脉冲干扰谱线数为 $2N_{ep} = 2T_p/T_a$ 。将该值代入式(5),此时相关器的输出功率为:

$$P_1 = X \cdot P_j \left| \sum_{i=-N_c}^{N_c} \sum_{s=-N_{ep}'}^{N_{ep}' } u_s c_i e^{-j2\pi(\Delta\tau/T_c)i} \cdot \text{sinc} \left[\pi \left(\frac{i}{T_c} + \frac{w}{T} + \frac{s}{T} + \delta f_j \right) T_d \right] \right|^2 \quad (12)$$

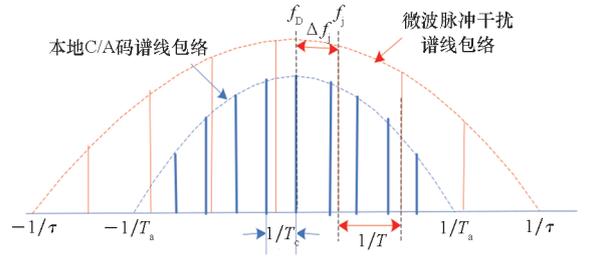


图7 C/A 码谱线和微波脉冲干扰信号谱线关系图 ($\tau < T_a < T$)

Fig. 7 Microwave pulse and C/A code signal spectrum when $\tau < T_a < T$

第六种情况:微波脉冲周期 T 小于 C/A 码码元宽度 T_a ,三者的频谱包络如图 8 所示。此时微波脉冲干扰谱线包络完全覆盖本地 C/A 码谱线包络,微波脉冲重复频率 $1/T$ 远大于 C/A 码带宽 $1/T_c$,在某一时刻,只有一条中心脉冲干扰谱线落入 C/A 码带宽内,对最靠近干扰频率 f_j 的 C/A 码谱线产生干扰,将 $s = 0$ 代入式(5),此种情况下的相关器输出功率为:

$$P_1 = X \cdot P_j \left| \sum_{i=-N_c}^{N_c} u_0 c_i e^{-j2\pi(\Delta\tau/T_c)i} \text{sinc} \left[\pi \left(\frac{i}{T_c} + \frac{w}{T} + \delta f_j \right) T_d \right] \right|^2 \quad (13)$$

如果 $i \neq -w$,则干扰频率 f_j 将会落入相干积分器的带宽 $1/T_d$ 外,相关器输出功率接近于 0。因此得到相关器输出功率为:

$$P_1 = X \cdot P_j \cdot |c_w|^2 \cdot u_0^2 \cdot [\text{sinc}(\pi\delta f_j T_d)]^2 \quad (14)$$

根据图 2 可知微波脉冲中心脉冲干扰谱线系

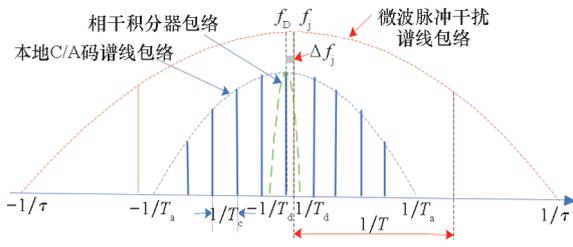


图 8 微波脉冲干扰、相干积分器和 C/A 码谱线关系图 ($T < T_a$)

Fig. 8 Microwave pulse, coherent integrator and C/A code signal spectrum when $T < T_a$

数 u_0 与占空比 τ/T 成正比,即相关器输出功率与微波脉冲占空比密切相关。随着占空比的提高,微波脉冲对导航接收机的干扰效果将逐渐增强。当占空比为 100% 时,式(14)和式(8)相等,此时

$$C/N_0 = \frac{X \cdot P_j (1 - \Delta\tau/T_a)^2 [\text{sinc}(\pi\Delta f_D T_d)]^2}{N_0 + T_d \cdot X \cdot P_j \left| \sum_{i=-N_c}^{N_c} \sum_{s=-N_u}^{N_u} u_s c_i e^{-j2\pi(\Delta\tau/T_c)i} \text{sinc}[\pi(i/T_c + s/T + w/T_c + \delta f_j) T_d] \right|^2} \quad (16)$$

由式(16)可知,干扰相当于在导航信号中添加了噪声,而干扰信号的功率通常又远大于热噪声功率,因此干扰信号会导致载噪比降低。

表 1 总结了上述六种干扰分类的脉冲干扰谱线与 C/A 码谱线的关系,根据推导的相关器输出功率,分别给出了相较于连续波干扰不同参数微波脉冲干扰对导航接收机的干扰效果。

2 试验验证

2.1 试验配置

采用罗德施瓦茨公司生产的矢量信号源产生模拟微波脉冲信号,卫星导航信号由导航模拟器来模拟生成,然后通过合路器将微波脉冲信号和导航信号合路后经过导航天线端的射频模块注入导航接收机的输入端口,提取微波脉冲干扰下导航接收机接收的播发卫星载噪比和导航电文信息等参数,通过监测计算机中的监测软件进行实时显示,以观测导航接收机的受干扰情况。受试导航接收机采用的是四星定位原则,即当导航接收机少于 4 颗卫星参与定位,则接收机处于不定位状态。试验配置如图 9 所示。

在监测计算机的控制软件中选择 1#、3#、6#、8#、9#、12# 卫星播发模拟的导航信号,设置输出信号功率为 -150 dBW,待导航接收机接收到稳定播发卫星的导航信号时,由矢量信号源产生不同干扰频率、重复频率和占空比的微波信号,固定重复频率和占空比,微波脉冲干扰功率设为 -90 dBm,选

干扰效果等效于连续波。

载噪比 C/N_0 指的是 1 Hz 带宽内接收到的信号功率与噪声功率的比值,它可以有效评估微波脉冲干扰下导航接收机的性能,也能够反映伪距测量值的精度。微波脉冲干扰下的相干积分后载噪比 C/N_0 为:

$$C/N_0 = \frac{P_c}{N_0 + T_d P_1} \quad (15)$$

式中, $N_0 = k(T_{ant} + T_{amp})$ 为噪声谱密度,其中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 为玻尔兹曼常数, T_{ant} 为天线接收到的噪声, $T_{amp} = 290(N_f - 1)$ 为接收机内部放大器产生的热噪声, N_f 为在温度为 290 K 时的放大器噪声。 N_0 的典型值为 -205 dBW/Hz。参考文献[14],得到导航信号的输出功率 P_c ,将式(5)和 P_c 代入式(15),可得:

表 1 不同参数微波脉冲干扰对导航接收机载噪比的影响
Tab. 1 Effect of different microwave pulses on carrier-to-noise ratio of navigation receiver

干扰分类	参数关系	主要结论
第一种情况	$\tau \gg T_d$ 且 $T - \tau < T_b$	所有的脉冲干扰谱线漏过相干积分器,仅干扰一条 C/A 码谱线,干扰效果与连续波干扰类似
第二种情况	$T_c \leq \tau < T_d$	含中心谱线在内的多条脉冲干扰谱线干扰了第 w 条 C/A 码谱线,选择合适的脉宽和重频,干扰效果优于连续波干扰
第三种情况	$T_c \approx T$	所有的 C/A 码谱线均可能被微波脉冲干扰谱线干扰,相关器输出功率与占空比关系不大,干扰效果差于连续波干扰
第四种情况	$T_a \leq \tau < T_c$	所有的脉冲干扰谱线干扰多条 C/A 码谱线,干扰效果与占空比相关
第五种情况	$\tau < T_a < T$	部分脉冲干扰谱线干扰全部 C/A 码谱线,干扰效果与占空比相关
第六种情况	$T < T_a$	某一时刻,只有一条中心脉冲干扰谱线落入 C/A 码带宽内,对最靠近干扰频率 f_j 的 C/A 码谱线产生干扰,相关器输出功率与微波脉冲占空比密切相关

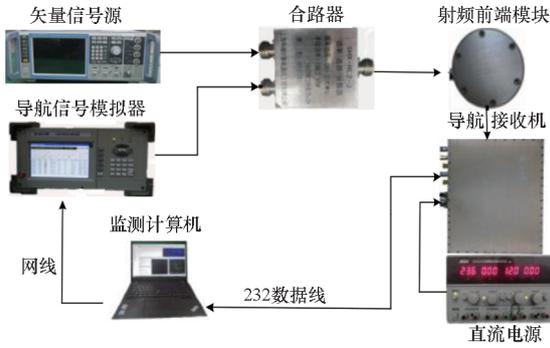


图9 导航接收机微波脉冲注入效应试验配置

Fig.9 Test configuration of the navigation receiver injected by microwave pulse

择中心频率 $f_0 \pm 2$ MHz (1.559 ~ 1.563 GHz) 作为干扰频率,步进值 0.2 MHz,由监测计算机的监控软件观测并记录播发卫星的载噪比和定位情况,继续增大干扰功率,直至导航接收机跟踪卫星数量少于 4 颗,接收机失去定位功能,此时的微波信号功率即为导航接收机的敏感阈值。

载噪比 C/N_0 直接反映了导航接收机接收到的卫星信号质量,导航接收机接收到的每颗卫星信号均具有相对应的载噪比 C/N_0 ,在上述试验配置中,导航接收机接收到 6 颗卫星的载噪比 C/N_0 基本相同,约为 43 dB-Hz,如图 10 所示。

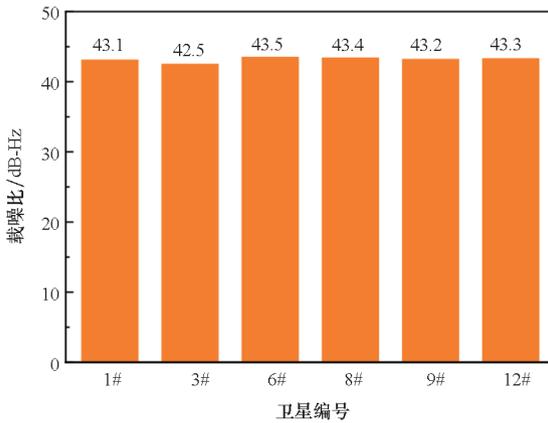


图10 导航接收机初始载噪比设置

Fig.10 Setup of initial C/N_0 for navigation receiver

当导航接收机受到干扰后,根据干扰信号强度的逐渐增大,6 颗卫星的载噪比 C/N_0 均会逐渐减小,当有 3 颗卫星的载噪比 C/N_0 小于 32 dB-Hz 时,导航接收机无法正常定位,此时记录干扰信号功率 P 为导航接收机的敏感阈值。由于 6 颗卫星的载噪比相同,通常 6 颗卫星的载噪比会同时出现小于 32 dB-Hz 的情况,如图 11 所示,因此,可以以单颗卫星为例,建立干扰信号功率 P 与载噪比 C/N_0 的传递关系:

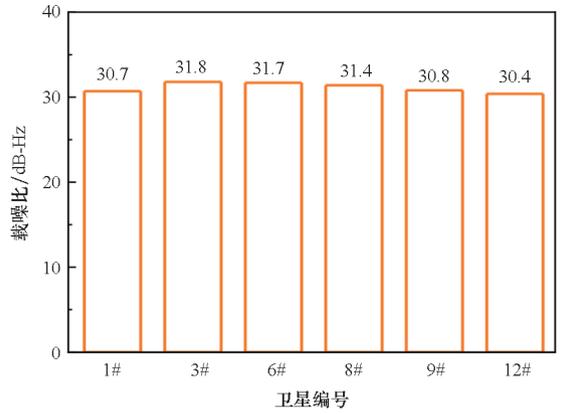


图11 微波脉冲干扰下导航接收机不定时时导航接收机载噪比值

Fig.11 C/N_0 when the navigation receiver is not positioned under microwave pulse interference

$$P = f(C/N_0), C/N_0 < 32 \text{ dB-Hz} \quad (17)$$

由于受试导航接收机的载噪比随着干扰信号功率仅在 30 ~ 43 dB-Hz 之间变化,变化范围较小,载噪比的计算精度不够高,当出现敏感阈值变化范围较大的情况时,受到载噪比计算精度限制,将无法反映不同参数微波脉冲的干扰效果。考虑到干扰信号功率与载噪比直接相关,干扰信号功率越大,载噪比越低,而干扰信号功率由信号源产生,可调节范围较宽,且信号源的精度较高,可以准确反映不同参数微波脉冲下载噪比变化。因此采用敏感阈值作为导航接收机干扰效果的判据。

2.2 试验结果分析

受试导航接收机的相干积分时间 T_d 为 16 ms。选择微波脉冲重频为 10 Hz,占空比为 60%,此时脉宽 τ 为 60 ms,脉冲间隔为 40 ms,小于导航接收机的捕获时间 48 ms,符合理论分析中第一种情况,该微波脉冲干扰和连续波干扰下的导航接收机敏感阈值曲线如图 12 所示。结果表明,在相同干扰功率下,第一种情况下微波脉冲与连续波的敏感阈值类似,且两者对应的最低敏感阈值所处频点基本一致,表明两者分别作用于导航接收机所产生的相关器输出功率值相近,且敏感频点与连续波频点相同,这与理论分析相吻合。

固定微波脉冲重频为 70 Hz,分别选择占空比为 30%、50% 和 70%;固定微波脉冲占空比为 50%,选择重频 f_p 为 70 Hz、150 Hz 和 300 Hz。符合理论分析中第二种情况,图 13 分别给出了不同占空比和不同重频下第二种情况微波脉冲和连续波干扰下导航接收机敏感阈值曲线。

从图 13(a)可以看出,微波脉冲干扰下导航

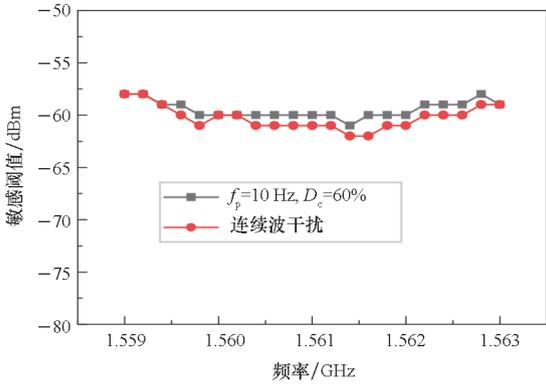
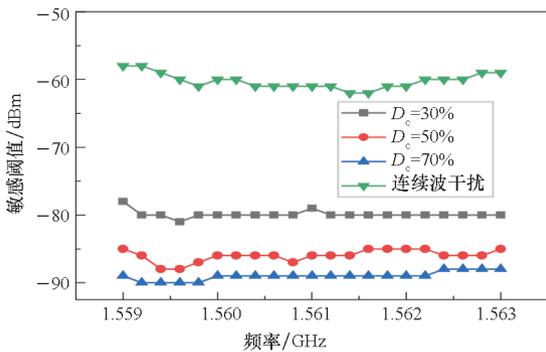


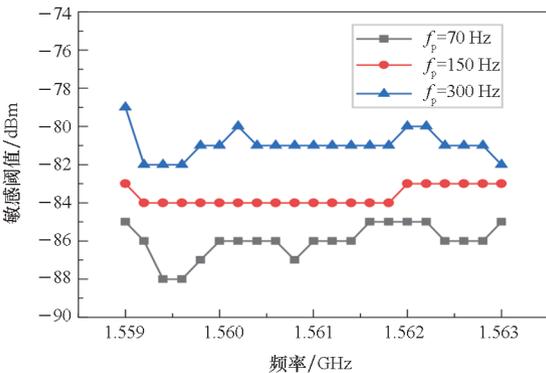
图 12 导航接收机敏感阈值曲线
(第一种情况下微波脉冲和连续波干扰)

Fig. 12 Sensitive threshold curve of the navigation receiver in the presence of microwave pulse in case 1 and continuous wave

接收机敏感阈值均明显小于连续波敏感阈值,两者差值最小值约为 30 dB,这意味着想要达到相同的干扰效果,微波脉冲干扰所需的功率值远小于连续波。这是因为脉冲干扰谱线和 C/A 码谱



(a) 不同占空比
(a) Different duty cycles



(b) 不同重频
(b) Different repetition frequencies

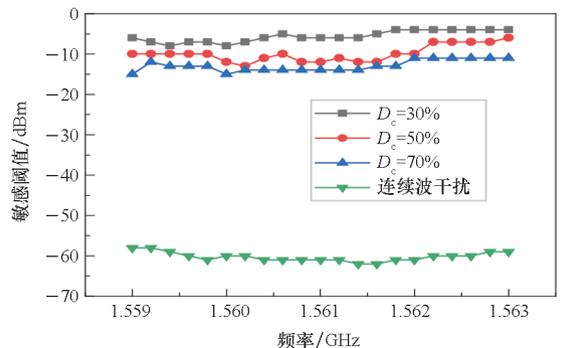
图 13 导航接收机敏感阈值曲线
(第二种情况下微波脉冲和连续波干扰)

Fig. 13 Sensitive threshold curve of the navigation receiver in the presence of microwave pulse in case 2 and continuous wave

线相似且多条脉冲干扰谱线落入相干积分器带宽内,在相同干扰功率下,脉冲干扰相比连续波有更大概率将干扰谱线落在 C/A 码谱线位置,造成干扰效果加强。而连续波干扰只有在干扰谱线与谱线位置重合时,才能达到较好的干扰效果,因此脉冲干扰的效果要优于连续波。另外,不同占空比下的导航接收机敏感阈值随微波脉冲载波频率的变化趋势相似,随着占空比逐渐增加,脉冲干扰谱线幅度增加,相关器的输出功率增大,导航接收机的敏感阈值随之减小,干扰效果逐渐增强。

从图 13(b)可以看出,相同占空比下,随着脉冲重复频率 f_p 增加,进入相干积分器中的脉冲干扰谱线数量 N_{ep} 减少,相关器输出功率减小,导致导航接收机的敏感阈值增加,干扰效果减弱,这与上述理论分析一致。因此,合适的脉冲重复频率 f_p 和脉宽 τ 的微波脉冲可以达到最佳的干扰效果。

图 14 分别给出了不同占空比下第三至第六种情况下微波脉冲和连续波干扰下导航接收机敏感阈值曲线。固定占空比为 30%、50% 和 70%,分别选择微波脉冲重频为 1 kHz、100 kHz、700 kHz 和 1 MHz。图 14(a) 结果显示第三种情况下导航接收机敏感阈值远大于连续波干扰,且其阈值最低的频点也与连续波存在较大差异;另外,不同占空比下的敏感阈值差别不大,这与理论分析基本吻合。通过理论分析得知,第四和第五种情况下涉及的干扰谱线和 C/A 码谱线较多且存在较大随机性,因此,在较低占空比下,随着干扰频率的变化,导航接收机的敏感阈值呈现明显变化,如图 14(b) 和图 14(c) 所示,随着占空比增加至 70% 时,微波脉冲干扰下导航接收机敏感阈值逼近于连续波干扰下敏感阈值。从图 14(d) 可以看出第六种情况下,随着占空比的增加,导航接收机的敏感阈值显著减小,当占



(a) 第三种情况 ($f_p = 1$ kHz)
(a) Case 3 ($f_p = 1$ kHz)

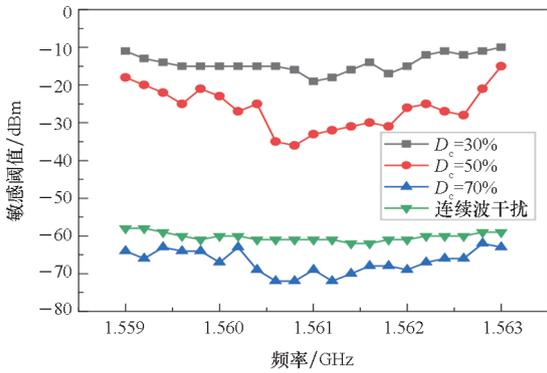
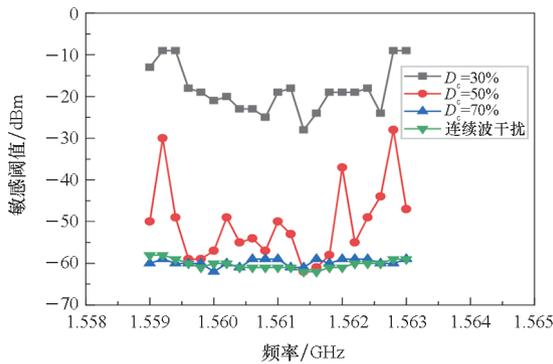
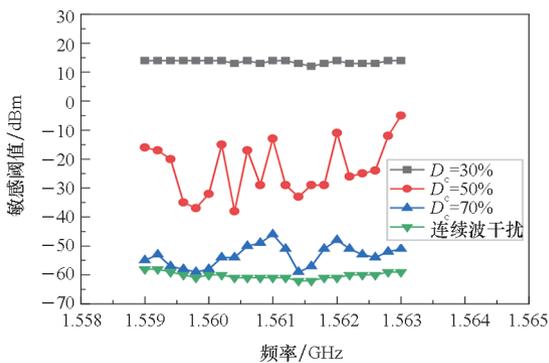
(b) 第四种情况 ($f_p = 100$ kHz)(b) Case 4 ($f_p = 100$ kHz)(c) 第五种情况 ($f_p = 700$ kHz)(c) Case 5 ($f_p = 700$ kHz)(d) 第六种情况 ($f_p = 1$ MHz)(d) Case 6 ($f_p = 1$ MHz)

图 14 不同情况下微波脉冲干扰和连续波干扰下导航接收机敏感阈值曲线

Fig. 14 Sensitive threshold curve of the navigation receiver in the presence of microwave pulse in different cases and continuous wave

空比增加至 70% 时,部分频点敏感阈值接近连续波。这和理论分析较为一致。相较于第二种情况,虽然这些情况下的微波脉冲干扰谱线会对 C/A 码谱线造成影响,但是由于干扰谱线包络频带较宽,进入较窄的相干积分器带宽内谱线数较少,且具有偶然性,因此敏感阈值存在较大波动,干扰效果较差。

3 结论

本文通过理论分析与试验验证,对导航接收机的微波脉冲效应规律与作用机理进行了深入研究,得到结论如下:

1) 微波脉冲干扰谱线进入相干积分器带宽内所致的相关输出功率增加是导航接收机失去定位的主要原因。在六种微波脉冲干扰情况下,当微波脉冲宽度大于等于扩频码周期且小于相干积分时间,进入相干积分器带宽内的多条微波脉冲谱线干扰某一条扩频码谱线,跟踪环路相关输出功率值增加,载噪比减小,对导航接收机的干扰效果最佳,且优于连续波干扰。

2) 当微波脉冲干扰谱线间隔与扩频码谱线间隔相近时,所有的脉冲干扰谱线都会对扩频码谱线造成影响,但是由于干扰能量分散,对导航接收机的干扰效果较差,且和占空比关系不大。类似地,当多条脉冲干扰谱线干扰多条扩频码时,在低占空比下,也存在干扰能量分散导致的干扰效果差的问题,但随着占空比的增加,其干扰效果显著增强,逐渐接近于连续波。

3) 当微波脉冲中心干扰谱线干扰落入扩频码带宽内,对最靠近干扰频率的扩频码谱线产生干扰,此时相关输出功率和占空比密切相关。

对于不同的导航接收机而言,具有不同的相干积分时间和不定位的评估算法,但是导航接收机不定位实质上是由播发卫星载噪比降低至规定门限值导致。因此,该理论分析和试验结果可为其他导航接收机的效应机理分析提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 陈亚洲,程二威,周星,等. 无人机装备电磁环境效应与作用机理[M]. 北京:国防工业出版社,2017.
CHEN Y Z, CHENG E W, ZHOU X, et al. Electromagnetic environment effect and action mechanism of UAV equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [2] MORALES-FERRE R, RICHTER P, FALLETTI E, et al. A survey on coping with intentional interference in satellite navigation for manned and unmanned aircraft[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(1): 249-291.
- [3] 杨雨川. 高功率微波武器对卫星电子系统的威胁及防护技术[D]. 长沙:国防科技大学,2008.
YANG Y C. The threat of high-power microwave weapons to satellite electronic system and its protection technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [4] 范宇清,程二威,魏明,等. 高功率微波弹对 GNSS 接收机毁伤效果分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020,

- 42(1): 37-44.
- FAN Y Q, CHENG E W, WEI M, et al. Analysis of damage effect of high-power microwave bomb on GNSS receiver[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(1): 37-44. (in Chinese)
- [5] 李冰, 苏东林, 周宗飞, 等. 一种用于电子系统的电磁环境效应边界测试方法: CN114355089B [P]. 2022-09-23.
- LI B, SU D L, ZHOU Z F, et al. Electromagnetic environment effect boundary testing method for electronic system: CN114355089B[P]. 2022-09-23. (in Chinese)
- [6] 张庆龙, 程二威, 王玉明, 等. 无人机卫星导航系统的电磁干扰效应规律研究[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(12): 2684-2691.
- ZHANG Q L, CHENG E W, WANG Y M, et al. Research on the electromagnetic interference effect of UAV satellite navigation system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(12): 2684-2691. (in Chinese)
- [7] 张庆龙, 王玉明, 程二威, 等. 导航接收机跟踪环路在电磁干扰下的效应律研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(2): 207-213.
- ZHANG Q L, WANG Y M, CHENG E W, et al. Effect law of navigation receiver tracking loop under electromagnetic interference [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(2): 207-213. (in Chinese)
- [8] HEGARTY C J, BOBYN D, GRABOWSKI J, et al. An overview of the effects of out-of-band interference on GNSS receivers[J]. Navigation, 2020, 67(1): 143-161.
- [9] MOTELLA B, PINI M, DOVIS F. Investigation on the effect of strong out-of-band signals on global navigation satellite systems receivers [J]. GPS Solutions, 2008, 12(2): 77-86.
- [10] 丁梦羽, 许睿, 刘建业, 等. 脉冲干扰对软件接收机的影响分析[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3): 58-65.
- DING M Y, XU R, LIU J Y, et al. Analysis of pulse interference effects on the software receiver[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(3): 58-65. (in Chinese)
- [11] 刘禹圻, 胡修林, 冉一航, 等. 卫星导航信号抗单频干扰性能研究[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1410-1416.
- LIU Y Q, HU X L, RAN Y H, et al. Study on evaluating the impact of CWI on DLL tracking performance for GNSS signals[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1410-1416. (in Chinese)
- [12] 郭海玉, 鲁祖坤, 陈飞强, 等. 窄带与脉冲干扰对卫星导航信号载噪比的影响[J]. 全球定位系统, 2021, 46(1): 50-56.
- GUO H Y, LU Z K, CHEN F Q, et al. Effects of narrowband and pulse interference on the carrier-to-noise ratio of satellite navigation signals[J]. GNSS World of China, 2021, 46(1): 50-56. (in Chinese)
- [13] 毛虎, 吴德伟, 卢虎. GPS 信号的脉冲干扰效能分析[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(4): 518-525.
- MAO H, WU D W, LU H. Effect analysis of pulse jamming against GPS[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019, 48(4): 518-525. (in Chinese)
- [14] BALAEI A T, DEMPSTER A G, PRESTI L L. Characterization of the effects of CW and pulse CW interference on the GPS signal quality[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(4): 1418-1431.
- [15] BEK M K, SHAHEEN E M, ELGAMEL S A. Mathematical analyses of pulse interference signal on post-correlation carrier-to-noise ratio for the global positioning system receivers[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(3): 266-275.
- [16] BEK M K, SHAHEEN E M, ELGAMEL S A. Classification and mathematical expression of different interference signals on a GPS receiver[J]. Navigation, 2015, 62(1): 23-37.
- [17] 刘瑞华, 商鹏. 不同干扰对北斗 B1I 信号接收机影响[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(8): 1705-1712.
- LIU R H, SHANG P. Effect of difference interferences on Beidou B1I signal receiver [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(8): 1705-1712. (in Chinese)
- [18] 刘瑞华, 李婷, 商鹏. 脉冲干扰对北斗 B1I 信号接收机影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 9062-9068.
- LIU R H, LI T, SHANG P. Effect of pulse interferences on Beidou B1I signal receiver [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22): 9062-9068. (in Chinese)
- [19] 李柏渝, 唐小妹, 聂俊伟, 等. 卫星导航抗干扰接收机 AGC 电路模型分析与优化设计方法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(6): 25-30.
- LI B Y, TANG X M, NIE J W, et al. Model analysis and design optimization for automatic gain control circuits in satellite navigation anti-jamming receivers [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(6): 25-30. (in Chinese)