

步进频雷达关键参数对虚警信号的影响分析

杜雪 魏光辉 吴大林

Analysis of the influence of key parameters of step-frequency radar on false alarm signal

Du Xue, Wei Guanghui, Wu Dalin

引用本文:

杜雪, 魏光辉, 吴大林. 步进频雷达关键参数对虚警信号的影响分析[J]. *强激光与粒子束*, 2024, 36: 093003. doi: 10.11884/HPLPB202436.240072

Du Xue, Wei Guanghui, Wu Dalin. Analysis of the influence of key parameters of step-frequency radar on false alarm signal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 093003. doi: 10.11884/HPLPB202436.240072

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240072>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[电磁干扰多通道时域快速测量与信号计算方法](#)

Multi-channel time-domain rapid measurement and signal calculation method for electromagnetic interference

强激光与粒子束. 2024, 36: 043005–1–043005–6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230246>

[典型音频放大电路的电源电磁干扰效应研究](#)

Electromagnetic interference effect of power supply in typical audio amplifier circuit

强激光与粒子束. 2019, 31: 040014–1–040014–6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180366>

[无人机数据链电磁干扰机理和防护研究](#)

Mechanism and protection on the data link of UAV exposed to electromagnetic interference

强激光与粒子束. 2021, 33: 033005–1–033005–8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.200263>

[无人机定位系统电源分配网络电磁干扰行为级分析与预测](#)

Analysis and prediction of electromagnetic interference behavior level in power distribution network of UAV positioning system

强激光与粒子束. 2023, 35: 053001–1–053001–7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220352>

[一种C波段雷达接收机防护技术研究](#)

Research on a C-band radar receiver protection technology

强激光与粒子束. 2024, 36: 043004–1–043004–5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230267>

[基于场路仿真的PCIe电磁干扰分析及优化设计](#)

PCIe electromagnetic interference analysis and optimization design based on co-simulation of field and circuit

强激光与粒子束. 2020, 32: 043202–1–043202–7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190360>



·高功率微波技术·

步进频雷达关键参数对虚警信号的影响分析*

杜 雪, 魏光辉, 吴大林

(陆军工程大学(石家庄校区), 石家庄 050003)

摘要: 为掌握雷达装备关键参数对虚警信号的影响规律, 揭示虚警信号产生的本质原因, 针对雷达装备在复杂电磁干扰中出现的多虚警信号问题, 以某型步进频雷达为受试对象, 理论阐明虚警干扰的作用机理和虚警目标的成像特征。理论与试验测定相结合, 选取单频连续波为电磁干扰源, 采用注入等效替代电磁辐射的试验方法, 总结归纳雷达关键参数跳频间隔和频率步进对虚警信号影响规律。结果表明: 受试雷达在单频电磁干扰作用下会产生能量较集中的虚警信号; 受试雷达频率步进选取 10 kHz、跳频时间 0.05 ms 时, 虚警电平随干扰频偏的变化规律较稳定, 信号幅度损失较小, 该参数取值可作为控制参数的最优取值, 依据该结果能够为后续开展雷达装备在多频电磁环境下的试验评估提供技术支撑。

关键词: 步进频雷达; 电磁干扰; 虚警信号; 跳频时间; 频率步进

中图分类号: TN97

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202436.240072

Analysis of the influence of key parameters of step-frequency radar on false alarm signal

Du Xue, Wei Guanghui, Wu Dalin

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

Abstract: Aiming at the problem of multiple false alarm signals of radar equipment in complex electromagnetic interference, in order to get the influence law of key parameters of radar equipment on false alarm signals, and to reveal the essential causes of false alarm signals, taking a type of stepper frequency ranging radar as the test object, this paper theoretically explains the mechanism of false alarm interference and the imaging characteristics of false alarm targets. Combining theoretical and experimental measurements, single-frequency continuous wave is selected as the source of electromagnetic interference, and the test method of injecting equivalent alternative electromagnetic radiation is adopted to summarize and generalize the influence of the critical radar parameters including frequency hopping interval and stepping frequency on the false alarm signal. The results show that the single-frequency electromagnetic interference of the test radar generates false alarm signal. When the frequency stepping of the tested radar is selected as 10 kHz and the frequency hopping time is 0.05 ms, the variation of false alarm level with interference frequency offset is relatively stable, and the signal amplitude loss is relatively small. The values can be used as the optimal control parameter values, and on this basis, it can provide technical support for subsequent experimental evaluation of radar equipment in multi frequency electromagnetic environments.

Key words: step-frequency radar, electromagnetic interference, false alarm signal, frequency hopping time, frequency stepping

雷达装备凭借其全天候、实时获取目标信息的优势广泛应用于无人作战系统中, 其效能的发挥很大程度上依赖自身抗电磁干扰能力^[1]。近年来针对雷达电磁干扰效应的研究主要以信息干扰为背景, 使雷达产生与真实目标相似的距离假目标。K. Olivier 等人通过使用数字射频存储器(DRFM)增强电子对抗技术, 混淆跟踪雷达^[2-3]。李文臣等人针对伪目标干扰评估建立了欺骗干扰的功率关系^[4]。李楠团队研究了基于数字重构技术原理, 阐明了高逼

* 收稿日期: 2024-03-03; 修订日期: 2024-07-13

基金项目: 国防基础科研重点项目(50909030201); 重点实验室基金项目(6142205200301)

联系方式: 杜 雪, duxue_xdd@163.com。

通信作者: 魏光辉, wei-guanghui@sohu.com。

真假目标干扰信号产生机理^[5]。徐磊等人分析了借助 DRFM 技术实现存储转发干扰脉冲, 实现对敌方的欺骗干扰^[6]。文献 [7-8] 针对转发而产生的假目标信号, 研究抗干扰算法以减小或消除其对雷达的干扰。文献 [9-11] 指出了系统对接收的雷达信号会进行采集存储和转发, 产生虚假目标信号。此外, 现有标准主要针对信息型干扰为背景, 对雷达性能指标干扰效果评估, 如 GJB4036.7-87、GJB8312-2015 等等^[12-13]。在研究过程中发现, 雷达在受到外界电磁干扰时, 除有用信号(目标回波)外, 还会产生与有用信号波形相似、但作用距离与真实目标距离或速度有差别的虚假目标, 即虚警干扰^[14-15]。虚警干扰在一定条件下也会使探测目标混乱, 其位置的随机性使雷达在探测目标距离时受到很大影响, 严重影响雷达战场作战效能的发挥。

雷达工作参数的选取反映了雷达自身性能, 合理选择工作信号参数, 得到最优测试结果, 是装备进行电磁干扰试验的前提条件。毛二可院士团队指出频率步进雷达距离设置中跳频间隔和频率步进选取受到严格的条件约束, 否则会造成过采样冗余^[16-18]。同时他们还研究了频率调制对线性调频雷达的性能影响^[19]。贺志毅等人从频域采样的角度对步进跳频信号的跳频间隔进行了深入分析, 给出了跳频间隔与发射脉冲宽度的关系^[20]。团队前期基于电路的场路耦合原理和雷达成像原理分析了雷达在工作参数一定的条件下单频电磁干扰信号对虚假干扰信号的作用机理及虚警信号位置成因^[21], 但未考虑工作参数对虚警信号的影响。一般情况下, 雷达发射脉宽 τ 、频率步进 Δf^* 存在严格的限制关系, 当 $\tau\Delta f^* > 1$ 会产生距离模糊, $\tau\Delta f^* = 1$ 即发射脉宽与回波脉宽相等, 得到的目标信号最理想, 但是实际雷达发射信号探测目标后回波会出现展宽和发散, 一般选择 $\tau\Delta f^* < 1$ 补偿部分损失能量^[16,20]。在实际应用中, 雷达不同工作参数对装备电磁干扰效应的影响有待进一步解决, 因此有必要开展雷达可调参数对虚警信号的分析研究。本文以某型步进频雷达为研究对象, 以单频连续波为干扰信号, 结合步进频测距雷达信号成像机理^[16], 对虚警信号位置进行分析, 总结步进频测距雷达关键参数对虚警信号的影响规律, 为雷达装备在复杂电磁环境下的效应评估提供依据。

1 虚警信号成像机理

假设雷达回波信号幅值为单位值, 在单频电磁干扰下对静止目标进行探测, 则射频前端接收信号为^[16]

$$\begin{cases} u(t) = u_r(t) + u_m(t) \\ u_r(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - kt_r - \frac{t_r}{2} - \frac{2R}{c}}{t_r}\right) \exp\left[-j\left(2\pi(f_0 + k\Delta f^*)\left(t - \frac{2R}{c}\right) + \theta_k\right)\right] \\ u_m(t) = \exp[-j(2\pi f_m t + \theta_m)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_r(t)$ 、 $u_m(t)$ 分别为有用信号(目标回波信号)和干扰信号; 下标 r、m 分别表示不同时刻对应的有用信号电压采集点和干扰信号采集点; N 为步进频阶梯数; t_r 为跳频时间间隔; f_0 、 f_m 分别为雷达起始频率和干扰频率; Δf^* 为频率步进; R 为目标距离; c 为光速; θ_k 、 θ_m 为发射信号、干扰信号的初相位。本振信号 $u_L(t)$ 可以表示为

$$u_L(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - kt_r - \frac{t_r}{2}}{t_r}\right) \exp[-j(2\pi(f_0 + k\Delta f^*)t + \theta_k)] \quad (2)$$

当干扰信号频率落入滤波器工作频带内, 其会同有用信号一起经混频、放大、滤波、采样、傅里叶逆变换处理, 形成虚假目标距离像; 假设采样时刻 $t_k = kt_r + t_d$, t_d 为延迟时间, $0 < t_d < t_r$, 结合式(1)~(2)整理得到采集信号

$$\begin{cases} S(k) = S_r(k) + S_m(k) \\ S_r(k) = S_{r1}(k) + S_{r2}(k) = \exp\left[-j\left(\frac{4\pi R f_l}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\left(\frac{4\pi R \Delta f^*}{c} k\right)\right] \\ S_m(k) = \exp[-j2\pi(f_0 t_r - f_m t_r + \Delta f^* t_d)k] \cdot \exp[-j2\pi(f_0 - f_m)t_d] \cdot \exp(-j2\pi \Delta f t_r k^2) \cdot \exp(-j\theta_k) \cdot \exp(-j\theta_m) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S_{r2}(k) = \exp\left(-j\frac{4\pi R \Delta f^*}{c} k\right)$ 经傅里叶逆变换得到有用信号目标距离像^[14], 即

$$S_{r2}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_{r2}(k) \exp\left(j\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (4)$$

为便于计算, 引入变量 l , 令 $l = \text{Round}(2N\Delta f^* R/c)$, 利用欧拉公式对式(4)进一步计算, 得到

$$\begin{aligned}
 S_{r2}(n) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_{r2}(k) \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \exp\left[\frac{j2\pi k(n-l)}{N}\right] = \frac{1}{N} \cdot \frac{1 - \exp[j2\pi k(n-l)]}{1 - \exp\left[\frac{j2\pi k(n-l)}{N}\right]} = \\
 &= \frac{1}{N} \cdot \frac{\exp[j\pi(n-l)]}{1 - \exp\left[\frac{j\pi(n-l)}{N}\right]} \cdot \frac{\exp[-j\pi(n-l)] - \exp[j\pi(n-l)]}{\exp\left[\frac{-j\pi(n-l)}{N}\right] - \exp\left[\frac{j\pi(n-l)}{N}\right]} = \\
 &= \frac{1}{N} \cdot \frac{\sin\pi(n-l)}{\sin\left(\frac{\pi(n-l)}{N}\right)} \cdot \exp\left[\frac{j\pi(N-1)(n-l)}{N}\right] = \frac{\sin c(n-l)}{\sin c\left(\frac{n-l}{N}\right)} \cdot \exp\left[\frac{j\pi(N-1)(n-l)}{N}\right]
 \end{aligned} \quad (5)$$

由公式(5)可知, 目标成像在 $n=l$ 时, 上式取最大, 此时得到得探测目标位置 $R = cn/2N\Delta f^*$ 。

同样, 式(3)中 $S_m(k)$ 利用欧拉公式, 经过逆傅里叶变换得到虚警信号距离像, 令 $p = \text{Round}[N(f_0 t_r - f_m t_r + \Delta f^* t_d)]$, 利用欧拉公式对 $S_m(k)$ 中 k 一次项傅里叶逆变换求解, 得

$$S_{m1}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_{m1}(k) \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) = \frac{1}{N} \cdot \frac{\sin\pi(n-p)}{\sin\left(\frac{\pi(n-p)}{N}\right)} \cdot \exp\left[\frac{j\pi(N-1)(p-l)}{N}\right] = \frac{\sin c(n-p)}{\sin c\left(\frac{n-p}{N}\right)} \cdot \exp\left[\frac{j\pi(N-1)(p-l)}{N}\right] \quad (6)$$

同样当 $n=p$ 时, 上式傅里叶逆变换后模值取最大, 得到虚警信号位置为 $R_1 = (f_0 t_r - f_m t_r + \Delta f^* t_d)c/2\Delta f^*$ 。假定式(3)中跳频时间 t_r 、频率步进 Δf^* 一定, 干扰信号 θ_m 初相位恒定, 发射信号初相位 θ_k 不确定, 则所得到的虚警信号会在 R_1 上产生 $R(\theta_k)$ 位移; 如果初相位 θ_k 确定, $t_k = kt_r + t_d$ 中的延迟时间 t_d 不确定, 同样会使得虚警信号不确定, 实际成像中还要结合雷达信号参数(跳频时间和频率步进)的选取等相关问题, 确定是否存在距离冗余等相关信息^[20]。

2 步进频雷达单频电磁辐射效应试验

2.1 试验配置

单频电磁辐射效应试验研究是电磁兼容与防护性能研究的出发点和技术基础, 连续波电磁信号是电磁环境的基本组成部分。根据试验目的, 结合 GJB8848-2016^[22] 和 GJB151B-2013^[23], 搭建受试设备电磁干扰试验平台。对于受试雷达装备, 电磁干扰主要以天线耦合至受试系统, 可以采取注入等效辐照的试验方法, 一方面试验参数容易控制; 另一方面排除外界电磁环境对试验的影响, 测试准确性提高。系统组成如图 1 所示, 信号源(Ceyear1435F)、功率放大器(AR 200T8G18A)、定向耦合器、频谱分析仪(Ceyear 4042G)组成电磁干扰系统, 天线(Schwarzbeck BBHA9120D)为目标, 信号源输出干扰信号经功率放大器进行放大, 随后经定向耦合器(50 dB 耦合度)将干扰信号传输给注入模块, 随后进行数据采集、信号处理显示在终端。

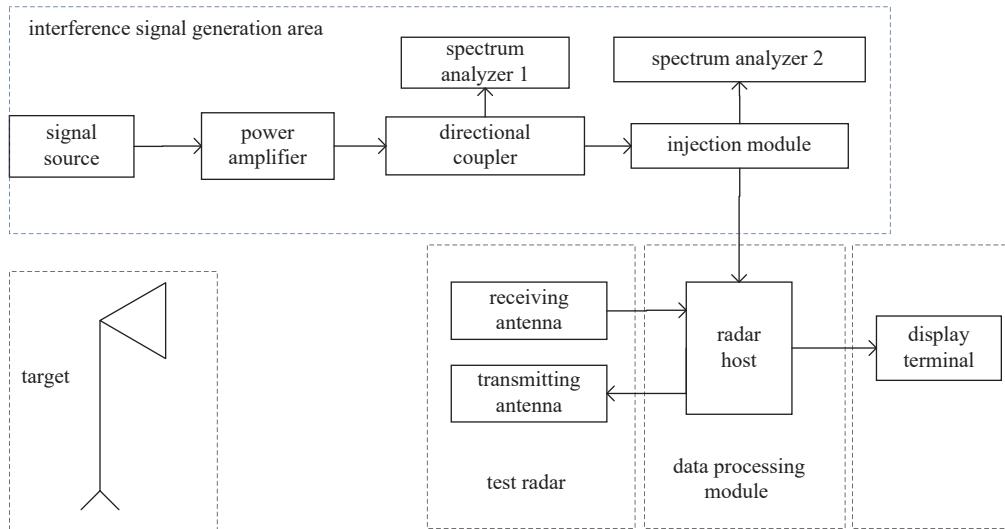


Fig. 1 Block diagram of field configuration

图 1 雷达电磁注入系统连接图

雷达系统控制界面如图 2 所示, 图 2 中控制界面的跳频时间是指发射信号子周期脉宽的持续时间, 以跳频时间 0.05 ms, 频率步进 10 kHz 为例, 说明每隔 0.05 ms, 频率步进 10 kHz, 这里的跳频时间可理解为跳频间隔 t_r 。

雷达接收信号经电路处理生成目标距离维像,如图3所示,图中标注为有用信号(目标回波)的峰值电平和距离。图中给出了受试雷达在单频连续波电磁干扰作用下的成像图。其中,在单频连续波电磁信号作用下,不仅500 m以内出现了干扰信号,在3 700 m附近出现了山丘状的虚警信号。



Fig. 2 Test radar terminal control software

图2 被测雷达终端控制软件

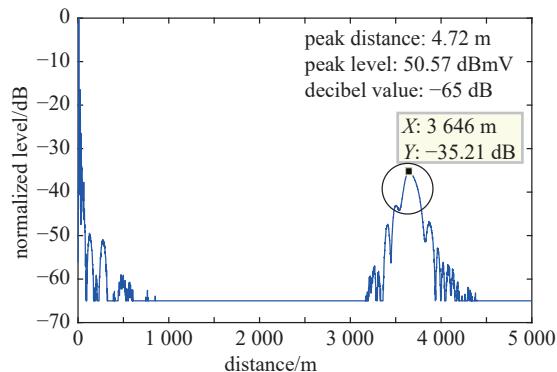


Fig. 3 Single frequency interference target range imaging

图3 单频干扰目标距离成像

2.2 稳定性测试

开展试验前首先对系统稳定性进行测试。以中心干扰频点为例,在不同干扰强度下进行10次测试,记录虚警信号电平 U_m ($m=1, 2$)和虚警信号位置 R_m ($m=1, 2$)随不同干扰强度 E_i ($i=1, 2$)的测试数据如表1所示。根据表1可知虚警信号的位置存在不固定性,其电平方差较小(U_1 的电平方差为0.002, U_2 的电平方差为0.001),试验数据比较稳定,说明以虚警信号电平作为效应参数可满足测试要求,试验以虚假目标电平绝对值(以下简称“虚警电平”)作为雷达虚警干扰效应指标。

表1 不同干扰强度下虚警信号测试数据

Table 1 Test data of false alarm signal under different interference strengths

U_1/dBmV	R_1/m	U_2/dBmV	R_2/m
$E_1=6 \text{ dBV/m}$			$E_2=17.5 \text{ dBV/m}$
19.12	4506.0	20.70	4586.0
19.10	3330.0	20.80	2756.0
19.13	2769.0	20.73	3580.0
19.12	1384.0	20.68	2860.0
19.13	633.7	20.73	932.9
19.12	3256.0	20.70	3456.0
19.10	3344.0	20.66	3243.0
19.12	1819.0	20.70	2016.0
19.13	783.7	20.71	689.3
19.00	1123.0	20.68	4586.0

2.3 虚警信号随雷达关键参数变化的测试结果

根据试验目的设置参数,本文主要针对干扰作用产生的虚警信号进行研究,在雷达单频连续波电磁干扰试验测试中发现,跳频间隔和频率步进的选取对有用信号几乎没影响,但是对虚警信号有一定影响,测试结果如图4所示,从图中看出, t_r 不同,虚警数量不同,虚警目标特征几乎一致。以此为出发点,总结、归纳跳频间隔 τ 和频率步进在满足紧约束条件下($\tau\Delta f^*\leq 1$)虚警电平变化规律,从试验角度上给出装备试验时跳频间隔和频率步进的最优取值。

根据公式(1)~(6)可知,虚警信号实际位置与跳频间隔 t_r 干扰频偏 Δf_m 和采集时刻 t_k 有关。

接下来,首先改变 t_r 、 Δf^* 、 f_m ,记录虚警信号的变化情况,包括虚警数量 n' ,虚警电平 U_m ,虚警之间的平均间隔 ΔR 。以中心频点为例,设置频率步进 $\Delta f^*=20 \text{ kHz}$,测试不同干扰频偏下和不同干扰场强虚警信号测试数据,结果如表2~3所示。

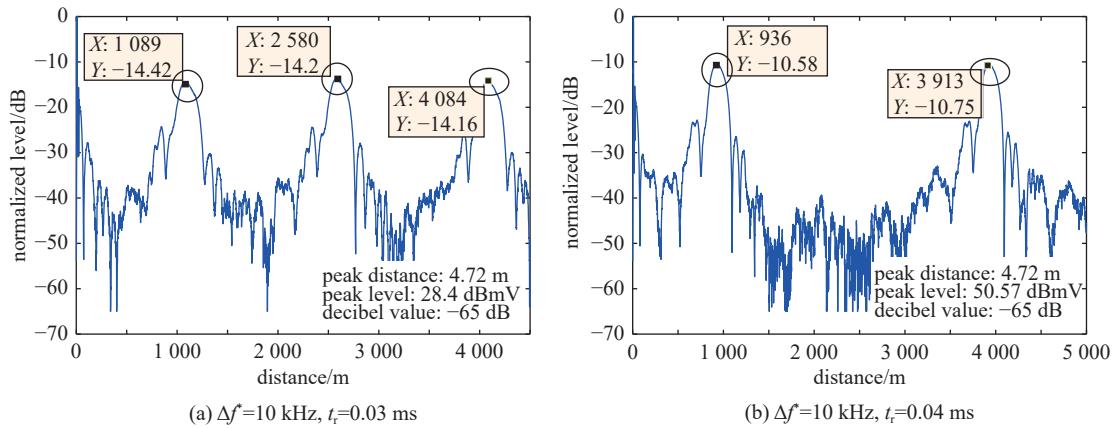


Fig. 4 Imaging of false alarm signal with different frequency hopping time

图 4 跳频间隔选取不同时虚警信号成像

表 2 虚警信号测试数据 ($E_1=20.6 \text{ dBV/m}$)Table 2 False alarm signal test data ($E_1=20.6 \text{ dBV/m}$)

t_r/ms	n'	U_m/dBmV	R/m	ΔR
0.05	1	24.67	2077.0	—
0.04	4	18.5	419.2	$\Delta R_1=1519.8 \text{ m}$
		18.5	1939.0	$\Delta R_2=1517.0 \text{ m}$
		18.3	3456.0	$\Delta R_3=1490.0 \text{ m}$
		18.4	4946.0	$\Delta R \approx 1508.0 \text{ m}$
0.03	3	19.2	1364.0	$\Delta R_1=1504.0 \text{ m}$
		19.2	2868.0	$\Delta R_2=1518.0 \text{ m}$
		19.2	4386.0	$\Delta R \approx 1511.0 \text{ m}$
0.02	2	19.6	1155.0	$\Delta R \approx 1502.0 \text{ m}$
		19.5	2657.0	—
0.01	1	17.7	965.1	—

表 3 虚警信号测试数据 ($E_2=32.6 \text{ dBV/m}$)Table 3 False alarm signal test data ($E_2=32.6 \text{ dBV/m}$)

t_r/ms	n'	U_m/dBmV	R/m	ΔR
0.05	1	24.8	2033.0	—
0.04	4	18.6	242.9	$\Delta R_1=1499.1 \text{ m}$
		18.6	1742.0	$\Delta R_2=1503.0 \text{ m}$
		18.7	3245.0	$\Delta R_3=1494.0 \text{ m}$
		18.6	4739.0	$\Delta R \approx 1498.7 \text{ m}$
0.03	3	19.2	713.6	$\Delta R_1=1496.4 \text{ m}$
		19.3	2210.0	$\Delta R_2=1514.0 \text{ m}$
		19.2	3724.0	$\Delta R \approx 1510.2 \text{ m}$
0.02	2	19.4	1402.0	$\Delta R \approx 1501.0 \text{ m}$
		19.5	2903.0	—
0.01	1	17.7	553.4	—

其次测试不同干扰频偏对虚警信号的影响。固定干扰场强 $E=E_1=20.6 \text{ dBV/m}$, 调节步进频率, 得到虚警信号测试数据如表 4 所示。

从表 2~表 4 可以得出以下结论: (1)虚警信号数量 n' 与干扰场强 E_m 无关, 与跳频间隔 t_r 、频率步进 Δf^* 有关, 与公式(6)所得理论结果一致; (2)同一跳频间隔 t_r , 出现多虚警信号时, 虚警信号位置不同, 但其间隔为 $\Delta R=ct_r/2n'$;

表 4 虚警信号测试数据 ($\Delta f_2=40$ MHz)
Table 4 False alarm signal test data ($\Delta f_2=40$ MHz)

t_r/ms	n'	U_m/dBmV	R/m	ΔR
0.05	1	21.23	1 983.0	—
		14.6	500.9	$\Delta R_1=1498.1$ m
		14.8	1 999.0	$\Delta R_2=1503.0$ m
		14.9	3 502.0	$\Delta R_3=1495.0$ m
0.04	4	14.6	4 997.0	$\Delta R \approx 1498.7$ m
		14.8	609.6	$\Delta R_1=1493.7$ m
		15.0	2 103.0	$\Delta R_2=1497.0$ m
		15.0	3 600.0	$\Delta R \approx 1495.4$ m
0.03	3	15.0	383.9	—
		15.1	1 888.0	$\Delta R \approx 1504.0$ m
		13.2	499.4	—
		—	—	—
0.02	2	—	—	—
0.01	1	—	—	—

注: 表中 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 分别代表出现多虚警目标时, 第 n' 个和第 $n'+1$ 个 ($n'=1, 2, 3$) 之间的间隔, ΔR 表示对间隔取平均。

虚警信号电平值近似相等, 最大误差为 0.3 dB; (3) 在同一跳频间隔 t_r , 虚警信号电平大小与干扰频偏有关; (4) 虚警信号在干扰场强 26.6 dBV/m 和 32.6 dBV/m 变化不大, 说明此时虚警信号达到饱和状态, 虚警电平并不会随着干扰场强的增大而增大。

为补偿回波信号的波形展宽^[15-16], 保持跳频间隔 t_r 不变, 令频率步进 $\Delta f^*=10$ kHz, 采用同样的方法记录不同干扰频偏下, 虚警信号数量 n' , 虚警电平 U_m (出现多虚警时, 忽略虚警信号之间的幅值) 测试结果如表 5、表 6 所示。

表 5 虚警信号测试数据 ($\Delta f^*=10$ kHz, $\Delta f_1=0$ MHz)
Table 5 False alarm signal test data ($\Delta f^*=10$ kHz, $\Delta f_1=0$ MHz)

t_r/ms	n'	$\Delta R/\text{m}$	U_1/dBmV		
			$E_1=17.6$ dBV/m	$E_1=20.6$ dBV/m	$E_1=26.6$ dBV/m
0.05	1	—	20.7	20.9	21.1
0.04	2	3 000	16.9	17.3	17.1
0.03	3	1 500	14.7	14.9	14.8
0.02	1	—	18.2	18.1	18.4
0.01	1	—	13.9	13.7	13.9

表 6 虚警信号测试数据 ($\Delta f^*=10$ kHz, $\Delta f_2=-60$ MHz)
Table 6 False alarm signal test data ($\Delta f^*=10$ kHz, $\Delta f_2=-60$ MHz)

t_r/ms	n'	$\Delta R/\text{m}$	U_2/dBmV		
			$E_2=17.6$ dBV/m	$E_2=20.6$ dBV/m	$E_2=26.6$ dBV/m
0.05	1	—	17.1	17.2	17.4
0.04	2	3 000	13.6	13.7	13.8
0.03	3	1 500	11.2	10.7	11.1
0.02	1	—	14.0	14.4	14.6
0.01	1	—	9.3	9.8	10.5

由表 5 和表 6 和表 2 进行比较可得: (1) 同一跳频间隔、同一干扰场强(或干扰场强), 不同频率步进下测得的虚警信号电平大小不一, 这说明在采样点数保持不变的情况下, 若频率步进 Δf^* 改变, 会造成某些频率数据重复采集或缺失, 导致电平有效值改变; (2) 当频率步进为 10 kHz、跳频间隔 0.05 ms 时, 虚警电平随干扰频偏的变化规律数据比较稳定, 信号损失幅度较小, 单一干扰频率仅出现 1 处虚警信号。

接下来对虚警信号电平规律进行总结。同样的方法测得不同跳频间隔、不同跳频间隔下虚警电平的具体变化情况, 结果如图 5 所示。根据图 5 可知: (1) 不同跳频间隔下, 虚警信号与干扰频偏变化规律几乎一致, 在中心频

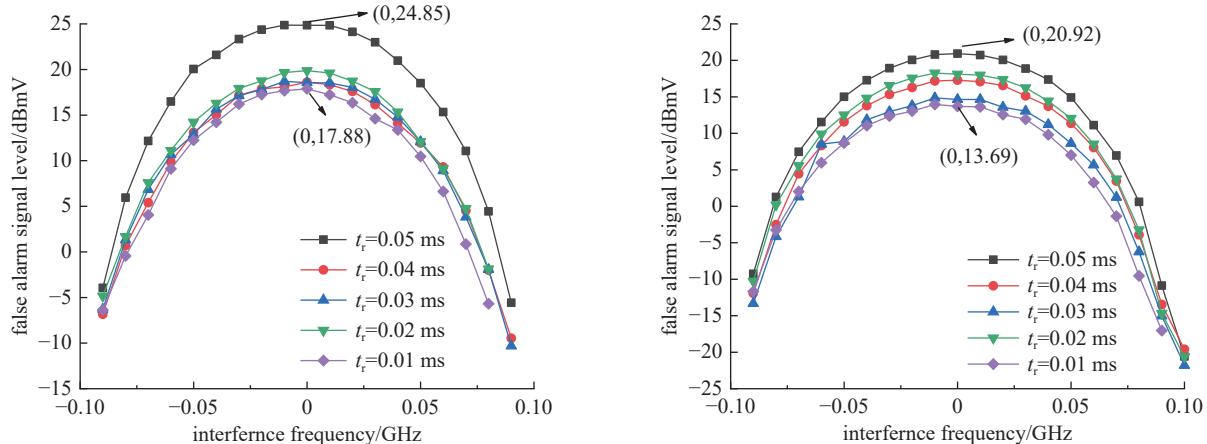


Fig. 5 Test results of false alarm level under different frequency hopping intervals

图 5 不同跳频间隔下虚警电平测试结果

点处最敏感。(2)不同跳频间隔下,若选取的虚警敏感电平不同,对应的虚警信号敏感频带也不同。说明滤波器对虚警信号的频率选择性。跳频间隔分别为 0.05 ms、0.01 ms 时,敏感电平为 5 dBmV 时,受试雷达敏感带宽大约为 0.07 GHz、0.06 GHz;而敏感电平为 10 dBmV,敏感带宽分别为 0.06 GHz、0.05 GHz 左右。虚警敏感频带的作用范围具体还要结合雷达应用场景和选取的虚警敏感电平。(3)相同干扰频率下, $\tau\Delta f^*=1$ 测得虚警信号电平值高于 $\tau\Delta f^*<1$ 的虚警电平,高出幅度约 5 dB。(4)频率步进和干扰频偏一定时,跳频时间不同,虚警信号幅值也不同,说明信号采集有效数据不同,虚警信号与干扰频偏、频率步进、跳频时间都有关。

3 结 论

针对雷达电磁干扰研究需求,本文以某型步进频雷达为研究对象,采用单频连续波为电磁干扰源,以虚警信号绝对电平为研究参量,研究了雷达关键参数对虚警信号的影响,得到了受试雷达单频连续波电磁虚警干扰规律:单频连续波使受试雷达产生位置不固定的虚警信号;频率步进和跳频时间改变都有可能导致采样点数发生变化,进而可能产生多虚警现象,当出现多虚警时,虚警间隔一定。通过试验给出跳频间隔和频率步进的最优取值,通过调节跳频间隔和频率步进,总结、归纳出跳频间隔和频率步进对虚警信号的影响规律:(1)在误差允许范围内,同一干扰频偏、同一干扰功率、同一跳频时间下获取的虚警信号电平一致。(2)虚警数量的不同并不会影响电磁干扰对虚警信号规律的探究。当频率步进为 10 kHz、跳频间隔 0.05 ms 时,虚警电平随干扰频偏的变化规律数据比较稳定,信号损失幅度较小,单一干扰频率仅出现 1 处虚警信号。因此可以将频率步进 10 kHz、跳频间隔 0.05 ms 作为试验基础参数设置,进一步开展电磁多频虚警干扰效应试验。(3)虚警信号电平值在受到中心频点的干扰时表现最敏感,虚警信号电平值最大。

参考文献:

- [1] 任仕召,魏光辉,潘晓东,等.典型雷达装备带内连续波辐射效应试验研究[J].*强激光与粒子束*,2020,32:053005.(Ren Shizhao, Wei Guanghui, Pan Xiaodong, et al. Experimental study on radiation effect of in-band continuous wave on typical radar equipment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 053005)
- [2] 马立云,王玉明,陈亚洲.连续波对激光雷达的电磁干扰效应[J].*强激光与粒子束*,2021,33:123012.(Ma Liyun, Wang Yuming, Chen Yazhou. Continuous-wave electromagnetic environment effects on laser radar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 123012)
- [3] Olivier K, Cilliers J E, du Plessis M. Design and performance of wideband DRFM for radar test and evaluation[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(14): 824-825.
- [4] 李文臣,黄烽,杨会民,等.雷达噪声干扰和多假目标干扰效能分析[J].*中国电子科学研究院学报*,2013,8(4):403-406.(Li Wenchen, Huang Feng, Yang Huimin, et al. Efficiency analysis of radar noise jamming and multiple false target jamming[J]. *Journal of CAEIT*, 2013, 8(4): 403-406)
- [5] 李楠.雷达干扰多假目标欺骗效果研究[J].*弹箭与制导学报*,2020,40(1):65-68.(Li Nan. Study on jamming effect of multiple false targets with radar[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2020, 40(1): 65-68)
- [6] 徐磊,俞成龙,陈旭.一种基于DRFM的针对LFM雷达的自适应复合干扰技术[J].*舰船电子对抗*,2021,44(2):18-22,60.(Xu Lei, Yu Chenglong, Chen Xu. An adaptive composite jamming technology to LFM radar based on DRFM[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2021, 44(2): 18-22,60)
- [7] Soumekh M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 191-205.
- [8] 周治宇,饶彬,谢晓霞.对LFM-PC雷达的分布式合成欺骗干扰效果分析[J].*太赫兹科学与电子信息学报*,2020,18(1):24-29.(Zhou Zhiyu, Rao Bin, Xie

- Xiaoxia. Analysis of the effect on distributed synthetic deception jamming to LFM-PC radar[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2020, 18(1): 24-29)
- [9] 黄天奇, 王布宏, 田继伟. 集中式组网雷达的假目标欺骗干扰优化方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(7): 1484-1490. (Huang Tianqi, Wang Buhong, Tian Jiwei. False target deception jamming optimized method for centralized netted radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(7): 1484-1490)
- [10] 袁天, 罗震明, 刘晨, 等. 基于欺骗噪声复合干扰的组网雷达对抗方法[J]. *探测与控制学报*, 2019, 41(6): 69-74. (Yuan Tian, Luo Zhenming, Liu Chen, et al. Antagonistic method of deception and noise complex jamming against netted radar[J]. *Journal of Detection & Control*, 2019, 41(6): 69-74)
- [11] 于恒力, 张林让, 刘洁怡, 等. 一种异构组网雷达系统抗欺骗式假目标方法[J]. *电子科技大学学报*, 2019, 48(5): 706-710. (Yu Hengli, Zhang Linrang, Liu Jieyi, et al. A method against deception-false-target jamming based on isomeric netted radar[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2019, 48(5): 706-710)
- [12] GJB 403.7-87, 舰载雷达通用技术条件电磁兼容性要求和测试方法[S]. (GJB 403.7-87, General technical specification of shipborne radars electromagnetic compatibility requirements and measurements[S])
- [13] GJB 8312-2015, 舰船雷达对抗系统通用规范[S]. (GJB 8312-2015, General specification for radar electronic warfare system of shipborne[S])
- [14] 赵宏泽, 魏光辉, 杜雪, 等. 雷达装备二阶互调伪信号干扰效应预测模型[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 083001. (Zhao Hongze, Wei Guanghui, Du Xue, et al. Prediction model of second-order intermodulation pseudo-signal interference effect for radar equipment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 083001)
- [15] Du Xue, Wei Guanghui, Zhao Hongze, et al. Research on continuous wave electromagnetic effect in swept frequency radar[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 4862451.
- [16] 毛二可, 龙腾, 韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理[J]. *航空学报*, 2001, 22(s1): 16-25. (Mao Erke, Long Teng, Han Yueqiu. Digital signal processing of stepped frequency radar[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 22(s1): 16-25)
- [17] 龙腾, 毛二可, 何佩琨. 调频步进雷达信号分析与处理[J]. *电子学报*, 1998, 26(12): 84-88. (Long Teng, Mao Erke, He Peikun. Analysis and processing of modulated frequency stepped radar signal[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(12): 84-88)
- [18] 龙腾, 李耽, 吴琼之. 频率步进雷达参数设计与目标抽取算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2001, 23(6): 26-31. (Long Teng, Li Dan, Wu Qiongzh. Design methods for step frequency waveform and the target pick-up algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(6): 26-31)
- [19] 周国富, 毛二可. 频率调制对雷达线性调频脉冲压缩性能的影响[J]. *北京理工大学学报*, 2008, 28(3): 256-259. (Zhou Guofu, Mao Erke. Effect of frequency modulation on the performance of pulse compression in radar linear frequency modulation[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(3): 256-259)
- [20] 贺志毅, 郝祖全, 朱淮城. 步进跳频信号跳频间隔的选取分析[J]. *现代雷达*, 2003, 25(8): 23-25,36. (He Zhiyi, Hao Zuquan, Zhu Huaicheng. A study on the selection of stepped-frequency interval[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(8): 23-25,36)
- [21] Du Xue, Wei Guanghui, Zhao Kai, et al. Research on dual-frequency electromagnetic false alarm interference effect of a typical radar[J]. *Sensors*, 2022, 22(9): 3574.
- [22] GJB 8848-2016, 系统电磁环境效应试验方法[S]. (GJB 8848-2016, Electromagnetic environmental effects test methods for systems[S])
- [23] GJB 151B-2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. (GJB 151B-2013, Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military equipment and subsystems[S])