

文章编号: 2095-4980(2020)01-0024-06

对 LFM-PC 雷达的分布式合成欺骗干扰效果分析

周治宇, 饶 彬, 谢晓霞

(国防科技大学 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 以线性调频脉冲压缩(LFM-PC)雷达为例, 研究了3种典型欺骗干扰(直接延迟转发、间歇采样干扰、移频干扰)对雷达测距和测角的影响机理。通过控制干扰机幅度、相位和延迟时间, 可对雷达产生相干和非相干的合成欺骗干扰效果。信号级仿真表明, 通过控制时延和频率, 可在距离维产生大量假目标, 形成距离欺骗效果; 通过控制幅度和相位时延可在角度维形成多点源干扰, 形成角度欺骗效果, 这是分布式集群干扰的独特优势。3种干扰样式中, 直接转发干扰和移频干扰更容易形成角度欺骗效果; 间歇采样由于固有的间歇性, 在距离维较容易形成欺骗干扰, 而角度维的干扰效果稍差一些。

关键词: 无人集群; 分布式; 线性调频脉冲压缩雷达; 距离欺骗; 角度欺骗

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018184

Analysis of the effect on distributed synthetic deception jamming to LFM-PC radar

ZHOU Zhiyu, RAO Bin, XIE Xiaoxia

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Linear Frequency Modulation Pulse Compression(LFM-PC) radar is taken as an example to study the influence mechanism of three typical deception jamming(direct delay forwarding jamming, the interrupted-sampling and repeater jamming, frequency-shifting jamming) on the ranging and angle measurement of radar. By controlling the amplitude, phase and delay of the jammer, it can produce coherent and non-coherent synthetic deception jamming on the radar. Signal level simulation shows that by controlling the delay and frequency, a large number of false targets can be generated in the distance dimension to form a distance deception effect. By controlling the amplitude and phase delay, multi-source jamming can be formed in the angle dimension to form the angle deception effect, which is the unique advantage of distributed cluster jamming. Among the three jamming patterns, direct delay forwarding jamming and frequency-shifting jamming is more likely to form angle deception effects; the interrupted-sampling and repeater jamming is more likely to form deception jamming in the distance dimension due to the inherent intermittence, and the angular dimension interference effect is slightly worse.

Keywords: unmanned cluster; distributed; Linear Frequency Modulation Pulse Compression radar; distance deception; angle deception

当前, 无人作战平台已经登上历史舞台, 成为军事领域最具应用潜力的作战技术之一。通过挂载侦察和干扰载荷, 分布式无人平台可实现集群侦察、集群干扰、集群摧毁等多种任务。分布式无人平台带来的是体系优势, 其性能并不一定就是单个平台作战性能的简单叠加, 而是有质的飞跃。从防御的角度, 亟需对这类系统可能带来的集群效果进行定量和定性评估, 以便有针对性进行反对抗。以防空雷达为例, 线性调频(LFM)信号虽具有较强的抗噪声干扰能力, 但单部 LFM 雷达仍难以对抗基于数字射频存储(Digital RF Memory, DRFM)技术的欺骗干扰技术^[1], 更难以对抗分布式的欺骗干扰技术。

收稿日期: 2018-08-12; 修回日期: 2018-11-15

作者简介: 周治宇(1994-), 男, 硕士, 主要研究方向为电子信息系统建模、仿真与评估。email:zhouzhiyu16a@nudt.edu.cn

分布式合成干扰作为一种新型电子对抗支援干扰手段, 主要从雷达的主瓣进入, 干扰信号容易获得较大增益, 严重制约和限制了雷达检测跟踪性能的发挥。现有的关于分布式干扰的研究主要包括: 对分布式电子干扰系统的干扰效能的研究^[2-3], 雷达抗干扰措施对抗分布式干扰的研究^[4], 分布式干扰对单、双基地雷达探测能力影响的研究^[5-6], 利用分布式干扰机对组网雷达进行无源定位的研究^[7]。上述研究主要集中在分布式干扰对雷达干扰效能方面。在对于干扰下的目标进行检测与跟踪的研究文献中, 提出检测门限的自适应选取和波形控制^[8]、经验模式分解^[9]、量测预测^[10]和共形阵列的动态分区^[11]等方法。但以上文献普遍从功能级对分布式干扰的效果进行研究以及评估, 极少有公开文献对分布式干扰从信号级进行研究分析。

本文从理论上分别分析了幅度、相位、时延对直接转发干扰、间歇采样转发干扰以及移频干扰对 LFM-PC 雷达干扰效果的影响, 并设置仿真场景, 分别对以上 3 种干扰样式在单一干扰机与分布式干扰机中的效果进行仿真, 仿真中主要关注不同干扰样式以及不同参数在距离维和角度维对 LFM-PC 雷达目标检测的影响效果, 得到有应用价值的结论。

1 分布式直接转发干扰

分布式直接转发干扰的原理是干扰机通过 DRFM 技术直接存储雷达信号, 通过控制延迟和幅度, 再进行一次或多次转发, 从而在距离维上形成一连串距离假目标。在实际应用中, 由于干扰机均为无人作战平台, 虽然幅度和延迟可精确控制, 但转发的相位一般难以控制。这是因为机载平台的位置和姿态都是快速动态变化的, 从接收到发射的时间内, 干扰信号的路程差会引起较大的扰动; 另外, 工程实现中, 由于采样、数字处理、时钟同步等原因, 信号相对相位误差也很难保持。

设雷达发射信号为:

$$s(t) = A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi f_0(t-\tau) + j\pi K(t-\tau)^2 + j\phi} \quad (1)$$

式中: T 为脉冲宽度; $K = B/T$ 为调频斜率, B 为雷达带宽; f_0 为载频; A 为幅度; $\tau = 2R/c$ 为回波时延, R 为目标和雷达的距离; ϕ 为信号的相位。由式(1)可知, 影响直接转发的分布式干扰因素有幅度 A 、延时 τ 以及相位 ϕ 。下面分析这 3 个参数对干扰效果的影响。

1.1 干扰信号幅度的影响

由式(1)可以得到直接转发分布式干扰的回波信号 J 为:

$$J = \sum_{i=1}^M A_i \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{T}\right) e^{j2\pi f_0(t-\tau_i) + j\pi K(t-\tau_i)^2 + j\phi_i} \quad (2)$$

式中 M 为干扰机个数。

实际中干扰机到达雷达的幅度 A_i 与干扰机的转发功率、干扰机波束指向、雷达波束指向、干扰机距雷达的距离等因素有关。为了研究信号幅度对干扰效果带来的影响, 将时延和相位对准, 式(2)变为:

$$J = \sum_{i=1}^M A_i \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi f_0 t + j\pi K t^2} \quad (3)$$

1.2 时延的影响

干扰机将截获到的雷达射频线性调频信号, 经过一个时间延迟 τ 后发射回去, 从而产生距离欺骗假目标。为了研究时延对干扰效果带来的影响, 将信号幅度和相位对准, 为了研究方便, 设置相位为 0, 信号幅度为 1, 式(2)变为:

$$J = \sum \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{T}\right) e^{j2\pi f_0(t-\tau_i) + j\pi K(t-\tau_i)^2} \quad (4)$$

1.3 回波信号相位对干扰效果的影响

同样地, 为了研究回波信号相位对干扰效果带来的影响, 将时延对准, 为了研究方便, 设置时延为 0, 信号幅度为 1, 式(2)变为:

$$J = \sum \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi f_0 t + j\pi K t^2 + j\phi} \quad (5)$$

1.4 三种主要参数的变化对直接转发干扰的影响仿真

场景设置为：在距离测量目标半径为 15 km 的圆内随机分布 100 个功率为 1 W 的干扰机对 LFM-PC 雷达进行干扰，场景如图 1 所示。

将 100 个干扰机相叠加产生的转发干扰信号与 1 个功率为 100 W 干扰机产生的转发干扰信号进行比较。雷达参数设置为：雷达信号带宽为 10 MHz，脉冲宽度为 50 μ s，待检测目标与雷达相距 60 km，采样频率为 40 MHz。3 种主要参数的变化设置为：a) 幅度 A 变化时服从(0,15)之间的均匀分布，不变时为 1；b) 时延 τ 变化时服从(-10 μ s,10 μ s)之间的均匀分布，不变时为 0；c) 相位 ϕ 变化时服从(0,2 π)之间的均匀分布，不变时为 0。当改变其中一个参数时，保持其余 2 个参数不变。图 2 分别是单一干扰机与分布式直接转发干扰参数变化情况进行比较的距离向波形，图 3 为图 2 中各种情况脉压后的结果。

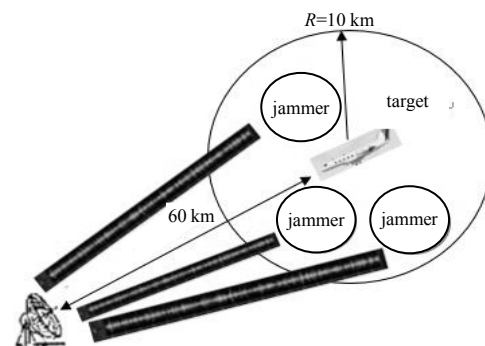


Fig.1 Sketch map of the scene

图 1 场景示意图

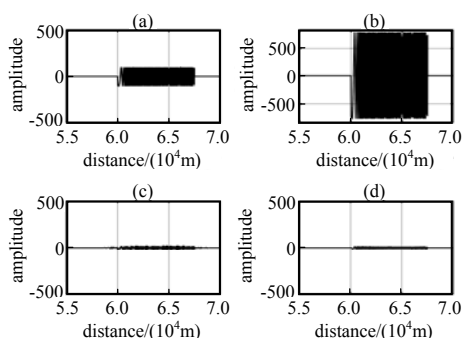


Fig.2 Waveforms before pulse compression under repeater jamming

图 2 脉压前直接转发干扰波形

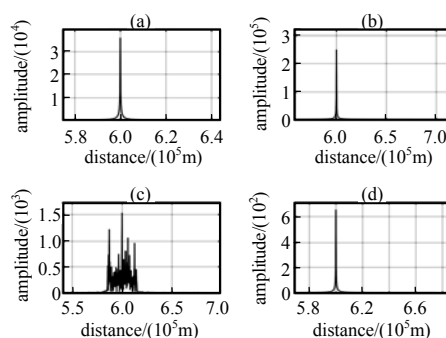


Fig.3 Waveforms after pulse compression under direct repeater jamming

图 3 脉压后直接转发干扰波形

图 2 和图 3 中(a)为单一干扰机的情况，(b)为分布式干扰机改变幅度的情况，(c)为分布式干扰机改变时延的情况，(d)为分布式干扰机改变相位的情况。由图 2 和图 3 对比可知，分布式直接转发干扰仅在改变时延的叠加信号中在距离维能产生欺骗性的多个假目标，且布满整个重复周期，雷达将无法有效区分真实目标信号和假目标干扰信号，从而造成大量的虚警或漏报，以达到干扰敌方的效果；而在改变相位和幅度的干扰信号中只产生了幅度的改变。对比分布式干扰机与单一干扰机可以看出，其产生的信号功率在幅度改变时优于前者；在相位改变时则劣于前者。

分布式干扰的优点还在于对雷达测角的影响，尤其在相同距离环上，如果有多个不同方向的人射信号将会对雷达形成多点源角度干扰，需要通过相干视频仿真，分析各种干扰对雷达测角的影响。图 4 为 50 次蒙特卡洛仿真中，直接转发干扰情况下的 4 种脉压后信号通过恒虚警处理，再进行和差测角，得到的角度偏差。图中横坐标为超过恒虚警门限的点数；真实目标的角度为 0，纵坐标即为偏差的角度。图中 4 幅图代表的情景与图 2 相同。表 1 为以上 4 种脉压后信号通过恒虚警处理，再进行和差测角后得到的平均角度偏差。

由图 4 可见，单一干扰机经过和差测角后产生的角度偏差很小，这是因为门限选择不同，在恒虚警处理后真实目标的角度泄露出来了。分布式合成干扰产生的虚假角目标较单一干扰机的角度偏差更大，即欺骗性更强。幅度和相位的改变虽不能在距离维上产生虚假目标，但在角度维上却有较大的欺骗性效果。时延的改变情况则和单一干扰机类似，是真实目标角度。

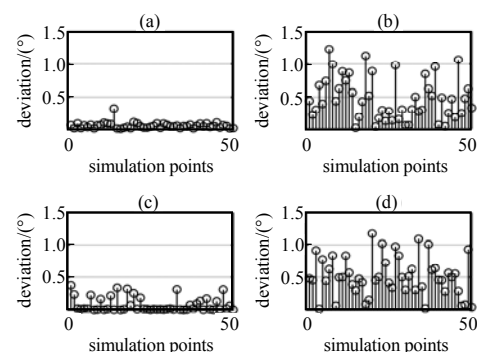


Fig.4 Angular deviations under direct repeater jamming

图 4 直接转发干扰下的角度偏差

表 1 直接转发干扰下 4 种场景的平均角度偏差
Table1 Mean angular deviations under direct repeater jamming in 4 scenes

scenes	mean angular deviation/(°)
single jammer	0.052 5
distributed amplitude changing	0.470 3
distributed delay changing	0.079 1
distributed phase changing	0.507 3

2 分布式间歇采样转发干扰

2.1 间歇采样转发干扰原理

由文献[12]可知雷达发射线性调频脉冲 $x(t)$ 为:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\pi k_f t^2} \quad (6)$$

式中: T 为脉宽; $k_f = B/T$ 为调频斜率, 相应的调频带宽为 B , 一般有 $BT \gg 1$ 。由文献[13]有

$$y_{sn}(t) = Sa\left[\pi(\xi_n + k_f t)(T - |t|)\right] \left[1 - \frac{|t|}{T}\right] \exp(j\pi \xi_n t), |t| < T \quad (7)$$

式中 $\xi_n = n f_s$ 。由文献[14]可知, $y_{sn}(t)$ 即为多普勒频移为 $f_d = n f_s$ 的目标回波经匹配滤波后的输出信号, $f_s = 1/T_s$ 为采样频率, $Sa(x) = \sin(x)/x$, $y_{sn}(t)$ 的幅度为:

$$|y_{sn}(t)| = \left| Sa\left[\pi(\xi_n + k_f t)(T - |t|)\right] \left[1 - \frac{|t|}{T}\right] \right| \quad (8)$$

2.2 分布式间歇采样转发干扰仿真

和 1.4 节的场景类似, 将干扰样式替换为间歇采样转发干扰(Interrupted-Sampling Repeater Jamming, ISRJ), 间歇采样参数设置为: 间歇采样周期为 $10 \mu\text{s}$, 占空比为 0.5, 其余参数与 1.4 节相同。图 5 为单一干扰机与分布式间歇采样转发干扰参数变化情况进行比较的距离向波形, 图 6 为图 5 中各种情况脉压后的结果。

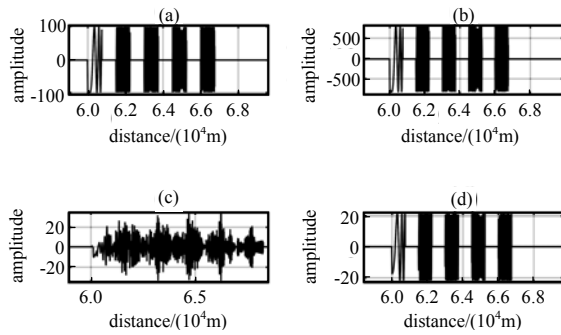


Fig.5 Waveforms before pulse compression under ISRJ
图 5 脉压前间歇采样转发干扰波形

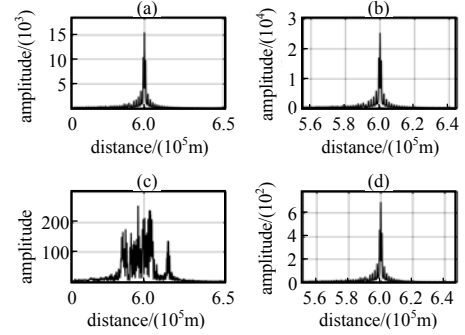


Fig.6 Waveforms after pulse compression under ISRJ
图 6 脉压后间歇采样转发干扰波形

由 2.1 节分析可知, 分布式间歇采样转发干扰因其间歇转发的性质, 在以上 4 种情况中均能在距离维产生欺骗性目标, 且假目标的幅度由对称中心向两边快速衰减, 因此一般仅有 3 到 5 个较强的假目标。而改变时延的叠加信号在距离维能产生幅度与真实目标相当的假目标群, 不仅起到了欺骗性的效果, 还兼具压制干扰的效果, 能将真实目标淹没在假目标群中。但改变相位、时延参数时的分布式合成干扰的幅度相对于单一干扰机, 不具有优势。

图 7 为 50 次蒙特卡洛仿真中, 间歇采样转发干扰情况下的 4 种脉压后信号通过恒虚警处理, 再进行和差测角后得到的角度偏差。表 2 为 4 种脉压后信号通过恒虚警处理, 再进行和差测角后得到的平均角度偏差。

由图 7 可以看出, 分布式间歇采样转发干扰得到的角度偏差较之直接转发干扰更小, 说明分布式间歇采样转发干扰在角度维更难产生假目标。部分原因是由于时域的间歇性, 造成假目标能量在时域维扩散了, 相同条件下形成多点源干扰所需的功率更小, 因此角度维的欺骗效果比直接转发干扰要稍差一些。总之, 间歇采样由于固有的间歇性, 在距离维较容易形成欺骗干扰, 而角度维的干扰效果稍差一些。

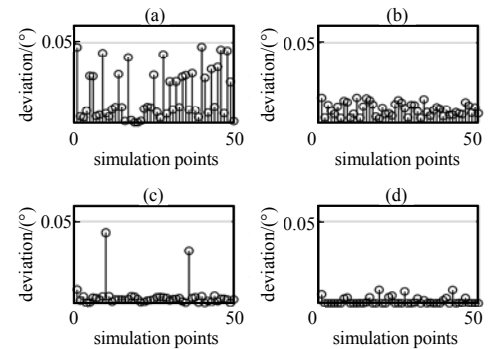


Fig.7 Angular deviations under ISRJ

图 7 间歇采样转发干扰下的角度偏差

表 2 间歇采样转发干扰下 4 种场景的平均角度偏差

Table2 Mean angular deviations under ISRJ in 4 scenes

scenes	mean angular deviation/(°)
single jammer	0.172 0
distributed amplitude changing	0.008 2
distributed delay changing	0.003 9
distributed phase changing	0.001 2

3 分布式移频干扰

3.1 移频干扰原理

移频干扰是转发式干扰机在对接收信号进行放大的同时对频率进行调制,然后再转发给雷达。由于线性调频信号在距离和速度间存在强耦合,当信号具有多普勒频移时,压缩信号主峰出现时间相对于无多普勒频移时将超前或滞后(与多普勒频移的正负有关)。因此,可以通过频移实现距离假目标欺骗干扰^[14]。

$t=0$ 时,干扰回波为:

$$s_j(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) A e^{j2\pi(f_0+\xi)(t-\tau) + j\pi K(t-\tau)^2} \quad (9)$$

式中 ξ 为移频量。

匹配滤波器响应函数为:

$$h(t) = \text{rect}(t/T) K e^{j2\pi f_0 t - j\pi K t^2} \quad (10)$$

回波信号经匹配滤波后,干扰输出为:

$$y_{j_out}(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) A T \sqrt{K} \left(1 - \frac{|t-\tau|}{T}\right) \text{sinc}\left(\pi K T \left(1 - \frac{|t-\tau|}{T}\right) \left(t - t_0 + \frac{\xi}{K}\right)\right) \exp\left(j2\pi\left(f_0 + \frac{\xi}{2}\right)(t-\tau)\right) \quad (11)$$

由式(11)可知:干扰压缩峰值位于 $\tau - \xi/K$ 时刻^[15];干扰压缩峰值位置相对原信号: $\xi > 0$ 时,前移 ξ/K ; $\xi < 0$ 时,滞后 ξ/K 。移频干扰输出信号频率比信号压缩输出频率多 $\xi/2$ 。

由式(9)可以得到分布式移频干扰的干扰回波表达式:

$$s_j(t) = \sum_{i=1}^M \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{T}\right) A_i e^{j2\pi(f_0+\xi_i)(t-\tau_i) + j\pi K(t-\tau_i)^2 + j\phi_i} \quad (12)$$

3.2 分布式移频干扰仿真

与 2.4 节的场景类似,将干扰样式替换为移频干扰。仿真中,频移 ξ 设置为服从 $(-5 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz})$ 的均匀分布,其他参数设置与 2.4 节中相同。图 8 为单一干扰机与分布式移频干扰参数变化情况进行比较的距离向波形,图 9 为图 8 中各种情况脉压后的结果。

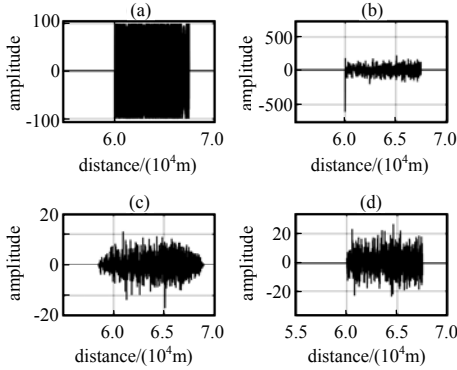


Fig.8 Waveforms before pulse compression under frequency-shifting jamming

图 8 脉压前移频干扰波形

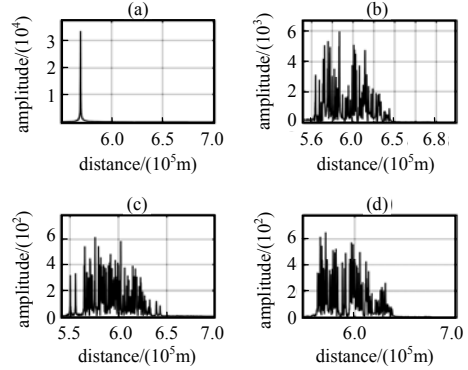


Fig.9 Waveforms after pulse compression under frequency-shifting jamming

图 9 脉压后移频干扰波形

从图 9 可以看出,4 种情况下都能形成距离上的假目标,分布式合成干扰能生成兼具干扰效果的假目标群,这一点优于单个干扰机;但单个干扰机的功率优于分布式合成干扰。与间歇采样转发干扰不同,生成的假目标并非幅度由对称中心向两边快速衰减,且不止 3~5 个假目标。

图 10 为 50 次蒙特卡洛仿真中,移频干扰情况下的 4 种脉压后信号通过恒虚警处理,再进行和差测角后得到的角度偏差。表 3 为以上 4 种脉压后信号通过恒虚警处理,再进行和差测角得到的平均角度偏差。

由图 10 可知,分布式干扰的情况相较于单一干扰机能得到较大的角度偏差且产生更多的角度维假目标,说明分布式干扰角度维的欺骗效果优于单一干扰机;而移频干扰角度维的干扰效果也优于间歇采样转发干扰和直接转发干扰。

表 3 频移干扰下 4 种场景的平均角度偏差
Table3 Mean angular deviations under frequency-shifting jamming in 4 scenes

scenes	mean angular deviation/(°)
single jammer	0.305 9
distributed amplitude changing	0.934 8
distributed delay changing	0.950 8
distributed phase changing	0.564 8

4 结论

分布式干扰是目前对防空雷达进行干扰的一种新型手段, 本文从信号的角度对分布式干扰进行了分析, 对理想状况下回波进行了理论分析及简单的雷达信号处理器仿真。分布式合成干扰的特色在于其分布式的特点在雷达单位周期内由多个干扰回波叠加而产生的假目标布满整个重复周期, 对 LFM-PC 雷达距离维和角度维产生欺骗效果, 使其难以正确检测到真正的目标信号, 降低了干扰被识别和处理的概率。

参考文献:

- [1] 曹兰英, 罗美方, 吴健. 基于信息论的脉冲压缩雷达 DRFM 干扰检测技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(3): 431-435. (CAO Lanying, LUO Meifang, WU Jian. Detection of DRFM jamming for pulse compression radar based on information theory[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(3): 431-435.)
- [2] AHMED N, HUANG H. Distributed jammer network: impact and characterization[C]// 2009 IEEE Military Communications Conference. Boston, MA, USA: IEEE, 2009: 237-242.
- [3] 蔡小勇, 蒋兴舟, 贾兴江, 等. 分布式电子干扰系统干扰效能分析与仿真[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(3): 47-51. (CAI Xiaoyong, JIANG Xingzhou, JIA Xingjiang, et al. Analysis and simulation for efficiency of the distributing electronic jamming system[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2006, 18(3): 47-51.)
- [4] 申振, 康健, 周长征. 分布式干扰机对联合战术信息分配系统干扰应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(2): 234-238. (SHEN Zhen, KANG Jian, ZHOU Changzheng. Application analysis of distributed jamming in Joint Tactical Information Distribution System[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(2): 234-238.)
- [5] 王勇刚, 李修和, 沈阳. 分布式压制性干扰下的双基地雷达探测能力研究[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 22(4): 45-49. (WANG Yonggang, LI Xiuhe, SHEN Yang. Detecting capability of bistatic radar under distributed blanket jamming[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2007, 22(4): 45-49.)
- [6] 王国宏, 王捷, 倪保航. “狼群”干扰对单、双基地雷达的干扰分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(3): 311-314. (WANG Guohong, WANG Jie, NI Baohang. Effects analysis of wolfpack jamming on monostatic radar and bistatic radar[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2005, 20(3): 311-314.)
- [7] 解凯, 陈永光, 李修和, 等. 分布式干扰机对组网雷达的无源定位[J]. 电子学报, 2008(6): 1164-1168. (XIE Kai, CHEN Yongguang, LI Xiuhe, et al. Passive location for netted radar on distributed jammers[J]. Acta Electronica Sinica, 2008(6): 1164-1168.)
- [8] KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y, BLAIR W D, et al. IMPDAF for radar management and tracking benchmark with ECM[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1998, 34(4): 1115-1134.
- [9] ELGAMEL S A, SORAGHAN J. Empirical mode decomposition-based monopulse processor for enhanced radar tracking in the presence of high-power interference[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2011, 5(7): 769-779.
- [10] FELDMANN M, NICKEL U, KOCH W. Adaptive air-to-air target tracking in severe jamming environment[C]// 14th International Conference on Information Fusion. Chicago, IL, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [11] YU K B, TURNER E L. Electronic protection for digital shared aperture array radar[C]// IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham, MA, USA: IEEE, 2010: 170-176.
- [12] 冯德军, 徐乐涛, 王雪松. 间歇采样转发假目标的相位特性及其在角度欺骗干扰中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2014(3): 135-140. (FENG Dejun, XU Letao, WANG Xuesong. Phase signature of active decoy and its application in angular deception jamming using interrupted-sampling repeater[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014(3): 135-140.)
- [13] 郭诚, 陈新年. 间歇采样转发干扰参数分析[J]. 电子信息对抗技术, 2014(5): 49-54. (WU Cheng, CHEN Xinnian. Jamming parameter analysis for intermittent sampling repeater[J]. Electronic Warfare Technology, 2014(5): 49-54.)
- [14] 张汉伟, 徐才宏. 对 LFM 脉冲压缩雷达的干扰研究与仿真分析[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(6): 22-26. (ZHANG Hanwei, XU Caihong. Research into the jamming to the LFM pulse compression radar and simulation analysis[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010, 33(6): 22-26.)
- [15] 张克舟, 李青山, 张恒, 等. LFM 脉冲压缩雷达的随机移频多假目标干扰技术研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(8): 106-109. (ZHANG Kezhou, LI Qingshan, ZHANG Heng, et al. Random frequency-shift for multi-false-target jamming of LFM pulse compression radar[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(8): 106-109.)

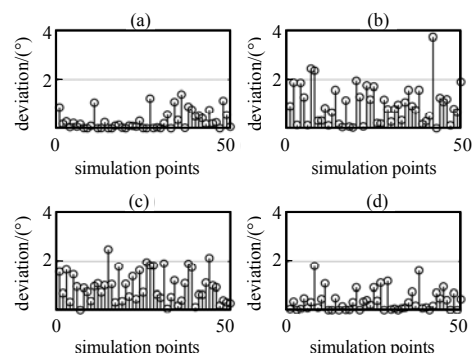


Fig.10 Angular deviations under frequency-shifting jamming
图 10 移频干扰下的角度偏差