

位置恒定式线性调频信号体制雷达假目标群干扰方法

潘小义^{1,2*}, 冯学文³, 周丽², 成洋², 陈吉源¹, 孟晓明⁴

- (1. 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;
2. 中国人民解放军 95841 部队, 甘肃 酒泉 735008; 3. 中国人民解放军 95930 部队, 甘肃 酒泉 735008;
4. 中国人民解放军陆军装备部驻南京地区军事代表局驻上海地区第二军事代表室, 上海 200031)

摘要:针对调频斜率捷变的线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号先进体制雷达多假目标干扰需求,提出了基于间歇采样转发与双向移频调制联合处理的位置恒定式 LFM 雷达假目标群干扰方法。将雷达截获信号同时与两路时间延迟信号混频求频差,获取随调频斜率自适应变化的间歇采样频率和移频调制量;依次进行间歇采样转发处理和双向移频调制处理获得干扰信号。经理论分析与仿真实验验证,针对调频斜率捷变等先进体制 LFM 雷达,该干扰方法产生的假目标群位置恒定,有利于在脉冲积累时形成较好的干扰效果,且相比单独间歇采样转发或移频干扰,假目标群覆盖范围可以更广,具有实际工程应用价值。

关键词:调频斜率捷变;间歇采样转发干扰;移频干扰;假目标群

中图分类号:TN958 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2025)05-175-11



论文
拓展

Group false-target jamming method with stable position against linear frequency modulation radars

PAN Xiaoyi^{1,2*}, FENG Xuewen³, ZHOU Li², CHENG Yang², CHEN Jiyuan¹, MENG Xiaoming⁴

- (1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. The PLA Unit 95841, Jiuquan 735008, China;
3. The PLA Unit 95930, Jiuquan 735008, China; 4. The PLA Unit Shanghai Second Military Representative Office, Nanjing Military Representative Office of the Ministry of Army Equipment, Shanghai 200031, China)

Abstract: In order to generate multiple false targets and interfere the advanced chirp rate agile LFM(linear frequency modulation) radars, a group false-target jamming method with stable position, based on intermittent sampling repeater jamming and bidirectional shift-frequency modulation, was proposed. The intermittent sampling frequency and frequency shift modulation were obtained by mixing the radar signal with two time-delay signals at the same time. The interference signal was obtained by intermittent sampling and repeating processing and bidirectional frequency shift modulation processing in sequence. Theoretical analysis and simulation experiments show that the position of the false target group generated by this jamming method is constant for advanced LFM radar systems such as frequency modulation slope agility. The proposed method is conducive to forming good interference effects during pulse accumulation. Meanwhile, compared with the intermittent sampling repeater jamming or the shift-frequency jamming, the range of group false targets via the proposed method is more wider, which is valuable in practical engineering applications.

Keywords: chirp rate agility; intermittent sampling repeater jamming; shift-frequency jamming; group false-target

现代雷达对抗中,相干干扰因具备相参处理增益大、干扰功率要求低等优势而被灵巧型雷达干扰系统重视,其中相干假目标干扰因其具有较强的欺骗迷惑性,更是雷达干扰技术研

究的重点,其产生方式主要通过延时转发或者移频调制产生^[1-4]。相对于延时转发式干扰,针对线性调频(linear frequency modulated, LFM)雷达的移频干扰利用雷达信号的距离-多普勒耦

收稿日期:2023-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61701507,61890542,61890540);长沙市科技计划资助项目(kq2209002)

*第一作者:潘小义(1986—),男,安徽池州人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:mrpanxy@nudt.edu.cn

引用格式:潘小义,冯学文,周丽,等.位置恒定式线性调频信号体制雷达假目标群干扰方法[J].国防科技大学学报,2025,47(5):175-185.

Citation: PAN X Y, FENG X W, ZHOU L, et al. Group false-target jamming method with stable position against linear frequency modulation radars [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(5): 175-185.

合特性,能够较为便捷地产生距离导前假目标^[2]。随着雷达技术的发展和抗干扰的现实需求,频率分集等先进技术逐渐在雷达系统中开始应用^[5-10]。对于调频斜率变化的频率分集等体制雷达而言,传统的移频干扰产生的假目标会发生峰值位置跳变,导致假目标不能在多个雷达脉冲间形成有效积累,易被雷达检测与识别^[11-13]。针对于此,文献[14]提出了一种延迟不变的 LFM 雷达移频干扰方法,其原理是将 LFM 移频干扰信号中的移频量转换为调频斜率和固定时延的乘积,最终实现移频量随调频斜率变化而自适应地变化,脉冲压缩后假目标不会发生位置跳变。但这种移频干扰方法在生成多假目标干扰信号时需要多路延时处理,消耗资源较多,应用实现存在一定难度。此外在收发天线共用体制干扰机系统中,传统移频干扰需要对雷达全脉冲进行采样,干扰系统的响应速度大大降低。实际上,多假目标干扰由于能够大量消耗雷达系统资源、具有较好的干扰效果而备受关注^[15]。

间歇采样转发干扰是一种能够便捷产生多假目标的干扰方式,数学原理上其等价于用一矩形包络脉冲串对雷达截获脉冲信号进行时域调制处理^[16]。间歇采样转发干扰通过短时采样和短时转发的交替进行提高了干扰响应速度,同时形成的干扰信号可视作具有不同多普勒频偏的回波信号,经雷达匹配滤波处理后表现为多个 sinc 函数的加权输出,从而形成距离向的假目标群^[17-20]。间歇采样转发干扰包含两个重要的参数:间歇采样时长和间歇采样频率。当信号调频斜率不变时,间歇采样转发干扰各阶假目标峰值幅度大小由假目标阶数、间歇采样时长和间歇采样频率共同决定,假目标峰值位置由假目标阶数和间歇采样频率决定。当调频斜率变化时,与固定移频干扰类似,此时固定间歇采样频率同样会引起同一阶假目标峰值位置在不同雷达脉冲匹配滤波处理后跳变,无法形成有效积累^[11-12]。此外,在实际应用中,间歇采样转发干扰参数需要根据干扰效果需求进行选定,同时还受到雷达脉冲信号长度、射频开关转换速度等现实因素的约束。

综上所述,调频斜率捷变 LFM 雷达系统干扰有着迫切的需求,如何便捷、快速地产生位置稳定的假目标群是上述先进体制雷达干扰技术研究的热难点问题之一。本文综合利用间歇采样转发干扰和移频干扰模型,提出了基于间歇采样与双向

移频调制联合处理的位置恒定式 LFM 雷达假目标群干扰方法,相比传统单一干扰方法,经 LFM 体制雷达脉冲压缩处理后可形成位置恒定的假目标群干扰效果。

1 间歇采样转发下双向移频干扰信号建模及脉压输出

1.1 信号模型

间歇采样转发干扰基本过程是对雷达截获信号进行一小段高保真采样后开始转发该段信号,待转发完成后再进行下一段信号采样,如此交替进行直至整个雷达脉冲信号结束;移频干扰则是在雷达截获信号上人为地调制一个频率分量。假设干扰机截获的雷达 LFM 信号复包络为:

$$u(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\pi kt^2} \quad (1)$$

式中, $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & t \in [-T/2, T/2] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 为矩形窗函数,

T 表示雷达脉冲持续时间, $k = \frac{B}{T}$ 是 LFM 信号调频斜率, B 为 LFM 信号带宽。

由间歇采样转发和移频干扰实现过程可知,间歇采样转发下双向移频干扰信号模型可以表示为:

$$u_j(t) = u(t)p(t)(e^{j2\pi\Delta f t} + e^{-j2\pi\Delta f t}), \Delta f > 0 \quad (2)$$

式中, $p(t)$ 为间歇采样转发控制信号, $e^{j2\pi\Delta f t}$ 为正向移频干扰调制信号, $e^{-j2\pi\Delta f t}$ 为负向移频干扰调制信号, Δf 为移频调制量。

间歇采样转发干扰过程如图 1 所示,理想间歇采样转发过程可以等价为用矩形包络脉冲串信号对雷达截获脉冲信号进行时域调制处理,设间歇采样转发控制信号为 $p(t)$, 可以表示为:

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad (3)$$

式中, τ 为间歇采样时长, T_s 为间歇采样周期, “*” 表示卷积, $\delta(\cdot)$ 为冲击函数, n 为整数。

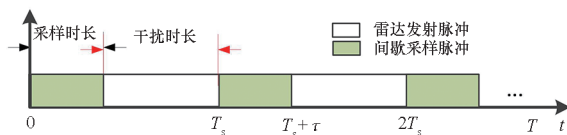


图 1 间歇采样转发干扰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interrupted-sampling repeater jamming

根据信号与系统知识,存在如下傅里叶变换对:

$$\begin{cases} u(t) e^{j2\pi\Delta f t} \Leftrightarrow \\ U(f - \Delta f) = \frac{1}{\sqrt{k}} e^{-j\pi \frac{(f-\Delta f)^2}{k} + j\frac{\pi}{4}}, -B/2 < f < B/2 \\ u(t) e^{-j2\pi\Delta f t} \Leftrightarrow \\ U(f + \Delta f) = \frac{1}{\sqrt{k}} e^{-j\pi \frac{(f+\Delta f)^2}{k} + j\frac{\pi}{4}}, -B/2 < f < B/2 \\ p(t) \Leftrightarrow \\ P(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau f_s Sa(n\pi\tau f_s) e^{-jn\pi\tau f_s} \delta(f - nf_s) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $Sa(n\pi\tau f_s) = \frac{\sin(n\pi\tau f_s)}{n\pi\tau f_s}$, 表示抽样函数;

$f_s = \frac{1}{T_s}$ 为间歇采样频率。

令 $a_n = \tau f_s Sa(n\pi\tau f_s)$ 为加权系数, 则有:

$$\begin{aligned} U_1(f) &= [U(f - \Delta f) + U(f + \Delta f)] * P(f) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n e^{-jn\pi\tau f_s} [U(f - \Delta f - nf_s) + \\ &\quad U(f + \Delta f - nf_s)] \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \frac{1}{\sqrt{k}} \left[e^{-j\pi \frac{(f-\Delta f-nf_s)^2}{k} + j\frac{\pi}{4} - jn\pi\tau f_s} + \right. \\ &\quad \left. e^{-j\pi \frac{(f+\Delta f-nf_s)^2}{k} + j\frac{\pi}{4} - jn\pi\tau f_s} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

1.2 输出响应

根据匹配滤波器特性, 匹配滤波器传输函数可以表示为:

$$H(f) = kU^*(f) = \sqrt{k} e^{j\pi \frac{f^2}{k} - j\frac{\pi}{4}}, -B/2 < f < B/2 \quad (6)$$

则间歇采样转发下移频干扰信号经匹配滤波器脉冲压缩处理后输出为:

$$\begin{aligned} Y(f) &= U_1(f)H(f) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \left[e^{j2\pi \frac{\Delta f + nf_s}{k} f} e^{-j\pi \frac{(\Delta f + nf_s)^2}{k} - jn\pi\tau f_s} + \right. \\ &\quad \left. e^{j2\pi \frac{(-\Delta f + nf_s)}{k} f} e^{-j\pi \frac{(-\Delta f + nf_s)^2}{k} - jn\pi\tau f_s} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

变换到时域并取幅值:

$$\begin{aligned} |y(t)| &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} Y(f) e^{j2\pi f t} df \right| \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \left| \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi f \left(t + \frac{\Delta f + nf_s}{k} \right)} df + \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi f \left(t + \frac{-\Delta f + nf_s}{k} \right)} df \right| \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \left\{ Sa[\pi(k t + \Delta f + nf_s)(T - |t|)] \left(1 - \frac{|t|}{T} \right) + \right. \\ &\quad \left. Sa[\pi(k t - \Delta f + nf_s)(T - |t|)] \left(1 - \frac{|t|}{T} \right) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

由此可见, 随着取值 n 的变化, 实际上对应着不同阶次的假目标, 即间歇采样转发下的双向移频干扰信号能够快速产生多假目标, 且各阶假目标的峰值时刻由间歇采样频率 f_s 、移频量 Δf 和调

频斜率 k 共同决定。由式(8)也可以看出, 正向移频和负向移频相当于将间歇采样形成的假目标群进行了双向搬移, 将会在时间轴上产生对称分布的两组假目标群, 正向移频和负向移频引起的假目标群峰值时刻分别为:

$$\begin{cases} t_{n-\max}^+ = -\frac{nf_s}{k} - \frac{\Delta f}{k} \\ t_{n-\max}^- = -\frac{nf_s}{k} + \frac{\Delta f}{k} \end{cases} \quad (9)$$

设间歇采样频率 f_s 最大可取值为 $f_{s-\max}$, 移频量 Δf 最大可取值为 $\Delta f_{\max}$, 则理论上讲, 假目标群可以分布的范围为:

$$\Delta t = \left[-\frac{|N|f_{s-\max}}{k} - \frac{\Delta f_{\max}}{k}, \frac{|N|f_{s-\max}}{k} + \frac{\Delta f_{\max}}{k} \right] \quad (10)$$

其中, N 表示可以被雷达检测到的假目标最大阶数。显然, 相比单独的间歇采样转发干扰和移频干扰, 本文干扰方法产生的假目标群分布范围可以更广, 为干扰应用设计带来更多的选择自由度。

通过式(9)同样还可以看出, 若雷达信号调频斜率 k 发生变化, 而间歇采样频率 f_s 和移频量 Δf 不变, 则假目标峰值时刻将发生变化。

例如, 假设 LFM 信号脉冲持续时间 $T = 100 \mu s$, 调频斜率 $k = 2 \times 10^{11} \text{ Hz/s}$, 设间歇采样时长 $\tau = 0.9 \mu s$, 间歇采样频率最大值 $f_{s-\max} = 0.5 \text{ MHz}$, 则单独进行间歇采样转发干扰时, 考虑 $N = 5$ 和 $N = -5$ 时假目标群分布情况, $\Delta t_1 = \left[-\frac{5 \times f_{s-\max}}{k}, \frac{5 \times f_{s-\max}}{k} \right] = [-12.5 \mu s, 12.5 \mu s]$, 乘以光速的一半就得到对应的距离范围为 $[-1.875 \text{ km}, 1.875 \text{ km}]$; 设移频最大值 $\Delta f_{\max} = 3 \text{ MHz}$, 则单独进行移频干扰时, 考虑正负移频量为 3 MHz 和 -3 MHz , 将会形成 2 个假目标, 峰值时刻分别为 $-\frac{\Delta f_{\max}}{k} = -15 \mu s$ 和 $-\frac{\Delta f_{\max}}{k} = 15 \mu s$, 两者之间距离范围是 $[-2.25 \text{ km}, 2.25 \text{ km}]$; 间歇采样后双向移频调制干扰形成的假目标群(正向移频且 $N = 5$ 、负向移频且 $N = -5$)之间 $\Delta t_1 = [-27.5 \mu s, 27.5 \mu s]$ 对应的距离范围为 $[-4.125 \text{ km}, 4.125 \text{ km}]$ 。可见, 相比单独间歇采样转发干扰和移频干扰, 间歇采样转发后双向移频干扰形成的假目标群可以分布的范围更广。

再来看调频斜率变化时假目标位置跳变情况: 当 $k = 2 \times 10^{11} \text{ Hz/s}$ 时, 若 $f_s = 0.5 \text{ MHz}$, $\Delta f = 3 \text{ MHz}$, 那么由正向移频和负向移频引起的 $N = 0$

阶假目标峰值时刻 $t_{0-\max}^+ = -15 \mu\text{s}$ 、 $t_{0-\max}^- = 15 \mu\text{s}$ 、 $N = +1$ 阶假目标峰值时刻 $t_{1-\max}^+ = -17.5 \mu\text{s}$ 、 $t_{1-\max}^- = 12.5 \mu\text{s}$ ；当调频斜率 $k = 10^{11} \text{ Hz/s}$ ，而 f_s 和 Δf 若保持不变，则此时 0 阶假目标峰值时刻 $t_{0-\max}^+ = -30 \mu\text{s}$ 、 $t_{0-\max}^- = 30 \mu\text{s}$ 、 $N = +1$ 阶假目标峰值时刻 $t_{1-\max}^+ = -35 \mu\text{s}$ 、 $t_{1-\max}^- = 25 \mu\text{s}$ ，即同一阶假目标峰值时刻发生了显著的跳变，雷达脉冲积累时易被识别和抑制。

2 位置恒定式假目标群干扰实现方法及参数设定

2.1 干扰实现方法

由于 LFM 信号频率差只与调频斜率和时延有关，若可以通过设计使得间歇采样频率 f_s 和移频量 Δf 满足

$$\begin{cases} f_s = k\Delta\tau_1 \\ \Delta f = k\Delta\tau_2 \end{cases} \quad (11)$$

其中， $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ 均为固定时延。这时间歇采样频率 f_s 和移频量 Δf 均能随着雷达信号调频斜率 k 自适应地变化。将式(11)代入式(9)，则此时：

$$\begin{cases} t_{n-\max}^+ = -n\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2 \\ t_{n-\max}^- = -n\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知，此时假目标群峰值时刻不随调频斜率 k 发生变化，只与固定时延 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ 相关。

为实现上述间歇采样频率 f_s 和移频量 Δf 随调频斜率自适应变化要求，且避免在实际系统中实时对调频斜率 k 进行估算，本文采取如图 2 所示的方法实现 f_s 和 Δf 的自适应调整。具体过程如下：

将截获信号 $u(t)$ 与延迟 $\Delta\tau_1$ 后的信号混频，得到：

$$\Delta u_1(t) = u(t)u^*(t - \Delta\tau_1) = e^{j2\pi k\Delta\tau_1 t - j\pi k\Delta\tau_1^2} \quad (13)$$

输入鉴频器得到频率差 $k\Delta\tau_1$ ，以该频率差作为间歇采样频率，即 $f_s = k\Delta\tau_1$ ，合成间歇采样控制信号：

$$p(t|k\Delta\tau_1) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nk\Delta\tau_1) \quad (14)$$

同理，将截获信号 $u(t)$ 与延迟 $\Delta\tau_2$ 后的信号混频，得到：

$$\Delta u_2(t) = u(t)u^*(t - \Delta\tau_2) = e^{j2\pi k\Delta\tau_2 t - j\pi k\Delta\tau_2^2} \quad (15)$$

输入鉴频器得到频率差 $k\Delta\tau_2$ ，以该频率差作为移

频量，即 $\Delta f = k\Delta\tau_2$ ，合成双向频率调制信号：

$$v(t|k\Delta\tau_2) = e^{j2\pi k\Delta\tau_2 t} + e^{-j2\pi k\Delta\tau_2 t} \quad (16)$$

依次使用间歇采样控制信号 $p(t|k\Delta\tau_1)$ 和频率调制信号 $v(t|k\Delta\tau_2)$ 对 $u(t)$ 进行处理，可得最终干扰信号为：

$$u_j(t) = u(t)p(t|k\Delta\tau_1)v(t|k\Delta\tau_2) \quad (17)$$

至此，只要设定好延迟 $\Delta\tau_1$ 和 $\Delta\tau_2$ ，就实现了间歇采样频率和移频量随调频斜率的自适应变化，输出的假目标群位置恒定不跳变。

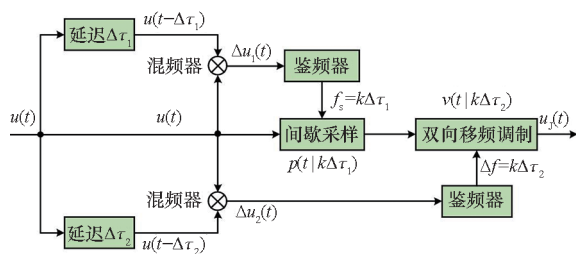


图 2 位置恒定式 LFM 雷达假目标干扰实现示意图

Fig. 2 Schematic diagram of false target jamming for LFM radar with constant position

2.2 干扰参数设定

以第一段间歇采样脉冲为例，其采样时长为 τ ，从图 2 中易知，固定时延 $\Delta\tau_1$ 的设置需满足：

①在第一段间歇采样脉冲结束前，间歇采样频率能够被求出，则至少需 $\Delta\tau_1 < \tau$ ；②保证间歇采样转发干扰信号的短时脉冲能够在发射时段内被完全转发，即间歇采样周期 $T_s = \frac{1}{\max(k)\Delta\tau_1} > 2\tau$ 。

从而有：

$$\Delta\tau_1 < \min\left(\frac{1}{2\max(k)\tau}, \tau\right) \quad (18)$$

$\Delta\tau_2$ 的设置需满足：①在第一段间歇采样脉冲结束前，移频调制量能够被求出，即至少需 $\Delta\tau_2 < \tau$ ；②为保证移频干扰假目标幅度及干扰效果，一般移频调制量不宜超过信号带宽的一半，即 $\Delta f = k\Delta\tau_2 < \frac{kT}{2}$ 。从而有：

$$\Delta\tau_2 < \min\left(\frac{T}{2}, \tau\right) \quad (19)$$

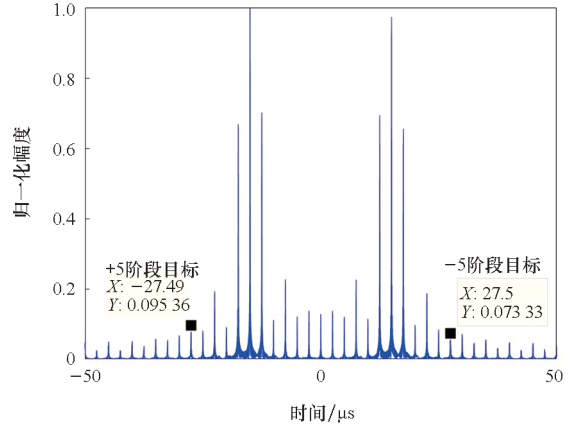
3 仿真实验

仿真实验条件见第 2 节，即 LFM 雷达脉冲持续时间 $T = 100 \mu\text{s}$ ，调频斜率 k 在不同脉冲间发生捷变，间歇采样频率和移频量大小根据仿真实验内容要求进行相应设置。

3.1 假目标群分布范围验证

设 LFM 雷达信号调频斜率初始值 $k = 2 \times$

10^{11} Hz/s, 间歇采样时长 $\tau = 0.9 \mu\text{s}$, 间歇采样频率最大值 $f_{s-\max} = 0.5$ MHz, 单独进行间歇采样转发干扰所得假目标群分布情况如图 3(a) 所示, 图中对 $N = +5$ 和 $N = -5$ 假目标的横坐标进行了标注, 其峰值时刻分别为 $-12.51 \mu\text{s}$ 和 $12.5 \mu\text{s}$, 仿真结果与第 2 节中仅进行间歇采样转发干扰的理论分析结果是吻合的。设移频最大值 $\Delta f_{\max} = 3$ MHz, 单独进行正负移频干扰所得 2 个假目标分布情况如图 3(b) 所示, 峰值时刻分别为 $-15.01 \mu\text{s}$ 和 $15 \mu\text{s}$, 仿真结果也和本文前述中单独的移频干扰理论分析结果相吻合。将间歇采样转发和双向移频调制处理结合的干扰信号形成的假目标群如图 3(c) 所示, 可见在距离向上形成了对称的 2 组假目标群, 再观察图中标注的正向移频且 $N = +5$ 和负向移频且 $N = -5$ 时的假目标时刻分别为 $-27.49 \mu\text{s}$ 和 $27.5 \mu\text{s}$, 即本文所提方法形成的假目标群分布范围相比单独进行间歇采样转发或移频干扰而言要大, 有利于在实际雷达距离内形成覆盖范围



(c) 间歇采样转发下双向移频干扰
(c) Bidirectional frequency shift interference under interrupted-sampling repeater jamming

图 3 假目标群分布范围仿真实验结果

Fig. 3 Simulation experiment results of the distribution range of false target groups

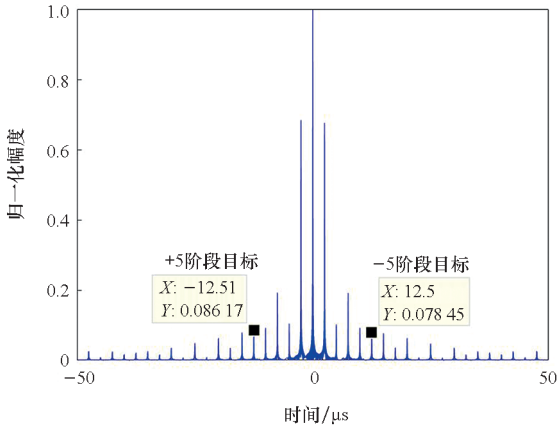
更广的假目标群。

3.2 假目标群跳变验证

设 LFM 雷达相邻两个脉冲信号的调频斜率发生变化, 即 $k = 2 \times 10^{11}$ Hz/s 和 $k = 10^{11}$ Hz/s, 间歇采样时长 $\tau = 0.9 \mu\text{s}$, $f_s = 0.5$ MHz、 $\Delta f = 3$ MHz 固定不变。图 4(a) 是第一个脉冲对应的联合处理干扰信号经匹配滤波压缩处理后的结果。由图中标注可以看到: 正向移频且 $N = 0$ 时假目标峰值时刻 $t_{0-\max}^+ = -15.01 \mu\text{s}$, 负向移频且 $N = 0$ 时假目标峰值时刻 $t_{0-\max}^- = 15 \mu\text{s}$; $N = +1$ 时假目标峰值时刻 $t_{1-\max}^+ = -17.5 \mu\text{s}$ 、 $t_{1-\max}^- = 12.5 \mu\text{s}$, 与第 2 节的理论分析结论相一致。图 4(b) 是第二个脉冲对应的联合处理干扰信号经匹配滤波压缩处理后的结果。 $N = 0$ 时假目标峰值时刻 $t_{0-\max}^+ = -30 \mu\text{s}$ 、 $t_{0-\max}^- = 30 \mu\text{s}$, $N = +1$ 时假目标峰值时刻 $t_{1-\max}^+ = -35 \mu\text{s}$ 、 $t_{1-\max}^- = 25 \mu\text{s}$, 与第 2 节的理论分析结论也是一致的。可见, 当雷达信号调频斜率捷变时, 固定间歇采样频率和移频调制量将会使得假目标群峰值时刻发生显著跳变, 影响干扰能量积累效果。

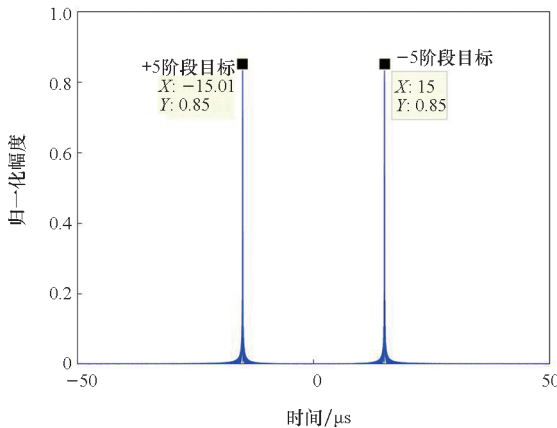
3.3 位置恒定式假目标群验证

设 LFM 雷达相邻三个脉冲信号的调频斜率发生变化, 即 $k = 3 \times 10^{11}$ Hz/s、 $k = 2 \times 10^{11}$ Hz/s、 $k = 10^{11}$ Hz/s, 间歇采样时长 $\tau = 0.9 \mu\text{s}$, 若 $f_s = 0.5$ MHz、 $\Delta f = 3$ MHz 固定不变, 结果如图 5 所示, 其中图 5(a) ~ (c) 绘出了三个干扰信号各自对应的假目标群情况; 图 5(d) 是三个干扰信号对应的



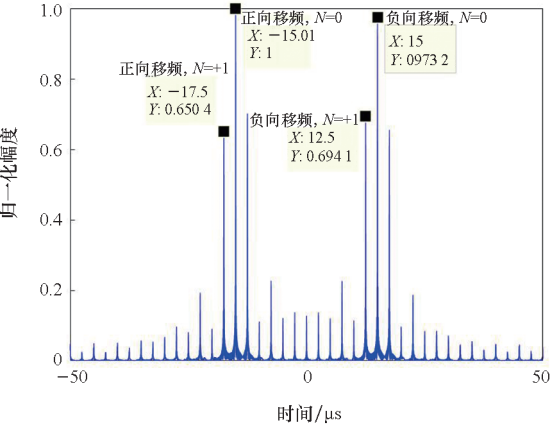
(a) 间歇采样转发干扰

(a) Interrupted-sampling repeater jamming

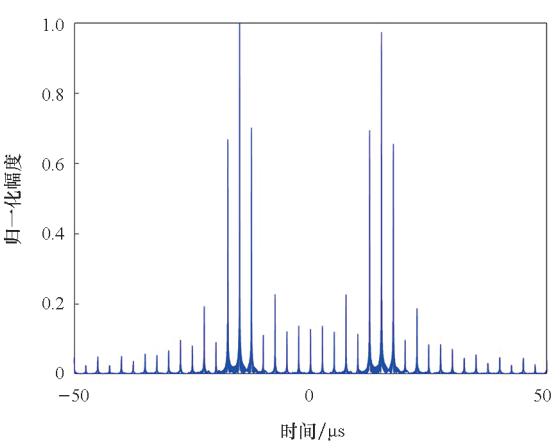


(b) 移频干扰(正、负双向移频)

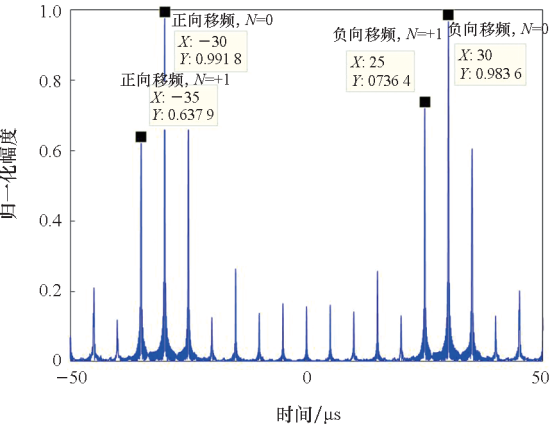
(b) Frequency shift interference (positive and negative bidirectional frequency shift)



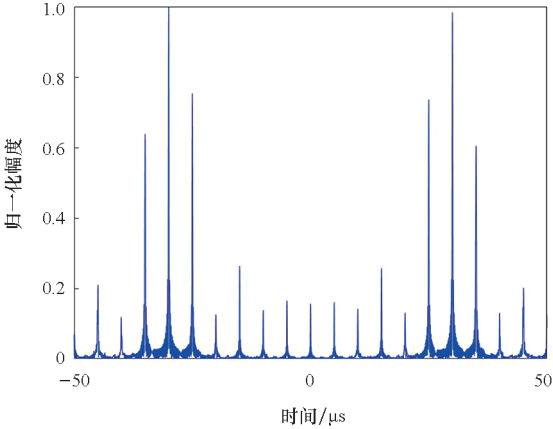
(a) 第一个脉冲
(a) The first pulse



(b) 第二个脉冲
(b) The second pulse



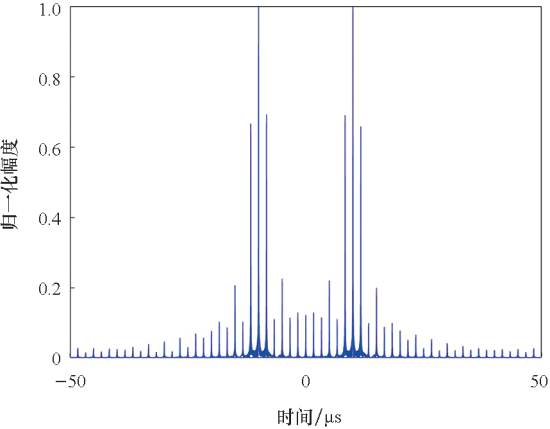
(b) 第二个脉冲
(b) The second pulse



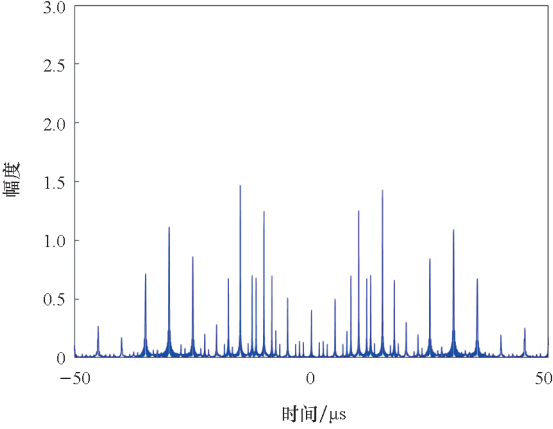
(c) 第三个脉冲
(c) The third pulse

图 4 假目标群峰值位置跳变仿真实验结果
Fig.4 Simulation experimental results of peak position jump of false target group

假目标群积累后的情况。图 6 是位置恒定式假目标群干扰方法仿真实验结果,其中图 6(a) ~ (c)绘出了三个干扰信号各自对应的假目标群情



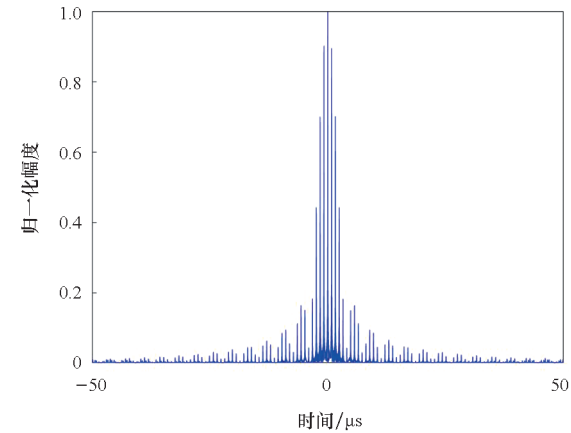
(a) 第一个脉冲
(a) The first pulse



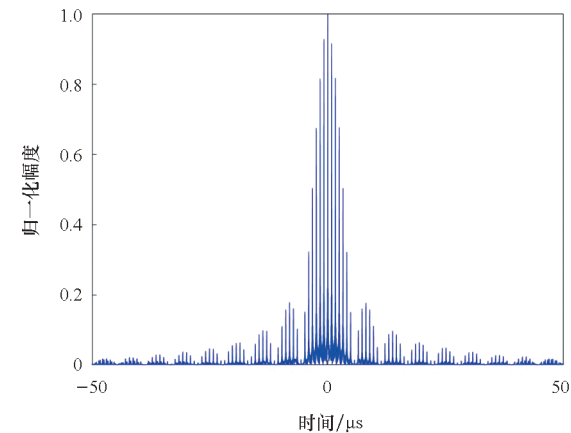
(d) 脉冲积累后的假目标群
(d) False target group after pulse accumulation

图 5 固定间歇采样频率和移频调制量时假目标群仿真实验结果
Fig.5 Simulated experimental results of false target group with fixed intermittent sampling frequency and frequency shift modulation amount

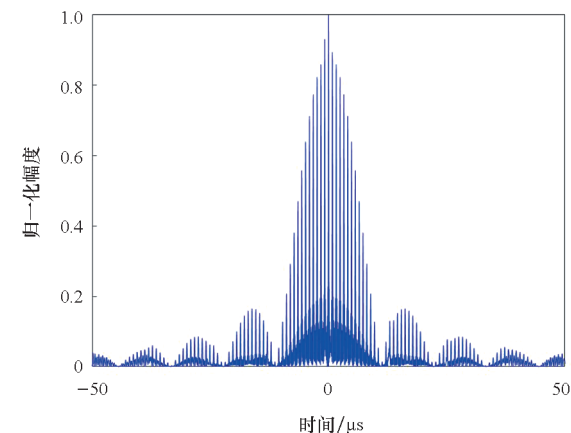
况。根据式 (18) 和式 (19), 可以设定 $\Delta\tau_1 = 0.81\ \mu\text{s}$, $\Delta\tau_2 = 0.72\ \mu\text{s}$, 从而间歇采样频率和移频调制量自动随调频斜率发生变化, 其中第一个干扰信号中 $f_s = 0.243\ \text{MHz}$, $\Delta f = 0.218\ 7\ \text{MHz}$, 第二个干扰信号 $f_s = 0.162\ \text{MHz}$, $\Delta f = 0.145\ 8\ \text{MHz}$, 第三个干扰信号 $f_s = 0.081\ \text{MHz}$, $\Delta f = 0.072\ 9\ \text{MHz}$; 图 6(d) 则是三个干扰信号对应的假目标群积



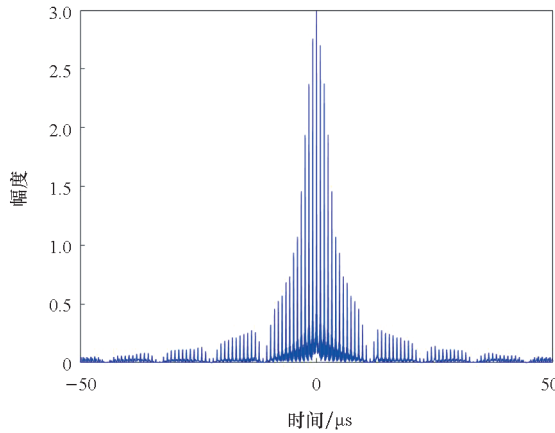
(a) 第一个脉冲
(a) The first pulse



(b) 第二个脉冲
(b) The second pulse



(c) 第三个脉冲
(c) The third pulse



(d) 脉冲积累后的假目标群
(d) False target group after pulse accumulation

图 6 位置恒定式假目标群仿真实验结果
Fig. 6 Simulation experiment results of the position constant false target group

累后的情况。对比图 6(a) ~ (c) 和图 6(d) 中的实验结果可以看出, 本文所提干扰方法形成的位置恒定式假目标群在积累后的幅度相比固定间歇采样频率和移频调制量的干扰形成的假目标群更高。

3.4 干扰方法稳定性验证

为进一步验证本文所提干扰方法的稳定性, 依然以 LFM 雷达相邻三个脉冲信号为实验对象, 设调频斜率 k 在 $3 \times 10^{11}\ \text{Hz/s}$ 至 $10^{11}\ \text{Hz/s}$ 范围内随机变化, 间歇采样时长 $\tau = 2.0\ \mu\text{s}$, 根据式 (18) 和式 (19), 可以预先设定 $\Delta\tau_1 = 0.76\ \mu\text{s}$, $\Delta\tau_2 = 1.8\ \mu\text{s}$, 进行三组对比实验。实验中随机得到的 k 值见表 1。

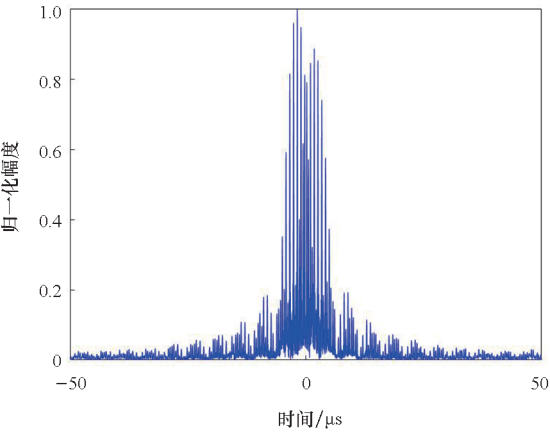
表 1 三个脉冲对应的调频斜率值

Tab. 1 Chirp rate of three pulse

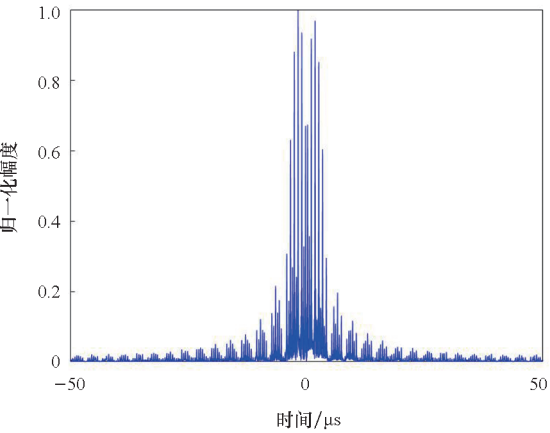
单位: Hz/s			
序号	第 1 个脉冲	第 2 个脉冲	第 3 个脉冲
1	1.064×10^{11}	1.554×10^{11}	1.092×10^{11}
2	1.194×10^{11}	2.647×10^{11}	2.390×10^{11}
3	2.311×10^{11}	1.342×10^{11}	2.412×10^{11}

随机调频斜率捷变实验得到的假目标群结果如图 7 ~ 9 所示, 其中每组图示中的图 (a) ~ (c) 是三个干扰信号各自对应的假目标群, 每组图示中的图 (d) 是积累后的假目标群。综合分析图 7 ~ 9 可以看到, 本文所提位置恒定式假目标群

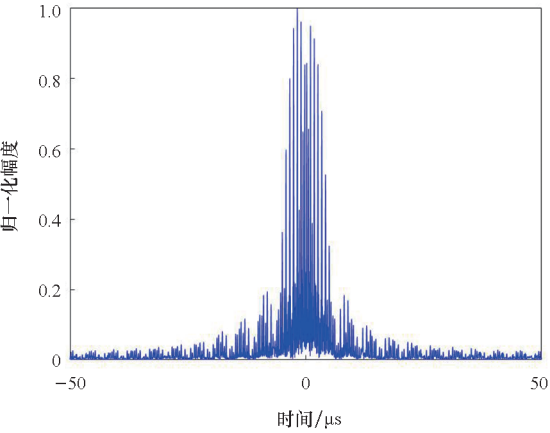
干扰方法能够很好地自动适应调频斜率 k 的随机变化,每个干扰脉冲对应的假目标群位置都不会发生跳变,从而保证了积累后的假目标群的干扰效果。



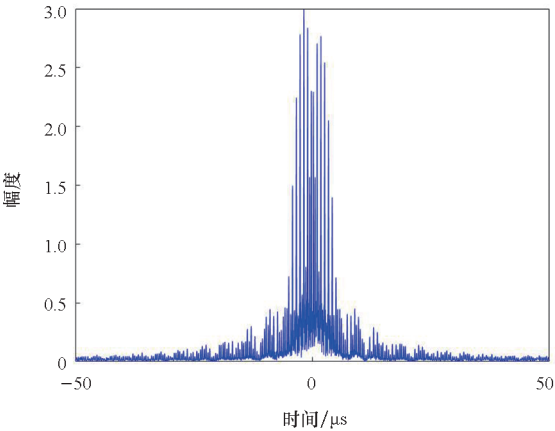
(a) 第一个脉冲
(a) The first pulse



(b) 第二个脉冲
(b) The second pulse

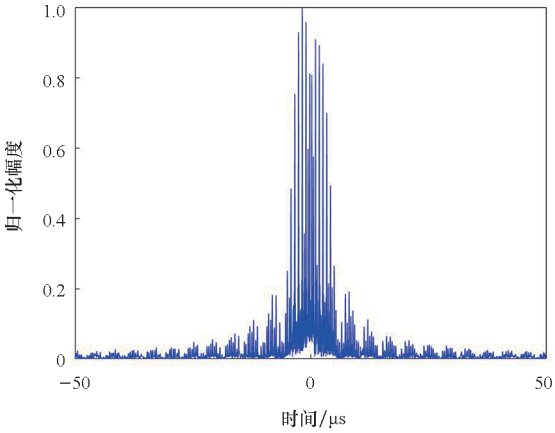


(c) 第三个脉冲
(c) The third pulse

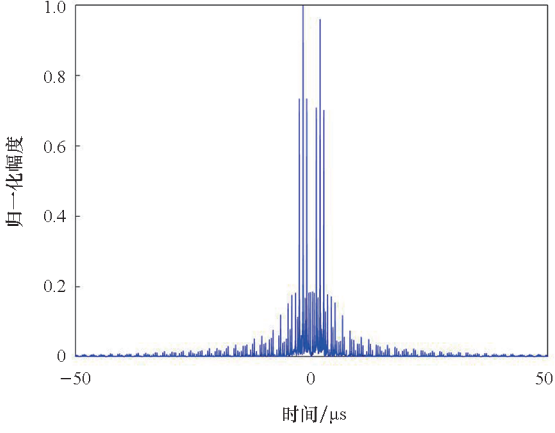


(d) 第 1 组实验对应的假目标群
(d) False target group corresponding to
No. 1 experiments

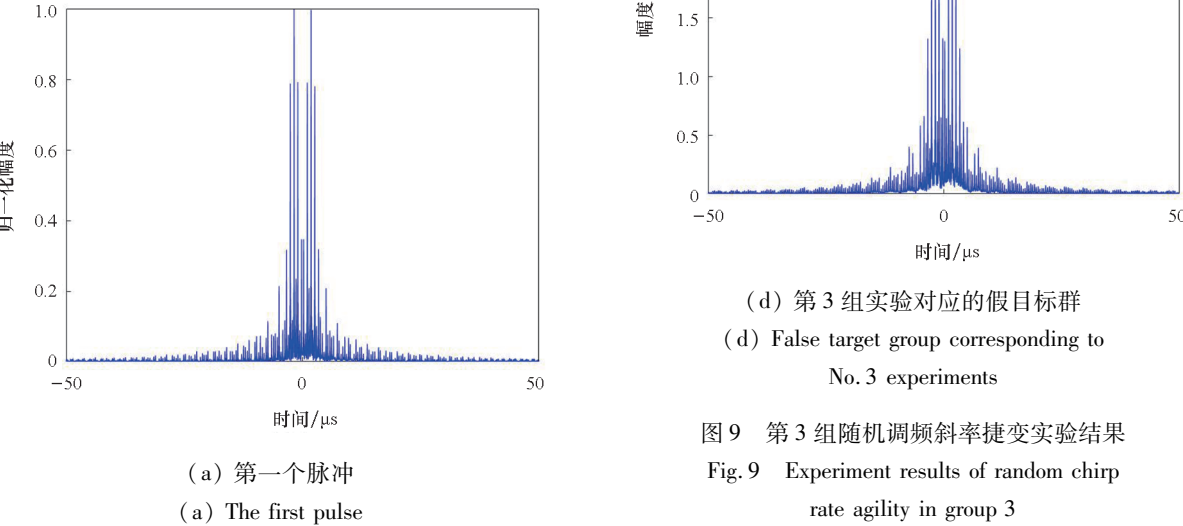
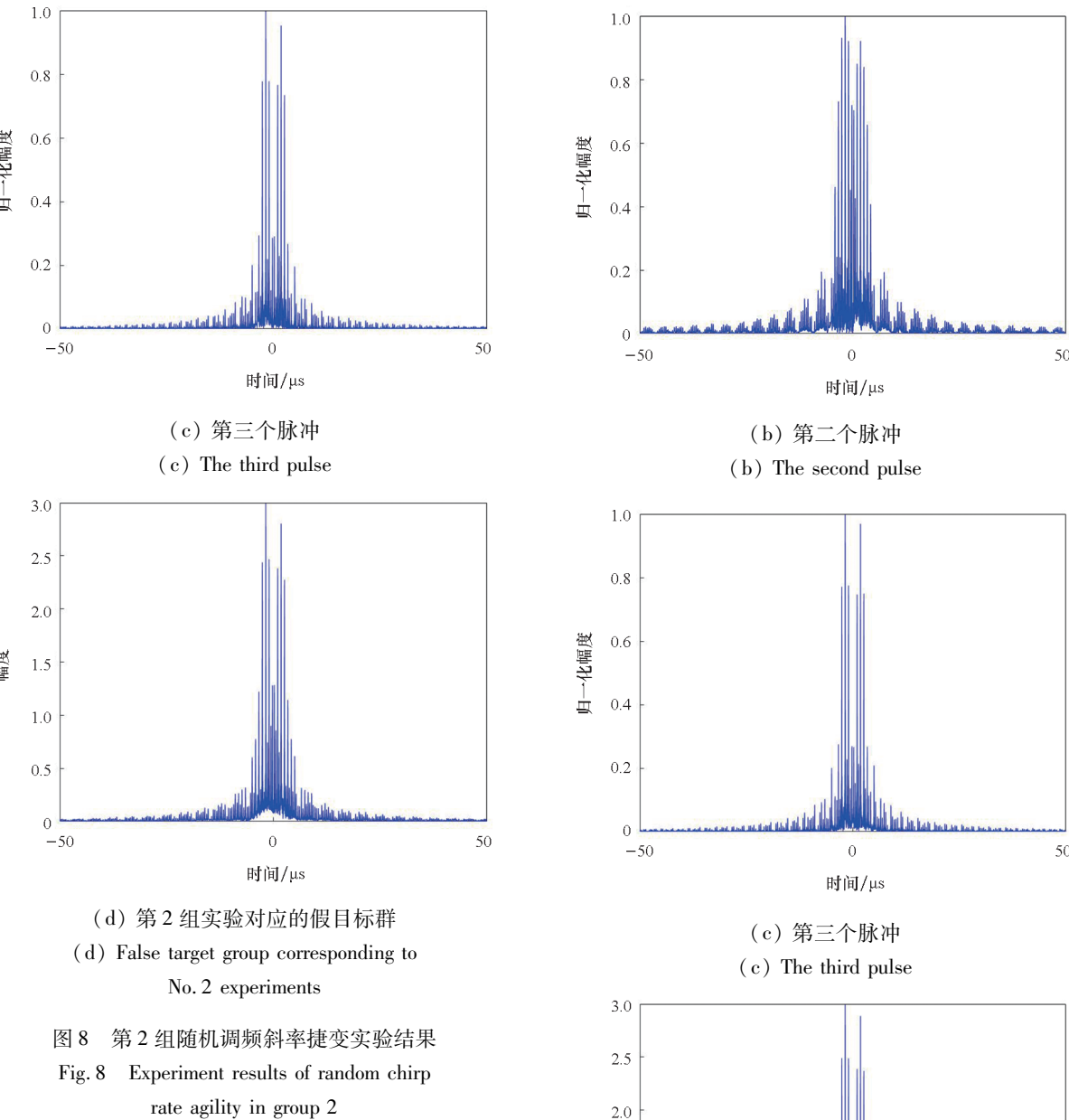
图 7 第 1 组随机调频斜率捷变实验结果
Fig. 7 Experiment results of random chirp
rate agility in group 1



(a) 第一个脉冲
(a) The first pulse



(b) 第二个脉冲
(b) The second pulse



4 结论

多假目标干扰因其具备较好的欺骗性、能够有效消耗雷达资源等优势被灵巧型雷达干扰系统所重视,如何便捷快速地产生有效的多假目标干扰信号是现代雷达干扰技术难题之一。针对 LFM 信号波形下的调频斜率捷变体制雷达多假目标干扰需求,基于间歇采样转发和双向移频调制联合处理,实现了无须实时计算调频斜率下的间歇采样频率和移频调制量自适应变化,解决了假目标群位置发生跳变的难题,具备对调频斜率捷变等先进体制 LFM 雷达的位置恒定式假目标群干扰效果;相比单独间歇采样转发干扰或移频干扰,所提干扰方法产生的假目标群分布范围也更广。理论分析和仿真实验结果验证了所提方法和结论的正确性。

参考文献 (References)

[1] 赵忠凯,周文彬,李虎. 基于非整数阶 SSC 盲移频的 LFM 雷达干扰技术[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2824 – 2831.
ZHAO Z K, ZHOU W B, LI H. LFM radar jamming technology based on non-integer order SSC blind frequency shift[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(10): 2824 – 2831. (in Chinese)

[2] 张亮,王国宏,张翔宇,等. LFM 雷达对抗移频干扰方法研究[J]. 电子学报, 2021, 49(3): 510 – 517.
ZHANG L, WANG G H, ZHANG X Y, et al. The research on LFM radar countering frequency-shift jamming methods[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(3): 510 – 517. (in Chinese)

[3] 周文彬. 脉冲压缩体制雷达的干扰样式研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
ZHOU W B. Research on the jamming pattern of pulse compression system radar[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)

[4] 李欣,罗富友,袁天. 广义 S 变换和阈值分割联合抗频谱扩展 – 压缩移频干扰[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(1): 49 – 56.
LI X, LUO F Y, YUAN T. Spectrum spread and compression shift-frequency jamming suppression by combining generalized S transform and threshold segmentation [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(1): 49 – 56. (in Chinese)

[5] 冯祥芝,许小剑. 随机线性调频斜率 SAR 抗欺骗干扰方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 69 – 73.
FENG X Z, XU X J. Study of countermeasures to deceptive jamming using random linear modulation frequency ratio SAR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(1): 69 – 73. (in Chinese)

[6] 朱圣棋,余昆,许京伟,等. 波形分集阵列新体制雷达研究进展与展望[J]. 雷达学报, 2021, 10(6): 795 – 810.
ZHU S Q, YU K, XU J W, et al. Research progress and prospect for the novel waveform diverse array radar [J]. Journal of Radars, 2021, 10(6): 795 – 810. (in Chinese)

[7] DONG S X, QUAN Y H, FANG W, et al. Anti-intermittent sampling jamming method based on frequency agile radar and K-means [C]//Proceedings of the CIE International Conference on Radar, 2021: 1140 – 1144.

[8] SUN Y Z, XIA H J, WEI Y. Adaptive dense main lobe jamming suppression method based on multiple measurement sparse recovery for frequency agile radar[C]//Proceedings of the CIE International Conference on Radar, 2021: 1936 – 1939.

[9] WEI S P, ZHANG L, ZHANG J, et al. Fully coherent integration and measurement of optimized frequency agile waveform for weak target high-resolution ISAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5120716.

[10] ZHOU K, LI D X, HE F, et al. A sparse imaging method for frequency agile SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5223616.

[11] 董淑仙,吴耀君,方文,等. 频率捷变雷达联合模糊 C 均值抗间歇采样干扰[J]. 雷达学报, 2022, 11(2): 289 – 300.
DONG S X, WU Y J, FANG W, et al. Anti-interrupted sampling repeater jamming method based on frequency-agile radar joint fuzzy C-means [J]. Journal of Radars, 2022, 11(2): 289 – 300. (in Chinese)

[12] 刘智星,杜思予,吴耀君,等. 脉间 – 脉内捷变频雷达抗间歇采样干扰方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(2): 301 – 312.
LIU Z X, DU S Y, WU Y J, et al. Anti-interrupted sampling repeater jamming method for interpulse and intrapulse frequency-agile radar[J]. Journal of Radars, 2022, 11(2): 301 – 312. (in Chinese)

[13] 杜思予,刘智星,吴耀君,等. 基于 SVM 的捷变频雷达密集转发干扰智能抑制方法[J]. 雷达学报, 2023, 12(1): 173 – 185.
DU S Y, LIU Z X, WU Y J, et al. Dense-repeated jamming suppression algorithm based on the support vector machine for frequency agility radar[J]. Journal of Radars, 2023, 12(1): 173 – 185. (in Chinese)

[14] 王玉军,赵国庆,胡曦明. 基于延迟不变的 LFM 雷达移频干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1861 – 1863.
WANG Y J, ZHAO G Q, HU X M. Method of shift-frequency jamming to LFM radar based on delay invariance[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8): 1861 – 1863. (in Chinese)

[15] 张洋,位寅生,于雷. 抗主瓣多假目标欺骗干扰 EPC-MIMO 波形自适应优化设计技术[J]. 电子学报, 2022, 50(3): 513 – 523.
ZHANG Y, WEI Y S, YU L. Adaptive optimization design technology of EPC-MIMO waveform against mainlobe multiple

false targets deception jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(3): 513–523. (in Chinese)

[16] WANG X S, LIU J C, ZHANG W M, et al. Mathematic principles of interrupted-sampling repeater jamming (ISRJ)[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2007, 50(1): 113–123.

[17] 刘建成, 刘忠, 王雪松, 等. 基于群延迟的前移干扰研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(1): 99–105.

LIU J C, LIU Z, WANG X S, et al. Research on forward interference based on group delay [J]. Progress in Natural Science, 2007, 17 (1): 99–105. (in Chinese)

[18] 刘建成, 王雪松, 刘忠, 等. 对线性调频脉压雷达的导前假目标群干扰[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1350–1353.

LIU J C, WANG X S, LIU Z, et al. Preceded false target groups jamming against LFM pulse compression radars [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(6): 1350–1353. (in Chinese)

[19] 吴传章, 陈伯孝. 间歇非均匀采样转发干扰产生方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 1–10.

WU C Z, CHEN B X. Study on generating method of interrupted non-uniform sampling repeater jamming [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 1–10. (in Chinese)

[20] LIU X B, ZHAO F, XIE A L. Target measurement in radio frequency simulation using code-interrupted transmitting and receiving of pulse signals[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(5): 4451–4460.