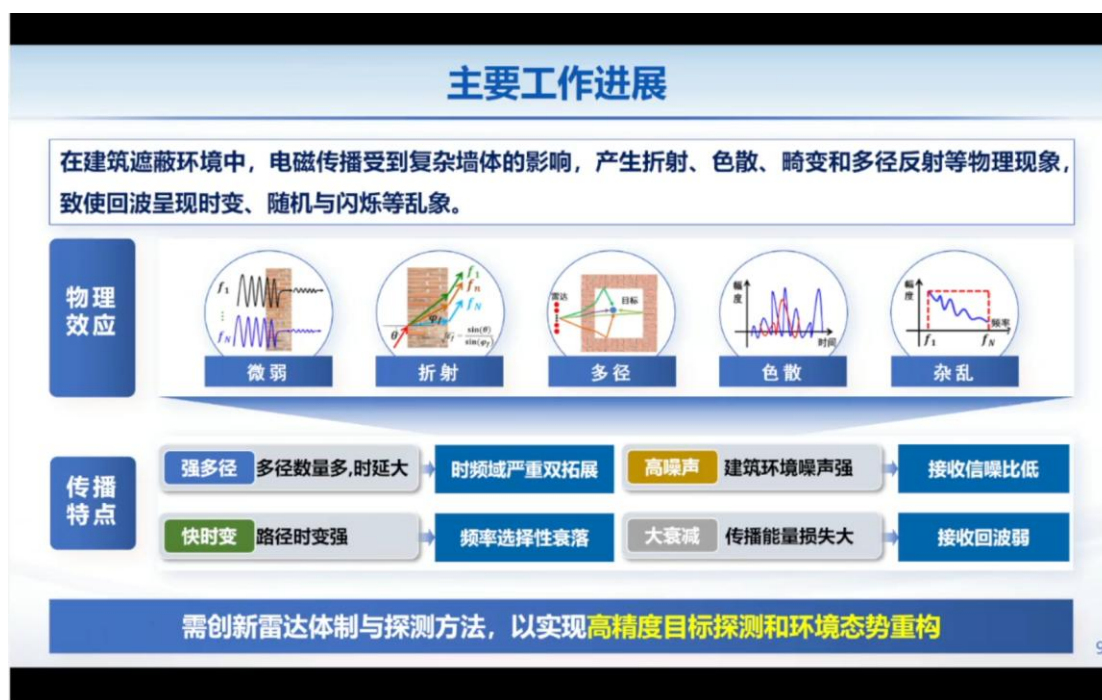
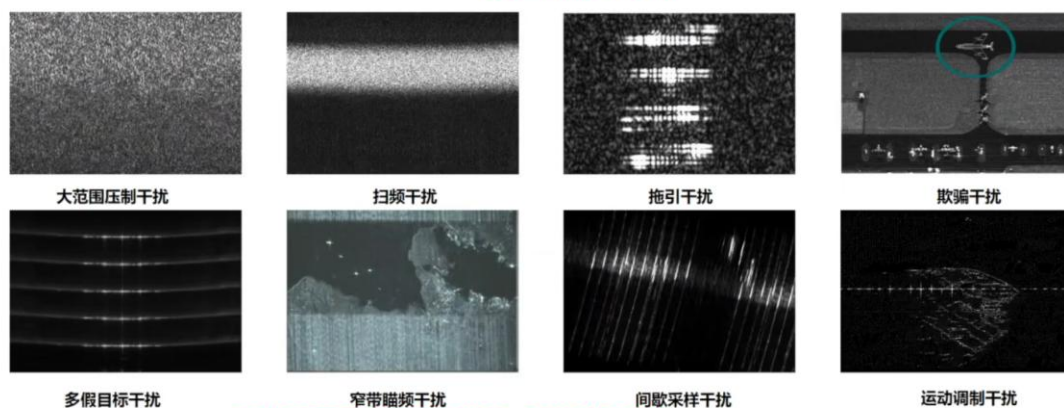


分选任务结束后，可以更为细致的去干扰对抗，信号内部参数去搞。



雷达有源干扰



高效宽频压制、相干可控欺骗、多样组合干扰的精准注入有源干扰，对雷达造成探测误差、跟踪丢失、目标混淆、信号屏蔽等影响

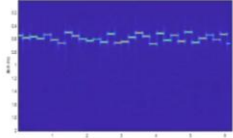


西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

美国等发达国家已经较为全面的掌握雷达复杂自适应抗干扰波形优化设计技术，并在实际雷达装备中广泛应用

美军已经在F-22、F-35等最先进的隐身战斗机上实际应用复杂抗干扰波形，F-22装备的AN/APG-77雷达具有优秀的低截获性能。美国航天飞行器X-37B装配高性能雷达系统进行下一代先进雷达试验，具有步进调频、多子带编码、脉内频率编码、脉间脉内联合频率编码等复杂调制波形工作模式。

✓抗截获
✓抗干扰
✓抗辨识



美国X-37B飞行器与复杂编码波形

我国现状

- ◆ 清华大学
- ◆ 北京理工大学
-
- ◆ 西安电子科技大学
- ◆ 中电38所

- ◆ 频率捷变
- ◆ 重频捷变
- ◆ 相位编码
- ◆ 多维捷变



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

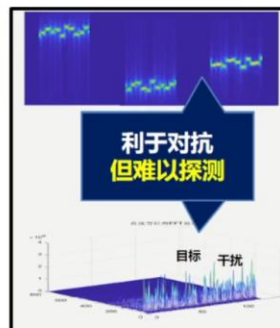
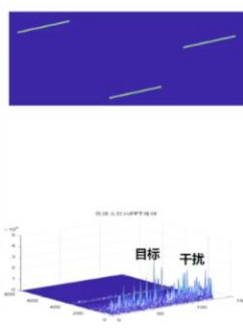
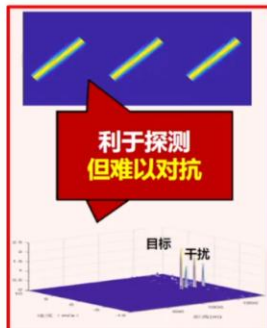
雷达探测波形与对抗波形之间存在尖锐矛盾

对抗弱

波形调制复杂度

对抗强

波形
对抗需求



探测强

探测能力

探测弱

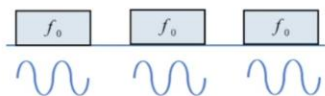
波形
探测需求



挑战一

兼顾探测和对抗性能的对抗波形设计难

探测需求

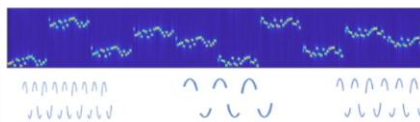


- 强相参
- 高增益
- 易处理

对抗

兼容难

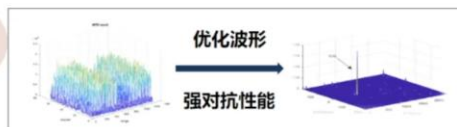
对抗需求



- 多维度
- 强捷变
- 多调制



探测



12

12 西安电子科技大学

13

13 西安电子科技大学



挑战二

捷变体制雷达相参积累难

强耦合

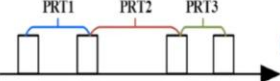
捷变体制雷达运动补偿难

脉间
频率
捷变



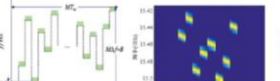
回波非相干

脉间
重频
捷变



采样非均匀

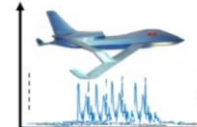
脉内
脉间
联合



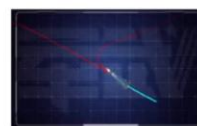
时频信息交织



曲线机动



扩展目标



高速运动

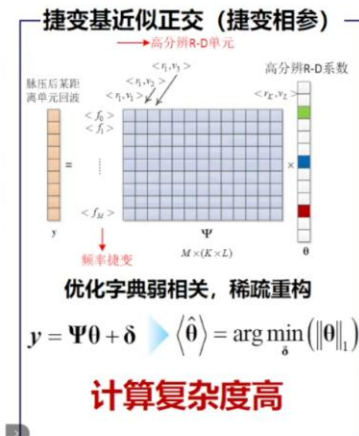
14

14 西安电子科技大学

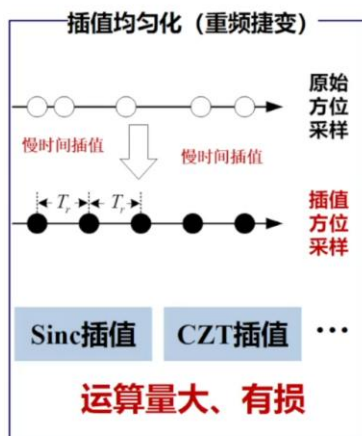
15

15 西安电子科技大学

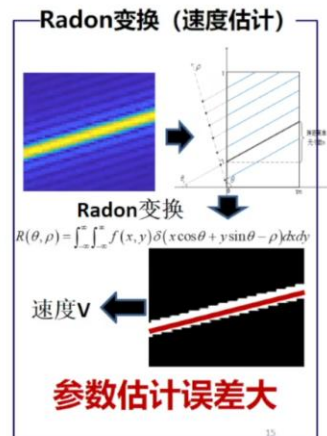
现有方法：压缩感知



现有方法：插值处理



现有方法：运动补偿



$$S(f_r, t) = p(f_r) \cdot \exp(-j4\pi \underbrace{f_r v t/c}_{\text{频率捷变}}) \exp(-j4\pi \underbrace{f_l R_0/c}_{\text{距离走动项}}) \exp(-j4\pi \underbrace{f_l v t/c}_{\text{捷变初相}})$$

波形回波信号模型

① 距离走动项 ② 捷变初相 ③ 捷变多普勒

	传统波形	频率捷变	引入问题
①	速度引入的包络走动	速度引入的包络走动	与传统一致
②	初相固定	初相随频率捷变	回波非相参
③	多普勒固定	多普勒随频率捷变	回波非相参

关键

■ 距离走动校正

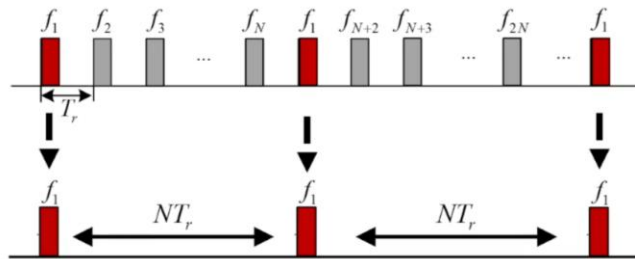
■ 捷变初相补偿

波形一：半相参频率捷变波形

创新波形

波形特点

波形优势



■ 保留捷变特性 ■ 赋予相参性

- 同频脉冲组规避捷变带来的问题
- 速度估计精度高
- 传统方法即可进行运动估计
- 可补偿①距离走动项

$$S(f_r, t_l) = \text{rect}\left(\frac{f_r}{\gamma T_p}\right) \exp(-j4\pi f_r v t_l / c) \exp(-j4\pi f_l R_0 / c) \exp(-j4\pi f_r R_0 / c) \exp(-j4\pi f_l v t_l / c)$$

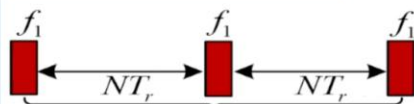
信号模型

① 距离走动项

② 捷变初相

频率捷变

步骤一：走动校正



M个脉冲

重频降低导致速度模糊

$$v = v' + kv_{\max}$$

构建补偿项 $H(k)$

$$H(k) = \exp\left[j4\pi k \frac{(f_1 + f_r)v_{\max} t_m}{c}\right]$$

KT变换

积累效果评价

峰值旁瓣比/峰值旁瓣差PSLD

模糊数搜索

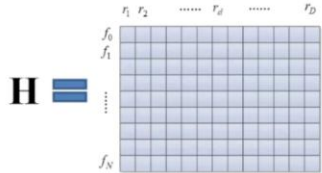
全脉冲走动校正

速度粗估计 V



步骤二：捷变初相补偿

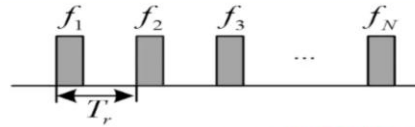
$I = S \cdot H \cdot F_N$ 距离超分辨率网格



核函数: $H_q(l) = \exp\left(j4\pi f_l \frac{d\Delta r}{c}\right)$
 $\Delta r = c/2 [\max(f_l) - \min(f_l)]$

目标所在距离单元将聚焦

步骤三：全脉冲积累



根据频率捷变序列以及模糊数构建NDFT变换因子

$$W(l, m) = \exp\left(-j2\pi \frac{f_l}{f_0} \frac{\sum_{i=0}^{l-1} T_i}{T_0} \left(\frac{m}{M} + k\right)\right)$$

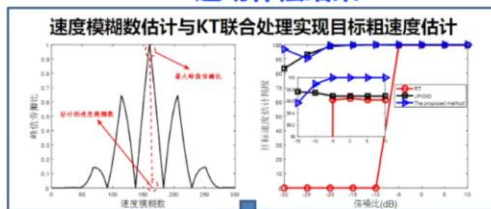
相参积累结果

目标位置

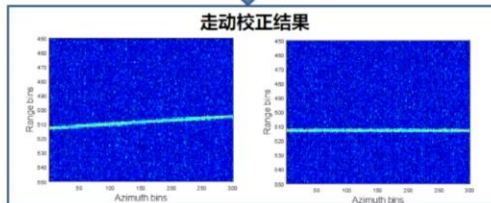
$$d_t = \frac{R}{\Delta r} \quad m_t = \frac{2f_0 T_0 M}{c} v$$



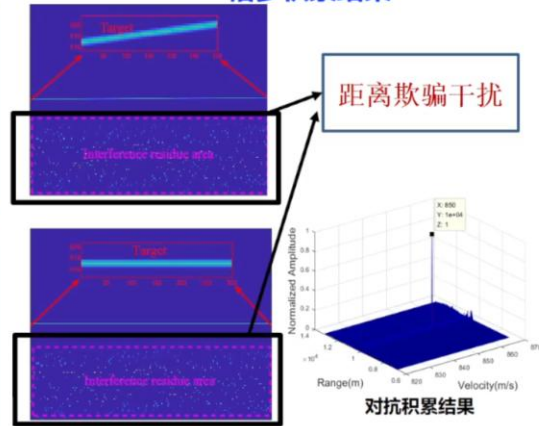
运动补偿结果



走动校正结果



相参积累结果



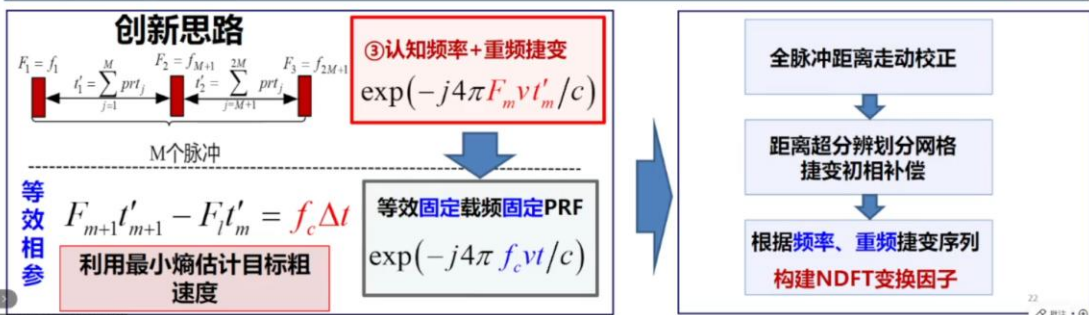
- E. Zhu, J. Wang et al. "Cognitive Frequency Agility Waveform for Precise Velocity Deblurring Detection of High-Speed Targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*

波形二：全相参频率+重频联合捷变波形

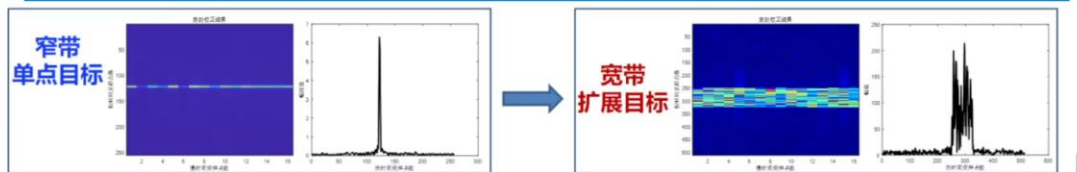
$$S(f_r, t_l) = p(f_r) \cdot \exp(-j4\pi f_r v t_l / c) \exp(-j4\pi f_l R_0 / c) \exp(-j4\pi f_l v t_l / c)$$

频率+重频捷变

① 距离走动项 ② 捷变初相 ③ 频率+重频捷变



波形三：面向扩展目标的相参频率+重频联合捷变波形



$$S(f_r, t_l) = p(f_r) \cdot \exp(-j4\pi f_r v t_l / c) \exp(-j4\pi f_l v t_l / c) \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp(-j4\pi f_l R_{k0} / c)$$

扩展目标捷变波形回波信号模型

多散射点捷变初相耦合

① 耦合捷变初相补偿难

② 相参处理复杂度高

$$\delta(f_l) = |\sigma[j\phi(f_l)]| \cdot \exp[j\phi(f_l)]$$



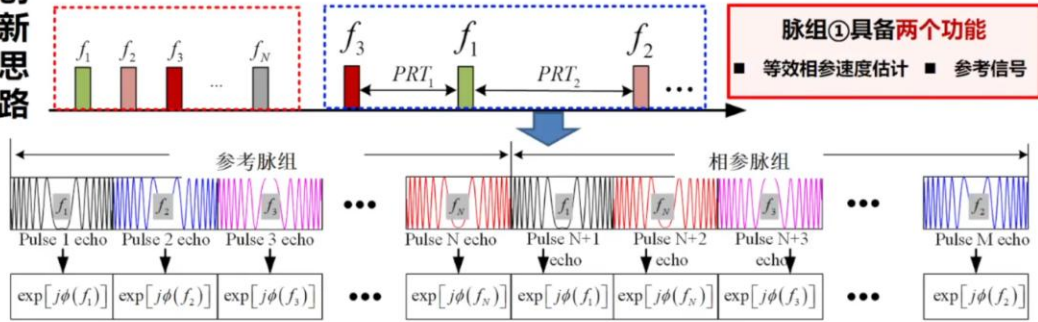
波形三：面向扩展目标的相参频率+重频联合捷变波形

$$S(f_r, t_l) = p(f_r) \cdot \exp(-j4\pi f_r v t_l / c) \exp(-j4\pi f_l v t_l / c) \left| \sigma[j\phi(f_l)] \right| \cdot \exp[j\phi(f_l)]$$

创新思路

① 参考脉组

② 积累脉冲



特性：同频信号的抖动初相相同



扩展目标抖动初相对消

$$s(\hat{t}, t_q) = |\sigma(f_q)| \exp[j2\pi f_q v_0 t_q / c] \sin c \left(\gamma T_p \left(\hat{t} - \frac{2R_{k0}}{c} \right) \right) \exp[j\phi(f_q)]$$

$$H(\hat{t}, t_n) = |\sigma(f_n)| \exp[-j2\pi f_n v_0 t_n / c] \sin c \left(\gamma T_p \left(\hat{t} - \frac{2R_{k0}}{c} \right) \right) \exp[-j\phi(f_n)]$$

相参组回波

参考组回波复共轭

$$s(\hat{t}, \tilde{t}_q) = \left\{ \left| \delta(f_q) \right|^2 \sin^2 \left[B \left(\hat{t} - 2 \frac{R_{k0}}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[j4\pi \frac{v \cdot f_q}{c} \tilde{t}_q \right] \right\}$$

脉组②具备两个功能

■ 与参考组载频相同 ■ 信号相参

相参设计

$$f_{q+1} (t_{q+1} - t_p) - f_q (t_q - t_n) = f_c p r t_0$$

同频对消残余相位

同频对消残余相位

$$\exp \left(\frac{-j4\pi f_c v p r t_0}{c} \right)$$

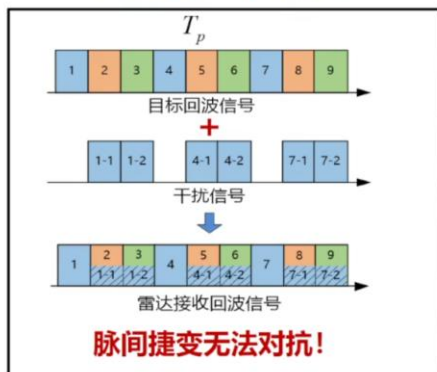
$$S(\hat{t}, f_a) = \left\{ \begin{aligned} & \left| \delta(f_{1:N}) \right|^2 \sin^2 \left[B \left(\hat{t} - 2 \frac{R_{k0}}{c} \right) \right] \\ & \cdot \sin c \left[L \cdot p r t_0 \left(f_a - 2v \cdot \frac{f_0}{c} \right) \right] \end{aligned} \right\}$$

FFT即可高效积累

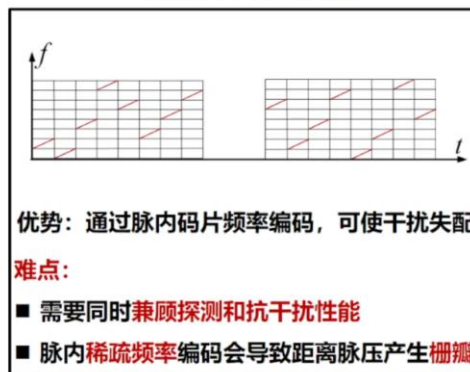
● E. Zhu, J. Wang et al. Frequency Agile Waveform Design and Coherent Processing for High-speed Target Detection, *IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing* 2024

波形四：脉内频率编码优化波形设计——抗切片转发干扰

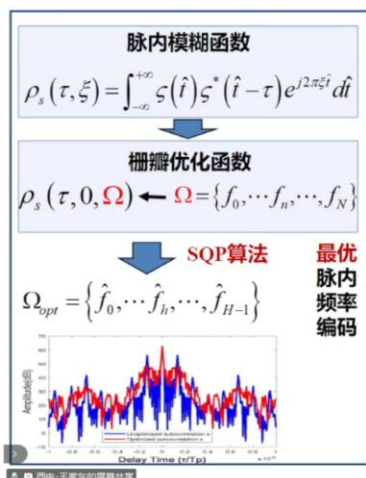
抗切片转发干扰原理



脉内频率编码波形



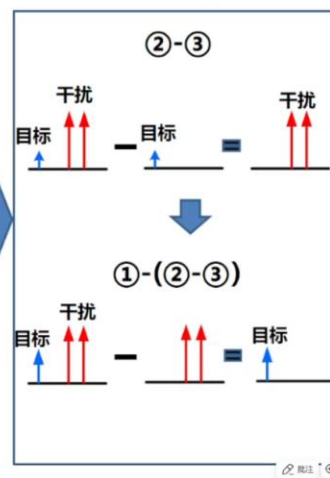
第一步脉内频率优化设计



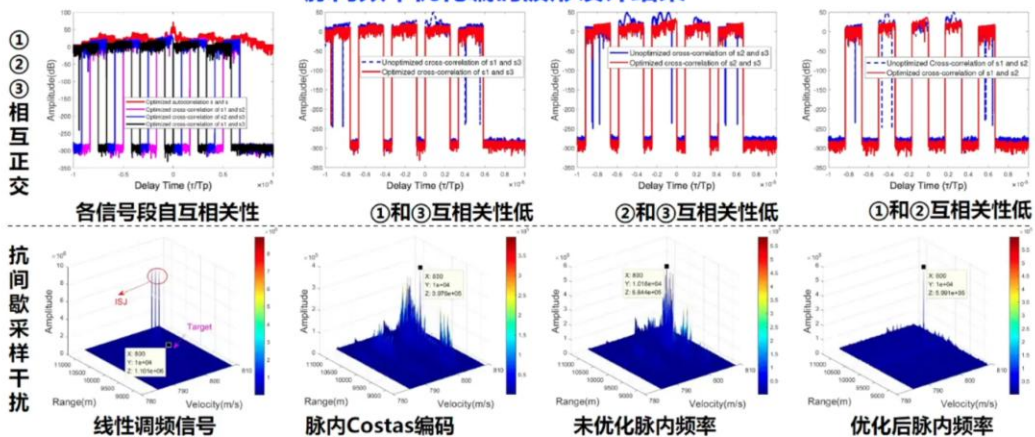
第二步非匹配滤波器设计



第三步干扰对消



脉内频率优化编码波形设计结果

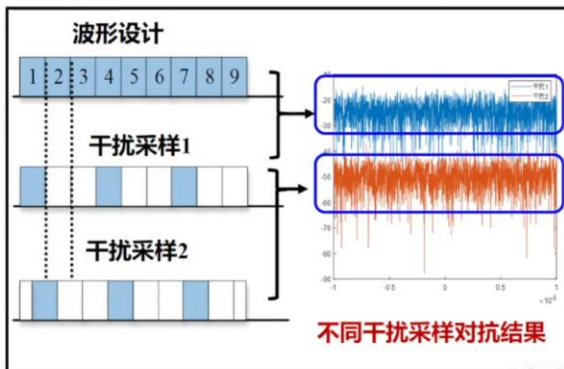
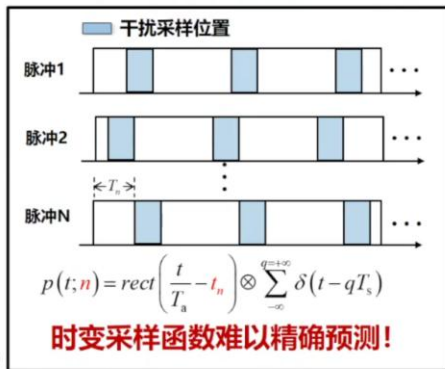


● E. Zhu, J. Wang et al. Waveform Agility in Intra-plus-inter-pulse Frequency and PRF for Anti-jamming and Coherent Processing, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*

波形四：脉内相位编码+非匹配滤波器设计——抗切片转发干扰

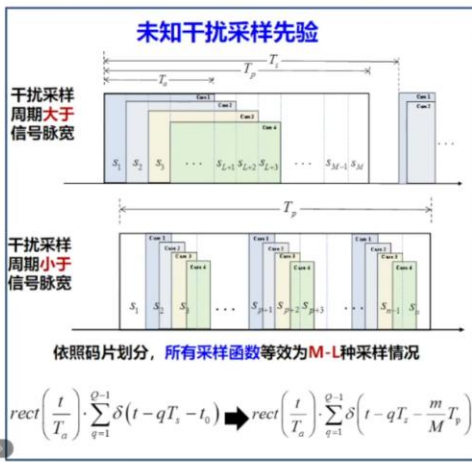
难点1：切片采样位置具有**随机性**

难点2：单一波形设计只能应对一种采样情况





第一步考虑所有干扰采样情况



第二步构建发射波形优化模型

构建联合优化模型，抑制干扰性能同时优化信号探测性能

$$\sigma_0 \sum_{m=0}^{M-L} \omega_m \frac{\|W_{sl} \odot R_m\|_p^2}{\|W_{ml} \odot R_m\|_p^2} + (1 - \sigma_0) \sum_{m=0}^{M-L} \omega_m \frac{\|W_{sl} \odot R_{j,m}\|_p^2}{\|W_{sl} \odot R_0\|_p^2}$$

脉压：保证探测性能

干扰抑制比：抑制干扰能量

第三步接收端非匹配滤波器设计

$$P_h = \frac{\|W_{sl} \odot R_{jh}\|_p^2}{\|W_{ml} \odot R_{ph}\|_p^2} \quad P_{ratio} = \frac{1}{G_0} \frac{\|W_{sl} \odot R_{ph}\|_p^2}{\|W_{ml} \odot R_{ph}\|_p^2} \quad P_{loss} = \frac{(h^H s)^H (h^H s)}{(h^H h)(s^H s)}$$

□ 干扰抑制比

□ 信号旁瓣

□ 信噪比

min

P_h → 抑制干扰能量

联合以上约束

s.t.

$P_{ratio} \leq PSLR_0$

$SNR_{loss} \leq SNR_{min}$ → 保证探测性能

优化非匹配滤波器