

## 一种新的压制性干扰技战术研究

沈阳<sup>①</sup> 李修和<sup>①</sup> 陈永光<sup>①②③</sup>

<sup>①</sup>(电子工程学院 合肥 230037)

<sup>②</sup>(63880部队 洛阳 471003)

<sup>③</sup>(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 雷达天线超低旁瓣技术和压缩滤波技术使得宽带阻塞式远距离支援干扰的效能急剧下降。针对这种情况, 该文首先分析了远距离支援干扰的弱点和现代雷达采取的抗压制性干扰措施, 然后提出近距离主瓣干扰战术和相参干扰技术组合的近距离相参干扰方法。文中给出了干扰机的原理框图, 详细设计了干扰样式和干扰信号, 并且分析了该干扰方法的功率和时频特性。计算机仿真试验表明此种干扰方法较宽带阻塞式远距离支援干扰有较大的优越性。

**关键词:** 电子反干扰; 超低旁瓣; 近距离干扰; 相参干扰

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1068-04

## Research on One New Blanket Jamming Technology and Tactics

Shen Yang<sup>①</sup> Li Xiu-he<sup>①</sup> Chen Yong-guang<sup>①②③</sup>

<sup>①</sup>(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

<sup>②</sup>(Unit 63880, Luoyang 471003, China)

<sup>③</sup>(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The efficiency of broad band barrage Stand-Off Jamming (SOJ) is decreased quickly with such techniques as radar ultra-low sidelobe antennas and narrow-channel filter. In allusion to this situation, the weakness of SOJ and Electronic Counter-CounterMeasure (ECCM) of modern radar against blanket jamming are analyzed firstly. Then, a blanket Stand-Forward Jamming (SFJ) method with close-in mainlobe jamming tactics and coherent phase jamming technique is suggested to apply. This paper puts forward a principle block diagram of the jammer and designs jamming mode and signal in detail as well. Furthermore, it investigates the characteristics of power and time-frequency of this jamming technique. Computer simulation indicates that this jamming technique is superior to broad band barrage SOJ.

**Key words:** Electronic Counter-CounterMeasure(ECCM); Ultra-low sidelobe; Stand-Forward Jamming(SFJ); Coherent phase jamming

### 1 引言

压制性干扰是远距离支援干扰战术(SOJ)经常选择的干扰方式<sup>[1]</sup>。然而, 雷达抗干扰能力的增强使得压制性干扰的效能急剧下降。这些事实迫使电子战研究人员为寻求新的干扰手段而付出了艰辛的探索。随着科技的发展, 电子战从大型专用装备向装备小型化和网络化发展成为当今一大潮流, 近距离相参干扰系统就是其中之一。文献[2]介绍了美军开发的“狼群”系统, 文献[3]报道了我国对干扰机组网技术的研究。但是都未涉及具体的技术问题。本文在深入分析现代雷达抗干扰能力的基础上, 重点研究了组成近距离相参干扰系统的干扰机原理框图及其使用的干扰样式, 详细分析了此种

干扰技术的功率利用率和时频特性并进行了计算机仿真, 结果表明近距离相参干扰系统压制性干扰较宽带阻塞式干扰有较大的优越性。

### 2 SOJ 的弱点与雷达 ECCM 技术

#### 2.1 SOJ 的弱点

SOJ 是指运用专用电子战飞机, 配置在目标以外对威胁雷达进行电子干扰的一种干扰战术(如图 1 所示)。专用电子战飞机由于处于对方火力范围以外而比较安全。远距离支援干扰通常是旁瓣干扰, 干扰频段较宽, 属阻塞式干扰。随着雷达技术的发展和反辐射武器的进步, 远距离支援干扰的效能逐渐下降, 甚至电子战飞机的生存也受到一定的威胁。

远距离支援干扰时, 雷达接收机端内信干比为

$$SJR = \frac{P_t G_r^2 \sigma R_j^2 L_j \Delta f_j}{P_j G_j G_{rj}(\theta) \gamma_j 4\pi R^4 L_r \Delta f_r} \quad (1)$$

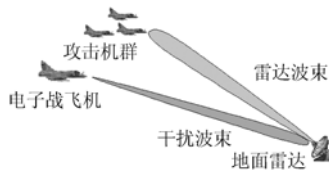


图 1 远距离支援干扰示意图

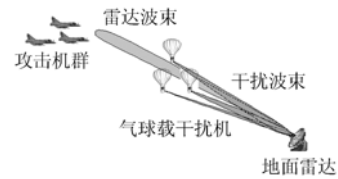


图 2 近距离相参干扰系统示意图

式中  $P_t$  为雷达发射功率； $G_r$  为雷达天线增益； $\sigma$  为目标的雷达截面积； $R_j$  为干扰机距雷达的距离； $L_j$  为干扰机损耗； $\Delta f_r$  为雷达接收机带宽； $P_j$  为干扰机发射功率； $G_j$  为干扰天线增益； $G_{rj}(\theta)$  为雷达天线在干扰机方向上的增益； $\gamma_j$  为干扰信号极化损失； $R$  为目标距雷达的距离； $L_r$  为雷达系统损耗； $\Delta f_j$  为干扰机带宽。

设干扰条件下，雷达检测目标的最小可检测信干比为  $(SJR)_{\min}$ ，雷达压制距离为  $R_0$ ，则由式(1)得有效干扰功率密度与雷达压制距离的关系式如下：

$$\frac{P_j G_j}{\Delta f_j} = \frac{P_t G_r^2 \sigma R_j^2 L_j}{G_{rj}(\theta) \gamma_j 4\pi R_0^4 (SJR)_{\min} L_r \Delta f_r} \quad (2)$$

式中参数含义同前。

### 2.2 雷达 ECCM 技术

对于 SOJ 这种阻塞式压制干扰，雷达所采取的 ECCM 技术都是以增大雷达对目标的辐射能量和抑制进入雷达接收机的干扰能量为目标，从而减小雷达接收机端内的干信比。影响 SOJ 效果的雷达 ECCM 技术有以下几种<sup>[4]</sup>：

(1)增大雷达对目标的辐射能量 主要是 PC, PD 体制雷达采用新的信号形式和相控阵天线技术提高了雷达对目标的辐射能量。

(2)频域上降低干扰功率密度 主要是捷变频雷达和大带宽的扩谱信号迫使干扰机增大带宽，从而稀释了干扰功率密度。

(3)空域上降低干扰功率密度 主要是超低副瓣接收、副瓣对消和副瓣匿隐技术稀释了干扰功率密度。

(4)信号处理方式降低了干扰功率利用率 主要是 PC 和 PD 等体制雷达的相参处理技术降低了干扰功率利用率。

## 3 近距离相参干扰系统

### 3.1 技术特点分析

近距离相参干扰系统是将众多体积小、重量轻、价格便宜的小型电子干扰机散布在接近被干扰目标的空域、地域上，自动地或者受控地对选定的军事电子设备进行干扰。在图 2 中是以伞降的方式向雷达阵地附近散布干扰机。根据干扰原理，干扰距离减少十分之一，则干扰强度增大 100 倍。可见同样的干扰功率，近距离相参干扰系统的近距离干扰可以比 SOJ 产生高得多的干扰强度；干扰信号不会受到低副瓣天线、副瓣匿隐或者对消的抑制，因而其干扰功率可以比副瓣干扰高 40dB~60dB；近距离相参干扰系统散布在不同的地域、空域，因而可以形成多方向的主瓣干扰扇面，这种多

方向干扰扇面的组合，便可以形成大区域的压制性干扰扇面；不同方向的干扰信号进入波瓣自适应调零天线，当干扰方向大于或者等于自适应调零天线阵元数目时，自适应调零控制失效，干扰信号便可以顺利地进入雷达接收机。

综上所述，近距离相参干扰系统是一种先进的干扰战术措施，它具有如下的特点：(1)变副瓣干扰为主瓣干扰；(2)变单向干扰为多向干扰；(3)变远距干扰为近距干扰；(4)变阻塞干扰为瞄准干扰。

### 3.2 干扰机设计

为了满足小型化的需求，干扰机采用数字射频存储 (DRFM) 技术。采用 DRFM 的干扰机具有瞄频速度快、瞄频精度高、工作频带宽、可同时对付多部雷达等特点。图 3 给出了采用 DRFM 技术的干扰机组成框图，显然该干扰机属于应答式结构<sup>[5]</sup>。雷达信号经接收、放大、混频以后，送到 DRFM，输出雷达脉冲复制信号，复制信号送调制器使信号的频谱受噪声的污染，这样即可产生一种噪声调制波形，再经过混频发射出去。干扰机系统组成中的 DRFM 是其关键<sup>[6]</sup>。

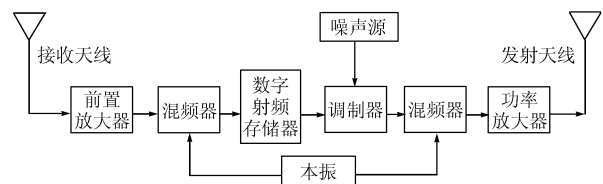


图 3 干扰机系统组成框图

针对近距离相参干扰系统采取的抵近战术和 DRFM 技术的特点，近距离相参干扰系统的干扰样式选为瞄准式干扰。近距离相参干扰系统的瞄准式干扰样式和近距离干扰战术可以对付频率捷变等现代雷达。DRFM 的运用使得其可以将雷达信号及其脉内特征无失真地复制下来，而且复制的雷达信号与噪声信号相卷积，与传统的压制干扰信号比，其与雷达信号的频谱特性更相似，经雷达接收机的窄带滤波可以获得相应的增益，能够对付脉冲压缩和脉冲多普勒等现代相参雷达。

### 3.3 干扰效能评估

3.3.1 干扰功率分析 对于近距离相参干扰系统压制性干扰，雷达接收机端内信干比为

$$SJR = \frac{P_t G_r^2 \sigma}{4\pi R^4 L_r \Delta f_r \sum_{i=1}^n \frac{P_{ji} G_{rji} G_{rji}(\theta) \gamma_{ji}}{\Delta f_{ji} R_{ji}^2 L_{ji}}} \quad (3)$$

式中  $R_{ji}$  为干扰机  $i$  距雷达的距离;  $L_{ji}$  为干扰机  $i$  的损耗;  $P_{ji}$  为干扰机  $i$  的发射功率;  $G_{ji}$  为干扰机  $i$  的天线增益;  $\Delta f_{ji}$  为干扰机  $i$  的带宽;  $G_{rji}(\theta)$  为雷达天线在干扰机  $i$  方向上的增益;  $\gamma_{ji}$  为干扰机  $i$  的极化损失; 其余参数含义同前。

为便于分析,不妨设所有组成近距离相参干扰系统干扰机的性能参数一样,干扰机的损耗记为  $L_j$ , 干扰机的极化损失记为  $\gamma_j$ , 干扰机的发射功率记为  $P_j$ , 干扰机的天线增益记为  $G_j$ , 干扰机的带宽记为  $\Delta f_j$ 。和 2.1 节同样的道理, 近距离相参干扰系统近距离压制干扰条件下, 有效干扰功率密度与雷达压制距离的关系式如下

$$\frac{P_j G_j}{\Delta f_j} = \frac{P_i G_r^2 \sigma L_j}{4\pi R_0^4 (\text{SJR})_{\min} L_r \Delta f_r \gamma_j \sum_{i=1}^n \frac{G_{rji}(\theta)}{R_{ji}^2}} \quad (4)$$

式中参数含义同前。

**3.3.2 干扰时频分析** 以线性调频(LFM)脉冲压缩(PC)雷达为例, 其信号时域表达式如下:

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t + 2\pi k t^2 + \varphi_0) \quad (5)$$

其中

$$a(t) = A_m \text{rect}(t/T) \quad (6)$$

$$k = B/T \quad (7)$$

式中  $a(t)$  为信号的幅度包络;  $A_m$  为脉冲幅度;  $T$  为脉冲宽度;  $f_0$  为起始载频;  $\text{rect}()$  为矩形窗函数;  $k$  为调制斜率;  $\varphi_0$  为初相;  $B$  为频率变化范围。

噪声信号瞬时幅度服从正态分布

$$W(n(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(n(t)-n_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

式中  $n(t)$  为噪声信号瞬时幅度;  $n_0$  为干扰信号均值;  $\sigma$  为噪声干扰在接收机输入端的功率。

干扰信号采用噪声与雷达信号卷积的形式, 其时域表达式为

$$j(t) = n(t) \otimes s(t) \quad (9)$$

因为 PC 雷达的压缩滤波器是匹配滤波器, 匹配滤波器的频率特性是输入信号频谱的共轭, 压缩滤波器输出的频谱为

$$G(f) = S(f)H(f) \quad (10)$$

式中  $S(f)$  为滤波器输入信号的频谱;  $H(f)$  为滤波器的频率特性。

所以, 匹配滤波器输出信号的包络为

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j2\pi ft} df \quad (11)$$

## 4 计算机仿真

### 4.1 仿真条件

针对同一部雷达, 采用 SOJ 和 SFJ 两种战术, 作对比试验, 考察两种干扰战术的干扰效能, 考核指标为雷达探测距离。雷达技术参数有: 发射功率  $10^6 \text{W}$ , 天线增益 40dB, 接收机带宽 2.5MHz, 平均旁瓣增益 -35dB, 系统损耗 4dB,

噪声系数 10dB, 最小可检测信干比 3dB。目标 RCS 设为  $3\text{m}^2$ 。SOJ 和 SFJ 的参数有: 距雷达的距离分别为 180km 和 100km, 干扰机系统损耗分别为 15dB 和 6dB, 极化损失均为 0.5, SFJ 的干扰机数分别为 1, 3 和 5, 参数完全相同。

为了进一步验证近距离相参干扰系统产生的干扰信号对付 PC 雷达的优越性, 选取 LFM 雷达为例, 采用射频噪声干扰波形和噪声卷积干扰波形进行仿真试验, 考察它们的干扰效能, 对比匹配滤波输出, 分别计算雷达接收机端内的干信比增益。其中, LFM 信号的载频为 300kHz, 调频范围为 200kHz, 脉冲宽度为 10ms; 噪声服从高斯分布, 宽度为 2ms。

### 4.2 结论分析

根据式(2)和式(4)分别计算采用两种干扰战术时, 达到不同的雷达干扰距离所需要的有效干扰功率密度。仿真结果如图 4 所示。取雷达干扰后的距离为 80km 进行分析, 结果如表 1 所示。雷达发射信号和干扰信号波形以及射频噪声干扰和噪声卷积干扰的压缩滤波结果如图 5 所示。

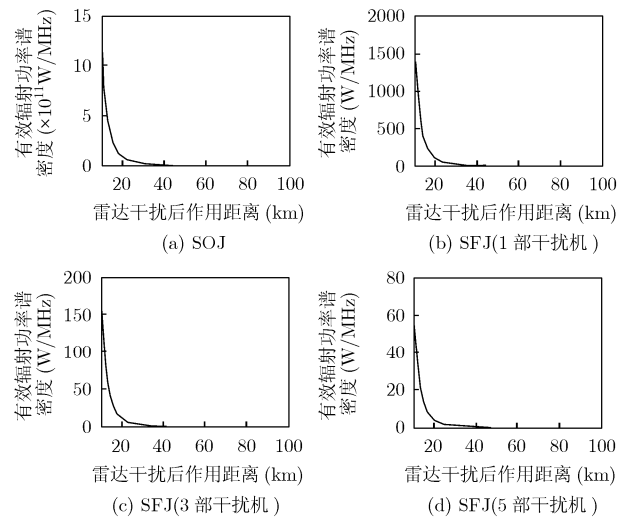


图 4 雷达受干扰距离与有效干扰功率密度关系图

表 1 雷达干扰后距离为 80km 对应的各有效干扰功率密度值

干扰战术	SOJ	SFJ		
		1部干扰机	3部干扰机	5部干扰机
有效干扰功率密度(W/MHz)	3.01e8	0.3704	0.0412	0.0148
干扰机发射功率(W)	2.86e7	1.4640	0.1627	0.0586

由表 1 知: 对于 SOJ, 设干扰天线增益  $G_j$  为 25dB, 干扰机带宽  $\Delta f_j$  为 30MHz, 则要求干扰功率为 28.6MW; 对于 SFJ 的近距离相参干扰系统, 设干扰天线增益  $G_j$  为 5dB; 干扰机带宽  $\Delta f_j$  为 10MHz; 则要求单部干扰机的干扰功率为 1.464W, 且随着干扰机数目的增加, 对单部干扰机的干扰功

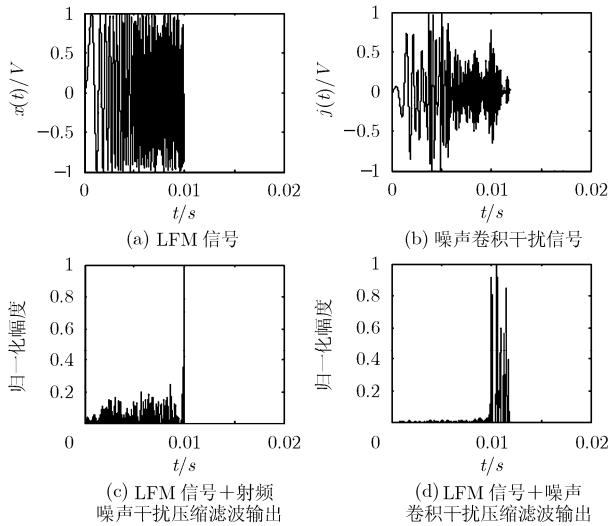


图 5 雷达信号、干扰信号及压缩滤波输出

率要求进一步降低。

由雷达信号参数可以得出，匹配滤波器的压缩增益为  $D=BT=2000$ 。干信比增益定义为输出端干信比与输入端干信比之比<sup>[7]</sup>。结果如表 2 所示，可见噪声卷积干扰的干信比提高了 9dB(-25.3dB 减去-34.3dB)。

表 2 干信比增益

	接收机输入端 $J_i/S_i$ (dB)	接收机输出端 $J_o/S_o$ (dB)	干信比增益 $K$ (dB)
射频噪声干扰	0	-34.3	-34.3
噪声卷积干扰	0	-25.3	-25.3

通过上述仿真试验，可以得到以下 4 点结论：

(1)SOJ 遭遇雷达 ECCM 的挑战，干扰效能急剧下降；

(2)SFJ 增大了干扰功率密度，降低了对干扰机发射功率的要求；

(3)雷达窄带滤波技术稀释了非相参干扰的功率密度，对干扰功率提出了严峻挑战；

(4)基于 DRFM 的噪声卷积相参干扰波形提高了干扰功率利用率。

### 5 结束语

随着雷达对抗技术的迅猛发展，如何更好地干扰对方的现代雷达已经成为必须加紧研究的课题。雷达面对噪声干扰所采取的措施是尽可能宽地扩展其发射能量的频率范围以迫使干扰机稀释其有效辐射功率密度，采用窄带滤波技术对回波信号进行相干处理以获得相应的处理增益，并且尽可能

使其对从天线旁瓣进来的信号的响应最小。从本文的分析结果来看，即使对宽带低旁瓣雷达，近距离相参干扰系统在主波束干扰方面仍具有优势。轻便灵巧的小型干扰机是雷达对抗的发展方向，近距离的干扰战术和相参干扰技术是对付新体制雷达的好方法。

### 参 考 文 献

[1] 林象平. 雷达对抗原理[M]. 西安：西北电讯工程学院出版社，1985，6：227-230.  
Lin Xiang-pin. Theory of Radar Countermeasure[M]. Xi'an: Publishing company of Northwest Telecommunication Engineering Institute, 1985, 6: 227-230.

[2] 四明. “狼群”智能传感器网络[J]. 国际航空杂志, 2005(7): 26-27.  
Si Ming. Wolfpack sensors for countering low power network[J]. *International Aviation*, 2005(7): 26-27.

[3] 陈开林. 有源干扰机组网技术分析[J]. 电子对抗技术, 2002(1): 10-13.  
Chen Kai-lin. Analyse of netting technology of active jammer[J]. *Technology of Electronic Countermeasure*, 2002(1): 10-13.

[4] 李可达. 现代雷达基本抗干扰技术[J]. 航天电子对抗, 2004(2): 15-19.  
Li Ke-da. Basic anti-jamming technology of modern radar[J]. *Space Electronic Countermeasure*, 2004(2): 15-19.

[5] Schleher D C 著. 顾耀干, 等翻译. 信息时代的电子战[M]. 成都: 信息产业部电子第二十九研究所电子对抗国防科技重点实验室, 2000: 137-139.

[6] 杨坚. PD 和脉压雷达相参干扰技术研究[J]. 电子对抗技术, 1999(2): 15-19.  
Yang Jian. Research on coherent phase jamming technology to Pulse Doppler and pulse compress radar[J]. *Electronic Countermeasure Technology*, 1999(2): 15-19.

[7] 吴一戎, 胡东辉. 一种新的合成孔径雷达压制干扰方法[J]. 电子与信息学报, 2002, 19(11): 1664-1667.  
Wu Yirong and Hu Donghui. A New Noise Jamming Approach to SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002(11): 1664-1667.

沈 阳： 男，1978 年生，讲师，研究方向为雷达数据处理、信息融合等。

李修和： 男，1975 年生，讲师，研究方向为雷达数据处理、信息融合等。

陈永光： 男，1962 年生，研究员，研究方向为信息处理、电子装备试验等。