

## 对线性调频雷达的卷积干扰技术

张 煜 杨绍全

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

**摘要:** 根据线性调频雷达信号处理的特点, 该本文提出一种新的应答式干扰技术——卷积干扰, 即干扰机接收到雷达照射信号后, 用某视频信号与接收信号卷积后转发。阐述了卷积干扰的机理, 分析了干扰信号的时频特性, 讨论了干扰功率及干信比方面的优势。理论分析证明, 卷积干扰对线性调频雷达具有显著的干扰效果。根据视频信号的不同, 干扰机能产生假目标欺骗干扰和噪声覆盖干扰两种效果, 且需要较小的干扰功率。仿真实验表明理论分析的正确性和实际应用的可行性。

**关键词:** 卷积干扰; 线性调频信号; 脉冲卷积干扰; 噪声卷积干扰

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1408-04

## Convolution Jamming Technique Countering LFM Radar

Zhang Yu Yang Shao-quan

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In this paper, a new method is proposed for jamming the Linear Frequency Modulation (LFM) radar, which is based on the feature of the LFM signals processing and is named convolution jamming. The jammer receives the radar signal and convolves it with the expected video frequency signal. Then the convolution result is retransmitted. It can produce false targets deceptive jamming or noise cover jamming according to the video frequency signal. Theoretical analysis and computer simulation justify the validity and efficiency of the new jamming technique.

**Key words:** Convolution jamming; LFM signals; Pulse convolution jamming; Noise convolution jamming

### 1 引言

现代雷达广泛应用线性调频信号以提高探测距离和距离分辨率。高分辨雷达、合成孔径/逆合成孔径雷达均是利用线性调频信号高距离分辨率的特点识别目标的<sup>[1-3]</sup>。由于线性调频信号的脉冲压缩处理使目标回波产生高的处理增益, 这就要求干扰机必须输出高的干扰功率。寻求一种功率利用效率高的干扰信号, 是电子对抗领域需解决的课题。

对线性调频雷达的干扰样式目前已有较多研究, 主要包括遮盖性干扰和欺骗性干扰两类<sup>[4]</sup>。两者在不同场合分别有较好的干扰效果, 均能消耗雷达资源, 破坏雷达工作。但常规的射频噪声干扰针对线性调频雷达时需要较高的干扰功率。

根据线性调频脉冲压缩雷达信号处理的特点, 本文提出一种新的干扰技术——卷积干扰。卷积干扰是一种应答式干扰。根据在脉冲压缩后要求的干扰效果, 干扰机接收雷达照射信号后与视频信号  $f(t)$  卷积, 再经放大后转发。这种干扰不需要测频就能干扰频率捷变的脉冲压缩雷达, 还可利用脉冲压缩的处理增益, 降低干扰功率要求。通过改变  $f(t)$  的信

号形式, 可灵活产生假目标欺骗干扰和噪声遮盖干扰。

### 2 卷积干扰信号的产生机理

设接收到的雷达发射信号为线性调频信号:

$$s(t) = \exp[j2\pi(f_0 t + \mu t^2 / 2)] \quad (1)$$

其中  $f_0$  为载频,  $\mu = B/T_p$  为调频斜率,  $B$  为谱宽,  $T_p$  为时宽。

干扰机位于目标上, 且离雷达的距离为  $r$ 。设目标为点目标, 反射强度为  $\sigma$ , 目标的响应函数:

$$c(t) = \sigma\delta(t - \tau_r) \quad (2)$$

其中  $\tau_r = 2r/c$ ,  $c$  为光速。则目标回波信号为

$$p(t) = c(t) * s(t) \quad (3)$$

干扰机接收到雷达照射信号后, 用一视频函数  $f(t)$  与接收信号卷积后转发, 即干扰信号为

$$J(t) = f(t) * s(t) \quad (4)$$

那么匹配滤波器的输入信号为

$$u(t) = p(t) + J(t) = [c(t) + f(t)] * s(t) \quad (5)$$

设  $s(t)$ ,  $c(t)$ ,  $f(t)$  和  $u(t)$  的频谱分别为  $S(f)$ ,  $C(f)$ ,  $F(f)$  和  $U(f)$ , 则

$$U(f) = [C(f) + F(f)]S(f) \quad (6)$$

式(6)经匹配滤波之后输出的频谱为

$$V(f) = U(f)S^*(f) = [C(f) + F(f)]|S(f)|^2 \quad (7)$$

对应时域输出为

$$v(t) = c(t) * F^{-1} \left[ |S(f)|^2 \right] + f(t) * F^{-1} \left[ |S(f)|^2 \right] \quad (8)$$

式(8)中  $F^{-1} \left[ |S(f)|^2 \right]$  称作点扩展函数(point spread function)<sup>[3]</sup>。由式(8)可见, 脉冲压缩输出信号中目标回波信号决定于目标的反射特性  $c(t)$ , 干扰信号决定于参与卷积的视频信号  $f(t)$ 。换言之, 任一函数与线性调频信号卷积, 其脉冲压缩输出信号为该函数与点扩展函数的卷积, 亦即获得了脉冲压缩处理增益。这就是卷积干扰可以降低干扰功率的理论依据。

根据需要,  $f(t)$  可以灵活选取为冲击脉冲串或者视频噪声, 二者分别可以产生假目标欺骗干扰和噪声遮盖性干扰效果。将这两种干扰分别称为脉冲卷积干扰和噪声卷积干扰。

### 3 干扰信号的时频特性

为进一步说明卷积干扰的机理, 对脉冲卷积干扰和噪声卷积干扰进行线性时频分析(这里不采用Wigner-Ville等非线性时频分析方法, 以避免产生交叉项)<sup>[5]</sup>。

#### 3.1 脉冲卷积干扰时频分析

设  $f(t)$  为  $N$  个幅度不同、时延不同的冲击脉冲组成的脉冲串, 表示为

$$f(t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - t_i) \quad (9)$$

如图 1(a), 图中  $N = 3$ 。它与接收到的雷达信号卷积, 相当于将原来的线性调频信号分别移位至 3 个冲击脉冲的位置, 因此, 卷积结果相当于 3 个幅度不同、延时不同的线性调频信号的叠加。脉冲卷积干扰的时频特性如图 1(b)。由图可见: 脉冲卷积干扰等效于将线性调频信号延时转发的结果。每个线性调频脉冲与回波信号(图 1(b)中的实线)有相同的时频特性, 因此它们也具有相同的处理增益。这种情况与多散射点构成的目标产生距离像的机理相同, 也就是在真实目标之后产生了几个假的点目标。

脉冲卷积干扰产生的假目标有如下特点:

(1) 假目标信号滞后于目标回波 当需要在回波前产生假目标时, 必须先将接收信号移频再与  $f(t)$  卷积。这是因为线性调频信号的频移和时延间有强耦合, 即存在如下关系<sup>[6]</sup>:

$$f_d + \beta \tau = 0 \quad (10)$$

为补偿干扰引起的时延  $\Delta \tau$  或产生超前于目标回波的信号, 对线性调频信号的频移量可由式(10)得到。

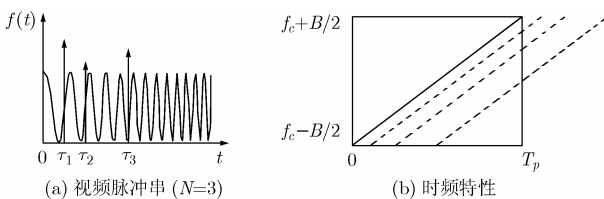


图 1 脉冲卷积干扰的时频特性分析

(2) 假目标的最大时延受线性调频信号的时宽限制 当干扰机中没有射频存储设备时, 接收信号的持续时间为线性调频信号的时宽。当  $f(t)$  的时延大于线性调频信号的时宽时, 由于信号不存在, 卷积结果为 0。

#### 3.2 噪声卷积干扰时频分析

设  $f(t) = n(t)$ ,  $n(t)$  为视频噪声, 可想象为幅度随机的许多脉冲之和, 实际的数字噪声正是这种情况。其脉宽等于噪声的取样周期, 脉内的幅度为确定值。从脉冲卷积干扰可以推断, 噪声卷积干扰的时频特性也是位于目标回波后的一系列随机脉冲产生的线性调频信号。时频分析的结果(如图 2(b))证实了上述分析(矩形框对角线表示的是雷达照射信号的时频特性)。

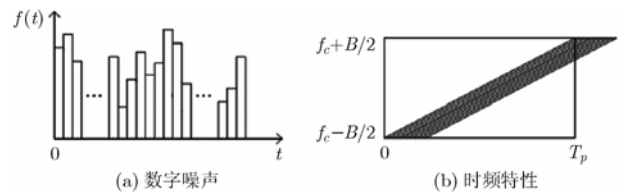


图 2 噪声卷积干扰的时频特性

噪声卷积干扰利用了视频噪声与雷达照射信号的卷积结果作为干扰信号, 干扰的频率随照射信号的频率变化而变化。换言之, 干扰机不需要测频和频率引导, 就能自动瞄准信号频率, 由于干扰信号总是滞后于回波信号, 为使干扰信号的出现时间超前于回波信号, 可将接收信号移频后与噪声卷积。因此能对频率捷变雷达干扰。

由于时域卷积等效于频域相乘, 因此。从频域来分析, 可以将雷达信号视为一个频率范围为  $[f_c - B/2, f_c + B/2]$  的滤波器。设数字噪声功率谱密度不变, 当其带宽大于信号带宽时, 带外能量被滤除掉, 因此压缩后的干扰功率也有所损失; 当其带宽小于信号带宽时, 相当于没有被滤波, 但由于其带宽较窄, 噪声功率本身就要小许多, 因此压缩后的干扰功率也较小。因此应使数字噪声带宽与雷达信号带宽大致相等, 这样就可以最大限度利用噪声功率。

此外, 噪声卷积干扰脉压后的干扰持续时间决定于噪声的持续时间。回波信号经脉压后的时宽等于  $1/B$ , 为使干扰信号覆盖回波, 干扰信号的时宽应大于  $1/B$ , 即噪声的持续时间应大于  $1/B$ 。

### 4 干信比增益与干扰功率增益

干扰信号对线性调频雷达的影响可以通过系统干信比增益  $K$  和系统干扰功率增益  $K_d$  体现出来。

$$K = (J_o / S_o) / (J_i / S_i) \quad (11)$$

$$K_d = J_o / J_i \quad (12)$$

其中  $J_i$ ,  $J_o$  和  $S_i$ ,  $S_o$  分别为脉冲压缩前后的干扰功率和信号功率。由于不同干扰方法中的干扰信号特性不同, 因此它们的系统干信比增益和系统干扰功率增益也不同, 通过对

$K$  或  $K_d$  进行比较, 能够客观反映不同干扰方法对线性调频信号的干扰影响<sup>[7]</sup>。

脉冲卷积干扰相当于将接收到的雷达信号延时后转发, 它能够与雷达照射信号获得相同的脉冲压缩增益, 因此脉冲压缩前后的干信比没有损失, 其干扰功率增益为压缩比  $D$ , 干信比增益为 1。

我们主要关心的是噪声卷积干扰相对于常规射频噪声干扰的功率优势。设参与卷积的视频噪声长度为  $L$  ( $L \geq 1/B$ ), 则噪声卷积干扰信号脉冲压缩前的长度为  $L + T_p$ , 脉冲压缩之后的长度为  $L + 1/B$ 。由于压缩网络是无源的, 根据能量守恒原理, 有

$$J_i(L + T_p) = J_o \left( L + \frac{1}{B} \right) \quad (13)$$

所以噪声卷积干扰的功率增益:

$$K_d = J_o / J_i = \frac{L + T_p}{L + 1/B} > 1 \quad (14)$$

其干信比增益:

$$K = (J_o / S_o) / (J_i / S_i) = \frac{1}{D} \cdot \frac{L + T_p}{L + 1/B} \quad (15)$$

而常规射频噪声干扰的干扰功率增益为 1 (若考虑到噪声经过匹配滤波器的损失, 干扰功率增益将小于 1), 干信比增益为  $1/D$ 。

显然, 通过对  $K$  或  $K_d$  进行比较, 可以得出这样的结论: 噪声卷积干扰相比于常规射频噪声干扰而言, 要达到相同的干扰效果, 前者需要的功率更小, 是后者所需功率的  $(L + 1/B)/(L + T_p)$ 。

## 5 仿真结果

仿真时雷达参数: 发射信号载频为 300kHz, 谱宽为 200kHz, 脉冲宽度为 10ms。

### 5.1 脉冲卷积干扰

设视频脉冲串由 3 个冲击脉冲组成, 仿真中冲击脉冲的位置分别为 2ms, 4ms 和 7ms, 如图 3(a)所示。它与图示线性调频信号相卷积, 然后将卷积结果作为干扰信号转发出去。雷达接收机接收到该信号之后进行匹配滤波, 结果如图 3(b)所示, 可以看出, 干扰产生的压缩峰位于目标回波压缩峰之后, 且其相对位置关系保持不变。这个结果相当于将雷达信号分别延时 2ms、4ms 和 7ms 之后转发。

由于这种方法产生的干扰压缩峰只能位于目标回波之后, 可以进行移频处理——将接收到的雷达信号移频之后再与视频脉冲卷积。这种干扰在雷达接收机处的匹配滤波结果如图 4 所示。根据式(9), 移频量与时延之间应该满足  $f_d + \beta\tau = 0$ , 此处将  $f_d$  设置为 100kHz, 那么时延量应为  $-5\text{ms}$ , 即干扰产生的压缩峰应比原来的位置超前 5ms, 仿真结果也证实了这一点。

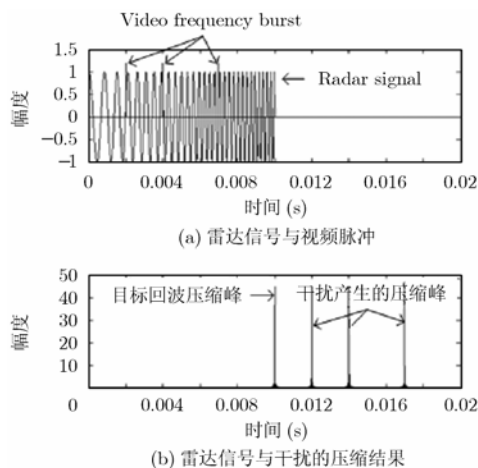


图3 脉冲卷积干扰示意图

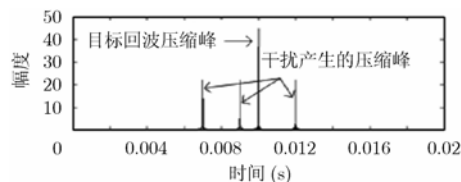


图4 加上移频处理的干扰效果

通过移频的方法, 使得脉冲卷积干扰的压缩结果在目标前后均可以产生, 但是, 移频之后干扰压缩峰比目标回波压缩峰降低了, 这是因为移频引起了能量损失。

### 5.2 噪声卷积干扰

设数字噪声带宽与雷达信号带宽相同, 时宽为雷达信号的  $1/5$ , 且其幅度服从均值为 0, 方差为 1 的高斯分布。如图 5(a)所示。根据前面的理论分析, 干扰的压缩结果应该位于目标回波压缩峰之后, 且应该也得到一定的压缩增益, 幅度大大提高, 如图 5(c)所示。可以看到, 卷积干扰压缩的结果全部位于图 5(b)所示目标回波压缩峰之后, 为了在目标前后均产生覆盖效果, 可以采用移频措施。根据前面的分析,

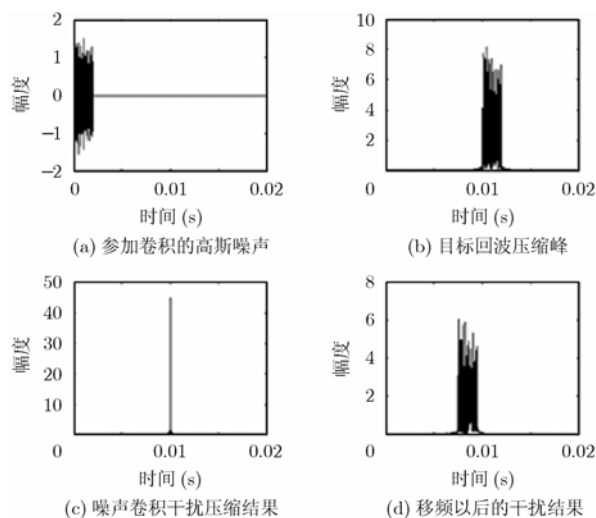


图5 噪声卷积干扰示意图

当移频量  $f_d$  为 50kHz 时, 干扰压缩结果应左移 2.5ms, 从图 5(d) 的仿真结果中看到确实如此。同脉冲卷积移频一样, 它也有移频带来的能量损失, 因此, 幅度相对有所下降。

5.3 与噪声干扰的功率对比

由雷达参数可计算出匹配滤波器的压缩增益  $D = 2000$ 。常规射频噪声干扰中, 噪声非但得不到压缩增益, 反而会由于滤波而引起能量损失, 因此压缩后干信比一定低于  $10\lg(1/D) = -33.0103\text{dB}$ ; 而卷积干扰可以利用到脉冲压缩增益, 脉冲压缩后干信比应大得多。

由前面的理论分析, 脉冲卷积干扰压缩后干信比应为 0dB, 噪声卷积干扰压缩后的干信比应比常规噪声干扰的大  $10\lg[(L + T_p)/(L + 1/B)]\text{dB}$ 。

表 1 给出仿真实验中得到的不同方法的干扰功率增益与干信比增益比较情况。

从表 1 可见, 仿真得出的结果与理论分析基本一致, 噪声卷积干扰相对于常规噪声干扰来说具有相当大的功率优势, 并且在  $L \geq 1/B$  的前提下,  $L$  越小, 越节省干扰功率。

表 1 卷积干扰与常规射频噪声干扰方法对比结果

干扰形式		干扰功率增益(dB)		干信比增益 (dB)	
		理论值	实验值	理论值	实验值
噪声干扰		0	-3.0644	<-33.0103	-36.0747
脉冲卷积干扰		2000	2000	0	0
噪声卷积干扰	$L=T_p/5$	7.7815	7.7758	-25.2288	-25.2345
	$L=T_p/10$	10.4139	10.3885	-22.5964	-22.6218

6 结束语

卷积干扰作为对线性调频雷达的一种有效而灵活的干扰样式, 既能产生假目标欺骗性干扰效果, 又能产生噪声遮

盖性干扰效果。它是一种应答式干扰, 干扰机接收到雷达照射信号之后与某视频信号进行卷积, 再经放大之后转发。这种干扰不需要测频就能干扰频率捷变的脉冲压缩雷达, 还可利用脉冲压缩的处理增益, 降低干扰功率要求。理论分析证明, 本文提出的干扰形式对线性调频雷达是有着显著干扰效果的, 而仿真实验也表明了理论分析的正确性和实际应用的可行性。

参 考 文 献

- [1] 丁鹭飞, 张平编. 雷达系统. 西安: 西安电子科技大学出版社[M], 1984: 12-13.
- [2] 刘永坦. 雷达成像技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社[M], 1999: 260-266.
- [3] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社[M], 2005: 19-30.
- [4] 赵国庆. 雷达对抗原理. 西安: 西安电子科技大学出版社[M], 1999: 124-191.
- [5] [美]L 科恩. 白居宪译. 时频分析: 理论与研究. 西安: 西安交通大学出版社[M], 1998: 57-111.
- [6] 杨绍全, 张正明. 对线性调频雷达的干扰. 西安电子科技大学学报[J], 1991, 18(3): 24-30.
- [7] 吴一戎, 胡东辉. 一种新的合成孔径雷达压制干扰方法. 电子与信息学报[J], 2002, 24(11): 1664-1667.  
Wu Yi-rong, Hu Dong-hui. A new noise jamming approach to SAR. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(11): 1664-1667.

张 煜: 女, 1979 年生, 博士生, 研究方向为电子对抗技术。  
杨绍全: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子对抗技术及阵列信号处理。