

Wigner-Ville 变换在抗箔条干扰方法中的研究

邹晓华¹, 刘以安²

(1. 江苏科技大学 计算机科学与工程学院, 江苏 镇江 212003;

2. 江南大学 信息工程学院, 江苏 无锡 214036)

摘要: 在雷达跟踪空中目标时, 受箔条干扰信号的影响, 会造成雷达探测的数据不完整、不精确、不可靠。针对这一情况, 本文应用 Wigner-Ville 变换理论, 给出了一种对雷达回波信号进行滤波的算法。通过仿真实验证明, 应用 Wigner-Ville 变换能较好地抑制箔条干扰信号, 可进一步提高雷达系统的跟踪精度和可靠性。

关键词: Wigner-Ville; 箔条干扰; 滤波

中图分类号: TP973

文献标识码: A

The application of wigner-ville transform on the suppressing chaff-interference

ZOU Xiao Hua¹, LIU Yi An²

(1. School of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. School of Information Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

Abstract: When the radar tracks the aerial target, it is easily jammed by the chaff signals, so it will make the data detected by the radars half-baked, imprecise, unreliable and even contrary. In this case, this paper put forward an algorithm to filter the echo signals of radar through the application of the Wigner-Ville transform theory. The simulation testify that Wigner-Ville transform has a better performance in suppressing chaff-interference signals. further more, it can improve the tracking accuracy and reliability of the radar system.

Key words: Wigner-Ville; chaff-interference; filter the waves

高新技术在现代电子战的应用给现代军事 C3I 系统的仿真研究提出了新的挑战。箔条作为无源电子对抗中的重要干扰器材, 因其价格低廉、使用方便、干扰范围大和技术成熟等优势, 可在未知雷达参数的情况下, 对不同方向、不同频率、不同类型和体制的多雷达实施干扰。目前箔条干扰技术已被广泛应用于雷达无源对抗系统中, 成为现代战争不可缺少的软杀伤武器之一。

在实施箔条干扰时, 目标和箔条云同处雷达的一个分辨单元内, 从而造成雷达跟踪二者回波能量的合成中心^[1]。此外, 因箔条云的 RCS 常高于目标的 2~3 倍, 使得回波能量的合成中心靠近箔条云, 造成雷达跟踪点逐渐转移到箔条诱饵上。如能将淹没在箔条云回波中的目标回波分离出来, 就可使雷达不受箔条干扰的影响而继续

跟踪目标, 从而达到抗干扰的目的。目前箔条干扰的鉴别技术有很多^[2-3], 但对抗效果不甚理想。本文应用 Wigner-Ville 变换进行抗箔条干扰技术的研究, 通过仿真试验, 与 FIR 数字滤波器进行比较, 以判断 Wigner-Ville 变换能否较好地抑制箔条干扰信号。仿真结果表明, FIR 数字滤波器在抑制箔条干扰信号时, 虽然能大大降低目标回波信号的能量, 但无法准确辨别出目标的位置。而 Wigner-Ville 变换对于简化信号、抑制箔条干扰, 具有较好的效果, 并能清晰地识别出目标信号。

1 Wigner-Ville 变换抗箔条干扰技术

1.1 Wigner-Ville 的基本思想

Wigner 分布是由 Wigner 于 1932 年在量子力学的研究中提出的, 后由 Ville 在 1948 年将其引入到信号处理

技术与方法 Technique and Method

领域。因此, Wigner 分布又称为 Wigner-Ville 分布, 简称 WVD。

信号的 Wigner 分布可解释为表示信号能量随时间和频率分布的一个函数。故在 LFM 为发射信号的高分辨率雷达中, 应用 Wigner 分布进行积累可有效地抑制箔条干扰。

定义: 对于信号 $x(t)$, 它的自 Wigner 分布^[4]定义为:

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-j\omega\tau) x(t+\tau/2) x^*(t-\tau/2) d\tau \quad (1)$$

而信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互 Wigner 分布^[5]定义为:

$$W_{x,y}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-j\omega\tau) x(t+\tau/2) y^*(t-\tau/2) d\tau$$

$x^*(t)$ 、 $y^*(t)$ 分别为 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的共轭函数。

对于箔条干扰的目标回波信号, 只考虑箔条的因素, 不考虑天气等其他因素, 因此回波信号只是 2 个信号的混合, 一个是目标自身的信号、另一个是箔条信号。假设目标信号为 $x(t)$, 箔条信号为 $y(t)$, 则雷达的混合回波信号为: $z(t)=x(t)+y(t)$, 它的 Wigner-Ville 分布为:

$$W_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-j\omega\tau) x(t+\tau/2) y^*(t-\tau/2) d\tau$$

显然, $z(t)$ 的 Wigner-Ville 分布, 集中出现在表示信号瞬时变化律的直线上, 所以进行滤波是可行的。

1.2 Wigner-Ville 算法离散化

对信号进行离散化, 需以时间为单位进行采样。设抽样间隔为 T_s , 即 $t=nT_s$, 并令 $\tau/2=kT_s$, 则 $\tau=2kT_s$, 这样 (1) 式对 τ 的积分变成对 k 的求和^[5], 即:

$$W_x(t, \Omega) = 2T_s \sum_{+\infty}^{-\infty} f_t(nT_s+kT_s) g_t^*(nT_s-kT_s) e^{-j2k\Omega T_s}$$

将 T_s 归一化为 1, 并有 $\omega=\Omega T_s$, 则上式变成:

$$W_x(n, \omega) = 2 \sum_{+\infty}^{-\infty} f_t(n+k) g_t^*(n-k) e^{-j2k\omega} \quad (2)$$

将 $x(t)$ 变成 $x(n)$ 后, $x(n)$ 的频谱 $X(e^{j\omega})$ 将变成周期的, 周期为 2π , 且 2π 对应抽样频率 f_s , $X(e^{j\omega})$ 与 $x(t)$ 的频谱 $X(j\Omega)$ 之间的关系是

$$X(e^{j\omega})|_{\omega=\Omega T_s} = \frac{1}{T_s} \sum_{+\infty}^{-\infty} X(j\Omega-jk\Omega) \quad (3)$$

即周期延拓关系, 延拓周期 $\Omega_s=2\pi/T_s$ 。同样, $x(t)$ 的 WVD $W_x(t, \Omega)$ 也变成周期的 $W_x(n, \omega)$ 。由于 (2) 式中的核函数是 $\exp(-j2k\omega)$, 因此 $W_x(n, \omega)$ 的周期为 π , 即:

$$W_x(n, \omega+\pi) = \sum_{+\infty}^{-\infty} f_t(n+k) g_t^*(n-k) e^{-j2k(\omega+\pi)} \quad (4)$$

式中, k 为信号 f_t 的时间序号; n 为时移。

$x(t)$ 的最高频率为 f_{\max} , 抽样定理决定了抽样频率至少应满足 $f_s \geq 2f_{\max}$ 。如按 $f_s=2f_{\max}$ 对 $x(t)$ 抽样, 并对抽样后的 $x(n)$ 做 WVD, 由于其 WVD 的周期变为 π , 因此在 WVD 中必会产生严重的混叠。解决这个问题的直接方法就是提高抽样频率, 要求 f_s 至少满足 $f_s \geq 2f_{\max}$ 。

对 (4) 式的频率 ω 进行离散化^[5], 并确定 k 的求和范围:

$$\text{令: } r_x(n, k) = f_t(n+k) g_t^*(n-k)$$

并假定 $x(k)$ 的长度为 N , 即 $k=0, 1, \dots, N-1$, 再分析 $r_x(n, k)$ 的取值情况。

如果当 $N=6$ 时, 可以写出:

$$n=0 \text{ 时, } r_x(0, k) = \{f_t(0) \times g_t(0)\}, \quad k=0$$

$$n=1 \text{ 时, } r_x(1, k) = \{f_t(0) \times g_t(2), f_t(1) \times g_t(1), f_t(2) \times g_t(0)\}, \quad k=-1 \sim 1$$

$$n=2 \text{ 时, } r_x(2, k) = \{f_t(0) \times g_t(4), f_t(1) \times g_t(3), f_t(2) \times g_t(2), f_t(3) \times g_t(1), f_t(4) \times g_t(0)\}, \quad k=-2 \sim 2$$

$$n=3 \text{ 时, } r_x(3, k) = \{f_t(1) \times g_t(5), f_t(2) \times g_t(4), f_t(3) \times g_t(3), f_t(4) \times g_t(2), f_t(5) \times g_t(1)\}, \quad k=-2 \sim 2$$

$$n=4 \text{ 时, } r_x(4, k) = \{f_t(3) \times g_t(5), f_t(4) \times g_t(4), f_t(5) \times g_t(3)\}, \quad k=-1 \sim 1$$

$$n=5 \text{ 时, } r_x(5, k) = \{f_t(5) \times g_t(5)\}, \quad k=0$$

如果将 $r_x(n, k)$ 都扩充为 N 点序列, 则只要在其后补零即可。

综上所述, 对于雷达混合回波信号进行 Wigner-Ville 计算, 可采用如下的算法:

(1) FFT 计算长度 N 的确定

根据数据长度 L , 计算满足不等式 $2L \leq 2m$ 的最小整数 m , 令 $N=2m$ 作为 FFT 计算长度。

(2) 对于输入信号 f_t (雷达回波信号, 长度为 L), 作为公式中的 f 函数; 对于输入信号 g_t (雷达发射信号, 长度为 L), 求其共轭作为公式中的 f 函数。

(3) 若信号序列长度小于 N , 则应在信号序列的末端相应补零, 使其总长度为 N 。

(4) 令 $r_x(n, k) = g_t(n+k) \times f_t(n-k)$, 做循环求和实现离散序列的积分。

2 FIR 滤波器抗箔条干扰技术

2.1 FIR 滤波器原理

FIR 滤波器的设计思想主要是建立在对理想滤波器频率特性在某种近似基础上^[6], 设理想低通数字滤波器的频率特性为 $H_d(e^{j\omega})$, 假定其幅频特性 $|H_d(e^{j\omega})|=1$, 相频特性 $\Phi(\omega)=0$, 其单位抽样响应

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\omega}) e^{-j\omega n} d\omega = \frac{\sin(\omega_c n)}{n\pi}$$

$h_d(n)$ 是以 $h_d(0)$ 为对称的 sinc 函数, $h_d(0) = \frac{\omega_c}{\pi}$ 。这样的系统是非因果的, 因此是物理不可实现的。但如果用一窗函数将 $h_d(n)$ 截短, 如取 $h_d(-\frac{M}{2}), \dots, h_d(0), \dots,$

$h_d(\frac{M}{2})$, 并将截短后的 $h_d(n)$ 相移, 得 $h(n) = h_d(n - \frac{M}{2}), n=0, 1, 2, \dots, M$ 那么 $h(n)$ 是因果的, 且为有限长 $M+1$ 。令

《微型机与应用》2009 年第 23 期

技术与方法 Technique and Method

$$H(z) = \sum_{n=0}^M h(n)z^{-n}$$

可得所设计滤波器的转移函数。 $H(z)$ 的频率响应将近似 $h_d(e^{j\omega})$,且是线性相位的。这就是设计 FIR DF 的思路。

2.2 FIR 滤波器算法实现步骤

可采用如图 1 所示的数字系统组成实现对模拟信号 $x(t)$ 进行滤波处理。

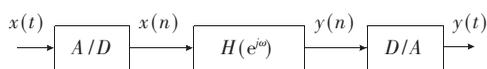


图 1 FIR 滤波器系统组成

对数字滤波器的指标参数采用传统的描述方式:设定采样频率(Hz)为 F_s ;通带上限临界圆频率(或通带截止频率 f_c)为 w_p ,通带波纹(dB)为 δ_p , (通带内最大衰减);通带下限临界圆频率(或阻带截止 f_s)为 w_s ,阻带波纹(dB)为 δ_s , (阻带内最小衰减)。根据整个系统的需求,实际确定合理的滤波器频率响应指标。

根据窗函数设计的经验公式,得归一化过渡带为

$$\Delta f = \frac{w_s - w_p}{2\pi}, \text{滤波器阶数为 } M \approx \frac{\delta_s - 7.95}{14.36\Delta f} + 1.$$

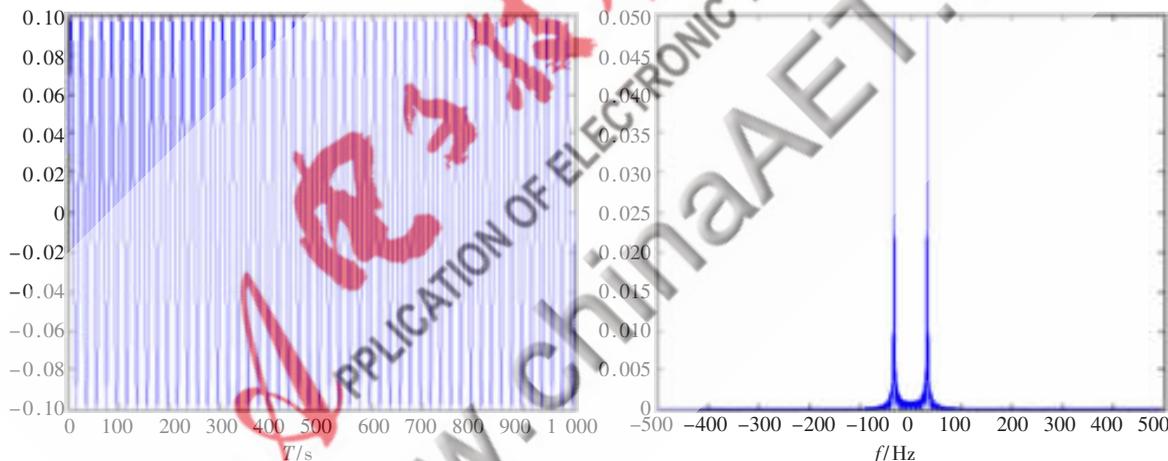


图 2 目标回波信号时域和频域图

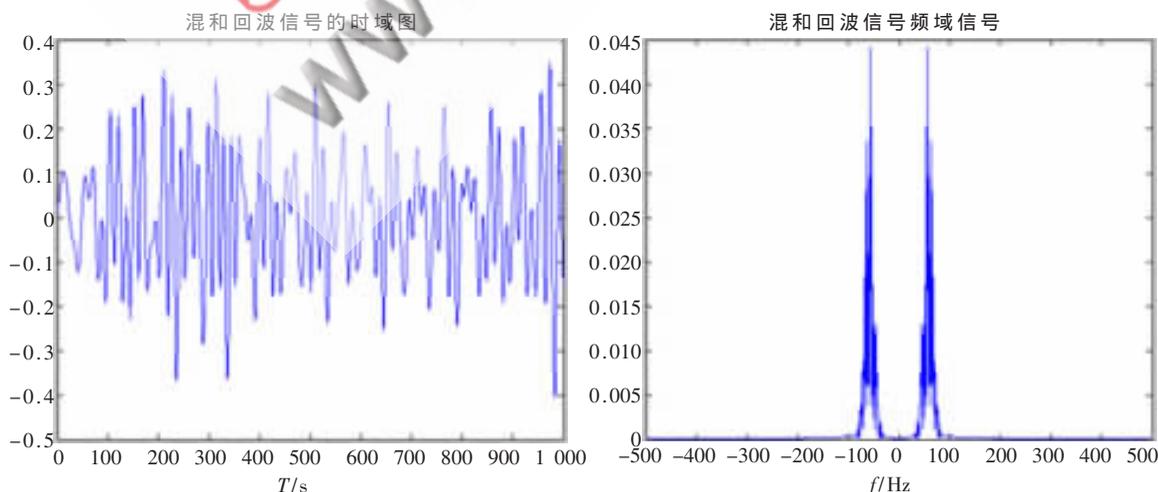


图 3 混合回波信号时域和频域图

通过分析和参考文献[7],使用 FIR 滤波器将回波信号中的噪声滤掉的算法步骤为:(1) 根据截止频率 f_c, f_s 、采样频率 F_s 、滤波器阶数 M ,算出 $h_d(n)$;(2)根据所选择的窗函数,算出 FIR 滤波器 $h(n)$;(3)将滤波器 $h(n)$ 作为分子 fenzid,令分母 fennud 为 1;(4)将 fenzid 和 fennud 经过循环处理后得到的输出,即为滤波后的信号。

3 仿真实验

在箔条干扰中,根据相关资料及现场试验结果,箔条云回波信号的时域特性为:箔条云散射回波信号的相位为均匀分布,其幅度在时域上的统计特性与频域上的功率谱均为高斯分布。仿真箔条回波信号可以产生 1 组特殊的随机数,使其在时域和频域上符合上述要求。同时,在工程应用中,箔条回波信号的幅度是随着各种特定的条件变化的,可以应用幅度不同箔条回波信号(目标信号淹没在箔条回波信号中)分析 Wigner-Ville 变换的抗干扰性能。

假设目标回波信号 $y(t) = 100 \times \sin(2 \pi \times 33 t)$ 然后采用 MATLAB6.1 在 PC 机上编程实现。对箔条回波信号进行 Wigner-Ville 变换,如图 2、图 3 所示。

图 2 为目标信号经过仿真得到的时域和频域图。图

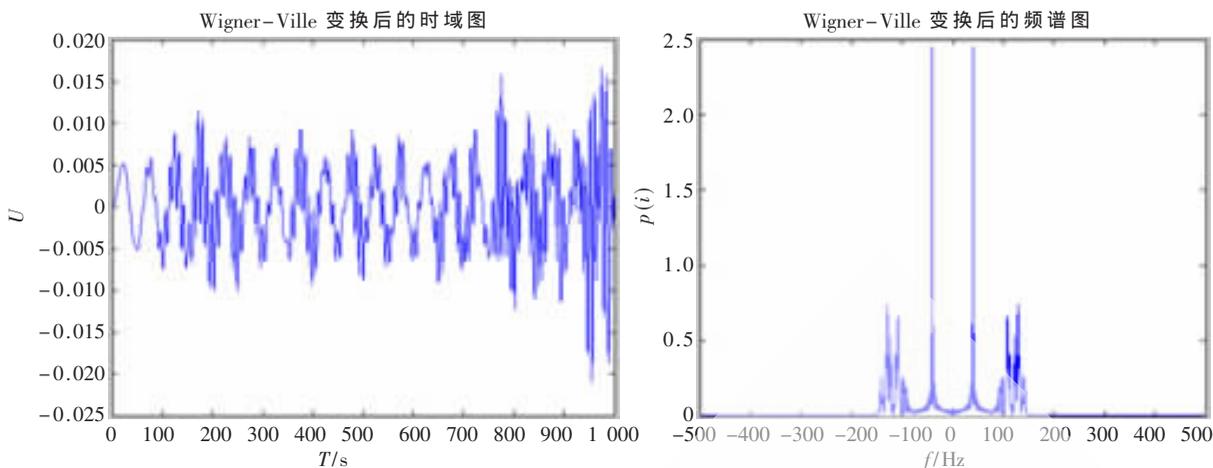


图4 Wigner-Ville 变换后的回波信号时域和频域图

3 为混合信号经过仿真得到时域和频域图。目标和箔条的混合信号经过 Wigner-Ville 变换后得到的时域和频域图如图 4 所示。通过图 2、图 3 频域信号的对比可以发现,混合回波信号中的箔条回波信号(中频为 60 Hz,带宽为 20 Hz,幅度可调)经 WVD 变换后,已被有效地抑制可以清晰的从图 2 中辨别出目标回波信号。同时,为了检验 Wigner-Ville 变换对箔条信号抑制的效果,计算 Wigner-Ville 变换前后的混合回波信号的功率, $P_1 = -23.6359$ dB, $P_2 = -51.6597$ dB (P_1 和 P_2 分别为 WVD 变换前后的功率)。由于箔条回波信号为随机信号,所以对相同的中频和带宽每次产生的混合信号的功率是变化的,因此只采集了 1 组数据,由 P_1 和 P_2 可以得出混合回波信号经 WVD 变换后的功率降幅达 28.0238 dB。

图 5 为混合回波信号经 FIR 滤波器滤波后的时域和频域信号,通过图 4 和图 5 的对比可以看出:虽然 FIR 滤波器能有效地抑制箔条回波信号,但目标信号的功率损耗较大。图 5 中的频域信号中目标信号频率的幅度非常小。因此得出 $P_3 = 67.6972$ dB, $P_4 = -22.2244$ dB (P_3 、 P_4 分别为 FIR 滤波前后混合回波信号的功率)。由 P_3 、 P_4 可以得出混合回波信号经 FIR 滤波后的功率降幅达 89.9216 dB。

通过仿真实验表明,混和信号经过 Wigner-Ville 变换后,功率降幅能达到 28.0238 dB,小于 30 dB。表明 Wigner-Ville 变换在箔条抗干扰方面有效地抑制了箔条信号的干扰,噪声能量抑制也达到预期效果,且保证目标回波信号能量降低很小时,可以较大地降低箔条干扰的信号能量,满足工程实践。而 FIR 滤波器在对混和信号滤波以后,功率降幅高达 89.9216 dB,表明 FIR 数字滤波器对箔条信号干扰抑制的效果不是很理想,因为该方法在抑制箔条干扰信号能量的同时也大大降低了目

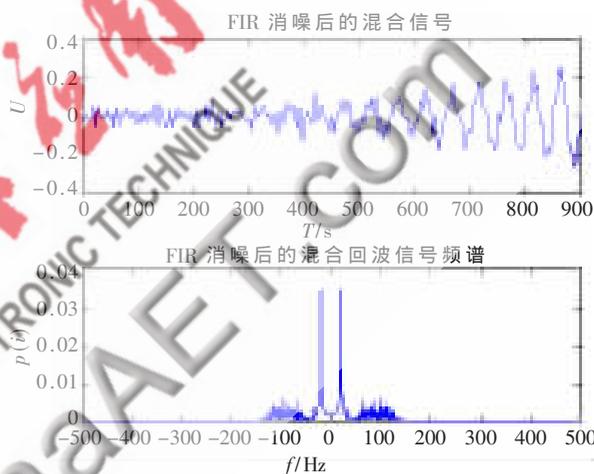


图5 FIR 滤波变换后的仿真结果

标回波信号的能量,无法准确地辨别出目标的位置。

参考文献

- [1] 李伟.抗箔条质心干扰的一种方法[J].舰船电子对抗, 2000(5): 11-13.
- [2] 朱益群,张应微,李燕双.抗箔条干扰中信号处理方法研究[M].北京:电子工业出版社,1996.
- [3] 贾鑫,郭桂蓉.反舰导弹末制导雷达抗箔条干扰的一种方法[J].舰船电子对抗,1998(3).
- [4] 陆传贵.现代信号处理导论[M].北京:北京邮电大学出版社,2003.
- [5] 胡广书.现代信号处理教程[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [6] 陈怀琛.数字信号处理教程-MATLAB 释义与实现[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [7] 刘湘崇.基于 MATLAB 的低通 FIR 数字滤波器的滤波[J].电脑学习,2002(4): 26-27.

(收稿日期:2009-08-05)