

# 基于自适应线性预测滤波的反辐射导弹检测技术

陈建春, 耿富录, 徐少莹

(西安电子科技大学, 电子工程学院, 陕西西安 710071)

**摘要:** 本文提出一种基于自适应线性预测滤波器技术实现的反辐射导弹(ARM)检测新方法, 可以有效地将雷达回波中的强载机信号消除而保留微弱的 ARM 信号, 使 ARM 的检测更加迅速、可靠。仿真结果表明, 这种方法可以在低达-20dB 的 ARM 与载机回波功率比中实现 ARM 信号的有效检测识别, 从而实现 ARM 发射的早期告警。

**关键词:** 信号检测; 反辐射导弹; 线性预测滤波器; 加速度补偿; 快速傅立叶变换

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)06-0755-03

## ARM Detection Technique Based on Adaptive Linear Prediction Error Filtering

CHEN Jian chun, GENG Fu lu, XU Shao-ying

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

**Abstract:** A new method for ARM detection based on Adaptive Linear Prediction Error Filter (ALPEF) is proposed in this paper. The method is proved to be fast, reliable for detecting ARM signal in a very low aircraft to ARM signal ratio. Its mechanism is based on the elimination the strong aircraft signal from the radar echoes. Computer simulation results show that a very good detection performance is achieved in a -20dB aircraft to ARM signal ratio, so that a reliable early warning of ARM launching can be given.

**Key words:** signal detection; ARM; linear prediction error filter; acceleration compensation; FFT

### 1 引言

反辐射导弹(ARM)对防空雷达系统构成了严重的威胁, 因此现代的雷达系统要求具备一定的抗击 ARM 能力。改变雷达的工作体制(如采用双/多基地等无源雷达接收系统<sup>[1,2]</sup>)是一种有效的积极防御手段, 但由于这种雷达体制较传统的复杂, 且一些关键的技术尚未成熟, 目前仅处于研究试验阶段。较现实的做法是对现有的单基地雷达配备抗 ARM 设备。这种被动的防御法包括有源诱饵法<sup>[3,4]</sup>, 基于信号处理实现的 ARM 检测告警法<sup>[5-7]</sup>或二者的结合等。ARM 检测可在时域或频域进行, 但由于 ARM 比载机回波弱得多, 且加上噪声的影响, 在时域检测可靠性很差。在频域检测通常采用快速傅立叶变换(FFT)实现, 但由于载机回波通常近似为一单频信号, ARM 回波在发射初期为一线性调频信号或为频带信号, 直接 FFT 后 ARM 信号功率得不到有效积累, 其频谱往往淹没于强载机信号频谱的副瓣之中, 结果仍然无法可靠检测。因此必须在进行 FFT 前进行适当的预处理。文献[5]提出在 FFT 前进行加速度补偿的预处理方法, 但存在的问题是补偿后的频谱中仍含有强载机频谱, 检测时需进行二维相关处理以区别载机和 ARM 信号, 这就要求载机与 ARM 信号必须在频域上充分分离, 时域上表现为 ARM 发射后需经一定时间的加速, 当其速度与载机速度差别充分大时才可实现检测, 因此告警较为迟缓。本文提出的方法是, 先对雷达回波在时域进行载机信号抑制, 然后对抑制了载机的信号在频域上进行加速度补偿, 再对补偿后的信号进行 FFT, 最后实现简单的频域门限检

测。因此, 不需信号在频域充分分离, 理论上可实现 ARM 一发射即告警。

### 2 ARM 信号的检测原理

#### 2.1 回波信号模型

假定雷达处于对目标载机的跟踪状态, 载机发射 ARM 的一段时间内通常做匀速直线运动或只做很小的机动飞行。由于 ARM 是正对雷达站发射, 发射

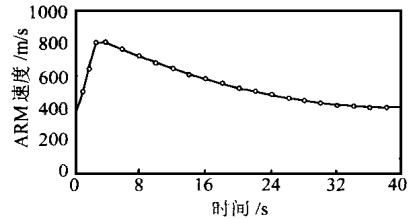


图1 典型 ARM 速度曲线

脱离载机时有一很大的加速度, 这一加速度一般持续数秒钟, 而后做近似匀速直线运动。典型的导弹速度曲线示于图 1, 期望能够在导弹加速阶段发现 ARM。

设载机在发射反辐射导弹时的速度为  $v$ , ARM 发射时的加速度为  $a$ , 则其速度为  $v + at$ 。因而载机与 ARM 的回波信号脉冲串的复包络分别为

$$S_1(t) = A_1 e^{j(2\pi f_d t + \phi_0)} \quad (1)$$

$$S_2(t) = A_2 e^{j[2\pi f_d t + \frac{1}{2} \mu t^2 + \phi_0]} \quad (2)$$

其中  $f_d = 2v/\lambda$  为载机的多卜勒频率,  $\lambda$  为雷达的工作波长,  $\phi_0$  为初相,  $A_1, A_2$  分别为载机和 ARM 信号的振幅,  $\mu$  为 ARM 信号的调频斜率, 其值由下式确定

$$\mu = 2a/\lambda \quad (3)$$

在 ARM 发射的初始阶段, 载机与 ARM 处于同一距离波



将上式信号与  $m$  个补偿信号  $c_i(k)$  相乘

$$c_i(k) = e^{-j2\pi \frac{1}{2} \mu_i (kT_r)^2} = e^{-j\pi \mu_i (kT_r)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

$$z_i(k) = \varepsilon(k) \cdot c_i(k) = A_2 e^{j2\pi [f_d (kT_r + \tau) + \frac{1}{2} (\mu (kT_r + \tau)^2 - \mu_i (kT_r)^2)]} \cdot [1 - e^{j2\pi \mu \Delta T_r (kT_r + \tau) + \frac{1}{2} \mu (\Delta T_r)^2}] = A_2 e^{j2\pi [f_d + \mu] kT_r + \frac{1}{2} \mu^2 + f_d \tau] e^{j\pi (\mu - \mu_i) (kT_r)^2} \cdot [1 - e^{j2\pi \mu \Delta T_r (kT_r + \tau) + \frac{1}{2} \mu (\Delta T_r)^2}] \quad (20)$$

显然, 当  $\mu_i = \mu$  即完全补偿时, 最佳补偿输出为

$$z_{opt}(k) = A_2 e^{j2\pi [f_d + \mu] kT_r + \phi_1} + A_2 e^{j2\pi [f_d + \mu (\tau - \Delta T_r)] kT_r + \phi_2} \quad (21)$$

式中  $\phi_1 = (1/2) \mu^2 + f_d \tau$ ,  $\phi_2 = \phi_1 + (1/2) \mu (\Delta T_r)^2 - \mu \Delta T_r \tau + (1/2) \mu^2 \Delta T_r^2$  为由时延  $\Delta T_r$  和  $\tau$  引起的固定相位项。因此补偿输出中已不含线性频率项, 只有两个多卜勒频率  $f_d + \mu \tau$  及  $f_d + \mu (\tau - \Delta T_r)$ ; 当  $\Delta T_r$  很小时此二多卜勒频率十分接近。

实际工作时, 因为 ARM 的加速度或  $\mu$  是未知的, 因此需在  $\mu$  值可能出现的范围内进行多次补偿处理, 并对每一组补偿结果进行 FFT 处理, 即进行多通道的 FFT 处理, 然后再进行检测。

### 3 仿真结果与分析

根据以上设计思想, 进行了计算机仿真。仿真参数如下: 雷达工作波长  $\lambda = 5\text{cm}$ ; 雷达脉冲重复周期  $T_r = 0.25\text{ms}$ ; 载机相对雷达径向速度  $v = 340\text{m/s}$ , 对应  $f_d = 2v/\lambda = 13.6\text{kHz}$ ; ARM 发射加速度  $a = 150\text{m/s}^2$ , 对应  $\mu = 2a/\lambda = 6\text{kHz/s}$ ; 加速度补偿范围  $\mu_i = 0 \sim 10\text{kHz/s}$ ,  $i = 0, 1, \dots, 10$ , 步进间隔  $\Delta\mu = 1\text{kHz/s}$ ; FFT 点数  $N = 256$ ; 信号延迟  $\Delta = 6 > \frac{1}{2\mu NT_r^2} = 5.2$ ; 载机/ARM = 20dB; ARM/噪声 = -3dB。计算权值  $w$  所需的相关函数是对  $N - \Delta$  点采样数据做统计平均求得。

图 4、5 分别为无 ARM 发射时不进行载机信号抑制和进行载机信号抑制情况下的补偿频谱; 图 6、7 分别为有 ARM 发射时的相应结果。

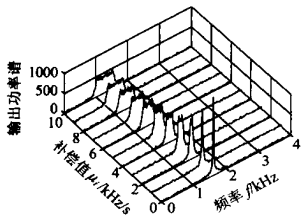


图 4 无 ARM 时无对消的补偿输出功率谱

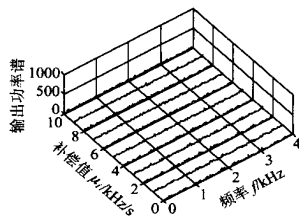


图 5 无 ARM 时有对消的补偿输出功率谱

在无 ARM 发射情况下, 滤波器输入仅有载机信号和噪声, 经对消后载机信号被抑制, 进行加速度补偿后的 FFT 输出在各通道上只有噪声功率输出。在 ARM 发射后, 由于  $N$  点数据采集是在 ARM 刚发射开始进行的, 此时载机与 ARM 信号在频率上尚未分开, 因此图 6 未对消的补偿输出频谱中 ARM 频谱淹没于载机的频谱中(对应图 6 中  $\mu_i = 0\text{kHz/s}$ ), 无法实现 ARM 的检测。而在图 7 中, 强的载机信号经滤波后被抑制掉, 补偿的频谱输出中只含有 ARM 信号与噪声分量(对应图中  $\mu_i = 6\text{kHz/s}$  时输出最大), 且 ARM 信号频谱远大于噪声, 从

而可以应用门限检测法可靠检测出 ARM 的存在。

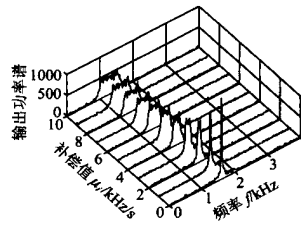


图 6 有 ARM 时无对消的补偿输出功率谱

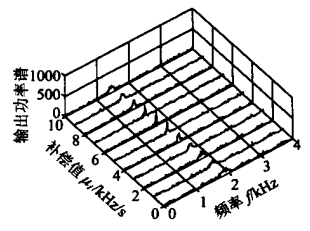


图 7 有 ARM 时有对消的补偿输出功率谱

### 4 结论

以上建立的载机发射 ARM 时的回波模型是针对载机作匀速飞行情况。实际中载机可能存在一定的机动, 表现为其多卜勒频率为非单一谱线, 但这种机动一般认为比 ARM 的机动小得多, 因此该模型仍然适用。当载机的机动较大而需考虑时, 可以将自适应预测器的阶数  $P$  取得稍高一些, 以有效抑制展宽的载机信号频谱, 但这对 ARM 信号亦有一定损失。另外, 式(17)给出的是  $\Delta$  下限值计算公式, 但应用时  $\Delta$  也不能取得太大, 否则补偿后的 ARM 信号频谱会出现分裂, 降低检测性能。

### 参考文献:

- [1] M I Skolnik. Radar handbook [M]. Second edition, New York, Mc Graw-Hill 1990.
- [2] Li Neng Jing. Radar ECCMs New Area: Anti Stealth and Anti Arm [J]. IEEE Trans. 1995, AES31(3): 1120- 1127.
- [3] R McLendon, C Turner. Broadband sensor lethal defense suppression [J]. Microwave Journal, 1983, 26(9): 85- 103.
- [4] 司锡才, 查玉峰. 两点源抗反辐射导弹诱骗(骗)技术 [J]. 航空学报, 1989, 10(6): 288- 296.
- [5] Chen Jianchun, Geng Fulu, et al. A study on anti Radiation Missile Launching Warning Technique [A]. International Symposium on Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors [C], Japan, 1994: 485- 490.
- [6] 童锐. FFT 在 PD 雷达中截获与跟踪高速和高加速目标的应用 [J]. 电子学报, 1981(6): 13- 22.
- [7] 王盛利, 朱力. 变抽样率处理技术检测反辐射导弹 [J]. 电子对抗, 1999(1): 24- 28.
- [8] B Widrow, S D Stearns. Adaptive Signal Processing [M]. Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall Inc. 1985.

### 作者简介:



陈建春 男, 1962 年生于山西太原, 副教授。主要从事雷达信号处理, 自适应信号处理算法, 高速 DSP 在数字信号处理中应用等方面的研究。