

机载相控阵雷达中抑制杂波的线性预测法

苏杰 李春升 周荫清

(北京航空航天大学电子工程系, 北京, 100083)

LINEAR PREDICTION APPROACH FOR CLUTTER SUPPRESSION IN AIRBORNE PHASED ARRAY RADARS

Su Jie, Li Chunsheng, Zhou Yinqing

(Department of Electronic Engineering of Beijing University of Aeronautics and

Astronautics, Beijing, 100083)

摘要 从一个多通道自回归过程拟合杂波信号的概念出发, 提出了用线性预测法实现机载相控阵雷达的时空二维自适应信号处理。研究表明, 杂波过程可以用一个低阶的多通道自回归过程很好地拟合, 从而使用一个低阶的线性预测处理器以较低的代价实现准最优的处理。同时, 这种低阶的线性预测处理器还具备冗余的自由度以对付除杂波外的其他有色噪声和干扰。

关键词 信号处理, 相控阵雷达, 线性预测, 自适应滤波

中图分类号 V243.2

Abstract To cope with the time-varying and Doppler broadened clutter in airborne phased array radars, it is required that the signal processing be adaptive and two-dimensional (spatial and temporal). However, the optimum adaptive spatial-temporal processing is hard to be realized real-timely because of the large amount of computation it requires. From the idea of approximating the clutter process by using a multi-channel Auto-Regressive (AR) process, a linear prediction approach is proposed to realize adaptive spatial-temporal processing of airborne adaptive array signals. The research shows that the clutter process can be well approximated by a low-order AR process, and a low-order linear prediction receiver achieves a suboptimum performance at a very low computational expense. Besides, the receiver has additional degree of freedom to cope with other colored noises and interference. In consideration of the many advantages of the linear prediction receiver in both algorithm and realization, it has a good prospect in the application of airborne adaptive array signal processing.

Key words signal processing, phased arrays-radar, linear prediction, adaptive filters

机载雷达工作在下视状态时, 运动目标的回波在频域上被淹没在多普勒展宽的副瓣杂波之中, 使得单纯的时间滤波器无法滤除与运动目标本身具有相同多普勒频移的那部分副瓣杂波, 因此有必要在信号处理中加上一个空间维。即: 要对阵列天线接收到的同时含有回波场的时间和空间信息的信号进行时、空二维的处理。时变的杂波还要求信号处理是自适应的。

Brennan 和 Reed 等人首次提出了时、空二维自适应信号处理的理论^[1]。为了实现在机载相控阵雷达中的实时应用, 已经研究了许多准最优或者次最优的方法^[2~6]。本文尝试用一个多通道自回归 (AR) 过程拟合杂波信号。

1 多通道最小二乘线性预测和最优时空二维处理器

N 个阵元构成的天线阵接收到的信号矢量是一个 N 通道信号 $\vec{x}(t)$

$$\vec{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_N(t)]^T \quad (1)$$

其中 $x_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, N$ 表示第 j 个阵元接收到的信号。

可用的是 $\vec{x}(t)$ 的 M 个时间采样。用 $\vec{x}(t)$ 在前 $M-1$ 个时刻的采样值来预测其当前采样值的 $M-1$ 阶线性预测器定义为

$$\hat{\vec{x}} = - \sum_{i=1}^{M-1} A_{M-1,i} \vec{x}(t-i) \quad (2)$$

式中 $\hat{\vec{x}}$ 是对 $\vec{x}(t)$ 的预测; $A_{M-1,i}$, $i = 1, 2, \dots, M-1$ 是 $M-1$ 阶前向预测器系数阵。

定义前向预测误差

$$\vec{e}_{M-1,t} = \vec{x}(t) - \hat{\vec{x}}(t) = \vec{x} + \sum_{i=1}^{M-1} A_{M-1,i} \vec{x}(t-i) \quad (3)$$

再用

$$A(z) = I + A_{M-1,1}z^{-1} + \cdots + A_{M-1,M-1}z^{-(M-1)} \quad (4)$$

表示预测误差滤波器的传递函数, 则前向预测误差可表示为

$$\vec{e}_{M-1,t} = A(z)\vec{x}(t) \quad (5)$$

假定有 $z^{-1}\vec{x}(t) = \vec{x}(t-1)$ 。

最小二乘预测器的系数阵是下列 Yule-Walker 方程的解^[7]

$$[A_{M-1,1} \cdots A_{M-1,M-1}] R_{M-1,t} = - [R_{M-1,M-2} \cdots R_{M-1,0}] \quad (6)$$

式中

$$R_{M-1,i} = E \{ \vec{x}(t) \vec{x}^H(t-i) \} \quad i = 0, 1, \dots, M-2 \quad (7)$$

为 $\vec{x}(t)$ 的采样协方差阵序列, 而 $R_{M-1,t}$ 为

$$R_{M-1,t} = \begin{bmatrix} R_{M-2,M-2} & \cdots & R_{M-2,0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{0,M-2} & \cdots & R_{0,0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

假定 $\vec{x}(t)$ 是平稳的, 则最小二乘预测器的系数阵就是下列平稳条件下的 Yule-Walker 方程的解^[7]

$$[I \ A_{M-1,1} \ \cdots \ A_{M-1,M-1}] R_M = [R_{M-1}^e \ 0 \ \cdots \ 0] \quad (9)$$

式中

$$R_{M-1}^e = E \{ \vec{e}_{M-1,t} \vec{e}_{M-1,t}^H \} \quad (10)$$

为均方预测误差, 而 R_M 为

$$R_M = \begin{bmatrix} R_0 & \cdots & R_{M-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{1-M} & \cdots & R_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式 (9) 可由高效的 Levinson-Durbin 算法解出^[8]。

把最小二乘预测器的系数阵排成一个上三角阵

$$U_A = \begin{bmatrix} I & A_{M-1,1} & \cdots & A_{M-1,M-1} \\ 0 & I & \cdots & A_{M-2,M-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I \end{bmatrix} \quad (12)$$

则 U_A 提供了对 R_M^{-1} 的一个下三角 \times 对角 \times 上三角分解^[9]

$$R_M^{-1} = U_A^H R^e U_A \quad (13)$$

式中

$$R^e = \text{diag}\{R_{M-1}^e \cdots R_0^e\} \quad (14)$$

定义归一化的前向预测滤波器系数

$$\tilde{A}_{M-1,i} = R_{M-1}^{e/2} A_{M-1,i} \quad (15)$$

和归一化的前向预测误差

$$\tilde{e}_{M-1,t} = R_{M-1}^{e/2} e_{M-1,t} \quad (16)$$

则 (13) 式可以简化为下面的下三角 \times 上三角形式^[9]

$$R_M^{-1} = U_A^H U_A \quad (17)$$

式中

$$U_A = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{M-1,0} & \tilde{A}_{M-1,1} & \cdots & \tilde{A}_{M-1,M-1} \\ 0 & \tilde{A}_{M-1,0} & \cdots & \tilde{A}_{M-2,M-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \tilde{A}_{0,0} \end{bmatrix} \quad (18)$$

R_M 就是平稳条件下噪声协方差阵 R , 因此, 平稳条件下最优时空二维处理器的输出就是

$$y = \hat{S}^H R_M^{-1} \hat{x} = \hat{S}^H U_A^H U_A \hat{x} \quad (19)$$

2 线性预测处理器

如果输入样本过程是一个 $p \leq M-1$ 阶的 AR 过程, 即用零均值单位方差的白噪声激励一个 p 阶全极点滤波器

$$H(z) = 1/A_p(z) \quad (20)$$

而产生的输出, 式中

$$A_p(z) = 1 + A_{p,1}z^{-1} + \cdots + A_{p,p}z^{-p} \quad (21)$$

则最小二乘预测器的解就是

$$A_{M-1,j} = \begin{cases} A_{p,j} & j = 1, 2, \dots, p \\ 0 & j > p \end{cases} \quad (22)$$

且对所有的 $i > p$, 有

$$A_{i,j} = \begin{cases} A_{p,j} & j = 1, 2, \dots, p \\ 0 & j > p \end{cases} \quad (23)$$

如果杂波信号是一个 p 阶的 AR 过程, 则只需要求解一个 p 阶的最小二乘线性预测器, 就能得到 (19) 式中的 R_M^{-1} 。若 p 很小, 则将带来很大的收益: 一是求解线性预测器的计算量很小; 二是这时 U_A 所具有的稀疏的结构使得形成 (19) 式的处理器输出的计算量也随之减小了。

实际上并不知道杂波是一个什么样的过程,但是实验证明用一个很低阶的 AR 过程就可以把它拟合得很好。在下节的模拟实验中,使用低阶和高阶的线性预测处理都一样达到了最优处理性能,这从一个方面说明了这一点。

(19) 式的最优处理器可以用图 1 所示的线性预测处理器结构来实现。图中的 $\hat{b}_{p,t}(f)$ 定义为

$$\hat{b}_{p,t}(f) = \tilde{A}_{p,t}(f) \hat{s}_w \quad (24)$$

式中 \hat{s}_w 是一个常规的波束导向矢量; $\tilde{A}_{p,t}(f)$ 为 p 阶归一化预测误差滤波器的传递函数。这种结构相当于先以预测误差滤波器对回波信号进行预白化,然后再用算子 \hat{b}^H 和多普勒滤波器实现对目标的空、时匹配。

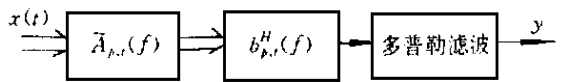


图 1 线性预测处理器

3 自适应算法

由以上可知,实现线性预测处理器的关键是求解一个多通道最小二乘线性预测器,而该预测器的解又是由输入样本过程 $\hat{x}(t)$ 的二阶统计特性决定的。在大多数实际情况下, $\hat{x}(t)$ 的统计特性是未知的,而且还经常是时变的,这就要求从 $\hat{x}(t)$ 的样本数据中自适应地估计出它的二阶统计特性并求解最小二乘预测器。

用观测样本数据自适应求解最小二乘预测器的各种批处理方法和递归方法在近年来得到了广泛的研究。本文仅从机载雷达应用中的时变信号环境和实时性要求考虑,选用一类快速归一化递归最小二乘格形(RLSL)算法^[10]对线性预测处理器的性能进行了模拟实验研究。由于 RLSL 算法引入了一个加权因子对过去和当前的数据进行加权,使得它能够快速跟踪信号统计特性的变化,因此对于工作在时变信号环境下的自适应系统是很合适的。采用它的另一个原因是算法要求的计算量较低,它在每个样本间隔内更新一次滤波器所需的计算量为 $O\{N^2p\}$, p 为预测器的阶数。当 p 不大时,对于实时应用是很有利的。此外,采用归一化的格形算法在实现上也带来了明显的优点:格形算法的模块化结构便于采用并行/流水实现,且对数字实现带来的舍尾误差不敏感;均方根归一化使得滤波器内各量的模总不大于 1,方便了定点实现。

4 模拟实验

使用计算机模拟程序产生的模拟杂波数据测试了线性预测处理器的性能。模拟实验采用以下参数:载机高度为 $h=8\text{km}$;载机速度 v 为 100m/s ;波长 K 为 0.1m ;脉冲重复频率 f_r 为 4kHz ;接收天线为沿飞行方向排列的等间距线阵,阵元数 N 为 8,阵元间距 $d=K/2$,时间采样数 M 为 8;发射天线各参数同接收天线,观察方向为垂直于飞行方向,距离 r 为 16km ;地面为均匀、无杂波起伏;杂波/噪声功率比 CNR 为 20dB ;用信噪比增益 $\text{GSNR}=\text{输出信噪比}/\text{输入信噪比}$ 作为衡量处理器性能的量度。

4.1 不同阶次的线性预测处理器的性能

图 2 的(a)、(b) 和(c) 分别是阶次 $p=7、3、1$ 阶的线性预测处理器的 GSNR 的性能。可以看到, 随着样本数的增加, 最终都收敛到了最优时空二维处理的性能, 而低阶的处理性能收敛得更快。 $p=1$ 阶的线性预测处理器仅用 96 个样本数据就收敛到了最优性能的- 3dB 内, 比采用典型 SMI 算法^[2]的最优时空二维处理(约需 $2NM \times M = 1024$ 个样本数据才能收敛到最优性能的- 3dB 内) 快了十多倍。因此从算法收敛速率的角度看, 采用低阶的处理器也是有利的。无论高阶还是低阶的处理器最终都收敛到了最优解, 这也从一个方面说明了杂波过程只需用一个低阶的 AR 过程就可以拟合得很好。

4.2 线性预测处理器的干扰抑制能力

为了测试线性预测处理器在整个噪声的自由度加大时的性能, 在杂波信号中又叠加了一个模拟的窄带干扰源, 其参数为: 干扰源方位是相对于飞行方向锥角 135° , 带宽 B_i 为 4kHz, 干扰/噪声功率比 INR 为 40dB。

图 3(a) 是在存在干扰源的情况下线性预测处理器的 GSNR 性能。它表明 $p=1$ 阶的线性预测处理器在有干扰源存在时仍能收敛到最优性能, 这说明即使是低阶的线性预测处理器仍有足够的自由度来应付噪声总自由度的增大。噪声总自由度的增大不只发生在存在干扰信号时, 而且也发生在地面不均匀及有杂波起伏, 以及存在阵元幅、相误差的情况下。线性预测处理器所具有的冗余自由度使得它在这些情况下仍有能力达到准最优处理器的性能^[3]。

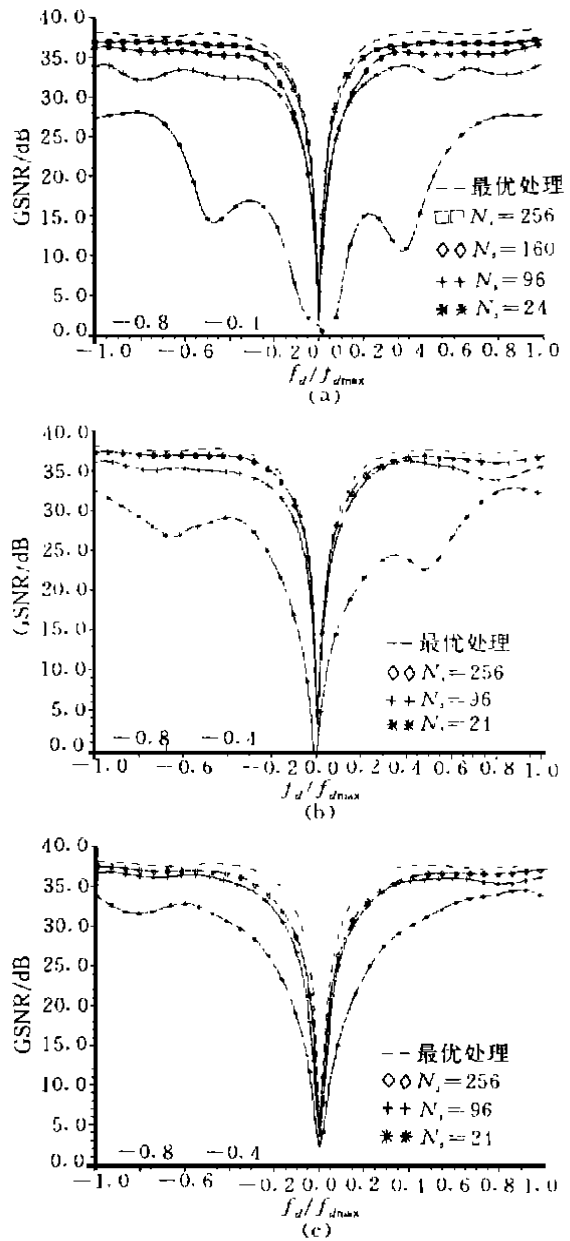


图 2 线性预测处理器的性能
(虚线为最优时空二维处理器性能)
(a) $p=7$; (b) $p=3$; (c) $p=1$

地看到它在干扰方向上形成的方向图凹陷。

5 结 论

从一个多通道 AR 过程去拟合杂波信号的概念出发,提出了线性预测处理器结构并用它来抑制杂波和干扰,得到了很好的结果。由于杂波过程可以用一个低阶的 AR 过程拟合得很好,采用线性预测处理器结构可以用较低的代价得到接近最优时空二维处理的性能。模拟实验表明,在理想情况下,1 阶的线性预测处理器就已经达到了非常接近最优时空二维处理的性能。随着各种线性预测算法结构和实现手段的发展和成熟,线性预测处理器在机载相控阵雷达的信号处理中具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar. IEEE Trans, 1973; AES- 9 (2): 273- 252
- 2 Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays. IEEE Trans, 1974; AES-10 (6): 853- 863
- 3 苏杰. 机载相控阵雷达时空二维自适应信号处理. 硕士学位论文北京航空航天大学, 1992
- 4 Klemm R. Adaptive airborne MTI: an auxiliary channel approach. IEE Proc, Pt. F, June 1987; 134 (3):
- 5 Su J, Zhou Y. Adaptive clutter suppression for airborne phased array radar using clutter subspace approximation. Int Conf Radar- 92, Brighton, U. K., Oct. 1992
- 6 苏杰, 周荫清. 用杂波子空间近似法实现机载相控阵雷达的自适应杂波抑制. 北京航空航天大学学报, 1993
- 7 潘士光. 谱估计和自适应滤波. 北京: 航空航天大学出版社, 1991
- 8 Levinson N. The wiener RMS (root mean square) error criterion in filter design and prediction. J Math Phys, 1947; 24: 261- 278
- 9 Akaike H. Block toeplitz matrix inversion, SIAM J Appl Math, 1973; 24: 334- 341
- 10 Friedlander B. Lattice filters for adaptive processing. Proc IEEE, 1982; 70: 829- 867

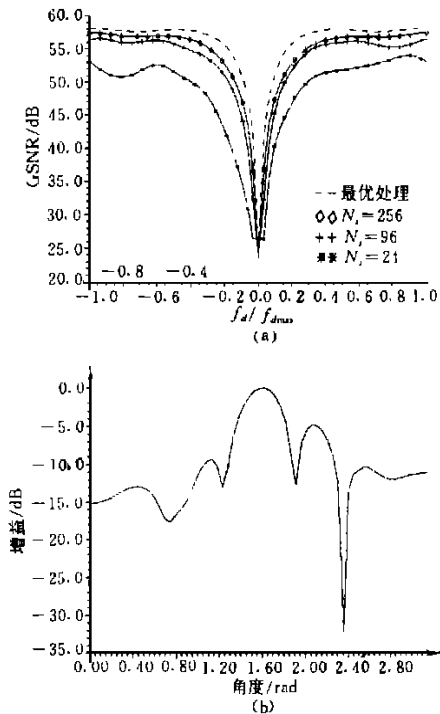


图3 p = 1阶线性预测处理器的干扰抑制能力
(a) 存在干扰信号时处理器性能;
(b) 用256个样本形成的自适应方向图