

多波束时域滑窗空时自适应方法及其性能分析*

陈建文 皇甫堪 周良柱

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

王永良

(空军雷达学院重点实验室 武汉 410010)

摘要 鉴于新一代机载预警相控阵雷达采用多波束且电子波束灵活可控的特点, 本文提出了一种多波束时域滑窗空时自适应处理方法。理论分析与计算机仿真实验表明, 该方法与现有的几种典型空时二维自适应信号处理 (STAP) 方法相比, 具有系统自由度低、低速目标检测性能好、鲁棒性强等优点, 并且实现复杂度较低, 便于工程实现。

关键词 机载预警相控阵雷达, 空时自适应信号处理, 波束域降维, 杂波抑制

分类号 TN911.7

Multiple-beam STAP Approach with Time-delay Taps and Performance Analysis

Chen Jianwen Huang Fukan Zhou Liangzhu

(Department of Electronic Technology, NU DT, Changsha, 410073)

Wang Yongliang

(Key Research Lab, Air Force Radar Academy, Wuhan, 430010)

Abstract The new generation airborne early warning phased array radars will widely adopt flexible multiple-beam so that they will perform multiple functions. This paper presents a new practical STAP approach, which uses multiple-beam architecture and multiple time-delay taps. Moreover, the performance of this approach has been analyzed in detail by comparing with that of recent typical space-time adaptive processing (STAP) approaches. Theoretical analysis and computer simulation show that this method has the low degrees of system, good performance of detecting slow target, strong robustness to error.

Key words airborne early warning phased array radar, space-time adaptive processing (STAP), rank reduction within beam domain, clutter suppression

空时二维自适应信号处理(STAP)是机载预警相控阵雷达研制的关键技术,已成为当前国际雷达界前沿性的热点研究方向,其核心问题是有效地抑制杂波和干扰,已提出了多种STAP处理方法^[1-5]。为了改善机载雷达主杂波区的性能,Brennan提出了时域滑窗滤波后时空二维联合处理的方法(简记为FSA法)^[3],文献[4]对这一方法进行了深入的研究与分析,并指出了取三路滑窗为较好的折衷结果(简记为3B法)。文献[5]也给出了三脉冲前多普勒STAP结构和三脉冲后多普勒STAP结构,但实际实现较复杂。3B法采用了先时后空的处理方式,先通过时域对杂波作滤波处理,致使相对于一个多普勒通道输出的杂波自由度大为减小,同时,利用时域方面较少的自由度与空域作联合处理来有效地抑制杂波,其主杂波区性能有明显改善。但是,3B法需使用 $3N$ 的系统自由度(N 为空域采样数),相应的杂波协方差矩阵为 $3N \times 3N$ 阶,其矩阵求逆的运算量约为 $O[(3N)^3] = 27N^3$ 乘法次数,为Capon法运算量的27倍。同时,需要估算杂波协方差矩阵的独立同分布(IID)参考单元至少为 $2(3N) = 6N$,数据采样跨越长度仍很大,在严重的非均匀杂波环境,将导致性能下降。考虑到实际相控阵雷达形成多波束工作

* 国家自然科学基金及空军中青年科技拔尖人才基金资助项目

1998年12月10日收稿

第一作者: 陈建文,男,1964年生,博士生

的特点,为了降低实现复杂度及获得较高的数据率,本文提出了一种使用空域多波束级联时域三路滑窗的方法(简记为MBMC法),该方法在保证系统优良性能的前提下,较大地减小了运算量,降低了实现复杂度,具有系统自由度低、低速目标检测性能好、鲁棒性强等特点。

1 空域多波束时域三路滑窗 STAP 原理

空域降维有阵元降维和波束域降维两条途径。相控阵雷达的电子波束灵活可控,波束空间处理器可应用部分自适应阵,其性能比阵元空间处理器优越,因此,波束域降维大有可为。空域多波束时域三路滑窗 STAP 处理器结构如图 1 所示,其原理为:首先使用 Butler 波束形成器形成多个波束,其次,选择主波束及其相邻的多个空域波束,所选的多个空域波束连同两次滑窗之后的输出再级联多普勒滤波器。最后,根据线性约束最小输出功率准则对同频多普勒通道输出进行空时联合自适应处理。

设 $x_n(k)$ 表示第 n 个子阵在 k 时刻的回波信号,这里 $n = 1, 2, \dots, N, K = 1, 2, \dots, K, N$ 为空域采样数, K 为时域采样数。定义: $X_{th} = [x_n(1), x_n(2), \dots, x_n(K)]^T$, 那么,二维数据矢量 $V(NK \times 1$ 维) 可以表示为 $V = [X_{t1}^T, X_{t2}^T, \dots, X_{tN}^T]^T$, 于是杂波协方差矩阵 $R_x = E[VV^H]$ 。上述 MBMC 法的整个处理过程可概括为采用一变换矩阵 T_L 实施变换, T_L 可以表示为:

$$T_L = \begin{bmatrix} [S_s(\omega_1) \leftarrow F_1(\omega_j)]^T \\ \dots \\ [S_s(\omega_L) \leftarrow F_1(\omega_j)]^T \\ [S_s(\omega_1) \leftarrow F_2(\omega_j)]^T \\ \dots \\ [S_s(\omega_L) \leftarrow F_2(\omega_j)]^T \\ [S_s(\omega_1) \leftarrow F_3(\omega_j)]^T \\ \dots \\ [S_s(\omega_L) \leftarrow F_3(\omega_j)]^T \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中, $\omega_i (i = 1, 2, \dots, L)$ 表示第 i 个空域波束的归一化角频率, $\omega_j (j = 1, 2, \dots, K - 2)$ 表示第 j 个多普勒通道的时域归一化角频率, \leftarrow 是 Kronecker 积。 $S_s(\omega_i)$ 是空域导向矢量, $F_1(\omega_j)$ 、 $F_2(\omega_j)$ 、 $F_3(\omega_j)$ 分别为第 j 个多普勒通道未滑窗、一次滑窗、二次滑窗的时域导向矢量,分别为:

$$S_s(\omega_i) = [w_1, w_2 e^{j\omega_i}, \dots, w_N e^{j(N-1)\omega_i}]^T \quad (2)$$

$$F_1(\omega_j) = [h_1, h_2 e^{j\omega_j}, \dots, h_K e^{j(K-1)\omega_j}]^T, F_2(\omega_j) = g_1 F_1(\omega_j), F_3(\omega_j) = g_2 F_1(\omega_j) \quad (3)$$

式中, $g_1 = W_{i,j,2}^H F_1(\omega_j) / W_{i,j,1}^H F_1(\omega_j) e^{j\omega_j}$, $g_2 = W_{i,j,3}^H F_1(\omega_j) / W_{i,j,1}^H F_1(\omega_j) e^{j2\omega_j}$, $\{W_n, n = 1, 2, \dots, N\}$ 及 $\{h_k, k = 1, 2, \dots, K\}$ 分别为空域和时域静态加权系数。处理器第 j 个多普勒通道的最优自适应权为

$$W(j) = (T_L^H R_x T_L)^{-1} T_L^H R_x S(\omega_i) \quad (4)$$

其中, R_x 按其估计值 $\hat{R} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_i V_i^H$ 计算, $V_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 为在检测系统的邻近单元测得的 M 个二维数据矢量样本。 $S(\omega_i)$ 为对应第 j 个多普勒通道的空时二维导向矢量。当检测第 j 个多普勒通道时,这一通道的输出和它的一次、二次滑窗的同频多普勒通道的输出一起进行联合自适应处理。可计算得到图 1 处理器的改善因子为

$$I(\Psi_0, f_{dj}) = \frac{W^H(j) T_L^H R_x S(\omega_i)^2 (CHR + 1)}{W^H(j) (T_L^H R_x T_L) W(j)} \quad (5)$$

2 计算机模拟实验与性能分析

模拟实验系统的参数说明如下:阵列为正侧面阵,天线阵列为矩形平面阵,尺寸为 32 行 \times 32 列,单元间距 $d = 0.115\text{m}$,相干脉冲数 $K = 34$,载机速度 $V_p = 140\text{m/s}$,载机高度 $H_p = 8\text{Km}$,脉冲重复频率 f_r

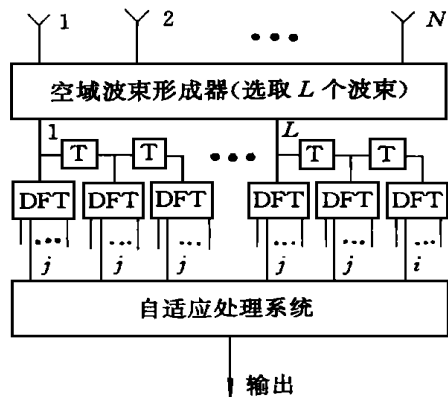


图 1 MBMC 法原理图
Fig. 1 Multiple beams multiple channels (MBMC) architecture

$= 304\text{Hz}$, 工作波长 $\lambda = 0.23\text{m}$, 单元杂噪比 $(CNR) = 60\text{dB}$, 波束指向阵面法向, 杂波带斜率 $\alpha = \frac{f_r \lambda}{4V_p} = 0.125$ 。

系统采用低重复频率时, 主要为主杂波, 速度模糊对杂波谱的影响很大, 致使杂波散布开, 使空时二维杂波去相关。为分析 MBMC 法的杂波抑制机理, 图 2 给出了 $L = 11$ 时 MBMC 法在第 24 号多普勒滤波器的空时二维频响立体图, 图 3 为其等高线图。为便于观察二维频响凹口, 选取脉冲重复频率 $f_r = 608\text{Hz}$, 其余参数同上, 则杂波带斜率 $\alpha = \frac{f_r \lambda}{4V_p} = 0.3$ 。由图可见, 二维频响沿杂波斜带形成了斜凹口, 凹口深且窄, 说明 MBMC 法对杂波的抑制性能较好。因为 MBMC 法处理器的时域自由度为 3, 具有较强的时域调整能力, 能形成空时二维频响凹口, 从而可有效地抑制杂波。如果使用 4 个或更多的时域自由度, 这种处理器可进一步改善杂波抑制性能, 但改善效果已不太明显, 同时又增加了运算负担和实现复杂度, 但时域 3 个自由度是需要的。

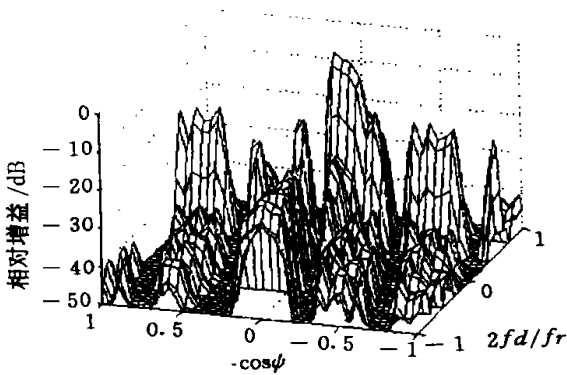


图 2 空时二维频响立体图

Fig. 2 Space-time two-dimensional frequency response

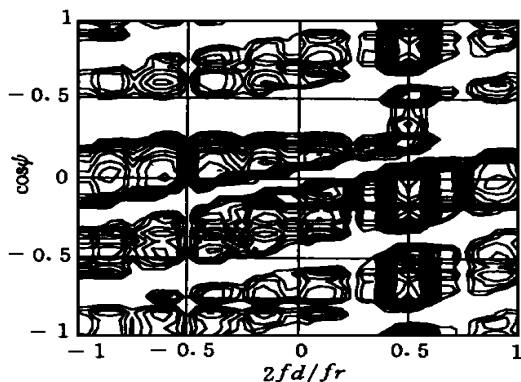


图 3 空时二维频响等高线图

Fig. 3 Contour of space-time frequency response

处理器的性能常用改善因子来衡量, 改善因子 (IF) 定义为输出信杂噪比除以输入信杂噪比。图 4 (a) 给出了 MBMC 法分别取 3、5、7、9、11 个波束时的性能。由图可见, 随着空域波束的增加性能不断提高。不过所选波束数 $L > 11$ 时, 性能比 $L = 11$ 时改进不大, 而且将增加计算量与设备量。空域取十一

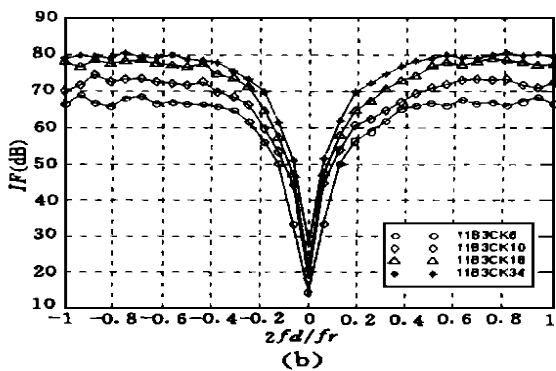
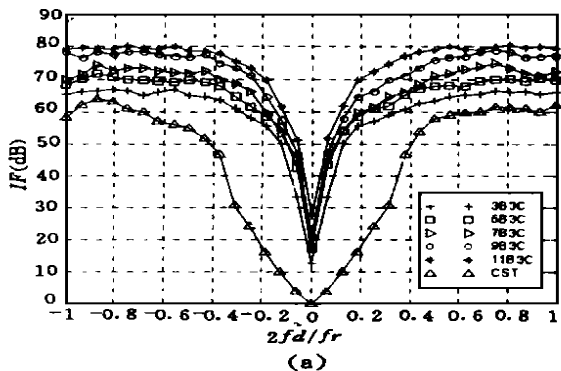


图 4 MBMC 法的性能 (err = 5%)

Fig. 4 Performance of the MBMC approach with 5% array error

个波束时, 性能已接近准最优, 而矩阵求逆的计算量仅为 $O[(3L)^3] = 27L^3$ 次乘法次数, 这里 $L = 11$, 计算量比 3B 法 ($O[(3N)^3]$) 减小约 24 倍, 这里 $N = 32$ 。采样要求为 $2(3L)$, 比 3B 法降低约 3 倍。所以, $L = 11$ 时, MBMC 法具有准最优性能和可接受的运算量, 是一个较好的选择。MBMC 法比常规方法有很大的性能改善。从工程实现角度考虑, 应选择 5 个波束, 甚至 3 个波束; 从准最优性能方面考

虑,则应选择 11 个波束。图 4(b) 给出了 MBMC 法取 11 个波束,时域采样数 K 分别取 6、10、18、34 时的性能。随着时域采样数的增加性能不断提高,按照信号积累,它们应依次递增 3dB,但时域采样数 K 较小时,性能损失较大。因此,MBMC 法的时域采样数 K 应大于或等于 18,才能在保证准最优性能的前提下,获得较好的降维效果。

图 5 给出了 $L = 11$ 时的 MBMC 法与 3B 法、Capon 法、SSMC 法及常规 CST 法 5% 阵元误差时的性能比较。由图可见,MBMC 法的性能比 3B 法略差,因为 3B 法有 $3N$ 个系统自由度,MBMC 法仅有 $3L$ 个系统自由度 ($L < N$),但 MBMC 法的计算量比 3B 法大大减小,降低了实现复杂度和数据率要求。MBMC 法的性能比 Capon 法好,特别是在主杂波区性能明显优于 Capon 法。SSMC 法采用了子阵级自适应滤波技术,其性能明显低于 MBMC 法,而且在旁瓣杂波区性能比 Capon 法差,在主杂波区性能略优于 Capon 法,但矩阵求逆的计算量为 $O[(3P)^3] = 27P^3$ 次乘法次数,这里 $P = 16$,是 MBMC 法计算量的 3 倍,采样要求也比 MBMC 法高。因此,波束域降维优于阵元域降维。上述几种方法的性能均优于常规 CST 法。另外,当阵元误差较大时,MBMC 法性能损失并不大,说明对误差不敏感,具有较强的鲁棒性。因此,考虑到实际工程应用,MBMC 法是较好的选择。

3 结束语

本文分析了现有的几种典型空时二维自适应处理(STAP)方法的性能,提出了一种多波束时域滑窗 STAP 方法,并结合正侧面阵从杂波抑制机理和自适应方法研究角度进行了深入的分析,同时与采用阵元域降维途径的 SSMC 法及 3B 法、Capon 法、常规 CST 法进行了性能比较。从工程实现角度考虑,应选取 5 个波束,甚至 3 个波束;从准最优性能方面考虑,应选取 11 个波束。另外,MBMC 法的时域采样数 k 应大于或等于 18,才能在保证准最优性能的前提下,获得较好的降维效果。理论分析与计算机仿真实验表明,这一方法具有较低的系统自由度、较好的低速目标检测性能、较强的鲁棒性,并且实现复杂度较低,便于工程实现。

参考文献

- 1 Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar. IEEE Trans. on AES March, 1973, 9(2): 237 ~ 252
- 2 保铮, 廖桂生, 吴仁彪等. 相控阵机载雷达杂波抑制的时空二维自适应滤波. 电子学报, 1993, 21(9): 1 ~ 7
- 3 Brennan L E, Pivinski D J and Standaher F M. Comparison of space-time adaptive processing approaches using experimental airborne radar data. The Record of 1993 IEEE National Radar Conference, Massachusetts, U. S. A., Apr. 1993: 176 ~ 181
- 4 王永良. 改善机载预警非正侧面阵雷达主杂波区性能的研究. 电子学报, 1998, 26(3): 90 ~ 95
- 5 Cooper R M, Martin L. Space time adaptive processing for a carrier based airborne early warning radar system. 1997 IEEE National Radar Conference. New York, U. S. A., May, 1997: 66 ~ 71

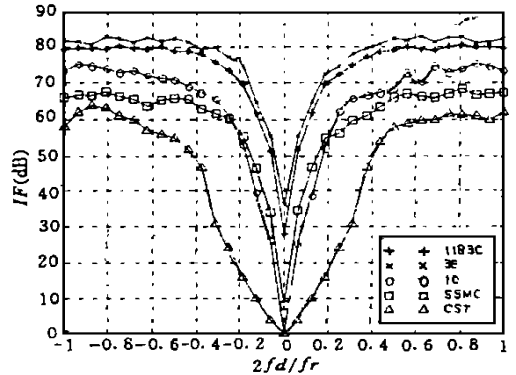


图 5 几种 STAP 方法性能比较 (err=5%)

Fig. 5 Performance comparison of MBMC and several typical processing approaches with 5% array error