

# 机载相控阵雷达波束-多普勒域部分自适应处理方法研究

陈建文<sup>1</sup>,王永良<sup>2</sup>,陈 辉<sup>2</sup>

(1. 南京电子技术研究所,江苏南京 210013;2. 空军雷达学院雷达兵器运用工程重点实验室,湖北武汉 430010)

**摘 要:** 本文研究了机载相控阵雷达波束-多普勒域部分自适应处理系统的几种降维处理方法,主要包括辅助通道法(ACR)、局域联合处理方法(JDL)和空时相邻多波束法(STMB),并从改善因子性能、自适应权、空时二维频响方面,讨论了几种可能有效的波束位置选择方案的合理性.理论分析与计算机仿真表明,空时相邻多波束法具有较低的系统自由度、优良的性能和很强的误差鲁棒性,是机载雷达非均匀杂波环境下一种可取的波束选取方案.

**关键词:** 机载相控阵雷达;杂波抑制;空时自适应处理

**中图分类号:** TN957.51; TN959.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)12A-1932-04

## Research on Partially Space-Time Adaptive Processing Approaches in Beam-Doppler Domain for Airborne Phased Array Radar

CHEN Jian-wen<sup>1</sup>,WANG Yong-liang<sup>2</sup>,CHEN Hui<sup>2</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China;

2. Key Research Lab, Wuhan Radar Academy, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** This paper studies several reduced rank partially space-time adaptive processing (STAP) approaches in beam-Doppler domain for airborne phased array radar, which includes the Auxiliary Channel Receiver (ACR), the Joint Domain Localized (JDL) approach and the Space-Time Multiple-Beam (STMB) approach. A comparative analysis is performed. Several selections of beam number and position are also investigated in detail based on improvement factor, adaptive weights and space-time two-dimensional response characteristics. Theoretical analysis and computer simulation further illustrate that the STMB approach has very low system degrees of freedom (DOFs) and good performance. It is robust to array element error and nonhomogeneous clutter, and therefore feasible and available for airborne phased array radar applications in nonhomogeneous clutter environments.

**Key words:** airborne phased array radar; clutter rejection; space time adaptive processing

### 1 引言

空时自适应信号处理(STAP)是新一代高性能机载雷达的关键技术之一,已成为当前国内外雷达界的热点研究方向.对于STAP而言,空间可以构成阵元域与波束域,时间可以构成脉冲域与多普勒域,因此可以组合成阵元-脉冲域、阵元-多普勒域、波束-脉冲域和波束-多普勒域,相应的信号处理系统也可以分为四种类型,即阵元-脉冲域处理系统、阵元-多普勒域处理系统、波束-脉冲域处理系统和波束-多普勒域处理系统.鉴于新一代机载雷达广泛采用相控阵天线和脉冲多普勒体制,具有多波束且电子波束灵活可控的特点,而波束位置与波束数目的合理选择是波束-多普勒域处理方法的关键所在,为了寻求最佳的波束选取方案,本文分析、比较了波束-多普勒域处理系统的几种降维处理方法,讨论波束位置及波束数目选择方式的合理性.

### 2 波束-多普勒域部分自适应处理方法

#### 2.1 降维处理方法的统一框架<sup>[1]</sup>

设  $x_{n,k}(l)$  为对应第  $l$  个距离单元的第  $n$  个阵元第  $k$  时刻的二维接收数据,  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , 这里  $N$  为空域采样数,  $K$  为时域采样数. 第  $l$  个距离单元的一次空时二维快拍数据矢量可表示为

$$X_l = [x_{1,1}(l), x_{2,1}(l), \dots, x_{N,1}(l), x_{1,2}(l), x_{2,2}(l), \dots, x_{N,2}(l), \dots, x_{1,k}(l), x_{2,k}(l), \dots, x_{N,k}(l)]^T \quad (1)$$

图 1 为 STAP 的统一模型结构图,其中  $Q_{s,p}(N \times N_1)$  为第  $p$  个波束的空域变换矩阵,  $N_1 < N$ ,  $Q_{t,p}(K \times K_1)$  为其时域变换矩阵,  $K_1 < K$ ,  $\odot$  表示 Kronecker 积. 变换后的第  $p$  个波束二次空时二维快拍数据矢量为  $\tilde{X}_l(p) = (Q_{s,p} \odot Q_{t,p})^H X_l$ ,  $p = 1, 2, \dots, P$ , 令空域导向矢

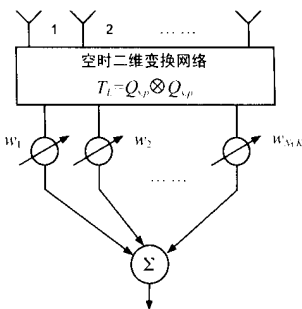


图 1 空时二维自适应信号处理的统一模型

量为  $S_s(w_{si}) = [w_1, w_2 e^{jw_{si}}, \dots, w_N e^{j(N-1)w_{si}}]^T$ , 时域导向矢量为  $S_t(w_{tj}) = [h_1, h_2 e^{jw_{tj}}, \dots, h_K e^{j(N-1)w_{tj}}]^T$ . 这里,  $w_1, w_2, \dots, w_N$  和  $h_1, h_2, \dots, h_N$  为空域与时域静态权系数,  $w_{si} (i = 1, 2, \dots, N)$ ,  $w_{tj} (j = 1, 2, \dots, K)$ , 分别表示目标的空域和时域角频率.

根据线性约束最小方差准则, 可得统一框架下的空时二维自适应权  $W_{st} (N_1 K_1 \times 1$  维) 的计算为如下统一的优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & W_{st}^H \tilde{R}_l(p) W_{st} \\ \text{s. t.} \quad & W_{st}^H \{ [Q_s^T S_s(w_{si})] \odot [Q_t^T S_t(w_{tj})] \} = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\tilde{R}_l(p) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L+L/2} \tilde{X}_i \tilde{X}_i^H$ . 可以求得空时二维自适应权矢量为

$$W_{st} = \mu \tilde{R}_l^{-1} \{ [Q_s^T S_s(w_{si})] \odot [Q_t^T S_t(w_{tj})] \} \quad (3)$$

式中  $\mu$  为常数. 相应的空时二维自适应处理器的输出为  $\tilde{Y}_l = [\tilde{y}_l(1), \tilde{y}_l(2), \dots, \tilde{y}_l(P)]^T$ , 其中,  $\tilde{y}_l(p) = W_{st} \cdot \tilde{X}_l(p)$ ,  $p = 1, 2, \dots, P$ .

### 2.2 波束-多普勒空间部分自适应处理方法

波束-多普勒域处理选取空域辅助波束有两种典型方式, 一是在主波束邻近选取辅助波束, 二是在主通道杂波区. 时域处理除使用 MTI 加多普勒滤波外, 还可通过时域的多个多普勒通道联合处理来抑制杂波, 多个多普勒通道的选取也有两种典型方式, 一是在主多普勒通道邻近处选取, 二是在主杂波区附近选取. 因此, 波束-多普勒域的波束选取方式可有多种形式. 图 2 给出了三种典型的波束选取方式, 其中 (a) 为 Klemm R. 提出的辅助通道法 (ACR)<sup>[2]</sup>; (b) 为 Wang H. 和 Cai L. 提出的局域联合处理方法 (JDL)<sup>[3]</sup>; (c) 为王永良提出的空时相邻多波束法 (STMB)<sup>[4]</sup>. 在此, 我们主要研究波束域方法波束选取的合理性.

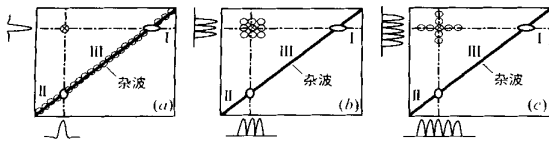


图 2 典型波束域处理结构原理示意图.

—辅助通道; ×—目标

不同的波束选取方式可用不同的变换矩阵  $T_L$  来表示. 辅助通道法 (ACR) 的处理过程可概括为采用变换矩阵  $T_L$  实施变换,  $T_L$  可以表示为

$$T_L = \begin{bmatrix} [S_s(w_{si}) \odot S_t(w_{tj})]^T \\ [S_s(w_{si+n}) \odot S_t(w_{tj+k})]^T \\ [S_s(w_{si+2n}) \odot S_t(w_{tj+2k})]^T \\ \dots \\ [S_s(w_{si+(N+K-2)n}) \odot S_t(w_{tj+(N+K-2)k})]^T \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

其中,  $n = k = \frac{2}{N+K-1}$ ,  $N$  为空域采样数,  $K$  为时域采样数.

局域联合处理 (JDL) 方法的变换矩阵  $T_L$  可以表示为

$$T_L = \begin{bmatrix} [S_s(w_{si}) \odot S_t(w_{tj})]^T \\ [S_s(w_{si}) \odot S_t(w_{tj+k})]^T \\ \dots \\ [S_s(w_{si}) \odot S_t(w_{tj+(q-1)k})]^T \\ \dots \\ [S_s(w_{si+(p-1)n}) \odot S_t(w_{tj})]^T \\ [S_s(w_{si+(p-1)n}) \odot S_t(w_{tj+k})]^T \\ \dots \\ [S_s(w_{si+(p-1)n}) \odot S_t(w_{tj+(q-1)k})]^T \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

其中,  $S_s(w_{si}) (i = 1, 2, \dots, p)$  表示对应于第  $i$  个空域波束的空域导向矢量,  $p$  为相邻多个空域波束的数目,  $S_t(w_{tj}) (j = 1, 2, \dots, q)$  表示对应于第  $j$  个时域“波束”的时域导向矢量,  $q$  为相邻多个时域波束的数目.  $n = \frac{2}{N}$ ,  $k = \frac{2}{K}$ ,  $p \times q$  为所选局域的大小. 空时相邻多波束法 (STMB) 的变换矩阵为

$$T_L = \begin{bmatrix} [S_s(w_{si}) \odot S_t(w_{tj})]^T \\ [S_s(w_{si}) \odot S_t(w_{tj+n})]^T \\ \dots \\ [S_s(w_{si}) \odot S_t(w_{tj+qn})]^T \\ [S_s(w_{si}) \odot S_t(w_{tj})]^T \\ \dots \\ [S_s(w_{sp}) \odot S_t(w_{tj})]^T \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

其中,  $p+q$  为所选空时相邻辅助波束数.

无误差时, 以上三种方法均可以达到准最优性能, 其中 ACR 法是三者中最好的, 而 JDL 法在主杂波区也比 STMB 法的性能好. 但当阵元误差较大时, JDL 法与 STMB 法均要求沿空域方向 (纵向) 增加波束数, 而且对误差的鲁棒性各不相同, STMB 法在旁瓣杂波区与主杂波区均优于其它两种方法, ACR 法的误差鲁棒性是三者中最差的. JDL 法与 STMB 法同时组合空域与时域的多个相邻波束来共同对消二维杂波, 实际上是利用相邻多波束对消有源干扰的推广, 即利用旁瓣拟合旁瓣以对消有源干扰. 经研究 JDL 法  $9 \times 5$  局域时某多普勒通道归一化自适应权幅度大小分布时, 我们发现局域内在对准主杂波 (区) 和多普勒通带杂波 (区) 的“ $\Gamma$ ”字形位置处的自适应权幅度较大, 而其它位置的自适应权幅度均较小, 相比之下, JDL 法采用局域多波束实现二维杂波对消, 其系统自由度较高, STMB 法采用对准区杂波和区杂波的“ $\Gamma$ ”字形波束, 针对性较强, 因而其误差鲁棒性优于 JDL 法, 而且数据采样率与运算量也明显小于 JDL 法, 因此更适合于非均匀的杂波环境.

研究表明, 辅助波束的位置及波束数的选择与杂波自由度有关, 经时域超低旁瓣多普勒滤波和空域波束预加权处理后, 在理想情况下, (多普勒检测通道) 通道 1 中的杂波大特征值个数为 5, 空域波束通道 (通道 2) 中的杂波大特征值个数为 4, 但有阵元误差时, 通道 1 中的杂波大特征值个数随着阵元误差的增加而增多, 通道 2 中的杂波大特征值个数不随阵元误差的增加而变化. 这是因为阵元误差引起的杂波随机分量主要沿空域方向扩散, 通带 1 对应多普勒滤波的主通道, 存

在阵元误差时,沿空域方向会出现杂波的随机分量,杂波自由度会增大. 通带 2 对应空域接收波束通道,大部分处于多普勒滤波器的低旁瓣区域,杂波自由度受阵元误差的影响很小. 通带 1 和通带 2 的可控系统自由度分别为  $(N - 1)$  和  $(K - 1)$ ,上述结论为降维处理系统的设计提供了理论依据.

为进一步研究波束-多普勒域处理方法的波束位置选择的合理性,图 3 给出了波束-多普勒空间部分自适应处理结构的几种波束位置选择方案,简称为  $(a) \sim (f)$  方式. 方式  $(a)$ 、 $(b)$ 、 $(c)$  的时域相邻“波束”与空域相邻波束在位置上是分离的,方式  $(a)$  的时域相邻多“波束”对准 区杂波,这是采用相邻多普勒通道对消杂波的波束域实现形式,实质上是用主瓣拟合旁瓣对消有源干扰结构的推广,因时域误差小,取几个“波束”即可,其空域相邻多波束位置与 STMB 方法相同,而空域误差影响较大,因此其误差鲁棒性与  $(b)$  相似,而且方式  $(a)$  主杂波区性能与 STMB 法相近,但在旁瓣杂波区的性能较差. 方式  $(b)$  的空域相邻多波束位置移至 区,时域相邻多“波束”位置与 STMB 法相同,即时域采用相邻多“波束”旁瓣拟合原理对消 区杂波,而空域采用相邻多波束主瓣拟合原理对消 区杂波. 方式  $(c)$  的时域相邻多波束位置移至 区,空域相邻多“波束”位置移至 区,均采用相邻多波束主瓣拟合原理对消杂波. 方式  $(b)$  和方式  $(c)$  的杂波抑制性能在旁瓣杂波区优于方式  $(a)$ ,因其空域相邻波束与时域相邻波束是脱节的,其主瓣杂波区的杂波抑制性能均相同. 方式  $(d)$  实际上是  $q=2$  的 JDL 法. 方式  $(e)$  和  $(f)$  的两列波束在位置上分离,不利于杂波对消,而且 区的波束沿空域方向排列,不能有效对消主杂波.

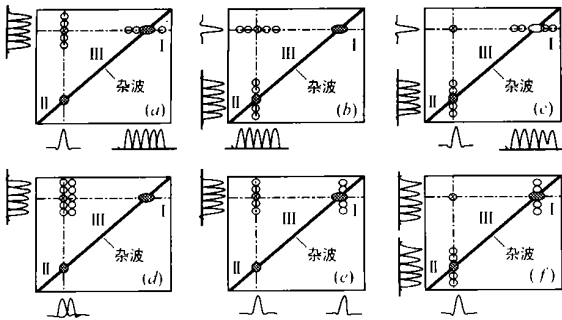


图 3 波束-多普勒处理结构的几种波束位置选择方案

实际上,  $(a)$ 、 $(b)$ 、 $(c)$ 、 $(e)$ 、 $(f)$  方式的空域相邻波束与时域相邻“波束”在位置上是分离的,相当于级联处理,而 STMB 法属于局域联合处理,且比 JDL 法的波束选取更有针对

性,所以,STMB 法的杂波抑制性能优于  $(a)$ 、 $(b)$ 、 $(c)$ 、 $(e)$ 、 $(f)$  方式,误差鲁棒性优于 JDL 方法,而且系统自由度较低,适合于非均匀的杂波环境. 由以上分析可知:方式  $(c)$  和  $(d)$  是可供选择并能与 STMB 法相比较的方案,其余方案  $(a)$ 、 $(b)$ 、 $(e)$ 、 $(f)$  则显然差于  $(c)$ 、 $(d)$  与 STMB 法. 限于篇幅,下文主要比较方式  $(c)$ 、 $(d)$  与 STMB 法.

不同的波束选取方式在数学上表现为变换矩阵的不同,方式  $(c)$  的变换矩阵  $T_L$  为

$$T_L = \begin{bmatrix} [S_s(s_{it}) \otimes S_t(t_{js} - k)]^T \\ [S_s(s_{it}) \otimes S_t(t_{js} + k)]^T \\ \dots \\ [S_s(s_{it}) \otimes S_t(t_{js} - k \times \frac{q}{2})]^T \\ [S_s(s_{it}) \otimes S_t(t_{js} + k \times \frac{q}{2})]^T \\ [S_s(s_{it} - n) \otimes S_t(t_{ij})]^T \\ [S_s(s_{it} + n) \otimes S_t(t_{ij})]^T \\ \dots \\ [S_s(s_{it} - n \times \frac{p}{2}) \otimes S_t(t_{ij})]^T \\ [S_s(s_{it} + n \times \frac{p}{2}) \otimes S_t(t_{ij})]^T \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

其中,  $t_{js}$  为对应主杂波的归一化多普勒角频率,  $t_{js} = \frac{2V_r}{d \cdot f_r}$ .  $s_{it}$ ,  $d$  为阵元间距,  $V_r$  为载机速度,  $f_r$  为多普勒频率.  $s_{it}$  为对应主通道杂波的归一化空域角频率,  $s_{it} = \frac{4V_r}{f_r} \cdot t_{ij}$ ,  $t_{ij}$  为雷达工作波长. 方式  $(d)$  的变换矩阵与 JDL 方法相同,如式 (5) 所示,其中  $q=2$ .

### 3 计算机模拟

本节对前面讨论的方式  $(c)$ 、 $(d)$  与 STMB 法三种波束域局域处理方法的改善因子性能进行计算机模拟实验,模拟实验系统的参数为:正侧面阵  $M = 16$ ,  $N = 16$ ,  $K = 32$ ,  $PRF = 2434.8\text{Hz}$ ,  $H = 8\text{km}$ ,  $V_r = 140\text{m/s}$ ,  $\sigma = 0.23\text{m}$ ,  $d = 0.115\text{m}$ ,  $CNR_i = 60\text{dB}$ . 阵元副相误差为 5%. 杂波谱沿斜对角分布.

图 4 给出了 5% 阵元误差时上述三种方法的改善因子性能. 可看出,当阵元误差较大时,STMB 法在主杂波区和旁瓣杂波区均优于方式  $(d)$ ,具有很强的误差鲁棒性,方式  $(c)$  受阵元误差的影响较大. 而无误差时,在相同系统自由度下,方式  $(d)$  的性能最佳,STMB 法次之,其次是方式  $(c)$ ,但它们在主杂波区附近的性能均近似相同.

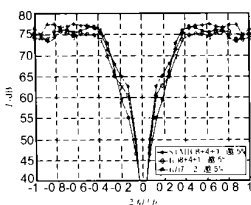


图 4 5% 阵元误差时的改善因子性能

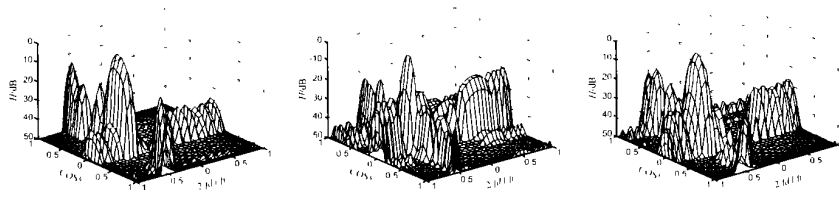


图 5 5% 阵元误差时几种波束域方法某多普勒通道的空时二维自适应频响图

图 5 给出了 STMB 法和方式 (c)、(d) 在 5% 阵元误差时某多普勒通道的空时二维频响。由图可见, 当阵元误差较大时, STMB 法仍能在主波束通道和多普勒检测通道对应的条带杂波处形成较深的频响凹口, 杂波抑制性能与无误差时的情况相比下降不大, 说明 STMB 法的误差鲁棒性较强。当阵元误差较大时, 方式 (d) 的时域、空域自适应凹口大小、深度均变差了, 杂波抑制性能与无误差时的情况相比下降很大, 其误差敏感程度比 STMB 法大。方式 (c) 当阵元误差较大时, 杂波剩余明显增大, 杂波抑制性能下降。无误差时, 方式 (d) 与 STMB 法相似, 方式 (c) 的杂波剩余较大。

#### 4 结论

本文在空时自适应处理 (STAP) 降维处理方法的统一框架下, 详细分析、比较了波束-多普勒域部分自适应处理系统的几种降维处理方法, 主要包括辅助通道法 (ACR)、局域联合处理方法 (JDL) 和空时相邻多波束法 (STMB), 给出了它们在统一框架下的变换矩阵表达式, 并以改善因子性能、自适应权系数和空时二维频响为考察指标, 讨论了几种可能的波束位置选择方案的合理性。理论分析和计算机仿真结果表明, 空时相邻多波束法 (STMB) 具有较低的系统自由度、优良的性能和很强的误差鲁棒性, 适于机载雷达非均匀的杂波环境, 是一种可取的波束选取方案。

#### 参考文献:

[1] 陈建文. 机载雷达空时自适应处理方法研究 [D]. 博士学位论

文. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2000.

- [2] Klemm R. Adaptive airborne MTI: an auxiliary channel approach [J]. IEE Proceedings, Pt. F, 1987, 134(3): 269 - 276.
- [3] Wang H, Cai L. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 660 - 670.
- [4] 王永良, 吴志文, 彭应宁. 适于非均匀杂波环境的空时自适应处理方法 [J]. 电子学报, 1999, 27(9): 56 - 58.

#### 作者简介:

陈建文 男, 1964 年生于湖北武汉市。博士、副教授。1992 年于华中科技大学电路与系统专业获硕士学位, 2000 年 6 月于国防科技大学信号与信息处理专业获博士学位, 现在南京电子技术研究所做博士后。已发表论文 20 多篇。研究领域为雷达信号处理等。

王永良 男, 1965 年生。博导、教授。分别于 1990 年和 1994 年在西安电子科技大学电磁场与微波技术系和雷达信号处理国防科技重点实验室获得硕士和博士学位, 1994 年 6 月至 1996 年 12 月在清华大学电子工程系做博士后, 1996 年 12 月由讲师晋升为教授。现已发表论文 80 多篇, 其中进入国际 SCI、EI 等三大索引的论文有 30 多篇。曾荣获省部级科技进步一、二、三等奖各 1 项。研究领域为雷达信号处理、阵列信号处理等。

陈辉 男, 1974 年生。硕士。1996 年 7 月和 1999 年 3 月分别获武汉空军雷达学院信息处理专业学士和硕士学位。已发表论文 10 多篇。主要研究阵列信号处理、空间谱估计等。