

直升机载战场侦察雷达空时自适应处理实用方法研究¹

陈建文 王永良 皇甫堪* 周良柱*

(空军雷达学院兵器运用工程重点实验室 武汉 430010)

*(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 针对直升机平台的特点,本文研究了直升机载战场侦察雷达杂波抑制与平台运动补偿的可能有效途径,主要包括传统的 DPCA 方法、 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法、 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法、随机抽取单元辅助通道 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法和扩展的 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法。理论分析与计算机仿真表明,扩展的 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法更适用于多种非理想情况(如:阵元幅相误差、载机偏航、航速误差等)和电子战环境,具有更强的杂波与干扰抑制能力和更强的误差鲁棒性,而且,该方法既可用于相控阵雷达,又可用于连续型天线系统,是直升机载战场侦察雷达有效地实现杂波抑制与平台运动补偿的可取方案。

关键词 直升机载雷达,空时自适应信号处理,杂波抑制,干扰

中图分类号 TN951

1 引言

直升机载战场侦察雷达(HBSR)与固定翼高空机载预警(AEW)雷达相比,具有更强的环境适应性、机动性和生存能力,其独特的“悬停”工作方式,可实现对重点目标的进一步侦察。因此,HBSR更适用于局部战争情况下进行战场侦察。

要完成从强杂波背景中检测目标的任务,HBSR同样需要进行杂波抑制与平台运动补偿,但对慢速目标的检测性能要求更高,因为HBSR的多数检测对象为地(海)面和低空目标,比如坦克、战车、舰船和队列等,而慢速目标在主杂波区内或附近,检测难度较大。另外,直升机平台受大气紊流影响严重,而且,受直升机载重的限制,雷达天线的孔径受限,要求自适应杂波抑制信号处理算法简单、实用。因此,有必要探讨应用于HBSR杂波抑制和运动补偿的可能有效途径和方法。

2 直升机载战场侦察雷达杂波抑制的途径

相位中心偏置天线系统(DPCA)结合时间平均杂波相干机载雷达(TACCAR)技术是最早应用于机载雷达杂波抑制与平台运动补偿的有效方法^[1],但该方法的信杂比改善与直升机载雷达的技术要求尚有一定的差距,而且直升机载机的随机漂移会破坏DPCA条件,加大补偿损耗。因此,该方法在HBSR中应用还有一定困难。

一维时间域自适应处理以及常规的MTD处理器是HBSR杂波抑制最经济、简便的方法,但对航速、天线孔径及天线副瓣电平有一定限制,而且,对低速目标的检测不够理想。

多维自适应运动补偿技术主要用来补偿由随机气流等导致的杂波特性随机变化^[2],实际上属于三维处理方法,设备量大,很难实时实现。因此,该方法对于HBSR仅有理论上的意义。

随着超大规模集成电路技术和相控阵技术的发展,空时自适应处理(STAP)技术日趋成熟,并已提出了多种降维处理方法。这些STAP方法均需要根据检测系统的邻近参考单元估计实际系统的杂波协方差矩阵,并要求邻近参考单元的选择必须满足独立同分布(IID)的条件,同时,为了使由不满足条件引起的性能损失限制在3dB,要求参考单元数取2~3倍的系统自由度(DOF)^[3]。机载雷达的杂波环境是极度非均匀的,因此这一要求实际上是很苛刻的。典型的降

¹ 1999-11-09 收到, 2000-05-18 定稿
空军中青年科技拔尖人才基金资助课题

维 STAP 方法中, 和差波束空时自适应处理 ($\Sigma\Delta$ -STAP) 方法具有最少的天线通道, 可实现性最强, 较适于小阵列 HBSR 采用。因为 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法具有相当低的系统自由度 (DOF), 实现简单, 较易满足 IID 条件, 适合于非均匀杂波环境, 而且对主杂波抑制能力较强, 对低速目标的检测性能较好^[4,5]。另外, 传统的机载雷达, 其实现方式并不是采用相控阵体制, 因而不具有多通道处理的特点, 好在为了实现目标跟踪处理, 这类雷达具有两种波束, 即和波束 (Σ) 与差波束 (Δ), 根据 STAP 原理, 可直接对 Σ 、 Δ 双通道实施 STAP 处理, 从而改善其杂波抑制能力。因此, $\Sigma\Delta$ -STAP 方法是一种可取的用于 HBSR 的 STAP 方法。

但是, 实际非常规的电子战环境严重地破坏了 IID 的假设, 杂波环境是时空高度非平稳的, 特别是在密集干扰条件下, $\Sigma\Delta$ -STAP 方法的 DOF 更显不足, 因此需要增加额外的通道改善其性能。密集干扰对系统将造成较大的影响, 需要消耗较多的系统自由度去完成对消处理。因此, 实际空时自适应处理器设计时应考虑一定的空域冗余度以便对消密集干扰。针对这一特点, 下面分析一种 HBSR STAP 的实用方法, 称为扩展的 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法 (简记为 $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法), 并结合正侧面阵进行理论分析和计算机仿真研究, 同时与随机抽取单元辅助通道 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法 (简记为 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法)、 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法和常规的 DPCA 方法进行性能比较。

3 扩展的 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法研究

不失一般性, 设雷达天线采用矩形平面相控阵, 天线采用可分离加权, 每一列先微波波合成一路, 可等效为一 N 元等距线阵。下面给出一种改进的 $\Sigma\Delta$ -STAP 处理器结构, 它采用和、差通道与边缘单元辅助通道输出进行空时联合自适应处理, 实现杂波与密集干扰的同时抑制。为便于描述, 称这一方法为扩展的 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法 ($E\Sigma\Delta$ -STAP 方法), 其结构框图如图 1 所示, 原理示意图如图 2 所示。

其原理可以概括为: 首先使用和差波束形成器, 同时形成和波束 Σ 与差波束 Δ , 然后根据线性约束最小方差准则对和、差波束及边缘单元辅助通道输出的多个相邻的多普勒通道进行自适应处理。

设 $x(n, k)$ 表示第 n 个子阵在 k 时刻所接收的回波信号, 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。定义时空采样信号矢量为

$$\text{Vec}(X) = [x(1, 1), x(2, 1), \dots, x(N, 1), x(1, 2), \dots, x(N, 2), \dots, x(N, K)]^T \quad (1)$$

设 $\omega_{s\Sigma}$, $\omega_{s\Delta}$ 表示和、差通道输出信号的角频率, 则和、差波束导向矢量可分别表示为

$$S_{\Sigma}(\omega_{s\Sigma}) = [w_{s1}, w_{s2}e^{j\omega_{s\Sigma}}, \dots, w_{sN}e^{j(N-1)\omega_{s\Sigma}}]^T \quad (2)$$

$$S_{\Delta}(\omega_{s\Delta}) = [w_{d1}, w_{d2}e^{j\omega_{s\Delta}}, \dots, w_{dN}e^{j(N-1)\omega_{s\Delta}}]^T \quad (3)$$

其中 $\{w_{si}, i = 1, 2, \dots, N\}$ 和 $\{w_{di}, i = 1, 2, \dots, N\}$ 分别为空域和波束 Taylor 静态加权和差波束 Bayliss 静态加权矢量。 E_1 , E_N 为边缘单元辅助通道的输出, 其空域导向矢量分别为 $S_{E_1} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 和 $S_{E_N} = [0, 0, \dots, 1]^T$ 。设 $\omega_{t,j}$ 为待检测的第 j 个多普勒通道的角频率, 则第 j 个多普勒通道的时域导向矢量为

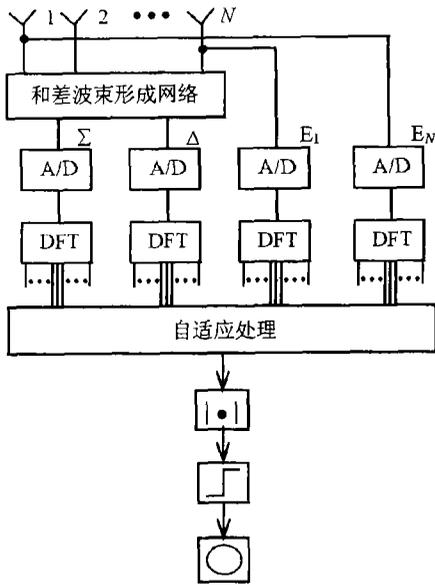


图 1 ΣΔ-STAP 方法结构框图

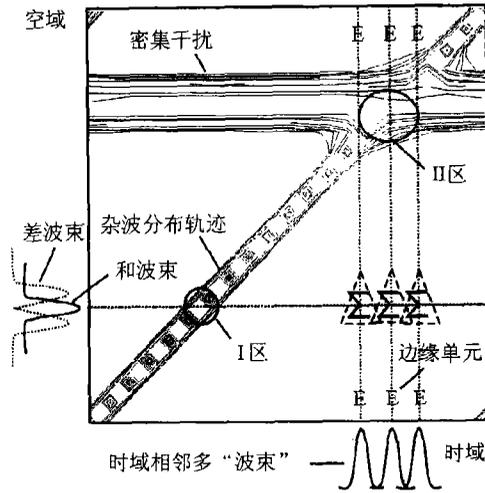


图 2 EΣΔ-STAP 方法原理示意图

$$S_T(\omega_{t,j}) = [h_1, h_2 e^{j\omega_{t,j}}, \dots, h_K e^{j(K-1)\omega_{t,j}}]^T \quad (4)$$

其中 $\{h_j, j = 1, 2, \dots, K\}$ 为第 j 个多普勒通道的时域加权矢量。这样，可把 EΣΔ-STAP 方法的一系列处理过程概括为采用一变换矩阵 T_L 实施变换， T_L 可以表示为

$$T_L = [S_\Sigma(\omega_{s,\Sigma}) \otimes S_T(\omega_{t,j}), S_\Sigma(\omega_{s,\Sigma}) \otimes S_T(\omega_{t,j-1}), \\ S_\Sigma(\omega_{s,\Sigma}) \otimes S_T(\omega_{t,j+1}), S_\Delta(\omega_{s,\Sigma}) \otimes S_T(\omega_{t,j}), \\ S_\Delta(\omega_{s,\Sigma}) \otimes S_T(\omega_{t,j-1}), S_\Delta(\omega_{s,\Sigma}) \otimes S_T(\omega_{t,j+1}), \\ S_{E_1} \otimes S_T(\omega_{t,j}), S_{E_1} \otimes S_T(\omega_{t,j-1}), S_{E_1} \otimes S_T(\omega_{t,j+1}), \\ S_{E_N} \otimes S_T(\omega_{t,j}), S_{E_N} \otimes S_T(\omega_{t,j-1}), S_{E_N} \otimes S_T(\omega_{t,j+1})] \quad (5)$$

其中， \otimes 表示 Kronecker 积。该处理器的最优自适应权为

$$W(j) = (T_L^H R_X T_L)^{-1} T_L^H R_X S(\omega_{s,\Sigma}) \quad (6)$$

这里 $R_X = \text{Vec}(X)\text{Vec}(X)^H$ ， H 表示共轭转置， $S(\omega_{s,\Sigma})$ 为空时导向矢量。

下面分析 EΣΔ-STAP 方法的杂波对消机理及其对密集干扰抑制原理。

3.1 主杂波区对消机理

我们从和差波束自适应 DPCA(ΣΔ-ADPCA) 角度说明 EΣΔ-STAP 方法对消主杂波的机理，然后分析图 1 中边缘单元改善处理器旁瓣杂波区性能，抑制密集干扰的原理。

相位中心偏置天线 (DPCA) 技术广泛应用于机载雷达杂波抑制和平台运动补偿，ΣΔ-ADPCA 是 DPCA 的一种具体实现形式。它利用差波束自适应校正和波束的相位，能较好地抑制主杂波，实现也相对简单，在单脉冲雷达中即可实现。图 3 给出了反映双延迟 ΣΔ-ADPCA 的二维滤波特性的二维频响及其等高线图，相应的杂波谱呈直线状分布。由图可见，双延迟 ΣΔ-ADPCA 方法的二维频响图的等高线轨迹是弯曲的，但在主杂波区仍有近似的线性关系，因此，

在主杂波区拟合较好, 而旁瓣杂波区拟合较差. 所以, $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法具有较好的主杂波抑制性能, 而旁瓣杂波抑制性能较差.

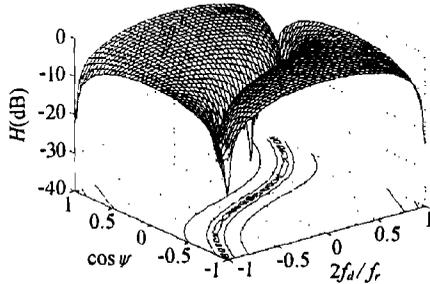


图3 双延迟 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 频响图

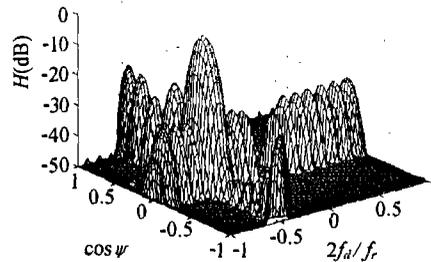


图4 E $\Sigma\Delta$ -STAP 方法某多普勒通道空时二维频响

实际上, $\Sigma\Delta$ -ADPCA 是 $\Sigma\Delta$ -STAP 的一种特殊情形, 两者间具有内在的联系. 理想情形下, $\Sigma\Delta$ -ADPCA 与 $\Sigma\Delta$ -STAP 具有相同的性能. 非理想情形下, $\Sigma\Delta$ -STAP 的性能优于 $\Sigma\Delta$ -ADPCA. E $\Sigma\Delta$ -STAP 方法在 $\Sigma\Delta$ -STAP 的基础上增加了边缘单元辅助通道, 除了具有 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法主瓣杂波区性能好的优点外, 还改善了旁瓣杂波区的检测性能, 同时, 增强了抗干扰能力.

3.2 旁瓣杂波区对消机理及密集干扰抑制原理

由边缘单元引起的方向图可表示为^[6]

$$f(\theta) = 2 \cos\left[\frac{N}{2}kd \sin \theta\right] \quad (7)$$

这里 N 为等效线阵单元数, d 为阵元间距, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数. 由边缘单元产生的方向图无明显的主瓣, 而且与整个等效线阵方向图具有同样的旁瓣结构, 特别是在远离主瓣处二者的旁瓣结构完全一致^[6,7]. 利用边缘单元方向图与和波束方向图旁瓣准同形的特点, 通过和波束与边缘单元辅助“波束”旁瓣的相互对消可实现旁瓣杂波的抑制, 这实际上用旁瓣拟合旁瓣来实现干扰对消. 靠近主瓣的旁瓣区域与和波束的旁瓣结构不一致, 会消耗较多的系统自由度, 对消效果略有下降, 但对系统性能的影响不大. 如果采用非边缘单元(随机抽取单元)作为辅助通道, 由于其旁瓣较零乱, 与和波束的旁瓣结构相差很大, 因此, 杂波与干扰的对消性能较差.

E $\Sigma\Delta$ -STAP 方法抑制密集干扰的原理如下: 设密集干扰来自 $\theta_1 \sim \theta_p$ 方向, 首先确定其中心角 θ_m , 再对第一个和最末一个单元分别加一个具有共轭相移的对消信号, 建立一个附加的余弦方向图, 它能左右移动, 使其峰值与 θ_m 一致. 通过对附加的余弦方向图标乘常数因子 C , 使其幅值与 θ_m 上的阵列方向图相等而相位相反, 则可对消掉该角域的干扰. 对 θ_1 与 θ_p 也进行同样的操作, 则可抑制来自 $\theta_1 \sim \theta_p$ 方向的密集干扰.

3.3 频域 E $\Sigma\Delta$ -STAP 方法频响图

从以上分析可见, E $\Sigma\Delta$ -STAP 方法在 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法的基础上增加了边缘单元辅助通道, 除了具有 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法主瓣杂波区性能好的优点外, 还改善了旁瓣杂波区的检测性能, 同时, 增强了抗干扰的能力.

图4给出了 E $\Sigma\Delta$ -STAP 方法某多普勒通道空时二维频响图, 相应的杂波谱呈直线状分布. 由图可见, E $\Sigma\Delta$ -STAP 方法二维频响图沿杂波带分布形成了很深的二维频响凹口, 因此, 在主杂波区和旁瓣杂波区均拟合较好. 所以, E $\Sigma\Delta$ -STAP 方法具有较好的主杂波和旁瓣杂波抑制性能, 与上述分析一致.

随机抽取单元作为辅助通道的非边缘单元 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法 ($R\Sigma\Delta$ -STAP 方法) 的杂波抑制能力与 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法相比有所提高, 但由于随机抽取单元的方向图并不具有与等效线阵和波束方向图旁瓣准同形的特点, 因此, 其性能的改进只是系统自由度 (DOF) 的增大引起的, 杂波对消能力与抗干扰能力均不如 $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法。

4 计算机仿真分析

直升机载战场侦察雷达 (HBSR) 的地杂波功率谱一般有高斯谱和立方谱两种近似模型, 为简化计算又不失一般性, 假设其杂波的内部运动为高斯过程, 谱也是高斯的。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 8 行 \times 4 列, 单元间距 $d=1.5\text{cm}$, 相干脉冲数 $K=32$, 载机速度 $V_p=50\text{m/s}$, 载机高度 $H=4\text{km}$, 工作波长 $\lambda=3\text{cm}$, 脉冲重复频率 $\text{PRF}=1\text{kHz}$, 单元杂噪比 $\text{CNR}=40\text{dB}$, 波束指向阵面法向, 多普勒滤波器为 -70dB 切比雪夫加权, 阵元幅相误差为 5%。

仿真 1 无干扰条件下几种方法的性能比较

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 5 为无干扰条件下, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法的性能, 同时给出了 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法的性能。作为比较, 图中还给出了 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法及常规的 DPCA 方法的性能。由图可见, 无干扰条件下, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法的性能略优于 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法, 它们均优于 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法及常规的 DPCA 方法。 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法只能有效抑制主杂波, 而对旁瓣杂波的抑制能力较差, 无干扰时, 其性能比 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法略差。常规的 DPCA 方法由于只在时域作处理, 而滤波器凹口非常宽, 根本无法对低速目标作出有效检测。采用 Bayliss 差波束后, $\Sigma\Delta$ -STAP 方法采用 3 个相邻多普勒通道联合处理, 其主杂波区的改善因子比常规的 DPCA 方法有很大的提高, 滤波凹口变窄, 但在旁瓣杂波区, 改善因子平均只有 54dB 左右, 比常规的 DPCA 方法仅高出几个分贝。增加边缘单元或随机抽取单元辅助通道后, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法与 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法不仅具有较理想的主杂波区性能, 而且旁瓣杂波区的性能也获得了明显的改善, 但 $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法在无干扰条件下比 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法只略有改善。

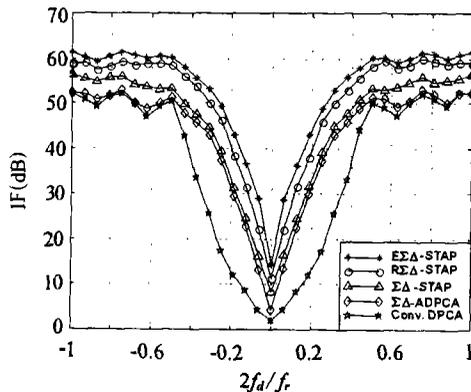


图 5 无干扰条件下几种方法性能比较

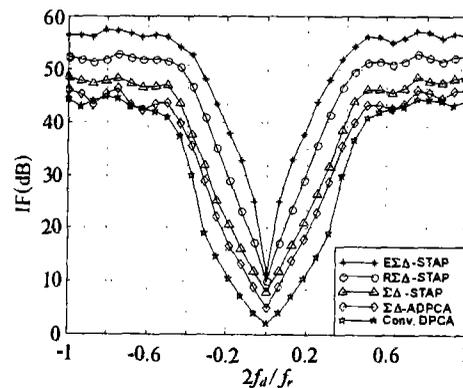


图 6 密集干扰条件下几种方法性能比较

仿真 2 密集干扰条件下几种典型方法的性能比较

图 6 为密集干扰条件下, 上述 5 种方法的改善因子性能曲线. 密集干扰用相隔 0.5° 的 20 个窄带干扰模拟, 角域范围为 $120^\circ \sim 130^\circ$, 干噪比为 20dB. 从图中可以看出, 在密集干扰条件下, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法的性能比 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法有明显的改善, $\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法及常规的 DPCA 方法的性能较差. 另外, 即使增加 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法联合处理的多普勒通道数目, 其改善因子曲线也几乎趋于重合, 说明 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法性能的改善主要被空域波束的相关性和有限的自由度所限制. 而边缘单元辅助通道参与 $\Sigma\Delta$ -STAP 联合处理, 具有较好的旁瓣杂波与密集干扰的抑制能力, 在主杂波区也有相当理想的信杂比改善, 这对低速运动目标的检测极其有利, 且在密集干扰条件下明显优于 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法, 这与前面的分析相符.

仿真 3 干扰强度增强时几种典型方法的性能比较

图 7 为同样的干扰数目条件下, 干扰强度增加到 40dB 时几种典型方法的改善因子性能比较曲线. 由图可见, 干扰强度增强, 性能下降, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法的抗干扰能力较强, 比无干扰情况下, 平均下降约 7dB, 而 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法平均下降约 10dB, $\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法及常规的 DPCA 方法在强干扰条件下性能下降很大, 抗干扰能力较差.

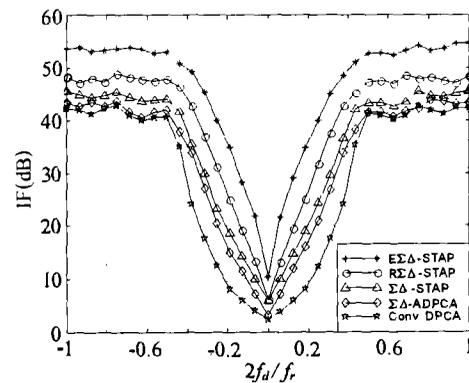


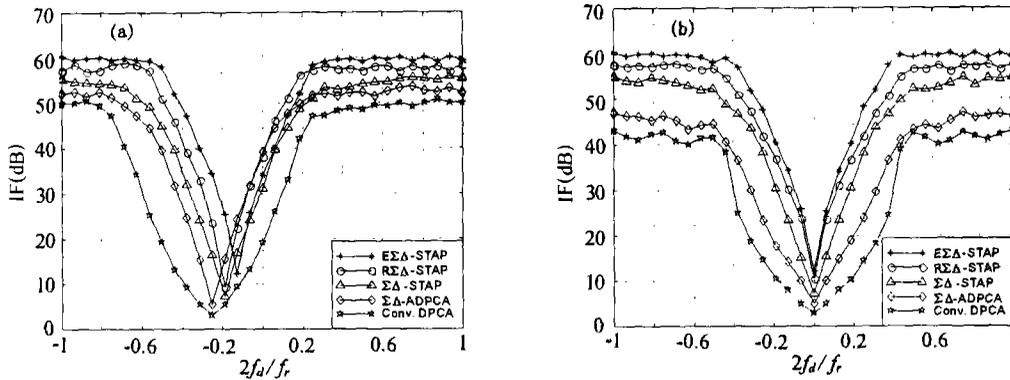
图 7 干扰强度增强时几种方法性能比较

仿真 4 存在平台漂移时几种典型方法的性能比较

对于直升机载雷达, 大气紊流会造成直升机载机平台随机漂移, 导致载机偏航和航速误差的产生, 给杂波抑制带来很大的困难. 图 8(a) 给出了直升机载机偏航 5° 时几种典型方法的改善因子性能曲线, 从图中可以看出, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法的性能下降不大, 只是对应主杂波区的性能较差的区域偏离了原来的多普勒位置, 而 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法及常规的 DPCA 方法的性能下降较明显. 这是因为载机偏航改变了杂波分布的轨迹, 致使主杂波区偏移, 性能差的区域也偏离原有多普勒位置. 随着偏离程度的增加, 凹口也会扩展. 因此, 对主杂波区稳健的处理方法, 性能将有明显的改善. 载机偏航破坏了 DPCA 条件, $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法因具有自适应调整能力, 其性能略优于常规的 DPCA 方法. 下面, 我们考虑航速大小的变化对 $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法性能的影响. 图 8(b) 给出了 5% 航速误差时几种典型方法的改善因子性能曲线. 由图可见, 航速误差降低了 $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法的改善因子性能, 但 $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法的性能仍下降不大, $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法及常规的 DPCA 方法的性能下降显著, 这是因为空时自适应处理 (STAP) 可补偿多种误差, 而航速误差破坏了 DPCA 条件, 会影响杂波平均多普勒频率和多普勒带宽, 也使得相邻脉冲间的相位超前量与方位偏角的关系发生变化, 对消也就不匹配, 从而降低了改善因子性能. $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法对误差的自适应调整能力较弱, 而常规的 DPCA 方法不具有误差补偿能力, 因此, 其性能下降很明显.

5 结 论

直升机载战场侦察雷达 (HBSR) 面临的复杂的非均匀杂波环境及直升机载重的限制要求雷达信号处理设备简单实用, 许多现有的空时自适应处理方法由于系统自由度过高, 实现较复杂而不适用于 HBSR. 本文研究了应用于 HBSR 杂波抑制与平台运动补偿的可能有效途径, 主要包



(a) 载机偏航的影响

(b) 航速误差的影响

图8 平台漂移对几种方法性能的影响

括常规的 DPCA 方法、 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法、 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法和 $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法。研究表明, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法保持了 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法主瓣杂波抑制能力较强的优点, 同时具有很强的旁瓣-旁瓣干扰对消能力。因此, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法比 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法更适于实际电子战环境。文中结合计算机仿真, 系统地分析了在多种非理想情况下(如: 阵元幅相误差、密集干扰、平台漂移等), $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法与 $R\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法、 $\Sigma\Delta$ -ADPCA 方法和常规的 DPCA 方法的性能, 并进行了比较, 进一步证明了扩展的 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法比上述几种典型方法具有更强的杂波与干扰抑制能力, 以及在非理想的实际环境中具有更强的鲁棒性。所以, $E\Sigma\Delta$ -STAP 方法是 HBSR 有效地实现杂波抑制与平台运动补偿的可取方案。

值得指出, 文中虽以平面相控阵系统验证了该方法的有效性, 它也同样适用于具有和、差波束的非相控阵体制的 HBSR。

参 考 文 献

- [1] M. I. Skolnik, Radar Handbook, Second Edition, New York, McGraw-Hill, 1990, 16.1-16.8, 18.1-18.16.
- [2] R. Klemm, Adaptive airborne MTI with two dimensional motion compensation, IEE Proc.-F, 1991, 138(6), 551-558.
- [3] I. S. Reed, J. D. Mallett, L. E. Brennan, Rapid convergence rate in adaptive arrays, IEEE Trans. on AES, 1974, AES-10 (6), 853-863.
- [4] R. D. Brown, M. C. Wicks, Zhang Y, Zhang Q, Wang H. A space-time adaptive processing approach for improved performance and affordability, IEEE National Radar Conference, MI, USA, 1996, 321-326.
- [5] Wang H, Zhang Q, R. D. Brown, M. C. Wicks, An improved and affordable space-time adaptive processing approach, IEEE International Radar Conference (CIEIRC'96), Beijing, China, 1996, 72-77.
- [6] El-Azhary, M. S. Affi, P. S. Excell, A simple algorithm for sidelobe cancellation in a partially adaptive linear array, IEEE Trans. on AP, 1988, 36(10), 1484-1486.
- [7] 许志勇, AEW 雷达空时二维自适应处理降维方法研究, [博士论文], 西安电子科技大学, 1997, 9.

RESEARCH ON PRACTICAL APPROACHES TO SPACE-TIME ADAPTIVE PROCESSING FOR HELIBORNE BATTLEFIELD SURVEILLANCE RADAR

Chen Jianwen Wang Yonghang Huangfu Kan* Zhou Liangzhu*

(Key Research Lab., Wuhan Radar Academy, Wuhan 430010, China)

*(Inst. of Electron. Eng., National Univ. of Defense Tech., Changsha 410073, China)

Abstract This paper studies the optional effective methods for clutter suppression and platform motion compensation in Heliborne Battlefield Surveillance Radar (HBSR), which includes the traditional DPCA method, $\Sigma\Delta$ -ADPCA method, $\Sigma\Delta$ -STAP method, $\Sigma\Delta$ -STAP method with random-element auxiliary channel and extended $\Sigma\Delta$ -STAP method. A comparative analysis is performed. Theoretical analysis and computer simulation further illustrates that the extended $\Sigma\Delta$ -STAP method is suitable for modern electronic warfare environment. It has stronger clutter and jamming rejection performance in the concentrated jamming environment and stronger error robustness in the non-ideal real environment (i.e., array element amplitude and phase errors, heliborne crab, velocity error, etc.). In addition, this method can be implemented easily for phased array heliborne radar as well as continuous antenna system. Therefore, the extended $\Sigma\Delta$ -STAP approach is feasible and available for clutter suppression and platform motion compensation in HBSR.

Key words Heliborne radar, Space-time adaptive processing (STAP), Clutter suppression, Jamming

陈建文 男, 1964 年生, 副教授, 博士, 研究方向: 雷达信号处理、信号检测。
王永良: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 雷达信号处理、阵列信号处理、空间谱估计。
皇甫焜: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 信号与信息处理、图像处理。
周良柱: 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 信号与信息处理、图像处理。