

# 基于空时联合约束的机载雷达 STAP 单脉冲角度估计方法

陈 功<sup>1,2</sup>, 谢文冲<sup>1,2</sup>, 王永良<sup>1</sup>

(1. 空军预警学院, 湖北武汉 430019; 2. 电子信息控制重点实验室, 四川成都 610036)

**摘 要:** 对现有 STAP(Space-Time Adaptive Processing)单脉冲角度估计方法存在单脉冲比失真及目标多普勒失配时角度估计性能严重下降的问题, 本文从数学上分析了常规 STAP 单脉冲方法的失效机理, 并基于机载雷达杂波的空时耦合特性, 将差波束约束条件扩展到空时二维空间, 提出了基于空时联合约束的 STAP 单脉冲角度估计方法, 将单脉冲曲线延伸为单脉冲曲面, 通过空时联合约束显著提高了目标角度估计的精度和稳健性. 计算机仿真结果验证了本文方法的有效性.

**关键词:** 机载雷达; 空时自适应处理; 角度估计; 空时联合约束; 单脉冲曲面

**中图分类号:** TN959.73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2015)03-0489-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.011

## Space-Time Adaptive Monopulse Angle Estimation Approach for Airborne Radar Based on Space-Time Joint Constraint

CHEN Gong<sup>1,2</sup>, XIE Wen-chong<sup>1,2</sup>, WANG Yong-liang<sup>1</sup>

(1. Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China;

2. Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu, Sichuan 610036, China)

**Abstract:** Because a monopulse ratio is distorted and a Doppler mismatch may occur, the performance of the existing space-time adaptive monopulse angle estimation is degraded severely. This paper gives mathematical analysis of the failure mechanism of the conventional space-time adaptive monopulse method. In view of the space-time coupling characteristic of airborne radar clutter, this paper expands a constraint for difference beam to a space-time domain. A novel space-time adaptive monopulse angle estimation approach based on the space-time joint constraint is proposed, and a monopulse curve is extended to a monopulse surface. The accuracy and robustness of angle estimation are improved by the space-time joint constraint. Simulation results verify the validity of the novel method.

**Key words:** airborne radar; space-time adaptive processing (STAP); angle estimation; space-time joint constraint; monopulse surface

### 1 引言

角度估计是机载相控阵雷达获取目标信息的一个重要环节. 目前, 角度估计主要有两种思路: 一是基于代价函数的最大似然(Maximum Likelihood, ML)方法<sup>[1,2]</sup>, 二是单脉冲方法<sup>[3,4]</sup>. ML估计是一种最优估计, 理论上可以达到克拉美-罗界, 但其运算量过大, 不利于实现. 因此, 实际工程中一般采用运算量较小的单脉冲方法, 其本质上是 ML 估计的近似<sup>[5]</sup>. 单脉冲方法能够利用单个回波脉冲进行角度估计并在分辨力上突破波束宽度的限制, 但机载雷达所面临的强杂波环境导致经典单脉冲

方法的性能严重下降. 空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)<sup>[6]</sup>是机载相控阵雷达抑制杂波及干扰的有效方法. 直接建立在 STAP 基础上的单脉冲角度估计, 即常规 STAP 单脉冲方法(也称常规空时自适应单脉冲方法), 能够在目标位于副瓣杂波区时保持相对较好的估计性能, 但当目标落入主瓣杂波区时, 其估计性能又将严重下降. 为了在抑制主瓣杂波的同时保持较好的角度估计性能, 学者们相继提出了多种改进的自适应单脉冲方法<sup>[7~11]</sup>. Fante 在文献[11]中提出了一种基于空域多点约束的 STAP 单脉冲方法, 改善了单脉冲曲线的失真. 然而, 这种方法中的单脉冲比不仅与目

标角度有关,同时也受到目标多普勒频率的影响.当实际多普勒频率与视在多普勒频率(多普勒滤波器中心)有一定偏差(多普勒失配)时,角度估计也会产生相应的误差.

针对上述问题,本文首先从数学上分析了常规 STAP 单脉冲方法失效的机理.考虑到机载雷达杂波存在空时耦合特性<sup>[6]</sup>,本文将约束 STAP 单脉冲问题扩展到空时二维空间,提出了基于空时联合约束的 STAP 单脉冲方法,并将单脉冲曲线扩展到单脉冲曲面.该方法通过在空域和时域对单脉冲比进行联合约束,降低单脉冲比对多普勒频率的依赖性,显著提高了目标多普勒频率失配情况下的角度估计精度及稳健性.

## 2 基本模型

单脉冲角度估计可分为比幅法、比相法、幅度和差法及相位和差法<sup>[3]</sup>,其中幅度和差法应用最为广泛<sup>[5]</sup>.如图 1 所示,在相控阵雷达中,幅度和差法对阵列的单个脉冲数据同时加和权及差权,形成和( $\Sigma$ )波束与差( $\Delta$ )波束.在雷达波束主瓣范围内,差、和波束幅度之比,即单脉冲比  $R$ ,与目标角度  $\Psi$  之间存在线性的——对应关系,于是通过测量实际单脉冲比就能推算出目标的精确角度.

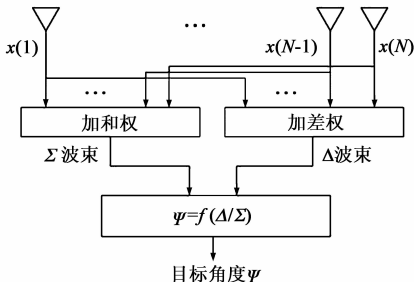


图1 相控阵雷达幅度和差单脉冲角度估计原理框图

自适应单脉冲角度估计方法采用了基于自适应处理的和权及差权,目的是在形成和、差波束的同时抑制杂波及干扰,以提高目标检测及参数估计性能.对于机载相控阵雷达,由于杂波频谱的展宽和杂波谱中心的偏移,单纯的 AMTI 或一维自适应波束形成技术均无法有效抑制杂波,因此本文重点研究空时自适应处理(STAP)单脉冲角度估计.此时,“单脉冲”的概念被推广至单个空时快拍.

## 3 常规 STAP 单脉冲角度估计方法失效机理的数学分析

设静态(无自适应)和权及差权分别为  $q_{\Sigma}$  及  $q_{\Delta}$ ,则常规 STAP 单脉冲角度估计的和权及差权分别为

$$w_{\Sigma} = \frac{Q^{-1}s_0}{s_0^H Q^{-1}s_0} \odot q_{\Sigma} \quad (1)$$

$$w_{\Delta} = \frac{Q^{-1}s_0}{s_0^H Q^{-1}s_0} \odot q_{\Delta} \quad (2)$$

其中,  $Q = E(\mathbf{x}\mathbf{x}^H)$  为接收数据协方差矩阵,“ $E(\cdot)$ ”表示求期望,  $s_0$  为波束指向的空时导向矢量,“ $\odot$ ”表示 Hadamard 积.令  $\mathbf{a} = q_{\Delta}$ ,  $\mathbf{b} = q_{\Sigma}$ ,  $\mathbf{c} = \frac{Q^{-1}s_0}{s_0^H Q^{-1}s_0}$ , 常规 STAP 单脉冲角度估计中的单脉冲比记为  $R_{\text{STAP}}$ , 根据 Hadamard 积的有关性质<sup>[12]</sup>, 可作如下推导

$$\begin{aligned} R_{\text{STAP}} &= \frac{(\mathbf{c} \odot \mathbf{a})^H \mathbf{x}}{(\mathbf{c} \odot \mathbf{b})^H \mathbf{x}} \\ &= \frac{\text{tr}[\mathbf{x}^T (\mathbf{c}^* \odot \mathbf{a}^*)]}{\text{tr}[\mathbf{x}^T (\mathbf{c}^* \odot \mathbf{b}^*)]} \\ &= \frac{\text{tr}[(\mathbf{x}^T \odot \mathbf{c}^H) \mathbf{a}^*]}{\text{tr}[(\mathbf{x}^T \odot \mathbf{c}^H) \mathbf{b}^*]} \\ &= \frac{\mathbf{a}^H (\mathbf{x} \odot \mathbf{c}^*)}{\mathbf{b}^H (\mathbf{x} \odot \mathbf{c}^*)} \end{aligned} \quad (3)$$

令  $\mathbf{y} = \mathbf{x} \odot \mathbf{c}^*$ , “ $\text{phi}(\cdot)$ ”表示求相位,则由于  $\mathbf{c}$  为复矢量,有  $\text{phi}(\mathbf{y}) \neq \text{phi}(\mathbf{x})$ . 静态单脉冲比  $R_q$  与角度  $\Psi$  一一对应,因此  $R_q$  与  $\text{phi}(\cdot)$  也必然一一对应,故有

$$\text{phi}(\mathbf{y}) \neq \text{phi}(\mathbf{x}) \Rightarrow R_{\text{STAP}} = R_q(\mathbf{y}) \neq R_q(\mathbf{x}) \quad (4)$$

这个结果说明  $R_{\text{STAP}}$  存在失真,常规 STAP 单脉冲角度估计方法失效的原因是自适应处理权系数  $\mathbf{c}$  对接收信号进行了相位调制,破坏了原本的单脉冲特性.进一步讲,由于单脉冲方法的角度估计范围是主瓣内部,当目标落入主瓣杂波区时,这种失真将更为严重.

## 4 空时联合约束 STAP 单脉冲角度估计方法

针对常规 STAP 方法的单脉冲比失真问题,文献<sup>[11]</sup>利用空域线性约束条件在一定程度上改善了这种失真.但是机载雷达的杂波空时耦合特性使单脉冲比受到多普勒频率影响,在目标多普勒频率失配的情况下,基于空域约束的 STAP 单脉冲角度估计仍是有偏的.为了在强杂波环境下进行单脉冲角度估计,应当对差波束提出如下两方面要求:一是与和波束共同构成与角度成线性关系且不随多普勒频率变化的单脉冲比值;二是尽可能抑制非目标信号能量.本文从这两方面要求出发,以新的差权代替式(2).

### 4.1 方法原理描述

机载雷达由于载机平台的运动,其杂波在空时二维平面上呈现耦合特性.因此,我们利用分布在  $\Psi\text{-}f_d$  平面(空时联合域)上不同角度、频率的多个约束点来构建空时联合的约束条件.这里以图 2 所示约束点分布为例,给出空时联合约束 STAP 单脉冲角度估计方法的原理描述.图中,  $\Psi_0$  为雷达空域主波束指向,  $f_{d0}$  为目标所在多普勒滤波器的中心频率(时域主波束指向),  $\Delta\Psi$  和  $\Delta f$  分别为空域和时域的约束点间隔.

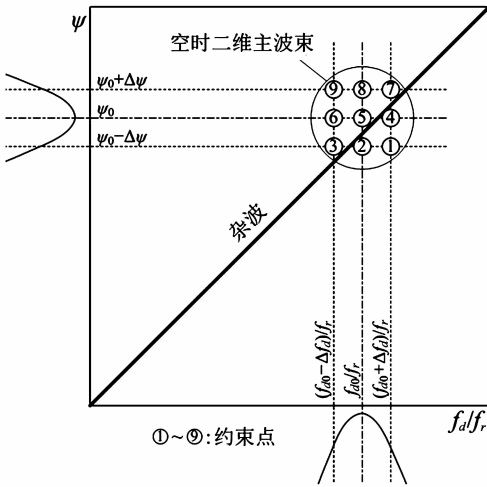


图2 空时联合约束点分布

空时联合约束条件可以写成如下矩阵形式

$$\mathbf{w}_{\Delta,c}^H \mathbf{H} = \boldsymbol{\rho} \quad (5)$$

其中,下标“c”含义为约束,约束矩阵  $\mathbf{H}$  和约束响应矢量  $\boldsymbol{\rho}$  分别为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{f_{d0} + \Delta f_d} & \mathbf{H}_{f_{d0}} & \mathbf{H}_{f_{d0} - \Delta f_d} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_{f_{d0} + \Delta f_d} & \boldsymbol{\rho}_{f_{d0}} & \boldsymbol{\rho}_{f_{d0} - \Delta f_d} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,下标“ $f_{d0} + \Delta f_d$ ”、“ $f_{d0}$ ”、“ $f_{d0} - \Delta f_d$ ”表示约束点的三个不同的多普勒频率, $k_{\text{slope}}$ 为静态单脉冲比斜率.为使角度估计方法在多普勒失配情况下有良好的稳健性,三个多普勒频率处都应同样满足  $R$  与  $\Psi$  之间的线性比值,故有

$$\mathbf{H}_{f_{d0} + \Delta f_d} = [s(\Psi_0 - \Delta\Psi, f_{d0} + \Delta f_d) \quad (8)$$

$$s(\Psi_0, f_{d0} + \Delta f_d) \quad s(\Psi_0 + \Delta\Psi, f_{d0} + \Delta f_d)]$$

$$\boldsymbol{\rho}_{f_{d0} + \Delta f_d} = k_{\text{slope}} [-\mathbf{w}_{\Sigma}^H s(\Psi_0 - \Delta\Psi, f_{d0} + \Delta f_d) \quad (9)$$

$$0 \quad \mathbf{w}_{\Sigma}^H s(\Psi_0 + \Delta\Psi, f_{d0} + \Delta f_d)] \Delta\Psi$$

$$\mathbf{H}_{f_{d0}} = [s(\Psi_0 - \Delta\Psi, f_{d0}) \quad (10)$$

$$s(\Psi_0, f_{d0}) \quad s(\Psi_0 + \Delta\Psi, f_{d0})]$$

$$\boldsymbol{\rho}_{f_{d0}} = k_{\text{slope}} [-\mathbf{w}_{\Sigma}^H s(\Psi_0 - \Delta\Psi, f_{d0}) \quad (11)$$

$$0 \quad \mathbf{w}_{\Sigma}^H s(\Psi_0 + \Delta\Psi, f_{d0})] \Delta\Psi$$

$$\mathbf{H}_{f_{d0} - \Delta f_d} = [s(\Psi_0 - \Delta\Psi, f_{d0} - \Delta f_d) \quad (12)$$

$$s(\Psi_0, f_{d0} - \Delta f_d) \quad s(\Psi_0 + \Delta\Psi, f_{d0} - \Delta f_d)]$$

$$\boldsymbol{\rho}_{f_{d0} - \Delta f_d} = k_{\text{slope}} [-\mathbf{w}_{\Sigma}^H s(\Psi_0 - \Delta\Psi, f_{d0} - \Delta f_d) \quad (13)$$

$$0 \quad \mathbf{w}_{\Sigma}^H s(\Psi_0 + \Delta\Psi, f_{d0} - \Delta f_d)] \Delta\Psi$$

式(5)确保了单脉冲比具有理想特性,但并没有对杂波进行抑制.为了提高角度估计性能,差波束还应得到最小的杂波输出功率,于是根据线性约束最小方差

(LCMV)准则可以建立关于  $\mathbf{w}_{\Delta,c}$  的优化模型如下

$$\begin{cases} \min \mathbf{w}_{\Delta,c}^H \mathbf{Q} \mathbf{w}_{\Delta,c} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}_{\Delta,c}^H \mathbf{H} = \boldsymbol{\rho} \end{cases} \quad (14)$$

求解式(14),得到空时联合约束下的自适应差权

$$\mathbf{w}_{\Delta,c} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \boldsymbol{\rho}^H \quad (15)$$

值得注意的是,在采用振幅和差单脉冲测角的雷达中,目标信号检测是在和波束中进行的.为了保证检测性能,本算法仅考虑对差权进行约束,和权则采用基于最大信干噪比(MSINR)准则的空时最优权,如式(1).

以上是基于空时联合约束的 STAP 单脉冲角度估计方法.事实上,在空时二维处理的条件下,角度  $\Psi$  与多普勒频率  $f_d$  具有对应性.因此,本文方法还可以推广到对目标多普勒频率  $f_d$  的精确估计,其原理与式(5)~式(13)类似.

## 4.2 约束点的确定

约束点的分布和数量应当合理选择.式(5)仅对  $\Psi - f_d$  平面上的若干离散点进行了约束,而非全局约束.约束点越密集的区域,差波束越接近理想特性.实际中,目标角度在主波束中的分布特性未知,一般假设其服从均匀分布,并在由空域主瓣角度范围和目标对应多普勒滤波器频带所构成的空时二维主波束区域中选取均匀分布的点进行约束.在数量方面,约束点数量越多,差波束失真就越小,但同时差波束能用于抑制杂波的自由度也越少,杂波抑制性能就越差,因而实际工程中应根据机载雷达杂波自由度大小和系统对测角精度的要求进行综合考虑.本文后续的仿真结果显示,对  $22 \times 22$  的均匀平面阵,采用均匀分布的  $3 \times 3$  个约束点已能够获得较好的估计精度.

## 4.3 单脉冲曲面的构造

在经典单脉冲角度估计理论中,常用单脉冲曲线来表征单脉冲比  $R$  与角度  $\Psi$  之间的关系.理想的单脉冲角度估计应使  $R$  随  $\Psi$  线性变化,即  $R = k_{\text{slope}} \times (\Psi - \Psi_0)$ ,图3给出了雷达波束指向  $60.7^\circ$  时的理想单脉冲曲线.而在我们所讨论的多普勒失配情况下,单脉冲比可能同时是角度  $\Psi$  和多普勒频率  $f_d$  的函数,即  $R(\Psi,$

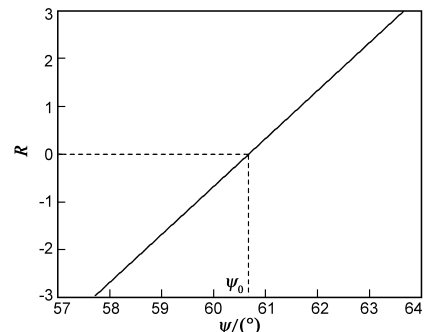
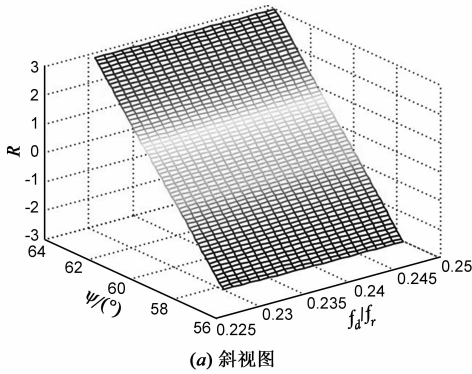


图3 理想单脉冲曲线

$f_d$ ), 此时单脉冲曲线显然无法描述  $R$  与  $f_d$  的关系. 因此我们考虑基于空时联合域构造单脉冲曲面(monopulse surface). 单脉冲曲面是对传统单脉冲曲线的扩展与延伸, 通过单脉冲曲面可以全面地分析  $R$  的变化. 图 4 给



出了某多普勒分辨单元对应的理想单脉冲曲面, 其在  $R - \Psi$  平面的投影(图 4(b))与图 3 一致, 即理想情况下单脉冲比  $R$  仅随角度  $\Psi$  变化, 与频率  $f_d$  无关.

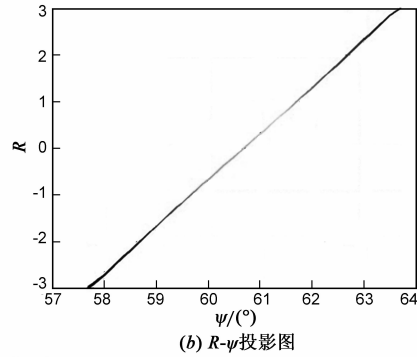


图4 理想单脉冲曲面

## 5 仿真及分析

假设机载雷达采用  $N = M = 22$  的均匀平面阵,  $N$  为子阵数,  $M$  为子阵阵元数, 波长  $\lambda = 0.15\text{m}$ , 阵元及子阵间距均为  $\lambda/2$ , 相干脉冲数  $K = 24$ , 杂噪比  $\text{CNR} = 50\text{dB}$ , 载机以航速  $V = 529.2\text{km/h}$  作匀速直线飞行, 高

度  $H = 8\text{km}$ , 发射脉冲重复频率  $f_r = 3.92\text{kHz}$ , 无距离模糊.  $(\Psi_0, f_{d0}/f_r) = (60.7^\circ, 0.24)$ , 此时目标靠近杂波脊. 空时联合约束点分布如图 2, 且约束点间隔与空域及多普勒域主波束的  $3\text{dB}$  宽度对应, 即  $\Delta\Psi = 3^\circ$ ,  $\Delta f_d/f_r = 0.02$ .

### 实验 1 杂波环境下的单脉冲曲面对比

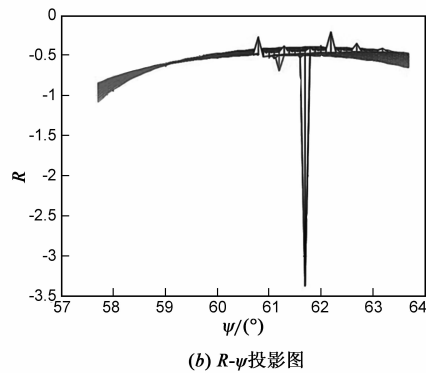
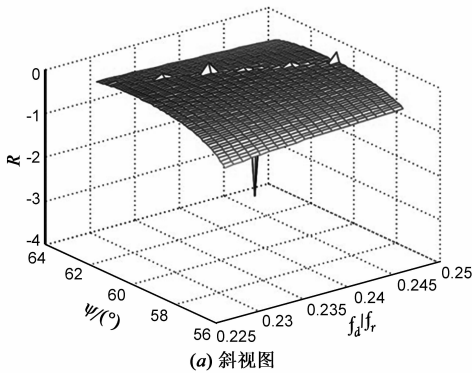


图5 常规STAP单脉冲曲面

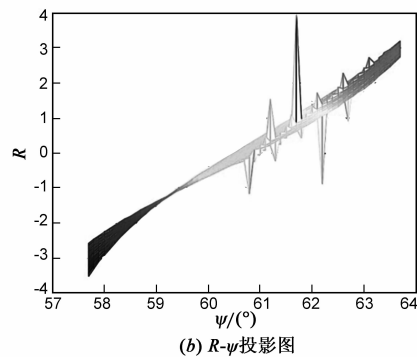
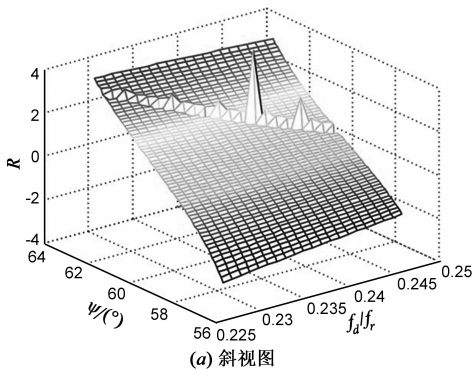


图6 空域约束STAP单脉冲曲面

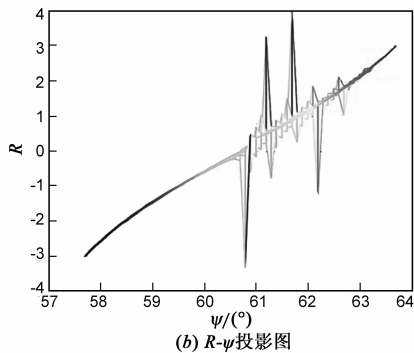
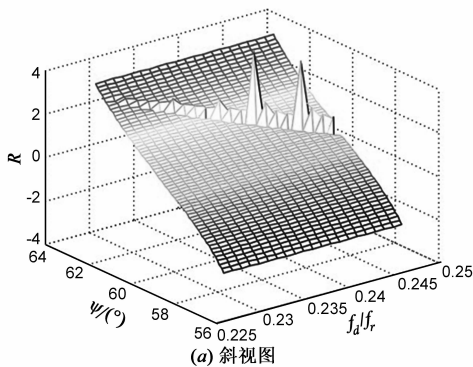


图7 空时联合约束STAP单脉冲曲面

常规、空域约束及空时联合约束 STAP 方法的单脉冲曲面如图 5~图 7。从图 5 中可以看出,常规 STAP 单脉冲曲面严重失真, $R$  与  $\Psi$  之间的对应关系被破坏,角度估计已完全失效。图 6 基本保持了理想单脉冲曲面的形状,说明加入空域约束后,角度估计性能得到一定程度的改善。但图 6(b)显示曲面发生了扭曲, $R-\Psi$  投影凝聚性较差。若目标的真实多普勒频率未知,则这种方法几乎均为有偏估计,稳健性较差。在图 7(b)中, $R-\Psi$  投影比较集中地凝聚在一条曲线上,与图 3 所示的理想单脉冲曲面最接近,说明本文方法对单脉冲曲面扭曲具有明显的改善作用,稳健性较好。

图 5~图 7 中存在沿杂波  $\Psi-f_d/f_r$  耦合特性分布的畸变脊。一旦目标的角度和多普勒频率均与杂波重合,即落入畸变脊,目标实质上就成为杂波的一部分,无法实现目标检测和角度估计。从图 7 可以看出,空时联合约束将曲面的失真区域压缩至畸变脊处,实现了目标角度有效估计区域的最大化。

#### 实验 2 杂波 + 干扰环境下的单脉冲曲面对比

在上述仿真的基础上,加入主瓣噪声干扰,干燥比  $JNR = 60\text{dB}$ ,干扰角度  $\Psi_j = 60^\circ$ ,得到三种方法的单脉冲曲面如图 8~图 10。

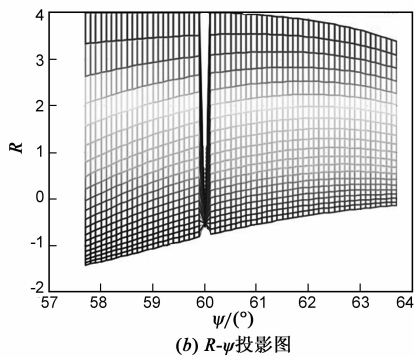
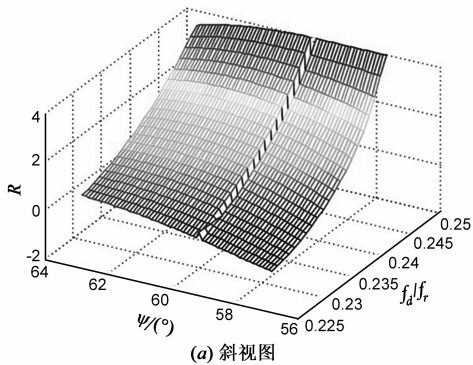


图8 常规STAP单脉冲曲面(加干扰)

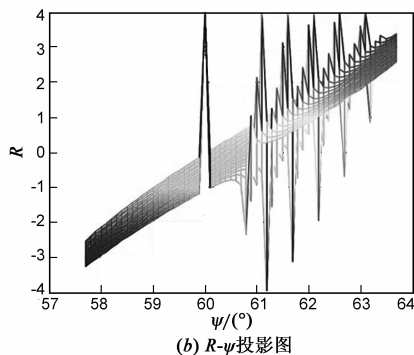
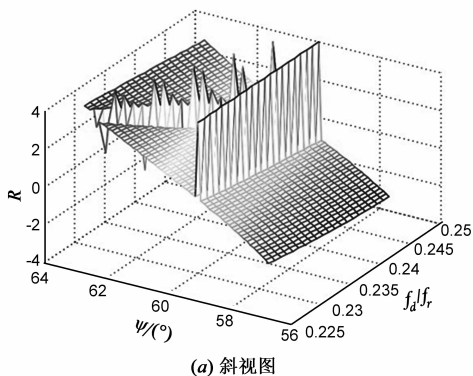


图9 空域约束STAP单脉冲曲面(加干扰)

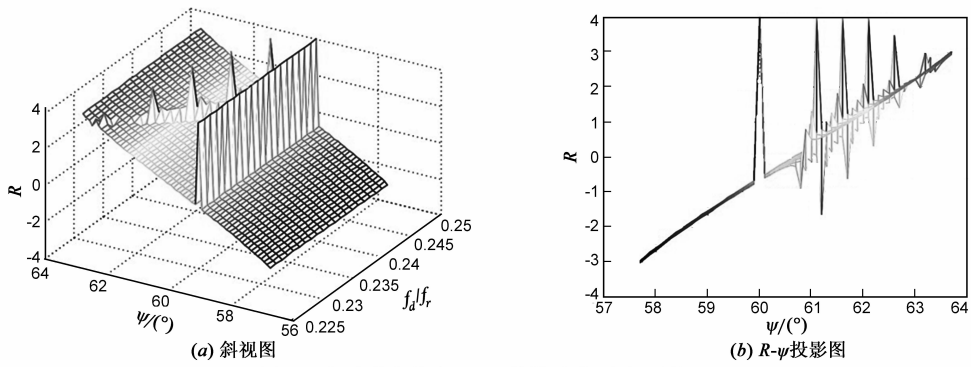
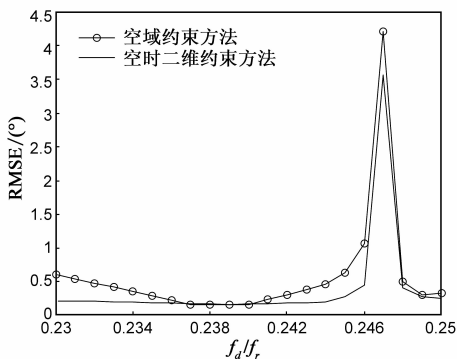


图10 空时联合约束STAP单脉冲曲面(加干扰)

加入干扰后,常规 STAP 单脉冲角度估计的性能进一步下降(如图 8 所示),加入空域约束后的凝聚性同样很差(如图 9(b)所示),而空时联合约束 STAP 单脉冲方法依然保持了良好的凝聚性(如图 10(b)所示),最接近图 3(b)中的理想投影。

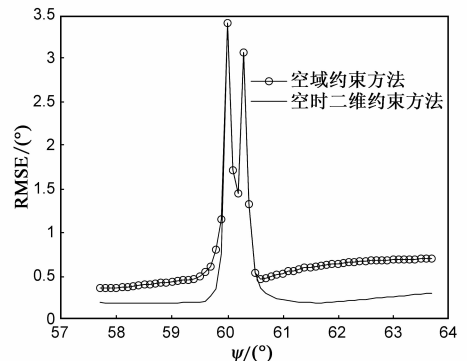
### 实验 3 两种约束 STAP 单脉冲方法的误差比较

假设真实目标位于  $60.7^\circ$ ,同时存在杂波、干扰及通道噪声,其中通道噪声为高斯白噪声且信噪比  $\text{SNR} = 20\text{dB}$ ,其余参数保持不变.分别假设目标真实多普勒频率位于  $[0.23, 0.25]$  区间内步进为  $0.001$  的不同  $f_d/f_r$  处,并分别进行 200 次蒙特卡洛仿真,得到两种方法在不同  $f_d/f_r$  处的均方根误差(RMSE),如图 11.可以看出,空域约束 STAP 单脉冲角度估计的误差对多普勒频率比较敏感.从趋势上看, $f_d$  与  $f_{d0}$  的偏差越大,测角误差就越大.相比之下,空时联合约束 STAP 单脉冲角度估计的 RMSE 则一直维持在一个较低的水平,说明与前者相比,空时联合约束 STAP 单脉冲角度估计的精度更高,稳健性更好. $f_d/f_r = 0.247$  附近为杂波畸变脊处.由于常规 STAP 单脉冲方法已完全失效,不再将其纳入比较。

图11 两种方法的RMSE- $f_d/f_r$ 曲线

进一步假设存在一定多普勒失配, $f_d/f_r = 0.248$ ,其余参数不变.分别假设目标位于  $[57.7^\circ, 63.7^\circ]$  区间内步进为  $0.1^\circ$  的不同角度  $\Psi$ ,并分别进行 200 次蒙特卡洛仿

真,得到两种方法在不同  $\Psi$  处的 RMSE,如图 12.可以看出,在已存在多普勒失配的情况下,除干扰及杂波畸变脊处外,空时联合约束 STAP 单脉冲角度估计方法的误差水平明显低于空域约束 STAP 单脉冲角度估计方法,进一步验证了本文提出的方法具有更高的测角精度和更好的稳健性。

图12 两种方法的RMSE- $\psi$ 曲线

## 6 结束语

针对强杂波环境下机载雷达单脉冲角度估计问题,本文从数学上分析了常规 STAP 单脉冲角度估计失效的机理,提出了一种基于空时联合约束的机载雷达 STAP 单脉冲角度估计方法.结论如下:(1)相对于静态权值,空时自适应处理权值改变了雷达信号的相位信息,导致常规 STAP 单脉冲角度估计方法失效;(2)与现有方法相比,空时联合约束 STAP 单脉冲角度估计方法通过合理分配系统自由度,兼顾了机载雷达的杂波/干扰抑制性能和目标角度估计性能,其单脉冲曲面扭曲最小,角度估计性能最好。

### 参考文献

- [1] Davis R C, Brennan L E, Reed I S. Angle estimation with adaptive arrays in external noise fields[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1976, 12(2): 179 - 186.
- [2] Wu J X, Wang T, Bao Z. Angle estimation for adaptive linear

- array using PCA-GS-ML estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 670 – 677.
- [3] Leonov A I, Formichev K I. Monopulse Radar[M]. Boston: Artech House, 1986.
- [4] 胡航, 张皓. 一种改进的两级子阵级自适应单脉冲方法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1996 – 2003.  
Hu Hang, Zhang Hao. An improved two-stage processing approach of adaptive monopulse at subarray level[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1996 – 2003. (in Chinese)
- [5] Nickel U. Overview of generalized monopulse estimation[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(6): 27 – 56.
- [6] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] Nickel U, Chaumette E, Larzabal P. Estimation of extended target using the generalized monopulse estimator: extension to a mixed target model[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(3): 2084 – 2096.
- [8] Wu R B, Su Z G, Wang L. Space-time adaptive monopulse processing for airborne radar in non-homogeneous environments[J]. AEU International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(5): 258 – 264.
- [9] Nickel U, Chaumette E, Larzabal P. Statistical performance prediction of generalized monopulse estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 381 – 404.
- [10] Nickel U. Performance analysis of space-time-adaptive monopulse[J]. Signal Processing, 2004, 84(9): 1561 – 1579.
- [11] Fante R L. Synthesis of adaptive monopulse patterns[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(5): 773 – 774.

- [12] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

### 作者简介



**陈 功** 男, 1991 年生于江西南昌, 硕士研究生, 主要研究方向为机载雷达信号处理、空时自适应处理等.

E-mail: reynchen059@gmail.com



**谢文冲** 男, 1978 年生于山西运城, 2006 年获国防科技大学信号与信息处理专业工学博士学位, 现为空军预警学院副教授, 获国家技术发明二等奖 1 项, 主要研究方向为机载雷达信号处理、空时自适应处理等.

E-mail: xwch1978@aliyun.com

**王永良(通信作者)** 男, 1965 年生于浙江嘉兴, 1994 年获西安电子科技大学信号与信息处理专业工学博士学位, 1996 年清华大学电子工程系博士后出站, 现为空军预警学院教授, 国家杰出青年基金获得者, 享受国务院政府特殊津贴, 入选“新世纪百千万人才工程国家级人选”, 获国家技术发明二等奖 2 项, 主要研究方向为雷达信号处理、空时自适应处理等.

E-mail: ylwangkjld@163.com