

## 机载相控阵雷达近程杂波抑制的俯仰向空域自适应算法

孟祥东<sup>①②</sup> 王彤<sup>①</sup> 吴建新<sup>①</sup> 保铮<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(南京电子技术研究所 南京 210013)

**摘要:** 该文针对机载平面阵列相控阵雷达的动目标检测提出了一种俯仰向空域自适应的近程杂波抑制算法。该方法利用平面阵列天线在俯仰向的自由度, 在近程杂波的支撑区域内沿着多普勒单元选取训练样本估计协方差矩阵, 计算俯仰向空域最优权。在存在距离模糊的情况下, 该方法可以自适应地滤除近程杂波, 保留远程杂波, 从而增强了杂波的距离均匀性, 有利于提高后续的方位空域和时域 STAP 的性能。

**关键词:** 机载相控阵雷达; 距离模糊; 杂波抑制; 空时自适应处理(STAP)

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0948-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01348

## Elevation Adaptive Algorithm for Short-Range Clutter Suppression in Airborne Phased Array Radar

Meng Xiang-dong<sup>①②</sup> Wang Tong<sup>①</sup> Wu Jian-xin<sup>①</sup> Bao Zheng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** An elevation adaptive algorithm is presented according to the characteristics that clutter Doppler varies with range in airborne phased array radar. This algorithm, by making use of the elevation freedom in plane array antenna, is first to select the training data from Doppler cells in the short-range clutter region to evaluate the covariance matrix, and then to calculate the elevation optimum weight. When the PRF is chosen so that radar is range ambiguous, this algorithm can eliminate short-range clutter while reserving the long-range clutter. Thus, the clutter range dependence is alleviated, which is of great help for latter STAP in azimuth and time domain.

**Key words:** Airborne phased array radar; Range ambiguity; Clutter suppression; Space-Time Adaptive Processing (STAP)

### 1 引言

空时自适应信号处理(STAP)技术在机载相控阵雷达上的应用已经有了一定的发展<sup>[1-3]</sup>, 但是仍然有许多疑难问题未能很好地解决, 例如杂波的非均匀性会严重影响协方差矩阵的估计精度, 从而影响 STAP 处理的性能。杂波的非均匀性主要由两种因素引起: 一种为环境因素, 例如目标信号, 杂波功率非均匀和孤立干扰等因素; 另一种为系统本身的因素, 例如主杂波的多普勒随着距离的变化而变化的特性, 这种特性在非正侧面相控阵雷达中的表现尤为突出。当脉冲重复频率(PRF)较大而出现距离模糊时(大多数情况下机载 AEW 相控阵雷达都存在距离模糊), 近程杂波与远程杂波就会相互叠加在一起。近程杂波的多普勒随着距离的变化较快, 而

远距离杂波随着距离的变化较慢, 这样杂波在距离维就出现了非均匀性, 杂波的这种非均匀性与系统本身的几何关系有关, 具有一定的规律性, 可以通过一定算法解决。目前国内外已有很多方法来消除这种距离非均匀性<sup>[4-10]</sup>, 例如多普勒补偿, 角度多普勒补偿(ADC), 递推更新(DBU), 配准补偿法(RBC)等。但是在距离模糊的情况下, 补偿的方式无法同时照顾各次模糊距离的杂波。与以前的方法不同, 本文主要的思想是滤除近程的杂波而不是去补偿它。该方法的前提是相控阵雷达天线应该是平面阵列, 而且在数据录取时保留有俯仰向的自由度(平面阵列相控阵雷达的应用已经比较普遍)。文献[11-13]已提出过利用天线俯仰向的自由度抑制杂波的思想, 但是文献[11]采用的 MCARM 数据俯仰向只有两个自由度, 没有给出俯仰向自适应滤波的统一计算方法, 估计协方差矩阵的训练样本沿着距离单元选取, 受杂波非均匀性影响很大。文献[12,13]提出的三维 STAP 运算量很大, 而且仍然存在估计

2008-10-14 收到, 2009-12-18 改回

国家部委基金资助课题

通信作者: 孟祥东 sweyemeng2003@yahoo.com.cn

协方差矩阵样本选取困难的问题。本文所提出的方法主要是利用各次模糊距离杂波的来波俯仰角的不同将近程杂波区分出来并抑制掉, 与传统的空时自适应处理主要有两点不同: (1) 在自适应抑制近程杂波时, 协方差矩阵的估计采用同一个距离单元中的不同多普勒通道的数据作为训练样本; (2) 计算自适应最优权时采用多约束的方式。

本文的内容安排如下, 第2节对存在距离模糊情况下的近程杂波的距离非均匀性进行分析; 第3节阐述了本文所提出的算法的原理以及计算过程。第4节介绍仿真实验的结果。最后给出结论。

## 2 非正侧面阵杂波的距离非均匀性

设天线阵面与载机飞行速度的夹角为  $\alpha$ , 波束主瓣指向与载机速度的夹角为  $\theta$ , 不同距离的杂波到阵列天线的俯仰角为  $\varphi$ , 如图1所示。天线置于载机的右侧, 当  $\alpha = 0^\circ$  时, 雷达天线为正侧面阵, 当  $\alpha = -90^\circ$  时, 天线为前视阵。地杂波多普勒的表达式可以写为<sup>[1]</sup>

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \cos \varphi \quad (1)$$

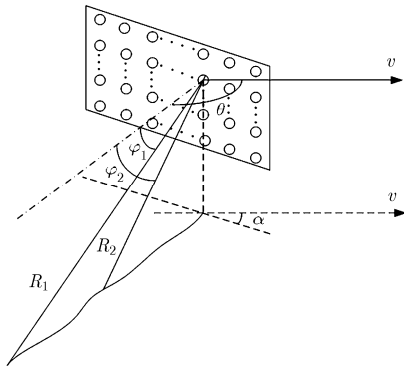


图1 非正侧面阵天线与载机的几何关系示意图

其中  $v$  为载机的飞行速度,  $\lambda$  为波长, 考虑到地球曲率半径的影响, 俯仰角  $\varphi$  可以表示为

$$\varphi = \arcsin \left[ \frac{H}{R_c} + \frac{R_c^2 - H^2}{2R_c(R_c + H)} \right] \quad (2)$$

因此地杂波的多普勒是斜距  $R_c$  的函数,

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \sqrt{1 - \left( \frac{H}{R_c} + \frac{R_c^2 - H^2}{2R_c(R_c + H)} \right)^2}, \quad \theta \in [\alpha, \alpha + 180^\circ] \quad (3)$$

地杂波的多普勒在近程随着距离的变化比较快, 而在远程随着距离变化较慢。通常情况下机载 AEW 雷达的脉冲重复频率 (PRF) 比较高, 存在距离模糊, 近程杂波与远程杂波就会叠加在一起, 杂波会有很

严重的非均匀性。按照表1所给出的雷达系统参数, 由式(3)可以计算出主瓣杂波的多普勒与距离单元的关系如图2所示, 其中有6次距离模糊(为了便于对照, 本文中所有的计算和仿真都是按照表1中的系统参数进行的)。

表1 雷达系统参数

脉冲重复频率 $f_r$	5000 Hz
距离采样频率 $f_s$	2 MHz
地球曲率半径 $R_c$	6378 km
载机高度 $H$	8000 m
载机速度 $v$	150 m/s
天线阵元个数 $N \times M$	$8 \times 64$
脉冲个数 $P$	64
距离单元个数 $L$	400
阵元间距与波长的比值 $d/\lambda$	0.5

可见多普勒随着距离变化很快的主瓣杂波基本上处于第1次模糊距离的范围内, 于是文中把第1次模糊距离内的杂波称为近程杂波。对于非正侧面阵雷达来说, 近程杂波的主瓣具有严重的距离非平稳性, 必须抑制近程杂波才能为后续的 STAP 处理做好准备; 对于正侧面阵雷达来说, 若波束指向不与阵面法线方向一致, 近程杂波的主瓣与距离模糊后远程杂波的主瓣是不重合的, 如图2(c)所示。这时为消除杂波的距离非平稳性, 抑制近程杂波也是必需的, 而对于正侧面阵雷达正侧视的情况, 近程杂波的抑制是没有必要的。另外需要说明的是, 虽然这些近程杂波是从天线的俯仰向旁瓣进入的, 但是由于目前超低副瓣技术难以实现以及它们距离较近, 在实际中功率往往会接近于甚至超过位于主瓣的远程杂波。这些近程杂波所引起的距离非均匀性会严重影响 STAP 处理的性能。在一定的脉冲重复频率  $f_r$  下, 地杂波的主瓣和副瓣在归一化的距离多普勒谱平面中所占的区域称为杂波的支撑区域。根据天线方位角  $\theta$  的取值范围, 由式(3)可以算出近程杂波的支撑区域如图3所示, 封闭细曲线内所包含的区域为近程杂波的支撑区域, 粗曲线则表示主瓣杂波的多普勒谱线。

可见, 不同的天线阵面放置所对应的近程杂波的支撑区域是不同的。由于载机距离地面有一定的高度, 近程杂波在起始的100多个距离单元内是不存在的。近程杂波不但主瓣能量很强, 而且旁瓣也往往会很强以至于淹没较弱的动目标, 因此支撑区域内近程杂波的主副瓣都需要抑制。

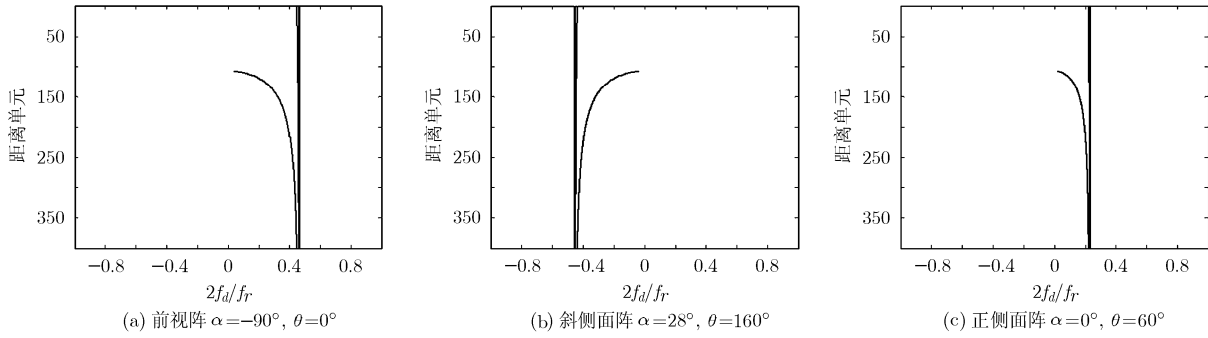


图 2 杂波的多普勒与距离单元的关系图

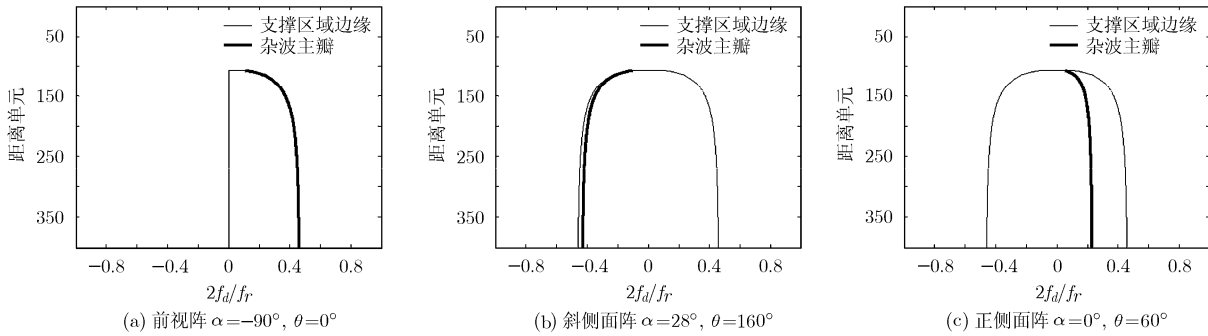


图 3 近程杂波的支撑区间

### 3 算法原理

当雷达脉冲重复频率足够大以致存在距离模糊时，我们把除了第一次模糊距离以外的其他模糊距离的杂波，统称为远程杂波。各次模糊距离的杂波可以依靠阵列天线俯仰向的阵元或者俯仰向自由度来分辨。因此在俯仰向阵元所接收的数据矢量之间加某一权值可以将俯仰角处于某一范围的杂波抑制掉，只要权值满足一定的条件即可。该权值可以通过自适应计算得到。

由于要抑制的是同一个距离单元中的近程杂波，我们只对近程杂波支撑区间内的距离单元和多普勒单元进行处理，相应地，自适应处理构造协方差矩阵时所需要的训练样本应该在近程杂波的支撑区间内在某一固定的距离单元中沿着多普勒通道选取，这与通常所采取的在固定的多普勒通道中沿着距离单元选取样本的方法不同。第  $l$  个距离单元的协方差矩阵  $R_l$  可以按照下式计算：

$$R_l = \frac{1}{K_l} \sum_{k=k_1}^{k_2} X_{l,k} \cdot X_{l,k}^H \quad (4)$$

其中  $X_{l,k}$  为  $N \times 1$  的列矢量 ( $N$  为阵列天线俯仰向阵元的个数)，表示第  $l$  个距离单元中近程杂波支撑区间内的第  $k$  个多普勒单元的杂波数据， $K_l$  为第  $l$  个距离单元中近程杂波支撑区间内所含有的多普勒单元的个数， $k_1$ 、 $k_2$  分别为近程杂波支撑区间内起始

多普勒单元号与结束多普勒单元号，因此

$$K_l = k_2 - k_1 + 1 \quad (5)$$

由于多次距离模糊的远程杂波和动目标都需要保护，因此自适应处理时应该采用多约束的最优准则，最优准则表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & W_l^H R_l W_l \\ \text{s.t.} \quad & W_l^H C = F^H \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中  $W_l$  为天线俯仰向自由度的权系数； $R_l$  为协方差矩阵，估计  $R_l$  时要在近程杂波的支撑区域内沿着多普勒通道选取样本，但是若支撑区域内包含了远程杂波的主瓣，为了准确地估计  $R_l$  应该将远程杂波的主瓣所占据的多普勒通道剔除，以免造成样本污染。 $F$  为  $\tilde{L} \times 1$  的常数矢量 ( $1 \leq \tilde{L} \leq N - 2$ )

$$F = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$C$  为  $N \times \tilde{L}$  的导向矢量矩阵，由  $\tilde{L}$  个远距离杂波导向矢量所组成，在某个距离单元中  $\tilde{L}$  个模糊距离的距离值可以很容易地由系统参数计算得到，根据式 (2) 不难计算出  $\tilde{L}$  个模糊距离处来波方向的俯仰角  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{\tilde{L}}$ ，导向矢量矩阵  $C$  的主要作用是保护目标信号不被相消，其表达式可以写为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{-F \sin \varphi_1} & e^{-F \sin \varphi_2} & \cdots & e^{-F \sin \varphi_L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-FG \sin \varphi_1} & e^{-FG \sin \varphi_2} & \cdots & e^{-FG \sin \varphi_L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $F = j2\pi(d/\lambda)$ ,  $G = N - 1$ 。

计算最优权矢量得

$$\mathbf{W}_l = \mathbf{R}_X^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{F} \quad (9)$$

$$\mathbf{Z}_{l,k} = \mathbf{W}_l^H \cdot \mathbf{X}_{l,k} \quad (10)$$

权矢量  $\mathbf{W}_l$  对第  $l$  个距离单元中远程杂波支撑区间内所有的多普勒单元都是适用的, 但是对于不同的距离单元, 权矢量  $\mathbf{W}_l$  需要重新计算。式(10)相当于将列阵元进行了子阵合成, 把平面阵列天线录取的数据合成了一维线阵的数据。因此合成后俯仰向的自由不再存在, 方位向的自由度是仍然存在的。后续还要对剩余的杂波做 STAP, 从而达到抑制远程杂波检测动目标的目的, 但是这时杂波的距离均匀性会大大增强, STAP 的性能会有很大的提高。

#### 4 仿真实验

本文按照表 1 的参数仿真了雷达杂波数据, 无论阵列天线怎样放置主瓣的俯仰角都指向  $0^\circ$ , 杂波的能量按照距离的 4 次方衰减。阵列天线的每个阵元、每个脉冲的杂噪比(CNR)为 40 dB, 信噪比(SNR)为 30 dB, 且存在 5% 的阵元幅相误差。在方位主波束内距离雷达天线 130.5 km, 俯仰角  $\varphi = 2.5^\circ$  处有一个动目标, 前视阵时由动目标的相对速度所产生的多普勒假设为 750 Hz, 斜侧面阵时动目标的多普勒假设为 -375 Hz。在这两种情况下由于距离模糊动目标都落在了远程杂波的支撑区域内, 弯曲的远程杂波主瓣覆盖了远程的动目标, 但是动目标与远程杂波的俯仰角是不同的。由表 1 中的参数不难算出第 1 次模糊距离(远程)的俯仰角范围为  $\varphi = 15.5^\circ \sim 90^\circ$ 。经过俯仰向空域自适应滤波处理后, 距离多

普勒谱如图 4 和图 5 所示。图中的封闭曲线所包围的区域表示远程杂波的支撑区域, 图中箭头所指示的横坐标  $x$  和纵坐标  $y$  分别表示动目标的多普勒值和所在的距离单元。

图 4(b)和图 5(b)中已经将远程杂波滤除, 剩余的杂波为远程模糊距离的杂波以及动目标, 这样杂波的均匀性明显得到了提高, 位于远程杂波副瓣内的动目标也被显示了出来。这时接收的数据仍然具有方位阵元的自由度, 为了进一步抑制杂波检测动目标还要继续做 STAP。现有的 STAP 方法已经有很多, 由于不在本文的研究范畴, 限于篇幅不再分析。

#### 5 结论

本文提出了先利用平面阵列天线俯仰向的自由度做自适应空域滤波的算法, 采用在某一距离单元内沿着多普勒通道选取样本做协方差矩阵, 而且计算自适应时, 采用了多约束的最优准则。采用这种算法, 可以在存在一定阵元误差的情况下完全抑制远程杂波的主瓣和副瓣, 而保留距离平稳性较好的远程杂波。这样就增强了杂波的距离平稳性, 提高了在距离单元之间选取样本做协方差矩阵估计的准确性, 从而提高了后续的 STAP 处理性能。当雷达不存在距离模糊时杂波多普勒随着距离的变化可以用现有的补偿的方法解决<sup>[4-8]</sup>, 本文所提出的方法的优越性在于它适用于存在距离模糊的机载平面阵列天线雷达。然而在设计雷达 PRF 时多数情况下距离模糊都是存在, 因此本方法具有较广的适用性。本文所给出的俯仰向自适应滤波的算法在提高 STAP 处理性能的同时也会给雷达系统带来一定的复杂性。阵列天线俯仰向阵元数据的录取和处理会在一定程度上增加系统的存储和运算负担, 以目前的硬件技术水平要达到实时处理的目的可能有一定困难, 这是本方法的主要局限性。

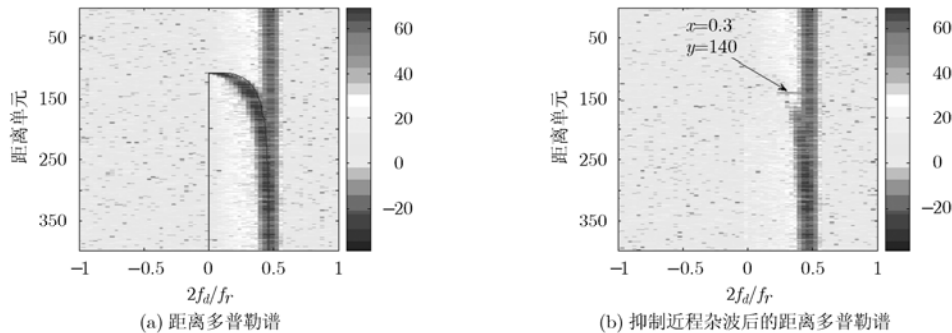


图 4 前视阵远程杂波的抑制

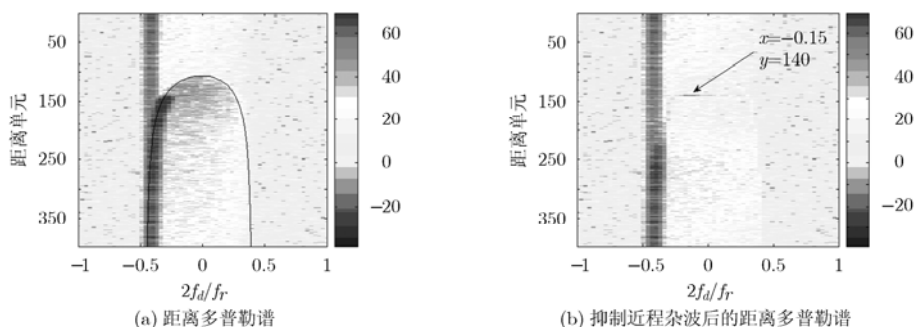


图 5 斜侧面阵近程杂波的抑制

### 参考文献

- [1] 保铮, 张玉洪, 廖桂生, 王永良, 吴仁彪. 机载雷达空时二维信号处理[J]. 现代雷达, 1994, 16(1): 38-48.
- [2] Bao Zheng, Zhang Yu-hong, Liao Gui-sheng, Wang Yong-liang, and Wu Ren-biao. Space-time signal processing for airborne radars[J]. *Modern Radar*, 1994, 16(1): 38-48.
- [3] Ward J. Space-Time Adaptive Processing For Airborne Radar [DB/OL]. [1998-04-06]. <http://ieeexplore.ieee.org/search>.
- [4] Ries P, Lapierre F D, and Verly J G. Framework and taxonomy for radar Space-time adaptive processing (STAP) Methods[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1084-1099.
- [5] Kreyenkamp O and Klemm R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar[C]. *IEE Proceeding. of Radar, Sonar and Navigation*, 2001, 148(5): 253-258.
- [6] Braham.H, Zhang Yuhong, and Abdelhak H. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne Radars. Proceedings of the IEEE Radar Conference, April 22-25, 2002: 311-317.
- [7] Xu Jin and Chen Biao. A GLRT based STAP for the range dependent problem[DB/OL]. [2007-04-15]. <http://ieeexplore.ieee.org/search>.
- [8] Lapierre F D, Verly J G, and Van Droogenbroeck M. New solutions to the problem of range dependence in bistatic STAP radars. Proceedings of the IEEE International Radar Conference, Piscataway NJ, USA, May 5-8, 2003: 452-459.
- [9] Zatman M. Performance analysis of the derivative based updating method. Adaptive Sensor Array Processing. Workshop, Lincoln Lab, MA, March, 2001: 421-425.
- [10] 刘聪峰, 廖桂生. 基于对角加载的 STAP 性能改善[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 906-910.
- [11] Liu Cong-feng and Liao Gui-sheng. Improving the STAP performance via diagonal Loading[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(4): 906-910.
- [12] 王彤, 保铮, 廖桂生. 机载火控雷达慢速目标检测[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(2): 222-231.
- [13] Wang Tong, Bao Zheng, and Liao Gui-sheng. Slow moving target detection of airborne fire-control Radar[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2002, 24(2): 222-231.
- [14] Hale T B, Temple M A, and Wicks M C. Clutter suppressing using elevation interferometry fused with space-time adaptive processing. *Electronics Letters*, 2001, 37(12): 793-794.
- [15] Corbell P M and Hale T B. 3-dimensional STAP performance analysis using the cross-spectral metric. [DB/OL]. [2004-04-26]. <http://ieeexplore.ieee.org/search>.
- [16] Corbell P M, Perez J J, and Rangaswamy M. Enhancing GMTI performance in non-stationary clutter using 3D STAP[DB/OL]. [2007]. <http://ieeexplore.ieee.org/search>.

孟祥东: 男, 1980 年生, 博士生, 从事空时二维自适应信号处理、动目标检测等方面的研究。

王彤: 男, 1974 年生, 副教授, 现从事信号与信息处理的研究工作, 特别是针对雷达探测方向的阵列信号处理、包括空时二维自适应处理、雷达成像和地面动目标检测等。

吴建新: 男, 1982 年生, 博士生, 从事空时二维自适应信号处理、动目标检测等方面的研究。

保铮: 男, 1927 年生, 中科院院士, 从事雷达系统和信号处理的的教学和研究工作, 研究面涉及自适应信号处理、阵列信号处理、二线信号处理、雷达成像和目标识别等雷达信号处理的重要领域, 在理论和实践方面有多项创造性的成果。