

一种分布式星载单脉冲雷达 GMTI 方法

江朝抒,汪学刚,陈祝明

(电子科技大学电子工程学院,四川成都 610054)

摘 要: 提出了一种基于分布式星载单脉冲雷达的地面动目标检测方法,该方法充分利用星载分布式雷达主瓣和栅瓣回波的空时二维分布特点,能够在一次扫描(一个相干处理间隔)中有效地检测和分辨不同栅瓣杂波中的地面低速动目标,因此该方法不仅具有比一般分布式星载雷达处理更大的区域覆盖率和广域监视能力,具有较高的 GMTI 性能,且处理简单,运算量低,适合于星上实时处理。

关键词: 分布式星载雷达;地面动目标显示;单脉冲测角;面积覆盖率

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 04-0949-05

GMTI for Distributed Space-Based Monopulse Radar

JIANG Chao-shu, WANG Xue-gang, CHEN Zhu-ming

(School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: A ground moving target indication (GMTI) method for distributed space-based monopulse radar is proposed. This method takes advantage of the space-time distribution of the mainlobe and gratinglobe echoes of distributed space-based monopulse radar, and can detect targets buried in gratinglobe clutters during one coherent processing interval (CPI), thus more area coverage rate (ACR) and higher wide area surveillance ability can be achieved. It's shown that this method is also computation-saving and is very suitable for on-board processing.

Key words: distributed space-based radar; GMTI; monopulse angle measurement; ACR

1 引言

分布式星载雷达是近年来发展起来的新型天基雷达,不仅具备星载雷达安全性好、能够全天候、全天时进行监视等优点,且其 GMTI 性能突破了单星雷达受天线基线长度的限制,从而更易于检测地面慢速动目标。

常用星载雷达 GMTI 技术包括 DPCA (Displaced Phase Center Antenna: 相位中心偏置天线)^[6]、STAP (Space-Time Adaptive Processing: 空时自适应处理)^[12~14]、干涉动目标检测技术^[1~5]等。DPCA 技术要求脉冲重复频率、天线间距(即卫星间距)、卫星排列严格满足 DPCA 条件,而分布式卫星很难达到这一要求;STAP 技术由于卫星速度高和地球自转引起较大的地杂波谱展宽,且在大擦地角时地面动目标径向速度分量较低,因此检测地面动目标需要的空时自由度大幅增加,星载设备难以胜任;干涉动目标检测技术对于分布式星载雷达具有较好的适应性,已经提出的星载干涉动目标检测技术有 ATI (Along Track Interferometry: 沿轨干涉)^[1~3]技术、解卷积技术等^[4,5]。ATI 技术结合 SAR 成像所获得的复图像,利

用地杂波干涉相位与动目标干涉相位的差别来检测动目标,但该过程需要对幅度和相位进行二次检测,且由于动目标图像的散焦,必须反复进行检测、运动参数估计和聚焦,因此在分布式星载条件下实现有一定难度;解卷积技术则通过解卷积运算来消除栅瓣影响,获得地面的高精度方位-多普勒图像,以进行动目标检测,但解卷积运算涉及到矩阵求逆,因此运算量相对较大。H Steyskal 等基于 TechSat21 星载雷达系统^[10],提出了一种波束形成级联多普勒滤波方法抑制栅瓣杂波,该方法处理过程相对简单,但需实时调整发射信号脉冲重复频率以使多普勒滤波器的凹口对准各栅瓣杂波,且不能检测多普勒频率与栅瓣杂波重叠的动目标(位于多普勒滤波器盲区)。

本文提出了分布式星载单脉冲雷达的地面动目标检测方法,将以前提出的基于单脉冲机载火控雷达的地面动目标检测方法^[11]引入分布式星载单脉冲雷达中,可以有效检测处于栅瓣杂波内部的动目标,使分布式星载雷达的面积覆盖率可以达到其子孔径雷达的水平,且该方法运算量低,非常适合于星上实时处理。

2 星载分布式雷达干涉阵列扫描和地杂波分布

为了简化讨论,设星座包含 N 颗卫星,卫星沿轨道方向排列成间距为 d 的均匀线阵,为了同时兼顾覆盖率和 GMTI 指标,发射采用单孔径波束,接收则利用多孔径形成干涉阵列,则总的接收天线方向图为:

$$F(\theta) = F_e(\theta) F_i(\theta) \quad (1)$$

式中, $F_e(\theta)$ 为单一天线的方位收发双程方向图, $F_i(\theta)$ 为干涉阵列方向图. 若单个卫星天线孔径为 D , 则 $F_e(\theta)$ 的波束宽度为:

$$\theta_{be} = k_1 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

式中, k_1 为天线口径形状和口径电流分布所决定的常数. 对于 $F_i(\theta)$, 其波束宽度为:

$$\theta_{bi} = k_2 \frac{\lambda}{Nd \cos \theta_i} \quad (3)$$

式中, k_2 为干涉阵列加权所决定的常数.

由于单个卫星天线的孔径有限, 因此 $Nd \gg D$, 导致 $\theta_{be} \gg \theta_{bi}$, 故 $F(\theta)$ 的幅度方向图如图 1 所示. 因此, 对于传统的分布式星载雷达处理,

每次只能检测 θ_{bi} 范围内的动目标, 若要每次检测 θ_{be} 范围内的运动目标, 则需要通过干涉阵列波束形成使 θ_{bi} 扫过 θ_{be} 的范围, 则所需形成的波束个数为:

$$M = \theta_{be} / \theta_{bi} = \frac{k_2 Nd \cos \theta_i}{k_1 D} \quad (4)$$

故需要的阵列加权个数为 MN . 因此, 传统星载分布式雷达对地面进行搜索和广域监视时, 需要非常高的处理运算量.

为了简化讨论, 设干涉阵列为正侧视 ($\theta_i = 0$) 和均匀幅度加权, 设卫星轨道速度为 v_g , 波束的俯角为 β , 则地面偏离正侧视方向 θ 角 ($|\theta| < \theta_{bi}/2$) 固定散射体回波的多普勒频率为:

$$f_d = \frac{2v_g \cos \beta \sin \theta}{\lambda} \quad (5)$$

而总的收发天线方向图为:

$$F(\theta) = F_e(\theta) \frac{\sin\left(\frac{N\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)} \exp\left[-j \frac{N\pi d \sin \theta}{\lambda}\right] \quad (6)$$

从式(5)和式(6)可知, 星载分布式雷达地杂波在空频二维平面 ($f_d - \sin \theta$) 上沿直线分布, 其幅度则受 $F(\theta)$ 调制. 如图 2 所示. 若干涉阵列不是正侧视 ($\theta_i \neq 0$), 则地

杂波在空频二维平面上沿椭圆分布.

从式(6)可以看出, 由于 $d \gg \lambda$, 故在 $F_e(\theta)$ 的主瓣范围内存在多个栅瓣. 消除栅瓣杂波的一种方法是设计多普勒滤波器使其零点对准栅瓣杂波, 由于星载雷达杂波多普勒频率与杂波单元方位的对应关系, 该方法等效于在栅瓣位置形成波束零点来抑制杂波. 由于干涉波束栅瓣的宽度 $\theta_{bi} \ll \theta_{be}$, 故需形成很窄的阻带, 因此需设计具有较高自由度的多普勒滤波器; 另一种方法是采用对消器, 但需调整 PRF 以使对消器零点对准所有栅瓣杂波, 且当干涉阵列非正侧视 ($\theta_i \neq 0$) 时, 杂波 f_d 与 $\sin \theta$ 不成线性关系, 故无法采用对消器来进行杂波抑制; 另一方面, 若动目标回波多普勒频率处于栅瓣杂波谱内部, 则动目标也将被抑制而无法检测.

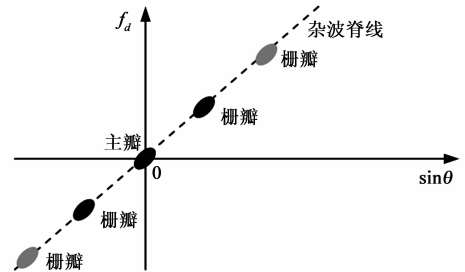


图2 星载分布式雷达干涉阵列地杂波空频二维分布

3 星载分布式单脉冲雷达地面动目标检测

由于传统雷达多采用单脉冲技术来进行角跟踪, 设发射时单孔径采用和波束, 接收采用和差波束分别接收, 则和差双通道总的收发天线方向图分别为:

$$F_{\Sigma}(\theta) = F_{\Sigma}^2(\theta) F_i(\theta) \quad (7)$$

$$F_{\Delta}(\theta) = F_{\Sigma}(\theta) F_{e\Delta}(\theta) F_i(\theta) \quad (8)$$

设每个 CPI 包含的发射脉冲个数为 L , 脉冲重复频率为 f_r , 则多普勒分辨力为 f_r/L , 而 $F_{\Sigma}^2(\theta)$ 主瓣所对应的多普勒宽度为:

$$\Delta f_{de} \approx \frac{2v_g \theta_{be} \cos \beta}{\lambda} \quad (9)$$

式中, θ_{be} 为 $F_{\Sigma}^2(\theta)$ 的主瓣宽度. $F_i(\theta)$ 的栅瓣宽度所对应的多普勒宽度为:

$$\Delta f_{di} = \frac{2v_g \cos \beta}{Nd} \quad (10)$$

要满足频域不失真采样的条件, 则:

$$f_r/L < \Delta f_{di} \quad (11)$$

即:

$$L > \frac{Nd}{2v_g T_r \cos \beta} \quad (12)$$

式中, T_r 为 PRI. 在满足式(12)条件下, 对 $F_{\Sigma}^2(\theta)$ 的主瓣所包含的 $F_i(\theta)$ 的栅瓣内各多普勒单元, 利用双通道回波的单脉冲比可以测出该通道杂波单元或目标偏离 $F_{\Sigma}^2(\theta)$ 主瓣波束指向的偏角, 即:

$$\theta(f_{dk}) = g\left(\frac{E_{\Delta}(f_{dk})}{E_{\Sigma}(f_{dk})}\right) \quad (13)$$

$g(\cdot)$ 为表示偏角与单脉冲比值关系的函数(由单个卫星天线和差波束方向图决定).因此,通过式(14)可以获得干涉阵列栅瓣回波在空频二维平面的分布图(如图 2 所示).

由于完全获得地杂波和目标的空频二维响应,因此,可以根据该响应偏离地杂波空频二维脊线的程度来进行动目标检测.下面分两种情况来进行讨论.

(1)对栅瓣之间的多普勒单元,只有副瓣杂波及噪声对检测构成影响,因此可通过幅度加权获得低副瓣,然后进行 CFAR 检测,并根据单脉冲测角结果获得目标的偏角位置(如图 3 所示).

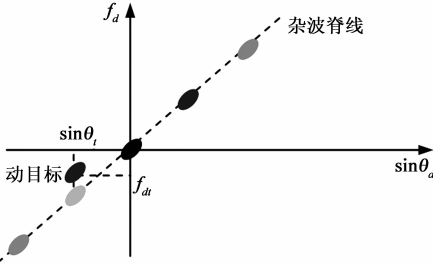


图3 单脉冲偏角与多普勒单元的对应关系(目标多普勒频率处于栅瓣之间)

(2)对栅瓣内部多普勒单元,若信号功率接近或超过杂波功率,则可由单脉冲测得的偏角与该多普勒所对应的杂波偏角的差值来进行动目标检测(如图 4 所示).单一多普勒-距离单元的信杂比可近似为:

$$SCR \approx \frac{2k_1\sigma_s}{\sigma_0 D \cdot \Delta R} \cos^2 \beta \cos \theta \quad (14)$$

式中, σ_s 为目标 RCS, σ_0 为地面后向散射系数, ΔR 为距离分辨率.从式(14)可以看出,若 $\sigma_0 = 1\text{m}^2/\text{m}^2$, $k_1 = 1$, $D = 1\text{m}$, $\Delta R = 1\text{m}$, $\theta = 30^\circ$, $\beta = 10^\circ$.对于 RCS 为 1m^2 的目标,单个多普勒单元的 SCR 为 1.68(2.25dB).故对于宽带雷达,较易获得检测所需的信杂比.对动目标与栅瓣杂波重叠的多普勒单元,和差通道回波分别为:

$$u_{\Sigma}(f_{dt}) = U_{\Sigma t} e^{j\varphi_{\Sigma t}} + U_{\Sigma c} e^{j\varphi_{\Sigma c}} \quad (15)$$

$$u_{\Delta}(f_{dt}) = U_{\Delta t} e^{j\varphi_{\Delta t}} + U_{\Delta c} e^{j\varphi_{\Delta c}} \quad (16)$$

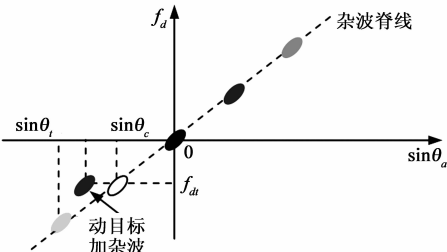


图4 单脉冲偏角与多普勒单元的对应关系(目标多普勒频率处于栅瓣内)

式中, $U_{\Sigma t} e^{j\varphi_{\Sigma t}}$ 、 $U_{\Delta t} e^{j\varphi_{\Delta t}}$ 为 f_{dt} 处动目标和差通道回波, $U_{\Sigma c} e^{j\varphi_{\Sigma c}}$ 、 $U_{\Delta c} e^{j\varphi_{\Delta c}}$ 为 f_{dt} 处杂波和差通道回波.

在多普勒频率 f_{dt} 处采用比幅测角,则所测偏角为:

$$\theta_a = g\left(\frac{|u_{\Delta}(f)|}{|u_{\Sigma}(f)|}\right) = g\left(\frac{\sqrt{U_{\Delta t}^2 + U_{\Delta c}^2 + 2U_{\Delta t}U_{\Delta c}\cos(\varphi_{\Delta t} - \varphi_{\Delta c})}}{\sqrt{U_{\Sigma t}^2 + U_{\Sigma c}^2 + 2U_{\Sigma t}U_{\Sigma c}\cos(\varphi_{\Sigma t} - \varphi_{\Sigma c})}}\right) \quad (17)$$

在多普勒频率 f_{dt} 处,当 $U_{\Sigma c} \ll U_{\Sigma t}$ 时,有:

$$\theta_a \approx g\left(\frac{U_{\Delta t}}{U_{\Sigma t}}\right) = \theta_t \quad (18)$$

式中, θ_t 为动目标的偏角.则在该多普勒频率位置动目标与杂波脊线的偏角误差为:

$$\epsilon(f_{dt}) = \theta_t - \theta_c(f_{dt}) \approx \sin \theta_t - \sin[\theta_c(f_{dt})] \quad (19)$$

由于动目标与杂波位于不同的栅瓣中,故:

$$\epsilon(f_{dt}) \approx m\Delta\theta = m\frac{\lambda}{d} \quad (20)$$

式中, $\Delta\theta$ 为栅瓣之间的偏角差, m 为整数,故该偏角误差非常显著,从而根据该偏角误差可以检测动目标.

4 检测性能分析

第 3 节的第(1)种情况已为经典的雷达信号检测理论所解决.下面主要讨论第(2)种情形下采用单脉冲测角误差作为统计量时的检测性能.

W D Blair 等的研究表明,在高斯噪声背景下,复单脉冲比值的 I、Q 均服从高斯分布^[7-9].在无目标的情况下,仅考虑噪声与杂波分量.假设杂波模型为幅度瑞利模型,杂噪比为 C_0 ,此时可得单脉冲比值(幅度比)误差的概率密度函数为:

$$f_{\epsilon}(r/H_0) = C_0 r \exp\left(-\frac{C_0 r^2}{2}\right) \quad (21)$$

则可得虚警概率与判决门限 ϵ_T 的关系为:

$$P_{fa} = \exp\left(-\frac{C_0 \epsilon_T^2}{2}\right) \quad (22)$$

虚警概率仅与判决门限和杂噪比有关.

在有目标情况下,考虑一般雷达需先经过脉冲压缩和相干积累,故噪声功率相对于杂波和信号功率较低,因此忽略噪声的影响.设检测单元的信杂比为 R_{sc} ,杂波与目标的回波相位差的绝对值 $|\varphi_{\Delta t} - \varphi_{\Delta c}|$ 服从 $[0, \pi]$ 内的均匀分布.单脉冲比值(幅度比)为:

$$x = \frac{\sqrt{U_{\Delta t}^2 + U_{\Delta c}^2 + 2U_{\Delta t}U_{\Delta c}\cos(\varphi_{\Delta t} - \varphi_{\Delta c})}}{\sqrt{U_{\Sigma t}^2 + U_{\Sigma c}^2 + 2U_{\Sigma t}U_{\Sigma c}\cos(\varphi_{\Sigma t} - \varphi_{\Sigma c})}} \quad (23)$$

则其条件概率密度函数为:

$$f_{\theta_a}(x|\theta_c, \theta_t, R_{sc}) = \frac{1}{\pi} \frac{2|bc - ad|x}{(b - dx^2)\sqrt{(b - dx^2)^2 - (a - cx^2)^2}} \quad (24)$$

在 $F_{2S}^2(\theta)$ 的主瓣范围内, $g(\cdot)$ 可近似为线性函数, 即:

$$\theta = g(x) = g_0 x \quad (25)$$

则式(24)中, a 、 b 、 c 、 d 分别为:

$$a = \frac{1}{g_0^2} (R_{sc}^2 \theta_t^2 + \theta_c^2), \quad b = \frac{2}{g_0^2} R_{sc} \theta_t \theta_c, \quad (26)$$

$$c = R_{sc}^2 + 1, \quad d = 2R_{sc}$$

因此, 处于 θ_c 位置所对应的多普勒单元的目标(实际上位于 θ_t) 的发现概率为:

$$P_d(\theta_c, \theta_t, R_{sc}) = \int_{\varepsilon_r + \theta_c/g_0}^{u_x} f_{\theta_t}(x | \theta_c, \theta_t, R_{sc}) dx \quad (27)$$

式中, u_x 为 x 的上限. 图 5 为式(27)的检测性能曲线(假设单星天线的和波束宽度大于 5°). 从图 5 可以看出, 动目标和与具有相同杂波单元的偏角越接近, 则检测目标所需要的多普勒单元信杂比越大, 检测目标更困难. 对于多普勒单元信杂比低于 -3dB 的目标, 则难以实现检测. 因此本方法对单一多普勒单元的信杂比有一定的要求. 从前面的分析可知, 对于宽带分布式星载雷达, 可以在单一多普勒单元可以获得检测所需的信杂比.

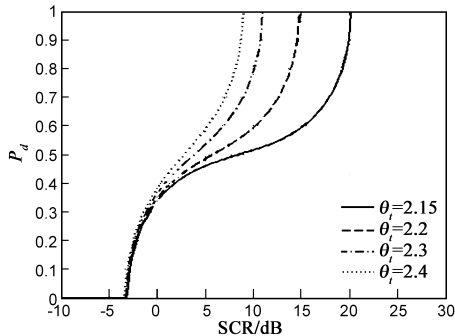


图5 不同目标偏角下的发现概率与信杂比的关系 ($P_{fa}=10^{-6}$, $\theta_c=2.13^\circ$)

5 仿真结果分析

设分布式星载雷达为侧视雷达, 且暂不考虑地球自转影响, 单星雷达天线孔径 $D=4\text{m}$, 波长为 0.08m , 脉冲重复频率为 5000Hz , 阵列由 8 颗卫星组成, 波束指向方位角为 3° , 俯仰角为 40° , 卫星轨道速度为 7.49km/s (轨道高度为 752km). 目标的方位角为 3° , 俯仰角为 40° , 总的信杂比为 -18.57dB , 目标运动附加的径向速度分量为 6.81m/s , 目标回波多普勒频率处于第二上栅瓣内, 该多普勒单元信杂比为: 2.77dB , 杂波的通道间一致分量和起伏分量(噪声)之比为 30dB , 图 6、图 7 分别为仿真的和差通道回波, 图 8 为 GMTI 处理结果. 结果表明, 在该信杂比条件下, 栅瓣内的动目标仍可被检测出来.

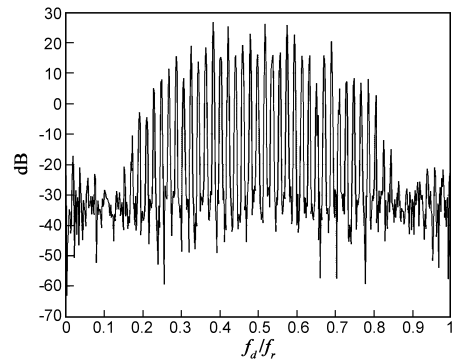


图6 仿真的分布式星载雷达和通道回波

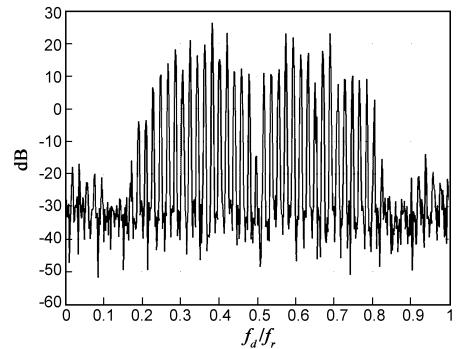


图7 仿真的分布式星载雷达差通道回波

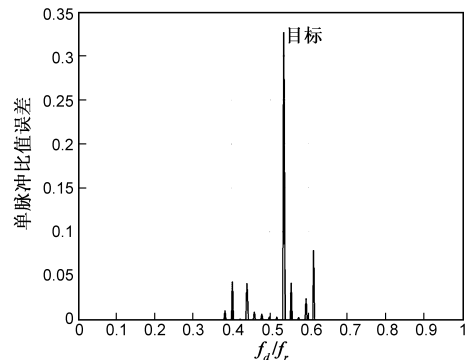


图8 栅瓣区域单脉冲检测结果

6 面积覆盖率分析

由于传统的 GMTI 方法无法检测栅瓣杂波中的目标, 故要扫描完所有栅瓣指向的空域, 则需要形成 M 个波束(见式(4), M 为星间稀疏孔径与单星天线孔径之比), 而采用单脉冲 GMTI 方法后, 由于可以检测栅瓣中的目标, 只需要形成 1 个波束即可检测完单星波束的全部覆盖区域, 故其面积覆盖率比传统 GMTI 方法提高了 M 倍.

7 结论

本文提出了一种分布式星载单脉冲雷达 GMTI 方法, 该方法通过对回波各多普勒单元进行单脉冲测角, 利用测角误差来检测动目标. 与其它方法仅能对栅瓣间的动目标进行检测相比, 该方法能够同时对栅瓣间

和栅瓣内低速动目标进行检测,提高了雷达的面积覆盖率,有利于广域搜索和监视;且该方法运算量低,易于在星上实现.因此可以作为一种低成本星上 GMTI 处理技术.

参考文献:

- [1] I Sikaneta, C Gierull. Ground moving target detection for along-track interferometric SAR data [A]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference [C]. IEEE Press, 2004. 2227 - 2235.
- [2] V Pascazio, G Schirinzi, A Farina. Moving target detection by along-track interferometry [A]. Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. IEEE Press, 2001, (7): 3024 - 3026.
- [3] E F Stockburger, D N Helder. Interferometric moving ground target imaging [A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference [C]. IEEE Press, 1995. 438 - 443.
- [4] K Marais, R Sedwick. Space based GMTI using scanned pattern interferometric radar (SPIR) [A]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference [C]. IEEE Press, 2001, (4): 2047 - 2055.
- [5] Hacker T L, Sedwick R J. Space-based GMTI radar using separated spacecraft interferometry [A]. Proceedings of AIAA Space Technology Conference and Exposition [C]. USA, 1999. 4634 - 4636.
- [6] M I Skolnik. Radar Handbook, Second Edition [M]. New York: McGraw-Hill, 1990. 16.1 - 16.8.
- [7] W D Blair, M Brandt-Pearce. Statistical description of monopulse parameters for tracking Rayleigh targets [J]. IEEE Transactions on AES, 1998, 34(2): 597 - 612.
- [8] W D Blair, M Brandt-Pearce. Signal amplitude conditioned density function for monopulse measurements of fixed-amplitude targets [A]. Proceedings of IEEE National Radar Conference [C]. Ann Arbor, Michigan, 1996. 374 - 379.
- [9] G W Groves, W D Blair, W C Chow. Probability distribution of complex monopulse ratio with arbitrary correlation between channels [J]. IEEE Transactions on AES, 1997, 33(4): 1345 - 1390.
- [10] H Steyskal, J K Schindler, P Franchi, R J Mailloux. Pattern synthesis for TechSat21 - a distributed space-based radar system [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45 (4): 19 - 25.
- [11] 江朝抒,汪学刚,陈祝明.单脉冲机载火控雷达地面动目标检测方法[J].电波科学学报,2007,22(1):113 - 116. Jiang Chao-shu, Wang Xue-gang, Chen Zhu-ming. Ground moving target detection for airborne monopulse fire-control

radar [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(1): 113 - 116. (in Chinese)

- [12] 康雪艳,江碧涛,张云华,云日升.星载 GMTI 稀疏阵雷达的 STAP 研究[J].系统工程与电子技术,2007,29(9): 1460 - 1463. Kang Xue-yan, Jiang Bi-tao, Zhang Yun-hua, Yun Ri-sheng. Study of STAP for spaceborne GMTI radar of sparse array [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(9): 1460 - 1463. (in Chinese)
- [13] 王彤,保铮,廖桂生.天基分布式雷达 GMTI 方法[J].电子学报,2006,34(3):399 - 403. WANG Tong, BAO Zheng, LIAO Gui-sheng. A new GMTI method of space-based distributed radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 399 - 403. (in Chinese)
- [14] 李真芳,保铮,王彤.分布式小卫星 SAR 系统地面运动目标检测方法[J].电子学报,2005,40(9):1664 - 1666. LI Zhen-fang, BAO Zheng, WANG Tong. Ground moving target indication for distributed small satellite SAR systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 40(9): 1664 - 1666. (in Chinese)

作者简介:



江朝抒 男,1973 年生于湖南益阳.1996 年、1999 年和 2006 年在电子科技大学分别获得工学学士、硕士和博士学位,2007 年至 2009 年在中国民航局第二研究所博士后工作站工作.现为电子科技大学副教授.主要研究方向为雷达信号处理、雷达系统模拟和场面监视技术.

E-mail: chshjiang@126.com



汪学刚 男,1964 年生于湖南澧县.现为电子科技大学教授、博士生导师.主要研究方向为雷达信号处理,毫米波雷达,雷达模拟器.

E-mail: xgwang@ee.uestc.edu.cn



陈祝明 男,1966 年生于重庆.现为电子科技大学副教授.目前的主要研究方向为雷达系统及雷达信号处理.

E-mail: zmchen@ee.uestc.edu.cn