

天基稀疏孔径雷达在波束扫描干涉模式下的 GMTI 研究

宁蔚 廖桂生

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要 在理论上天基稀疏孔径波束扫描干涉雷达(SPIR)的地面动目标检测方法仅适用于回波数据无方位模糊时的情形,但该文通过对点散布函数矩阵的进一步分解后发现, SPIR 在方位模糊时仍会有一定的空时重构效果,且其动目标检测性能会比常规空时级联处理的性能好。

关键词 天基雷达, 波束扫描干涉雷达, 地面动目标检测, 空时重构图

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1598-05

Ground Moving Target Indication of Space Based Sparse Array Scanned Pattern Interferometric Radar

Ning Wei Liao Gui-sheng

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract In theory, the Ground Moving Target Indication (GMTI) method of space based sparse array Scanned Pattern Interferometric Radar (SPIR) only works when there are no ambiguities in azimuth. By decomposing the Point Spread Function (PSF) matrix, It is proposed that SPIR can work even there are a few ambiguities in azimuth, i.e. the ground scene can be recovered to some degree. Also through simulation experiments, SPIR is found to get much better GMTI performance than that of general space-time cascade processing.

Key words Space-based radar, Scanned Pattern Interferometric Radar (SPIR), Ground Moving Target Indication (GMTI), Space-time recovered figure

1 引言

随着空间技术的快速发展,天基雷达的信息获取优势就更加明显。它可以不受国界的约束,进行大范围、全天候的地面观测和警戒,并且不再有飞行人员方面的风险顾虑。天基雷达的一项重要任务是地面动目标检测(Ground Moving Target Indication, GMTI),但由于卫星速度快、作用距离远,使得GMTI面临方位模糊、距离模糊、低信杂比等诸多因素,即使采用理论上很先进的空时自适应处理(Space Time Adaptive Processing, STAP)^[1]技术,也需很长的天线孔径(百米级)才能获得足够的功率孔径积和降低最小可检测速度,而如此长的星载天线在目前是不现实的。为了满足对星载 GMTI 的性能要求,天基雷达必然地从单星单孔径天线向稀疏孔径阵列、乃至多星协同工作的模式发展。

本文就是在天基稀疏孔径阵列雷达系统的框架下,以沿航迹直线排布的稀疏阵列,单孔径发射、多孔径接收的设计模型,作GMTI方法研究的。稀疏孔径既扩大了天线阵的基线长度,又可降低最小可检测速度,同时每个孔径上的小天线又保证了大视角观测范围。波束扫描干涉方法^[2-4](Scanned Pattern Interferometric Radar, SPIR)实现GMTI的思路是,利用稀疏孔径阵列方向图将回波信息“去卷积”,从而在空时谱上分离杂波和动目标。该方法与STAP的主要区别在于,它不再

依赖杂波协方差矩阵,影响其GMTI性能的主要因素是方位采样率(指波束扫描采样)和脉冲重复频率。但该方法的应用受到了方位模糊的限制^[2]。本文通过对SPIR的研究与实验分析,认为其“去卷积”的方法在一定程度上不受方位模糊的限制,仍能实现一定观测范围内的空时重构效果,并能获得高于常规空时级联处理方法的GMTI性能。

2 SPIR 方法简介

SPIR方法是在方位-多普勒谱(后面均简称为空时谱)上完成的。在收到回波信号后,先空域波束形成,再时域多普勒处理。而SPIR中的波束扫描过程则体现在,每次快拍的数据都将作一遍中心指向为各方位角的波束形成。将空间波束形成以及扫描的过程用矩阵 G 表示,设 G 的第一行是波束中心指向在观测角范围最左端时的阵列方向图,第二行则是波束中心指向右移一个方位角单元后的阵列方向图,依此类推,直到最后一行波束中心指向在观测角范围的最右端。可见行位置代表波束中心指向,列位置代表阵列方向图的方位角(在观测角范围内)。这样,每次快拍都将产生多个波束形成的结果。经多个脉冲的多普勒处理后,其结果是在不同波束中心指向时的回波频谱,可用下式表示^[2,4]:

$$S = G\boldsymbol{\Sigma} \quad (1)$$

其中 S 为回波信号的空时谱矩阵,行仍代表波束中心位置,列是多普勒通道位置; $\boldsymbol{\Sigma}$ 是某距离门地杂波在不同方位单元的反射系数矩阵,行位置代表是杂波分布的方位,列是多普

勒通道,显然不同方位的地杂波单元对应不同的多普勒频率。(顺便指出,由于SPIR的稀疏阵列是沿航迹直线排列的,因而其空域波束形成必是指方位向,并且,文中的天线方向图、阵列方向图和观测角范围等概念也均是指方位向。注意,本文中时空谱的含义与一般STAP中的时空谱不同。)

由式(1)看到,若 G 可逆,则将式(1)两侧左乘 G^{-1} ,就能得到 Σ 。即

$$\Sigma = G^{-1}S \quad (2)$$

由于地杂波单元的空时位置可知,而动目标是出现在 Σ 中的其它位置,因而就可实现GMTI。然而星载雷达的快速飞行,且采用了小天线,使其接收的地杂回波带宽很宽,这样,稀疏的天线阵列(几至几十个孔径)就无法满足高维矩阵 G (维数上百)的可逆性。文献[2]指出,当地杂回波无方位模糊时,即 Σ 的每一列只有一个非零值时,(实际上,由于脉冲数目不可能无限大,因而除了杂波单元的非零值外,其它位置也非零,但相对非常小),式(1)将满足(易证):

$$|\Sigma| = |G||\Sigma| \quad (3)$$

其中 $||$ 表示矩阵各元素取模, $|G|$ 可通过最小冗余阵列(Minimum Redundancy Array, MRA)设计而满足满秩^[2],则将 $|G|^{-1}$ 左乘式(3)两侧,将得到 $|\Sigma|$,即地面杂波单元的方位-多普勒图(后面简称为时空重构图),用公式表示为:

$$|\Sigma| = |G|^{-1}|\Sigma| \quad (4)$$

然而,当有动目标出现时,就不能满足 Σ 的每列只有一个非零值的要求,亦不能作GMTI;只有当目标反射系数很强,或动目标所在的方向增益使其相对于同一多普勒通道的地杂单元很强时,式(3)近似成立,可作GMTI。

通过对SPIR原理的简单介绍,可看出SPIR方法的GMTI应用面临两个限制:一是要保证方位无模糊,而对于星载雷达而言,对距离模糊程度的要求使得方位无模糊不能实现(因为一般倾向于距离无模糊的设计);二是对目标反射强度的要求也使得该方法不实用。但我们看到了SPIR方法的两个特点:不用估计杂波协方差矩阵和点散布函数矩阵 $|G|$ 的可逆性设计,就仍希望利用 $|G|$ 的可逆性完成GMTI。

3 SPIR方法讨论

当方位上存在模糊时,式(3)是不成立的,但将注意力转向 G 矩阵,可看到 G 矩阵对角线强元素相对较强,因而想到,若 G 矩阵趋向于对角阵的话,则式(3)能够近似成立。在一般情况下, G 是波束中心指向在单个孔径天线的主瓣视角范围内,以方位分辨率(即阵列波束宽度)的一半为步进长度而遍历构成的。可见,波束扫描间隔(即方位采样间隔)是方位分辨率的一半,(满足奈奎斯特定律),若将阵列方向图的方位角范围限制在单孔径天线的主瓣视角范围内,并以方位分辨率的一半为单位,则可得到,此时的 G 是一个方阵。为直观起见,这里先画出一个由12个孔径构成的MRA阵的 $|G|$ 图像,如图1所示(详细参数见实验部分)。

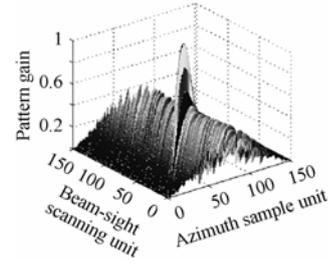


图1 波束扫描过程的点散布函数矩阵 $|G|$
Fig.1 Scanned pattern PSF function matrix $|G|$

已知 $|G|$ 的每一行代表某一波束中心指向时的阵列方向图,该方向图可分解为天线方向增益和阵列因子之积,如图2所示。因此可将 $|G|$ 表示为:

$$G = G_0W \quad (5)$$

其中 G_0 的每一行表示在某波束中心指向时的阵列因子,由于波束是在观测角范围内步进地连续扫描,因而阵列因子的峰值随着波束中心指向从观测角范围的一端移到另一端,如从左端到右端,故 G_0 的每一行均是上一行沿对角线的滑动,显然峰值都集中在对角线上,如图3所示; W 是以天线方向图在观测角范围内各方位角的增益为对角线元素而构成的对角阵,设 $\text{diag}(W)$ 代表由 W 对角线元素顺序排列构成的向量,则 $\text{diag}(W)$ 亦如图2中天线主瓣方向图所示。

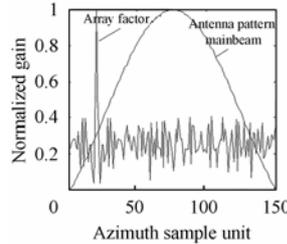


图2 阵列方向图分析

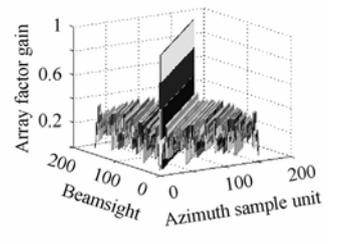


图3 阵列因子矩阵 $|G_0|$

Fig.2 Array pattern decomposition

Fig.3 Array factor matrix $|G_0|$

将式(5)带入式(1)得

$$S = G_0W\Sigma \quad (6)$$

由于 W 为对角阵,可得

$$|W\Sigma| = |W||\Sigma| \quad (7)$$

设想,若 G_0 也为对角阵,则有

$$|\Sigma| = |G_0W\Sigma| = |G_0||W||\Sigma| = |G_0W||\Sigma| = |G||\Sigma|$$

可见,若 G_0 或 G 是对角阵的话,则地面时空图 Σ 的SPIR重构将不受任何限制。因此由上式可知,影响SPIR方法可行性的最主要因素是 G_0 与对角阵的逼近程度,并且从图3看, $|G_0|$ 的形状恰类似于对角阵。假设当 G_0 与对角阵较接近时,可得到近似关系式:

$$|\Sigma| \approx |G_0||W||\Sigma| = |G_0W||\Sigma| = |G||\Sigma| \quad (8)$$

则有,

$$|\Sigma| \approx |G|^{-1}|\Sigma| \quad (9)$$

需注意,这里对 G_0 逼近对角阵的要求主要是指,希望 G_0 矩阵非对角线元素幅值越小越好,而并不要求每行只有一个较为突出的大值。其原因是, G_0 的每一行,即阵列因子,其主瓣宽度为两个方位采样单元,因而有3个相连的大值,但

在地面空时图 \mathcal{S} 的每列中(即多普勒通道), 模糊的各方位单元相距较大, 从而在与 \mathbf{G}_0 中的某行相乘时, 最多会有一个方位单元与 \mathbf{G}_0 该行的主瓣峰值相乘, 其它的方位模糊单元均与旁瓣值相乘。因此, 对 \mathbf{G}_0 的要求主要是降低阵列因子的旁瓣, 即使主瓣有一定程度的展宽, 也不会影响式(8)的近似效果。但显然, 动目标与所在同一多普勒通道中的杂波单元不能靠得太近, 二者的方位单元数跨度必须大于阵列因子的主瓣宽度, 否则就不易满足式(8)的近似关系了。可见, 阵列因子的主瓣宽度限定了动目标的最小可检速度。但注意, 这一限制仅适于那些反射强度与相近杂波单元反射强度相当或比之较小的动目标。若动目标反射强度相对于杂波单元而言很大时, 则阵列因子主瓣宽度的限制意义也就不存在了。动目标的最小可检速度将由多普勒滤波器主瓣宽度决定。

已得, 阵列因子主副比越高, 式(8)的近似关系越精确。但从图3看到, 该阵列的阵列因子主副比并不高, 约10dB。当 \mathcal{S} 在一个多普勒通道内存在方位模糊杂波单元或动目标时, 式(8)的近似精度就不会高, 因而由式(9)而进行的 SPIR 空时重构在理论上是不严密的, 但在工程上是有一定重构效果的。下面, 我们就通过仿真实验观察和分析 SPIR 的有效性。

4 SPIR 仿真实验及性能分析

4.1 SPIR 系统仿真设计

SPIR 系统的基本参数如表1所示, 且该多孔径天线阵列沿航迹直线排列。由这些参数可知: 观测角在 $-0.03 \sim 0.03 \text{rad}$ 之间, 这里采用零功率波束宽度作为观测角范围, 即

$$\theta_{\text{FOV}} = 2 \arcsin(\lambda/D)$$

其中 λ 和 D 分别代表波长和单个孔径宽度; 距离分辨率为5m。回波信号仿真需要考虑方位分辨率和脉冲数, 而它们分别与基线长度 L 和脉冲重复频率 PRF 有关, 因此下面先讨论基线长度和 PRF 的设计。

表1 天基 SPIR 系统仿真参数

Tab.1 Spacebased SPIR simulation parameters

孔径数	高度(km)	速度(m/s)	观测斜距(km)	天线尺寸	波长(m)	发射带宽(MHz)
12	750	7481.5	1000	2m 高 1m 宽	0.03	30

已知, 基线长度与方位分辨单元长度成反比, 因而需考虑下面2个方面:

(1)在观测角范围不变的情况下, 方位分辨单元越小, 方位采样数就越多, \mathbf{G} 的维数就越大, 则会导致计算量增大。

(2)我们假设, 在多孔径天线阵飞行不超出一个方位采样间隔(即波束扫描步进长度)期间, 其观测的任一地面单元的反射波具有较强的相干性, 使所接收的回波脉冲串可作相干积累。因此, 方位分辨单元的大小, 限定了脉冲串的相干积累时间。

对于 PRF 的选取, 我们知道, 它的大小将决定方位模糊的次数和脉冲串的数目。当 PRF 降低时, 方位模糊次数增多, 且脉冲数减少, 将导致空时谱上杂波所占空间增大, 而目标检测空间减小了。

由于 SPIR 是在每一距离门上分别完成的, 因而要求距离无模糊。由以上参数知, 方位向观测带是 60km, 距离向观测带约 26.5km, 当 PRF 在 4988Hz 时, 无模糊距离观测宽度约为 30km, 说明此时回波信号在距离向上无模糊, 但方位向模糊 5 次。

设方位采样间隔 400m, 脉冲数 219, 设地面反射系数的幅度和初始相位沿方位向的分布均是高斯随机的, 且各方位单元的仿真回波均带有与单元大小相应的频谱宽度(高斯谱)。多孔径阵列沿航向直线排列, 设第一个孔径天线的相位中心位置为 0, 则由最小冗余阵列设计得到的各孔径相位中心位置是: [0, 8.8802, 9.3736, 10.8536, 15.2938, 20.7206, 23.6807, 27.6274, 28.6141, 31.0809, 37.4944, 44.8946](单位: m), 若两孔径靠得太近, 可考虑将两孔径合并为一个大孔径。

4.2 SPIR 仿真实验

图4(a)画出了回波信号在波束扫描后的空时谱结果 $|\mathcal{S}|$, 利用式(9)恢复地面空时重构图, 其结果如图4(b)所示。我们看到, 在方位角范围中间的3个模糊部分的重构结果较为清晰。被重构出的杂波单元, 一般都是那些反射系数相对较强的地面单元, 而反射系数相对较弱的地面单元则不易被重构出来, 这就为待检目标的反射强度提出了要求。对重构单元(指杂波或动目标)反射强度的要求, 是由于 \mathbf{G}_0 矩阵与对角阵的逼近程度不够造成的, 即阵列因子的主副比不够高, 导致旁瓣的强信号干扰了主瓣弱信号的恢复。还需注意, 图4(b)中的方位单元数比图4(a)的方位单元数少, 这是重构图在方位向两端出现了超强重构带并将之删除后的结果(具体解释此处不赘述)。

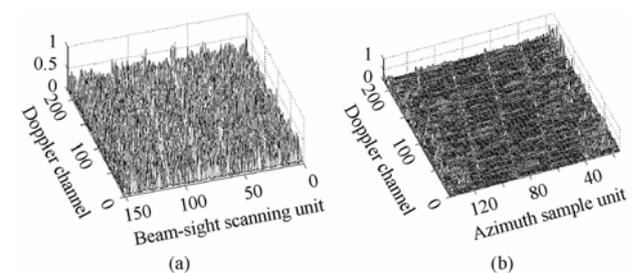


图4 SPIR 空时重构结果(未加入噪声)

(a) SPIR 回波信号空时谱 (b) 地面空时重构图

Fig.4 SPIR recovered ground scene (noise is not rejected in)

(a) SPIR signal spectrum (b) Recovered space-time ground scene

由于阵列因子的主副比决定了重构图的质量, 因此下面先观察阵列因子主副比的提高对重构图质量的改善。

利用方向图综合^[6]的方法, 可以使阵列因子的主副比有少量的提高(约 1dB), 如图5所示。虽然阵列因子的主副比提高很有限(这可能与MRA阵自身特点有关), 但已能对重

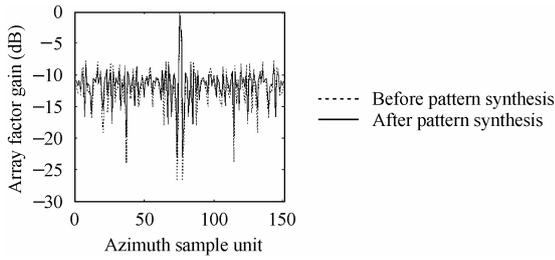


图5 方向图综合后的阵列因子

Fig.5 Array factor after pattern synthesis

构图中的部分失真,如图中杂波位置以外的连片小毛刺,产生了一定的抑制作用,如图6所示,这就为GMTI提供了更有利的环境。

在如图6所示的重构图中,我们已在该地面回波信号中加入了5个动目标的信息,其所在方位采样单元分别为[46, 54, 75, 84, 112],速度均为10m/s(便于在空时重构图中观察,可算得,由阵列因子主瓣宽度限定的动目标最小可检速度为5.95m/s),各动目标所处的多普勒通道分别在[183, 113, 148, 69, 43],其RCS分别为[25, 15, 10, 5, 5]m²,此反射强度分别相当于一个多普勒通道宽度所对应的地面单元(46×5m², RCS=14.3m²)反射强度的[1.75, 1.05, 0.70, 0.35, 0.35]倍。从图中看到,前3个动目标都被重构出来了,这与动目标回波信号相对于同一多普勒通道内的杂波单元来说并不显得弱有很大关系,因为我们已知,在阵列因子主副比不高时,SPIR重构效果与目标反射强度有较大关系。(以下实验中,阵列因子均是指经方向图综合后的阵列因子。)

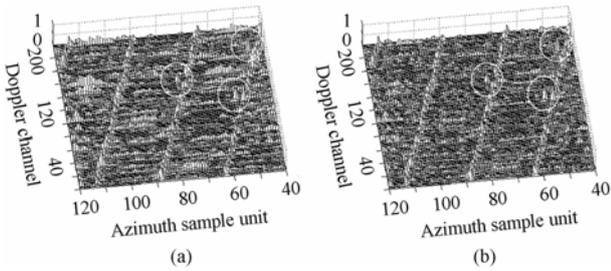


图6 阵列因子主副比提高前后的空时重构结果比较 (注入5个动目标, CNR=40dB)

(a) 阵列因子主副比提高前 (b) 阵列因子主副比提高后

Fig.6 Recover effect difference between before and after increasing mainlobe-to-sidelobe ratio

(5 targets injected, CNR=40dB)

(a) Before increasing mainlobe-to-sidelobe ratio

(b) After increasing mainlobe-to-sidelobe ratio

4.3 SPIR 方法的 GMTI 性能分析

从前面的实验结果看,对于GMTI而言,阵列因子主副比是SPIR方法有效性的最终限制。易知,随着阵列因子主副比的增高, SPIR的地面(及目标)空时重构效果就越好,但同时多普勒滤波器的检测性能也越好;当阵列因子的副瓣增益为0时, SPIR的空时重构效果最好,且没有失真,但此时

对于地面动目标检测而言,它与多普勒滤波器完全等价,显然,多普勒滤波要比SPIR方法简便得多。但是在实际情况阵列因子的主副比不是很高的情况下, SPIR方法还是有它自身的特点的,如在实验结果中可看到, SPIR的空时重构图比回波空时谱(即多普勒滤波输出图)清晰,如图7所示,图中只有最强的两个动目标能被显示出来。

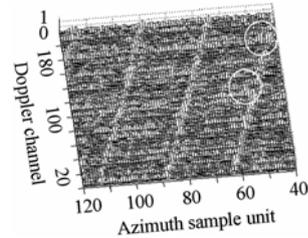


图7 SPIR的回波信号空时谱(与图6相对应)

Fig.7 SPIR signal spectrum(corresponding to Fig.6)

在SPIR方法中的“去卷积”之前,其在任一波束扫描位置时的多普勒滤波输出,就相当于GMTI中的常规空时级联处理,因而我们就想比较SPIR与常规空时级联处理方法的GMTI性能差异。

SPIR空时重构图相对空时谱较清晰的原因可从式(1)、式(9)得出,先将这两式重写出来,即

$$S = GZ$$

$$|Z| \approx |G|^{-1}|S|$$

可看出,重构图|Z|在一定程度上消除了点散布函数矩阵G的影响,而多普勒滤波输出S始终受阵列方向图的影响,因而会较多地受到旁瓣杂波的干扰。所以SPIR将表现出比常规空时级联方法更好的GMTI性能。

下面,我们以图6(b)和图7中波束扫描在第54方位采样单元时以及动目标RCS为15m²的情形为例,比较SPIR与常规空时级联处理的动目标检测性能。由于SPIR是在实数域上完成的,它只能仿真得到信杂噪合成的输出功率或杂噪输出功率,因此我们定义SPIR的输出信杂噪比为

$$SCNR_{out-SPIR} = \frac{\text{信杂噪合成输出功率} - \text{杂噪输出功率}}{\text{杂噪输出功率}}$$

$$= \frac{\text{信杂噪合成输出功率}}{\text{杂噪输出功率}} - 1$$

现在我们可以用改善因子(即输出信杂噪比与输入信杂噪比之比)来衡量SPIR与常规空时级联处理的性能差异。在常规空时级联处理中,一般先对多普勒滤波前作二脉冲对消以滤除该方位向上的主杂波。图8画出了SPIR与常规空时级联处理的改善因子,该图是50次蒙特卡罗实验的平均结果。由此结果得到,常规空时级联方法的改善因子平均为42.0dB, SPIR的改善因子平均为53.7dB,即比常规空时级联方法平均提高11.7dB。

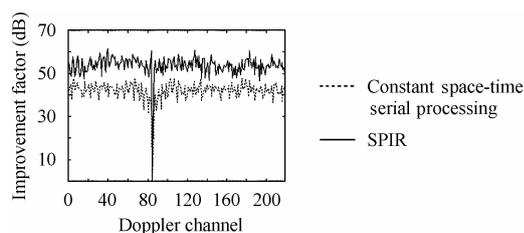


图 8 SPIR 与常规空时级联处理的动目标检测性能比较
Fig.8 GMTI performance comparison between SPIR and constant space-time serial processing

5 结束语

通过对 SPIR 点散布函数矩阵的进一步分解后发现, 由于阵列因子矩阵的形状类似于对角阵, 因此设想到 SPIR 方法在方位模糊时也可能会有有一定的重构效果, 并分析出阵列因子主副比是 SPIR 方法有效性的最终限制。通过实验证明, SPIR 在方位模糊时确实具有一定的空时重构效果和动目标检测能力, 而且 SPIR 的 GMTI 性能会比常规空时级联处理性能好。

参 考 文 献

[1] Klemm R. Space-time adaptive processing: principles and

applications. UK: IEE Press, 1998.

- [2] Marais Karen, J Sedwick Raymond. The development and analysis of scanned pattern interferometric radar. Dissertation for the Degree of Master of Science, MIT, USA, 2001.
- [3] J Sedwick Raymond, L Hacker Troy, Marais Karen. Performance and analysis for an interferometric space-based GMTI radar system. 2000 IEEE International Radar Conference, Alexandria, VA, 2000: 689-694.
- [4] Marais Karen, Sedwick Raymond. Space based GMTI using scanned pattern interferometric radar (SPIR). 2001 IEEE Proceedings of Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2001, (4): 2047-2055.
- [5] Merrill I Skolnik. Radar Handbook. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [6] Guo Q, Liao G, Wu Y, Li J. Pattern synthesis method for arbitrary arrays based on LCMV criterion. *Electronics Letters*, 2003, 39(23): 1628-1630.

宁 蔚: 男, 1976 年生, 博士, 研究方向为机载、星载雷达的地面动目标检测方法研究。

廖桂生: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理、SAR 成像等。