

# 角度模糊对天基稀疏孔径 GMTI 雷达的影响与抑制方法

陆必应, 梁甸农

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 天基稀疏阵实现地面运动目标指示具有很大吸引力. 然而稀疏阵存在栅瓣, 理论分析与仿真结果表明栅瓣会产生盲速和虚假目标. 本文提出一种消除角度模糊影响的简单方法: 首先对均匀稀疏阵阵元位置施加随机误差消除测速盲区; 随后采用陷零空时自适应处理剔除虚假目标. 仿真结果表明该方法稳健、有效.

**关键词:** 天基雷达; 空时自适应处理; 稀疏阵; 角度模糊

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0504-05

## The Angle Ambiguity Effects on Space Based Sparse Aperture GMTI Radar and Mitigation Method

LU Biying, LIANG Dianong

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Ground moving target indicator (GMTI) using space based sparse array is attractive. Unfortunately, grating lobes come with sparse array. Theoretical analysis and experimental results show that grating lobes cause “blind speeds” and “false targets”. A simple method for mitigating the angle ambiguity effects on GMTI performance is presented in this paper. The element positions of uniform array are randomized to reduce blind speed zones. Then the so called “nulling space time adaptive processing (STAP)” method is used to suppress false targets. Experimental results illustrate that the method is robust and effective.

**Key words:** space based radar; space time adaptive processing; sparse array; angle ambiguity

### 1 引言

利用天基雷达系统实现 GMTI 功能近来受到广泛的重视. 采用稀疏孔径可在较小的代价下得到较高的空间分辨率, 且适合于系统的模块化构成, 是提高天基 GMTI 雷达系统性价比的有效手段<sup>[1~5]</sup>. 但这类系统同时存在一些有待解决的问题, 如受天线最小面积限制, 存在距离、多普勒模糊, 稀疏孔径存在栅瓣, 不能正确区分空间回波的角度, 产生角度模糊<sup>[1~4]</sup>.

角度模糊是稀疏阵特有的模糊. 一方面稀疏阵的栅瓣会产生由阵列方向图决定的测速盲区<sup>[1~3]</sup>; 另一方面, 栅瓣方位的杂波和目标可能以另外的速度在其它方位被错误检测, 不能确定真实目标位置和速度, 即产生方位——速度模糊<sup>[3]</sup>. 为成功实现 GMTI, 必须消除角度模糊的影响. 发射频率正交信号是消除模糊的有效手段<sup>[1,2]</sup>, 但会增加系统的复杂度, 且测量自由度的增加也会增加信号处理的压力; 文献[3]研究了基于最大似然参数估计的模糊抑制方法, 但效果不是很理想, 且运算量极大.

空时自适应处理 (Space Time Adaptive Processing,

STAP) 是实现 GMTI 的有效方法<sup>[1~4,8]</sup>. 本文结合 STAP 研究天基稀疏阵角度模糊对 GMTI 性能的影响和基于阵列信号处理理论的消除角度模糊影响的方法, 主要内容安排如下: 第二节简单分析了角度模糊对 GMTI 性能的影响; 第三节研究了基于阵列结构随机化的测速盲区消除方法; 第四节研究了陷零 STAP 虚假目标抑制方法; 第五节对本文提出的消除角度模糊方法进行了仿真分析.

### 2 角度模糊影响分析

离散阵列空间特性最有效的描述是阵列方向图. 由  $M$  个阵元组成的线阵, 第  $m$  个阵元的位置为  $x_m$ , 权值为  $w_m$ , 则阵列方向图可表示成入射角  $\phi$  的函数<sup>[6]</sup>:

$$p(\phi) = \left| \sum_{m=0}^{M-1} w_m^* e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} x_m \sin \phi} \right| \quad (1)$$

其中  $(*)$  表示取共轭,  $\lambda$  为发射电磁波波长. 相邻阵元位置间的距离称为阵元间距, 由文献[6]知: 若阵元间距大于  $\lambda/2$ , 则称该阵列为稀疏阵; 若为均匀稀疏阵, 则存在栅瓣; 若为不规则稀疏阵, 则存在与主瓣幅度接近的旁瓣. 栅瓣和高旁瓣的存在, 无法确定接收回波的实

际方向和角度,即产生了角度模糊。

令阵元沿  $x$  轴分布,目标方位角和俯仰角分别为  $\theta, \varphi$ , 对应的入射锥角为  $\Psi$ , 则有  $\cos \Psi = \cos \theta \cos \varphi$ 。若目标相对于天线相位中心的径向速度为  $v_r$ , 载体沿  $x$  轴运动的速度为  $v$ , 则目标与天线相位中心相对运动产生的多普勒频率  $f_d$  为:

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

其中  $\lambda$  为发射电磁波波长。式(2)表明固定俯仰角  $\varphi$ 、 $v$  和  $\lambda$  回波多普勒频率  $f_d$  是目标径向速度  $v_r$  和方位角度  $\theta$  的函数,即相同的  $f_d$  可能对应不同的  $v_r$  和  $\theta$  的组合,称之为动目标检测的方位——速度模糊。

利用 STAP 法抑制杂波,进行动目标检测时,具有相同多普勒频率的方位——速度组合只能在空域区分。稀疏阵存在栅瓣,若栅瓣恰好指向模糊组合方向,待检测目标与栅瓣杂波就无法区分。可能产生两种结果<sup>[9]</sup>:若训练样本包含栅瓣杂波信息,主瓣目标被栅瓣杂波覆盖,不能有效检测,即产生测速盲区;若训练样本不含栅瓣杂波信息则可能错误地将栅瓣杂波当成主瓣目标,产生虚假目标。栅瓣杂波既有可能是地杂波,也有可能是以其它速度运动的目标,因此即使在 STAP 过程中稀疏阵列的空域栅瓣相对位置是固定的,测速盲区和虚假目标也具有一定的随机性,必须采取有效措施消除角度模糊的影响。

### 3 基于阵列结构随机化的测速盲区抑制

角度模糊与阵列方向图紧密联系,通过阵元位置和阵列结构的优化,综合出良好的方向图是提高 GMTI 性能的有效手段<sup>[2,3,5]</sup>。由文献<sup>[9]</sup>的分析知:对阵元位置施加零均值、方差为五分之一倍平均阵元间距的正态随机扰动可以在保证主瓣增益的前提下实现对高旁瓣方向的有效陷零,也就是说阵元位置的随机化有利于实现对任意方向杂波的抑制(陷零),从而有利于消除角度模糊的影响。

下面从自适应方向图说明随机稀疏阵消除测速盲区的的过程。自适应方向图即自适应滤波器方位——多普勒二维频响特性,是表征空时自适应处理器的有效指标。阵列指向的特定方位和多普勒用空时导向矢量  $S_{s-l}$  表示<sup>[8]</sup>:

$$S_{s-l} = S_t \odot S_s = S(\phi, f_{dn}) \quad (3)$$

其中,  $S_t$  为时间导向矢量,  $S_s$  为空间导向矢量,  $\phi$  为入射角,  $f_{dn}$  为归一化多普勒频率。假设空时处理器针空时导向矢量获得的权值矢量为  $W$ , 自适应方向图  $P_w(\phi, f_{dn})$  定义为:

$$P_w(\phi, f_{dn}) = |W^H S(\phi, f_{dn})| \quad (4)$$

式中  $H$  表示共轭转置。不存在干扰时的自适应方向图

又称为静态方向图;存在干扰时,理想的自适应方向图在干扰方向形成零点,在待测目标所处的方位和多普勒方位形成高增益。自适应方向图多普勒维表示空时处理器的时域特性,方位维表示空时处理器的空域特性。

假设某系统与待检测目标具有相同多普勒频率的杂波方位恰好处于静态自适应方向图栅瓣(或幅度接近栅瓣的旁瓣)位置, STAP 训练样本包含栅瓣杂波信息,则空时处理后得到的自适应方向图如图 1 所示。图中画出的是目标所在方位、多普勒的剖面图。目标所在方位以入射锥角表示,锥角余弦为 0.005,与目标相同多普勒的杂波锥角余弦为 -0.005,目标多普勒为 -350Hz。

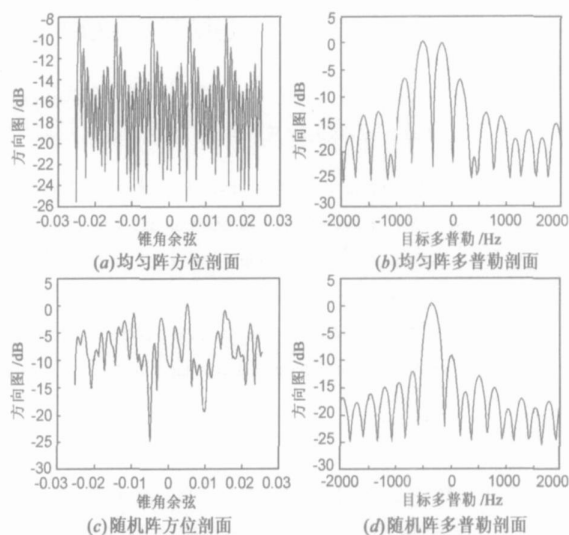


图 1 均匀与随机稀疏阵自适应方向图

图 1 所示的随机阵与均匀阵自适应方向图的根本区别有三点:(1)在与目标具有相同的多普勒频率的杂波方位(锥角余弦 -0.005)产生了深零点;(2)在目标方位(锥角余弦 0.005)保持了较高的增益;(3)在目标多普勒点保持了高增益。上述三点保证了与目标具有相同多普勒的杂波在空域获得了高抑制,与目标多普勒不同的杂波在多普勒域获得了较高的抑制,即通过空域和多普勒域的互补实现了杂波的有效抑制,从而保证了较高的输出信号干扰噪声比(Signal Interference Noise Ratio, SINR),消除了测速盲区。

### 4 陷零法虚假目标抑制

STAP 处理时训练样本的选取更新具有一定的时间间隔性和空间间隔性,稀疏阵某些旁瓣位置杂波信息的遗漏是不可避免的。由第二节分析可知会造成虚假目标,又由第三节分析知随机稀疏阵在保证主瓣增益的前提下可实现任意方向陷零,因而可以抑制虚假目标。下面研究基于波束陷零的虚假目标抑制方法。

基于权值优化的阵列方向图综合和波束形成具有一定的等价关系, 方向图综合和波束形成方法也互相借用<sup>[6,7]</sup>. 从采用时变的权值和时变的波束这一意义上来说, 空时自适应处理的自适应方向图与自适应阵列信号处理的自适应波束具有直接的对应关系, 下面按此思路研究两种具体的波束陷零方法——线性约束空时自适应处理器和干扰陷零法.

#### 4.1 线性约束空时自适应处理器

经典的陷零波束形成器是线性约束最小方差波束形成器, 通过对采用最大 SINR 准则的最小方差波束形成器在陷零方向添加线性约束得到. 最优空时处理器采用最大输出 SINR 准则, 与自适应信号处理中的最小方差波束形成器相对应, 若想实现某方向陷零, 类似地可通过对该方向添加线性约束实现.

对正侧面阵 GMTI 系统, 假设阵列是由  $N$  个阵元构成的线阵, 对  $M$  个脉冲进行相干积累, 待处理单元的入射锥角为  $\Psi_t$ , 目标多普勒为  $f_{dt}$ , 相应的  $NM \times 1$  维空时导向矢量记为  $S(\Psi_t, f_{dt})$ , 杂波和噪声协方差矩阵为  $R_k$ , 则最优空时处理器的权值为<sup>[8]</sup>:

$$W_{k, \text{opt}} = \alpha R_k^{-1} S(\Psi_t, f_{dt}) \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为权值系数, 不影响输出 SINR. 特别地, 取

$$\alpha = (S^H(\Psi_t, f_{dt}) R_k^{-1} S(\Psi_t, f_{dt}))^{-1} \quad (6)$$

则

$$W_{k, \text{opt}} = R_k^{-1} S(\Psi_t, f_{dt}) (S^H(\Psi_t, f_{dt}) R_k^{-1} S(\Psi_t, f_{dt}))^{-1} \quad (7)$$

式(7)表示的最优空时处理器权值与最小方差波束形成器具有完全相同的求解形式<sup>[6,7]</sup>. 假设空时处理器对空时导向矢量  $S(\Psi_b, f_{db})$ ,  $i = 1, 2, \dots, I-1$  方向添加陷零线性约束, 即令

$$W_k^H S(\Psi_b, f_{db}) = f_i, \quad i = 1, 2, \dots, I-1 \quad (8)$$

其中  $|f_i| < 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, I-1$ , 具体值由杂波抑制制度确定. 令  $S_{s-t} = [S(\Psi_b, f_{db}), S(\Psi_b, f_{db1}), \dots, S(\Psi_{b-I-1}, f_{d(I-1)})]^T$ ,  $F = [1, f_1, \dots, f_{I-1}]^T$ , 与线性约束最小方差波束形成器类似, 可将空时处理器表示成如下的形式:

$$\min W_k^H R_k W_k \quad (9a)$$

$$\text{s. t. } W_k^H S_{s-t} = F \quad (9b)$$

式(9)表示的空时处理器与线性约束波束形成器具有相同的数学描述, 本文称之为线性约束空时自适应处理器(Linear Constraints STAP, LCSTAP), 其权值矢量的解为:

$$W_{k, \text{opt}} = R_k^{-1} S_{s-t} (S_{s-t}^H R_k^{-1} S_{s-t})^{-1} F \quad (10)$$

#### 4.2 干扰陷零法

前文已经指出, 在实际系统中, 杂波、噪声协方差矩阵是通过训练样本估计得到的. 若想对某空时导向矢量进行陷零处理, 一个简单的方法是在训练样本中

添加人工干扰, 对杂波、噪声协方差矩阵进行修正. 假设待处理的空时导向矢量为  $S(\Psi_t, f_{dt})$ , 由训练样本得到的杂波、噪声协方差矩阵为  $R_k$ , 若对空时导向矢量  $S(\Psi_i, f_{di})$ ,  $i = 1, 2, \dots, I-1$  方向进行陷零, 则在该方向添加人工干扰, 得新的协方差矩阵:

$$R_{k, i} = R_k + \sum_{i=1}^{I-1} A_i S(\Psi_i, f_{di}) S^H(\Psi_i, f_{di}) \quad (11)$$

其中  $A_i$  为第  $i$  个空时导向矢量对应的人工干扰功率, 其值大小决定了陷零的程度. 用式(11)表示的协方差矩阵代替  $R_k$ , 再利用式(5)即可求得陷零后的空时处理器权值.

#### 4.3 运动目标检测算法

利用陷零法消除虚假目标的前提是对产生虚假目标的方位——多普勒组合进行有效估计, 这需要与目标检测过程结合起来. 下面分析消除模糊影响的运动目标检测步骤.

首先, 设计系统时采用随机化的阵列结构, 可通过对均匀稀疏阵元位置施加随机扰动误差获得, 扰动误差大小以使阵列方向图在保证主瓣固定增益的前提下实现任意方向的有效陷零为标准. 其次, 估计检测结果中动目标的方位——速度模糊组合的空时导向矢量, 再利用波束陷零法进行二次空时处理, 判断目标的真伪. 前文指出, 由栅瓣产生的虚假目标可能有两种不同类型的原始信号引起: 一是栅瓣处的强地杂波, 二是栅瓣处存在不同速度的运动目标. 地杂波可假设为静止目标, 在已知系统参数和处理单元的方位、多普勒频率的前提下, 可直接获得地杂波的空时导向矢量. 对运动目标, 由于存在不同的运动速度, 无法直接获得其方位和速度. 在此作如下假设: 如果某运动目标在其它方位以虚假目标出现, 则该目标本身也能被正确检测. 在此假设下, 由运动目标重复检测产生的虚假目标可通过对检测结果的简单配对得到.

在上述思想下, 得到具体的运动目标检测步骤: 第一步, 对目标场景进行空时自适应处理, 并进行恒虚警检测, 得到原始的运动目标检测结果; 第二步, 确定每个运动目标的合成多普勒频率, 对相同距离单元、不同方位角具有相同或相近多普勒频率的运动目标进行分组; 第三步, 选取分组中某个目标对应的空时导向矢量重新进行空时自适应处理, 对分组中其它目标对应的空时矢量方向陷零, 将输出 SINR 与陷零前输出 SINR 进行比较, 如 SINR 下降超过判决门限, 则判定该目标为虚假目标; 第四步, 重复第三步, 遍历分组中的每个目标和所有的分组, 得到新的运动目标检测结果; 第五步, 对第四步检测结果中的每个运动目标, 计算获得相同多普勒频率的地杂波方位, 对地杂波的空时导向矢量陷零, 再进行空时自适应处理, 采用与第三步相同的

方法对目标进行二次判断, 去除虚假目标, 得到最终的运动目标检测结果。

## 5 仿真结果与解模糊效果分析

### 5.1 空时处理器输出 SINR 分析

下面结合空时处理器输出 SINR 和运动目标检测结果分析阵列方向图综合和波束陷零法对 GMTI 性能的改善。首先从空时处理器输出 SINR 分析阵列结构随机化消除测速盲区的有效性。

假设某天基稀疏阵 GMTI 雷达系统由五个不同结构的线阵构成, 基准阵列为阵元间距为 100 倍波长的均匀稀疏阵, 分别对阵元位置施加零均值正态分布随机扰动, 扰动误差方差分别为 0、1/20、1/10、1/5 和 2/5 倍阵元间距。阵列轴线与卫星运动速度方向相同, 卫星绕轨运行速度为 7km/s, 阵元是具有相同特性的方位孔径为 4m 的子天线。雷达工作波长 0.2m, 发射脉冲重复频率 4kHz, 不存在多普勒模糊, 假设系统不存在距离模糊。采用正侧面观测几何, 观测区域的俯仰角在  $\pi/3$  弧度附近, 方位角由阵元天线的方位角决定。采用等功率杂波模型和高斯白噪声模型, 单个阵元单脉冲的输入杂波噪声比 (Clutter Noise Ratio, CNR) 44dB, 信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 为 3dB, 相干积累脉冲数目  $M=8$ , 训练样本包含处理单元外的所有方位的杂波信息。对俯仰角为  $\pi/3$  弧度、方位角为 0.01 弧度处目标进行 STAP 处理, 目标最大径向速度为  $\pm 100\text{m/s}$ , 结果如图 2 所示。

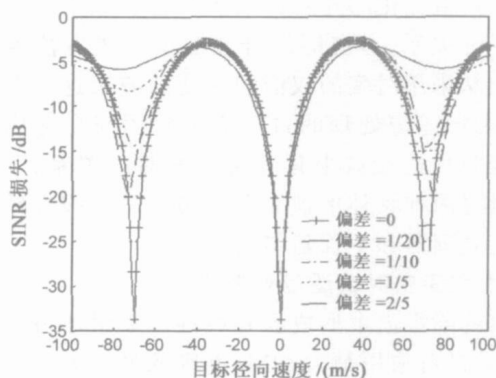


图 2 不同结构阵列对应的速度—SINR

图 2 的结果表明随着阵元间距随机性的增强, 可有效改善特定速度对应的输出 SINR 损失, 消除测速盲区; 另外, 理论分析与仿真结果表明空时处理器自适应方向图与阵列方向图有确定的对应关系。这两个特性保证了可以通过阵元位置优化来消除栅瓣引起的测速盲区。

接着分析波束陷零法虚假目标抑制效果。对图 2 所示的五个阵列, 取阵元位置扰动误差方差为 1/5 倍阵元间距的随机阵。在相同的系统参数和试验条件下, 假设目标运动和载体运动合成的目标多普勒频率为 100Hz, 固定此多普勒频率, 对俯仰角为  $\pi/3$  弧度的距离单元进行方位扫描 STAP 处理, 扫描角度从 -0.05 弧度到 0.05 弧度, 对应的入射锥角为 -0.025 弧度到 0.025 弧度。假设训练样本中不包含运动目标信息, 输出信噪比 (此处的信号特指场景中唯一的运动目标) 如图 3(a) 所示。

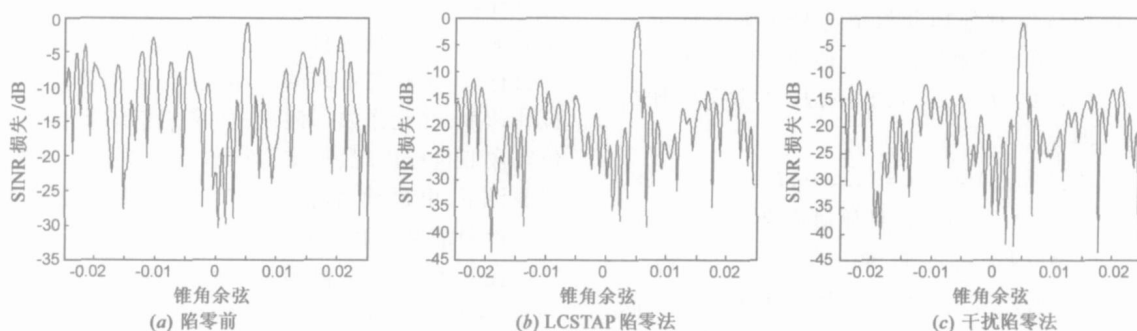


图 3 波束陷零前后不同方位相同多普勒空时处理的输出 SINR

由图 3(a) 的结果可见, 空时处理器除在目标方位获得最大输出 SINR 外, 在其它方位也存在较高的输出 SINR, 在后续的目标检测中很难区分, 造成错误判断。

当空时处理器的空时导向矢量不指向目标时, 对运动目标所处的空时导向方向进行陷零处理。在理想空时导向矢量的情况下, 陷零后非目标方向能获得优于 -40dB 的输出 SINR。实际系统中, 产生虚假目标的杂波空时导向矢量是通过检测结果估算得到, 存在一定的误差。在估计产生虚假目标的杂波空时导向矢量时, 一般认为其多普勒频率与待检测目标的多普勒频率相同, 在此令多普勒频率误差为估计值的 1/10; 方位角通

过系统参数估计得到, 假设最大方位误差为阵列方位分辨率的一半 (自适应方向图方位向剖面主瓣 3dB 宽度的一半), 此时两种陷零方法得到的不同方位空时处理器对应的输出 SINR 分别如图 3(b)、(c) 所示, 二者具有接近的性能。可见即使存在较大的空时导向矢量估计误差, 波束陷零法仍然有显著的虚假目标抑制效果。实际应用中, 以估计出的虚假目标空时导向矢量为中心, 添加多个线性约束条件, 或施加多个临近空时导向矢量的人工干扰, 可进一步提高虚假目标抑制效果。

### 5.2 运动目标检测结果

最后通过具体的天基稀疏阵 GMTI 仿真结果对本

文的方法进行评估。在前述系统参数和观测几何下, 感兴趣区域的俯仰角在  $59^\circ$  到  $60^\circ$  之间, 方位角在  $87^\circ$  到  $93^\circ$  之间。假设待检测运动目标径向速度在  $\pm 100\text{m/s}$  之间, 检测区域内共有六个目标, 对应的俯仰角和方位角分别为  $[59.89^\circ \ 91.78^\circ]$ 、 $[59.89^\circ \ 88.57^\circ]$ 、 $[59.70^\circ \ 89.71^\circ]$ 、 $[59.55^\circ \ 90.97^\circ]$ 、 $[59.55^\circ \ 89.71^\circ]$ 、 $[59.25^\circ \ 88.57^\circ]$ , 径向运动速度分别为  $15\text{m/s}$ 、 $25\text{m/s}$ 、 $-20\text{m/s}$ 、 $-15\text{m/s}$ 、 $20\text{m/s}$ 、 $20\text{m/s}$ 。六个目标回波对应的 SNR 分别为  $7\text{dB}$ 、 $0\text{dB}$ 、 $0\text{dB}$ 、 $3\text{dB}$ 、 $3\text{dB}$ 、 $3\text{dB}$ , 目标的具体位置如图 4(a) 所示。

首先考虑阵元间距为 100 倍波长的均匀稀疏阵, 直接检测和陷零处理的结果如图 4(b)、4(c) 所示。可见直接检测存在大量的虚假目标, 且有一个目标漏检, 采用波束陷零只检测到 2 个目标, 其它目标漏检。

对上述阵列阵元位置施加零均值, 方差为 20 倍波长的正态随机误差, 得到的随机阵列的阵元间距为  $[105.89 \ 73.28 \ 114.29 \ 132.47 \ 86.16 \ 117.16 \ 125.08 \ 68.13 \ 71.18 \ 111.42] \lambda$ , 并进行陷零处理, 其结果如图 4(d) 所示。可见, 阵元位置随机扰动加波束陷零成功地检测出所有真实目标, 消除了虚假目标。

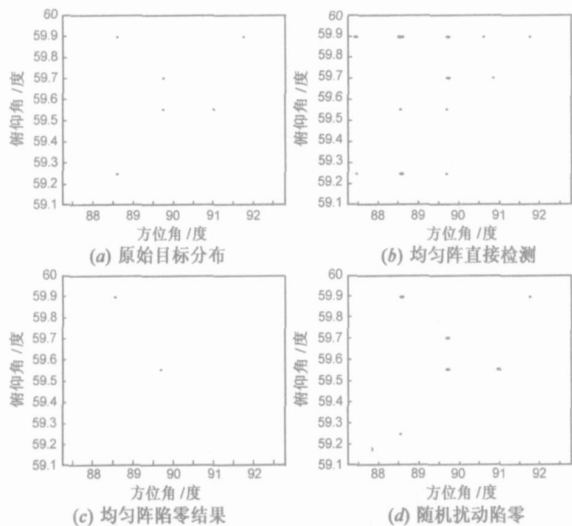


图 4 原始目标分布与检测结果 ( $P_f=10^{-6}$ )

需要指出的是, 存在空时导向向量估计误差的情况下, 线性约束 STAP 与人工干扰 STAP 具有非常接近的性能, 而后者具有较小的计算量, 可采用一般 STAP 结构与算法, 更利于系统的实现。

## 6 结论

本文以天基雷达实现 GMTI 功能为应用背景, 分析了稀疏阵角度模糊对 GMTI 性能的影响, 研究了基于阵

列信号处理方法的模糊抑制方法。理论分析和仿真结果表明: 由于 STAP 的训练样本具有一定的空间间隔和时间间隔, 稀疏阵栅瓣杂波既可能产生测速盲区, 又可能形成虚假目标; 基于阵列结构随机化的方向图综合可消除测速盲区; 陷零空时自适应处理能抑制随机稀疏阵旁瓣杂波产生的虚假目标。

## 参考文献:

- [1] Garnham J, Wwinwright R, Brms R. Enabling research and development for flight demonstration of sparse aperture sensing [A]. Proceedings of 2001 AIAA [C]. NM: Albuquerque Press, 2001. 13–17.
- [2] Leatherwood D A, Melvin W L, Garnham J. High fidelity MTI modeling and analysis of a distributed aperture spaceborne concept [A]. Proceedings of 2000 AIAA [C]. CA: Long Beach Press, 2000. 117–120.
- [3] Goodman N A. SAR and MTI Processing of Sparse Satellite Clusters [D]. Kansas: The University of Kansas, 2002.
- [4] 保铮. 对于分布式小卫星群天基雷达信号处理一些基本问题的思考 [A]. 第九届全国雷达学术年会论文集 [C]. 烟台: 海军航空工程学院, 2004. 20–22.
- [5] Steyskal H, Schindler J K. Separable space time pattern synthesis for the techsat21 space based radar system [A]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference [C]. SNHA: Air Force Research Laboratory Press, 2003. 955–959.
- [6] Johnson D H, Dudgeon D E. Array Signal Processing: Concepts and Techniques [M]. New York: Prentice Hall Press, 1993.
- [7] 何振亚. 自适应信号处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 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.
- [9] 陆必应. 天基 GMTI 与解模糊方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.

## 作者简介:



陆必应 男, 1976 年 12 月生于安徽舒城, 博士, 获国家、部委科技进步二等奖各 1 项, 在各类核心期刊发表学术论文 20 余篇, 研究方向为雷达系统与雷达信息处理。

E-mail: joelu76@yahoo.com.cn

梁甸农 男, 1936 年生, 湖南涟源人, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事超宽带雷达、天基分布式雷达系统理论和自适应信号处理研究。