

# 分布式卫星 SAR 的波束形成和多视处理成像<sup>1</sup>

雷万明 刘光炎 黄顺吉

(电子科技大学电子工程学院 701-4 成都 610054)

**摘要** 针对分布式卫星 SAR 的正侧视工作模式, 该文建立了雷达信号的回波模型, 提出了分布式卫星 SAR 中单个星载 SAR 的成像算法和利用波束形成和多视处理合成分布式卫星 SAR 图像的算法。理论分析和仿真结果表明: 该算法能在不改变图像分辨力的情况下提高图像的信噪比和抑制相干斑, 改善图像质量。

**关键词** 分布式卫星 SAR, 正侧视, 波束形成, 多视处理, 相干斑

**中图分类号** TN951

## 1 引言

由一族小的群聚卫星组成的分布式卫星 SAR 系统是最近提出的面向 21 世纪的新的 SAR 系统<sup>[1]</sup>。在这种系统中, 每颗卫星沿各自的轨道绕地球飞行, 卫星之间的相对位置保持不变, 每颗卫星都是一个标准的 SAR 系统, 但通过对收集的数据进行阵列信号处理能实现一颗虚拟卫星的功能。

分布式卫星 SAR 是由多个星载 SAR 组成的系统, 工作方式多种多样, 结构和几何布局能根据任务的不同进行不同的组合, 具有传统 SAR 无法比拟的优越性。与常规的星载 SAR 相比, 分布式卫星 SAR 提供了多个天线和多个基线的不同组合, 这些不同的组合将有利于前视成像的方位解模糊和三维成像的相位解模糊; 利用阵列信号处理所固有的抗干扰性质, 将分布式卫星 SAR 视为稀疏天线阵, 能提高分布式卫星 SAR 的抗干扰和动目标检测及成像能力; 在正侧视模式下, 分布式卫星 SAR 收集到的数据除了距离 - 多普勒信息外, 还有目标到达角的信息, 利用这些信息有利于改善成像质量。

本文针对一个由 8 颗卫星组成的分布式卫星 SAR 系统, 在正侧视工作模式下, 建立了雷达信号的回波模型, 提出了单个星载 SAR 的成像算法和利用波束形成和多视处理合成分布式卫星 SAR 图像的算法。理论分析与仿真结果表明, 与传统的单个星载 SAR 相比, 分布式卫星 SAR 能在不影响分辨力的情况下提高信噪比和抑制相干斑, 使成像质量得到明显改善, 展示了分布式卫星 SAR 潜在的良好应用前景。

## 2 分布式卫星 SAR 的工作模式和回波模型

### 2.1 工作模式

如图 1 所示, 设分布式卫星 SAR 系统由 8 颗小卫星 ( $s_1, s_2, \dots, s_8$ ) 组成, 整个小卫星按等分角度群聚组合在以虚拟卫星  $s_v$  为圆心, 直径  $D = 240\text{m}$  的圆周平面上, 此群聚平面并不完全垂直于虚拟卫星地球轨道平面, 而是与虚拟卫星地球轨道平面的垂直面保持一个固定的夹角  $\alpha$  (也称群聚平面仰角)。

当虚拟卫星  $s_v$  以速度  $v$  沿某一地球轨道运行时, 处于群聚平面内的小卫星组合以同样的速度沿此地球轨道运行, 每颗小卫星之间及它们与虚拟卫星  $s_v$  之间的相对几何关系始终保持不变, 包括  $\alpha$  角, 小卫星组合同时沿它们的分布式圆周绕虚拟卫星  $s_v$  移动, 每颗小卫星绕虚拟卫星  $s_v$  一周的周期  $T_v$  恰好等于虚拟卫星  $s_v$  绕地球轨道一周的周期  $T_e$ 。分布式卫星 SAR 系统的信号由单颗卫星的 SAR 发射, 但 8 颗卫星的 SAR 同时接收, 并且信号的发射按轨道由每

<sup>1</sup> 2001-04-13 收到, 2001-11-22 定稿

颗卫星的 SAR 轮流进行, 即在群聚卫星绕地球飞行一周的行程中, 由一颗卫星的 SAR 发射信号, 全部的星载 SAR 进行接收, 但在下一次绕行时, 发射信号的 SAR 将轮换成另外一颗卫星的 SAR。

分布式卫星 SAR 的结构决定了它的工作模式多种多样, 可根据任务进行改变, 本文仅研究群聚卫星的波束不扫描, 到地面的投射角保持不变, 在正侧视工作模式下的 SAR 成像问题, 且假设群聚卫星每 90min 绕虚拟卫星转一圈。

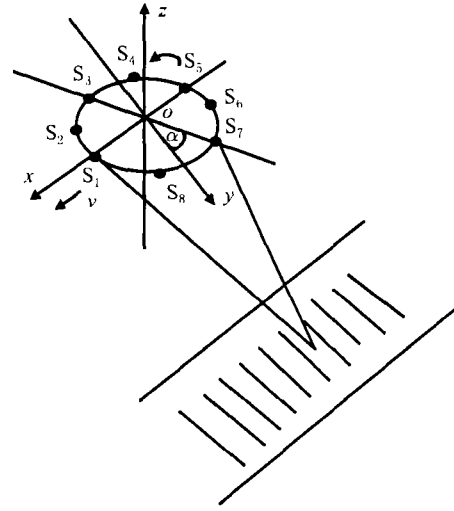


图 1 分布式卫星 SAR(正侧式)

## 2.2 雷达信号的回波模型

如图 1 所示, 分别以地心和虚拟卫星为中心, 建立相对地心坐标系  $X, Y, Z$  和群聚坐标系  $x, y, z$ 。群聚坐标系的  $x$  轴指向虚拟卫星的飞行方向,  $y$  轴指向正侧视方向,  $z$  轴与  $x$  轴和  $y$  轴构成右手坐标系。设  $s = 0$  时刻地面目标  $T$  位于发射信号星载 SAR 的方位波束中心线上, 在相对地心坐标系下的位置矢量为  $\mathbf{R}_t$ , 虚拟卫星的位置矢量为  $\mathbf{R}_v$ 。考虑到地球自转的影响, 设相对地心坐标系下地面目标  $T$  的速度矢量和加速度矢量分别为  $\mathbf{v}_T$ ,  $\mathbf{a}_T$ , 虚拟卫星的速度矢量和加速度矢量分别为  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{a}$ , 则随着群聚卫星的运动, 虚拟卫星和地面目标  $T$  在相对地心坐标系中的位置也将随时间发生变化,  $s$  时刻虚拟卫星和地面目标  $T$  在相对地心坐标系下的位置矢量分别为

$$\mathbf{R}_v(s) = \mathbf{R}_v + \mathbf{v}s + \mathbf{a}s^2/2 \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_t(s) = \mathbf{R}_t + \mathbf{v}_T s + \mathbf{a}_T s^2/2 \quad (2)$$

由于群聚卫星与虚拟卫星之间存在位置差, 使地面目标  $T$  到每颗卫星的距离矢量都不同, 且当群聚卫星绕虚拟卫星作旋转飞行时, 每颗卫星相对于虚拟卫星的位置也随时间发生变化, 这些变化将影响群聚卫星与地面目标  $T$  之间的距离矢量, 使同一目标产生不同的多普勒频移, 下面分别进行分析。

**2.2.1 群聚卫星静止不动** 这种情况下, 群聚卫星与虚拟卫星的位置关系在整个飞行过程中保持不变。设发射信号的星载 SAR 和接收信号的星载 SAR 在群聚坐标系中的位置矢量为  $\mathbf{P}_t$  和  $\mathbf{P}_r$ , 则  $\mathbf{P}_t$  和  $\mathbf{P}_r$  的关系可表示为  $\mathbf{P}_r = \mathbf{P}_t + \Delta\mathbf{P}$ 。由群聚卫星与地面目标  $T$  之间的相对几何关系,  $s$  时刻地面目标  $T$  和发射信号的星载 SAR 及接收信号的星载 SAR 的距离分别为

$$R_T(s) = |\mathbf{R}_t(s) - \mathbf{R}_v(s) - \mathbf{P}_t| \quad (3)$$

$$R_R(s) = |\mathbf{R}_t(s) - \mathbf{R}_v(s) - \mathbf{P}_r| \quad (4)$$

雷达信号从发射信号的星载 SAR 发出, 到达地面目标, 然后被地面目标反射到接收信号的星载 SAR, 所经过的总距离为  $R(s) = R_T(s) + R_R(s)$ 。如果用  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_t - \mathbf{R}_v - \mathbf{P}_t$  表示  $s = 0$  时刻, 位于发射信号星载 SAR 方位波束中心线上目标的距离矢量,  $\mathbf{V} = \mathbf{v}_T - \mathbf{v}$  和  $\mathbf{A} = \mathbf{a}_T - \mathbf{a}$

表示发射信号的星载 SAR 与地面目标的相对速度和加速度矢量, 则将前面各式代入距离表达式  $R(s)$ , 有

$$R(s) = |\mathbf{R} + \mathbf{V}s + \mathbf{A}s^2/2| + |\mathbf{R} - \Delta\mathbf{P} + \mathbf{V}s + \mathbf{A}s^2/2| \quad (5)$$

相应地, 地面目标的相位史为

$$\Phi(s) = (2\pi/\lambda)R(s) \quad (6)$$

其中  $\lambda$  为雷达波长. 将  $R(s)$  在  $s = 0$  时刻展开成泰勒级数并忽略高次项的影响后,  $R(s)$  可表示为

$$R(s) = a_1s + a_2s^2 + d \quad (7)$$

系数  $a_1$ ,  $a_2$  和  $d$  分别为

$$a_1 = 2\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}/|\mathbf{R}| - \Delta\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}/(2|\mathbf{R}|) \quad (8)$$

$$a_2 = [2|\mathbf{V}|^2 + (2\mathbf{R} - \Delta\mathbf{P}) \cdot \mathbf{A}]/(2|\mathbf{R}|) \quad (9)$$

$$d = (|\Delta\mathbf{P}|^2 - 2\Delta\mathbf{P} \cdot \mathbf{R}/(2|\mathbf{R}|) + 2|\mathbf{R}|) \quad (10)$$

对地表上的静止目标而言, 由于地球自转的加速度非常小, 且群聚卫星之间的距离与群聚卫星到地面的距离相比也非常小, 因而 (9) 式和 (10) 式可近似为

$$a_2 \approx (|\mathbf{V}|^2 + \mathbf{R} \cdot \mathbf{A})/|\mathbf{R}| \quad (11)$$

$$d \approx (-\Delta\mathbf{P} \cdot \mathbf{R}/|\mathbf{R}|) + 2|\mathbf{R}| \quad (12)$$

根据上述近似, 由 (6), (7) 式可知, 任一星载 SAR 的多普勒参数为

$$f_{\text{DC}} = -(2/\lambda)(\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}/|\mathbf{R}|) + (1/\lambda)(\Delta\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}/|\mathbf{R}|) \quad (13)$$

$$f_{\text{DR}} = -(1/\lambda)(2|\mathbf{V}|^2 + 2\mathbf{R} \cdot \mathbf{A})/|\mathbf{R}| \quad (14)$$

当  $\Delta\mathbf{P} = 0$  时, 发射和接收信号是同一个星载 SAR, 由星载 SAR 的正侧视回波模型和 (13), (14) 式可知, 发射信号的星载 SAR 工作在标准的正侧视模式. 当  $\Delta\mathbf{P} \neq 0$  时, 发射和接收信号为不同的星载 SAR, 尽管发射和接收信号的星载 SAR 都处于正侧视模式, 但发射和接收波束的共同作用, 使接收信号的星载 SAR 实际处于斜视模式, 斜视产生的多普勒质心为  $(1/\lambda)(\Delta\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}/|\mathbf{R}|)$ .

**2.2.2 群聚卫星绕虚拟卫星旋转** 卫星的运动可以由 6 个自由度参量描述, 其中, 3 个自由度为卫星质心的运动, 属轨道问题, 另 3 个自由度刻划卫星绕自身质心的转动状态, 属姿态问题. 当群聚卫星绕虚拟卫星作旋转飞行时, 由于整个群聚卫星也在飞行, 如果将群聚卫星不旋转时的轨道看作标准轨道, 则每颗卫星实际上是以固定的频率沿标准轨道作摆动飞行. 由前面的假设, 群聚卫星每 15s 绕虚拟卫星转  $1^\circ$ , 摆动频率与雷达的脉冲重复频率相比非常低, 因而在方位数据处理块长度内, 摆动产生的速度和加速度可视为常数.

设  $s = 0$  时刻地面目标位于发射信号星载 SAR 方位波束中心线上, 发射和接收信号的星载 SAR 在群聚坐标系中的位置为  $\mathbf{P}_t$  和  $\mathbf{P}_r$ , 群聚卫星旋转产生的相对于群聚坐标系的速度矢量为  $\mathbf{v}_t$  和  $\mathbf{v}_r$ , 加速度矢量为  $\mathbf{a}_t$  和  $\mathbf{a}_r$ , 则  $s$  时刻发射和接收信号的星载 SAR 在群聚坐标系中的位置为

$$\mathbf{P}_t(s) = \mathbf{P}_t + \mathbf{v}_t s + \mathbf{a}_t s^2/2 \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_r(s) = \mathbf{P}_r + \mathbf{v}_r s + \mathbf{a}_r s^2/2 \quad (16)$$

如果用  $\Delta P = P_r - P_t$  表示初始时刻两卫星之间的位置差,  $\Delta V = v_r - v_t$  和  $\Delta A = a_r - a_t$  表示两卫星旋转速度和加速度之差. 将 (3) 式和 (4) 式中的  $P_t$  和  $P_r$  替换成 (15), (16) 式, 利用 (5), (6) 式经过类似前面的推导可得星载 SAR 的多普勒参数为

$$f_{DC} = -(2/\lambda)(\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}/|\mathbf{R}|) + (1/\lambda)[\mathbf{R} \cdot \Delta \mathbf{V} + \Delta \mathbf{P} \cdot (\mathbf{V} - \Delta \mathbf{V})]/|\mathbf{R}| \quad (17)$$

$$f_{DR} = -(1/\lambda)(2|\mathbf{V}|^2 + 2\mathbf{R} \cdot \mathbf{A})/|\mathbf{R}| \quad (18)$$

其中  $\mathbf{V} = \mathbf{v}_T - \mathbf{v} - \mathbf{v}_t$  和  $\mathbf{A} = \mathbf{a}_T - \mathbf{a} - \mathbf{a}_t$  是发射信号的星载 SAR 与地面目标的相对速度和加速度矢量. 地面目标的多普勒参数是由目标与卫星之间的相对速度矢量和距离矢量决定的, 如果将群聚卫星的旋转视为地球自转不均匀的结果, 则由于  $(1/\lambda)\mathbf{R} \cdot \Delta \mathbf{V}/|\mathbf{R}|$  非常小, (17) 式可表示为

$$f_{DC} = -(2/\lambda)(\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}/|\mathbf{R}|) + (1/\lambda)(\Delta P_1 \cdot \mathbf{V}/|\mathbf{R}|) \quad (19)$$

其中  $\Delta P_1 = \Delta P - (\Delta \mathbf{V} \cdot \Delta \mathbf{P})\mathbf{V}/|\mathbf{V}|^2 + (\mathbf{R} \cdot \Delta \mathbf{V})\mathbf{V}/|\mathbf{V}|^2$ . 比较 (13) 式和 (19) 式可知, 尽管群聚卫星在飞行过程中存在绕虚拟卫星的旋转运动, 但在方位数据处理块长度内, 群聚卫星在群聚坐标系中的位置可视为静止不动的, 卫星的旋转对信号处理没有影响, 旋转所产生的几何畸变可在图像后处理时进行校正.

由 (19) 式可知, 分布式卫星 SAR 中单个星载 SAR 的多普勒质心由两部份组成, 第一部份是地球自转产生的多普勒质心, 它是发射信号星载 SAR 的多普勒质心. 第二部份是接收和发射信号的星载 SAR 处于不同卫星的结果, 它相当于斜视产生的多普勒质心. 如果用  $f_{TDC}$  表示发射信号星载 SAR 的多普勒质心, 则任一星载 SAR 的多普勒质心为

$$f_{DC} = f_{TDC} + \Delta f_{DC} \quad (20)$$

当发射和接收是同一个星载 SAR 时  $\Delta f_{DC} = 0$ .

利用多普勒参数和距离表达式 (7), 任一星载 SAR 的回波总历程为

$$R(s) = -\lambda f_{DC}s - (\lambda/2)f_{DR}s^2 + d \quad (21)$$

$d$  由 (12) 式决定, 它与目标到发射信号星载 SAR 的距离和卫星之间的相对位置有关, 同一距离波门的  $d$  相同. 忽略 sinc 函数的宽度, 点目标回波经距离压缩后为

$$s(s, t) = \sigma \delta(t - R(s)/c) \exp(-j2\pi R(s)/\lambda) \quad (22)$$

其中  $s$  表示慢变化时间,  $t$  表示距离向时间,  $\sigma$  是由目标的反射系数、发射和接收天线增益决定的系数.

### 3 图像合成及图像质量的提高

**3.1 波束形成和多视处理成像** 分布式卫星 SAR 是由多个星载 SAR 组成的系统, 每个星载 SAR 都能通过回波成像, 但从前面的分析可知, 它们的成像模式不同, 因而它们的方位向信号处理也须考虑这种差异.

在星载 SAR 成像中, 当分辨力较高时会使地面目标的回波产生距离徙动, 使地面目标在方位向位于不同的距离波门, 方位压缩前必须进行距离徙动校正. 距离徙动由距离走动和距离弯曲组成, 距离走动是多普勒质心不为零的结果, 因而当星载 SAR 处于斜视成像模式时, 距离走动由地球自转和斜视产生. 由于两种距离走动产生的机理不同, 导致两种走动在时域和频域的差异. 当斜视产生的多普勒质心较大或方位数据处理块较长时, 在时域校正斜视产生的距离走动会使图像散焦和产生几何失真, 而地球自转产生的距离走动则与之相反, 适合在时域校正.

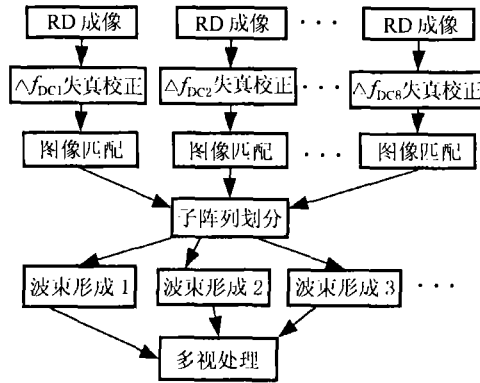


图 2 分布式卫星 SAR 波束形成和多视处理流程

由 (19) 式可知,  $f_{TDC}$  是发射信号星载 SAR 的多普勒质心,  $\Delta f_{DC}$  是斜视产生的多普勒质心, 它们都能从雷达回波中估计出来.  $\Delta f_{DC}$  由分布式卫星 SAR 的几何参数和雷达波长决定, 在本文的假设下, 它的值比雷达脉冲重复频率小得多, 如果在时域校正  $\Delta f_{DC}$  产生的距离走动, 只会使图像产生几何失真, 而不会使图像散焦, 因而可用距离-多普勒 (RD) 算法进行成像<sup>[2]</sup>. 由  $\Delta f_{DC}$  产生的几何失真可在方位压缩后进行校正, 实现流程如图 2 上面部份所示.

在星载 SAR 成像中, 卫星的摄动和绕动会引起图像之间的误匹配, 如果对每个星载 SAR 的图像进行匹配, 则匹配后的图像像素可表示成下面的矢量形式:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{a}(r) + \mathbf{N} \quad (23)$$

其中  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_8)^T$  表示地面上点  $(x, r)$  所对应的复像素值矢量,  $\mathbf{N}$  是系统的杂波和噪声构成的矢量,  $\mathbf{A}$  是目标的后向反射系数矩阵,  $\mathbf{a}(r)$  为目标的阵列响应, 它们的值分别为

$$\mathbf{A} = \text{diag}(\sigma_1(x, r), \sigma(x, r), \dots, \sigma_8(x, r)) \quad (24)$$

$$\mathbf{a}(r) = (\exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}d_1), \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}d_2), \dots, \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}d_8))^T \quad (25)$$

同常规的星载 SAR 相比, 每个像素值除了表示目标回波功率外, 还含有目标到达角信息, 通过波束形成和多视处理对这些信息加以利用, 将能改善 SAR 图像的信噪比和抑制相干斑.

将 8 颗卫星构成的阵列划分成子阵列, 当目标反射回波与杂波和系统噪声不相关时, 第  $i$  个子阵列同一距离门的相关矩阵为

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H] = p\mathbf{a}_i(r)\mathbf{a}_i^H(r) + \mathbf{R}_N \quad (26)$$

其中  $\mathbf{R}_N$  是杂波和噪声的相关矩阵,  $\mathbf{X}_i$ ,  $\mathbf{a}_i(r)$  和  $p$  分别表示子阵列对应的像素值矢量、阵列响应和回波平均功率. 通过对  $\mathbf{R}$  进行特征值分解可得  $\mathbf{a}_i(r)$  的估计  $\hat{\mathbf{a}}_i(r)$ , 然后利用波束形成合成第  $i$  个子阵列的图像. 对这些子阵列图像进行多视叠加, 能合成分布式卫星 SAR 的图像, 处理流程如图 2 下面部份所示.

### 3.2 图像质量的提高

将 8 颗卫星构成的稀疏阵列进行重叠划分构成子阵列, 每个子阵列由  $M$  颗卫星构成, 即分别取子阵列权值为  $\mathbf{W}_1 = (\bar{w}_1, \dots, \bar{w}_M)$ ,  $\mathbf{W}_2 = (\bar{w}_2, \dots, \bar{w}_{M+1}), \dots$ , 由相应的卫星构成  $8 - M + 1$  个子阵列. 对每个子阵列的 SAR 图像进行波束合成, 第  $i$  个子阵列合成图像的信噪比为

$$\text{SNR}_i = S_i/N_i = [p\mathbf{W}_i^H \mathbf{a}_i(r)\mathbf{a}_i^H(r)\mathbf{W}_i]/[\mathbf{W}_i^H \mathbf{R}_N \mathbf{W}_i] \quad (27)$$

当杂波和系统噪声为高斯白噪声时, 上式变为

$$\text{SNR} \approx Mp/\sigma^2 = \text{MSNR}_s \quad (28)$$

其中  $\text{SNR}_s = P/\sigma^2$  表示波束形成前单个星载 SAR 图像的信噪比。将  $8 - M + 1$  幅图像进行多视处理以抑制相干斑, 则经过多视处理后的等效视数 ENL 为

$$\text{ENL} = \sqrt{\frac{8 - M + 1}{(1 + 1/\text{SNR}_i)^2 + (1/\text{SNR}_i)^2}} \quad (29)$$

从 (28) 式和 (29) 式可知, 通过波束形成和多视处理合成的图像与单个星载 SAR 图像相比, 无论是信噪比还是抑制相干斑噪声的能力都有很大提高, 并且信噪比与等效视数可进行折衷, 使合成图像质量达到最优。

## 4 仿 真

根据前面所述波束形成和多视处理算法, 本文对分布式卫星 SAR 系统进行了仿真, 仿真参数为: 8 颗卫星成等角分布在直径为 240m 的圆周上, 群聚平面与地面平行, 卫星  $s_1$  位于  $x$  轴正半轴上, 群聚卫星每 90min 绕虚拟卫星转一圈, 虚拟卫星的参数如下所示:

卫星轨道高度: 632589m,      卫星速度: 7450m/s,  
 天线尺寸: 9m(方位向), 3.4m(距离向), 波长: 0.24m,  
 分辨力: 5m×5m,      测绘带宽: 50km,  
 观察角: 43°(偏星下),      带宽: 60MHz,  
 发射脉宽: 33μs,      采样率: 66MHz,  
 脉冲重复频率: 2000Hz      孔径时间: 3.096s,

由卫星  $s_1$  的 SAR 发射信号, 8 颗卫星的 SAR 同时接收回波, 方位向取 8192 点, 距离向取 4096 点采样进行成像实验, 且利用汉明加权进行方位压缩。

将 8 颗卫星重叠划分为 4 个子阵列, 先进行子阵列的波束形成, 然后进行多视处理, 表 1 是几种处理方法方位压缩结果的比较。由于 8 个星载 SAR 的图像都要保存, 数据量相当大, 在计算表中积分旁瓣比时, 按工程应用上的定义, 仅在主瓣过零点外各取了 10 倍多的方位分辨单元进行计算, 表中信噪比是指原始数据的信噪比。从表 1 可知, 通过波束形成与多视处理, 可提高图像的峰值旁瓣比和积分旁瓣比, 改善图像的信噪比和抑制相干斑噪声, 有利于图像的后处理。图 3 是原始数据信噪比为 -25dB 时, 通过波束合成与多视处理后的点目标图像。

## 5 结 论

分布式卫星 SAR 系统是一个由多个星载 SAR 组成的系统, 与传统的单个星载 SAR 相比, 在正侧视模式下, 除了能利用回波信号中的距离 - 多普勒信息, 形成多幅图像外, 还可利用目标的到达角信息, 通过波束形成来提高图像的信噪比。通过将群聚卫星构成的阵列划分成子阵列, 先对子阵列进行波束形成, 然后对子阵列图像进行多视处理, 能提高信噪比和抑制相干斑噪声, 使图像质量得到提高。

表 1 各种处理方法方位压缩结果比较 (汉明加权)

处理方法	信噪比					
	-5dB		-15dB		-25dB	
	峰 值 旁 瓣 比	积 分 旁 瓣 比	峰 值 旁 瓣 比	积 分 旁 瓣 比	峰 值 旁 瓣 比	积 分 旁 瓣 比
单个 SAR	35.69	24.79	31.42	16.02	23.88	6.16
多视处理	38.70	25.59	37.29	16.72	27.56	6.81
本文方法	38.77	28.93	27.73	22.02	30.12	12.34

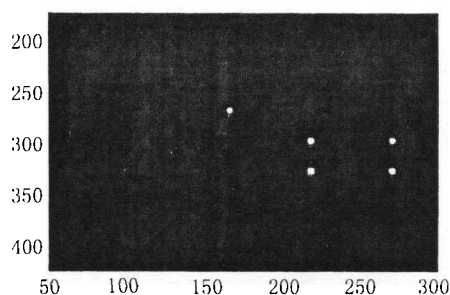


图 3 波束形成和多视处理后的点目标图像

## 参 考 文 献

- [1] J. Stile, N. Goodman, SiChung Lin, Performance and processing of SAR satellite clusters, Proc. IGARSS'2000, Honolulu, Hi, USA, 2000, 883-886.
- [2] 刘永坦, 雷达成像技术, 哈尔滨, 哈尔滨工业大学出版社, 1999, 36-46.

THE IMAGING OF DISTRIBUTED SATELLITE SAR SYSTEM  
USING BEAMFORMING AND MULTI LOOK

Lei Wanming    Liu Guangyan    Huang Shunji

*(Dept. of Electron. Eng., Univ. of Electron. Sci. and Tech. of China, Chengdu 610054, China)*

**Abstract** Based on the side-looking mode SAR of distributed satellites SAR system, This paper gives the mathematical model of SAR echo signal, and proposes a imaging algorithm of the single satellite SAR of distributed satellite SAR and a imaging algorithm of distributed satellite SAR system by beamforming and multilook. The results of theory analysis and simulation show that the algorithm can enhance SNR and suppress the speckle noise of resulted image without changing the resolution of SAR image., improve image's quality.

**Key words** Distributed satellites SAR system, Side-looking, Beamforming, Multilook, Speckle

雷万明: 男, 1964 年生, 博士生, 研究方向为信号处理.

刘光炎: 男, 1968 年生, 博士生, 研究方向为信号处理.

黄顺吉: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 SAR 系统, 成像和信号处理, 目标检测与识别.