

分布式卫星 SAR 的慢速目标检测与成像¹

雷万明 刘光炎 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

摘要 基于分布式卫星 SAR 的正侧视工作模式, 该文建立了分布式卫星 SAR 的回波模型, 提出了通过杂波抑制进行慢速目标检测和成像的算法, 理论分析和仿真结果表明: 该方法能有效地抑制杂波, 提高运动目标的动态检测范围。

关键词 分布式卫星 SAR, 正侧视, 慢速目标, 检测, 成像

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二十一世纪的新的 SAR 系统^[1]。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。

合成孔径雷达除了用于地面静止目标的高分辨成像外, 还可用于一定范围内的运动目标成像。当 SAR 用于运动目标检测和成像时, 如果运动目标的频谱在杂波之外, 则通过滤除杂波可对其进行检测和成像, 动态检测范围与杂波谱宽度和脉冲重复频率有关。由于地面杂波的方位谱宽度与平台的飞行速度成正比, 波长一定时平台速度越大, 杂波谱的宽度越宽, 因而在星载 SAR 中, 当地面目标处于慢速运动状态时, 它的频谱将完全淹没在杂波谱中, 不能进行分离。分布式卫星 SAR 是由多个星载 SAR 组成的系统, 如果将每个星载 SAR 视为一个天线阵元, 它相当于稀疏天线阵, 地面目标的回波除了多普勒信息外, 还有目标到达角信息, 且目标的到达角信息独立于多普勒信息。因此, 尽管地面静止目标与慢速运动目标的频谱重叠在一起, 但它们有不同的阵列响应矢量, 通过阵列信号处理对杂波进行抑制, 能对慢速目标进行检测和成像。

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, 提出了慢速运动目标 (6km/h ~ 12km/h) 的检测和成像算法。理论分析与仿真结果表明, 分布式卫星 SAR 能极大地改善运动目标的动态检测范围, 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 α (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 v 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 α 角, 小卫星组合同时沿它们的分布式圆周绕虚拟卫星 s_v 转动, 每颗小卫星绕

¹ 2001-07-12 收到, 2002-04-15 改回

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, 8 颗卫星的 SAR 同时接收, 并且信号的发射按轨道由每颗卫星的 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 将轮换为另外一颗星载 SAR。

分布式卫星 SAR 的结构决定了它的工作模式多种多样, 可根据任务的不同进行改变, 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慢速目标的检测与成像问题, 且假设群聚卫星每 90min 绕虚拟卫星转一圈。

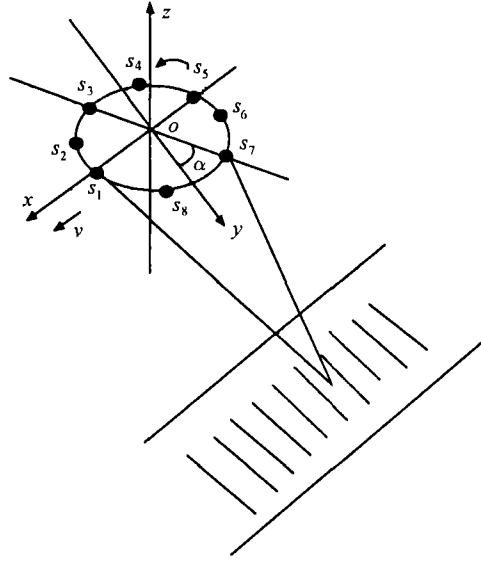


图 1 分布式卫星 SAR(正侧式)

2.2 点目标方位信号的时域表示

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 $s = s_c$ 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 R_t , 虚拟卫星的位置矢量为 R_0 。考虑到地球自转的影响, 设相对地心坐标系下, 由地球自转在地表静止目标上产生的速度和加速度矢量分别为 V_T , A_T , 虚拟卫星的速度和加速度矢量分别为 V_v 和 A_v , 则地面目标与虚拟卫星之间的相对速度和加速度矢量分别为

$$V_{\text{rel}} = V_T - V_v \quad (1)$$

$$A_{\text{rel}} = A_T - A_v \quad (2)$$

由于群聚卫星在飞行过程中的位置不是固定不变的, 它们也在绕虚拟卫星作旋转飞行, 因而地面目标相对于群聚卫星的速度和加速度矢量将与 (1), (2) 式不同。由前面的假设, 群聚卫星每 15s 绕虚拟卫星转 1° , 如果将方位处理孔径开始时刻群聚卫星所在的轨道看作标准轨道, 则群聚卫星绕虚拟卫星作旋转飞行时, 每颗卫星实际上是以固定的频率沿标准轨道作摆动飞行, 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, 摆动产生的几何畸变可在图像后处理时进行校正。设 V_t , A_t 分别表示旋转在发射信号的星载 SAR 上产生的速度和加速度矢量, 则地面目标相对于发射信号星载 SAR 的速度和加速度矢量分别为

$$V = V_T - V_v - V_t \quad (3)$$

$$A = A_T - A_v - A_t \quad (4)$$

目标的多普勒参数是由目标与卫星之间的相对速度和加速度矢量决定的, 如果将 $V_T - V_t$ 和 $A_T - A_t$ 视为地球自转产生的速度和加速度矢量, 则发射信号的星载 SAR 在方位处理孔径内可视为静止不动的。由卫星和地面目标之间的相对几何关系, 设方位处理孔径开始时刻发射信

号的星载 SAR 在群聚坐标系中的位置矢量为 \mathbf{P}_t ，则 s 时刻地面目标与发射信号星载 SAR 的距离矢量为

$$\mathbf{R}_T(s) = \mathbf{R} + \mathbf{V}(s - s_c) + \frac{1}{2}\mathbf{A}(s - s_c)^2 \quad (5)$$

其中 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_t - \mathbf{R}_0 - \mathbf{P}_t$ 表示 $s = s_c$ 时刻，位于发射信号星载 SAR 的方位波束中心线上目标的距离矢量。

由于在群聚坐标系中群聚卫星之间存在位置差，当发射和接收信号为不同的星载 SAR 时，地面目标相对于接收信号星载 SAR 的距离矢量将与 (5) 式不同。设方位处理孔径开始时刻接收信号的星载 SAR 在群聚坐标系中的位置矢量为 \mathbf{P}_r ， \mathbf{P}_t 和 \mathbf{P}_r 的关系为 $\mathbf{P}_r = \mathbf{P}_t + \Delta\mathbf{P}$ ，旋转在接收信号星载 SAR 上产生的速度和加速度矢量分别为 \mathbf{V}_r ， \mathbf{A}_r ，类似于前面的推导， s 时刻地面目标相对于接收信号星载 SAR 的距离矢量为

$$\mathbf{R}_R(s) = \mathbf{R}_T(s) + \mathbf{r}(s) \quad (6)$$

$$\mathbf{r}(s) = \Delta\mathbf{P} + \Delta\mathbf{V}(s - s_c) + \frac{1}{2}\Delta\mathbf{A}(s - s_c)^2 \quad (7)$$

其中 $\Delta\mathbf{V} = \mathbf{V}_r - \mathbf{V}_t$ 和 $\Delta\mathbf{A} = \mathbf{A}_r - \mathbf{A}_t$ 是卫星旋转时，卫星位置差所产生的旋转速度和加速度之差。

(5) 式和 (6) 式是地面静止目标的距离矢量，当地面目标处于运动状态时，(5)，(6) 式分别为

$$\mathbf{R}_T(s) = \mathbf{R} + (\mathbf{V} + \mathbf{v})(s - s_c) + \frac{1}{2}(\mathbf{A} + \mathbf{a})(s - s_c)^2 \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_R(s) = \mathbf{R} + (\mathbf{V} + \mathbf{v})(s - s_c) + \frac{1}{2}(\mathbf{A} + \mathbf{a})(s - s_c)^2 - \mathbf{r}(s) \quad (9)$$

其中 \mathbf{v} 和 \mathbf{a} 分别是地面目标的速度和加速度矢量。当群聚卫星的几何参数一定时，由 (8)，(9) 式可知在合成孔径时间内，地面目标到发射和接收信号的星载 SAR 的距离矢量由参数 \mathbf{v} ， \mathbf{a} ， s_c 和 \mathbf{R} 决定， \mathbf{R} 在距离压缩后可视为已知的。如果用矢量 $\theta = (\mathbf{a}, \mathbf{v})$ 表示目标的运动参数，则地面运动目标由参数矢量 $\vartheta = (\theta, s_c)$ 决定。相应地，距离矢量 $\mathbf{R}_T(s)$ 和 $\mathbf{R}_R(s)$ 可表示为 $\mathbf{R}_T(s, \vartheta)$ ， $\mathbf{R}_R(s, \vartheta)$ 。雷达信号从发射信号的星载 SAR 发出，到达地面目标，然后经地面目标反射到接收信号的星载 SAR，所经过的总距离为 $R(s, \vartheta) = |\mathbf{R}_T(s, \vartheta)| + |\mathbf{R}_R(s, \vartheta)|$ 。将 (8)，(9) 式代入 $R(s, \vartheta)$ ，则 $R(s, \vartheta)$ 可表示为

$$R(s, \vartheta) = 2R_T(s, \vartheta) - \mathbf{u}(s, \vartheta) \cdot \mathbf{r}(s, \vartheta) \quad (10)$$

其中 $R_T(s, \vartheta) = |\mathbf{R}_T(s, \vartheta)|$ 是目标与发射信号的星载 SAR 之间的距离， $\mathbf{u}(s, \vartheta) = \mathbf{R}_T(s, \vartheta) / |\mathbf{R}_T(s, \vartheta)|$ 表示 s 时刻地面目标相对于发射信号星载 SAR 的单位方向矢量。不考虑地面目标的反射系数和忽略 sinc 函数的宽度，通过选择适当的距离分辨率，则距离压缩后目标产生的方位向信号为

$$s(s, t, \vartheta) = D\delta\left(t - \frac{R(s, \vartheta)}{c}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi R(s, \vartheta)}{\lambda}\right) \quad (11)$$

其中 s 表示方位向慢变化时间， t 表示距离向时间， D 是由发射和接收天线增益决定的因子。如果用 $\mathbf{a}(\mathbf{u}(s, \vartheta)) = D_m \exp(j\beta \mathbf{u}(s, \vartheta) \cdot \mathbf{r}_m(s, \vartheta))_{m=1}^8$ 表示目标的阵列响应矢量，将距离压缩后的方位向信号进行距离徙动校正和距离向匹配，则地面目标的方位向信号可表示为下面的矢量：

$$\mathbf{S}(s, \vartheta) = \exp(-j2\beta R_T(s, \vartheta)) \mathbf{a}(\mathbf{u}(s, \vartheta)) \quad (12)$$

分布式卫星 SAR 所接收的方位向信号, 除了距离多普勒信息外, 还有由阵列响应矢量 $\mathbf{a}(\mathbf{u}(s, \vartheta))$ 决定的目标到达角信息, 它独立于目标的多普勒信息。

2.3 点目标方位信号的频域表示

利用距离表达式, 当发射和接收是同一个星载 SAR 时, 地面目标的相位史为

$$\Phi(s, \vartheta) = \frac{4\pi}{\lambda} R_T(s, \vartheta) \quad (13)$$

其中 λ 为雷达波长。相应地, 发射信号星载 SAR 的瞬时多普勒频率为

$$\begin{aligned} f(s, \vartheta) &= -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi(s, \vartheta)}{\partial s} = -\frac{2}{\lambda} \mathbf{u}(s, \vartheta) \cdot \mathbf{V}(s, \vartheta) \\ &= -\frac{2}{\lambda} |\mathbf{V}(s, \vartheta)| \cos(\mathbf{u}(s, \vartheta), \mathbf{V}(s, \vartheta)) \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\mathbf{V}(s, \vartheta) = (\mathbf{V} + \mathbf{v}) + (\mathbf{A} + \mathbf{a})(s - s_c)$ 是地面目标相对于雷达的瞬时速度, 夹角 $\angle(\mathbf{u}(s, \vartheta), \mathbf{V}(s, \vartheta))$ 是两矢量在 s 时刻所构成的射线的夹角。由于雷达与地面目标的相对位置随着时间在发生变化, 矢量 $\mathbf{u}(s, \vartheta)$ 的射线方向也将随着时间 s 发生变化, 而矢量 $\mathbf{V}(s, \vartheta)$ 是时间的线性函数, 它的运动轨迹是空间的一条射线, 在方位处理孔径内矢量 $\mathbf{V}(s, \vartheta)$ 的射线方向是固定不变的。如果用 $\mathbf{V}_u(\vartheta)$ 表示速度矢量 $\mathbf{V}(s, \vartheta)$ 的射线方向, 则 (14) 式可表示为

$$f(s, \vartheta) = -\frac{2}{\lambda} |\mathbf{V}(s, \vartheta)| \cos(\mathbf{u}(s, \vartheta), \mathbf{V}_u(\vartheta)) \quad (15)$$

目标的瞬时多普勒频率与参数 ϑ 和方位时间 s 有关, 如果两个目标有相同的多普勒频率和不同的参数 ϑ , 下面证明它们将有不同的单位方向矢量 $\mathbf{u}(s, \vartheta)$ 。用反证法, 假设 $\mathbf{u}(s, \vartheta_1) = \mathbf{u}(s, \vartheta_2)$, 则由 (14) 式和 (15) 式有

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{2}{\lambda} \mathbf{u}(s, \vartheta_1) \cdot (\mathbf{V}(s, \vartheta_1) - \mathbf{V}(s, \vartheta_2)) \\ &= -\frac{2}{\lambda} |\mathbf{V}(s, \vartheta_1) - \mathbf{V}(s, \vartheta_2)| \cos(\mathbf{u}(s, \vartheta_1), \mathbf{V}_u(\vartheta_1) - \mathbf{V}_u(\vartheta_2)) \end{aligned} \quad (16)$$

当参数一定时 $\mathbf{V}_u(\vartheta_1) - \mathbf{V}_u(\vartheta_2)$ 为常数, 由 s 的任意性有 $\mathbf{V}(s, \vartheta_1) - \mathbf{V}(s, \vartheta_2) = 0$, 两个目标具有相同的瞬时速度, 这与假设矛盾, 因而有 $\mathbf{u}(s, \vartheta_1) \neq \mathbf{u}(s, \vartheta_2)$ 。

$S(s, \vartheta)$ 由一个共同的 Chirp 项和一个慢变化的阵列响应矢量组成, 方位信号的 Fourier 变换为

$$S(f, \vartheta) = \int \exp(-j2\beta R_T(s, \vartheta)) \mathbf{a}(\mathbf{u}(s, \vartheta)) e^{-j2\pi f s} ds \quad (17)$$

在星载 SAR 中由于时间带宽积足够大, 利用驻定相位原理将 $-(j2\beta R_T(s, \vartheta) + j2\pi f s)$ 在驻定相位点展开成泰勒级数^[2], 在忽略高次项的影响后, (17) 可表示为

$$S(f, \vartheta) = e^{-j2\pi f s_0} e^{-j2\beta R_T(s_0, \vartheta)} \int \exp(-j\beta \frac{\partial^2 R_T(s, \vartheta)}{\partial s^2} |_{s=s_0} (s - s_0)^2) ds \quad (18)$$

其中 s_0 是驻定相位点, 它由 $\partial(2\beta R_T(s, \vartheta) + 2\pi f s)/\partial s = 0$ 决定。利用极限关系^[3] $\delta(s) = \lim_{c \rightarrow 0} [1/(c\sqrt{j\pi})] e^{js^2/c^2}$, 当函数 $r(s)$ 在 s_0 连续时, 下面的近似公式成立^[3]

$$\frac{1}{c\sqrt{j\pi}} \int r(s) e^{j(s-s_0)/c^2} ds \approx r(s_0) \quad (19)$$

利用上面的近似公式可将 (19) 式表示为

$$\mathbf{S}(f, \vartheta) \approx K \exp(-j2\pi f s_0) \mathbf{S}(s_0, \vartheta) \quad (20)$$

其中 $K = \sqrt{j\pi / (-\beta \frac{\partial^2}{\partial s^2} R_T(s, \vartheta)|_{s=s_0})}$ 。时间带宽积越大, (20) 式近似得越准确, 当频率 f 一定时上式还可表示为

$$\mathbf{S}(f, \vartheta) \approx ca(u(f, \vartheta)) \quad (21)$$

由方位时间和多普勒频率之间的锁定关系和 $r(s)$ 的表达式可知, 如果两个目标有相同的频率 f 和不同的参数 ϑ , 则它们有相同的 $r(f)$ 和不同的 $u(f, \vartheta)$, 因而目标在频域的阵列响应完全由参数 ϑ 决定, 所有的静止目标都有相同的频域阵列响应。

2.4 回波统计模型和最优检测

雷达和目标之间的相对运动会使目标的回波变成线性调频信号, 当雷达信号的发射功率和目标到雷达的距离一定时, 线性调频信号的强弱由地面目标的后向反射系数决定, 而后向反射系数与电磁波的入射角和反射方向有关。在分布式卫星 SAR 中, 由于卫星之间存在位置差, 电磁波的反射方向也将不同, 这种差异会使后向反射系数产生差异。当忽略后向反射系数在星载 SAR 之间的差异时, 由 (12) 式可知, 地面目标的回波为

$$\mathbf{q}(s, \vartheta) = \sigma(s_c) \mathbf{S}(s, \vartheta) \quad (22)$$

其中 $\sigma(s_c)$ 是地面目标的后向反射系数, 与目标所处的距离向和方位向位置有关。对固定的距离 $|R|$, $\sigma(s_c)$ 是变量 s_c 的函数, 它对应一个与虚拟卫星飞行方向平行的反射带, 是带上所有目标的反射函数。如果用 $\mathbf{S}_0(s) = \mathbf{S}(s, 0)$ 表示 $s_c = 0$ 时刻, 位于发射信号星载 SAR 方位波束中心线上的地面静止目标的方位向信号, 则在分布式卫星 SAR 中, 处于同一距离波门的方位向目标回波为

$$\mathbf{q}(s) = \mathbf{S}_0(s) * \sigma(s) \quad (23)$$

式中 $*$ 表示卷积。由于本文研究的是运动目标的检测和成像, 如果将运动目标以外的散射体回波视为杂波, 则 (23) 式是方位向杂波信号。

由 (23) 式可知, 如果将分布式卫星 SAR 视为时不变的矢量滤波器, 地面目标的反射系数作为输入信号, 则 $\mathbf{S}_0(f)$ 是输入信号 $\sigma(s)$ 的传递函数。当 $\sigma(s)$ 是功率谱密度为 $C_\sigma(f)$ 的高斯平稳过程时, 杂波信号 $\mathbf{q}(s)$ 也是平稳随机过程, 它的功率谱密度矩阵为

$$\mathbf{C}_q(f) = \mathbf{S}_0(f) C_\sigma(f) \mathbf{S}_0^H(f) \quad (24)$$

这样, 在杂波加噪声的环境中, 当存在运动目标时, 分布式卫星 SAR 的接收信号为

$$\mathbf{Z}(s) = c\mathbf{S}(s, \vartheta) + \mathbf{W}(s) \quad (25)$$

其中 $c\mathbf{S}(s, \vartheta)$ 表示运动目标的回波, $\mathbf{W}(s) = \mathbf{q}(s) + \mathbf{N}(s)$ 是杂波和噪声之和。 $\mathbf{Z}(s)$ 的 Fourier 变换为

$$\mathbf{Z}(f) = c\mathbf{S}(f, \vartheta) + \mathbf{W}(f) \quad (26)$$

当噪声矢量 $\mathbf{N}(s)$ 是功率谱密度矩阵为 $\mathbf{C}_N(f)$ 的平稳随机过程时, $\mathbf{W}(s)$ 的功率谱密度矩阵为

$$\mathbf{C}_W(f) = \mathbf{C}_q(f) + \mathbf{C}_N(f) \quad (27)$$

在运动目标的检测和成像中, 首先要进行运动目标信号的检测, 如果将每个星载 SAR 视为一个天线阵元, 则群聚卫星构成一个稀疏天线阵, (25) 式和 (26) 式分别是天线阵的时域和频域接收信号, 由阵列信号处理理论可知, 可通过波束形成对运动目标信号进行检测。波束形成可在时域或频域进行, 但由前面的分析, 目标的频域阵列响应由参数 ϑ 和频率 f 决定, 静止目标具有相同的频率阵列响应, 这给频域处理带来好处。如果以输出信噪比最大作为优化准则, 则 (26) 式的最优波束权值为^[4]

$$W_{\text{opt}}(f, \vartheta) = C_W^{-1}(f)S(f, \vartheta) \quad (28)$$

波束形成提高了运动目标各频率分量的 SCNR(ϑ)(信号与杂波和噪声的功率之比), 当接收信号中存在运动目标信号时, 如果按距离波门合并方位谱, 它所对应的幅度将大于门限值, 从而可进行运动目标检测。波束形成后的统计检测问题为

$$T(\mathbf{Z}, \vartheta) = \left| \int S^H(f, \vartheta) C_W^{-1}(f) \mathbf{Z}(f) df \right|^2 \quad (29)$$

因此, 运动目标检测分成下面两个步骤进行:

- (1) 对方位向的固定频率 f , 左乘矩阵 $C_W^{-1}(f)$ 进行杂波抑制。
- (2) 乘以 $S^H(f, \vartheta)$ 进行波束形成, 然后进行运动目标检测。

由于 (28) 式中的 $S^H(f, \vartheta)$ 与运动目标的参数 θ 有关, 在参数估计之前无法得到, 而经过杂波抑制后, 星载 SAR 的方位谱将由运动目标频谱和残留的杂波构成, SCNR(ϑ) 已得到很大提高, 因而杂波抑制后可直接进行运动目标检测。相应地, 统计检测问题为

$$T(\mathbf{Z}, \vartheta) = \int e^T |C_W^{-1}(f) \mathbf{Z}(f)|^2 df \quad (30)$$

其中 $e = (1, 1, \dots, 1)^T$ 。通过将上式与门限值比较, 确定是否有运动目标。杂波抑制过程中的 $C_W(f)$ 由下面的经验公式:

$$\hat{C}_W(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{Z}_n(f) \mathbf{Z}_n^H(f) \quad (31)$$

估计, 其中 $\mathbf{Z}_n(f)$ 表示第 n 个距离波门的方位谱线, N 表示估计功率谱密度矩阵所用的距离波门数。

当检测到运动目标信号后, 为了对运动目标成像, 需要知道运动目标的多普勒参数, 它可由杂波抑制后的方位谱进行估计^[5], 最后可得运动目标图像为

$$\text{Image}(s, \vartheta) = F^{-1}(S^H(f, \vartheta) C_W^{-1}(f) \mathbf{Z}(f)) \quad (32)$$

3 慢速目标检测和成像

合成孔径雷达是通过利用目标和雷达之间的相对运动, 使地面目标的回波产生线性调频, 然后通过方位压缩来获得方位聚焦的。目标和雷达之间的相对运动除了使回波产生线性调频外, 还会使回波产生距离徙动。当 SAR 平台是卫星时, 距离徙动现象特别严重, 为了能正确成像, 方位压缩前必须进行距离徙动校正。当地面目标中存在运动目标时, 由于运动目标具有不同的多普勒参数, 需要按运动目标的多普勒参数进行距离徙动校正和方位压缩, 才能获得运动目标

图像。因此,一般情况下,运动目标检测和成像分成检测和成像两个过程,成像之前还需估计运动目标的多普勒参数。当运动目标处于慢速运动(6km/h~12km/h)状态时,与静止目标的多普勒参数相比,它们的多普勒变化率 f_{DR} 可视为相同(f_{DR} 对速度不敏感),而多普勒质心 f_{DC} 存在差异,但这种差异非常小。对一般的星载高分辨率雷达(5m×5m)而言,如果按静止目标的多普勒参数对运动目标成像,多普勒质心之差对成像的影响完全可忽略,因而不需进行多普勒参数估计,检测到有运动目标后直接利用成像时估计的多普勒参数进行成像。

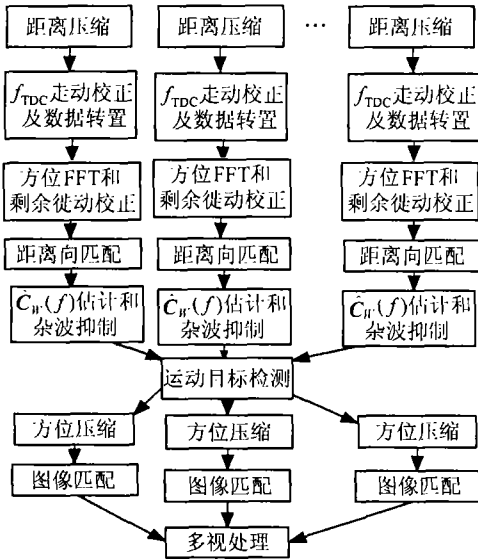


图2 慢速目标检测和成像处理流程

在分布式卫星 SAR 中,当发射和接收信号为同一个星载 SAR 时,在距离方程中 $u(s, \vartheta) \cdot r(s, \vartheta) = 0$,发射信号的星载 SAR 工作在正侧视模式。当发射和接收信号为不同的星载 SAR 时,卫星之间的距离差 $u(s, \vartheta) \cdot r(s, \vartheta)$ 的存在,将影响地面目标的多普勒质心,使多普勒质心由地球自转和斜视组成,距离走动也相应地由地球自转和斜视产生,全部的星载 SAR 都有相同的地球自转距离走动和不同的斜视距离走动。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,为了不产生几何失真,地球自转产生的距离走动应在时域校正,而斜视产生的距离走动却适合在频域校正。分布式卫星 SAR 中慢速目标检测和成像处理流程如图 2 所示。

4 仿 真

根据前面所述慢速运动目标检测和成像算法,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。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,虚拟卫星的其它参数如下所示:

卫星轨道高度: 632589m,

卫星速度: 7450m/s,

天线尺寸: 9m(方位向), 3.4(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: 33 μ s,

采样率: 66MHz,

脉冲重复频率: 2000Hz,

孔径时间: 3.096s。

将背景杂波幅度归一化,每个星载 SAR 背景杂波均值功率与噪声功率之比为 -25dB,运动目标与背景杂波均值功率之比为 0dB,占据四个分辨单元,以 8km/h 的速度运动。图 3 是杂波抑制前按距离波门的方位功率谱求和图,从图上不能发现运动目标。图 4 是杂波抑制后与图 3 相对应的图,它由(30)式进行计算。从图 4 可知,杂波得到了很好的抑制,可检测出运动目标。图 5 是发射信号星载 SAR 的仿真图像。图 6 是卫星 1、3、5、7 进行杂波抑制后分

别成像, 然后通过多视叠加后所成的图像。从图 6 可知, 利用本文方法能有效地抑制杂波, 使运动目标成像, 达到了慢速目标检测与成像的目的。

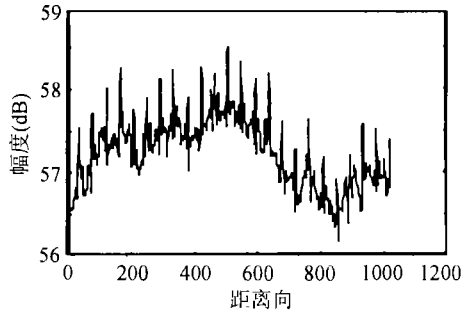


图 3 杂波抑制前方位功率谱求和图

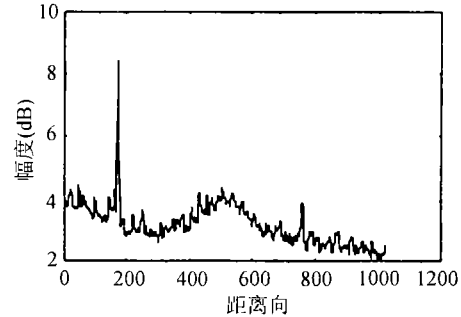


图 4 杂波抑制后的方位功率谱求和平均图

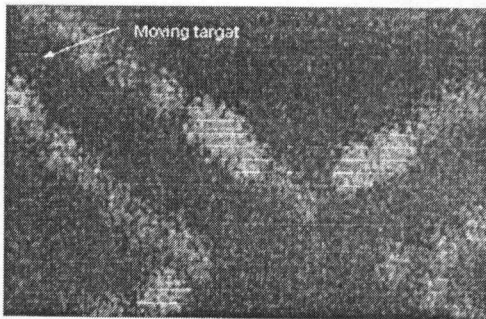


图 5 发射信号星载 SAR 图像

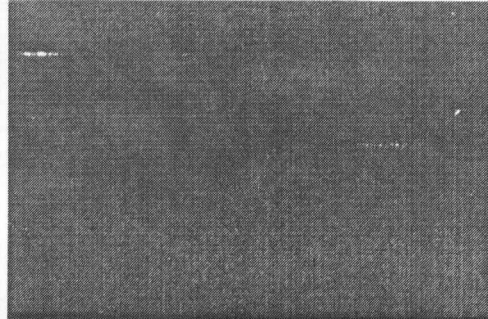


图 6 运动目标图像

5 结 论

分布式卫星 SAR 系统是由多个星载 SAR 组成的系统, 与传统的单个星载 SAR 相比, 在正侧视模式下, 回波信号中除了距离 - 多普勒信息, 还有目标的到达角信息。利用运动目标与静止目标频域阵列响应矢量的不同, 通过杂波抑制, 能对慢速运动目标进行检测和成像, 大大地提高运动目标的动态检测范围, 展示了分布式卫星 SAR 的良好应用前景。

参 考 文 献

- [1] J. Stiles, 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, 342-346.
- [3] J. G. H. Ender, Detection and estimation of moving target signals by multi-channel SAR. Proc. EUSAR'96, Königswinter, Germany, 1996, 411-417.
- [4] 张贤达, 保 铮等, 通信信号处理, 北京, 国防工业出版社, 2000, 310-326.
- [5] S. Barbarossa, A. Faria, Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signals, IEEE Trans. on AES., 1994, 30(2), 341-358.

DETECTING AND IMAGING OF MOVING TARGETS WITH LOW VELOCITY OF DISTRIBUTED SATELLITE SAR SYSTEM

Lei Wanming Liu Guangyan Huang Shunji

(Dept. of Electronic Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Based on the side-looking SAR mode of distributed satellites SAR system, this paper gives the mathematical model of radar echo signal of distributed satellite SAR, and proposes a detecting and imaging algorithm of the moving targets with low velocity by suppressing the ground clutters. The results of theory analysis and simulation show that the algorithm can suppress the ground clutters efficiently, and enhance the detecting ranges of moving targets.

Key words Distributed satellites SAR system, Side-looking, Moving target with low velocity, Detecting, Imaging

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.