

前视阵列 SAR 回波稀疏采样 及其三维成像方法

刘向阳¹, 王 静², 牛德智¹, 杜宇扬¹, 刘许刚¹

(1. 西安通信学院, 陕西西安 710106; 2. 长安大学信息工程学院, 陕西西安 710064)

摘 要: 针对高分辨前视阵列 SAR 三维成像系统面临的距离采样率高和回波数据量大的问题, 本文利用地面散射源在三维空间中的稀疏性, 提出距离频域和沿航向时域二维稀疏采样并稀疏重构地面三维图像的方法. 从前视阵列 SAR 角度观察三维地面, 地面散射源在距离向和沿航向二维空间中是稀疏的, 在该二维方向上联合稀疏采样有望实现最佳的稀疏采样效果. 为避免距离向时域稀疏采样造成的三维成像复杂化, 提出利用子脉冲结合距离频域稀疏采样的方法来实现距离向稀疏采样. 同时, 结合地面散射源连续性特点, 提出低信噪比情况下稳健的信号重构方法. 与传统三维匹配滤波成像方法相比, 本方法降低了距离采样率和回波数据量, 并直接重构地面散射源信息以实现三维成像.

关键词: 三维成像; 前视阵列 SAR; 稀疏采样; 压缩感知成像

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)01-0074-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.01.011

The Method on Echo Sparse Sampling and Three-Dimensional Imaging for Forward-Looking Array SAR

LIU Xiang-yang¹, WANG Jing², NIU De-zhi¹, DU Yu-yang¹, LIU Xu-gang¹

(1. Xi'an Communication Institute, Xi'an, Shaanxi 710106, China;

2. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: For the problem of high slant-range sampling ratio and huge echo data volume in the high-resolution three-dimensional imaging system of forward-looking array SAR, the joint two-dimensional sparse sampling method in the domain of slant-range frequency and along-track time and its sparse reconstruction method for the three-dimensional imaging of the scene is presented, which is based on the sparse property of the scatterers in the three-dimensional space. From the perspective of forward-looking array SAR to observe the three-dimensional ground, the scatterers in the ground are sparse in the joint space of the slant-range direction and the along-track direction. To avoid the effect of the sparse sampling in the slant-range direction on the three-dimensional imaging, the solution of sub-pulse technique and the sparse sampling in the slant-range frequency is presented to accomplish the sparse sampling in the slant-range direction. Also, the sparse reconstruction method, which is combined with the continuity of the scatterers, is proposed to increase the robustness in the situation of low signal-to-noise ratio. Compared to the traditional imaging method with three-dimensional matched filtering, the method in this paper reduces the slant-range sampling ratio and the echo data volume, and the three-dimensional image can be directly reconstructed using the recovered scatterers.

Key words: three-dimensional imaging; forward-looking array SAR; sparse sampling; compressive sensing imaging

1 引言

前视阵列合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar,

SAR) 适用于高频段 (如毫米波) 雷达的低空近距离对地三维成像, 具备实时获取平台前方观测场景三维图像的优势和全天时、全天候工作的优点. 除三维地貌

测绘、植被资源调查、地质灾害调查、重点设施监测等常规三维图像应用外,由于可以向平台实时提供地面场景的三维信息,前视阵列 SAR 在地物匹配制导、飞行器自主导航和降落等场合具有独特的优势,受到了国内外机构和学者的广泛关注^[1,2].

前视阵列 SAR 始于 20 世纪 90 年代末,最初用于获取飞行路线前方扇形区域的二维图像.结合平台沿航向运动形成的虚拟合成孔径,德国宇航局的 Reigber A 博士提出了前视阵列 SAR 三维成像的概念,并进行了初步仿真实验^[3].目前,前视阵列 SAR 三维成像研究已经取得了大量的成果,主要集中在阵列稀疏和超分辨、成像算法优化和设计等方面^[4-6].随着分辨率要求的逐步提高,前视阵列 SAR 需要长的阵列天线、大的信号带宽和宽的合成孔径,给系统设计和实现带来如下难题:(1)大的信号带宽增加了系统收发组件的复杂度和成本,而且当前的硬件水平也难以满足超高距离采样率的要求,如何解决大带宽信号的采样问题?(2)若满足奈奎斯特采样要求,三维高分辨率将导致系统的数据量十分巨大,给存储、传输和处理带来很大压力,而实际观测场景在三维空间中是稀疏的,如何利用观测场景的稀疏性降低回波数据量?

针对以上两个问题,结合地面散射源的稀疏特性,通过收发脉冲的优化设计,本文提出距离向频域和沿航向时域回波二维稀疏采样及其三维成像的方法.该方法显著降低了系统采样率和回波数据量,为前视阵列 SAR 三维成像系统向实用化迈进提供技术参考.

2 前视阵列 SAR 回波稀疏采样模型

前视阵列 SAR 系统对地观测构型如图 1 所示^[7].载机在观测条带上方高度 H 处沿某个方向水平匀速飞行,速度为 v .接收阵列天线垂直于平台飞行方向、水平均匀排列,阵元间隔为 d ,阵元数为 N ,则阵列长度 L 等于 $(N-1)d$.发射天线位于接收天线阵中心的正下方 δh 处,发射波束指向前下方.波束中心的前视角和方位角分别为 θ 、 φ ,且 $\varphi=0$.定义载机飞行方向为沿航向,以 x 轴表示;接收阵列方向为跨航向,以 y 轴表示,且接收阵列中心处为 y 轴零点;高度方向即为 z 轴,三个坐标轴的方向排列符合笛卡尔直角坐标系规则,如图 1 所示.

2.1 地面散射源稀疏特性

从雷达视角观察地面三维空间,由于高频段微波的穿透性很差,雷达通常在每个俯仰和跨航向二维方向上仅能探测到一个距离雷达最近的散射源,其它散射源将会被这个距离最近的散射源遮挡,类似于人眼观测周围环境时在每个二维方向上仅能看到一个离人眼最近的物体(透光的物体除外);因此,雷达三维图像仅仅是由雷达观测到的散射源组成的三维图像,它在

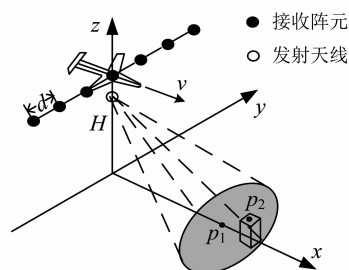


图1 前视阵列SAR系统对地观测示意图

三维空间中是稀疏的.由于稀疏恢复算法运算量较大,如果在三维空间上都稀疏采样再重构三维图像,势必导致三维成像的运算量十分巨大,系统难以实现,因此在一至两个方向上稀疏采样是折中的选择.考虑到散射源的稀疏性是波束遮挡有关的,而跨航向与波束视线方向近似是垂直的,跨航向上散射源的稀疏特征通常不明显,因此在跨航向上选择满采样率采样,即阵列密布.再者,如果单从距离向或沿航向某一个方向来看,地面三维图像并不一定是稀疏的,它与具体的地形、波束俯仰角等有关.因此,从解决距离高采样率和大数据量问题的角度,在距离向和沿航向上对回波进行联合稀疏采样有望设计出更优的稀疏采样方法,这也是本文研究的基本出发点.

2.2 回波稀疏采样方法

由于跨航向和沿航向回波处理对距离向的依赖性,距离向时域稀疏采样虽然可以降低接收机的采样频率,但将使跨航向和沿航向回波处理复杂化,因此直接在距离时域稀疏采样并不是最佳的选择.考虑到调频步进信号的灵活性,这里选用多个调频步进信号合成大带宽信号的发射方式来实现距离向稀疏采样.首先,调频步进信号的距离采样率只要略大于每个子脉冲的带宽即可,大大降低距离采样率.其次,对近距离工作的前视阵列 SAR 来说,每个脉冲的时宽常常是受限的,在峰值功率一定的情况下系统平均功率常常较低,导致系统信噪比低.而假如采用包括 M 个子脉冲的调频步进信号,其有效脉宽将是每个子脉冲脉宽的 M 倍,在峰值功率一定的情况下系统平均功率提高了 M 倍.

在距离向稀疏采样设计上,假定系统要求的宽带信号是由多个子脉冲组成的脉冲串合成的,这个宽带信号的带宽为 B ,而每个子脉冲的带宽为 ΔB ,且有 $B = M\Delta B$.针对地面散射源的稀疏性,可以适当减小每个脉冲串中子脉冲数量,后期通过稀疏处理方法实现散射源重构.为了实现最佳的稀疏效能,这里选定每个脉冲串中子脉冲数目是随机的,子脉冲发送的时间间隔是随机的,子脉冲的载频在区间 $[f_c - B/2 - \Delta B/2, f_c + B/2 - \Delta B/2]$ 上也随机选择,但每个子脉冲仍为时宽带宽较大的线性调频信号,其中 f_c 表示系统中心频率.结合

后面的沿航向稀疏采样,这种完全随机的收发方式也可以理解为每个子脉冲是一个独立的脉冲,只是其带宽仅为原来的 $1/M$,其沿航向采样率比全带宽情况下略高一些.由于子脉冲与载频的对应关系,将其称作频域稀疏采样.

在沿航向稀疏采样设计上,脉冲串的采样间隔和相邻子脉冲的采样间隔都服从区间 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 上的均匀分布,其中 x_{\min} 表示最小采样间隔,它大于等于距离不模糊对应的距离采样间隔, x_{\max} 表示最大采样间隔,它决定了稀疏采样的采样比.显然相邻子脉冲平均采样间隔为 $\bar{x} = (x_{\min} + x_{\max})/2$,则该系统的稀疏采样率可以表示为

$$\gamma_{\text{sparse}} = \frac{\delta x}{M \cdot \bar{x}} \quad (1)$$

其中, δx 表示在奈奎斯特采样频度下,宽带脉冲在沿航向上的平均采样间隔.

以上稀疏采样在距离频域和沿航向时域上都采用了随机采样的方式,它保证了观测矩阵中不同原子的相关性较小,为精确重构散射源信息提供了保证.而且,观测矩阵中原子间的相关性与平均采样间隔 \bar{x} 有关, \bar{x} 值越小,原子间的相关性越小,但稀疏采样率也越大.同时,从稀疏恢复角度来看,设计平均采样间隔 \bar{x} 时也要考虑到回波信噪比的因素,以保证较好的恢复质量.需要注意的是,在子脉冲参数设计上,每个子脉冲的距离分辨率要不小于沿航向距离弯曲最大值的两倍,这样在利用稀疏重构技术恢复地面散射源时不需要校正距离弯曲,简化了后续成像算法的复杂度,不过这对工作于高频段的前视阵列 SAR 来说是非常容易实现的.

2.3 回波信号模型

采用“停-走-停”信号模型,假定在沿航向位置 x_m 处,发射子脉冲的载频为 f_m ,发射天线和第 n 个接收阵元的坐标可以分别表示为 $(x_m, 0, H - \delta h/2)$ 和 $(x_m, y_n, H + \delta h/2)$,其中 $y_n = nd - L/2$.场景中任意散射源 p 的坐标为 (x_p, y_p, z_p) ,则发射天线和第 n 个接收阵元到散射源 p 的瞬时斜距分别表示为

$$\begin{aligned} R_t(x_m, p) &= \sqrt{(x_m - x_p)^2 + y_p^2 + (H - \delta h/2 - z_p)^2} \\ R_r(x_m, y_n, p) &= \sqrt{(x_m - x_p)^2 + (y_n - y_p)^2 + (H + \delta h/2 - z_p)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

由于 δh 较小,忽略其泰勒展开式中二次及高次项,收发双程距离近似表示为

$$\begin{aligned} R_r(x_m, y_n, p) &\approx \sqrt{R^2(x_m, p) + y_p^2} \\ &\quad + \sqrt{R^2(x_m, p) + (y_n - y_p)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $R(x_m, p) = \sqrt{(x_m - x_p)^2 + (H - z_p)^2}$.由式(3)可知,散射源 p 到第 n 个接收阵元的双程距离是随着沿航向位置 x_m 和接收阵元位置 y_n 而变化,其中随接收阵元

位置 y_n 的变化称作跨航向距离徙动,随沿航向位置 x_m 的变化称作沿航向距离徙动.

根据地面的体(或面)散射模型,地面是由许许多多类似于散射源 p 的、小尺寸的点散射源组成的,其总的接收回波信号可以表示为

$$\begin{aligned} s(t, y_n, x_m) &= \iiint_{\Omega} dP \sigma_p w_a(x_m - x_p) w_r \left(t - \frac{R_r(x_m, y_n, p)}{c} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi R_r(x_m, y_n, p)}{\lambda_m} \right) \exp \left(j\pi\gamma \left(t - \frac{R_r(x_m, y_n, p)}{c} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, Ω 表示波束照射区域, dP 表示体积元, σ_p 表示体积元的散射系数, $w_a(\cdot)$ 和 $w_r(\cdot)$ 分别表示俯仰向天线方向图和子脉冲的窗函数, λ_m 表示子脉冲的波长,有 $\lambda_m = c/f_m$, γ 表示子脉冲的调频率, t 表示距离向快时间, c 表示电磁波传播速度.

3 前视阵列 SAR 稀疏三维成像方法

三维成像过程大致可以分解为两步:一是跨航向聚焦和距离向粗聚焦;二是距离向精聚焦和沿航向聚焦.这里的粗聚焦和精聚焦是指聚焦后的分辨率不同,相对于精聚焦,粗聚焦的分辨率较低.下面详细介绍其处理过程.

3.1 跨航向聚焦和距离向粗聚焦

对任意沿航向位置 x_m 处的二维回波,利用接收阵列的波束形成实现跨航向高分辨,利用子脉冲的脉冲压缩实现距离向高分辨^[8,9],即得到 x_m 处场景的二维图像,也称作 x_m 处脉冲的二维图像.以上成像过程可以采用文献[8,9]中的二维成像方法,其中先采用 Chirp Scaling 方法精确校正跨航向距离徙动并利用脉冲压缩方法实现距离向粗聚焦,然后跨航向采用 SPECAN 方法完成跨航向聚焦,其二维图像可以表示为

$$\begin{aligned} S(t, k_y, x_m) &= \iiint_{\Omega} dP \sigma_p \text{sinc} \left(\pi \frac{B}{A_y} \left(t - \frac{2R(x_m, p)}{c} \right) \right) \\ &\quad \cdot \text{sinc} \left(\pi \frac{L}{\lambda_m} \left(k_y - \frac{y_p}{R(x_m, p)} \right) \right) w_a(x_m - x_p) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi R(x_m, p)}{\lambda_m} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, k_y 表示跨航向波束,无量纲. $\text{sinc}(\cdot)$ 表示辛格函数, $A_y \approx \sqrt{1 - (\frac{\lambda k_y}{4\pi})^2}$.另外,式(5)忽略了二维成像中引入的常数项.

可见,由于 $R(x_m, p)$ 是随慢时间变化的,任意散射源在距离向-跨航向二维图像中的跨航向位置也是随慢时间变化的.通过几何校正可以补偿其峰值位置变化,进而方便沿航向聚焦处理.其中,几何校正可以采用

基于 Chirp-Z 变换的快速变标算法,变标因子为 $\beta = \frac{\lambda_m R(x_m, p)}{\lambda R_c}$, 其校正结果是

$$S(t, k_y, x_m) = \iiint_{\Omega} dP \sigma_p \operatorname{sinc} \left(\pi \frac{B}{A_y} \left(t - \frac{2R(x_m, p)}{c} \right) \right) \cdot \operatorname{sinc} \left(\pi \frac{L}{\lambda} \left(k_y - \frac{y_p}{R_c} \right) \right) w_a(x_m - x_p) \exp \left(-j \frac{4\pi R(x_m, p)}{\lambda_m} \right) \quad (6)$$

其中, R_c 表示场景中心距离. 以上处理过程采用了一些常规的 SAR 成像算法, 在此不再详细推导.

3.2 距离向聚焦和沿航向聚焦

在进一步处理之前, 首先需要校正散射源的沿航向距离徙动. 当波束中心指向散射源 p 时, 载机的沿航向位置为 $x_0 = x_p - (H - z_p) \tan \theta_0$, 其中 θ_0 表示波束中心的前视角, 此时雷达到散射源 p 的距离为 $R_p = (H - z_p) / \cos \theta_0$. 在该位置处对 $R(x_m, p)$ 进行泰勒级数展开, 忽略四次以上高次项的展开式为

$$R(x'_m, p) \approx R_p - (x'_m - x_p) \sin \theta_0 + \frac{(x'_m - x_p)^2 \cos^2 \theta_0}{2R_p} - \frac{(x'_m - x_p)^3 \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0}{6R_p^2} \quad (7)$$

其中 $x'_m = x_m + (H - z_p) \tan \theta_0$. 在沿航向距离徙动公式中, 一次项称作沿航向距离走动, 二次和三次项称作沿航向距离弯曲. 由于距离弯曲量小于距离分辨率的一半, 距离弯曲校正时可以忽略, 因此需补偿的双程距离走动量 ΔR 为

$$\Delta R = 2x_m \sin \theta_0 \quad (8)$$

利用式(8)在时域校正沿航向距离走动后, 同一散射源在不同脉冲图像中的信息被拉回到同一个距离单元, 校正后的回波信号可以表示为:

$$S(t, k_y, x_m) \approx \iiint_{\Omega} dP \sigma_p \operatorname{sinc} \left(\pi \frac{B}{A_y} \left(t - \frac{2(R_p + x'_p \sin \theta_0)}{c} \right) \right) \operatorname{sinc} \left(\pi \frac{L}{\lambda} \left(k_y - \frac{y_p}{R_c} \right) \right) w_a(x_m - x_p) \exp \left(-j \frac{4\pi R(x_m, p)}{\lambda_m} \right) \quad (9)$$

其中, $x'_p = x_p - (H - z_p) \tan \theta_0$.

由式(9)可知, 校正后同一距离门散射源的位置与 x_p 有关, 满足以下关系式

$$R_p + (x_p - (H - z_p) \tan \theta_0) \sin \theta_0 = \mathcal{R} \quad (10)$$

其中 \mathcal{R} 表示回波采样的距离门范围, 为实常数. 式(10)经合并后可以表示为

$$x_p \sin \theta_0 - z_p \cos \theta_0 = \mathcal{R} - R_c + H \tan \theta_0 \sin \theta_0 \quad (11)$$

其中, $R_c = H / \cos \theta_0$. 而且, 如果假定仅考虑回波完整的散射源, 则散射源的沿航向位置 x_p 还需要满足下面的约束条件:

$$x_p \in \left[x_1 + g(\mathcal{R}) + \frac{L_a}{2}, x_M + g(\mathcal{R}) - \frac{L_a}{2} \right] \quad (12)$$

其中, $g(\mathcal{R}) = \frac{(\mathcal{R} - R_c + H \tan \theta_0 \sin \theta_0)}{\sin \theta_0}$, L_a 表示合成孔径长度, x_1 和 x_M 分别表示第一个脉冲、最后一个脉冲的沿航向位置. 显然, x_p 的支撑区间是随距离门变化的.

如图 2 所示, 在 $x-z$ 坐标系中, 式(11)可以用直线 l 表示. 定义 $r-s$ 坐标系, 如图 2 所示, 则 $x-z$ 坐标系到 $r-s$ 坐标系的变换关系为

$$r = x \sin \theta_0 - z \cos \theta_0 - H \tan \theta_0 \sin \theta_0 \quad (13)$$

$$s = x \cos \theta_0 + z \sin \theta_0$$

其中 θ_0 为顺时针方向的旋转角, $H \tan \theta_0 \sin \theta_0$ 为平移常量. 而且, 直线 l 与坐标轴 s 平行. 对式(11)中处于同一个距离门的散射源的位置关系来说, 其在 $r-s$ 坐标系中的关系式为:

$$r = \mathcal{R} - R_c \quad (14)$$

$$s \in \left[\left(x_1 + \frac{L_a}{2} \right) \cos \theta_0, \left(x_M - \frac{L_a}{2} \right) \cos \theta_0 \right]$$

显然, 变量 s 的支撑区间是固定的, 不再随距离门变化. 而且, 变量 r 与距离门 \mathcal{R} 的关系更加简洁.

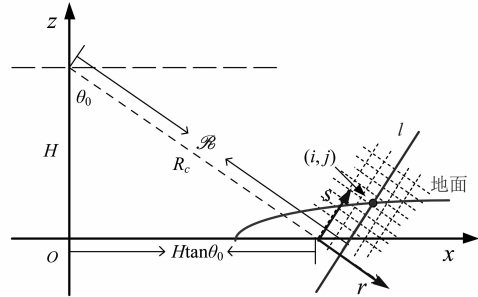


图2 走动校正后距离门对应的空间位置示意图

根据式(9)和(11)可知, 在大多数应用场景下, 对每个距离单元来说, 由直线 l 切割的三维空间中仅包括少数几个散射源(图 2 仅包含地面上 1 个散射源), 回波满足稀疏条件. 同时还应看到, 由于粗分辨的距离包络是有一定宽度的 sinc 函数(它是精分辨距离单元的 M 倍), 直线 l 附近散射源的能量也将叠加到距离 \mathcal{R} 处的回波上, 叠加的散射源的数量取决于粗分辨的 sinc 函数的宽度. 后面的沿航向回波处理不仅可以实现不同沿航向位置的散射源的高分辨, 还可以将粗分辨的距离门进一步细分为更小的距离分辨单元(如图 2 中点虚线所示, 每一个虚线方框表示一个二维的分辨单元), 因此每个距离门散射源的数量还与 M 有关. 即便如此, 精分辨后每个距离门中散射源的数量仍是有限的.

根据以上散射源的稀疏特性, 依次抽取第 k 个距离门第 n 个跨航向的沿航向回波排列成信号矢量, 该信号

矢量可以表示为数量有限的、分布于连续空间的多个散射源的回波信号的叠加. 为了使其具有普遍性, 将该信号矢量表示为:

$$\mathbf{Y}_{k,n} = \mathbf{A}_{k,n} \mathbf{X}_{k,n} + \mathbf{N}_{k,n} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{Y}_{k,n}$ 表示沿航向回波矢量, $\mathbf{N}_{k,n}$ 表示该回波矢量中的噪声矢量, 它是均值为零、方差与噪声水平有关的复高斯白噪声矢量, $\mathbf{X}_{k,n}$ 表示该回波矢量对应的散射空间的散射系数排列成的矢量, 该散射空间可由式(16)唯一确定.

$$\begin{aligned} r &\in \left[R_k - R_c - \frac{\Delta R}{2}, R_k - R_c + \frac{\Delta R}{2} \right] \\ y &\in \left[y_n - \frac{\Delta y}{2}, y_n + \frac{\Delta y}{2} \right] \\ s &\in \left[\left(x_1 + \frac{L_a}{2} \right) \cos \theta_0, \left(x_M - \frac{L_a}{2} \right) \cos \theta_0 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

其中, ΔR 表示子脉冲的距离分辨率, Δy 表示跨航向分辨率.

由于该回波矢量在 y 轴方向无分辨能力, 在离散化表示 $\mathbf{X}_{k,n}$ 时按照先 r 轴后 s 轴的顺序、仅沿 r 和 s 两个方向进行. 该散射系数矢量可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k,n} = & [\sigma_{k,n}(-I, -J), \sigma_{k,n}(-I, -J+1), \\ & \sigma_{k,n}(-I, -J+2), \dots, \sigma_{k,n}(-I, J), \\ & \sigma_{k,n}(-I+1, -J), \sigma_{k,n}(-I+1, -J+1), \dots, \\ & \sigma_{k,n}(-I+1, J), \dots, \sigma_{k,n}(I, -J), \\ & \sigma_{k,n}(I, -J+1), \sigma_{k,n}(I, -J+2), \dots, \sigma_{k,n}(I, J)] \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\sigma_{k,n}(i, j)$, $i \in (-I, I)$, $j \in (-J, J)$ 表示 $r-s$ 坐标系中 $(R_k - R_c + i\delta R, j\delta S)$ 位置散射源的散射系数, R_k 表示第 k 个距离门的距离值, δR 和 δS 分别表示该散射空间在 r 和 s 两个方向的离散化间隔, I 和 J 分别表示 r 和 s 两个方向上离散点数量的一半.

相应的, $\mathbf{X}_{k,n}$ 对应的观测矩阵 $\mathbf{A}_{k,n}$ 就是将每个虚拟散射源的沿航向回波信号归一化后的、以列矢量排列成的矩阵, 可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{k,n} = & [\mathbf{a}_{k,n}(-I, -J), \mathbf{a}_{k,n}(-I, -J+1), \\ & \mathbf{a}_{k,n}(-I, -J+2), \dots, \mathbf{a}_{k,n}(-I, J), \\ & \mathbf{a}_{k,n}(-I+1, -J), \mathbf{a}_{k,n}(-I+1, -J+1), \dots, \\ & \mathbf{a}_{k,n}(-I+1, J), \dots, \mathbf{a}_{k,n}(I, -J), \mathbf{a}_{k,n}(I, -J+1), \\ & \mathbf{a}_{k,n}(I, -J+2), \dots, \mathbf{a}_{k,n}(I, J)] \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\mathbf{a}_{k,n}(i, j)$, $i \in (-I, I)$, $j \in (-J, J)$ 指第 k 个粗分辨率距离门中第 i 个精分辨率距离门第 j 个高度位置处散射源对应的回波矢量, 该矢量由式(9)、(13)唯一确定, 即矩阵 $\mathbf{A}_{k,n}$ 是与距离门、回波采样方式有关的.

由前面的稀疏性分析可以看出, 矢量 $\mathbf{X}_{k,n}$ 中大部分元素为零, 只有数量有限的元素不为零, 且不为零的元素的个数大约等于散射源的个数. 也就是说, 根据式

(15), 第 k 行第 n 列的回波信号 $\mathbf{Y}_{k,n}$ 可以用观测矩阵 $\mathbf{A}_{k,n}$ 稀疏表示. 根据稀疏信号重构理论, 在特定测量方式下使用较少观测数据就能以很高概率重构稀疏信号 $\mathbf{X}_{k,n}$. 因此, 只要上节中稀疏采样方式设计恰当, 就可以以很高的概率恢复出稀疏信号 $\mathbf{X}_{k,n}$. 将每个距离门恢复的稀疏信号组合即可构造出地面的三维图像, 因此三维成像问题转化为噪声背景下的稀疏信号重构问题, 重构性能与矩阵 $\mathbf{A}_{k,n}$ 的不相关性和信噪比密切相关.

在信噪比较高时, 许多成熟的稀疏恢复算法, 如迭代门限算法 (ITA)、基追踪去噪 (BPDN)、子空间追踪 (SP) 等^[10-13], 都能以高概率精确重构出这些稀疏散射源. 而对前视阵列 SAR 来说, 受毫米波器件功率和接收阵元增益等影响, 回波信噪比通常较低, 此时常见稀疏恢复算法的性能会显著降低, 导致据此重构的三维图像会出现较多的杂波点, 影响三维图像的质量. 为了解决低信噪比情况下的三维图像重构问题, 一种退而求其次的、结合散射源空间连续性的方法是: 由于每个散射矢量中存在多个散射源且这些散射源的能量有高有低, 在散射源稀疏恢复时, 仅仅恢复出能量较强的散射源而丢弃掉弱的散射源, 即仅重构部分信号. 这些强散射点不仅包含了大部分的信号能量, 还能从三维空间的角度表示出三维地形的轮廓信息. 然后结合散射源在三维空间上的位置连续性确定弱散射源的位置, 同时结合最小二乘信号估计方法进一步确定弱散射源的能量. 需要强调的是, 这里的强仅仅是一个相对值, 其对应的信号能量仍然较弱.

3.3 低信噪比下“强”散射源稀疏信号恢复

首先, 忽略式(15)中向量和矩阵的下标, 将该算法的计算过程描述为:

(1) 初始化 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{Y}$, $\mathbf{X}_0 = \mathbf{0}$, 原子集 $\Gamma_0 = \emptyset$, 初始感知矩阵 $\Theta_0 = \mathbf{A}$, $n = 1$;

(2) 计算余量 \mathbf{r}_{n-1} 与感知矩阵 Θ_{n-1} 每一列的内积 $\mathbf{g}_n = \Theta_{n-1}^T \mathbf{r}_{n-1}$, 上标 T 表示共轭转置;

(3) 找出 \mathbf{g}_n 中绝对值最大的元素, 即 $i_n = \arg_i \max |\mathbf{g}_n[i]|$;

(4) 如果 $\mathbf{g}_n[i_n] < T_f$, 则终止迭代, 输出 \mathbf{X}_{n-1} ; 否则转入下一步;

(5) $\Gamma_n = \Gamma_{n-1} \cup \mathbf{a}\{i_n\}$, $\Theta_n = \Theta_{n-1} \cap \mathbf{a}\{i_n\}$, 利用最小二乘法计算信号的近似解 $\mathbf{X}_n = (\Gamma_n^T \Gamma_n)^{-1} \Gamma_n^T \mathbf{Y}$;

(6) 更新余量 $\mathbf{r}_n = \mathbf{Y} - \Gamma_n \mathbf{X}_n$, $n = n + 1$, 转到步骤(2).

经分析可知, 该算法与正交匹配追踪 (OMP) 算法十分相似, 其主要不同是以信号残余中最佳匹配原子的能量与判别门限 T_f 的大小关系作为终止条件, 这里将其称作门限正交匹配追踪算法 (TOMP, Threshold Orthogonal Matching Pursuit). 该算法除具有运算量小的优点外, 还无需稀疏个数信息, 并且从前视阵列 SAR 三维

成像的应用效果来看,它在低信噪比条件下具有较强的鲁棒性。

该算法的物理含义是:对于 \mathbf{X} 中任意非零元素对应的散射源回波,观测矩阵 \mathbf{A} 中相应位置处的原子与该散射源的回波是完全相关的,它们的内积等于该散射源回波能量之和的开平方。而对噪声来说,它与观测矩阵 \mathbf{A} 中任意原子都是不相关的,它与任意原子内积仍然服从均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯分布。可见,即使散射源能量小于噪声能量,只要子脉冲数量足够多,总能使散射源回波与对应原子的内积大于噪声与其它原子的内积,将散射源对应的原子选入到原子支撑集中。上述现象也可以理解为:在计算内积时,散射源回波在对应原子位置实现相干积累,而噪声回波在任意原子位置处都是非相干积累。只要积累数足够大,弱信号的积累能量都可以大于噪声积累能量,进而选出散射源对应位置的原子。

显然,当仅有一个非零元素时,上述方法在低信噪比情况下具有较好性能。而对本文研究的前视阵列 SAR,每个 \mathbf{X} 中往往不止一个非零元素,甚至有一二十个。由于支撑集中的原子不是严格正交的,非零元素的信息交叉叠加会影响原子选择,尤其是当部分原子的相关系数较高时,因此控制原子间相关系数的上限十分重要。实验发现,原子间相关系数与合成孔径时间内子脉冲个数有关。子脉冲个数越多,相关系数就越低。降低原子相关系数的方法是提高子脉冲的采样数量。当原子间相关系数较低时,即使非零元素较多,该方法也具有较好的散射源检测效果,这将在实验中进一步验证。

该算法还需要进一步确定门限 T_f ,它是区分信号和噪声的分界线,该门限确定的基本原则是尽可能使强散射源的原子被选入支撑集 \mathbf{I} ,而不要将没有散射源的原子选入到支撑集 \mathbf{I} 中,类似于信号检测中的恒虚警检测。然而,在观测矩阵 \mathbf{A} 中,由于在无散射源位置上原子与散射源信号的内积不是零,而是与原子间的相关系数有关,称其为信号泄露,因此该原子与回波矢量的内积等于散射源的信号泄露、噪声与原子内积之和。有关该内积的概率分布特性还需进一步研究,此处尚不能给出一个严格的概率公式。但如前所述,噪声与任意原子的内积仍然服从均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯分布,根据高斯噪声的 3σ 准则,门限 T_f 必定大于 $3\sigma_n$ 。另外,观测矩阵中原子间的相关性可以通过仿真实验获取,结合信号能量可以大致估算出信号泄露的能量,本实验主要依据这两个估计值来确定判别门限,并通过数据仿真实验来检验。综上所述,本文处理流程主要包括以下几个步骤,如图 3 所示。

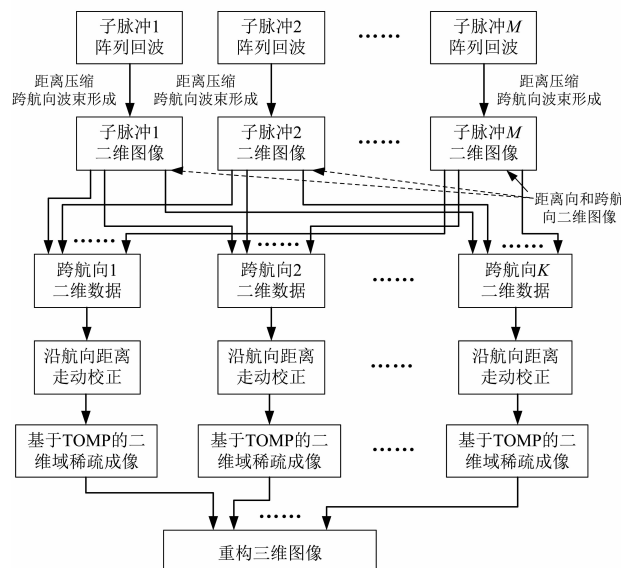


图3 前视阵列SAR稀疏三维成像方法流程图

4 仿真实验

下面通过仿真实验验证本方法的可行性及其三维成像质量,首先定义衡量三维地形重构质量的参数 Err 。对某个三维地形,假定其散射源的高度可以用唯一的二维函数 $h(x, y)$ 表示,其中 x, y 分别表示该散射源的沿航向位置和跨航向位置。假定估计的散射源的位置为 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$,则重构的三维地形的精度 Err 可以用所有散射源的高度误差的均值表示为

$$Err = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{z}_i - h(\hat{x}_i, \hat{y}_i)| \quad (19)$$

其中, N 表示散射源的总数量。 Err 为不小于零的正数,其值越小说明重构的三维地形的精度越高。

在仿真地面回波时,采用小平面单元模型^[14],每个分辨率单元至少放置 4 个散射点,这些散射点均匀分布在地面上,它们的后向散射系数服从复高斯分布且相互独立。仿真参数如表 1 所示,发射天线位于接收天线阵中心的正下方,距离接收天线阵中心 0.5m,回波信噪比为 5dB。

表 1 前视阵列 SAR 回波稀疏采样及三维成像系统仿真参数

中心波长	3mm	接收天线阵高度	500.25m
子脉冲带宽	50MHz	跨航向天线长度	6m
子脉冲宽度	2 μ s	接收阵元间距	3cm
采样频率	60MHz	波束中心俯仰角	60°
最大子脉冲数	20	波束中心方位角	0°
总带宽	1GHz	沿航向合成孔径长度	30m
平台速度	50m/s	沿航向分辨率	0.2m
场景中心斜距	1km	跨航向分辨率	0.5m

首先验证观测矩阵的相关性,假定仿真了 1200 个子脉冲的回波,相邻子脉冲的间隔服从 $[0.02, 0.12]$ 区间上的均匀分布,单位为 m. 可见,该仿真对应的飞行长度约为 80m,总的稀疏度约为 1/6. 每个子脉冲的载频服从 $[29.25, 30.75]$ 区间上的均匀分布,单位为 GHz. 图 4 给出了观测矩阵中最中间原子与其它原子的相关系数,可见原子间相关系数的最大值为 0.14,其平均值只有 0.0013,为散射源稀疏重构提供了条件.

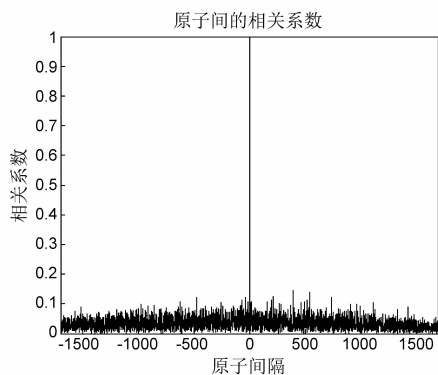


图4 观测矩阵中原子间的相关系数示意

为检验不同判决门限下的性能,假定散射源对应的原子位置随机且其散射系数服从复高斯分布,散射源个数为 10 个,散射源总功率与噪声功率之比为 5dB,图 5 给出了虚警率、检测概率随判决门限的变化曲线,其中该数值为判决门限与噪声之比,单位为 dB. 可见,在判决门限为 22dB 时,虚警率不到 1%,而对应的检测概率仍超过了 0.5,即至少有一半散射源能被该算法恢复出来,在保留大部分强散射源信息的同时保留了三维地形的轮廓.

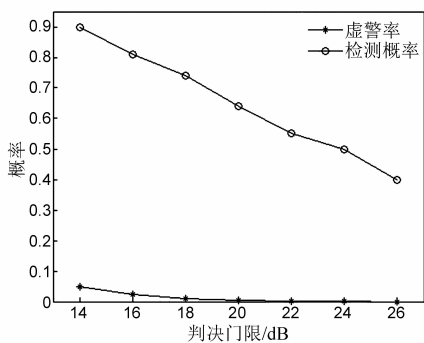


图5 虚警率、检测概率随判决门限的变化曲线

下面来看平坦地表情况下的散射源稀疏重构的情况,其中散射点的高度均为零. 图 6 给出了重构的散射源的位置信息,其高度误差均值小于 0.1m,其中检测门限为 22dB(对应于积累前信噪比为 -5dB),有效脉冲积累数约为 500 个.

然后,通过一组起伏地形情况下仿真数据验证本方法的性能,其它参数同上. 图 7 给出了仿真起伏地形

的高度图,该地形为一个对称的山包,山包高度为 15m,不存在层叠. 图 8 给出了未进行滤波处理的散射源的高度估计图. 根据仿真高度图与本方法估计的高度值相比较,即使未对散射源的高度估计进行滤波处理,其高度估计误差的均值小于 0.17m. 其中,仅有 1 个散射源的高度估计误差为 14.7m,其它散射源的高度估计误差都小于 0.5m. 其在起伏地形下的性能低于水平地形下性能的原因有待进一步分析.

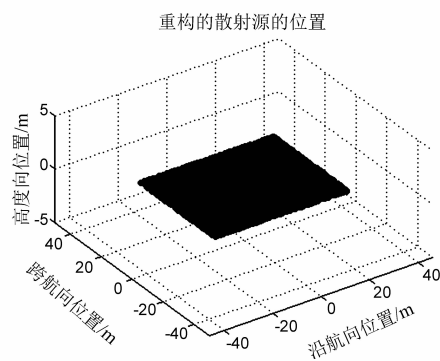


图6 水平地表的位置估计结果

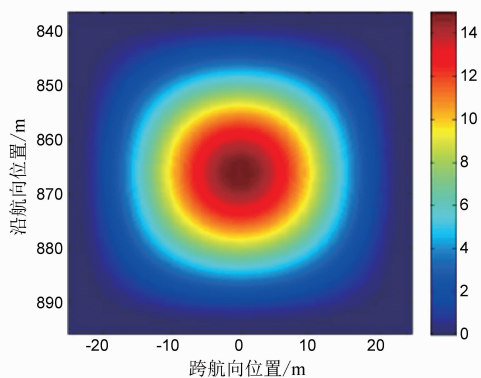


图7 仿真场景的高度起伏

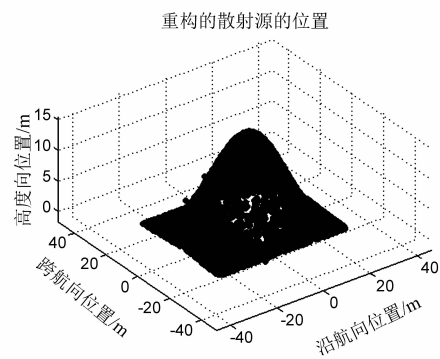


图8 起伏地形下散射源的位置估计结果

最后,为了检验多个不同散射源层叠到同一像素情况下该方法的性能,仿真了一个反射墙面情况,其几何结构如图 9 所示. 仿真信噪比为 5dB. 图 10 给出了利用本文方法恢复的地形图,可见,除少数几个孤立散射

点存在较大估计误差外,绝大部分散射点高度误差在 0.3m 以下。

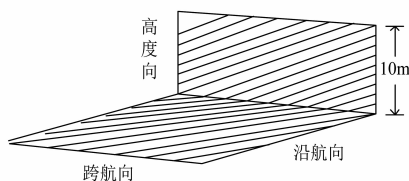


图9 仿真墙面的几何结构示意图

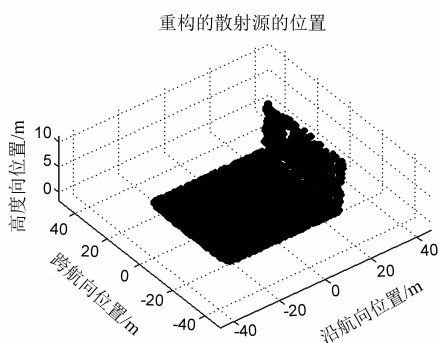


图10 层叠情况下重构的散射源位置图

以上仿真实验表明,该稀疏采样与三维成像方法可以在低信噪比下获得较好的地表三维图像,并显著降低了接收机采样率和数据量,具有较强的实用价值。

5 结论

对于距离频域和沿航向时域上非均匀稀疏采样的前视阵列 SAR 回波数据,利用基于门限的稀疏恢复方法可以精确地重构地表的三维图像,即使在信噪比仅有 5dB 的情况下该方法依然有效。与传统的三维匹配滤波方法相比,该方法降低了系统采样率和回波数据量,对高分辨前视阵列 SAR 系统设计提供了可行的实用化方案。然而,运算量大是该方法的主要问题,如何改进稀疏成像方法以显著降低运算量是该方法进一步研究的重点内容。

参考文献

- [1] Krieger G, Mittermayer J, Wendler M, et al. SIREV-sector imaging radar for enhanced vision[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2003, 7(2): 147 - 158.
- [2] Ren Xiaozhen, Sun Jiantao, Yang Ruliang. A new three-dimensional imaging algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 153 - 157.
- [3] Reigber A. Airborne Polarimetric SAR Tomography[D]. Stuttgart: PhD Dissertation of University of Stuttgart, 2001.
- [4] Wei Shunjun, Zhang Xiaoling, Shi Jun. Linear array SAR imaging via compressed sensing[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 117: 299 - 319.
- [5] 任笑真, 杨汝良. 机载前视 SAR 三维成像算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(6): 1361 - 1365.
Ren Xiao-zhen, Yang Ru-liang. Study on three-dimensional imaging algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2010, 32(6): 1361 - 1365. (in Chinese)
- [6] Tan Weixian, Hong Wen, Wang Yanping, et al. 3-D range stacking algorithm for forward-looking SAR 3-D imaging [A]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [C]. Boston, USA: IEEE Press, 2008. 1212 - 1215.
- [7] 刘向阳, 曾操, 毛志杰, 王静, 康连瑞. 基于高分辨信源估计的机载前视阵列雷达三维成像方法[J]. *电子学报*, 2013, 41(6): 1048 - 1055.
Liu Xiang-yang, Zeng Cao, Mao Zhi-jie, et al. A three-dimensional imaging method based on high resolution signal source estimation for airborne forward-looking array radar [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(6): 1048 - 1055. (in Chinese)
- [8] 陈琦, 杨汝良. 机载前视合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(1): 228 - 232.
Chen Qi, Yang Ru-liang. Research of chirp scaling imaging algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(1): 228 - 232. (in Chinese)
- [9] 徐刚, 李亚超, 张磊, 邢孟道. 基于多视角快拍 InSAR 干涉技术的前视 SAR 三维成像[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(3): 634 - 641.
Xu Gang, Li Ya-chao, et al. Three-dimension imaging of forward-looking SAR based on interferometric technology through different snapshots[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2011, 33(3): 634 - 641. (in Chinese)
- [10] Cai T T, Wang L. Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(7): 4680 - 4688.
- [11] Fang Jian, Xu Zongben, Zhang Bingchen, et al. Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation[J]. *IEEE Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(1): 352 - 363.
- [12] 刘天鹏, 刘振, 魏玺章. 基于压缩感知的脉间捷变频 SAR 成像研究[J]. *电子学报*, 2012, 40(6): 1073 - 1078.
Liu Tian-peng, Liu Zhen, Wei Xi-zhang. Research on inter-pulse frequency agility SAR imaging via compressed sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1073 - 1078. (in Chinese)
- [13] 樊甫华, 阮怀林. 低信噪比下非凸化压缩感知超宽带信

道估计方法[J]. 电子学报, 2014, 42(2): 353 - 359.

Fan Fu-hua, Ruan Huai-lin. Non-convex compressive sensing ultra-wide band channel estimation method in low SNR conditions [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42

(2): 353 - 359. (in Chinese)

[14] Franceschetti G, Migliaccio M. SARAS: A synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator[J]. IEEE Transactions on GRS, 1992, 30(1): 110 - 123.

作者简介



刘向阳 男, 1982 年 3 月出生, 河北石家庄人. 2010 年获西安电子科技大学信息与通信工程专业博士学位, 现为西安通信学院讲师、硕士生导师. 目前主要研究方向: 三维成像、信号仿真和运动目标检测.

E-mail: xiangyangliu@mail.xidian.edu.cn



王 静 女, 1982 年 9 月出生, 陕西西安人. 2009 年获西安电子科技大学信息与通信工程专业博士学位. 现为长安大学信息工程学院副教授、硕士生导师, 目前主要研究方向为目标检测与估计、信号编码与设计.

E-mail: jingwang@mail.xidian.edu.cn