

高分辨率宽测绘带 Scan SAR 压缩感知成像算法研究

万莉莉¹ 左伟华^{1,2}

(1. 怀化学院物理与信息工程系, 湖南怀化 418000; 2. 电子科技大学电子工程学院, 611731)

摘 要: 高方位向分辨率和宽测绘带对合成孔径雷达(Synthesis Aperture Radar, SAR)系统设计提出了矛盾的要求。为获得高分辨率宽测绘带地面图像, 提出了一种基于扫描模式 SAR(Scan SAR)及压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论的解决方法。Scan SAR 可获得宽测绘带, 然而各子测绘带方位向照射不完整, 导致了低的方位向成像精度。所提出的方法首先对子测绘带数据进行方位向补零, 并完成距离压缩和距离徙动校正; 在方位向有效数据行中进行随机取样构成新的数据矩阵; 根据取样指标集构建合理的重建矩阵, 通过 ROMP 算法重建出完整的方位向点目标位置信息; 通过子测绘带图像拼接, 即可获得高分辨率宽测绘带地面图像。仿真结果表明了所提出方法的有效性。

关键词: 压缩感知; 合成孔径雷达; 扫描模式; 宽测绘带; 高分辨

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2013)04-0466-08

Research on High Resolution Wide Swath Scan SAR Imaging Algorithm Based on Compressive Sensing

WAN Li-li¹ ZUO Wei-hua^{1,2}

(1. Department of Physics and information engineering, Huaihua University, Huaihua, Hunan 418000, China;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: High azimuth resolution and wide swath pose contradicting requirements on system design of synthesis aperture radar (SAR). In order to obtain high resolution and wide swath ground images, a possible solution based on Scan mode and compressive sensing theory is proposed in this paper. The Scan SAR mode can get wide swath, while the azimuth resolution of the sub-swath is low because of the incomplete azimuth illumination. The main processing steps of the proposed method include: the sub-swath data is zero padded firstly followed by the range compression and range cell migration correction; new data matrix is obtained by random selecting the effective azimuth rows; according to the random selection index set, a reasonable reconstruction matrix is built, which is used to reconstruct the targets' azimuth positions information with ROMP algorithm; the combination of the sub-swath images provides the high resolution and wide swath ground image. The simulations verify the validity of the proposed method.

Key words: Compressive sensing; Synthesis Aperture Radar; Scan mode; Wide swath; High resolution

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种微波成像雷达^[1]。在诸如地图测绘, 灾害评

估, 海洋观测等应用中, 常要求在一次飞行中, 能获得高分辨率宽测绘带的地面图像。然而高方位向分辨率和宽测绘带, 分别对 SAR 系统设计提出了相互矛盾的要求。这一矛盾可体现在脉冲重复频率

(Pulse Repeated Frequency, PRF) 的选择上。SAR 系统的 PRF 应该满足(1)式,其中 ρ_a 为方位向成像精度, W_g 为地面测绘带宽, θ_f 为测绘带远距离端入射角, c 为光速。

$$\frac{V}{\rho_a} \leq PRF \leq \frac{c}{2W_g \cdot \sin\theta_f} \quad (1)$$

方位向高分辨率要求 ρ_a 足够小,也就要求 PRF 足够高,以保证方位采样满足奈奎斯特采样定理,即(1)式的左端;而宽测绘带 W_g 则要求 PRF 足够低,以保证测绘带回波在两次脉冲发射期间能被完整接收,即(1)式的右端。可见高方位向分辨率和宽测绘带对 PRF 的要求是相互矛盾的。

为了解决高方位向分辨率与宽测绘带之间的矛盾,近年来提出了许多解决方案。它们主要对 SAR 成像模式进行改进。文献[1]提出了俯仰维多波束(Multiple Elevation Beam, MEB)和方位向多波束(Multiple Azimuth Beam, MAB)成像模式。文献[2]则将两者结合,并在距离及方位向模糊点形成合适的零陷以抑制距离及方位模糊。文献[3]提出高分辨率宽测绘带(High Resolution Wide Swath, HRWS)成像模式,它将基于俯仰维数字波束形成(Digital Beamforming, DBF)的扫描接收技术(Scan on receiver, SCORE)与 MAB 相结合,解决宽测绘带成像时不同斜距处天线照射功率不均匀的问题,同时大幅提高了距离向模糊信号比(Range ambiguity-to-signal ratio, RASR)性能。MAB 或 MEB 与 Scan 及 TOPS(Terrain Observation by Progressive Scans, TOPS)模式相结合在文献[4,5]中进行了研究。文献[6]则提出了多维波形编码技术,以提高距离及方位模糊抑制能力。文献[7,8]对多维波形编码技术的处理方法进行了研究。以上各成像模式均有各自的不足,如 MEB 获得的测绘带不连续;MAB 获得的 SAR 图像的方位向模糊信号比(Azimuth ambiguity-to-signal ratio, AASR)达不到实际要求,信号处理复杂。而且以上解决方案均会增加系统复杂性及信号处理复杂度。

扫描模式 SAR(Scan SAR)是一种以牺牲方位向成像精度为代价,提高测绘带宽的传统成像模式。它的俯仰维波束在各子测绘带间交替发射与接收,可同时获得多个子测绘带的回波数据;然而当波束照射某一个子测绘带时,其他子测绘带则无法被照射,即各子测绘带的方位向照射并不完整,

子测绘带内的目标只经历了部分多普勒历程,从而导致方位向成像精度低。

压缩感知(Compressive Sensing, CS)技术是由 Candes、Tao 等人 2004 年提出来的一种新的信号处理方法,并于 2006 年公开发表了相关的文献[9-11]。将压缩感知技术应用于雷达信号处理及成像系统,国内外学者已经做了一些工作^[12-15]。

本文基于 Scan SAR 模式及压缩感知基本理论,对高分辨率宽测绘带成像提出一种可能的解决方案。由于是 Scan SAR 模式,可以通过波束分时扫描多个子测绘带,获得宽测绘带。各子测绘带方位向数据不完整问题,则主要通过压缩感知技术予以解决,以获得高的方位向成像精度。下面将对这一方案进行详细分析和推导。

2 压缩感知基本理论

在文献[9]中, Candes 证明了当信号在某个正交空间满足稀疏性条件时,就可以对其进行降维采样,且可以从降维采样信号中以高的概率重构出原信号。这一结论表明,只要找到使信号稀疏的空间,任何信号均可压缩采样和重建。

信号稀疏性是应用压缩感知理论的前提。考虑(2)式所示复离散信号 $x \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ (它可以是时域、频域或其他变换域的信号)及其分解形式,其中 $\{\psi_i\} \in \mathbb{C}^{N \times 1} (i=1, 2, \dots, N)$ 为该信号空间的一组基, c_i 为 x 在这一组基下的分解系数。若 c_i 中只有 $K (K \ll N)$ 个较大,其他系数为零或非常小,则称信号 x 为 K -稀疏信号。

$$x = \sum_{i=1}^N c_i \psi_i = \sum_{i=1}^N \langle x, \psi_i \rangle \psi_i \quad \text{或} \quad x = \Psi \cdot C \quad (2)$$

通过观测矩阵 $\Phi \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 对稀疏信号 x 进行观测(或称为采样),可得到观测信号 $y \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 。当观测信号的维数 $M < N$, 则称之为降维观测。如(3)式所示,其中 Θ 称为重建矩阵。

$$y = \Phi x = \Phi \Psi C \triangleq \Theta C \quad (3)$$

压缩感知理论就是要从降维观测信号 y 中恢复出原信号 x ,这就需求解方程(3)。然而由于 $M < N$, 方程(3)无唯一解。要使(3)有唯一解,它需要满足一定的条件。其中一个充分条件称为有限等距性质(Restricted isometry property, RIP)。文献结

论表明将观测矩阵 Φ 的每个元素,均构建成服从独立同分布(如高斯分布、二项分布等)的随机元素时,就能使 Θ 以很高的概率满足 RIP 性质,从而使方程(3)有唯一解。这种情况下可以选择 L_0 范数,通过(4)来求解(3)。尽管(4)的求解是 NP-Hard 问题,但只要观测维数 M 满足 $M \geq K \log N$,就可使用贪婪算法如正则化匹配追踪算法(Regularized OMP, ROMP)^[16]来获得最优解。

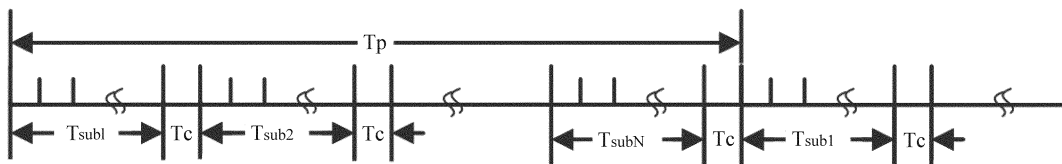
$$\underset{\hat{C}}{\operatorname{argmin}} \|\hat{C}\|_0 \quad \text{s. t.} \quad y = \Theta \hat{C} \quad (4)$$

需要注意的是,通过(4)式获得的是分解系数 C 的最优解,而非原始信号 x 本身。若要获得 x ,还需将 C 代入(2)式进行求解。

3 基于压缩感知的 Scan SAR 方位向回波信号重建原理

在第1部分已经分析过,Scan SAR 各子测绘带的方位向回波是不完整的。图1给出了 Scan SAR 信号周期的基本结构。

由图1可见,第 i 个子测绘带中的点目标只在 $T_{\text{sub}i}$ 期间才被照射,即其方位向采样是不完整的。根据第2部分阐述的压缩感知理论,当信号具备稀疏性条件时,通过随机观测矩阵对其进行降维观测,从降维观测信号中可以高概率恢复出完整的原始信号。结合 Scan SAR 子测绘带方位向回波的不完整性及压缩感知随机采样的特点,若方位向回波满足稀疏性条件,那么即便其采样是不完整的,也可从有效的方位向采样点中进行随机采样,实现对 Scan SAR 方位向信号的降维观测;然后通过构建合理的重建矩阵,重建出完整的方位向回波,从而提高方位向成像精度,解决方位向高精度与宽测绘带成像之间的矛盾。下面将对这一方法进行详细分析。



$T_{\text{sub}i}$: 子测绘带 i 驻留时间; T_c : 波束切换时间; T_p : 信号周期

图1 Scan SAR 信号周期基本结构

Fig. 1 The structure of Scan SAR signal period

3.1 Scan SAR 子测绘带方位向回波的稀疏性分析

信号的稀疏性是应用压缩感知理论的前提条件。传统 Scan SAR 主要应用于低分辨率宽测绘带成像,如海洋监测,大范围地面搜索等。在这些应用中,感兴趣的目标常常为强散射目标,如海洋中的舰船,冰川;大范围搜索时地面停放的汽车,飞机等。当成像场景中包含此类强散射目标时,可以认为场景在目标域满足稀疏性条件。这一稀疏性条件反映到信号域,就是场景的方位向回波可以满足稀疏性条件。下面对这一稀疏性进行分析。

设发射信号 $e(t)$ 为线性调频信号。方位向第 k 个点目标回波信号经距离向处理(包括距离压缩、距离徙动校正,并变换回二维时域)后的解析表达式如(5)所示,其中 $A_k(t)$ 为快时间表达式(忽略其具体形式), t 为距离向快时间, s 为方位向慢时间, s_k 为目标方位向波束穿越时刻, T_a 为合成孔径时间, K_a 为方位向调频率。为简化分析将方位向回波信号近似为线性调频信号。

$$r_k(s, t) = A_k(t) \operatorname{rect}\left(\frac{s-s_k}{T_a}\right) \exp(-j\pi K_a (s-s_k)^2) \quad (5)$$

Scan SAR 方位向采样是不完整的,即(5)式中

$\operatorname{rect}\left(\frac{s-s_k}{T_a}\right)$ 实际上应该是多个矩形脉冲和的形式,但这并不影响其稀疏性分析。

设方位向采样时间范围为 $s \in (s_0, s_1)$, 方位向采样时间间隔为 T_s , 则相应的离散时间点集可写为 $(s_0, \dots, s_0 + kT_s, \dots, s_0 + (N_s - 1)T_s)$, 其中 $N_s = \left\lfloor \frac{X_w}{V} \right\rfloor$, $k = 0, 1, \dots, N_s - 1$, X_w 为平台方位向飞行的距离, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向上取整符号。令某一斜距 R_0 处,第一个方位向点目标的回波如(6)式所示。

$$r_0(s, t) = A_k(t) \operatorname{rect}\left(\frac{s-s_0}{T_a}\right) \exp(-j\pi K_a(s-s_0)^2) \quad (6)$$

则同一斜距 R_0 上所有方位向目标的回波信号, 可表示如(7)式所示, 其中 Λ_a 为此斜距处所有方位向目标时间延迟序号的集合。

$$r(s, t) = \sum_{k \in \Lambda_a} r_0(s - kT_s, t) \quad (7)$$

那么, (8)式所示的 $\Psi(t)$ 可用认为是方位向回波信号时间域的一组基。

$$\Psi(t) = (r_0(s, t), r_0(s-T_s, t), \dots, r_0(s-(N_s-1)T_s, t)) \\ \triangleq (\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_{N_s}(t)) \quad (8)$$

它与快时间 t 有关。由于不同斜距处均可使用同一组基, 因此 $\Psi(t)$ 也可简写为 Ψ 。

设 $M = \left\lfloor \frac{T_a}{T_s} \right\rfloor$, 则 $r_0(s)$ 可写为 $M \times 1$ 的列向量, 那么 Ψ 还可写成 $(M+N_s-1) \times N_s$ 维的带状矩阵形式, 如(9)式所示。

$$\Psi = \begin{pmatrix} r_0(1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & r_0(1) & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & r_0(1) \\ r_0(M) & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & r_0(M) & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_0(M) \end{pmatrix}_{(M+N_s-1) \times N_s} \quad (9)$$

利用(8)或(9)式所示的基, 可对方位向回波信号 $r(s, t)$ 进行分解, 如(10)式所示, 其中 $C(t)$ 为与 t 有关的 $(M+N_s-1) \times 1$ 维的分解系数, 同时还考虑了信号传输过程中的加性噪声 $n(t)$ 。

$$r(s, t) = \Psi C(t) + n(t) \quad (10)$$

若方位向点目标个数 $K \ll N_s < M+N_s-1$, 即如本节开头所述, 在子测绘带中存在强散射体目标, 而其他目标的回波很微弱, 那么在分解系数 $C(t)$ 中, 只有 K 个系数较大, 而其他系数很小或者为零, 这正是第2部分所述 K -稀疏的定义。从而可知, $r(s, t)$ 在 Ψ 所构成的信号空间内是 K -稀疏的。这就为利用压缩感知理论进行 Scan SAR 方位向回波重建提供了前提条件。

3.2 随机矩阵 Φ 、随机观测数据及重建矩阵 Θ 的构建

在3.1中对 Scan SAR 子条带方位向回波信号的稀疏性进行了分析, 它是应用压缩感知理论的前提条件。本节将讨论随机采样及方位向重建过程。

为了对 Scan SAR 子测绘带方位向回波数据进行随机采样, 首先在不同驻留时间获得的方位向采样数据之间, 进行补零操作, 以获得与条带 SAR 相同的数据矩阵结构。补入的全零行表示的是此方位位置未采样; 其他行则为有效的方位向采样数据。采用传统的 SAR 成像方法, 对补零的后的数据进行距离向处理, 包括距离压缩, 距离徙动校正等操作。

Scan SAR 在数据获取阶段, 所获得的方位采样只是部分的, 而非完整的, 即已经对方位向进行了降维观测。但这并不妨碍对其进行进一步的随机采样。为了使随机采样的数据有效, 随机采样应该在有效的方位向采样数据中进行。之所以将数据矩阵补零至条带 SAR 相同的矩阵结构, 目的有两个, 其一为便于进行距离徙动校正; 另一个重要目的在于获得各方位向随机采样正确的方位向采样点编号。这一编号构成的指标集, 将用于构建随机矩阵 Φ 及重建矩阵 Θ 。

下面通过数学表达式对此过程进行描述。设经过补零操作及距离向处理后的子测绘带数据为 $r_{scan}(s, t) \triangleq r(n)$, $n \in (1, N_s+M-1)$ (为了表述方便, 不再考虑快时间变量)。在 n 的取值范围内随机产生一个指标集 Λ 。注意, 这一指标集所有元素均应在有效方位向数据对应的编号范围内, 以保证随机采样的有效性。

根据这一指标集, 设计一个随机矩阵 $\Phi(n)$, 它与 $r(n)$ 具有相同的结构。 $\Phi(n)$ 中 $n \in \Lambda$ 的行为全1; 而其他行为全零, 如(11)式所示。

$$\Phi(n) = \begin{cases} 1, n \in \Lambda \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

这样处理的实质是将 $\Phi(n)$ 的行选择为符合二项分布的随机变量, 其取值为0或者1, 概率分别为0.5。根据压缩感知理论, 当观测矩阵的元素为独立同分布的随机元素时, 可使重建矩阵以很高的概率满足 RIP 性质。故 $\Phi(n)$ 的选择符合压缩感知基本理论。

根据 $\Phi(n)$ 对 $r(n)$ 进行随机采样, 就可以获得随机观测数据。也就是将 $r(n)$ 中对应于所有 $\Phi(n)$ 中值为1位置的数据抽取出来, 构成新的数据矩阵, 称之为随机观测矩阵 $y(m)$ 。也就是将 $r(n)$ 中指标集 Λ 元素所对应的行取出来, 如(12)式所示。

$$y(m) = r(n), n \in \Lambda, m = 1, 2, \dots, |\Lambda| \quad (12)$$

对上节所述的基矩阵 Ψ 进行同样的处理,就可以获得重建矩阵 Θ :

$$\Theta(m, j) = \Psi(n, j), n \in \Lambda, m = 1, 2, \dots, |\Lambda| \quad (13)$$

如第2部分所述,只要观测值个数满足 $|\Lambda| \geq O(K \cdot \log(N_s + M))$,就能以很高的概率对完整的方位向回波进行重建(这一概率为 $1 - N^{-C_m}$, C_m 与随机采样点数有关)。

4 基于压缩感知的高分辨 Scan SAR 成像算法

在前述分析的基础上,本节给出基于压缩感知技术高分辨率 Scan SAR 成像算法的具体实施步骤。以子条带数据为例,图2给出了详细步骤。主要包括:

第一步:在驻留时间内获得的数据间插入零元素,以构成条带模式相同的回波数据结构。

第二步:对插入零元素的数据矩阵进行传统的距离向处理,主要包括距离压缩和距离徙动校正。

第三步:对经过距离向处理的数据矩阵的行,进行随机抽取(随机抽取需在有效方位向采样点中进行),所取行编号构成一个指标集,由它来构建随机矩阵 Φ ,所得数据就是随机观测矩阵;同时,对基矩阵做相同的抽取,为方位向回波重建做准备。

第四步:根据随机观测矩阵,同样抽取的基矩阵,以及随机取样矩阵,利用 ROMP 算法进行方位向回波重建。需要注意的是,ROMP 算法获得的是分解系数,而并非方位向回波信号本身。由于分解系数,实际上就是方位向点目标的位置信息,因此,通过 ROMP 算法后,已经获得了场景图像,而并不需要再重建出完整的方位向回波。当然,也可以通过(2)式计算出完整的方位向回波信号,然后再采用传统匹配

滤波的方法进行方位向压缩,本文不采用这种方法。

最后,将各子测绘带图像的拼接,即可获得高分辨率的宽测绘带地面图像。

5 仿真结果及性能分析

本节将通过数值仿真来验证本文所提出方法的正确性及有效性。

第一组实验为一维点目标成像。首先对一维点目标回波信号,做类似于 Scan 模式的数据获取,如图3(a)所示。虽然这与二维数据获取过程有区别,但可以模拟 Scan 模式下方位向回波采样的情况。

图3(a)中共有6个不同幅度的点目标回波,数据只在波束照射到时才被接收,其他时间则为零;(b)为从有效采样数据中随机取出25%构成的随机采样数据,随机采样的数据是直接拼接在一起的,并非连续信号;(c)图给出了完整数据(未进行 Scan 模式及随机采样)匹配滤波的成像结果;(d)则给出了对(b)中数据,采用本文提出的方法成像的结果。比较(c)及(d)可见,两种方法均可以获得点目标的位置及幅度信息;图(c)中点目标的像表现为 sinc 函数形式,有较高旁瓣;而后者则无旁瓣,表现出更高的分辨率。由此可见,即使通过25%的数据进行信息重建,就可以获得超分辨的成像结果。这为本文提出的方法应用于二维成像提供了仿真依据。

第二组实验为二维成像仿真。所设置参数能获得的距离向和方位向理想成像精度分别为2米和4米。图4(a)和(b)分别给出了采用传统全孔径距离多普勒算法(Range Doppler algorithm, RDA)和本文方法时,Scan SAR 单个子测绘带的成像结果。

由图4可见:

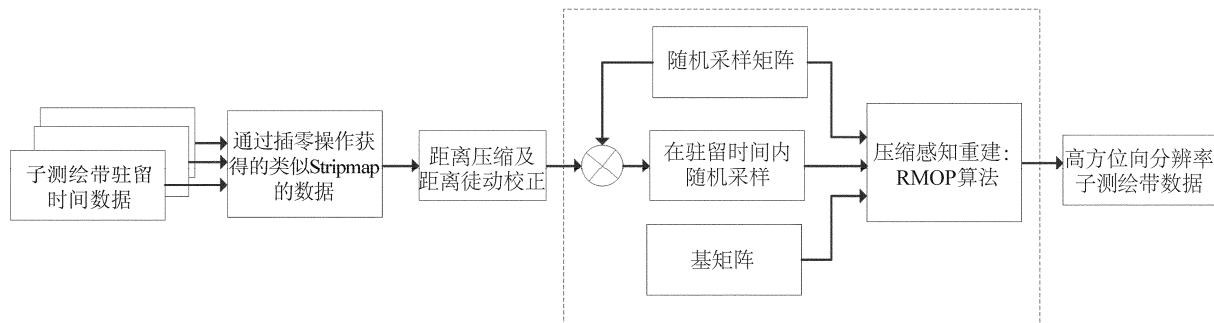


图2 本文提出方法的处理步骤

Fig. 2 Processing steps of the proposed method

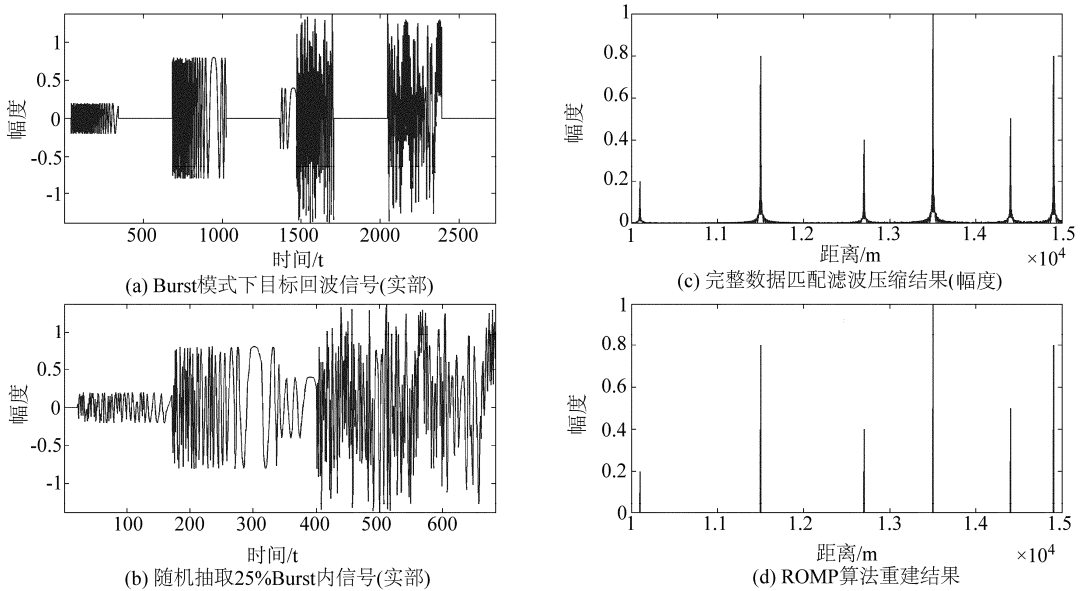


图 3 一维回波成像结果, (c) 匹配滤波, (d) 本文方法

Fig. 3 Compressed results of 1-D returns, (c) Matching filter method, (d) The proposed method

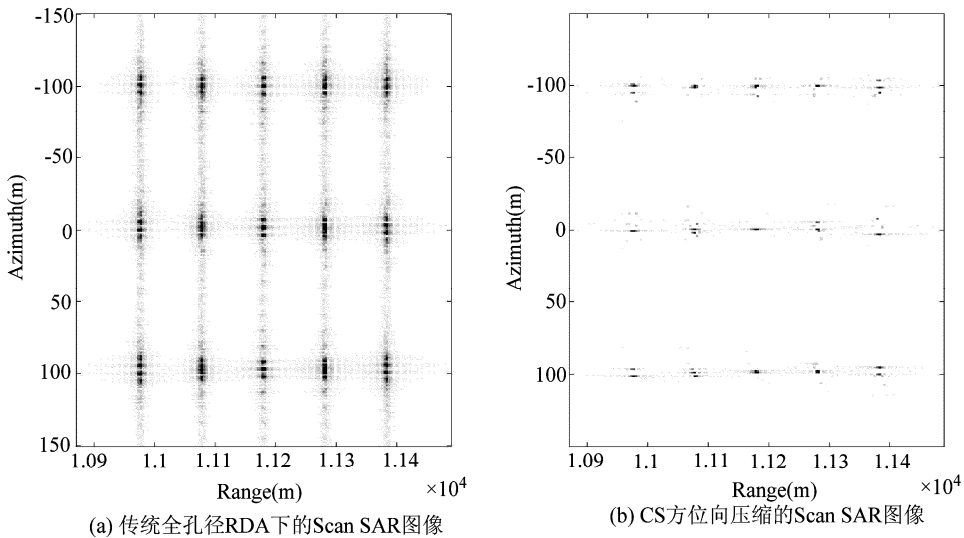


图 4 二维场景成像结果比较, (a) 传统 RDA, (b) 本文方法

Fig. 4 Compressed results of 2-D returns, (a) Traditional RDA, (b) The proposed method

(1)图(a)、(b)中每个点目标位置处均出现了目标的像,说明所提出方法是可行的。

(2)(a)图中,每个点目标表现为三个峰值点(峰值点个数与子测绘带个数有关),这正是由于Scan SAR 中点目标方位向采样不完整的成像结果,这造成了方位向成像精度的下降,下降程度与所取子测绘带个数成正比;(b)图中,场景中点目标均表现为单峰值,只有场景两侧个别点目标存在部分散焦现象。另外,点目标成像结果方位向的拖尾现象得到了明显改善,这说明本文提出的方法,有效解

决了 Scan SAR 方位向成像精度下降的问题。

(3)虽然(b)点目标的成像质量要明显优于(a),然而场景中心两侧的点目标质量会出现部分散焦现象,这与距离向处理,如距离压缩、距离徙动校正等有关。在后续研究中,将对成像算法做进一步的改进,使边缘点也获得较好的聚焦结果。

为了进一步比较两种成像算法的性能,图 5 给出了场景中心点成像结果的细节图,为使成像结果光滑,对数据进行了频域插值处理。根据图 5 所示的曲线,可计算出点目标的性能参数,如表 1 所示。

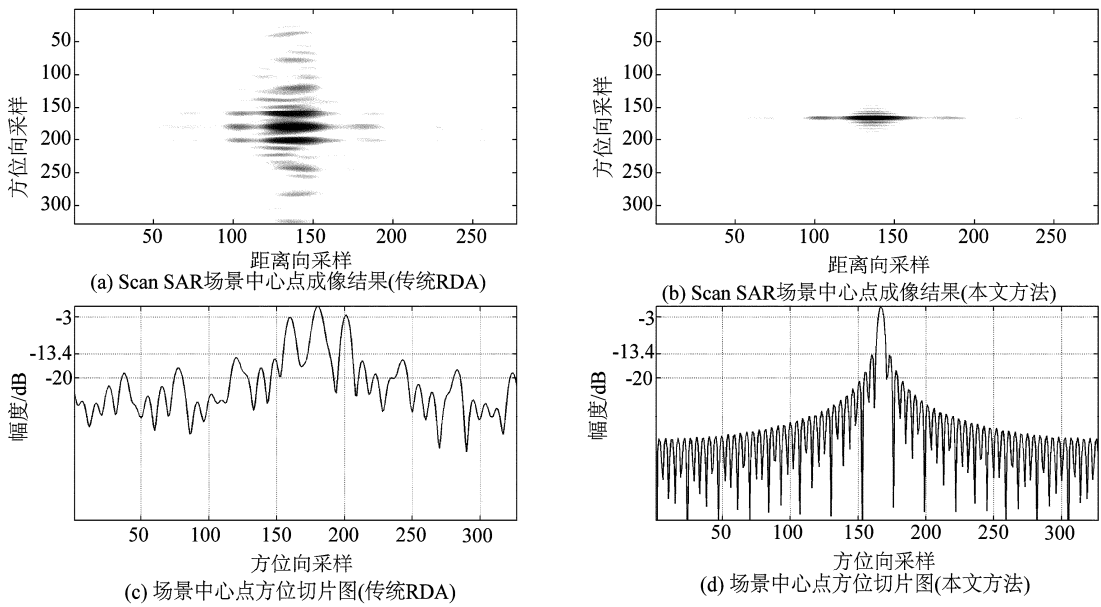


图5 子测绘带场景中心点目标成像结果比较, (a) 传统 RDA, (b) 本文方法

Fig. 5 Compressed results of point target located at the scene center, (a) Traditional RDA, (b) The proposed method

表1 场景中心点目标成像性能参数

Tab. 1 Calculated performance parameters of the image of point target located at the scene center of the sub-swath

方法 \ 参数	ρ_r/m	ρ_a/m	$ISLR_a/dB$	$ISLR_r/dB$	$PSLR_a/dB$	$PSLR_r/dB$
RDA	4.3808	11.2923	-5.5471	-4.2313	-3	-13.4
CS	4.6385	1.0505	-5.1541	-4.7069	-13.4	-13.4

从表1可见本文方法所获得的距离向成像精度 ρ_r 为4.6358米,要略差于传统RDA方法的4.3808米;但是本文方法所获得的方位向成像精度为1.0505米,要远远优于传统RDA方法的11.2923米,甚至要优于方位向理想成像精度。

传统RDA方法,造成方位向成像精度变差的原因是方位向回波数据的不完整性。而本文提出的方法,即便只使用了25%的方位向回波数据,其方位向成像精度也要优于理想的成像精度。这一仿真结果证明,本文方法在目标方位向稀疏的情况下,可以获得超分辨率的方位向成像精度,从而实现了高方位向分辨率的Scan SAR子测绘带图像。结合多个子测绘带的图像,即可获得高分辨率宽测绘带的Scan SAR图像。故本文的方法,为高分辨率宽测绘带Scan SAR成像提供了一种可能的解决方案。

6 结论

传统Scan SAR可以获得宽测绘带成像,然而由于方位向回波数据不完整,使得其方位向成像精度低。本文提出的方法,在方位向回波稀疏的前提下,基于压缩感知技术,通过对方位向不完整数据的随机取样,并构成合理的随机矩阵及重建矩阵,可以从不完整的数据中,恢复出完整的方位向点目标位置信息,从而可以获得超过条带SAR方位向成像精度的Scan SAR图像。因此,本文提出的方法对高分辨率宽测绘带Scan SAR成像提供了一种可能的解决方法。

参考文献

- [1] A. Currie and M. A. Brown, Wide-swath SAR [C]. IEE Proc. Inst. Elect. Eng. F., vol. 139, no 2, pp. 122-135, 1992.

- [2] G. D. Callaghan and I. D. Longstaff, Wide swath spaceborne SAR using a quad element array [C]. IEE Proceedings—Radar Sonar and Navigation, 1992;139(2), 122-135.
- [3] M. Suess, B. Grafmueller, and R. Zahn, A novel high resolution, wide swath SAR system [C]. in Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., Sydney, Australia, 2001; 1013-1015.
- [4] Nicolas G, Gebert N, Moreim A. Multichannel Azimuth Processing in ScanSAR and TOPS mode operation [J]. IEEE trans. On GRS. 2010, 48(7):2994-3008.
- [5] W. Xu, P. P. Huang, Y. K. Deng, Multi-channel SPC-MB-TOPS SAR for high-resolution wide-swath imaging [J]. Progress in electromagnetics Research, 2011, vol. 116, 533-551.
- [6] G. Krieger, N. Gebert, and A. Moreira, Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Jan. 2008, 46(1):31-46.
- [7] Fan Feng, Shiqiang Li, Weidong Yu, Shuo Wang, Study on the Processing Scheme for Space-Time Waveform Encoding SAR System Based on Two-Dimensional Digital Beamforming [J]. IEEE Trans. On GRS, March, 2012, 50(3):910-932.
- [8] Fan Feng, Shiqiang Li, Weidong Yu, Pingping Huang, Wei Xu, Echo Separation in Multidimensional Waveform Encoding SAR Remote Sensing Using an Advanced Null-Steering Beamformer [J]. IEEE Trans. On GRS, Oct. 2012, 50(10):4157-4172.
- [9] E. Candes. Compressive sampling [C]. Proceedings of the international congress of mathematicians. Madrid, Spain, 2006, 3:1422-1452.
- [10] E. Candes, J Romberg, Terence Tao. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE trans. on Information Theory, 2006, 6(2):227-254.
- [11] D. L. Donoho. Compressed sensing [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [12] Patel V., Easley, R., Healy M. et. al., Compressed Synthetic Aperture Radar [J]. IEEE Selected topics in signal processing, 2010, 4(2):244-254.
- [13] T. Alonso, L. Dekker, Mallorqui, J., A Novel Strategy for Radar Imaging Based on Compressive Sensing [J]. IEEE Trans. on GRS, 2010, 48(12):4285-4295.
- [14] 李晶, 张顺生, 常俊飞. 基于压缩感知的双基 SAR 二维高分辨成像算法 [J]. 信号处理, 2012, 28(5): 737-743. Li J., Zhang S. S., Chang J. F., Two-Dimensional High Resolution Bistatic SAR Imaging Algorithm Based on Compressed Sensing [J]. Signal processing, 2012, 28(5): 737-743. (in Chinese)
- [15] 刘记红, 徐少坤, 高勋章, 黎湘, 庄钊文. 压缩感知雷达成像技术综述 [J]. 信号处理, 2011, 27(2):251-260. Liu J. H., Xu S. K., Gao X. Z., Li X., Zhuang Z. W., A Review of radar imaging technique based on compressed sensing [J]. Signal processing, 2011, 27(2): 251-260. (in Chinese)
- [16] D. Needell, Topics in compressed sensing [D]. University of California, Davis, 2009.

作者简介



万莉莉 女,汉族,1982年5月生,河南开封人,2007年获桂林电子科技大学信号与信息处理专业硕士学位,讲师,湖南省怀化学院物理与信息工程系通信教研室主任,主要研究方向为雷达信号处理。E-mail:walili212@163.com



左伟华 男,汉族,1980年10月生,湖南衡阳人,电子科技大学电子工程学院博士研究生,讲师,湖南省怀化学院物理与信息工程系,主要研究方向为合成孔径雷达成像模式及算法研究。E-mail:kingso801021@163.com