

基于CS算法的MIMO-SAR成像研究

黄平平¹, 邓云凯², 徐伟²

(1. 内蒙古工业大学信息工程学院 呼和浩特 010051; 2. 中国科学院电子学研究所 北京 海淀区 100190)

【摘要】多孔孔径带合成技术是目前多发多收系统可工程实现的技术方案。该文深入研究了基于子脉冲频域合成的同步子脉冲合成和同相位中心合成两种合成方式,通过对相位补偿量的推导证明了同步子脉冲合成的复杂度和同相位中心合成方式的优势。并以此为基础,针对CS算法在MIMO-SAR系统的应用建立了相应的数学模型,提出了基于CS算法的MIMO-SAR系统的成像流程,并通过对其三发三收SAR系统的点目标和点阵目标的计算机仿真,验证了该方法的有效性。

关键词 频域合成; 高分辨率; 多发多收; 合成孔径雷达; 宽测绘带

中图分类号 TM503+.2

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.02.010

Research on Multiple-Input and Multiple-Output SAR Imaging Based on CS Algorithm

HUANG Ping-ping¹, DENG Yun-kai², and XU Wei²

(1. College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology Hohhot 010051;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100190)

Abstract Multiple apertures sub-band synthetic technique can be realized for multiple-input and multiple-output SAR at the state-of-the-art level. Two kinds of frequency sub-band synthetic techniques are researched. A mathematical model for MIMO SAR is proposed and the feasibility is analyzed. The image process of MIMO SAR based on CS algorithm is presented. The computer simulations show the effectiveness of the method.

Key words frequency synthetic; high resolution; multiple-input and multiple-output (MIMO); synthetic aperture radar (SAR); wide swath

多波束合成孔径雷达^[1-2]是近几年研究和工程实现的主要方向,技术上趋于成熟,在此基础上逐渐开始了对多发多收合成孔径雷达(MIMO-SAR)^[3-4]的研究。

目前同载频MIMO-SAR的研究大多采用正交编码信号^[5],均假设信号间的互相关噪声为零,该信号现实中是不存在的。基于Chirp信号的同载频MIMO-SAR系统需要借助两维DBF或空时自适应等技术手段实现信号分离,工程实现难度较大,因此有学者对基于Chirp信号分载频的情况进行了研究^[6],并取得了一定的研究成果。

文献[7-8]对时域合成方式进行了研究,但是该方式计算量较大^[9],而频域合成仅需将子脉冲频谱拼接,计算量小,在性能上与时域合成相当,综合比较,频域合成方法效率更高。本文在文献[10]子带

合成MIMO-SAR原理的基础上,进一步研究了两种不同子带合成方式的可行性,并将其与CS^[11]算法融合,给出了算法流程以及成像结果,为应用CS算法的MIMO-SAR系统的信号处理提供了参考。

1 子带合成选择方式分类

文献[10]论述了子带合成技术的基本原理。其基本思想是各子孔径同时发射带宽相同频谱相连的子带脉冲信号,回波处理时先用带通滤波器组对各个子孔径接收的混合回波信号进行分离,然后将多个子脉冲频谱相互拼接来合成一个宽带信号。

按照合成宽带信号所选子脉冲信号来自同一个PRT或是同一相位中心,可将选择方式分为同步子脉冲合成和同相位中心合成,如图1所示。以三发三收SAR系统为例,同步子脉冲合成,是将同一子孔

收稿日期: 2011-03-30; 修回日期: 2011-09-01

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZZ11069); 内蒙古自治区自然科学基金(2011BS0904)

作者简介: 黄平平(1978-),男,博士,主要从事合成孔径雷达系统设计与信号处理方面的研究。

径接收到的子带信号进行合成, 这样每个PRT内得到的3个宽带信号都是由该PRT内得到的9个子带信号合成的; 同相位中心合成, 是将相等等效相位中心上接收到的3个子带信号进行合成, 有的信号来自两个相邻的PRT。图1中通过两个临近的PRT获得的等效相位中心表示同步子脉冲合成和同相位中心合成在信号选择方式的差异。

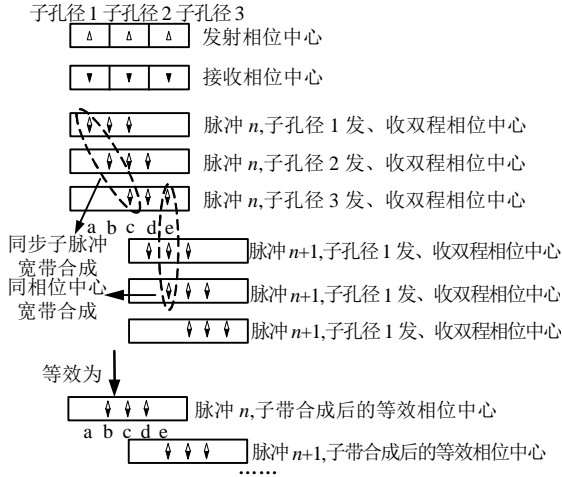


图1 两种子脉冲合成方式示意图

采用时域合成时, 不同的信号选择方式会影响到频移、相位校正和时移参考函数的表达式。而频域合成方式没有以上3个步骤, 不存在该问题, 只是同步子脉冲合成方式需要对不同相位中心的回波信号进行相位补偿, 能否将不同采样点的信号补偿到同一采样点, 决定了该方式是否可行。下面通过对相位补偿的数学推导来进行研究。

以三子孔径系统为例对同一采样点接收的不同采样点上发射信号的双程相位差进行推导, 其回波信号排列方式和斜距几何可以参考文献[12]。

设中间子孔径到点目标的距离为 $R(t)$, 孔径间距为 d , 子孔径1接收到各子孔径发射的信号依次为 s_{11} 、 s_{21} 和 s_{31} , 其对应的发收双程相位历程分别为 $\phi_{11}(t)$ 、 $\phi_{21}(t)$ 、 $\phi_{31}(t)$ 。设 $k = 2\pi/\lambda$, 则有:

$$\phi_{11}(t) = k \left(R(t - \frac{d}{v_a}) + R(t - \frac{d}{v_a}) \right) = 2kR(t) - 2k \left(\frac{\alpha d}{v_a} + \frac{2\beta d(t-t_0)}{v_a} - \frac{\beta d^2}{v_a^2} \right) \quad (1)$$

$$\phi_{21}(t) = k \left(R(t - \frac{d}{v_a}) + R(t) \right) = 2kR(t) - k \left(\frac{\alpha d}{v_a} + \frac{2\beta d(t-t_0)}{v_a} + \frac{\beta d^2}{v_a^2} \right) \quad (2)$$

$$\phi_{31}(t) = k \left(R(t + \frac{d}{v_a}) + R(t - \frac{d}{v_a}) \right) = 2kR(t) - 2k \left(-\frac{\beta d^2}{v_a^2} \right) \quad (3)$$

相位差为:

$$\phi_{21}(t) - \phi_{11}(t) = k \left(\frac{\alpha d}{v_a} + \frac{2\beta d(t-t_0)}{v_a} - \frac{\beta d^2}{v_a^2} \right) \quad (4)$$

$$\phi_{31}(t) - \phi_{21}(t) = k \left(\frac{\alpha d}{v_a} + \frac{2\beta d(t-t_0)}{v_a} + \frac{\beta d^2}{v_a^2} \right) \quad (5)$$

式中, $\alpha = -v_a \sin \theta$; $\beta = v_a^2 \cos^2 \theta / (2R_0)$; v_a 为平台速度。设 R_0 为航线到场景中心的距离, 此时 $\theta = 0$, $\alpha = 0$, $\beta = v_a^2 / 2R_0$, 将其分别代入式(4)和式(5), 可得:

$$\phi_{21}(t) - \phi_{11}(t) = k \left(\frac{v_a d(t-t_0)}{R_0} - \frac{d^2}{2R_0} \right) \quad (6)$$

$$\phi_{31}(t) - \phi_{21}(t) = k \left(\frac{v_a d(t-t_0)}{R_0} + \frac{d^2}{2R_0} \right) \quad (7)$$

其相位差为随时间变化的变量, 故很难补偿, 因此, 应选择同相位中心子脉冲合成方式。且同相位中心合成时, 等效相位中心周期性非均匀排列对成像效果的影响可能更小一些, 本文后续说明和仿真中选用的均为同相位中心合成方式。

2 基于CS算法结合的成像流程

MIMO-SAR几何构型及回波信号频带合成的过程在文献[10]中已详细给出。每个孔径发射信号带宽 $B_e = kT_e$, k 为调频率, T_e 为子脉冲脉宽, 重叠带宽为 ΔB , 信号重叠度表示为 $\alpha = \Delta B / B_e$, 设第一子孔径发射信号载频为 $f_c(1)$, 则第 n 子孔径载频为:

$$f_c(n) = f_c(1) + (n-1)(1-\alpha)B_e \quad (8)$$

设 t 为全时间, τ 为快时间, η 为慢时间, 第 n 孔径发射信号为:

$$s_n(\tau, \eta) = \text{rect}(\tau/T_e) \exp(j2\pi f_c(n)t + j\pi k \tau^2) \quad (9)$$

N 个孔径同时发射信号, 可以得到 $N \times N$ 个等效相位中心。解模糊后可得到 N 个不模糊的子带信号, 再对处于同一等效相位中心处的 N 个子带信号进行合成就可得到大带宽不模糊回波信号。

第 n 个子孔径对应的第 q 个等效相位中心接收到的回波数据为:

$$s_{wn}(\tau, \eta) = \sum_{m=1}^M \sigma_m \text{rect} \left(\left(\tau - \frac{2R_{m,wn}}{c} \right) / T_e \right) \times$$

$$\exp\left(j\pi k\left(\tau - \frac{2R_{m,wn}}{c}\right)^2\right) \text{rect}\left(\frac{y - y_m}{L_s}\right) \times \exp\left(j2\pi f_c(n)\left(t - \frac{2R_{m,wn}}{c}\right)\right) \quad (10)$$

式中, σ_m 为常数, 表示第 m 个点目标回波的幅度值; $R_{m,wn}$ 为第 m 个散射点到第 n 个子孔径对应的第 w 个等效相位中心的距离。

将合成得到的距离频域方位时域的宽带信号重写为:

$$S_n(f_r, \eta) = S_n'(f_r, \eta) H_F(f_r, \eta_0) = \sum_{m=1}^M \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \left\{ \text{rect}\left(\frac{f_r}{NT_e k}\right) \text{rect}\left(\frac{y - y_m}{L_s}\right) \times \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}(R_m'(\eta, R_m) - R_m'(\eta_0, R_m))f_r\right) \right\} \quad (11)$$

频域合成方法是先将回波信号变换到距离频域进行操作, 因此它应用于SAR成像时需要考虑算法的选择和调整问题。采用CS算法时应先对滤波后的合成谱乘以频域滤波器 $H(f_r) = \exp(-j\pi/k)$, 然后进行距离向的IFFT, 使数据回到原始回波域。

$$S_n(f_r, \eta) H(f_r) = \sum_{m=1}^M \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \left\{ \text{rect}\left(\frac{f_r}{NT_e k}\right) \text{rect}\left(\frac{y - y_m}{L_s}\right) \times \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}(R_m'(\eta, R_m) - R_m'(\eta_0, R_m))f_r\right) \right\} \times \exp(-j\pi f_r^2 / k) \quad (12)$$

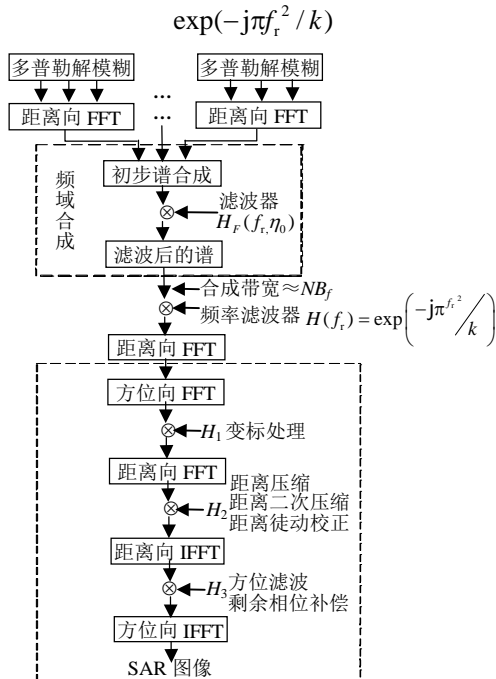


图2 带合成技术与经典CS算法结合的成像流程

利用驻定相位原理进行距离向IFFT得:

$$S_n'(\tau, \eta) = \sum_{m=1}^M \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \text{rect}\left(\frac{\tau}{NT_c}\right) \text{rect}\left(\frac{y - y_m}{L_s}\right) \times \exp(j\pi k(\tau - \xi)^2) \exp(-j2\pi \xi f_c) \quad (13)$$

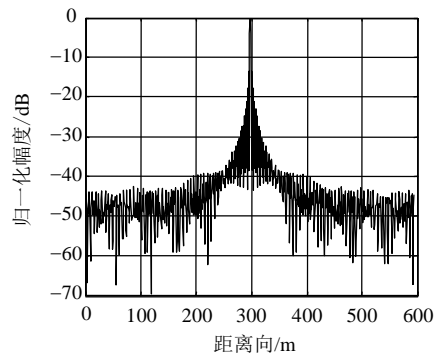
式中, $\xi = \frac{2}{c}(R_m'(\eta, R_m) - R_m'(\eta_0, R_m))$ 为时延。故经过上述变换, 回波信号又回到了原始回波域, 然后利用经典的CS算法进行后续成像处理, 操作流程如图2所示。

3 仿真验证

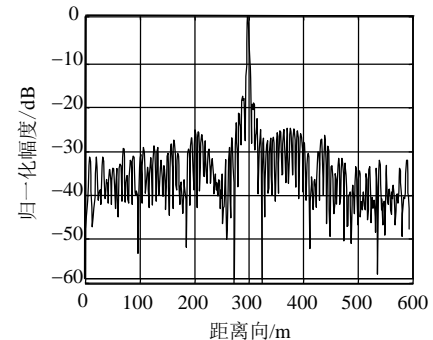
利用表1中的参数对同相位中心子脉冲合成和同步子脉冲合成分别进行仿真。按照文献[10]中的步骤对某三发三收SAR系统的点目标回波进行距离向FFT, 得到3个子频谱的合成频谱, 进行距离向压缩, 得到图3所示结果。

表1 仿真参数

参数	参数
卫星高度 H/km	675
地球半径 R_e/km	6371
卫星等效速度 $V_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	7.51
方位子孔径个数	3
脉冲重复频率/Hz	833
子带信号带宽/MHz	160
各个子带工作频率 f_c/GHz	9.498, 9.650, 9.802
子带重叠度/(%)	5
合成后工作频率 f_c/GHz	9.65
合成后信号带宽/MHz	464
方位向分辨率/m	0.3
距离向分辨率/m	0.3



a. 同相位子脉冲合成



b. 同步子脉冲合成

图3 距离向压缩结果

可以看到两种方法的压缩结果有明显的差异, 同步子脉冲合成的距离向压缩结果较差, 其点目标图像如图4所示。

可见, 由于合成的子脉冲间有一定的方位向相位差, 子带合成的过程中将该相位差引入到了合成后的宽带信号中, 成像结果有明显的散焦现象, 与本文中关于相位差推导结果相对应。

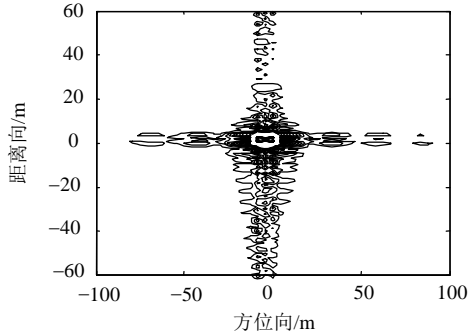
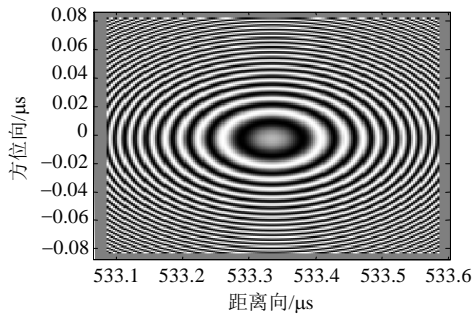
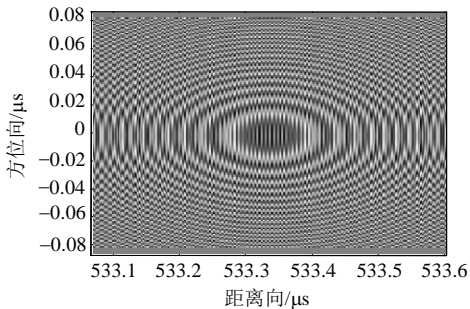


图4 同步子脉冲合成时点目标仿真结果

利用同相位中心合成方法得到的合成宽带信号, 在子带合成后, 将回波信号重新变换到原始回波域, 再按照图2所示经典CS算法流程进行成像处理, 图5和图6给出了重回原始回波域的回波信号和最终的点目标和点阵目标的成像结果。



a. 单子带信号

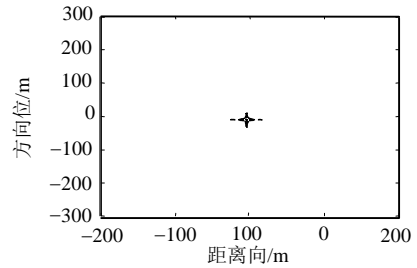


b. 重回原始回波域的合成信号

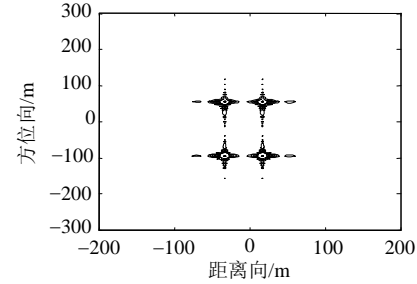
图5 原始回波信号

可见, 多个子带信号按照同相位中心方式合成成为一个宽带信号, 并将其重新变换到原始回波域, 再用CS算法对其进行成像处理, 得到较好的成像效果, 上图的点目标和点阵目标的仿真也验证了该方

法的正确性, 说明了子带合成技术与CS算法联合应用的可行性。



a. 点目标



b. 点阵目标

图6 合成宽带信号成像结果

4 结论

MIMO-SAR系统是实现高分辨率SAR成像的重要技术途径, 因此本文在文献[10]基于RD算法子带合成研究的基础上, 进一步对应用范围更广的CS算法进行了研究。算法成像效果较好, 缺点是计算量较大, 在此基础上将子带合成算法与常规算法融合的改进算法将在后续研究成果中给出。

参 考 文 献

- [1] GEBERT N, KRIGER G, MOREIRA A. Multi-channel scanSAR for high-resolution ultra-wide-swath imaging[C]//EUSAR. Friedrichshafen, Germany: [s.n.] 2008.
- [2] GOODMAN N A, LIN S C, STILES J M. Processing of multiple-receiver spaceborne arrays for wide-area SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(4): 841-851.
- [3] OSSOWSKA A, KIM J H, WIESBECK W. Modeling of nonidealities in receiver front-end for a simulation of multistatic SAR system[C]//Proceeding of the 4th European Radar Conference. Munich, Germany: [s.n.], 2007.
- [4] QI Wei-kong, YU Wei-dong. Study on MIMO-SAR based on space time coding and elevation digital beamforming [C]//EUSAR. Offenbach, Berlin, Germany: [s.n.], 2010.
- [5] KRIGER G, GEBERT N, MOREIRA A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing(S0196-2892), 2008, 46(1): 31-46.
- [6] GEBERT N, KRIGER G, MOREIRA A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization

- strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. IEEE Trans on AES, 2009, 45(2): 564-591.
- [7] WILLIE N J, RICHARD T L, ANDREW J W. The use of a frequency domain stepped frequency technique to obtain high range resolution on the CSIR X-band SAR system [C]//Africon Conference in Africa. Africa: [s.n.], 2002.
- [8] 白露, 毛士艺, 袁运能. 时域合成宽带方法: 一种0.1米分辨率SAR技术[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 472-477.
BAI xia, MAO Shi-yi, YUAN Yun-neng. Time domain synthetic bandwidth methods: a 0.1 m resolution SAR technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 472-477.
- [9] 丁海林, 李亚超, 高昭昭, 等. 线性调频步进信号的三种合成方法的对比与分析[J]. 火控雷达技术, 2007, 36(4): 10-16.
DING Hai-lin, LI Ya-chao, GAO Zhao-zhao, et al. Comparison and analysis to three synthesis methods of linear FM stepped-frequency signal[J]. Fire Control Radar Technology, 2007, 36(4): 10-16.
- [10] 黄平平, 邓云凯, 徐伟, 等. 基于频域合成方法的多发多收星载SAR技术研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 401-406.
HUANG Ping-ping, DENG Yun-kai, XU Wei, et al. The research of multiple-input and multiple-output SAR based on frequency synthetic[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 401-406.
- [11] RANEY R K, RUNGE H, BAMLER R. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 786-799.
- [12] 黄平平, 邓云凯, 祁海明. 多发多收星载SAR回波处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1056-1060.
HUANG Ping-ping, DENG Yun-kai, QI Hai-ming. Echo processing method for multiple-transit and multiple-receive space-borne SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1056-1060.

编辑 税红

(上接第211页)

- [3] SHEIKH F, MASUD S. Sample rate conversion filter design for multi-standard software radio[J]. Digital Signal Process, 2009, 4(14): 1-10.
- [4] GORDANA J D, SANJIT K. A new two-stages sharpened comb decimator[J]. IEEE Trans, Circuit and System-I, 2005, 52(7): 1414-1420.
- [5] GORDANA J D, HARRIS F. Design of wideband CIC compensator filter for a digital IF receiver[J]. Digital Signal Processing, 2009, 3(13): 1-11.
- [6] GORDANA J D. Simple wideband CIC compensator[J]. Electronics Letters, 2009, 45(24): 1-4.
- [7] ABOUSHAD H, DUMONTEIX Y, LOERAT M, et al. Efficient polyphase decomposition of comb decimation filters in $\Sigma-\Delta$ analog-to-digital converters[J]. IEEE Trans, Circuit and System II, 2001, 48(10): 898-903.
- [8] ASCARI L, PIERAZZI A, MORANDI C, et al. Low power implementation of a sigma-delta decimation filter for cardiac application[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology, 2001, 21(23): 750-755.
- [9] GORDANA J D, MITRA S K. Simple method for compensation of CIC decimation filter[J]. Electronics Letters, 2008, 44(19): 1162-1163.
- [10] ALFONSO F V, GORDANA J D. A general method to design GCF compensation filter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2009, 56(5): 409-413.
- [11] GORDANA J D, MITRA S K. A new two-stage sharpened comb decimator[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2005, 52(7): 1414-1420.
- [12] YEUNG K S, CHAN S C. The design and multiplier-less realization of software radio receivers with reduced system delay[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2004, 51(12): 2444-2445.

编辑 税红