

## 两发两收 SAR 系统互相关噪声消除方法研究

黄平平\*

(内蒙古工业大学信息工程学院 呼和浩特 010051)

**摘要:** 该文针对两发两收 SAR 系统分离混合回波信号时的互相关噪声问题, 提出了一种基于限幅滤波器和逆滤波的互相关噪声抑制方法。该方法通过限幅滤除了互相关噪声的大部分能量, 从而达到较好的抑制互相关噪声的目的。同时详细给出了该方法的原理和实现步骤。并通过计算机仿真和对积分旁瓣比等的定量计算证明了该方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 限幅滤波器; 逆滤波方法; 互相关噪声

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2012)01-0091-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1300.2012.10062

## Method of Removing the Cross-correlation Noise for Dual-input and Dual-output SAR

Huang Ping-ping

(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** According to analysis of separating the mixed echo by suppressing the cross-correlation noise in dual-input and dual-output SAR system, a new method based on threshold filter and inverse filter was proposed. The method can eliminate the most energy of cross-correlation noise by threshold filter, which can suppress the cross-correlation noise well. The principle and implementation steps are presented in detail. The computer simulation and account for the integrated sidelobe ratio showed the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** SAR; Threshold filter; Inverse filter method; Cross-correlation noise

### 1 引言

在常规星载 SAR 系统中, 方位分辨率和测绘带宽是一对矛盾<sup>[1,2]</sup>, 而近年来出现的新体制合成孔径雷达——多发多收合成孔径雷达(Multi-Input and Multi-Output Synthetic Aperture Radar, MIMO-SAR)<sup>[3,4]</sup>, 可以在保持分辨率的同时获得更宽的测绘带。

对一种新体制的雷达系统, 适用于该体制发射波形的研究是首要的, 由此, 国内外的一些研究者基于对一些基本正交信号模糊函数的分析, 展开了同载频 MIMO-SAR 波形的研究。鲍坤超等<sup>[5]</sup>将大时宽带宽积的空间相位编码步进频率信号与 m 序列码相结合, 应用于多发单收体制下的分布式小卫星雷达系统, 获得良好的距离和多普勒分辨率, 但是该方法没有解决方位和距离模糊过大的问题; Jian Li 在文献[6]中提出了一种直接设计信号波形矩阵的方法, 但直接基于信号波形矩阵进行优化是一个更加复杂和难以解决的问题。上述研究成果都对

MIMO-SAR 的波形设计进行了深入的研究, 但是这些波形都由于旁瓣过高和去“耦合”等问题, 还无法作为 MIMO-SAR 的实际发射波形。

目前关于同载频 MIMO-SAR 的研究, 几乎都毫无例外的假设波形为同载频理想正交波形<sup>[7,8]</sup>, 但在实际中几乎不存在互相关为零的多信号集合, 互相关噪声是必然存在的。也有学者进行了利用 Chirp 信号作为 MIMO-SAR 发射信号的探索, 文献[9]论述了双星同中心频率多发多收原理, 指出由于正调频信号对负调频信号的匹配函数失配, 脉冲压缩效果不理想。文献[10]中也对此进行了深入的研究, 说明了消除互相关噪声的重要性。针对同载频 MIMO-SAR 系统在信号分离时产生的互相关噪声问题, 本文通过分析提出一种基于限幅滤波器和逆滤波的抑制互相关噪声的方法, 通过限幅滤除了互相关噪声的大部分能量, 可以一定程度上改善成像效果, 尤其是对强点目标效果更好。

### 2 码分法原理

同载频雷达系统基本采用码分法, 即利用各发射信号自相关性好、互相关性差的特点来进行回波分离<sup>[9]</sup>。对正、负调频信号的自相关性及其互相关性进行了仿真, 结果如图 1 所示。

2012-01-12 收到, 2012-03-21 改回; 2012-04-06 网络优先出版  
内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目资助(NJZZ11069)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2011BS0904)资助课题  
\*通信作者: 黄平平 hpp2304092@163.com

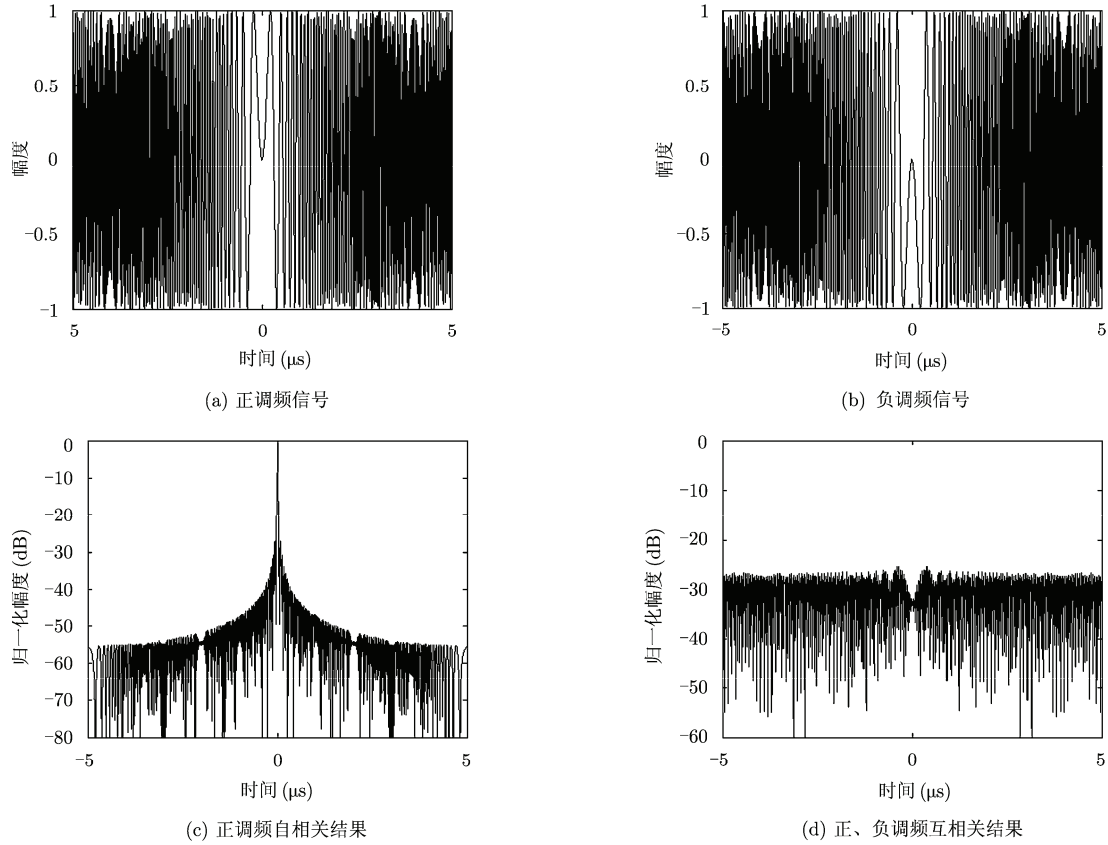


图 1 正、负调频信号的自相关及互相关性仿真图

从图 1 中可以看到，正、负调频信号具有较高的自相关峰值，其互相关峰值较低，基本符合自相关性好，互相关性差的要求，说明同载频 MIMO-SAR 系统具有码分法的可能性。

### 3 常规的码分法

假设子孔径 1 发射的正调频信号为  $S_1(t)$ ，子孔径 2 发射的负调频信号为  $S_2(t)$ ，以子孔径 1 为例进行说明，子孔径 1 接收到的混合回波信号为  $(S_1(t) + S_2(t))$ ，为将  $S_1(t)$  和  $S_2(t)$  分离开来，常规的码分法的分离思路如下：

$$\begin{cases} \text{分离 } S_1(t): & (S_1(t) + S_2(t)) \otimes S_1^*(-t) \\ & = S_1(t) \otimes S_1^*(-t) + S_2(t) \otimes S_1^*(-t) \\ \text{分离 } S_2(t): & (S_1(t) + S_2(t)) \otimes S_2^*(-t) \\ & = S_1(t) \otimes S_2^*(-t) + S_2(t) \otimes S_2^*(-t) \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\otimes$  表示卷积运算。对式(1)中分离  $S_1(t)$  式进行展开，发射信号可以表示为

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t) = \exp(j\pi kt^2) + \exp(j\pi(-k)t^2) \quad (2)$$

回波信号为

$$\begin{aligned} S_r(t) &= S_1(t - T_0) + S_2(t - T_0) \\ &= \exp[j\pi k(t - T_0)^2] + \exp[j\pi(-k)(t - T_0)^2] \end{aligned} \quad (3)$$

$T_0$  为时间延迟。对回波信号做上调频信号的匹配滤波，匹配滤波函数表示为  $S_1^*(-t)$ ，其频域表示为  $H(f) = \exp(-j\pi f^2/k)^*$ ，其中“\*”表示取共轭操作。由驻定相位定理，信号匹配滤波器后的频域表示为  $S_0(f) = S_r(f)H(f)$

$$\begin{aligned} &= \left[ \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{k}\right) \exp(-j2\pi fT_0) \right. \\ &\quad \left. + \exp\left(j\pi \frac{f^2}{k}\right) \exp(-j2\pi fT_0) \right] \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{k}\right)^* \\ &= \exp(-j2\pi fT_0) \left[ 1 + \exp\left(j2\pi \frac{f^2}{k}\right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

变换到时域，得到经过脉冲压缩的输出信号为

$$S_0(t) = \delta(t - T_0) + \sqrt{\frac{1}{2}k} \exp\left[-j\frac{1}{2}\pi k(t - T_0)^2\right] \quad (5)$$

式(5)相对于理想的压缩效果，增加了  $\sqrt{(1/2)k} \cdot \exp\left[-j(1/2)\pi k(t - T_0)^2\right]$  项，实际是正、负调频互相关产生的互相关噪声。

通过  $S_1^*(-t)$  的匹配滤波分离出  $S_1(t)$ 。但  $S_2(t) \otimes S_1^*(-t)$  的结果不为零, 成为了互相关噪声, 抬高了  $S_1(t)$  匹配滤波结果的旁瓣电平, 此时信号  $S_2(t)$  相当于信号  $S_1(t)$  的干扰信号。当用与  $S_2^*(-t)$  的匹配滤波分离混合信号中的  $S_2(t)$  时结果类似。因此, 用这种方法得到的信号分离效果并不理想。

#### 4 改进的码分法

为了解决上述常规分离方法导致的旁瓣过高问题, 本文提出一种基于限幅滤波器的改进的码分法。仍以从混合信号  $(S_1(t) + S_2(t))$  中将信号  $S_1(t)$  分离出来为例, 常规分离方法如上所述是直接利用信号  $S_1^*(-t)$  与混合信号匹配滤波, 从而得到  $S_1(t)$ , 虽然分离过程简单、易于实现, 但是代价是保留了大量的互相关噪声。改进方法是首先对干扰信号进行匹配滤波, 并对匹配滤波结果进行限幅和逆匹配滤波操作, 再对目标信号进行匹配滤波, 即可得到更好的脉压效果, 其详细流程如下:

(1) 匹配干扰信号: 为从  $(S_1(t) + S_2(t))$  中分离目标信号  $S_1(t)$ , 先将  $(S_1(t) + S_2(t))$  与  $S_2^*(-t)$  进行匹配滤波, 即先对干扰信号  $S_2(t)$  进行距离向压缩, 获得了较高幅度。而目标信号没有被匹配滤波, 幅度仍然较低。

(2) 限幅: 匹配滤波以后, 经过限幅滤波器<sup>[11]</sup>, 将  $S_2(t)$  压缩后的峰值能量滤除掉, 得到结果为  $S_1(t) \otimes S_2^*(-t) + \Delta(S_2(t) \otimes S_2^*(-t))$ , 其中  $\Delta(S_2(t) \otimes S_2^*(-t))$  为  $S_2(t) \otimes S_2^*(-t)$  经限幅滤波器后的残余能量, 相对于整体, 残余能量  $\Delta(S_2(t) \otimes S_2^*(-t))$  很小。实际应用中限幅门限可以根据成像区域目标特性进行设定, 仿真中则可以根据所设置的信号匹配压缩的结果计算出来。

(3) 逆匹配滤波: 对  $S_1(t) \otimes S_2^*(-t) + \Delta(S_2(t) \otimes S_2^*(-t))$  进行频域解卷积运算

$$\begin{aligned} & (S_1(\omega)S_2^*(\omega) + \Delta(S_2(\omega)S_2^*(\omega))) / S_2^*(\omega) \\ & = S_1(\omega) + \Delta S_2(\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

再变换到时域, 结果为  $S_1(t) + \Delta S_2(t)$ ,  $\Delta S_2(t)$  为对残余能量  $\Delta(S_2(t) \otimes S_2^*(-t))$  解卷积运算并变换到时域的结果。

(4) 匹配目标信号: 用  $S_1^*(-t)$  对  $(S_1(t) + \Delta S_2(t))$  匹配滤波, 得到较好的距离压缩效果。

(5) 成像处理: 用常规成像算法进行成像处理。上述处理过程如图 2 所示。

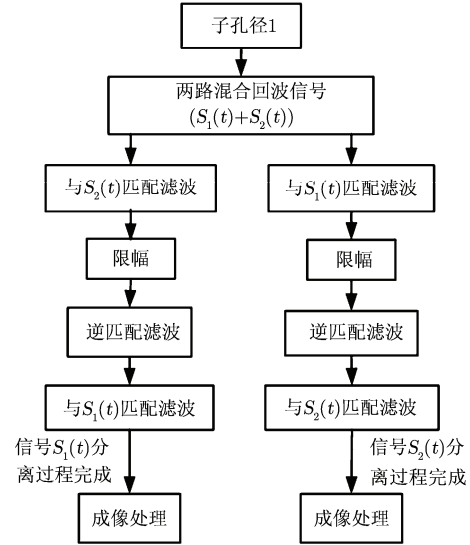


图 2 两发两收 SAR 回波信号分离流程

图 2 表示了整个分离过程, 先对干扰信号进行匹配滤波, 在限幅和逆滤波处理后才对目标信号进行匹配滤波, 这样, 信号  $S_1(t)$ ,  $S_2(t)$  就被较好的分别从子孔径 1 的混合回波信号  $(S_1(t) + S_2(t))$  中分离出来。

#### 5 仿真分析

对星载两发两收 SAR 信号分离进行了仿真, 仿真参数设置为: 两子孔径分别发射正调频信号和负调频信号。平台高度为 600 km, 载波频率为 9.5 GHz, 中心视角为 30.4°, 信号脉宽为 10  $\mu$ s, 带宽为 80 MHz, 过采样率为 1.4。用上述参数对常规的码分法和无干扰信号即理想状态下的匹配滤波结果进行了仿真, 得到图 3 所示结果。

从图 3 可以看出, 由于上述  $S_2(t) \otimes S_1^*(-t) = \sqrt{(1/2)k} \exp[-j(1/2)\pi k(t - T_0)^2]$  项的存在, 常规方法匹配滤波所得到的旁瓣很高, 其积分旁瓣比明显小于理想的匹配滤波结果。通过限幅操作, 可以得到混合回波进行匹配滤波及限幅后的结果, 如图 4、图 5 所示。

再经过逆匹配滤波运算, 对运算结果重新匹配滤波后, 可以得到对目标信号的匹配滤波结果, 将其同常规匹配滤波仿真结果比较, 如图 6、图 7 所示。

从图中可以看到使用改进的分离方法进行匹配滤波后的旁瓣高度, 明显低于常规分离方法的匹配滤波结果。表 1 列出了对常规的分方法、改进的分方法和理想的匹配滤波的峰值旁瓣比(PSLR)、积分旁瓣比(ISLR)的计算结果。

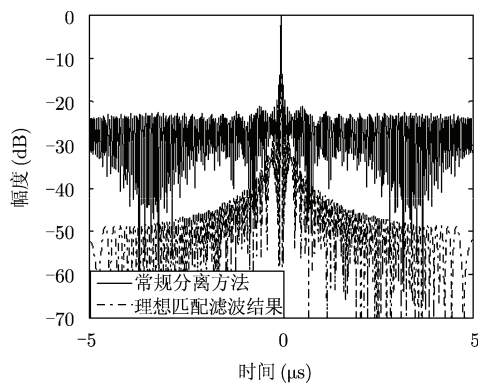


图3 常规分离方法与理想匹配滤波结果比较

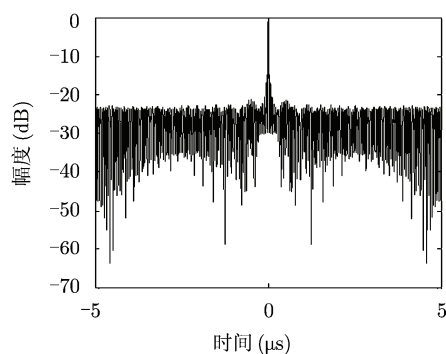


图4 混合回波匹配滤波结果

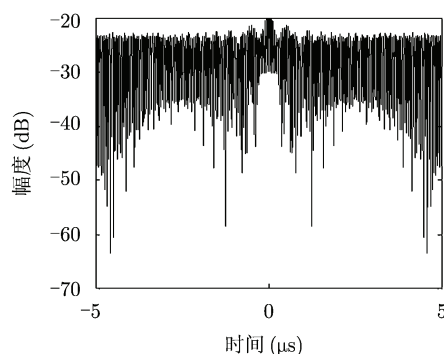


图5 混合回波匹配滤波经限幅后的结果

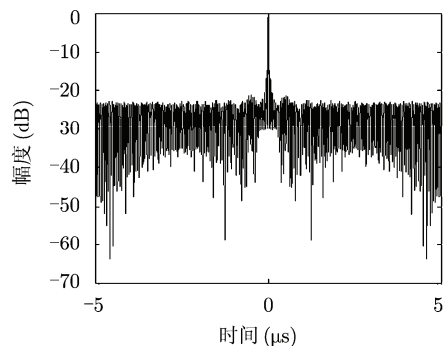


图6 常规分离方法匹配滤波结果

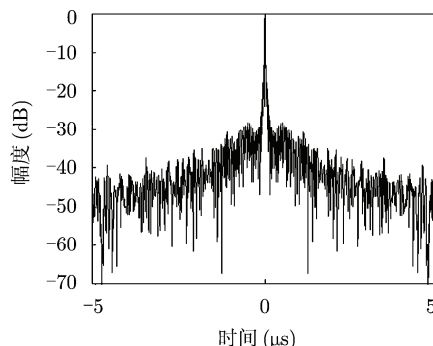


图7 改进的分离方法匹配滤波结果

表1 3种情况的匹配滤波结果参数比较

方法	峰值旁瓣比 (dB)	积分旁瓣比 (dB)
常规分离方法	-14.347	-0.782
改进的分离方法	-12.158	-8.668
理想的匹配滤波结果	-13.259	-9.589

比较表1的数据可知,改进的分离方法的匹配滤波结果积分旁瓣比有了很大提高,已经接近理想的信号匹配滤波结果,说明相对于常规的码分法,自相关噪声得到了很好的抑制,可以得到较好的成像效果。但是,在限幅操作的过程中,不可避免地会消

除部分目标信号的能量,这也是该方法的最大缺陷。

## 6 结束语

针对双通道发射正、负调频信号的情况,本文对互相关噪声的抑制方法进行了一定的探索,该方法对强点目标效果较好,如海洋舰船等,而对于一般的地面目标,还需要进一步研究一种自适应的限幅门限设置方法。对于子孔径数为3个及以上的MIMO-SAR系统,信号分离过程应对上述流程中的限幅和逆匹配滤波进行重复操作,随着孔径数的增多,限幅过程中损失的有用信号能量将增大,方法的有效性必然会降低。

## 参 考 文 献

- [1] Moore R K. Scanning spaceborne synthetic aperture radar with integrated radiometer[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981, 17(3): 410-420.
- [2] Goodman N A and Lin Sih Chung. Processing of multiple-receiver spaceborne arrays for wide-area SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(4): 841-852.
- [3] Gerhard Krieger, Nicolas Gebert, and Alberto Moreira. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31-46.
- [4] Weikong Qi and Weidong Yu. Study on MIMO-SAR based on space time coding and elevation digital beamforming[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Offenbach, Berlin, Germany, 2010: 198-201.
- [5] 鲍坤超, 陶海红, 廖桂生. 多发射体制下小卫星分布式雷达系统的波形设计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2117-2119.  
Bao Kun-chao, Tao Hai-hong, and Liao Gui-sheng. Waveform design for multi-emitted and distributed space-based radar system [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(9): 2117-2119.
- [6] Li J, Stoica P, and Zhu X. MIMO radar waveform synthesis [C]. Radar Conference, 2008. IEEE RADAR'08 Rome Italy, May 26-30, 2008: 1-6.
- [7] Krieger G and Moreira A. Multistatic SAR satellite formation: potentials and challenges[C]. Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Seoul, Korea, 2005: 2680-2684.
- [8] Klare J. Digital beamforming for a 3D MIMO SAR - improvements through frequency and waveform diversity[C]. Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Boston, USA, 2008: 17-20.
- [9] 井伟, 邢孟道, 保铮. 双星同中心频率多发多收的方位解模糊[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1077-1082.  
Jing Wei, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Removal of azimuth ambiguities with bi-satellite by multiple transmitting and multiple receiving[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1077-1082.
- [10] 邓云凯, 黄平平, 齐维孔, 等. 多发多收星载 SAR 系统波形选择分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1679-1685.  
Deng Yun-kai, Huang Ping-ping, Qi Wei-kong, et al. The analysis of waveform choice for multiple-transit and multiple-receive space-borne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(7): 1679-1685.
- [11] 顾晓春. X 波段小型化无源限幅器的研究[J]. 现代雷达, 2005, 27(8): 59-62.  
Gu Xiao-chun. Research on X-band passive limiter with small size [J]. *Modern Radar*, 2005, 27(28): 59-62.

## 作 者 简 介



黄平平(1978-), 男, 2010年自中国科学院电子学研究所获博士学位; 硕士研究生导师, 现工作于内蒙古工业大学信息工程学院。研究方向为: MIMO-SAR系统设计及信号处理、SAR应用等。

E-mail: hpp2304092@163.com