

基于移频干扰的成像算法抗干扰性能分析

朱 良^{1,2}, 曹 鹏³, 禹卫东¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080; 2. 中船工业集团船舶系统工程部, 北京 100094;
3. 北京印刷学院, 北京 102600)

摘 要: 本文针对 RD 和 CS 两种成像算法处理流程和方法的差异, 分析了两种算法在移频干扰情况下的成像处理增益, 并推导了两种算法的信干比处理增益公式. 理论分析结果表明, 在距离向采样率与 SAR 信号带宽相当的情况下, RD 成像算法对移频干扰的抑制能力强于 CS 算法; 在方位向过采样情况下, RD 算法由于采用二维匹配处理从而获得比 CS 算法大的信干比处理增益, 若对信号进行方位向滤波处理后, CS 算法的对移频干扰的抗干扰能力与 RD 算法相当. 最后, 通过计算机仿真验证了本文的理论分析和结论.

关键词: 合成孔径雷达; 移频干扰; 成像算法; 信干比; 成像处理增益

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 3A-047-04

The Analyse of SAR Imaging Algorithm Anti-Jamming Performance Based on Representative Shift-Frequency Jamming

ZHU Liang^{1,2}, CAO Peng³, YU Wei-dong¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Institute of Ship System Engineering Research, Beijing 100094, China;
3. Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: In according with the difference of RD algorithm and CS algorithm' processing flow and calculation method, this paper analyzed processing gain of two algorithms in the environment of shift-frequency jamming, and deduced formulas of the SJR processing gain about two algorithms. The academic analyzing result demonstrates that the restrainable capability of RD algorithm about shift-frequency jamming is stronger than CS algorithm if the sampling rate of distance dimension is equivalent with the band width of the signal. And at the condition of the over sampling rate about azimuth dimension, the SJR processing gain of RD algorithm is larger than CS algorithm because of two dimension matching filter of RD algorithm. If the over sampling signal is filtered in azimuth dimension, the SJR processing gain of CS algorithm is uniform with the RD algorithm. Finally, the computer simulation testifies the validity and availability of theory analyzing results and conclusion.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); shift-frequency jamming; imaging algorithm; signal-to-jam ratio (SJR); gain of imaging processing

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是主动式微波成像雷达, 凭借分辨率高、全天候、全天时等特点在军事侦察领域发挥日益重要的作用. 随着各种星载、机载合成孔径雷达系统的装备及使用, 研究对 SAR 实施有效干扰技术显得日益迫切.

由于合成孔径雷达的成像处理是二维匹配滤波的过程, 目标回波的成像输出将会有较高的信干比, 这就对干扰功率提出较高的要求^[1,2]. 目前研究表明, 有源欺骗干扰是对 SAR 干扰的常见有效方式. 其中, 移频干

扰是一种有效的有源欺骗干扰手段, 该干扰方法利用脉冲压缩信号的频移和时延具有强耦合性的弱点, 通过控制干扰信号的移频量和脉冲间相位关系, 能够在距离上和方位上的获得一定的处理增益, 干扰效果明显强于传统的噪声干扰^[3,4].

RD(Range Doppler)算法和 CS(Chirp Scaling)算法是 SAR 成像的常见算法. 目前的 SAR 干扰是主要是基于 RD、CS 算法的压制型噪声干扰效果研究^[5], 而针对移频干扰方式下基于 RD、CS 算法的抗干扰效果在公开文献还未见到. 本文采用了理论分析和计算机仿真验证的方法, 分析了 RD 和 CS 成像算法对移频干扰的信干比处

理增益和对干扰抑制能力的异同。

本文首先分析了两种算法的差异,推导得出了移频干扰条件下 RD 算法和 CS 算法对目标回波信号和干扰的处理增益,比较了两种算法输出的信干比处理增益,得出了 RD 算法抗干扰能力更强的结论;然后,从理论上证明了在移频干扰的情况下,通过对 CS 算法进行方位预滤波处理,可以得到与 RD 算法一样的干扰抑制效果;最后分别进行了计算机仿真验证,证明了本文理论分析和结论的正确性。

2 RD 算法的处理增益

2.1 目标回波的处理增益

RD 算法适合于小斜视角及短孔径情况下的目标成像,包括了 4 次 FFT 运算和 1 次距离徙动校正(RCMC),分别完成了目标回波的距离压缩和方位压缩^[2,6]。对于点目标而言, RD 成像算法对目标回波(功率)增益 G_{echo} 为^[7],

$$G_{echo} = (n_r)^2 (n_a)^2 \approx (f_s \cdot T_p)^2 (PRF \cdot T_s)^2 \quad (1)$$

式中, n_r 是距离向采样点数, n_a 是方位向采样点数, f_s 是采样频率, T_p 是脉冲宽度, PRF 是脉冲重复频率, T_s 是合成孔径时间。

2.2 移频干扰的处理增益

由于 SAR 采用线性调频信号,该类信号的时延和频移具有的强耦合性构成了移频干扰的基础。线性调频信号的模糊图函数为^[3,8],

$$|x(\tau, \xi_r)| = \begin{cases} \left| \frac{T_p - |\tau|}{T_p} \cdot \frac{\sin[\pi(k_r \tau + \xi_r)(T_p - |\tau|)]}{\pi(k_r \tau + \xi_r)(T_p - |\tau|)} \right|, & |\tau| \leq T_p \\ 0, & |\tau| > T_p \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中的 T_p 是 SAR 信号的脉宽, τ 是延时量, k_r 是 SAR 信号的调频率, ξ_r 是距离向的移频量。

由上式可以看出,线性调频信号的模糊图函数的最大值位于一条直线上,即,

$$k_r \tau + \xi_r = 0 \quad (3)$$

且,模糊函数的最大值为,

$$|x(\tau, \xi)|_{\max} = 1 - \frac{|\tau|}{T_p} = 1 - \frac{|\xi_r|}{B_r}, |\tau| \leq T_p \quad (4)$$

因此,线性调频信号的模糊函数表明,存在一定频偏的移频干扰信号经过匹配滤波后仍为 Sinc 函数。尽管移频干扰信号与匹配滤波器不完全匹配,仍能获得 SAR 的部分处理增益,但会造成脉冲压缩后的脉冲移位、信号展宽和峰值降低。式(4)表明移频干扰信号经过脉冲压缩后的峰值降低系数,与移频量 ξ_r 、延时量 τ 有关。

从上述分析可知,移频干扰信号经过距离向脉冲

压缩后的幅度失配系数为 L_r ,

$$L_r = 1 - \frac{|\xi_r|}{B_r} \quad (5)$$

其中, ξ_r 为移频干扰信号在距离向的移频量, B_r 是 SAR 线性调频信号的带宽。

则,移频干扰信号在距离向上的处理增益为,

$$A_{rd_r} = n_r L_r^2 \quad (6)$$

移频干扰信号经过方位向脉冲压缩后的幅度失配系数为 L_a ,

$$L_a = 1 - \frac{|\xi_a|}{B_a} \quad (7)$$

其中, ξ_a 为方位向移频量, B_a 是 SAR 方位向线性调频信号带宽。

方位向移频量 ξ_a ,

$$\xi_a = \frac{\Delta\phi PRF}{2\pi} \quad (8)$$

其中, $\Delta\phi$ 是固定的相位增量, PRF 是 SAR 雷达的脉冲重复频率。

SAR 方位向线性调频信号的谱宽 B_a ,

$$B_a = \frac{2\nu\beta}{\lambda} \quad (9)$$

其中, ν 代表平台的速度, β 是天线波束宽度。

则,移频干扰信号在方位向上的处理增益为,

$$A_{rd_a} = n_a \cdot L_a^2 \quad (10)$$

因此,移频干扰信号获得的总增益为,

$$G_{SFJ_RD} = n_r \cdot n_a \cdot L_r^2 \cdot L_a^2 \quad (11)$$

通过上述分析,可以得到 RD 算法下移频干扰的信干比处理增益,

$$G_{RD} = \frac{S_{out}/N_{out}}{S_{in}/N_{in}} = \frac{G_{echo}}{G_{SFJ_RD}} = \frac{n_r \cdot n_a}{L_r^2 \cdot L_a^2} = \frac{(f_s \cdot T_p) \cdot (PRF \cdot T_s)}{(1 - |\xi_r|/B_r)^2 (1 - |\xi_a|/B_a)^2} \quad (12)$$

由式(12)可以看出,若提高信号采样频率 f_s 或脉冲重复频率 PRF, RD 算法对移频干扰的抑制能力也随之提高。但是,这种抑制作用不能无限提高,由于受 SAR 接收带宽的限制,随着信号采样频率或脉冲重复频率的提高,其抑制移频干扰的能力会越来越弱。

3 CS 算法的处理增益

3.1 回波信号的处理增益

CS 算法是在解决大距离徙动情况下常用的 SAR 成像算法,该算法通过相位相乘完成随距离变化的距离徙动校正(RCMC),并解决了二次距离压缩(SRC)对方位频率的依赖问题。该算法中包括 4 次 FFT 和 3 次相位相乘,在第二次与参考函数相位相乘中完成了距离压缩和 SRC、一致 RCMC,产生了距离压缩增益;在第三步

与随距离变化的匹配滤波器进行相位相乘中完成了方位压缩和相位校正,引入了方位压缩增益^[2,6].

CS 算法中距离压缩增益(电平增益)为^[9]:

$$G_{cs_r} = T_p |k_r|^{1/2} = \sqrt{B_r T_p} \quad (13)$$

CS 算法中方位压缩增益(电平增益)为^[9],

$$G_{cs_a} = T_s |k_a|^{1/2} = \sqrt{B_a T_s} \quad (14)$$

其中, k_a 是多普勒信号调频率, B_a 为多普勒信号带宽.

因此,CS 算法对目标回波的总增益(功率增益)为,

$$G_{cs} = C_r^2 C_a^2 = (B_r T_p) (B_a T_s) \quad (15)$$

3.2 移频干扰的处理增益

在 CS 算法中,距离压缩是在 $f_r - f_a$ 域乘以相位函数后进行距离向逆傅里叶变换,即将信号变换到 $\hat{t} - f_a$ 域后完成,而方位压缩是在 $\hat{t} - f_a$ 域乘以相位函数后进行方位向逆傅里叶变换完成.因此,无论是距离向压缩还是方位向压缩,CS 算法都是通过相位函数相乘实现的,虽然相位函数的频谱幅度为 1,但移频干扰仍会造成距离压缩和方位压缩的幅度损失.

不难得知,移频干扰信号经过距离向脉冲压缩后的幅度失配系数为 L_r 和 L_a ,则,移频干扰信号在距离向上的处理增益为,

$$A_{cs_r} = L_r^2 \quad (16)$$

移频干扰信号在方位向上的处理增益为,

$$A_{cs_a} = L_a^2 \quad (17)$$

因此,移频干扰获得的总增益为,

$$G_{SFJ_CS} = L_r^2 \cdot L_a^2 \quad (18)$$

通过上述分析,可知 CS 算法下移频干扰的信干比处理增益,

$$\begin{aligned} G_{CS} &= \frac{S_{out}/N_{out}}{S_{int}/N_{in}} = \frac{G_{echo}}{G_{SFJ_CS}} \\ &= \frac{n_r \cdot n_a}{L_r^2 \cdot L_a^2} = \frac{(B_r \cdot T_p) \cdot (B_a \cdot T_s)}{(1 - |\xi_r|/B_r)^2 (1 - |\xi_a|/B_a)^2} \end{aligned} \quad (19)$$

4 RD 算法与 CS 算法成像增益对比

比较式(12)和式(19)可以发现,对于 RD 算法,提高距离向和方位向的采样频率,可以提高目标回波对移频干扰的信干比增益,这是因为 RD 算法的实质是对目标回波和移频干扰信号经过两次匹配滤波的过程,由于移频干扰在一定程度上保留了 SAR 信号脉内和脉间相位特征,因此该类干扰信号经过雷达接收机后可以获得部分处理增益(包括距离向和方位向),即有一定失配损失的信号处理增益.而对于 CS 算法,提高采样频率并不能提高算法的抗干扰能力,这是因为 CS 算法通过乘以相位补偿因子完成距离向和方位向的压缩,没有匹配滤波过程,但仍会造成干扰信号在距离向

和方位向压缩的幅度损失.总之,对于移频干扰而言, RD 算法的抗干扰能力会略强于 CS 算法.

为提高 CS 算法的信干比处理增益,可在与 CS 相位因子相乘前先让目标回波进行一次滤波器预滤波,滤掉多普勒带宽 B_a 之外的信号,从而提高输出的回波信号处理增益.

滤波器的系统函数为,

$$|H_a(f)| = \begin{cases} 1, & |f| \leq B_a/(2PRF) \\ 0, & |f| > B_a/(2PRF) \end{cases} \quad (20)$$

方位向处理增益为

$$A'_{CS_a} = \frac{B_a}{PRF} \quad (21)$$

CS 算法对移频干扰的信干比处理增益为,

$$\begin{aligned} G'_{CS} &= \frac{(B_r \cdot T_p) \cdot (B_a \cdot T_s)}{PRF (1 - |\xi_r|/B_r)^2 (1 - |\xi_a|/B_a)^2} \\ &= \frac{(B_r \cdot T_p) \cdot (PRF \cdot T_s)}{(1 - |\xi_r|/B_r)^2 (1 - |\xi_a|/B_a)^2} \end{aligned} \quad (22)$$

通常情况下,实际的 SAR 成像系统中 $f_s \approx B_r$.也就是说,在加入方位向预滤波情况下,CS 算法的信干比处理增益与 RD 算法的基本一致,即对于 RD 算法有效的移频干扰对 CS 算法也同样有效.

5 仿真分析

利用模拟回波和真实星载 SAR 回波数据进行了 RD 和 CS 算法的抗干扰性能分析.通过比较点目标和面目标在正侧视和大斜视成像中的 RD 和 CS 算法以及进行方位预滤波的 CS 算法对移频干扰的信干比处理增益,分析成像算法的抗干扰性能.其中,仿真参数包括星载 SAR 的参数见表 1,移频干扰参数见表 2.

表 1 星载 SAR 参数

SAR 信号参数	参数值
频率	1280MHz
带宽	28MHz
脉冲重复频率	1680Hz
脉宽	28 μ s
采样频率	33.6MHz
天线下视角	35.2°
SAR 平台速度	7900m/s
SAR 平台高度	570km
天线水平向尺寸	11.9m
天线垂直向尺寸	3.2m

表 2 移频干扰参数

移频干扰信号参数	参数值
频率	1280MHz
带宽	28MHz
脉冲重复频率	1680Hz
脉宽	28 μ s
移频增量	2.8MHz
固定相位增量	2°

5.1 点目标分析

对于点目标而言,主要从信干比处理增益方面分析比较 RD 算法、CS 算法和方位预滤波 CS 算法在正侧视和大斜视情况下(等效斜视角 88°)移频干扰的抗干扰性能分别见表 3 和表 4.

通过表 3 和表 4 结果可以看出:对于正侧视和大斜视成像,三种成像算法的抗干扰抑制能力在理论上基本相同.并且,在同样的成像条件下, RD 算法和进行方

位预滤波的 CS 算法对移频干扰的抗干扰能力基本相同,而 CS 算法对移频干扰的抑制能力相比较差。

表 3 正侧视下信干比处理增益比较 (dB)

	RD 算法	CS 算法	方位预滤波 CS 算法
理论值	65.37	63.55	64.58
实际值	64.23	61.61	63.52

表 4 大斜视下信干比处理增益比较 (dB)

	RD 算法	CS 算法	方位预滤波 CS 算法
理论值	65.37	63.56	64.58
实际值	62.21	61.37	62.63

5.2 面目标分析

对于面目标,采用相关系数来分析 RD 和 CS 算法对移频干扰的抗干扰能力。相关系数反映了面目标在被干扰前后的目标图像的相关性。具体定义如下:

$$\rho = \frac{E((X_1 - E|X_1|)(Y_1 - E|Y_1|))}{\sqrt{D|X_1|}\sqrt{D|Y_1|}} \quad (23)$$

其中, $E(T) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}$, $D(T) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ij} - E|T|)^2$, I_{ij} 是图像 T 第 i 行,第 j 列的灰度值。

在分析面目标移频干扰中, X_1 为受到干扰后的面目标 SAR 图像,而 Y_1 是未受到干扰的目标 SAR 图像,相关系数 ρ 表明了受干扰的程度,其值越小,表明同一目标的受干扰前、后的相似度小,即算法的抗干扰能力越差。

表 5 正侧视下相关系数比较

	RD 算法	CS 算法	方位预滤波 CS 算法
信干比 10dB	0.9725	0.9531	0.9697
信干比 0dB	0.9167	0.8249	0.9012
信干比 -10dB	0.6989	0.4858	0.6591

表 6 大斜视下相关系数比较

	RD 算法	C CS 算法	方位预滤波 CS 算法
信干比 10dB	0.8633	0.8311	0.8581
信干比 0dB	0.6078	0.5264	0.5876
信干比 -10dB	0.3824	0.2172	0.3679

通过比较表 5 和表 6 可以看出,大斜视成像下,3 种成像算法对面目标移频干扰的抗干扰能力显著变差。但分析不同信干比条件下的相关系数 ρ ,显然可以得出 RD 算法和进行方位预滤波的 CS 算法对移频干扰的抗干扰效果基本相同,而 CS 算法对移频干扰的抑制能力较差。

6 结论

本文从理论上分析了 RD 算法、CS 算法在处理流程和方法上的差异,推导了针对移频干扰的两种成像算法对信干比的处理增益,从理论上得出在距离向采样率与信号带宽相当,而方位向过采样时, RD 算法对

移频干扰的抑制能力明显强于 CS 算法。为了提高 CS 算法的抗干扰能力,本文提出了基于 CS 算法在方位向预滤波的方法,并在理论上证明,经过方位向预滤波后 CS 算法对移频干扰的信干比处理增益与 RD 算法的相当。最后,利用计算机仿真的方法对本文的理论分析进行了验证,通过对模拟回波与真实回波的仿真分析,证实了文中的结论。

参考文献

- [1] 吴一戎,胡东辉.一种新的合成孔径雷达压制干扰方法[J].电子与信息学报,2002,24(11):1664-67.
Wu Yirong, Hu Donghui. A new noise jamming approach to SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(11): 1664-67. (in Chinese)
- [2] 保铮,刑孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2006.132-164.
Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 132-164. (in Chinese)
- [3] 杨绍全,张正明.对线性调频雷达的干扰[J].西安电子科技大学学报,1991,18(3):24-30.
Yang Shaoquan, Zhang Zhenming. The jamming to LFM radar [J], Journal of XiDian University, 1991, 18(3): 24-30. (in Chinese)
- [4] 黄洪旭,黄知涛,周一宇.对合成孔径雷达的随机移频干扰[J].信号处理,2007,23(1):42-44.
Huang Hongxu, Huang Zhitao, Zhou Yiyu. Randomly-shift-frequency jamming style of SAR[J]. Signal Processing, 2007, 23(1): 42-44. (in Chinese)
- [5] 李兵,洪文.合成孔径雷达噪声干扰研究[J].电子学报,2004,32(12):2035-37.
Li Bing, Hong Wen. Study of noise jamming to SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12): 2035-37. (in Chinese)
- [6] 洪文,胡东辉,等译.合成孔径雷达成像——算法与实现[M].北京:电子工业出版社,2007:154-211.
Hong Wen, Hu Donghui. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 154-211. (in Chinese)
- [7] Walter W G. Synthetic aperture radar and Electronic Warfare [M]. Boston, London. Artech House, 1991. 8-34.
- [8] 张煜,杨绍全,董春曦,郑文秀.对线性调频雷达的正弦加权调频干扰技术[J].系统工程与电子技术,2007,29(4):544-547.
Zhang Yu, Yang Shaoquan, Dong Chunxi, Zheng Wenxiu. Sinusoidal weighted frequency modulation jamming technique countering LFM radar[J]. System Engineering and Electronics, 2007, 29(4): 544-547. (in Chinese)

- [9] 彭江萍,丁赤飙,彭海良.星载 SAR 辐射定标误差分析及成像处理器增益计算[J].电子科学学刊,2000,22(3):379-383.

Peng Jianping, Ding Chibiao, Peng Hailiang. Analysis of error in radiometric calibration for spaceborne SAR and calculation of imaging processing gain [J]. Journal of Electronics, 2000, 22 (3):379-383. (in Chinese)

作者简介



朱 良 男,1975 年 7 月生于河南临颖.1997 年毕业于信息工程学院,2006 年毕业于北京理工大学电子工程系.在职博士,工程师,主要从事合成孔径雷达干扰技术及干扰效果评估方面的有关研究.

E-mail: l_zhu06@sina.com



曹 鹏 男,1969 年出生,教授、硕士生导师,现为北京印刷学院机电工程学院院长,主要研究方向为高速数字信号处理.



禹卫东 男,1968 年出生,研究员、博士生导师,现为中科院电子所六室副主任,主要研究方向为合成孔径雷达信号处理技术、机载和星载 SAR 系统设计.