

基于RD和CS算法的SAR噪声干扰效果评估与对比

李林琳 李景文

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 该文针对RD与CS两种成像算法的差异,首先分析了两种算法在压制性噪声干扰环境下信号与噪声干扰的成像处理增益,推导出两种算法的信号-干扰功率比(信干比)处理增益公式并进行了分析。理论分析结果表明,在采样率仅略大于信号带宽条件下,RD和CS成像算法的信干比处理增益基本一致;在过采样条件下,RD算法由于二维匹配处理从而获得比CS算法大的信干比处理增益,但如果对过采样信号进行滤波处理后,CS算法的信干比处理增益与RD算法一致。最后,采用对计算机仿真数据和真实数据进行处理的方法验证了该文的理论分析和结论。

关键词: 合成孔径雷达; 成像处理增益; 噪声干扰;

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0331-04

The Evaluation and Contrast of SAR Noise Jamming Effect Based on the RD and CS Algorithm

Li Lin-lin Li Jing-wen

(School of Electronics and Information Engineering, BeiHang University, Beijing 100083, China)

Abstract: In according with the difference of the CS imaging processing algorithm and the RD imaging processing algorithm, the signal and the jamming imaging processing gain of the two algorithms is analyzed at the environment of noise jamming. And the formula of the signal-to-jam ratio (SJR) processing gain is deduced and analyzed. The analyzing result demonstrates that the SJR processing gains of the RD and CS imaging algorithm are uniform at the condition of the sampling rate is only larger a little than the band width of the signal. And at the condition of the over sampling rate, the SJR processing gain using RD algorithm is larger than using CS algorithm due to the two dimension matching filter of RD algorithm. However, if the over sampling signal is filtered, the SJR processing gain of CS algorithm is uniform with the RD algorithm. The computer simulation testifies the validity and the availability of the conclusion.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); the Gain of imaging processing; Noise jamming

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)凭借高分辨率、全天时、全天候和可直接观察的特点在军事领域发挥着日益重要的作用,因此对SAR实施有效干扰技术的研究也日趋深入。目前的研究表明,对SAR实施有效的欺骗性干扰需要较准确的雷达参数估计,工程应用上对SAR的干扰还是以噪声干扰为主^[1],干扰信号带宽大于接收机带宽。

最常用的SAR成像算法是RD(Range Doppler)算法和CS(Chirp Scaling)算法。而CS算法由于其自身的成像特点是大距离徙动情况下的常用算法。目前研究SAR干扰效果时所用的成像算法大多为二维匹配滤波处理的RD算法^[2,3],基于CS算法SAR干扰效果的公开文献还没有见到。本文采用理论分析、计算机仿真数据及真实数据验证的方法,研究压制性噪声干扰对基于RD成像算法的SAR系统与基于CS算法的SAR系统干扰效果的异同。

本文首先分析了两种算法的差异,推导得出了压制性噪

声干扰环境下CS算法和RD算法对信号与干扰的增益,比较两种算法的信干比处理增益,得出RD算法抗干扰能力更好的结论;然后,从理论上证明了在噪声干扰相同的情况下,通过对CS算法进行预滤波处理,可以得到与RD算法一致的干扰效果;最后分别对计算机仿真数据和真实数据进行处理,验证了本文的理论分析和结论的正确性。

2 RD算法对信号与噪声干扰的增益

2.1 RD算法对信号的增益

对于一个点目标来说,RD算法对回波信号的增益(功率增益)为^[2]:

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

式中 n_r 是距离向参考点数; n_a 方位向参考点数; 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 RD算法对噪声干扰的增益

距离向匹配滤波器的频率响应是发射的线性调频信号(chirp信号)频谱的共轭,由驻定相位原理知其幅度频谱近

似为^[4]

$$|H_r(f_0)| = \begin{cases} 1/\sqrt{b}, & |f_0| \leq B_r/2 \\ 0, & |f_0| > B_r/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 b 是脉冲信号调频率; B_r 是脉冲信号带宽。

离散时主周期内的幅度频谱为

$$|H_r(f)| = \begin{cases} \frac{f_s}{\sqrt{b}} = \sqrt{n_r \frac{f_s}{B_r}}, & |f| \leq B_r/2f_s \\ 0, & |f| > B_r/2f_s \end{cases} \quad (3)$$

与距离向相同, 方位向匹配滤波器离散时主周期内的幅度频谱为

$$|H_a(f)| = \begin{cases} \frac{\text{PRF}}{\sqrt{f_r}} = \sqrt{n_a \frac{\text{PRF}}{B_a}}, & |f| \leq B_a/2\text{PRF} \\ 0, & |f| > B_a/2\text{PRF} \end{cases} \quad (4)$$

式中 f_r 为多普勒调频率; B_a 为多普勒带宽。

压制性噪声干扰分为多种, 如射频干扰、噪声调频干扰、噪声调幅干扰等, 在带宽远大于接收机带宽时可近似为白噪声干扰, 为了简化推导过程, 后面的推导和分析均假设干扰为白噪声信号。

设 $B_n(\leq f_s)$ 为雷达接收机带宽, 则进入接收机的噪声带宽也为 B_n , 离散时距离向主周期内的功率谱为

$$N(f) = \begin{cases} f_s N, & |f| \leq B_n/2f_s \\ 0, & |f| > B_n/2f_s \end{cases} \quad (5)$$

对于方位向而言, 噪声带宽一般远大于脉冲重复频率, 离散时不同周期内的噪声功率谱相互叠加, 主周期内的噪声功率谱为

$$N(f) = \text{NPRF} \frac{B_n}{\text{PRF}} = NB_n, \quad f \in (-1/2, 1/2] \quad (6)$$

其距离处理增益(功率增益)和方位处理增益(功率增益)分别为

$$A_{\text{rn}} = n_r \frac{f_s}{B_r} \frac{f_s NB_r}{f_s NB_n} = n_r \frac{f_s}{B_n} \quad (7)$$

$$A_{\text{an}} = n_a \frac{\text{PRF}}{B_a} \frac{NB_n B_a}{NB_n \text{PRF}} = n_a \quad (8)$$

因此, 总的干扰增益为

$$A_n = A_{\text{rn}} A_{\text{an}} = n_r \frac{f_s}{B_n} n_a \quad (9)$$

由以上推导, 得知 RD 算法输出信干比与输入信干比的比值即信干比处理增益为

$$K_{\text{RD}} = \frac{S_{\text{out}}/N_{\text{out}}}{S_{\text{in}}/N_{\text{in}}} = \frac{A_{\text{echo}}}{A_n} \approx B_n T_p n_a = (B_n T_p)(\text{PRF} T_s) \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 若脉冲重复频率提高, 由于方位向的匹配滤波, RD 算法对噪声干扰的抑制作用也随之提高。当然, 这种抑制作用的提高不是无限的, 由于接收带宽的限制, 通过接收机的噪声带宽 B_n 是有限的, 所以随着脉冲重复频率的提高, 其抑制噪声能力的提升也越来越弱, 当脉冲重复频率大于噪声带宽后, 继续提高脉冲重复频率将得不到抑制噪声能力的继续提升, 其理论极限为

$$K_{\text{RD}} = \frac{A_{\text{echo}}}{A_n} = \frac{A_{\text{echo}}}{A_{\text{rn}} A_{\text{an}}} \approx (B_n T_p)(B_n T_s) \quad (11)$$

3 CS 算法对回波与噪声干扰的增益

3.1 CS 算法对回波的成像增益

CS 算法是星载 SAR 大距离徙动情况下的常用算法。算法的第 1 步乘以 CS 因子用于距离徙动曲线的对齐, 不产生增益。在与距离补偿因子相乘的第 2 步中进行距离压缩, 引入距离压缩增益。在与方位补偿因子相乘的第 3 步中进行方位压缩, 引入方位压缩增益。

CS 算法距离压缩增益(电平增益)^[5]:

$$C_r \approx \frac{B_r}{\sqrt{b}} = \sqrt{B_r T_p} \quad (12)$$

方位压缩增益(电平增益)为^[5]

$$C_a \approx \frac{B_a}{\sqrt{f_r}} = \sqrt{B_a T_s} \quad (13)$$

综上, CS 算法对回波的总成像增益(电平增益)为^[5]

$$C = C_r C_a = \sqrt{(B_r T_p)(B_a T_s)} \quad (14)$$

3.2 CS 算法对干扰信号的增益

无论是在距离向频域还是方位向频域, CS 算法只是在相位上乘以补偿因子, 频谱幅度为 1, 带宽为 $(-1/2, 1/2]$ (频率归一化后), 所以 CS 算法对噪声不产生增益。

得出 CS 算法信干比的处理增益为

$$K_{\text{CS}} = C^2 = (B_r T_p)(B_a T_s) \quad (15)$$

4 CS 算法与 RD 算法成像增益的比较

将式(15)与式(10)RD 算法的信干比处理增益比较可以发现, 对于 CS 算法, 提高采样频率并不能提高成像系统的抗干扰能力。这是因为, RD 算法的实质是回波经过二维匹配滤波器滤波的过程。对于信号, 由于其自身带宽的限制, 频域是否滤波都不损失其能量。噪声干扰则不同, 它的带宽远大于信号。RD 算法对其滤波, 在距离向上只能通过信号带宽 B_r 内的噪声, 在方位向上只能通过多普勒带宽 B_a 内的噪声, 降低了干扰的能量, 提高了输出信干比。而 CS 算法则是在整个频域的相位上乘以补偿因子, 没有滤波的过程。在过采样情况下, 信号所占带宽更窄, 进入 CS 系统的噪声干扰能量会更大。

为了提高 CS 算法的输出信干比, 可以在与 Chirp Scaling 因子相乘之前让回波先与两个一维滤波器卷积, 滤掉回波信号带宽 B_r , 多普勒带宽 B_a 之外的噪声, 从而提高输出信干比。

设计该滤波器为

$$|H_r(f)| = \begin{cases} 1, & |f| \leq B_r/(2f_s) \\ 0, & |f| > B_r/(2f_s) \end{cases} \quad (16)$$

$$|H_a(f)| = \begin{cases} 1, & |f| \leq B_a/(2\text{PRF}) \\ 0, & |f| > B_a/(2\text{PRF}) \end{cases} \quad (17)$$

对于实际的SAR成像系统,一般有 $f_s \approx B_r$,只需与一个方位向滤波器卷积即可。此时,对噪声的距离向处理与3.2节分析相同,距离向对噪声干扰不产生增益。

方位向处理增益为

$$A_{\text{an}} = \frac{NB_n B_a}{NB_n \text{PRF}} = \frac{B_a}{\text{PRF}} \quad (18)$$

则,CS算法对噪声干扰总的处理增益为

$$A_n = A_m A_{\text{an}} = A_{\text{an}} \approx \frac{B_a}{\text{PRF}} \quad (19)$$

其信干比的处理增益为

$$K_{\text{CS}} = \frac{C^2}{A_n} = (B_r T_p)(\text{PRF} T_s) \quad (20)$$

对比式(10),一般来说雷达带宽与信号带宽在同一量级上, B_n 略大于 B_r 。也就是说 K_{CS} 与 K_{RD} 在同一量级上。所以,方位向预滤波处理的情况下,CS算法对信干比的处理增益与RD算法对信干比的处理增益基本一致,对基于RD算法的干扰技术同样适用于CS算法。

5 仿真结果

5.1 基于正侧视的仿真结果

本文用仿真生成的回波数据和真实的机载与星载SAR回波数据进行实验。采用加性高斯干扰信号,将干扰信号直接加在原始回波数据上,干扰机布置在场景中心,干扰机天线主瓣始终对准雷达天线主瓣方向,干扰机瞄准了雷达频率,且干扰频带占据了雷达整个带宽。

5.1.1 信干比增益的比较 对于CS算法与RD算法对信干比的增益,用仿真生成的点目标回波数据加上噪声干扰进行比较,仿真参数如表1。当输入信噪比为-40dB,方位向不进行预滤波处理的CS算法、方位向进行预滤波处理的CS算法以及RD算法的信干比处理增益如表2所示。证实了理论分析的结论。

表1 仿真参数

参数名称	参数值
波长	0.24m
脉冲宽度	33 μ s
脉冲带宽	60MHz
脉冲重复频率	217Hz
采样频率	66.67MHz
天线视角	60°
平台速度	195m/s
平台高度	8km
距离向天线尺寸	1.2m
方位向天线尺寸	4.8m

表2 3种算法信干比处理增益理论值与实际值比较

	CS算法	预处理CS算法	RD算法
理论	6.6000×10^5	1.7627×10^6	1.9587×10^6
实际	6.5929×10^5	1.7144×10^6	1.8533×10^6

5.1.2 基于CS算法与基于RD算法的面目标干扰效果比较

本文采用基于图像相关系数的SAR干扰评估方法来说明两种成像算法对干扰效果的影响。

相关系数反映了两幅图像之间的相关性,定义如下:

$$\rho = \frac{E[(X_1 - E[X_1])(X_2 - E[X_2])]}{\sqrt{D[X_1]}\sqrt{D[X_2]}} \quad (21)$$

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

对于噪声干扰,设 X_2 为没有施加干扰的SAR图像, X_1 为干扰图像。则 ρ 越小表明干扰效果越好。

本文分别用CS算法、方位向预滤波处理的CS算法、RD算法对真实机载SAR回波数据成像,得到SAR功率图像。3种算法的干扰效果如表3。

表3 3种算法在不同信干比条件下的相关系数比较

	CS算法	预处理CS算法	RD算法
信干比5dB	0.9602	0.9706	0.9784
信干比0dB	0.8651	0.9062	0.9305
信干比-5dB	0.6116	0.7303	0.7920

可以看出,在相同信干比条件下,基于方位向预滤波处理的CS算法的干扰效果与基于RD算法的干扰效果基本一致,CS算法对干扰的抑制能力较差,证实了上述推导的结论。

5.2 对于大距离徙动情况的仿真结果

5.2.1 信干比增益的比较 点目标的仿真参数与表1相同,等效斜视角 $\theta = 92^\circ$,处理结果如表4。

表4 3种算法信干比处理增益理论值与实际值比较

	CS算法	预处理CS算法	RD算法
理论	6.6000×10^5	1.7627×10^6	1.9587×10^6
实际	5.7537×10^5	1.2593×10^6	9.8436×10^5

对于多点目标,点目标之间的旁瓣会相互影响,本文仿真了点间距为20m时对输出信干比增益的影响,处理结果如表5。

表5 3种算法信干比处理增益理论值与实际值比较

	CS算法	预处理CS算法	RD算法
理论	6.6000×10^5	1.7627×10^6	1.9587×10^6
实际	6.1228×10^5	1.3194×10^6	1.0619×10^6

在大斜视角的情况下,方位向不再是精确的线性调频信号,这样方位向的增益就会变小,导致信干比处理增益变小。对于多点目标,由于各点的旁瓣会折射到其他点的主瓣内,抬高点的信号增益,这样会使信干比的处理增益变大。

5.2.2 面目标干扰效果比较 本文采用星载 SAR 真实回波数据, 与 5.1.2 节相同, 对 3 种算法的干扰效果进行比较。分别用 3 种算法对回波数据成像, 得到 SAR 功率图像。3 种算法的干扰效果如表 6。

表 6 3 种算法在不同信干比条件下的相关系数比较

	CS 算法	预处理 CS 算法	RD 算法
信干比 5dB	0.8315	0.8631	0.8766
信干比 0dB	0.6151	0.6711	0.6973
信干比 -5dB	0.3423	0.3993	0.4283

对照表 3 可以看出, 在星载大斜视角的情况下, 3 种算法对干扰的抑制作用较差。从 3 种算法的结果同样可以得出方位向预滤波处理的 CS 算法的干扰效果与基于 RD 算法的干扰效果基本一致, CS 算法对干扰的抑制能力较差, 证实了上述推导的结论。

6 结束语

CS 算法是大斜视角情况下的常用算法, 研究该算法下的噪声干扰效果有十分重要的意义。本文从理论上分析了 CS 算法与 RD 算法在成像处理上的差别, 推导出了两种算法对信干比的处理增益。从理论上证明了在采样频率与信号带宽相当时, 两种算法的噪声干扰效果一致, 在过采样的情况下, RD 算法抗干扰能力要强于 CS 算法, 并分析了这种优势的极限。

为得到与 RD 算法一致的抗干扰能力, 本文提出了一种对基于 CS 算法的 SAR 系统进行预滤波处理的方法, 并在理论上证明, 经过这种处理的基于 CS 算法的 SAR 系统与基于 RD 算法的 SAR 系统的噪声干扰效果一致。

最后, 分别对计算机仿真回波数据与真实的机载与星载 SAR 原始回波数据, 用 RD 算法与经过预滤波处理的 CS 算

法进行成像处理, 证实了上文中推导的结论。这样无论是在理论研究中还是在实际干扰机的设计中, 用户都可以依照自身的需要来选择成像算法而不必再考虑算法本身对干扰的影响。

参考文献

- [1] Dumper K and Cooper P S. Spaceborne synthetic aperture radar and noise jamming. Radar 97, Edinburgh, England, October, 1997: 411-414.
 - [2] 李兵, 洪文. 合成孔径雷达噪声干扰研究. 电子学报, 2004, 32(12): 2035-2037.
Li Bing and Hong Wen. Study of noise jamming to SAR. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(12): 2035-2037.
 - [3] 吴一戎, 胡东辉. 一种新的合成孔径雷达压制干扰方法. 电子与信息学报, 2002, 24(11): 1664-1665.
Wu Yi-rong and Hu Dong-hui. A new noise jamming approach to SAR. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(11): 1664-1665.
 - [4] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989: 118-129.
 - [5] 彭江萍, 丁赤飏, 彭海良. 星载 SAR 辐射定标误差分析及成像处理增益计算. 电子科学学刊, 2000, 23(3): 379-383.
Peng Jiangping, Ding Chibiao, Peng Hailiang. Analysis of error in radiometric calibration for spaceborne SAR and calculation of imaging processor gain. *Journal of Electronics*, 2000, 23(3): 379-383.
- 李林琳: 女, 1983 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像理论及信号处理。
李景文: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号信息获取与处理、高分辨率雷达成像、合成孔径雷达动目标检测与成像等。