

SAR 信号在距离多普勒域和二维频域中的频谱分析

王 璐

(河海大学计算机与信息学院 南京 211100)

摘 要:合成孔径雷达的回波信号是 SAR 成像等一系列处理的基础,通过对 SAR 信号频谱的分析有利于脉冲压缩即匹配滤波器设计,SAR 信号频谱是目前较为精确高效的成像算法如 RDA、wKA、CSA 的理论基础。通过对频谱的分析有利于 SAR 成像中距离徙动、多普勒模糊等问题的解决。重点分析、详细推导了 SAR 信号在距离多普勒域及二维频域中的频谱表达式,深刻理解傅里叶变换的本质作用;最后利用 Matlab 对单个点目标分别在零斜视角、非零斜视角下的接收信号特性进行仿真,理论和实验分析 SAR 信号在这两种域的频谱性能。

关键词:合成孔径雷达;距离多普勒域;二维频域;频谱分析

中图分类号: TP391 TN955 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Analysis of the frequency spectrum of SAR in the range doppler domain and two dimensional frequency domain

Wang Lu

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Synthetic aperture radar echo signal is the foundation of SAR imaging and other processes, the analysis of SAR signal spectrum is helpful to the design of the pulse compression that is to say the design of the matched filter, the SAR signal spectrum is the theoretical basis of some accurate and efficient imaging algorithm, such as RDA, wKA, CSA. Through the analysis of the spectrum, some problems like range cell migration, doppler ambiguity in SAR imaging will be solved more easily. This essay focuses on the analysis and derivation of the SAR signal in the range doppler domain and two dimensional frequency domain to get the spectrum expression and profoundly understand the essence of the Fourier transform; Finally, by Matlab simulating the characteristics of the received signal on a single point target under zero squint angle and non-zero angle respectively, analysing the characteristics of SAR signal spectrum properties in these two domains theoretically and experimentally.

Keywords: SAR; range doppler domain; two dimensional frequency domain; spectrum analysis

1 引 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)以其全天时、全天候、高分辨率等优势已广泛应用于军事侦察、地形绘制等方面。SAR 在距离向和方位向都是高分辨,前者是通过脉冲压缩实现的,后者是通过可对看成线性调频信号的方位向回波部分进行匹配滤波得到的。脉冲压缩是一种广泛应用在雷达、声呐及其它探测系统的信号处理技术^[1-3]。SAR 处理数据时将从二维时域变换到其他域中,如距离多普勒算法,它是一种广泛使用的成像算法,通过距离和方位上的频域操作达到高效的模块化处理,同时还有简便的一维操作性。大多数 SAR 处理算法都工作在

频域,因此推导和仿真 SAR 信号的频谱^[4]是重要且必要的,从信号频谱中能理解相干斑噪声、射频干扰、距离徙动、通道均衡^[5]等热点问题形成的原因和解决相应问题的突破口,通过仿真图深入了解傅里叶变换对信号的影响。

2 SAR 信号谱的数学原理

2.1 SAR 信号的几何模型

雷达位置和波束在地面覆盖区的简单几何模型如图 1 所示。在图 1 中,斜视角是斜距矢量与零多普勒平面之间的夹角,它是描述波束指向的一个重要参数。它是在斜距平面内测量的,俯视即投影到地面,它与波束偏航角一致。

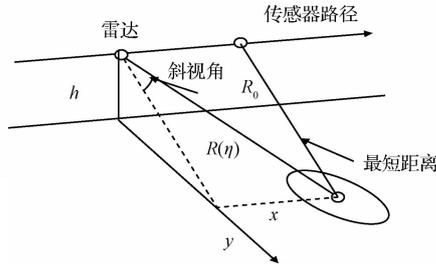


图1 SAR数据获取的几何关系

假设飞行路径局部直线,地球为局部平坦且不转动的即对几何模型进行简化。假设简单模型下的速度为 V_r ,图1中的 $X=V_r\eta$,其中 η 为相对于最近点位置的方位时间。传感器到目标点的距离 $R(\eta)$ 由下面的双曲线等式给出:

$$R^2(\eta) = R_0^2 + V_r^2\eta^2 \quad (1)$$

式中: R_0 为雷达离目标最近时的斜距即最短距离。

2.2 信号谱的数学推导

考虑波束斜视角比较大或孔径比较宽的情况下,距离和方位之间的交叉耦合使得信号的表达式复杂。详细的推导过程如下。

1) 距离向傅里叶变换

接收信号的信号 $s_0(\tau, \eta)$ 经距离向傅里叶变化表示成:

$$S_0(f_r, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} s_0(\tau, \eta) \exp\{-j2\pi f_r \tau\} d\tau \quad (2)$$

则积分号中的相位可表示为:

$$\theta(\tau) = -\frac{4\pi f_0 R(\eta)}{c} + \pi K_r \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right]^2 - 2\pi f_r \tau \quad (3)$$

$\theta(\tau)$ 对 τ 进行求导得到下式:

$$\frac{d\theta(\tau)}{d\tau} = 2\pi K_r \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] - 2\pi f_r \quad (4)$$

在脉冲持续时间内 V_r 保持不变, $R(\eta)$ 为 V_r 的函数,

$\frac{d\theta(\tau)}{d\tau} = 0$,即导数为0时的距离时间为:

$$\tau = \frac{f_r}{K_r} + \frac{2R(\eta)}{c} \quad (5)$$

则距离多普勒域中信号的表达式如下:

$$S_0(f_r, \eta) = A_0 A_1 W_r(f_r) \omega_a(\eta - \eta_c) \times \exp\left\{-j \frac{4\pi(f_0 + f_r)R(\eta)}{c}\right\} \exp\left\{-j \frac{\pi f_r^2}{K_r}\right\} \quad (6)$$

2) 方位向傅里叶变换

利用 POSP 推导出 $S_0(f_r, \eta)$ 经方位向傅里叶变换后的闭合解。方位向傅里叶变换为:

$$S_{2df}(f_r, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(f_r, \eta) \exp\{-j2\pi f_y \eta\} d\eta \quad (7)$$

此时傅里叶积分中的相位为:

$$\theta(\eta) = -\frac{4\pi(f_0 + f_r)R(\eta)}{c} - \frac{\pi f_r^2}{K_r} - 2\pi f_y \eta \quad (8)$$

将式(1)瞬时斜距代入式(8),求 $\theta(\eta)$ 对于 η 的导数

为0:

$$\frac{d\theta(\eta)}{d\eta} = \frac{4\pi(f_0 + f_r)V_r^2\eta}{c\sqrt{R_0^2 + V_r^2\eta^2}} - 2\pi f_y = 0 \quad (9)$$

则有:

$$f_y = -\frac{2V_r^2(f_0 + f_r)\eta}{c\sqrt{R_0^2 + V_r^2\eta^2}} \quad (10)$$

式(10)给出了二维频域中时间和方位频率的一一对应关系,这种对应关系与距离频率 f_r 有关。

二维频域信号表达式如下式所示:

$$S_{2df}(f_r, f_y) = A_0 A_1 A_2 W_r(f_r) W_a(f_y - f_{y_c}) \times \exp\{j\theta_a(f_r, f_y)\} \quad (11)$$

式中: A_2 是常数,它含有一个 $\pm\pi/4$ 的相位,但对以下分析不重要, $W_a(f_y - f_{y_c})$ 是以多普勒中心频率 f_{y_c} 为中心的方位频谱包络, $\theta_a(f_r, f_y)$ 是傅里叶变换后的相位角。

$$W_a(f_y) = \omega_a \left(\frac{-cR_0 f_y}{2(f_0 + f_r)V_r^2 \sqrt{1 - \frac{c^2 f_y^2}{4V_r^2(f_0 + f_r)^2}}} \right) \quad (12)$$

方位向傅里叶变换后的相位角如下式:

$$\theta_a(f_r, f_y) = -\frac{4\pi R_0(f_0 + f_r)}{c\sqrt{1 - \frac{c^2 f_y^2}{4V_r^2(f_0 + f_r)^2}}} + \frac{\pi c R_0 f_y^2}{(f_0 + f_r)V_r^2 \sqrt{1 - \frac{c^2 f_y^2}{4V_r^2(f_0 + f_r)^2}}} - \frac{\pi f_r^2}{K_r} = -\frac{4\pi R_0(f_0 + f_r)}{c} \sqrt{1 - \frac{c^2 f_y^2}{4V_r^2(f_0 + f_r)^2}} - \frac{\pi f_r^2}{K_r} \quad (13)$$

式(12)可得距离向频率包络没有出现由RCM引起的移动,而相位则包含了方位向调制、RCM及距离向和方位向的耦合(二次距离压缩)。

只要距离轨迹可以表示成双曲线形式,该等式就是任何斜视角下信号频谱的精确表达,因为没有用到任何关于斜视角的近似。通过该表达式可以直接推导出二维频域内的匹配滤波器,这对以后信号的处理有极大的作用。到目前为止得到的是适合任何信号的二维频谱。利用二维频谱更易解决SAR成像中的一个研究热点问题-通道均衡,如二维频域的A2DC通道均衡方法^[6-7]。

3) 距离向傅里叶逆变换

为了得到距离多普勒域中的信号形式,只需对 $S_{2df}(f_r, f_y)$ 进行距离向傅里叶逆变换,得到:

$$S_{rd}(\tau, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{2df}(f_r, f_y) \exp\{j2\pi f_r \tau\} df_r \quad (14)$$

对积分中的相位项进行近似,根式展开成 f_r 的幂级数,并保留至 f_r^2 项, $\theta_a(f_r, f_y)$ 变为:

$$\theta_a(f_r, f_y) = -\frac{4\pi R_0 f_0}{c} \left[D(f_y, V_r) + \frac{f_r}{f_0 D(f_y, V_r)} - \frac{f_r^2}{2f_0^2 D^3(f_y, V_r)} \frac{c^2 f_y^2}{4V_r^2 f_0^2} \right] - \frac{\pi f_r^2}{K_r} \quad (15)$$

其中

$$D^2(f_\eta, V_r) = 1 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4V_r^2 f_0^2} \gg \left| \frac{2f_\tau}{f_0} + \frac{f_\tau^2}{f_0^2} \right| \quad (16)$$

由于 f_η 随斜视角增加, 推导出的结论在大斜视角下不成立。

式(15)中括号中的第一项源自方位调制, 第2项源自RCM, 第3项则源自距离和方位的交叉耦合。其中交叉耦合对于大斜视角下的目标聚焦尤为重要。

$$\theta_{cc} = \frac{\pi}{2} \frac{cR_0 f_\eta^2 f_\tau^2}{V_r^2 f_0^3 D^3(f_\eta, V_r)} \quad (17)$$

该相位是在方位向傅里叶变换后出现的, 它代表由斜视角引起的附加距离调制。利用式(14)、(15)中的积分相位可写成:

$$\theta(f_\tau) = -\frac{4\pi R_0 f_0}{c} \left[D(f_\eta, V_r) + \frac{f_\tau}{f_0 D(f_\eta, V_r)} - \frac{f_\tau^2}{2f_0^2 D^3(f_\eta, V_r)} \frac{c^2 f_\eta^2}{4V_r^2 f_0^2} \right] - \frac{\pi f_\tau^2}{K_r} + 2\pi f_\tau \tau \quad (18)$$

此时再利用 POSP, $\theta(f_\tau)$ 对 f_τ 求导令其为 0。

将该距离频率代入式(15), 则式(14)距离向傅里叶逆变换的解为:

$$S_{rd}(\tau, f_\eta) = A_0 A_1 A_2 A_3 \omega_r \left\{ \frac{1}{1 - K_r Z} \left[\tau - \frac{2R_0}{cD(f_\eta, V_r)} \right] \right\} W_a(f_\eta - f_{\eta c}) \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_0 D(f_\eta, V_r) f_0}{c} \right\} \exp \left\{ j\pi K_m \left[\tau - \frac{2R_0}{cD(f_\eta, V_r)} \right]^2 \right\} \quad (19)$$

其中距离包络 ω_r 括号中的式子表示 RCM 移动。第一个指数项 $(-4\pi R_0 D(f_\eta, V_r) f_0 / c)$ 是由距离徙动引起的方位向调制。第二个指数为距离向调制。沿目标轨迹 $(\tau = 2R_0 / [cD(f_\eta, V_r)])$ 处的距离相位为 0。

新的距离调频率为:

$$K_m = \frac{K_r}{1 - K_r Z} \quad (20)$$

一般而言, $1/Z \ll |K_r|$, 所以 $|K_r Z| \ll 1$ 。可看出 K_m 与 K_r 仅有微小的差异, 但这种差异足够引起散焦。

由于使用了近似, 式(19)给出的距离多普勒频谱 $S_{rd}(\tau, f_\eta)$ 并不精确。该等式是一些处理算法如 CSA 的起点。此时得到的距离多普勒频谱对于斜视角非常大的情况这种近似可能不成立。

通过研究方位向频谱有利于 SAR 成像中相干斑和射频信号的抑制^[8]。SAR 图像的相干斑抑制成为 SAR 图像处理应用领域的一个重要研究方向^[9-10]。相干斑的存在严重降低了 SAR 图像的视觉质量, 给后续处理操作带来了困难。一种有效的相干斑抑制方法—方位多视处理: 将 SAR 回波信号的方位向频谱分割成若干个同样大小的子波束进行单独成像, 最后非相干叠加抑制斑点噪声。

3 MATLAB 对单个点目标的仿真及分析

考虑小(零)斜视角和大斜视角两种情况下的两个域中的目标频谱。其中机载雷达仿真参数如表 1 所示。实验结果分析如下。

表 1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
中心斜距/km	20	雷达速度/(m/s)	150
脉冲时宽/ μ s	25	距离调频率/(Hz/s)	0.25×10^{12}
工作频率/GHz	5.3	多普勒带宽/Hz	80
距离采样率/MHz	7.5	方位采样率/Hz	104
距离采样点数	256	斜视角/ $^\circ$	0 和 22.8
偏移时间/s	0 和 -51.7	多普勒中心频率/Hz	0 和 2 055

1) 零斜视角下的单个点目标的仿真分析

时域性质如图 2 所示。其中图 2(b)、(c)中多出了“鞍点”和“靶点”说明相位等值线存在虚像, 因为相位只代表复数信号的部分信息。

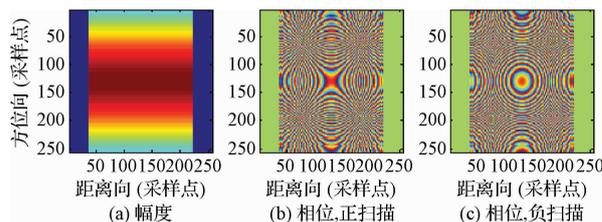


图 2 零斜视角下单个点目标的时域图

图 3 所示为在正扫频情况下的方位频谱。其中图 3(a)表明了零斜视角下, 间隙及其引起的不连续频率位于傅里叶变换后数据列的中间位置。图 3(b)是经傅里叶变换后方位频率二次相位改变符号, 相位等值线变成了椭圆。图 3(c)、(d)给出了二维频谱, 由于距离傅里叶变换也会引起符号变换, 此时图 3(d)的相位等值线又变为双曲线。

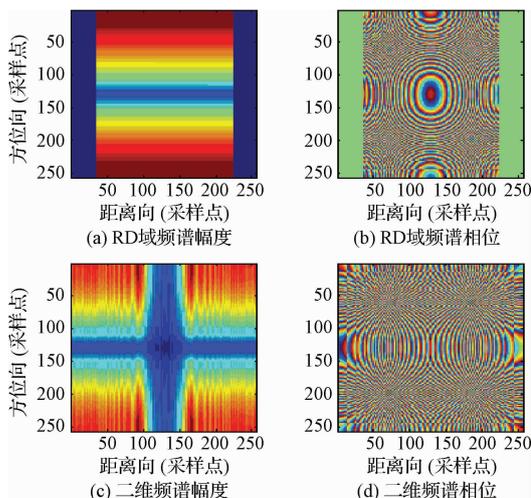


图 3 零斜视角、正扫频下单个点目标的方位频谱

2) 非零斜视情况下单个目标的仿真分析

图4所示显示了斜视角不可忽略时的时域信号特征。对比图2,此时图中出现较为明显的RCM。其中图4(a)显示了正扫频信号的相位等值线是双曲线。图4(b)显示了负扫频信号的相位等值线是椭圆。

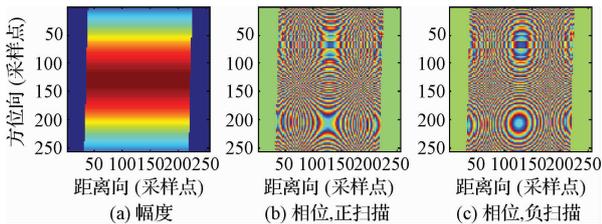


图4 非零斜视角下单个点目标的时域图

图5所示为正在扫频情况下的方位频谱。其中图5(a)、(b)由于多普勒中心的改变,方位频率的间隙位置产生了移动,与零斜视角的频谱不同。多普勒带宽按斜视角的余弦值被缩小,所以间隙变大。图5(c)、(d)给出了二维频谱与零斜视角下的结果类似,RCM在相位上表现的更加明显,零斜视角与非零斜视角的方位频率间隔位置和斜率有不同之处。

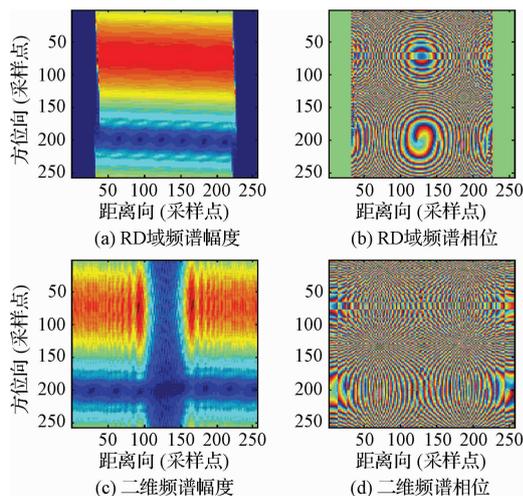


图5 非零斜视角、正扫频下单个点目标的方位频谱

4 结论

详细推导了 SAR 信号在距离多普勒域和二维频域中的信号表达式,有利于加深对多普勒中心频率、多普勒模糊及距离徙动的理解及傅里叶变换的本质,通过仿真得到了零斜视角与非零斜视角下信号频谱的异同。对 SAR 信号频谱的分析有利于进一步对 SAR 信号处理如距离脉压等具有重要的基础作用。

参考文献

- [1] GIERULL C H, SIKANETA I, CERUTTI-MAORI D. Two-step detector for RADARSAT-2's experimental GMTI mode[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(1):436-454.
- [2] YANG J, LIU C, WANG Y. Imaging and parameter estimation of fast-moving targets with single-antenna SAR[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(2):529-533.
- [3] LI G, XIA X G, XU J, et al. A velocity estimation algorithm of moving targets using single antenna SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2009, 45(3):1052-1062.
- [4] 王欣欢, 陈怀海. 一种改进的频谱修正法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(11):27-31.
- [5] SUCHANDT S, RUNGE H, BREIT H, et al. Automatic extraction of traffic flows using terra SAR-X along-track interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(2):807-819.
- [6] BAUMGARTNER S V, KRIEGER G. Fast GMTI algorithm for traffic monitoring based on a priori knowledge[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(11):4626-4641.
- [7] CHEN Z Y, WANG T. Two-stage channel calibration technique for multichannel synthetic aperture radar-ground moving target indication systems[J]. Iet Radar Sonar Navigation, 2014, 8(9):1116-1126.
- [8] 丁斌, 梁兴东, 向茂生. P 波段 SAR 射频干扰信号分析及抑制方法研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(6):788-795.
- [9] 李新娜, 王正明, 谢美华. SAR 图像的核回归自适应相干斑抑制方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(5):729-737.
- [10] 李光廷, 禹卫东. 基于自适应 Bilateral 滤波的 SAR 图像相干斑抑制[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5):1076-1081.

作者简介

王璐, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为 SAR 成像及运动目标检测。

E-mail:834811962@qq.com