

切趾滤波旁瓣抑制技术在合成孔径雷达中的应用

张先义 苏卫民 史记 顾红
(南京理工大学电子工程中心 南京 210094)

摘要: 线性调频 SAR 回波信号经过二维匹配滤波, 所得到二维像具有较高的旁瓣电平, 虽然通过幅度加权处理可以降低旁瓣电平, 但是主瓣的分辨率会降低。该文针对这一问题, 探讨了应用切趾滤波技术来抑制线性调频 SAR 图像的旁瓣电平的优点, 并给出了具体的实现步骤。理论分析和仿真表明, 在获得相同的峰值旁瓣电平下, 与幅度加权旁瓣技术相比, 切趾滤波技术可以保持原 SAR 图像的分辨率。最后, 多目标 SAR 图像的仿真结果验证了切趾滤波技术的优越性。

关键词: 合成孔径雷达; 切趾滤波; 旁瓣抑制; 分辨率

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0902-04

Application of Apodization Filtering Sidelobe Suppressin Technique to Synthetic Aperture Radar

Zhang Xian-yi Su Wei-min Shi Ji Gu Hong

(Research Center of Electronic Engineering Technology, Nanjing University of Sci. & Tech., Nanjing 210094, China)

Abstract: It is known that for Linear Frequency Modulation (LFM) Synthetic Aperture Radar (SAR) echo signal, the obtained SAR image by 2-dimensional matched filtering has relatively high sidelobe level. Though such sidelobe can be depressed with amplitude weighting, the resolution of mainlobe will be accordingly reduced. To resolve this problem, in this paper, the apodization filtering technique is discussed and then applied to sidelobe suppression of SAR imaging with the detailed realization procedure presented. The theoretical analysis and simulation results show that in comparison with amplitude weighting, this technique can preserve the resolution of original SAR imaging whilst reducing the sidelobe level. The advantage of this technique has been verified with the simulation results of SAR image in multi-object case.

Key words: SAR; Apolization filtering; Sidelobe suppression; Resolution

1 引言

合成孔径雷达^[1](SAR)是一种高分辨率成像雷达, 它可以在能见度极差的气象条件下得到类似光学照相的高分辨率雷达图像。常规 SAR 发射线性调频(LFM)信号, 并对接收到的回波信号进行距离向和方位向的匹配滤波, 得到被测区域的雷达图像。由于成像系统的二维频域支撑域有限, 使得 SAR 的脉冲响应函数在距离向和方位向上均为 sinc 函数^[2], 第一旁瓣电平高达-13.6dB。因此有很多学者提出了各种各样的旁瓣电平抑制技术, 其中以通过幅度加权来降低旁瓣电平较多, 如 $n=5$ 的-35dB 的泰勒加权, 但主瓣宽度会展览到原来的 1.34 倍^[2]。主瓣宽度的展览严重影响了 SAR 图像的质量。因此, 寻找更好的旁瓣电平抑制技术一直是 SAR 图像处理的关键技术之一。

通过切趾滤波^[3]可以找到一种特殊的图像域滤波函数, 将此滤波函数与 SAR 图像原始数据卷积就会得到一个比原来旁瓣电平低得多的输出响应, 可以得到一幅高质量的 SAR

图像。切趾滤波技术在超宽带随机噪声成像雷达距离旁瓣抑制中已取得了很好的应用效果^[3]。通过对线性调频 SAR 二维输出脉冲的模型加以分析, 本文探讨了应用切趾滤波技术来抑制线性调频 SAR 图像的距离向和方位向旁瓣电平所具有的优越性。

通过理论分析和仿真表明, 在获得相近的峰值旁瓣电平下, 与幅度加权旁瓣技术相比, 切趾滤波技术可以获得更低的积分旁瓣电平比, 并可以保持原图像的分辨率。最后多目标 SAR 图像的仿真结果验证了采用切趾滤波技术来抑制旁瓣电平的优越性。

2 线性调频 SAR 脉冲压缩的输出

线性调频 SAR 回波经距离向匹配滤波压缩后, 输出^[1]为

$$R_L(\hat{t}) = \text{sinc}(B\hat{t}) \quad (1)$$

其中 \hat{t} 为快时间, B 为发射信号带宽。由式(1)知, 线性调频 SAR 回波距离向压缩后的输出包络是 sinc 函数形状, 它的第一旁瓣电平高达-13.6dB。而在 SAR 成像场合, 强目标和弱目标的回波功率比常常达到 30dB, 甚至更高。强目标过

高的旁瓣很容易淹没附近弱目标的主瓣, 从而使得弱目标无法被检测到。

在线性调频 SAR 成像算法中, 对目标回波的快时间域(距离域)和慢时间域(多普勒域)进行脉冲压缩, 可以得到其二维输出脉冲^[2]为

$$S_0(\hat{t}, \hat{t}_m) = \text{sinc}(B\hat{t})\text{sinc}(\Delta f_d \hat{t}_m) \quad (2)$$

其中 \hat{t}, \hat{t}_m 分别为快时间和慢时间, B 为发射信号带宽, Δf_d 为回波序列的多普勒带宽。式(2)说明线性调频 SAR 二维图像的包络是两个 sinc 函数的乘积。为了提高图像质量, 需要采取措施来抑制旁瓣电平。采用不同的旁瓣电平抑制技术, 所获得的图像质量也会有所不同。这里介绍一种新的旁瓣电平抑制技术——切趾滤波技术^[3]。

3 切趾滤波技术^[3]

3.1 原理

传统 SAR 系统中, 多采用幅度加权来实现旁瓣电平的抑制。幅度加权一般在频域进行, 等同于图像域(时域)的卷积。本文介绍的切趾滤波是在时域进行的。通过切趾滤波可以找到一种特殊的图像域滤波函数, 将此滤波函数与图像域的数据卷积就会得到一个比原来旁瓣低得多的输出响应。假设这样一个滤波函数 $F(\tau)$, SAR 回波信号经过匹配滤波距离向或者方位向的输出为 $S(\tau)$, 期望滤波后的输出 $S_F(\tau)$ 可以表述为

$$S_F(\tau) = S(\tau) \otimes F(\tau) \quad (3)$$

这容易理解, 滤波等同于在频域用一个特殊的窗函数来优化原来的频谱数据, 此窗函数就是滤波器函数 $F(\tau)$ 的傅里叶变换。这与光学成像中通过孔径切趾来控制旁瓣幅度很相似, 故将这里的图像域数据处理技术称作切趾滤波^[3]。

3.2 实现步骤

式(3)在数字化后相当于一个线性方程组, 写成矩阵的形式

$$\mathbf{A}\mathbf{F} = \mathbf{G} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdots \\ f_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \cdots \\ g_M \end{bmatrix}$$

$f_j = F((j-1)\Delta\tau)$, ($j = 1, 2, \dots, N$), 是待求的滤波器系数, $g_i = S_{Fi}((i-1)\Delta\tau)$, ($i = 1, 2, \dots, M$), 是期望的输出相应离散采样: $a_{ij} = S[(i-1+j)\Delta\tau]$, ($i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$), $\Delta\tau$ 是时域采样时间间隔, $S(\tau)$ 是 SAR 回波信号经过匹配滤波的输出离散采样。

获得切趾滤波器系数 f_j , ($j = 1, 2, \dots, N$) 的步骤如下:

(1) 确定 g_i 的值。确定期望的主瓣宽度, 旁瓣幅度全部设定为零, 例如, 线性调频时, 可以把期望主瓣设为 sinc 函数, 主瓣中心点设为 1。

(2) 设定合适的滤波器长度 N 。

(3) 求滤波器的系数 f_j ($j = 1, 2, \dots, N$)。式(4)中的线性方程描述了一个病态的系统, 使得直接求解变得很难, 因而需找出一种稳健的算法来求解式(4)。投影法被证明是一种有效及稳健的解决病态问题的方法, 其主要优点是对给定的参数总能收敛。

投影算法的表述如下, 记

$$\mathbf{A}_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iN}] \quad (5)$$

将 \mathbf{F} 看成是 N 维的向量, 每个方程 $\mathbf{A}_i \mathbf{F} = g_i$, ($i = 1, 2, \dots, M$) 代表着一个超平面。设初始的 \mathbf{F} 序列的解为 $\mathbf{F}^{(0)} = [f_1^{(0)}, f_2^{(0)}, \dots, f_N^{(0)}]^T$, 则下一次迭代的解 $\mathbf{F}^{(1)}$ 为 $\mathbf{F}^{(0)}$ 在等式 $\mathbf{A}_1 \mathbf{F} = g_1$ 上的投影, 即

$$\mathbf{F}^{(1)} = \mathbf{F}^{(0)} - \frac{\mathbf{A}_1 \mathbf{g} \mathbf{F}^{(0)} - g_1 \mathbf{A}_1}{\mathbf{A}_1 \mathbf{g} \mathbf{A}_1} \quad (6)$$

接着计算 $\mathbf{F}^{(1)}$ 在等式 $\mathbf{A}_2 \mathbf{F} = g_2$ 上的投影得到 $\mathbf{F}^{(2)}$, 在接下去依次得到 $\mathbf{F}^{(3)}, \mathbf{F}^{(4)}, \dots$, 一直到 $\mathbf{F}^{(M)}$ 满足最后一个方程 $\mathbf{A}_M \mathbf{F} = g_M$, 至此, 完成了首轮迭代。然后, 再从式(4)开始, 计算 $\mathbf{F}^{(M)}$ 在 $\mathbf{A}_1 \mathbf{F} = g_1$ 上的投影, 记为 $\mathbf{F}^{(M+1)}$, 由此继续迭代, 直至得到 $\mathbf{F}^{(2M)}$, 这样完成了第二轮的迭代。

对于任意给定的 M, N 及 A_{ij} , 按上述方法迭代后得到的向量序列 $\mathbf{F}^{(0)}, \mathbf{F}^{(M)}, \mathbf{F}^{(2M)}, \dots$, 总是收敛的, 即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{F}^{(kM)} = \mathbf{F} \quad (7)$$

如果式(4)仅有一个解, 则 \mathbf{F} 就是此解, 如果式(4)有无穷多个解, 则 \mathbf{F} 取使得范数 $\|\mathbf{F} - \mathbf{F}^{(0)}\|^2$ 值最小的那个解。

4 仿真结果及性能分析

为了检验切趾滤波技术应用到线性调频 SAR 成像算法中的效果, 本文分别采用幅度加权(本文以常用的 $n=5$ 的 -35 dB 泰勒加权^[2]为例)以及切趾滤波对原始 SAR 图像进行旁瓣抑制, 并对它们的处理结果进行对比。选取的 SAR 系统参数如下:

设 SAR 发射 LFM 信号的载频为 9.375 GHz, 脉冲宽度为 $2 \mu\text{s}$, 脉冲重复频率^[4]为 660 Hz, 条带式正侧视, SAR 距离向和方位向分辨率均为 3 m, 载机平台移动速度为 110 m/s, 中心斜距参考距离为 30 km。

由式(2)知, SAR 回波信号经过二维匹配滤波后, 距离向和方位向包络都成 sinc 函数形状, 因为对距离向和方位向所采取的旁瓣抑制步骤基本相同, 这里仅给出距离向数据处理的结果进行分析对比。针对 SAR 信号处理的特点, 本文从以下几个准则^[3]比较: 峰值旁瓣电平(Peak Sidelobe Level, PSL, 定义为点目标冲激相应的最高峰值旁瓣电平)、积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Level Ratio, ISLR, 定义为旁瓣能量与主瓣能量的比值)和主瓣展宽倍数。

4.1 性能比较

图 1(a), 图 1(b), 图 1(c)分别为原始 SAR 距离向剖面图、幅度加权以及切趾滤波后的 SAR 距离向剖面图。采用旁瓣抑制技术后, 如图 1(b), 图 1(c)中的第 1 旁瓣电平要低

于图 1(a)的第 1 旁瓣电平 20 dB 左右,可见,采用旁瓣抑制技术确实能够有效地抑制 SAR 回波经匹配滤波所产生的旁瓣电平和积分旁瓣比。但是,比较图 1(b)和图 1(c)发现,图 1(b)中,目标的主瓣被展宽 1.34 倍,而图 1(c)中,目标的主瓣宽度没有被展宽,积分旁瓣比也略优于图 1(b)。另外,对雷达来讲,抑制旁瓣时,信噪比损失也需要着重考虑,通过计算,距离向的信噪比损失如表 1 中所示,幅度加权时,主瓣宽度变宽,因而信号能量比之前分散,信号峰值功率降低,导致信噪比损失,切趾滤波时,信号能量分散程度要小于幅度加权,所以其信噪比损失要小于幅度加权。由前面式(2)知,方位向匹配滤波后的包络也类似于 sinc 函数形状,所以也对方位向进行了旁瓣抑制操作,所得数据如表 1 中方位向部分,最后的结果也和距离向处理后的情况类似。

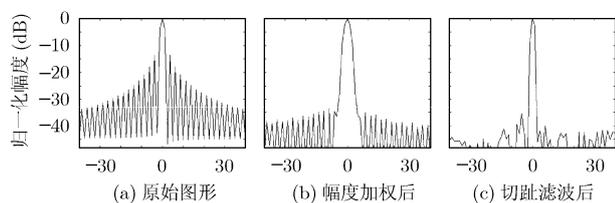


图 1 距离向剖面图

表 1 性能比较

	原始图像	幅度加权	切趾滤波	
距离向	PSL(dB)	-13.49	-34.01	-34.88
	ISLR(dB)	-9.83	-20.93	-22.90
	主瓣展宽倍数	1	1.34	1
	信噪比损失(dB)	0	0.89	0.46
方位向	PSL(dB)	-13.23	-34.14	-35.29
	ISLR(dB)	-9.83	-19.81	-22.26
	主瓣展宽倍数	1	1.34	1
	信噪比损失(dB)	0	0.89	0.46

切趾滤波旁瓣抑制算法和最小二乘意义下的旁瓣抑制算法有一定的相似之处,而最小二乘旁瓣抑制对信号中的噪声和多普勒频率比较敏感,因此本文仿真时也考虑了这些因素对算法性能的影响。经过大量的仿真发现,当输入信噪比大于-15dB,目标多普勒频率小于 15kHz 时,切趾滤波的旁瓣抑制性能基本不受影响,超过这个限制,其旁瓣抑制效果会逐渐变差。图 2 是输入信噪比为 0dB、目标多普勒频率为 1kHz 时的原始 SAR 三维图像、幅度加权以及切趾滤波后 SAR 三维图像。图 2(a)中距离向和方位向都有很高的旁瓣电平,其包络都呈 sinc 函数形状。图 2(b)中距离向和方位向的旁瓣电平都得到了很好的抑制,但是和图 2(a)相比较,其距离向和方位向的主瓣都被展宽。图 2(c)中距离向和方位向的

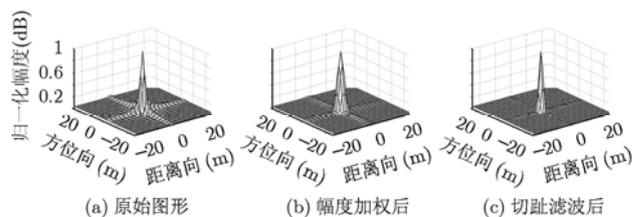


图 2 SAR 三维图图像

旁瓣电平被很好抑制,且其距离向和方位向的主瓣比图 2(b)中更尖锐。图 2 表明,采用切趾滤波后,可以得到更高质量的 SAR 图像,表 1 中数据是根据前面 3 个准则,对图 2 进行计算所得。

由前面切趾滤波的实现步骤知道,切趾滤波的效果和滤波器的阶数以及迭代次数有一定的关系。为了检查不同滤波器的阶数条件下,切趾滤波的性能,这里给出切趾滤波技术应用在线性调频 SAR 的情况。在求滤波器系数时,通过设置是否达到期望的 PSL 来控制迭代是否结束。这里设置期望的 $PSL = -35$ dB(切趾滤波后,主瓣宽度预设 1),结果如表 2。在滤波器阶数为 50 时,迭代所需次数为 18 次,随着滤波器阶数的增加,达到期望 PSL 所需的迭代次数也随之减少。这是由于线性调频信号形式简单,脉冲压缩后的信号包络衰减很快,有利于投影准则下最优滤波器系数的求解,因而其收敛速度很快。

表 2 性能分析

滤波器阶数	50	52	54	56	58	60
迭代次数	18	18	17	17	17	15
滤波器阶数	62	64	66	68	70	72
迭代次数	15	15	15	14	14	14

4.2 多目标情况

本小节对多目标情况进行了仿真。3 目标的位置分别为: (0, 0), (4, 0), (0, 7.5), 幅度分别为: 1, 1, 0.2。图 3(a), 图 3(b), 图 3(c)分别为多目标时原始 SAR 三维图像、幅度加权以及切趾滤波后的 SAR 三维图像。在图 3(a)中,可以发现,此时可见两个相近的强目标,而靠近强目标的弱目标已被淹没在强目标的旁瓣中。在图 3(b)中,此时由于强目标的旁瓣被抑制,因而可以见到强目标附近的弱目标,然而由于幅度加权带来的目标主瓣展宽,使得原本在图 3(a)中可以分辨的两个强目标现在叠在了一起。图 3(c)为采用切趾滤波后的 SAR 图像,由图可见,此时由于强目标的旁瓣被抑制,因而可以见到强目标附近的弱目标,又由于切趾滤波可以保持 SAR 原始图像的分辨率,因而两个相近的强目标仍然可以清楚的分辨。

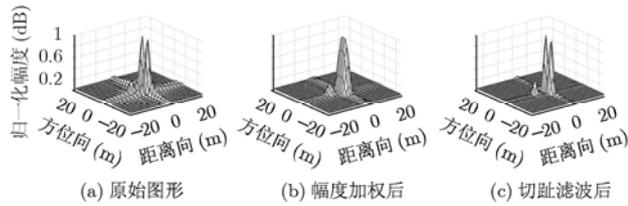


图3 多目标时线性调频 SAR 三维图图像

切趾滤波旁瓣抑制技术的优势在于, 相比传统的幅度加权而言, 在抑制原始 SAR 图像的旁瓣电平后, 仍然可以保持原图像的主瓣宽度, 即图像的分辨率, 而与泰勒加权本质上一样的同类型幅度加权算法都展宽了主瓣, 降低了 SAR 图像的分辨率。

5 结束语

将切趾滤波技术应用到 SAR 图像处理中, 既可以抑制图像的旁瓣电平, 得到较低积分旁瓣电平比, 又可以保持原图像分辨率, 这是切趾滤波技术的优势所在。但是, 切趾滤波技术由于要通过多次迭代求其滤波器系数, 因此运算量较大, 为了更好地把切趾滤波技术应用到实际 SAR 系统中, 还需要进一步研究快速的切趾滤波迭代算法。

参考文献

[1] 张澄波. 综合孔径雷达 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-2.

Zhang Cheng-bo. Synthetic Aperture Radar [M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-2.

[2] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 124-151.

Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 124-151.

[3] Xu Xiaojian and Narayanan R M. Range sidelobe suppression technique for coherent ultra wide-band random noise radar imaging [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2001, 49(12): 1836-1842.

[4] 张直中. 机载和星载合成孔径雷达导论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 8-36.

Zhang Zhi-zhong. Introduction to Airborne and Satellite SAR [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 8-36.

张先义: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为随机噪声超宽带成像雷达和外辐射源雷达。

苏卫民: 男, 1959年生, 教授, 博士, 研究方向为自适应阵列信号处理、外辐射源雷达、随机信号雷达、雷达成像理论。

顾红: 男, 1967年生, 教授, 博士, 研究方向为快速数字信号处理、随机信号雷达、外辐射源雷达、雷达成像理论。