

一种 SAR 相干干扰信号产生快速算法

张仕山, 靳学明

(华东电子工程研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 对合成孔径雷达(SAR)相干干扰由于计算量大而难以实施. 本文在分析 SAR 相干干扰原理、用于 SAR 相干干扰信号产生的二维卷积算法的基础上, 提出了一种快速算法. 对两种算法的运算过程做了详细分析, 并进行了仿真计算. 理论分析和仿真结果表明, 该快速算法大大简化了 SAR 相干干扰信号产生的方位处理过程, 减小了方位处理计算量. 结合现代高速信号处理技术, 该快速算法可用于 SAR 相干干扰信号的连续、实时产生.

关键词: 合成孔径雷达; 相干干扰; 快速产生算法; 二维卷积算法

中图分类号: TN958、TN972 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 01-0108-04

A Fast Algorithm for SAR Coherent Jamming Signal Generation

ZHANG Shi-shan, JIN Xue-ming

(East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Coherent jamming to SAR (Synthetic Aperture Radar) is hard to put into practice because of big amount of computation. This thesis has analyzed SAR coherent jamming theory, 2-D convolution algorithm for SAR coherent jamming signal generation, and provided a fast algorithm. The computation procedures of these two algorithms were analyzed in detail, and the simulation was also processed. Both theoretical analyses and simulation results indicated that fast algorithm could reduce complexity and computation amount of azimuth processing greatly for SAR coherent jamming signal generation. Combining with modern fast digital signal processing technology, this fast algorithm could be used to generate SAR coherent jamming signals sequentially in real time.

Key words: SAR (synthetic aperture radar); coherent jamming; fast algorithm; 2-D convolution algorithm

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)在军事及民用领域的应用越来越广泛, SAR 干扰和抗干扰技术也早已成为电子对抗领域的重要研究课题之一.

SAR 回波在距离向和方位向都有很高的能量积累, 回波功率大, 且 SAR 成像处理算法对噪声有较强的抑制作用, 对 SAR 进行噪声压制干扰所需等效辐射功率很大, 实现困难; 而使用相干干扰信号在一定程度上能够降低对干扰等效辐射功率的要求.

目前, 一些可用的相干干扰信号产生算法一般难以完成全程压制相干干扰信号的连续、实时产生. 本文分析了 SAR 相干干扰原理和用于 SAR 相干干扰信号产生的二维卷积算法, 并提出一种快速算法, 为全程压制相干干扰信号的连续、实时产生提供了一种可行的解决途径.

2 SAR 相干干扰分析

SAR 回波信号采样数据中的每一个点对应着目标的反射强度、延时和多普勒频率, 要实现相干干扰, 必须

确保 SAR 接收到的干扰信号具备和回波信号相同或相近的反射强度、延时和多普勒频率. 由此可知, 干扰信号的目标响应要与被干扰目标处的点目标响应一致, 才能形成相干干扰.

从另外一个角度来看, 相干干扰信号的产生过程其实就是一个回波模拟加多普勒补偿的过程: 一方面, 干扰机需要根据侦察信息及外部情报, 产生被保护区域的 SAR 模拟回波; 另一方面, 干扰机需要根据 SAR 平台运动参数、平台和干扰机的相对位置对模拟回波进行必要的多普勒补偿, 以抵消干扰信号从干扰机到达 SAR 平台所经历路程引起的多普勒频率, 则能够确保 SAR 接收到的干扰信号和被保护区 SAR 回波的特性相同或相近.

就 SAR 干扰而言, 为实现全程压制干扰, 干扰信号必须覆盖整个 SAR 接收时间窗. 现代 SAR 发射的一般都是大带宽、大时宽信号, 这就要求干扰信号必须有较大的时宽(几百 μ s 至几个 ms), 在大带宽、高采样率情况下对应的数据点数多, 计算量大; 此外, 干扰产生还必须是实时的. 所以, 产生全程压制相干干扰信号对硬件

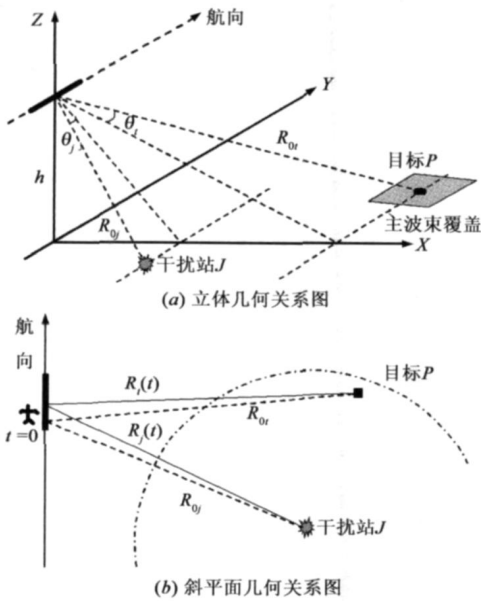


图1 SAR、测绘带、干扰机、保护区几何关系图

速度及干扰产生算法的效率要求都很高。目前,可用于相干干扰信号产生的回波模拟算法,以及其它一些相干/欺骗干扰信号产生算法^[4,5],数据量大时计算量都很大,无法连续、实时产生相干干扰信号。因此,寻求一种快速算法是实现 SAR 相干干扰的关键所在。

3 二维卷积算法

SAR 回波的数学模型^[1]如下:

$$s(r, x) = [\sigma(r, x) \cdot W_r(r) \odot h_1(r, x)] \odot_R h_2(r) \quad (1)$$

式中 $\sigma(r, x)$ 为目标二维反射特性; $W_r(r)$ 为 SAR 发射信号距离向天线方向图; $h_1(r, x)$ 为方位响应函数,其为距离 r 和方位 x 的二维函数; $h_2(r)$ 为距离响应函数,其为距离 r 的一维函数,与方位 x 无关。

可见, SAR 回波信号可表示为目标二维散射特性 $\sigma(r, x)$ 乘以距离向天线方向图 $W_r(r)$,再相继与两个脉冲响应函数 $h_1(r, x)$ 和 $h_2(r)$ 的卷积。

二维卷积算法依据上述回波数学模型产生 SAR 模拟回波,是一种简化的相干视频信号模拟方法。该算法的优点是计算速度比较快、支持并行处理,缺点是无法考虑平台、波束、测绘带之间的复杂几何关系,且为有效减小计算量采用了聚焦深度概念进行近似处理。在聚焦深度对应的距离内用一个方位响应函数,对高分辨率 SAR 来说,满足聚焦深度准则的距离范围只有数米,计算量很大。

二维卷积算法可用于 SAR 相干干扰信号的产生,这时还需要根据 SAR 平台运动参数、平台与干扰机的相对位置进行必要的多普勒补偿,所以计算量比用于回波模拟还要大一些。图 2 给出了二维卷积算法的流程图。该算法性能的详细分析可参见文献^[2]。从算法流

程可见,二维卷积算法包括方位处理和距离处理两个过程,其中方位处理包括构造每个斜平面方位响应函数和方位卷积运算;距离处理包括距离卷积运算和多普勒补偿。

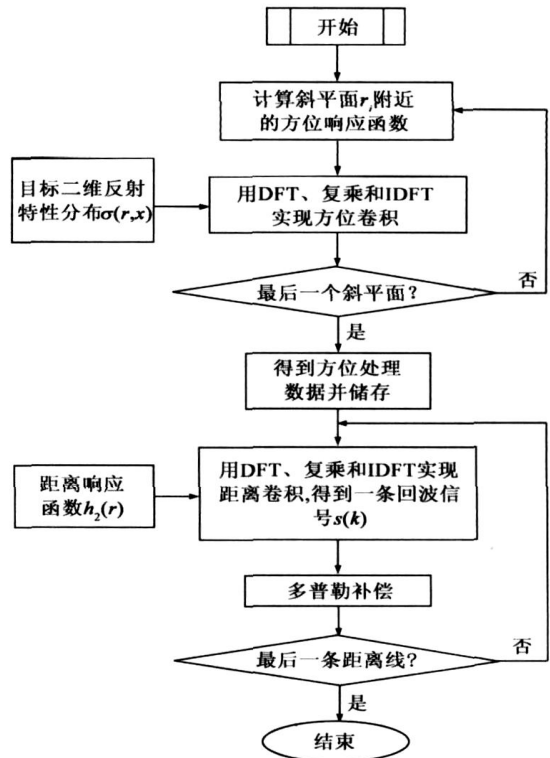


图2 二维卷积算法流程图

由于二维卷积算法的方位处理需要在距离处理前一次性完成,计算量大,且只能按合成孔径大小一一进行,所以不能连续、实时产生相干干扰信号。因此,将其直接用作相干干扰信号产生算法存在计算量大、实时性不足等问题。

4 快速算法

LSI 系统的线性卷积记为^[3]:

$$y(n) = x(n) \odot h(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) x(n-k) \quad (2)$$

可见在时域线性卷积运算就是一个延迟叠加过程。

线性卷积运算可以在频域用 DFT、复乘和 IDFT 来实现,即:

$$y(n) = \text{IDFT}\{\text{DFT}[x(k)] \cdot \text{DFT}[h(k)]\} \quad (3)$$

二维卷积算法包括方向处理和距离处理两个过程,卷积运算在频域实现。其中,方位处理过程就是求目标二维反射特性 $\sigma(r, x)$ 对每一个斜平面 r_i 的方位响应 $s_{ai}(r_i, x)$,由(1)式和(2)式可得:

$$s_{ai}(r_i, x) = [\sigma(r_i, x)] \cdot W_r(r_i) \odot h_1(r_i, x) = \sum_{N_x/2}^{N_x/2} [h_1(r_i, x_j) \cdot \sigma(r_i, x - x_j) \cdot W_r(r_i)] \quad (4)$$

式中 N_L 是合成孔径脉冲数。

由于 SAR 成像处理时的脉冲压缩只取决于回波信号只包含的相位信息, 在此不妨设 $\sigma(r, x) \equiv 1$, 即将目标二维反射特性中每个点的反射强度归一化, 且取 $W_r(r_i) = 1$, 则(4)式可以简化为:

$$s_{ai}(r_i, x) = \sum_{j=-N_r/2}^{N_r/2} [h_1(r_i, x_j)] \quad (5)$$

可见, 在此条件下方位处理过程就是对每个斜面 r_i 的方位响应函数 $h_1(r_i, x)$ 的求和运算. 通过 N_r (场景距离线点数) 次求和运算可得到一条保留了方位信息的距离线 $s_a(r)$, 称之为距离线方位响应函数, 然后将之与距离响应函数 $h_2(r)$ 做卷积运算, 并在时域进行多普勒补偿, 则可得到一条干扰信号。

在以上处理过程中, 方位处理被大大简化, 保留了方位线相位信息(方位多普勒), 但丢失了幅度信息(二维反射特性). 相位信息是方位脉冲压缩所必需的; 幅度信息并不影响方位脉冲压缩的聚焦度, 但幅度信息的丢失也会导致方位模糊, 这是由能量分布均匀化造成的, 而非方位脉压不匹配. 能量分布均匀化对干扰效果也有很大的影响, 为了增加干扰数据在 SAR 成像后的对比度, 需要对干扰信号进行幅度调制, 为此在距离卷积前可将距离线方位响应函数 $s_a(r)$ 与目标二维反射特性 $\sigma(r, x_j)$ 相乘, 以保留一定的幅度信息。

通过以上分析, 可以得到一种快速算法, 该算法的方位处理在时域完成, 距离处理在频域完成, 其流程如

图 3 所示. 比较快速算法和二维卷积算法可见: 快速算法大大简化了方位处理过程, 减小了方位处理计算量, 以及对存储容量的需求; 而两种算法的距离处理过程基本相同, 都是按距离线一一进行的。

表 1 两种算法方位处理计算量比较

算 法	方位处理计算量
二维卷积	$2 \times N_r$ 次 N_{a_fft} 点复数 DFT N_r 次 N_{a_fft} 点复数乘 N_r 次 N_{a_fft} 点复数 IDFT
快速算法	N_r 次 N_L 点复数求和

表 1 给出了两种算法方位处理的计算量统计. 表中 N_r 、 N_a 分别是场景距离线和方位线点数, N_L 是合成孔径脉冲数, N_{a_fft} 是方位 FFT 运算的点数, 由 N_r 、 N_a 共同确定. 表中给出的计算量未考虑构造方位响应函数的计算量. 由表 1 可见, 二维卷积算法方位处理的计算量很大, 和 N_a 、 N_r 及 N_{a_fft} 有关; 快速算法方位处理的计算量很小, 只与 N_r 及 N_L 有关, 而与 N_a 无关。

如果将快速算法用于 SAR 干扰信号产生, 在 SAR 成像模式和参数不变的情况下, 方位处理只需进行一次, 可在很短的时间内完成, 所产生的距离线方位响应函数 $s_a(r)$ 可以重复使用; 而距离处理是流水进行的, 利用现代多信号处理技术(如高速 DSP 处理器或大规模 FPGA), 如果能在 SAR 重复周期(PRT)内能够完成一次距离处理, 则使用快速算法能够连续、实时产生多个孔径的干扰数据。

此外, 由于快速算法不需要存储大量中间数据, 可大大降低对系统存储能力的要求。

5 仿真分析

仿真分析在 Matlab7 环境下进行. 仿真的目的主要是验证算法的有效性和正确性。

仿真使用的 3 种场景如下:

场景 1: SAR 图像, 场景中有若干个强反射区域, 场景大小 400×480 ;

场景 2: 点阵, 密度 4×4 , 点目标灰度值为 10, 背景灰度值为 (0, 1) 区间随机数, 场景大小 400×480 ;

场景 3: 点阵, 密度 1×1 , 点目标灰度值为 1, 场景大小 400×480 。

仿真参数: 带宽 100MHz, 脉宽 $10\mu s$, 重频 200Hz, 平台速度 120m/s, 成像起始斜距 10km, 方位波束宽度 2° . 计算可得: 方位时带积 28.9dB, 距离时带积 30.0dB, 二维时带积 58.9dB。

仿真过程: 分别用二维卷积算法和快速算法生成模拟数据, 用 CS 算法成像并计算二维时带积. 算法中

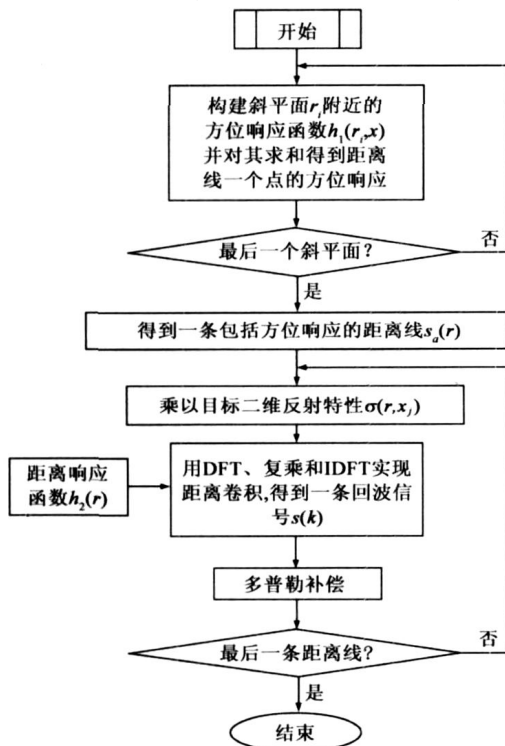


图 3 快速算法流程图

的多普勒补偿是对干扰信号从干扰机到达 SAR 接收机的多普勒历程差异的补偿, 不是本文关注的重点, 故此在仿真时没有考虑。

理论上, 仿真数据成像结果相对原始图像在平均后向散射系数上所获得的增益即为二维时带积。平均后向散射系数定义为图像能量均值的 dB 表示, 即:

$$\bar{\sigma}_o = DB(E_w) \quad (6)$$

方位时带积由方位脉冲压缩获得, 与方位多普勒带宽及合成孔径时间有关; 距离时带积由距离脉冲压缩获得, 和发射脉冲的带宽及脉宽有关。

表 2 平均后向散射系数(dB)和时带积(dB)

项 目	场景 ¹	场景 ²	场景 ³
原始图像散射系数(dB)	36.71	8.17	0.00
二维卷积模拟数据成像结果	散射系数(dB)	60.25	58.07
	时带积(dB)	52.08	58.07
快速算法模拟数据成像结果	散射系数(dB)	60.52	58.12
	时带积(dB)	52.35	58.12

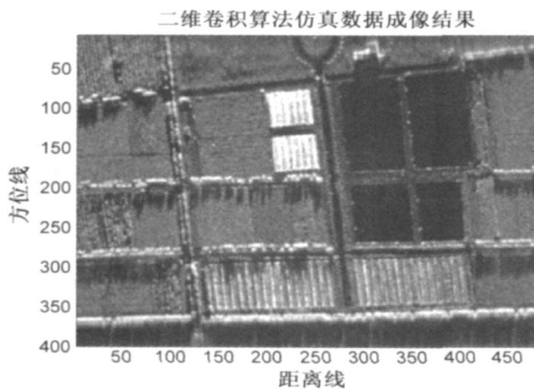


图 4 二维卷积算法仿真数据的成像结果

表 2 给出了平均后向散射系数和时带积的计算结果, 图 4 和图 5 给出了场景 1 的成像结果。可见, 场景不同时两种算法的仿真数据所获得的时带积有一定的差别, 和理论值 58.9dB 相比均有一定的损失; 但对于同一种场景, 两种算法仿真数据所获得的时带积是一致的, 这说明快速算法仿真数据能够保留方位向的全部相位信息。此外, 虽然快速算法仿真数据的成像结果是在方位

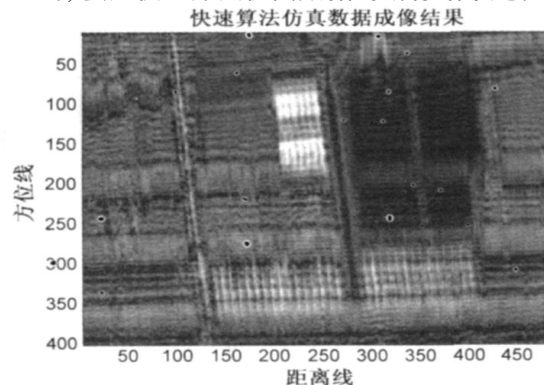


图 5 快速算法仿真数据的成像结果

向是模糊的, 但整个图像的轮廓是可分辨的。仿真结果和理论分析一致, 表明快速算法可以用于产生相干干扰信号。

6 结论

根据本文的理论分析和仿真结果, 可以得出以下结论: (1) 在二维卷积算法基础上通过合理简化得到的快速算法, 大大减小了方位处理的计算量, 可用于全程压制相干干扰信号的连续、实时产生; (2) 仿真结果证明了该算法的正确性, 其模拟数据成像后所能获得的二维时带积和二维卷积算法一致。

参考文献:

- [1] 魏钟铨等. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 142-144.
- [2] 韦立登, 李绍恩, 吴一茂等. SAR 原始回波信号产生算法的性能比较研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 262-265.
- [3] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 78-79.
- [4] 甘荣兵, 王建国. 对 SAR 的几何目标欺骗干扰的快速算法[J]. 现代雷达, 2006, 28(2): 40-42.
- [5] 王盛利, 于立, 倪晋麟等. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究[A]. 电子学报, 2003, 31(12): 1900-1902.
WANG Sheng li, YU Li, NI Jin lin, et al. A study on the active deception jamming to SAR[J]. Acta Electronica, Sinica, 2003, 31(12): 1900-1902. (in Chinese)

作者简介:



张仕山 男, 1974 年出生于安徽舒城, 硕士, 2003 年毕业于中国科技大学, 现任华东电子研究所工程师, 主要从事电子对抗总体技术研究。

E-mail: zhssh333 @ ustc.edu



靳学明 男, 1967 年出生于安徽贵池, 现任华东电子研究所研究员, 主要从事电子对抗总体技术研究。