

冲激信号 SAR 反向投影成像方法 I、Q 实现*

粟毅 梁向农

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘要 本文在分析冲激信号成像特点的基础上, 说明了线阵模型是解释冲激信号 SAR 成像过程的有效方法, 给出了冲激信号 SAR 反向投影 (BP) 方法, 针对系统实现问题, 提出了对 I、Q 两路信号分别积累、求模的 BPIQ 法, 并以计算机仿真及与常规的 BP 作比较, 最后给出了一些有用的结论。

关键词 冲激信号, 合成孔径, 成像, 反向投影

分类号 TN959

Back Projection Imaging I、Q Realization of Impulse Signal SAR

Su Yi Liang Diannong

(Department of Electronic Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract The characteristics of impulse signal synthetic aperture radar (SAR) imaging are analyzed in this paper. It is shown that the linear array model is an efficient interpretation to the azimuth integration of an impulse SAR. Back projection (BP) method can be comprehended easily with a linear array model. With respect to the algorithm realization in a field system, the BPIQ method with back projection to I, Q channels respectively and then evaluating the module of two integration's is presented. Computer simulations show that the imaging results of BPIQ are better than those of the ordinary BP algorithm.

Key words Impulse Signal, Synthetic Aperture, Imaging, Back Projection

可以穿透树簇、地表并能成像的机载雷达一直是民用、军用急需的技术。这一技术的实现包含有两层意思: 1) 树簇及地表穿透; 2) 成像。“穿透”的实现要求雷达工作频率低移, 通常选在 VHF 和 UHF 波段, 最高不超过 L 波段。“穿透”的散射机理就是绕射, 即当波长大于目标尺寸时, 如树干的宽度, 根据 Rayleigh 准则, 散射逐渐减少。雷达距离分辨率与系统带宽有以下关系:

$$\delta_r = \frac{\alpha}{2B} \quad (1)$$

而方位分辨率与波长、孔径尺寸和距离的关系为

$$\delta_a = \frac{\lambda R}{\alpha L_A} \quad (2)$$

(2) 式中 α 是一个与孔径电流分布或加窗函数有关的量。在距离一定的条件下, 要想提高方位分辨力 δ_a , 必需: 1) 提高工作频率; 2) 增加孔径长度 L_A 。考虑到“穿透”的需要, 工作频率不能随意提高, 孔径尺寸也因工作环境限制 (机载) 难以提高。实际应用中, 一般要求距离分辨力与方位分辨力相等或相近, 为达到这一要求只能采用合成孔径技术。

对于战场侦察 SAR, 通过成像实现自动目标识别是所期望的。实现这一功能要求 SAR 系统能够分辨目标 (如飞机、坦克及其它机动车辆) 较强的散射点, 或可将这此目标划分为多个分辨单元, 为此,

* 国家自然科学基金资助项目

1997 年 8 月 25 日收稿

第一作者: 粟毅, 男, 1961 年生, 副教授

一般选择分辨力为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 或更好。

高距离分辨力所需的大带宽 ($B = 150\text{MHz}$)，与“穿透”所需的低工作频段使得系统相对频带 Q 很大。当 $Q = 25\%$ ，称为超宽带系统 (UWB)。UWB 技术结合 SAR 技术使得穿透树簇和地表对目标进行成像并识别目标成为可能。

由于冲激信号 UWB SAR 系统的特殊性，研究这一体制的成像算法是近几年的事，特别是在美国斯坦福国际研究所 (SRI) 于 1992 年研制了第一套机载的实验样机 FOLPEN 后，美国有多家大学、机构开展了冲激 SAR 成像方法及后续处理研究。SRI 最初是将 UWB 信号分成 8 个子带信号，然后对每个子带信号进行相位补偿，通过方位向数据积累成像，再进行子带重组，从而实现 UWB 成像的。这一方面由于子带重组时存在的误差，相位补偿的近似以及计算问题，效果不理想。美国林肯实验室 (LLB) 于 1993 年组织了两次大型的穿透叶簇及地表实验，在对 SRI 的 FOLPEN 和 系统数据进行组处理时，采用了反向投影法 (BP)，处理结果表明这一方法的有效性；美国陆军实验室 (ARL) 在对其地基冲激 SAR 的数据处理时 (1995 年) 亦采用了 BP 法；另有多家机构在处理冲激 SAR 实验数据时，或采用 BP 法，或采用 BP 法的改进算法。

本文旨在对冲激信号 SAR 系统的特点进行分析，说明采用线阵模型解释其成像过程是有效的，在此基础上，给出 SAR BP 法，针对实际系统中的 I、Q 正交零中频接收方式，提出了 BPIQ 法，最后进行了计算机仿真，并给出了有意义的结论。

1 UWB SAR 的线阵模型

在窄带 SAR 系统中，雷达与目标的相对运动产生了一个多普勒历程，不同位置的目标有不同的多普勒历程，因此，成像可以通过对成像区的每一象素建立一个与之相匹配的滤波器来完成，这一过程近似为逆傅氏变换；距离向处理在远场、小积累角条件下可以认为是一与方位向相互独立的，通过脉压提高距离分辨力，其处理也可以用逆傅氏变换实现。

然而，随着相对带宽的增加，尤其是 UWB SAR，2-D IFFT 的成像方法不再是一种有效的方法。因为：1) 多普勒频移为 $2v/\lambda$ ，当信号瞬时频带很宽时， λ 取值范围很大，此时多普勒频移难以观测，此时基于多普勒频移的合成孔径聚焦解释变得模糊不清；2) 对于冲激体制，相干和相位的概念不很明确；3) 在 VHF/UHF 波段的 SAR 系统，波束很宽，如果充分利用波束宽度，系统不再工作于远场，Fresnel 近似不成立。另外，在 UWB SAR 地基实验中^[4]，作用距离一般不大于 500m，即便较小的积累角，也是一个近场问题。所以，根据远场条件导出的傅氏变换孔径函数，需作修正或改进。我们知道，SAR 聚焦过程也可以模型化为具有无数个天线单元的线阵，每个天线单元的输出经数字化、存贮并数字信号处理形成所需的窄波束。利用这一模型很容易描述 UWB 冲激信号的成像过程，也即对成像过程不加带宽和远场限制。

在阵列波束形成理论中，一般采用相位的概念，即所谓“相控阵”，通过调整相位产生所需的波束。在 UWB 系统中，相位与天线模型阵元位置无对应关系。例如：如果 $\lambda_1/\lambda_2 = 2$ ，在设计延迟线时，对频率高端的移相 360° ；而对频率低端仅为 180° 。所以在 UWB SAR 线阵模型中，用于定义波束或解释方位向聚焦过程的理想的参数应为时延。上述 SAR 线阵模型可称之为“时控阵”，而非“相控阵”。利用基于时延的概念，可以导出不受频率及成像区几何形状限制的合成孔径聚焦方法。

2 SAR 反向投影法及实现

BP 方法是 McCorkle^[2] 根据 CT 成像的投影切片理论^[1] 导出的一种冲激信号 SAR 成像算法。在 CT 成像中，通过反向投影重建的图象是二维“衰减图”，测量的投影是射线在成像域衰减的剩余功率。在 SAR 中，要重建的是一个“反射图”，而且 SAR 工作方式为单站系统，“投影”为等距离曲线上目标散射的矢量和。注意到这些差别，可将 CT 中的 BP 原理直接应用于冲激信号 SAR。

对 SAR 应用，其成像区结构见图 1。以 (x, y) 坐标系标记 SAR 系统工作时的地面投影几何位置，设 (x_n, y_n) 代表第 n 个目标位置， u 表示载机发射与接收冲激信号时的位置。 x 称为斜距， y 表示方

位距离，雷达坐标为 $(0, u)$ ，按成像分辨率将成像区分为 N 个分辨单元，雷达到第 n 个目标点的距离为

$$d_{n,u} = \sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2} \quad (3)$$

设 $r(u, t)$ 为雷达在 $(0, u)$ 处的接收回波，则 BP 算法为

$$g_n(t) = \int_n r(u, t + T_{n,u}) \quad t \geq 0 \quad (4)$$

式中 $T_{n,u} = \frac{2d_{n,u}}{c}$ 。 g_n 为位于 (x_n, y_n) 的目标的后向散射强度估计。对成像区的每一个分辨单元计算式 (5)，即得最终的 SAR 图像

$$g(x, y) = \sum_n^N g_n(t) \delta(x - x_n, y - y_n)$$

在 SAR 应用中，不同的距离对应于波前投影的后向散射回波 $r(u, t)$ 的不同时刻，所以从信号处理角度，式 (4) 中进行时延调整 $T_{n,u}$ 就是对回波信号的相参处理，不过这里没有用相位概念，而是利用了时延，故与频率无关。

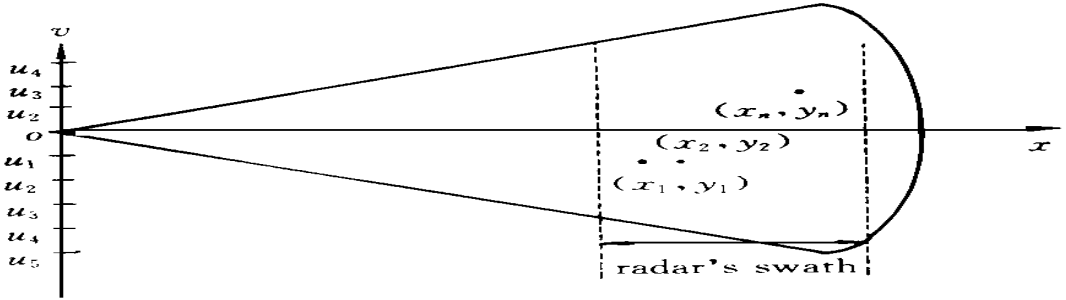


图1 SAR 成像区的几何结构

3 BP 的 IQ 实现

为降低 A/D 速率，系统实现时，接收机采用正交解调工作方式。对回波信号 $r(u, t)$ 做基带正交解调得 I、Q 两路信号 $r_I(u, t), r_Q(u, t) (t \geq 0)$ 。

设 $r(u, t)$ 为低通限带信号，其频谱为：

$$R(\omega) = \begin{cases} R(\omega) & \omega < B/2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

则当 $\omega > B/2$ 时，

$$H[r(u, t) \cos \omega t] = r(u, t) \sin \omega t$$

在满足上述条件下， $r_Q(u, t)$ 是 $r_I(u, t)$ 的 Hilbert 变换，这说明经正交解调后，信号保持原有信息，无混叠发生。对于 UWB 信号，包络及相位没有明确的物理意义。所以 ARL^[4] 以 I、Q 信号包络做积累的方法从理论上讲是不严格的。对于 UWB 信号，可以用信号的模和相角表征，即：

$$\tilde{r}(u, t) = \tilde{r}(u, t) e^{j \arg[\tilde{r}(u, t)]} = r_I(u, t) + jr_Q(u, t) \quad (6)$$

文 [4] 中 ARL 的方法是利用 $\tilde{r}(u, t)$ 做方位向的积累，即：

$$g_n(t) = \int_n \tilde{r}(u, T_{n,u} + t) \quad t \geq 0 \quad (7)$$

没有利用相角 $\arg[r(u, t)]$ 信息，故此，我们提出以下 BP 方位向积累方法，称之为 BPIQ 法。

$$g_{n,I}(t) = \int_u r_I(u, T_{n,u} + t) \quad t \geq 0 \quad (8)$$

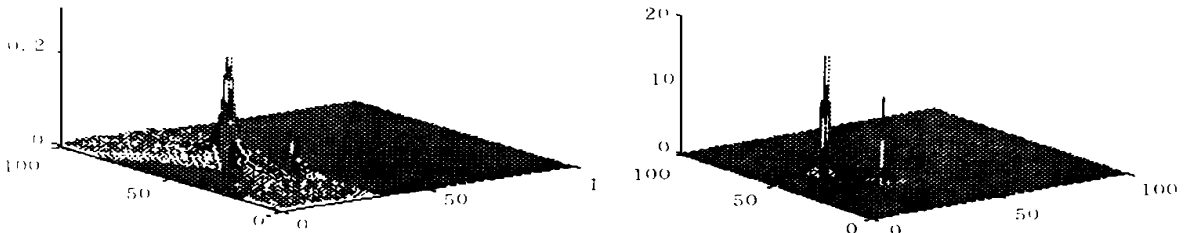
$$g_{n,q}(t) = \int_u r_Q(u, T_{n,u} + t) \quad t > 0 \quad (9)$$

$$g_n(t) = g_{n,I}(t)^2 + g_{n,Q}(t)^2 \quad t > 0 \quad (10)$$

$g_n(t)$ 即为成像后的结果。

4 计算机仿真

我们接近场条件对BP法进行仿真,成像区为 $100\text{m} \times 100\text{m}$,方位向分辨力为 2m ,距离向分辨力为 1m ,孔径距离目标区前缘为 300m ,积累合成孔径长度为 100m ,发射信号为 3ns 脉宽的单周波,成像区内包含三个理想点目标,其中二个在方位向分离一个分辨单元,距离向相同,回波信号按I、Q处理成零中心频率 300MHz 宽带的视频信号,采样率为 450MHz 。



(a)

(b)

图2 BP法成像结果, (a). BP幅度积累 (b). BPIQ算法

5 结论

冲激信号SAR成像可用线性模型较为直观和有效地解释,因为这一模型不受带宽、信号形式、近场条件的限制。BP法是冲激信号SAR成像的有效方法,在具体实现中,从仿真结果图3中可以看出,本文的BPIQ法较文[4]中的方法要好得多。利用BP法成像隐含对成像目标后散射各向同性的假设,这将有利于树干而不利于人造目标成像,一种可能的解决方法就是时—空匹配滤波器方法^[3]。冲激信号SAR系统由于其具有的高分辨力成像能力,运动补偿是非常严峻的,同时也是一个全新的研究课题。如要在实际中得到理想的成像结果,必须很好地解决上述两个问题。

参考文献

- 1 Gabort Herman Image Reconstruction From Projection. Academic Press, 1980
- 2 McCorkle John W. Focusing of Synthetic Aperture Ultra Wideband Data. IEEE International Conference on Systems Engineering, August, 1991
- 3 Chaney D, Willsky A S, Novak L M. Coherent aspect-dependent SAR image formation MIT LLB SPIE 2230 1994
- 4 Ressler M A. and McCorkle J W. Evolution of the Army Research Laboratory Ultra-Wideband Test Bed. Ultra-Wide Band, Short-Pulse Electromagnetics 2 Plenum Press, New York, 1995