

轨道超宽带 SAR 实验技术研究

常文革, 梁甸农, 周智敏

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 超宽带 SAR 地面实验系统具有可控性、重复性以及低造价等特点, 是研究、验证超宽带 SAR 的有效手段。但对于线性调频体制雷达, 由于线性调频信号具有较大的时宽, 导致了较大的单站雷达作用盲区, 虽然采用双站天线可以解决距离盲区问题, 但却不可避免地会受到发射机强耦合信号的影响, 严重妨碍了地面 SAR 实验系统的成像处理。本文提出了采用双站天线实现线性调频信号体制超宽带 SAR 地面实验的新方法, 并对双站 SAR 的成像算法进行了研究。实验结果验证了处理方法的可行性; 同时本文还对轨道实验系统的运动精度进行了分析研究。最后, 对双站 SAR 的局限性和应用前景进行了讨论。

关键词: 超宽带; 线性调频信号; 双站 SAR; 地面实验; 成像算法

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 09-1213-04

Research on Rail-UWB-SAR

CHANG Wen-ge, LIANG Dian-nong, ZHOU Zhi-min

(School of electronic science and engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Rail-UWB-SAR system has such merits as controllable, repeatable, and low-cost, and is an effective means to study UWB SAR. A new experiment method to solve LFM radar range 'dead' area, bistatic SAR, was presented in the paper. The bistatic SAR imaging algorithm was studied. The feasibility of the experiment method was confirmed by experiment results. The accuracy of Rail system was analyzed. Lastly, the disadvantage and its application were discussed.

Key words: UWB; LFM; bistatic SAR; imaging algorithm

1 引言

超宽带雷达是指瞬时相对带宽超过 25% 的雷达系统, 具有极高的距离分辨力。超宽带雷达结合合成孔径技术, 即超宽带合成孔径雷达 (UWB SAR), 是九十年代初新发展起来的雷达探测技术, 可对地表、叶簇等地物覆盖的目标探测并精细成像。在美国, 已发展的超宽带合成孔径雷达系统有: 美国斯坦福研究所的 SRI 冲激信号 UWB SAR, 分辨力 $1\text{m} \times 1\text{m}$; 美国密执安环境研究所 (ERIM) 和美国海军航空武器中心共同发展

的 P3-UWB SAR 系统, 等等。

超宽带 SAR 是一种新的雷达体制, 在系统设计、成像方法、目标检测与识别等许多方面需要进行大量的研究工作, 实验的可控性、可重复性是很必需的。机载实验需要大量的经费支持且可重复性较差, 而地面实验具有可控性、可重复性以及造价低等特点, 非常便于问题的分析研究。超宽带 SAR 地面实验是研究、验证、研制机载超宽带 SAR 的重要环节。美国发展了许多基于轨道的地面实验系统, 典型系统如表 1。

表 1 几种典型的轨道 UWB SAR 实验系统

名称	工作方式	信号形式	定位方式	轨道长度	步进精度	轨道平直度
ARL UWB TESTBED RADAR ^[1]	单站雷达	冲激信号	采用 Geotronics TCS 4000 经纬仪定位	104m	$\pm 2.5\text{mm}$	$\sigma_h: \pm 3\text{mm}; \sigma_v: \pm 6\text{mm}$
ERIM Rail SAR ^[6]	双站雷达	FM-CW 信号形式	位置传感器 + 磁倾计	11m	$< 2.5\text{mm}$	

超宽带雷达发射信号一般有两种信号体制: 冲激信号和调制脉冲信号。由于冲激脉冲极窄, 仅几纳秒, 冲激信号体制超宽带雷达的距离盲区很小, 非常便于地面实验。但由于冲激脉冲的能量难以提高, 加之冲激源的实现难度较大, 限制了冲激体制雷达的实际应用。

调制脉冲信号, 如线性调频信号具有发射能量大、分辨力高等优点, 是雷达系统广泛采用的波形之一。但由于线性调频

脉冲较宽, 线性调频信号体制的雷达系统具有距离盲区, 采用收发共用一个天线的单站雷达, 是无法进行近距离地面实验的, 必须采用收发分离的双站雷达进行地面实验。但双站雷达又存在两个困难: 1、发射机耦合信号的存在使雷达在时域无法直接分离发射机耦合信号和地面目标散射的信号; 2、无双站 SAR 成像算法可资利用。

收稿日期: 2000-08-28; 修回日期: 2001-03-04

2 线性调频体制超宽带 SAR 地面实验

发射机强耦合信号的存在对 SAR 成像带来了困难, SAR 方位成像的原理是利用雷达沿方位向运动时对地面静止目标所形成的回波历史,并基于该回波历史进行数据处理而达到方位向高分辨成像的.如果当地面静止目标的散射回波淹没在强的耦合信号中时,直接提取地面静止目标所形成的回波历史是不可能的.但经分析、实验可发现:尽管发射机耦合信号与目标散射信号两者无法直接在时域进行分离,但该混合波形经脉冲压缩后,耦合信号与目标散射信号两者是可分离的.也就是说在变换域可以去除耦合信号.然后方能进行 SAR 地面成像实验.线性调频体制超宽带 SAR 地面实验的关键便是双站 SAR 成像算法问题.

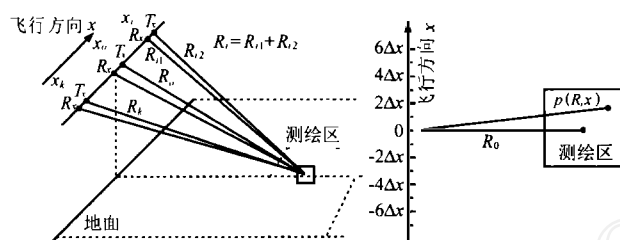


图1 双站 SAR 工作示意图

图2 雷达飞行路径与目标几何关系

超宽带 SAR 较常规窄带 SAR 具有信号相对带宽大,可达 100% 或更大;方位向积累角大,可达 $30^\circ \sim 50^\circ$, 常规窄带 SAR 的成像方法已不再适合超宽带 SAR^[4]. RMA (Range Migration Algorithm) 算法和 BP (Back Projection) 算法是超宽带 SAR 经常采用的成像算法^[5,8]. 对于单站 SAR, 如果雷达载体沿直线以均匀间隔在方位向对测绘区内某单点目标进行探测, 可以计算, 雷达与目标的时延历史为对称的双曲线变化过程, 针对这种时延(相位)历史的变化, RMA 算法和 BP 算法均能很好地进行处理成像.

对于双站 SAR, 工作原理见图 1 所示, T_x 为发射天线, R_x 为接收天线, R 为目标距飞行轨迹的最近距离, x_0 为目标距孔径中心的方位向距离. 雷达距目标的距离(时延)历史方程为:

$$R(x) = (R_1(x) + R_2(x)) = (\sqrt{R^2 + (x - x_0)^2} + \sqrt{R^2 + (x - x_0 + \Delta)^2}) \quad (1)$$

式中 c 为光速, Δ 为收发天线间隔, x 为某时刻方位向采样位置. 式(1)类似于双曲线方程, 但绝非双曲线, 尤其当 R 较小时. 超宽带 SAR 地面实验的成像处理必须考虑到这一点.

RMA 算法的理论基础是地震波迁移技术^[5], 该算法假设发、收天线处于同一位置. 尽管 RMA 算法在实际使用中也存在发、收天线异位问题(由于载体运动所致), 但正如文献^[5]所计算: 由于电磁波的传播速度远大于载体运动速度, 发、收天线异位很小, 在 mm 量级, 可以认为发、收天线处于同一位置. 而超宽带 SAR 地面实验必须采用双站 SAR 工作方式, 双站间隔几米, RMA 算法显然是不合适的. BP 算法是一种时域成像算法^[8,9], 非常适合超宽带(UWB)、超宽带束角(UWA) SAR. 文献^[9]对 BP 算法实现结构进行了改良, 使之运算量为

$N^2 \log(N)$ 量级, 基本达到了实用的程度. BP 算法通过修改可用于双站 SAR, 下面通过方位向脉冲序列相关处理的方法来推导双站 SAR BP 算法的处理步骤.

为分析方便, 假设雷达发射信号为高频正弦波 $s(t)$,

$$s(t) = e^{j\omega_0 t}$$

当载体沿方位向飞行, 雷达接收某点目标散射的回波序列为:

$$s_r(t) = \sigma \cdot s(t - R(x)/c) = \sigma e^{j\omega_0 t} \cdot e^{-j\omega_0 R(x)/c} \quad (2)$$

其中, σ 为与目标的反射强度有关的实数,

$t_d = R(x)/c = (\sqrt{R^2 + (x - x_0)^2} + \sqrt{R^2 + (x - x_0 + \Delta)^2})/c$, 表示回波时延.

式(2)去掉载频后就余下了第二项, 仅与方位向变量 x 有关的信息. 即:

$$s_d(x) = e^{-j\omega_0 t_d} \quad (3)$$

实际上 SAR 是脉冲工作的, 设雷达重复周期为 T_r . 当 SAR 发射脉冲信号时, 载体在匀速前进, 这样雷达发射信号的空间位置就排成间隔为 $\Delta x = v_a T_r$ 的点阵. 如图 2 所示. 用 $i\Delta x$ 代替 $(x - x_0)$, 有:

$$R_i = (R_{i1} + R_{i2}) = (\sqrt{R^2 + (i\Delta x)^2} + \sqrt{R^2 + (i\Delta x + \Delta)^2}),$$

$$i = \Delta, -2, -1, 0, 1, 2, \Delta \quad (4)$$

式(3)中与方位向有关的信号不再是 x 的连续函数, 而成为了与方位向采样点 i 有关的离散形式, 即:

$$s_d(i\Delta x) = e^{-j\omega_0 t_d} = e^{-j(2\pi/\lambda)R_i}$$

$$= e^{-j(2\pi/\lambda)(\sqrt{R^2 + (i\Delta x)^2} + \sqrt{R^2 + (i\Delta x + \Delta)^2})},$$

$$i = -N/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, N/2 \quad (5)$$

对于 SAR, 方位向聚焦就是对序列 $\{s_d(i\Delta x), i = -N/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, N/2\}$ 进行相关处理. 相关处理后, (R, x_1) 处的成像输出为:

$$s_o(x_1) = \sum_{i=-N/2}^{N/2} s_d(i\Delta x) \cdot s_d(i\Delta x - x_1)$$

$$= \sum_{i=-N/2}^{N/2} (e^{-j(2\pi/\lambda)(\sqrt{R^2 + (i\Delta x)^2} + \sqrt{R^2 + (i\Delta x + \Delta)^2})}$$

$$\cdot e^{-j(2\pi/\lambda)(\sqrt{R^2 + (i\Delta x - x_1)^2} + \sqrt{R^2 + (i\Delta x + \Delta - x_1)^2})}) \quad (6)$$

上式由两项组成: 第一项为阵列接收的信号; 第二项进行距离(相位)延迟, 该距离(相位)历史为如式(7)所示的过程. 整个式(6)表示对接收的信号进行延迟修正后累加. 式(6)也可以理解为沿着如式(7)所示的轨迹对接收信号进行累加的过程. 传统的 BP 算法是沿着双曲线轨迹累加的, 对于双站 SAR, BP 算法必须沿着如式(7)所示的轨迹累加, 这就是修正后的 BP 算法. 考虑到 SAR 运动补偿, 双站 SAR 处理过程为:

- (1) 完成距离向脉冲压缩, 形成距离向脉压域数据;
- (2) 对成像点 (R, x_1) , 形成累加轨迹, 累加轨迹为:

$$R(x_1) = \sqrt{R^2 + (i\Delta x - x_1)^2} + \sqrt{R^2 + (i\Delta x + \Delta - x_1)^2},$$

$$i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

沿着该轨迹对接收信号累加.

(3) 对成像区域的每一个成像点依次进行上述计算, 直到结束.

3 轨道超宽带 SAR 实验精度要求

SAR 原理上要求雷达作匀速直线运动,在实验中不可能完全做到这一点.雷达的运动误差会直接影响回波多普勒信号的相位,从而使方位压缩波形畸变,导致 SAR 图象质量下降.在轨道实验中,运动误差主要存在于两个方面:雷达步进间隔的误差以及轨道的平直度.

轨道的平直误差(如轨道弯曲和凹凸不平)致沿雷达视线方向(LOS; Line Of Sight)方向产生相位误差;沿前进方向的运动误差导致 SAR 方位采样间隔不均匀,同时引起 LOS 方向的相位误差.对于轨道 SAR,沿前进方向的误差和沿 LOS 方向的运动误差均可认为是一宽带随机变化过程.该宽带随机变化过程导致 LOS 方向出现随机相位误差,该相位误差附加于方位向多普勒信号,形成方位向随机相位误差.方位向随机相位误差会使 SAR 积分旁瓣比增大,影响图象对比度.积分旁瓣比 ISLR 与随机相位误差的方差 σ_ϕ^2 的关系为:

$$\text{ISLR} = e^{\sigma_\phi^2} - 1 \approx \sigma_\phi^2 \quad (8)$$

一般要求 $\text{ISLR} < -20\text{dB}^{[3]}$, 这就要求随机相位满足

$$\sigma_\phi < 0.1 \text{ (rad)} \quad (9)$$

下面就以此为依据,分析 SAR 对雷达运动和轨道平直度的要求.为分析方便,我们以单站 SAR 进行分析,所得结论可适用于双站 SAR.分析分为两个方面,一是沿运动方向,分析方位采样间隔和精度要求;一是沿 LOS 方向,分析轨道水平和垂直方向误差要求.

3.1 方位采样间隔和精度要求

方位采样间隔的选取取决于 SAR 方位向模糊度. SAR 方位无模糊的条件是方位采样间隔 Δa 的倒数大于方位向空间频率带宽.若天线方位向波束宽度为 θ ,则正侧视 SAR 方位向空间频率范围为:

$$\left(-\frac{2}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \frac{2}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \quad (10)$$

λ 为雷达信号波长.根据式(10),空间频率带宽并不会随天线方位向波束宽度的增加而无限增加,对于轨道超宽带 SAR,即使当天线方位向波束宽度 $\theta = 180^\circ$,那么最大空间频率带宽也为 $4/\lambda$.因此保证方位无模糊的条件是方位采样间隔 Δa 必须满足:

$$\Delta a < \lambda/4 \quad (11)$$

方位采样间隔误差,导致 LOS 方向出现相位误差.设雷达发射位置在 x 处(假设孔径中心位置为 0),雷达至目标的距离为

$$r(x) = \sqrt{R^2 + x^2} \quad (12)$$

式中 R 为雷达航迹距目标的垂直距离.如果在 x 方向有一个小的扰动 Δx ,必然会导致 $r(x)$ 的扰动 Δr ,两者关系为:

$$\Delta r = \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \Delta x = f(x) \cdot \Delta x \quad (13)$$

$f(x)$ 为增函数,因此 Δr 的最大值 Δr_{\max} 出现合成孔径的两端,即在 $x = L/2$ 处,可以计算 Δr_{\max} 与合成孔径长度 L ,进而可以计算 Δr_{\max} 与方位分辨率 ρ_a 的关系为(其中 k_a 为方位向加权因子):

$$\Delta r_{\max} = \frac{k_a \lambda}{4 \rho_a} \Delta x \quad (14)$$

相位误差的最大值

$$\sigma_{\phi_{\max}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{\pi k_a}{\rho_a} \Delta x \quad (15)$$

这样,由式(9)的约束和式(15)就可以求出 Δx ,即方位采样精度要求.由式(15)可以发现雷达步进精度仅与方位分辨率 ρ_a 有关,而与波长、作用距离等因素无关.

3.2 轨道平直度要求

轨道的平直度将引起沿 LOS 方向的误差 Δr . Δr 导致距离向的相位误差,引起方位向成像时散焦,使 SAR 图象质量下降.对于轨道 SAR, Δr 的变化为宽带随机变化过程.

由 Δr 引起的相位误差为

$$\sigma_\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (16)$$

对 Δr 的精度要求可以分解为对轨道水平和垂直误差的要求,即

$$\sigma_H = \Delta r / \cos \phi = \frac{\lambda \cdot \sigma_\phi}{4\pi \cos \phi} \quad (17)$$

$$\sigma_V = \Delta r / \sin \phi = \frac{\lambda \cdot \sigma_\phi}{4\pi \sin \phi} \quad (18)$$

ϕ 为雷达俯视角.这样由式(9)的约束及式(17)、(18)可计算出对轨道水平和垂直方向的误差要求.

综合式(9)的约束和式(11),式(15),以及式(17)、(18),当 $\lambda = 0.6\text{m}$, $\rho_a = 1\text{m}$, $k_a = 1.25$, $\phi = 30^\circ$ 时,可以计算:

SAR 方位向采样间隔应小于 0.15m , 间隔误差应小于 2.5cm ;

轨道水平精度要求为 5.5mm , 轨道垂直精度要求为 9.5mm .

若考虑到实际因素,步进精度要求、轨道平直精度要求还应更高一些.



图3 轨道超宽带 SAR 系统

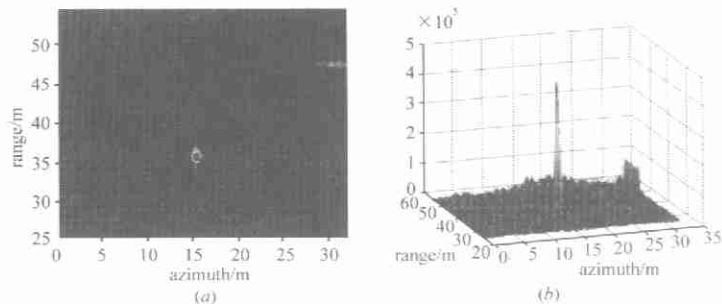


图4 对 2m 三角反射器的 SAR 成像结果

4 线性调频体制超宽带 SAR 地面实验结果

轨道超宽带 SAR 的系统参数为:雷达工作频率在 UHF 波段,带宽 $B = 300\text{MHz}$,作用距离 $R = 40\text{m}$. 轨道超宽带 SAR 系统如图 3 所示,轨道长 54 米,天线间距 6 米. 在实验中以 2GHz 采样率对接收机信号采样,以 10cm 采样间隔进行方位向采样. 图 4 为该系统对 2m 的三角反射器的 SAR 成像结果. 图 4(a)为 SAR 二维灰度成像结果,图 4(b)为 SAR 具有幅度的三维成像结果. 分析图 4(b)的实验结果,可得到超宽带 SAR 分辨力为 $0.68\text{m} \times 0.78\text{m}$. 良好的实验结果表明了双站轨道超宽带 SAR 的可行性.

5 结束语

超宽带 SAR 技术是一种新的雷达探测技术,在军事、民用等方面具有巨大的应用潜力. 超宽带 SAR 地面实验系统具有可控性、重复性以及低造价等特点,是验证、研究超宽带 SAR 的有效手段. 双站雷达是解决线性调频体制 SAR 轨道实验的有效途径. 由于 SAR 分辨力和超宽带雷达的穿透能力是与雷达作用距离无关的,所以利用该实验系统可以开展广泛的研究工作,如研究 UHF 波段的叶簇穿透特性;研究 UHF 波段的地表穿透特性;研究各种目标的超宽带散射特性;建立各种目标的 SAR 信息数据库;研究米波雷达的反隐身机理;作为 SAR 实验平台,为机载 SAR、星载 SAR 研究提供实验数据,等等.

当然,该实验系统存在的缺点也是很明显的:一方面,发射机直接耦合信号的功率通常较目标散射回波功率大几十分贝,为不使接收机饱和,接收机前端必须进行衰减,这样势必降低接收机的灵敏度. 另一方面,尽管收发天线相距较近,但对处于测绘区的目标而言,收发天线仍有一定的夹角. 这样当目标为非理想的各向同性目标(亦即目标具有一定波束角)时,接收天线将无法接收发射信号经目标散射回来的信号,导致方位向分辨力下降. 尽管如此,轨道超宽带 SAR 系统对于研究目标超宽带散射机理、研究机载、星载 SAR 都是非常有意义的.

参考文献:

- [1] Marc Ressler, Lynn Happ, Lam Nguyen, Tuan Ton, Matthew Bennett. The army research laboratory ultra-wide band testbed radars [J]. IEEE International Radar Conference, 1995.
- [2] Lynn Happ, Karl A Kappra, Marc A Ressler, et al. Low-frequency ultra-wideband synthetic aperture radar 1995 boomSAR tests [J]. IEEE 1996 National Radar Conference. Ann Arbor, Michigan, May 1996.

- [3] Walter G Carrara, Ron S Goodman, Ronald M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms [M]. Artech House 1995.
- [4] 常文革. 超宽带合成孔径雷达 [J]. 系统工程与电子技术, 22 (1).
- [5] C Cafforio, C Parti, F Rocca. SAR data focusing using seismic migration techniques [J]. IEEE Trans. AES, March 1991, 27(2).
- [6] Dan R Sheen, Clifford M Strawitch, Terry B Lewis. UHF wideband SAR design and preliminary results [J]. O-7803-1497-2/94 \$ 4.00, 1994 IEEE.
- [7] 王顺华. 机载大处理角 UWB-SAR 成像理论几算法研究 [D]. 工学博士学位论文, 1998, 10.
- [8] John W McCorkle. Focusing of synthetic aperture ultra wideband data [J]. CH3051-0/91/0000-0001, 1991 IEEE.
- [9] John McCorkle, Martin Rolheart. An order $N^2 \log(N)$ backprojector algorithm for focusing wide-angle wide-bandwidth arbitrary-motion synthetic aperture radar [J]. SPIE 1996, 2747: 25 - 36.

作者简介:



常文革 男, 1965 年出生于陕西岐山. 现为国防科技大学电子科学与工程学院副教授. 主要从事 SAR 信号处理, 自适应信号处理等信号与信息处理领域的研究工作.



梁旬农 男, 1936 年出生于湖南涟源. 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 中国电子学会会士. 主要从事超宽带 SAR、自适应信号处理等信号与信息处理领域的研究工作.



周智敏 男, 1957 年出生于山东潍坊. 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授. 电子学会高级会员, 主要从事超宽带 SAR、高速实时信号处理等信号与信息处理领域的研究工作.