

有源转发器延时对 SAR 定标测量的影响

耿波 洪峻

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 该文研究了有源转发器延时对距离向压缩信号、方位向压缩信号幅度和相位的影响;通过数据仿真,分析和讨论了不同分辨率、不同时延长度的情况下,有源转发器延时对点目标成像位置、主瓣及旁瓣的影响,并给出有源转发器延时设置时需要考虑的因素。

关键词 SAR 定标, 有源转发器, 延时, 点目标

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)12-2240-04

Effect on SAR Calibration from Transponder Time-Delay

Geng Bo Hong Jun

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The effect of transponder time-delay on amplitude and phase of both range-compressed and azimuth-compressed signal are researched. Through simulation, the impact of transponder time-delay on imaging location, main-lobe, side-lobe of point target pulse response are analyzed and discussed under different resolution, different length of time-delay. Besides, the factors which need to be taken into consideration during time-delay setting are presented.

Key words SAR calibration, Transponder, Time-delay, Point target

1 引言

在星载 SAR 的定标中,对已知雷达截面积(RCS)的地面标准反射器进行成像,即可通过分析图像中的点目标能量响应进行定标常数测量。定标常数测量的精度主要取决于反射器的雷达截面积和背景区域的后向散射系数特性。雷达截面积越高,背景区域后向散射系数越低,定标测量精度也就越高。

角反射器由于其 RCS 值一般较小往往不能满足要求,如果使用有源转发器,将脉冲信号放大后再转发,就能模拟具有较高雷达截面积值的点目标^[1]。定标测量要求背景区域具有均匀的后向散射系数特性,不受周围人造目标,如建筑物,高速公路,汽车等多路径噪声影响,但是找到这样一个理想的背景区域往往比较困难^[2]。而有源转发器能够采用某种方法通过改变脉冲的相位使点目标成像位置偏移一定的距离,使放置于非理想背景区域的定标器成像于理想背景区域,比如水面、阴影处等,从而降低背景、多路径干扰等噪声。

然而,有源定标器在提高定标常数测量精度的同时,根据成像相关处理的特点,也可能会引入误差。在 Masanobu Shimada 的文章中介绍了可调频有源定标器对定标测量的影响^[2]。本文则对可延时有源定标器对定标测量的影响进行分析和探讨。首先,详细推导了延时情况下距离向压缩信号和方位向压缩信号,然后通过对仿真结果的分析讨论了有源转发器延时给点目标成像位置、幅度、峰值旁瓣比带来的误差,

最后进行了总结讨论,给出有源转发器延时设置时需要考虑的因素。

2 理论推导

在图 1 星载 SAR 成像几何关系中, P 为有源转发器的位置, β 为天线波束的方位角宽度, T_s 为一个合成孔径时间, V_s 为卫星飞行速度, s_1 为波束照射到 P 点的第一个脉冲时刻, s_n 为波束照射到 P 点的最后一个脉冲时刻。

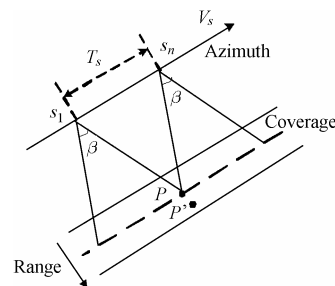


图 1 星载 SAR 与有源转发器几何关系

Fig.1 Geometrical relation of spaceborne SAR and transponder

2.1 接收信号

设雷达发射信号线性调频脉冲信号, τ 为发射脉冲时宽, f_c 为发射信号中心频率, k 为发射信号的线性调频率,其形式为

$$S(t) = \exp[j2\pi(f_c t + kt^2/2)], \quad |t| \leq \tau/2 \quad (1)$$

若有源转发器的等效雷达截面积为 σ , 则信号经地面有源转发器延时 t_0 、混频、放大后,在 SAR 接收机输出端的信号为

$$S_r(s, t) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} \exp(-j2\pi f_c t_0) \cdot \exp[-j4\pi R_{(s)}/\lambda] \exp\{j\pi k[t - t_0 - 2R_{(s)}/c]^2\}, \quad |t - t_0 - 2R_{(s)}/c| \leq \tau/2 \quad (2)$$

其中 λ 为信号波长, s 代表方位向时间(慢变化时间), t 代表距离向时间(快变化时间), $R_{(s)}$ 是雷达到转发器的斜距, c 为电磁波传播速度, $K_{(R)}$ 为发射功率、接收机增益, 距离天线方向图等有关的一个系数^[3]。发射脉冲照射到有源转发器后, 其回波脉冲应落在回波时间窗内, 若回波脉冲只有部分落入回波时间窗内或全部落到回波时间窗外, 会导致回波信号能量的损失。一般来说, 回波时间窗设计为信号时宽的十几倍, 因此较容易满足此条件。

在距离迁移影响可以忽略的前提下, 下面采用 Range-Doppler 成像相关处理算法对定标器延时对点目标响应的影响进行讨论。

2.2 距离向压缩

由式(2)推导出点目标回波的频域表达式为

$$S_r(s, f) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} \exp(-j2\pi f_c t_0) \cdot \exp[-j4\pi R_{(s)}/\lambda] |k|^{-1/2} \exp[j(\pi/4)\text{sgn}(k)] \cdot \exp(-j\pi f^2/k) \exp[-j2\pi f(t_0 + 2R_{(s)}/c)] \quad (3)$$

其中 $|f| \leq B_R/2$, $B_R = k|\tau|$ 为发射线性调频脉冲信号带宽。以发射信号的幅度归一化的共轭函数作为距离向的匹配滤波器, 得到距离压缩后的信号为

$$G(s, f) = S_r(s, f) H_r(f) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} |k|^{-1/2} \exp(-j2\pi f_c t_0) \exp[-j4\pi R_{(s)}/\lambda] \cdot \exp\{-j2\pi f[t_0 + 2R_{(s)}/c]\} \quad (4)$$

时域形式为

$$G(s, t) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} |k|^{-1/2} B_R \exp(-j2\pi f_c t_0) \cdot \exp(-j4\pi R_{(s)}/\lambda) \text{sinc}\{\pi B_R [t - t_0 - 2R_{(s)}/c]\} \quad (5)$$

由上式可知, 在时间 $t = t_m = t_0 + 2R_{(s)}/c$ 处, 距离向压缩脉冲达到最大值, 可见, 有源转发器延时改变了接收信号的一次相位, 使点目标距离向位置偏移, 偏移量的大小与延时长度 t_0 成正比。

2.3 方位向压缩^[4, 5]

回波信号经过距离向压缩后, 忽略压缩脉冲旁瓣的影响, 方位向上可看作是慢时间 s 的函数 $G(s)$, 对其进行方位压缩。若 f_{Dc} 为多普勒中心频率, $f_R = -2V_s^2/\lambda R_c$ 为多普勒调频率, 则

$$G(s) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} |k|^{-1/2} B_R \exp(-j2\pi f_c t_0) \exp(-j4\pi R_c/\lambda) \cdot \exp\{j2\pi [f_{Dc}(s - s_c) + f_R(s - s_c)^2/2]\} \quad (6)$$

其中 $s_1 \leq s \leq s_n$, $T_s = s_n - s_1$ 是一个合成孔径时间。

若多普勒中心频率 f_{Dc} 估计准确, 则经过杂波锁定后

$$G(s) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} |k|^{-1/2} B_R \exp(-j2\pi f_c t_0) \cdot \exp(-j4\pi R_c/\lambda) \exp[j\pi f_R (s - s_c)^2] \quad (7)$$

其频域形式为

$$G(f) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} |k|^{-1/2} B_R \exp(-j2\pi f_c t_0) \cdot \exp(-j4\pi R_c/\lambda) |f_R|^{-1/2} \exp[j(\pi/4)\text{sgn}(f_R)] \cdot \exp(-j\pi f^2/f_R) \exp(-j2\pi f s_c) \quad (8)$$

其中 $f \leq B_D/2$, B_D 为多普勒带宽。

由于回波信号在距离向的位置偏移, 在进行方位向压缩时, 方位向匹配滤波器的参考函数采用的是偏移后位置 P' 处的方位参考函数:

$$H_a(f) = \exp[-j(\pi/4)\text{sgn}(f_R')] \exp(j\pi f^2/f_R')$$

其中 $f_R' = -2V_s^2/\lambda R_c'$, $R_c' = CP'$ 。经过方位向压缩后,

$$\varepsilon(f) = G(f) H_a(f) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} |k|^{-1/2} |f_R|^{-1/2} B_R \cdot \exp(-j2\pi f_c t_0) \exp(-j4\pi R_c/\lambda) \cdot \exp(-j\pi f^2/\Delta k) \exp(-j2\pi f s_c) \quad (9)$$

其中 $\Delta k = \frac{f_R' f_R}{f_R' - f_R} = \frac{4V_s^2}{ct_0}$, 则上式时域形式为

$$\varepsilon(s) = \sqrt{\sigma} K_{(R)} |k|^{-1/2} |f_R|^{-1/2} B_R \cdot \exp(-j2\pi f_c t_0) \exp(-j4\pi R_c/\lambda) \cdot | \frac{4V_s^2}{ct_0} |^{1/2} \exp[-j(\pi/4)] \exp(j\pi \Delta k s^2) \otimes B_D \text{sinc}[\pi B_D (s - s_c)] \quad (10)$$

由上式可见, 脉冲延时会给点目标响应带来误差, 时延长度与点目标响应幅度成反比。以下内容通过仿真经转发器延时的点目标响应, 分别对点目标成像位置、点目标主瓣峰值、点目标峰值旁瓣比的影响进行分析。

3 有源转发器延时对点目标响应的影响

以下分析使用的系统仿真参数如下:

发射脉冲中心频率:	$f_c = 0.24 \text{ m};$
SAR 等效地面飞行速度:	$V_s = 6.870099 \text{ km/s};$
脉冲重复频率:	$\text{PRF} = 2000 \text{ Hz};$
卫星与转发器的斜距:	$R_c = 766807.035437 \text{ m};$
方位分辨率:	$\delta_R = 5\text{m}, 20\text{m}, 30\text{m}.$

3.1 对点目标位置的影响

点目标回波的一次相位决定了点目标的成像位置, 由式(4)和式(9)可见, 有源转发器延时改变了快时间信号的一次相位, 因此延时造成点目标响应在距离向上的位置偏移。表 1 和表 2 为分辨率为 5m 和 20m 的情况下不同延时长度造成的位置偏移结果。

3.2 对点目标主瓣峰值的影响

由式(7)可知, 在距离迁移可以忽略的情况下, 有源转发器延时对距离压缩信号的幅度及压缩脉冲形状没有影响, 然而, 距离向上的位置偏移造成了信号调频斜率与匹配滤波器不匹配, 等效于引入方位向二次相位误差, 将会造成主瓣峰值的变化^[4]。

当分辨率为 5m, 在不同时延 t_0 情况下点目标响应如图 2 所示。

表1 分辨率为5m, 有源转发器延时造成的点目标距离向位置偏移
Tab.1 When resolution is 5m, the range position deviation of point target due to transponder time-delay

	延时 2 μs	延时 4 μs	延时 6 μs
像素偏移(像素数)	133.34	266.68	400.02
实际距离偏移(m)	543.97	1087.9	1631.9

表2 分辨率为20m, 有源转发器延时造成的点目标距离向位置偏移
Tab.2 When resolution is 20m, the range position deviation of point target due to transponder time-delay

	延时 2 μs	延时 4 μs	延时 6 μs
像素偏移(像素数)	66	132	198
实际距离偏移(m)	543.97	1087.9	1631.9

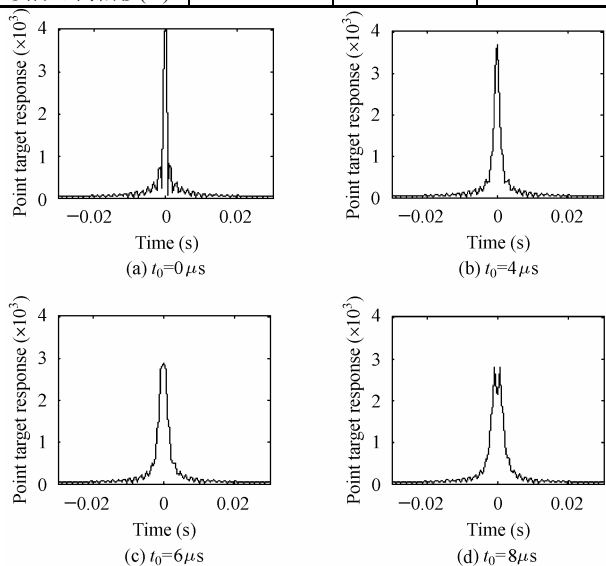


图2 分辨率5m, 延时 t_0 时的点目标响应

Fig.2 Point target response when time-delay is t_0 and resolution is 5m

由图2可见, 随着延时的增长, 点目标的峰值与旁瓣都发生了较大的变化, 当延时 8 μs 时, 点目标响应甚至开始出现双峰现象, 给点目标图像带来严重误差。

当分辨率为 20m, 在不同延时 t_0 情况下点目标响应如图3所示。

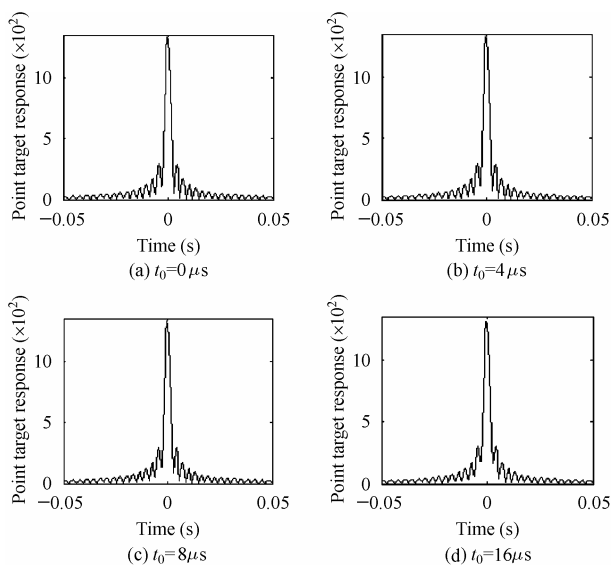


图3 分辨率20m, 延时 t_0 时的点目标响应

Fig.3 Point target response when time-delay is t_0 and resolution is 20m

由图3可见, 随着延时的增长, 点目标峰值没有发生较大的变化。由此可见, 分辨率较低时, 有源转发器延时对点目标响应带来的误差相对来说不大。

不同方位分辨率时, 有源转发器延时带给点目标峰值的误差变化曲线如图4所示。

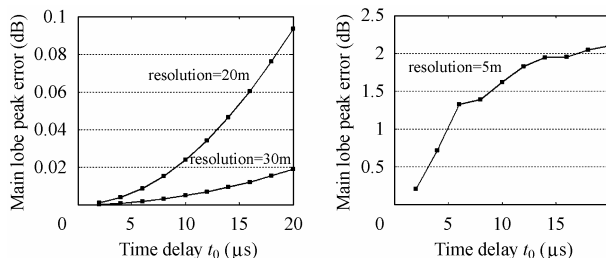


图4 有源转发器延时引起的点目标主瓣峰值误差曲线

Fig.4 Main lobe peak error of point target due to transponder time-delay t_0

可见, 延时越长, 造成点目标主瓣峰值的误差越大, 与前面的理论推导结果一致。此外, 分辨率越小, 延时带给点目标主瓣峰值的误差越大, 这是由于在卫星飞行速度和脉冲重复频率一定的情况下, 分辨率小意味着合成孔径时间较长, 那么点目标回波累积的误差也就相应较大。

3.3 转发器延时对图像中点目标旁瓣的影响

图5是分辨率为5m和20m时, 不同延时带给峰值旁瓣比(PSLR)的误差曲线图。

可见, 当分辨率为5m时, 延时对峰值旁瓣比的影响没有特定规律, 而且波动较大。造成这种情况的主要原因是, 长合成孔径时间给图像带来的累积误差很大, 导致点目标响应出现多个峰值, 计算峰值旁瓣比已失去意义。

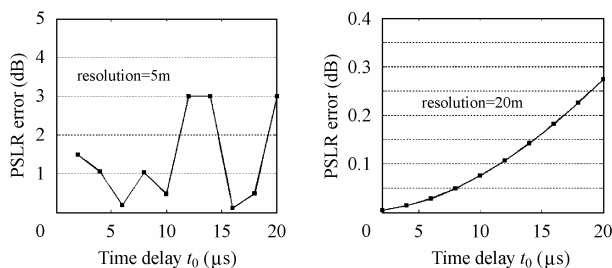


图5 有源转发器延时 t_0 对峰值旁瓣比的影响

Fig.5 PSLR error of point target due to transponder time-delay t_0

4 结束语

通过以上的仿真实验结果, 可以得到如下结论:

- (1) 有源转发器时延长度设置不当可能会造成定标测量误差, 比如点目标能量提取, 定标常数测量、点目标质量评估结果等的误差。若使用有源转发器延时功能, 进行定标数据处理之前可以先对点目标图像做相应的校正;
- (2) 有源转发器对脉冲的延时会造成点目标在距离向位置的滞后偏移;
- (3) 脉冲延时会引起主瓣峰值的下降, 并随着延时的增长而增加; 在相同时延长度下, 分辨率越高, 主瓣峰值误差

越大;

(4) 高分辨率 SAR 的情况下, 脉冲延时造成 PSLR 误差急剧增大, 且没有规律, 具体的 SAR 系统需要具体分析; 在分辨率相对低一些的情况下, PSLR 误差随着延时长度的增加而增大。

因此, 在使用可延时有源转发器时, 需要综合考虑它对位置, 主瓣峰值、旁瓣的影响, 这样才能充分利用有源转发器延时给定标测量带来的优越性。

参 考 文 献

- [1] Freeman A. SAR calibration: An overview. *IEEE Trans. on Geosci Remote Sensing* [J], 1992, 30(6): 1107-1121.
- [2] Masanobu Shimada, Hiromi Oaku, Masao Nakai. SAR

calibration using frequency tunable active radar calibrators [J]. *IEEE Trans. on Geosci Remote Sensing*, 1999, 37(1): 564-573.

- [3] Curlander J C, McDonough R N. *Synthetic Aperture RADAR: System and Signal Processing*[M]. New York: wiley-interscience publication, 1991: 322-327.
- [4] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001: 40-46.
- [5] 张澄波. 综合孔径雷达: 原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 第 4 章.

耿 波: 男, 1979 年生, 硕士生, 专业方向为信号与信息处理.

洪 峻: 男, 1960 年生, 研究员, 主要从事雷达微波遥感信息提取及应用、SAR 定标技术的研究.