

高分辨率条件下延时有源定标器 SAR 成像质量分析与校正

李亮^{*①②③} 洪峻^{①②} 明峰^{①②} 胡继伟^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像科学与技术国家重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 延时有源定标器是合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像质量评估和辐射定标的关键设备,有源定标器延时技术的采用可以降低本地杂波的影响,提高测量精度。但其点目标成像质量不可避免地会受到延时的影响,尤其在高分辨率条件下更为严重。该文建立了高分辨率条件下延时有源定标器点目标成像质量影响分析模型,定量地分析了不同延时有源定标器点目标响应峰值功率、主瓣 3 dB 宽度、峰值旁瓣比和积分旁瓣比的影响程度,通过研究提出了一种延时影响的校正方法,仿真实验验证了该方法的正确性。

关键词: SAR 定标; 有源定标器; 高分辨率; 延时

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0148-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00494

Analysis and Correction of Time Delay Active Radar Calibrator Imaging for High-resolution SAR

Li Liang^{①②③} Hong Jun^{①②} Ming Feng^{①②} Hu Ji-wei^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Sciences and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Time delay Active Radar Calibrator (ARC) is the crucial equipment for image quality evaluation and radiation calibration of Synthetic Aperture Radar (SAR). The technique of time delay in ARC will reduce the influence of local noise and improve the measure precision. However, the image quality of time delay ARC will be influenced inevitably, especially for high-resolution SAR. In this paper, the analysis model for image quality influence of ARC induced by time delay for high-resolution SAR is established. The effects induced by different time delay, including peak power, 3 dB width of main lobe, Peak Side Lobe Ratio (PSLR) and Integrated Side Lobe Ratio (ISLR) are analyzed quantitatively. A correction method of time delay is proposed, and the validity of the method is proved through simulation.

Key words: SAR calibration; Active Radar Calibrator (ARC); High resolution; Time-delayed

1 引言

有源定标器是合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像质量评估和辐射定标的关键设备。SAR图像质量评估和辐射定标均需要地面点目标来完成,而有源定标器可以通过转发SAR信号来模拟雷达截面积精确已知的地面点目标,图像质量评估常常要分析点目标响应的峰值旁瓣比(PSLR)、积分旁瓣比(ISLR)和主瓣3 dB宽度等特性,而辐射定标要提取点目标响应能量来实现定标常数的测量,因此点目标特性的好坏直接影响SAR

图像质量评估和辐射定标的测量精度^[1-4]。延时有源定标器通过可控延时将其成像点在距离向移动一定的距离,使其实际成像点位于背景杂波较低的位置,降低本地杂波和设备自身干扰的影响,提高图像信杂比,以呈现出较好的点目标特性,提高SAR图像质量评估和辐射定标的测量精度^[5-7]。

然而,有源定标器采用延时技术在降低本地杂波影响、提高测量精度的同时,不可避免地会对其点目标成像质量带来一定的影响,在高分辨率条件下,这种影响尤为严重。文献[8]建立了低分辨率条件下有源定标器延时对定标测量影响的误差分析模型,分析了不同延时有源定标器对L波段低分辨率SAR定标测量的影响,但对于高分辨SAR而言,成像过程中距离

2011-05-25 收到, 2011-08-24 改回

国家 863 计划项目(2008AA12120301)资助课题

*通信作者: 李亮 liliang282@163.com

徙动等因素不可忽略,该模型不再适用。本文针对高分辨率SAR技术特点,考虑距离徙动和延时等因素,建立了高分辨条件下延时有源定标器点目标成像影响分析模型,通过该模型定量地分析了不同延时有源定标器点目标响应峰值功率、主瓣3 dB宽度、峰值旁瓣比和积分旁瓣比的影响程度,并提出了一种延时影响的校正方法,给出了校正前后的延时有源定标器点目标特性仿真结果,结果表明通过校正可以改善延时有源定标器点目标图像质量,验证了校正方法的正确性。

2 延时有源定标器及其工作原理

延时有源定标器主要包括接收模块、光纤延时模块和发射模块,如图1所示。接收模块通过对接收天线接收到的雷达信号进行低噪声放大等处理,光纤延时模块主要实现接收信号的可控延时,经过延时的信号通过发射模块进一步放大后经发射天线转发给雷达,通过对SAR信号的接收、延时和转发来模拟地面点目标回波。通过对雷达接收到的有源定标器转发信号进行成像处理和分析,可以得到有源定标器点目标特性相关数据,用于对SAR进行点目标图像质量评估和辐射定标。

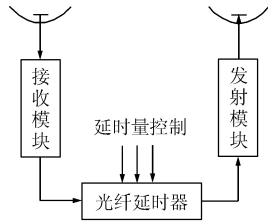


图1 延时有源定标器原理框图

延时有源定标器通过光纤延时模块将其实际成像点沿距离向移动一定的距离,从而使有源定标器转发信号与本地杂波和设备自身回波分离。若 s_{ARC} 为有源定标器回波信号, s_1 为有源定标器本地杂波, s_2 为有源定标器设备自身的回波信号,则SAR接收到的未经延时的有源定标器回波信号 s_r 为

$$s_r = s_{ARC} + s_1 + s_2 \quad (1)$$

经过一定延时,有源定标器实际成像点移到背景杂波较低的位置,设此时SAR接收到的背景杂波为 s'_1 ,则SAR接收到的延时有源定标器的回波信号 s'_r 为

$$s'_r = s_{ARC} + s'_1 \quad (2)$$

通过设置延时量,可以使有源定标器实际成像点位置移到背景杂波较低的位置,比如水面、阴影处等,即 $s'_1 \ll s_1$ 。从式(1)和式(2)可以看出,通过延

时,SAR接收到的有源定标器回波信号不仅克服了有源定标器自身回波的干扰,背景杂波也大大减小,提高了有源定标器转发信号的信杂比,减小了测量误差。

3 延时影响分析模型

3.1 有源定标器回波信号

设雷达发射线性调频脉冲信号, τ 为发射脉冲宽度, f_c 为发射信号中心频率, k_r 为发射信号线性调频率,其形式为^[9,10]

$$s(t, t_m) = a_r(t) \exp \left[j2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} k_r t^2 \right) \right] \quad (3)$$

其中 $a_r(\bullet)$ 为雷达线性调频信号的窗函数, t 为快时间,即距离向时间, m 为整数, T 为脉冲重复周期, $t_m = mT$ 为慢时间,即方位向时间。

SAR接收到的有源定标器转发信号为

$$s(t, t_m) = \sqrt{\sigma} A a_r(t - t_0 - 2R_{t_m}/c) e^{-j2\pi f_c t_0} \cdot e^{-j4\pi R_{t_m}/\lambda} e^{j\pi k_r (t - t_0 - 2R_{t_m}/c)^2} \quad (4)$$

其中 A 是一个与发射功率、接收机增益以及距离向天线方向图有关的系数, σ 为有源定标器雷达截面积, t_0 为有源定标器延时量, R_{t_m} 是雷达到有源定标器的距离。

3.2 距离徙动方程

距离徙动对合成孔径雷达成像是重要的问题,对于正侧视情况,距离徙动 R_q 可以由式(5)近似表示^[10]。

$$R_q \approx \frac{\lambda^2 R_B}{32\rho_a^2} \quad (5)$$

其中 R_B 为目标到雷达的最近距离, ρ_a 为方位向分辨率, λ 为雷达波长,从式(5)可以看出,距离徙动与方位向分辨率密切相关。本文主要研究高分辨率条件下延时有源定标器SAR成像质量分析,因此,对延时有源定标器进行成像时,距离徙动不可忽略,必须进行校正,后面延时有源定标器点目标特性分析模型也是基于距离徙动不可忽略的情况下进行的。

3.3 延时有源定标器脉冲压缩^[10]

对延时有源定标器回波信号式(4)做2维傅里叶变换,将回波数据从 (t, t_m) 域变换到 (f_r, f_a) 域得

$$S(f_r, f_a) = A' a_r \left(-\frac{f_r}{k_{re}(f_a, R_B)} \right) \exp \left[-j \frac{2\pi}{V} R_B \sqrt{f_{aM}^2 - f_a^2} \right] \cdot \exp \left[-j\pi \frac{f_r^2}{k_{re}(f_a, R_B)} \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} R_B [1 + (f_a/f_{aM})^2] f_r \right\} \exp(-j2\pi t_0 f_r) \quad (6)$$

其中 $1/k_{re}(f_a, R_B) = 1/k_r - (R_B + ct_0/2) \frac{2\lambda \sin^2 \theta}{c^2 \cos^3 \theta}$, $f_{aM} = 2V/\lambda$ 为最大多普勒频率, θ 为斜视角, A' 是一个与有源定标器延时时间 t_0 等相关的系数。

脉冲压缩在2维可分离的情况下, 利用频率匹配滤波器很容易实现, 但是, 从式(6)可以看出, 该信号2维不可分离, 在进行脉冲压缩之前, 必须设法解除2维之间的耦合, 也即进行距离徙动的校正。

距离徙动的校正函数 H_1 为

$$H_1(f_r, f_a) = \exp\left[j \frac{2\pi R_B}{c} (f_a / f_{aM})^2 f_r\right] \quad (7)$$

在频域中对接收回波信号进行距离徙动校正后即可实现2维信号去耦, 可以分别进行距离向脉冲压缩和方位向脉冲压缩。

距离脉压函数 H_2 为

$$H_2(f_r, f_a) = \exp\left[j\pi \frac{f_r^2}{k_{re}(f_a, R_B)}\right] \quad (8)$$

利用式(8)对去耦后的2维信号进行距离脉压后, 经过逆傅里叶变换可以实现 $f_r \rightarrow t$ 的转换。

对距离向实现成像的数据乘以方位向脉压函数 H_3

$$H_3(t, f_a) = \exp\left[j \frac{2\pi}{V} R_B \sqrt{f_{aM}^2 - f_a^2}\right] \quad (9)$$

利用 H_3 对距离压缩后的信号进行方位向压缩后, 通过逆傅里叶即可实现信号从 $f_a \rightarrow t_m$ 域的转换, 最终信号为 (t, t_m) 域信号 $s'(t, t_m)$, 即最后的点目标成像结果。

$$s'(t, t_m) = A'' \cdot \text{IFFT}_{f_a} \{ \text{IFFT}_{f_r} [S(f_r, f_a)] \cdot H_1(f_r, f_a) H_2(f_r, f_a) H_3(t_r, f_a) \} \quad (10)$$

其中 $A'' = A_1 \exp(-j2\pi f_c t_0) 2V / \sqrt{ct_0}$ (A_1 是一个幅度系数), 为2维压缩后点目标信号的幅度, B_r 为线性调频信号带宽, B_a 为多普勒带宽。由式(10)可以看到, 压缩后的信号幅度与有源定标器延时量 t_0 有关, 由于 k_{re} 是一个与有源定标器延时有关的量, 脉冲压缩结果也会由于延时的引入而产生误差。式(10)是一个复杂的运算过程, 下面通过仿真分析高分辨率条件下延时对有源定标器成像质量的影响。

4 有源定标器SAR成像质量分析

延时有源定标器用于高分辨率SAR辐射定标时, 通过对有源定标器SAR点目标图像质量分析计算定标常数以及进行SAR图像质量评估, 有源定标器点目标成像质量的好坏直接影响辐射定标精度以及SAR图像质量评估效果, 有源定标器成像质量分析主要包括其点目标响应的峰值功率、主瓣3 dB宽度、峰值旁瓣比和积分旁瓣比指标分析。为了验证延时对有源定标器SAR点目标成像质量的影响, 本

文针对高分辨率SAR进行了仿真计算, 仿真参数如表1, 为了比较高分辨率条件下延时对有源定标器SAR成像质量的影响, 本文仿真时将分辨率扩大到5 m的情况。

表1 仿真参数

参数	数值
信号中心频率 f_c	9.6 GHz
脉冲信号宽度 τ	30 μ s
卫星飞行速度 V	7000 m/s
SAR对有源定标器的视角 θ_0	$\pi/6$
卫星与有源定标器的斜距 R_B	742260 m
方位分辨率 ρ_a	0.5 m, 1 m, 5 m

4.1 延时影响原因分析

延时有源定标器距离压缩信号时域形式为

$$s(t_m, t) = A''' \text{sinc}[\pi B_r (t - t_0 - 2R_{t_m} / c)] \cdot \exp(-j4\pi R_{t_m} / \lambda) \exp(-j2\pi f_c t_0) \quad (11)$$

其中 A''' 是一个与幅度有关的系数, 分析点目标特性时可以不予考虑, B_r 为线性调频信号带宽。

从式(11)可以看出, 有源定标器延时对距离压缩信号的影响只是产生距离向位移, 不会影响其压缩脉冲的形状, 然而, 距离向上的位置偏移会造成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, 将会造成主瓣形状的变化, 进而导致主瓣峰值功率、3 dB宽度、峰值旁瓣比和积分旁瓣比的变化, 随着分辨率的提高, 合成孔径时间变长, 累积误差增加, 延时带来的影响越大。

4.2 延时对点目标峰值功率的影响

根据理论推导, 延时会带来有源定标器点目标响应峰值功率的下降, 特别是对于高分辨率SAR, 甚至会出现双峰现象, 图2给出了不同分辨率情况下, 不同延时带来的峰值功率的影响。

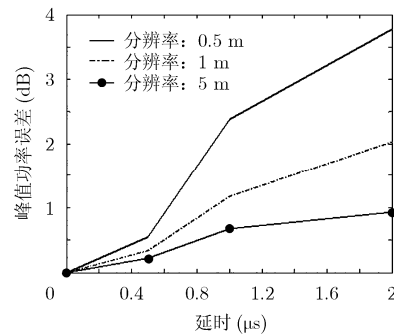


图2 延时带来的点目标响应峰值功率误差

图2给出了SAR分辨率分别为0.5 m, 1 m, 5 m情况下, 不同延时带来的点目标响应峰值功率影响, 从上图可以得出以下结论:

(1)相同延时情况下, 分辨率越高, 有源定标器延时带来的峰值功率影响越大;

(2)相同分辨率情况下, 有源定标器延时越大, 延时带来的峰值功率影响越大。

从图2可以看出, 对于分辨率为1 m的SAR而言, 有源定标器延时2 μs 带来峰值功率误差将近2 dB, 对于更高分辨率的SAR而言, 峰值功率误差更大, 因此, 利用延时有源定标器进行高分辨率SAR定标时, 必须考虑延时量的设置以及延时带来的点目标信杂比下降的影响。

4.3 延时有源定标器主瓣3 dB宽度的影响

有源定标器点目标响应主瓣3 dB宽度是进行SAR点目标图像质量评估的主要指标之一, 主瓣3 dB宽度误差直接影响到SAR点目标图像质量评估性能。表2给出了不同分辨率情况下延时有源定标器点目标响应主瓣3 dB宽度的影响, 从表中可以看出, 对于0.5 m分辨率SAR, 有源定标器延时1 μs 时其点目标响应主瓣3 dB宽度展宽一倍, 出现了明显的恶化, 1 m分辨率SAR, 有源定标器延时2 μs 时其点目标响应主瓣3 dB宽度展宽两倍多, 亦出现明显恶化, 但对于5 m分辨率SAR, 有源定标器延时2 μs 时其点目标响应主瓣3 dB宽度没有变化, 因此, 对于高分辨率SAR而言, 延时有源定标器点目标响应主瓣3 dB宽度会出现明显展宽, 若不进行校正, 利用其进行点目标质量评估会带来较大的误差。

4.4 延时有源定标器峰值旁瓣比的影响

图3给出了有源定标器转发延时有源定标器点目标PSLR的影响, 其中图3(a)是分辨率为0.5 m和1 m时的情况, 图3(b)是分辨率为5 m时的情况, 从图中可以看出, 分辨率越高, 延时有源定标器对PSLR的影响越大, 对于0.5 m分辨率SAR, 1 μs 的延时有源定标器带来的误差达

表2 不同分辨率情况下延时有源定标器主瓣3 dB宽度的影响

分辨率(m)	延时(μs)			
	0	0.5	1	2
0.5	0.4705	0.4926	0.9742	1.5955
1	0.8892	0.9086	0.9695	3.1108
5	4.3996	4.3996	4.3996	4.3996

10 dB之多, 而对于5 m分辨率SAR, 1 μs 的延时有源定标器带来的误差可以忽略不计。从图3(a)可以看出, 分辨率为0.5 m的SAR, 其PSLR误差并不是随延时增加而一直增大, 这是因为分辨率较高时, 随延时的增加, 点目标出现“双峰”甚至“多峰”的现象, 此时计算PSLR已经没有意义。

4.5 延时有源定标器积分旁瓣比的影响

图4给出了有源定标器转发延时有源定标器点目标ISLR的影响, 其中图4(a)是分辨率为0.5 m和1 m时的情况, 图4(b)是分辨率为5 m时的情况, 从图中可以看出, 分辨率越高, 延时有源定标器对ISLR的影响越大, 对于0.5 m分辨率SAR, 1 μs 的延时有源定标器带来的误差达10 dB之多, 而对于5 m分辨率SAR, 1 μs 的延时有源定标器带来的误差可以忽略不计。从图4(a)可以看出, 分辨率为0.5 m的SAR, 其ISLR误差并不是随延时增加而一直增大, 这是因为分辨率较高时, 随延时的增加, 点目标出现“双峰”甚至“多峰”的现象, 此时计算ISLR已经没有意义。

5 延时影响的校正

有源定标器延时使有源定标器成像点沿距离向后移一定的距离, 即实际成像点为 P' 点, 而不是有源定标器真正所在的位置 P 点, 如图5所示。

对高分辨率条件下, 对延时有源定标器进行点目标成像时, 必须进行距离徙动校正, 校正函数为式(7)。

从式(7)校正函数可以看出校正函数与 R_B 相

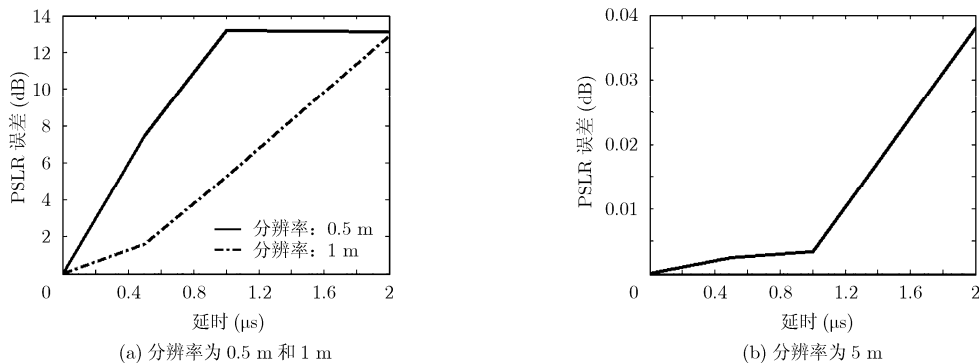


图3 有源定标器延时有源定标器点目标峰值旁瓣比的影响

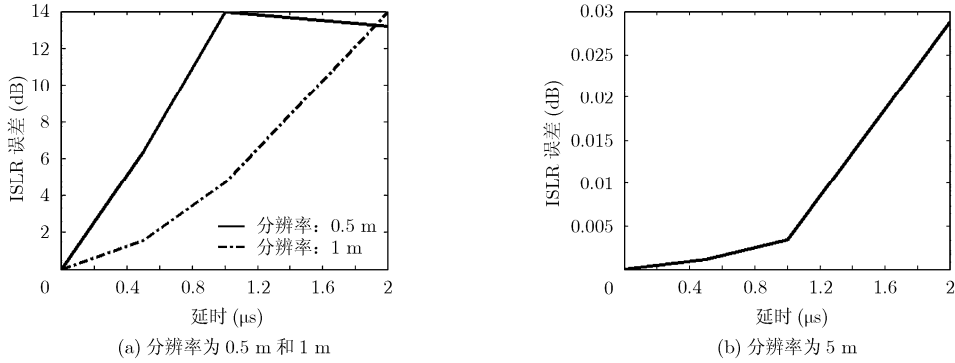


图4 有源定标器延时对点目标积分旁瓣比的影响

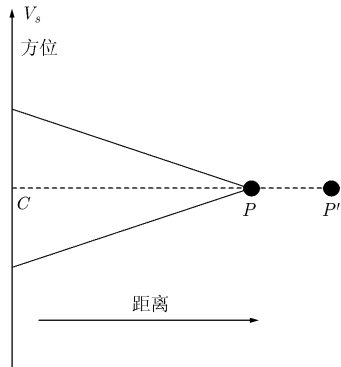


图5 有源定标器距离向位置偏移示意图

关，此时 R_B 也即是最近距离 CP ，但对于延时有源定标器而言，由于实际成像点已经移到 P' 点，因此，进行距离徙动校正时的参考距离应该以 CP' 为准，即校正函数是一个与有源定标器延时量 t_0 有关的函数。

距离徙动校正后，对点目标进行方位向压缩时，方位向匹配函数为式(9)，为了说明问题，我们考虑如式(11)的方位向匹配函数。

$$H_a(f_a) = \exp(-j\pi f_a^2 / K_a) \quad (11)$$

其中 $K_a = -2V^2 / \lambda R_B$ 为多普勒调频率， R_B 即为雷达距有源定标器的最近距离 CP ，对于延时有源定标

器成像点移动到 P' 点，一般情况下，多普勒调频率应该由成像点与雷达之间的实际距离计算得到，但是，现在的成像点 P' 是一个虚拟的点，真正多普勒产生是由于雷达与 P 点之间的相对运动产生的，因此，进行方位向压缩时，计算多普勒频率应该以 CP 为距离进行计算，仿真结果也证明了该计算方法是正确的，本文正是基于上述两点来校正高分辨率条件下延时对有源定标器SAR成像质量的影响。

下面以工作频率为9.6 GHz，分辨率为1 m的SAR为例，分析有源定标器延时2 μs时，校正前后的成像结果。

图6为延时校正前有源定标器点目标特性，其中图6(a)为方位向剖面图，图6(b)为2维点目标压缩结果。

图7为延时校正后有源定标器点目标特性，其中图7(a)为方位向剖面图，图7(b)为2维点目标压缩结果。

从图6和图7可以定性看出校正后有源定标器点目标图像质量有了明显的改善，表3定量给出了校正前后有源定标器点目标响应峰值功率、PSLR、ISLR和主瓣3 dB宽度结果。校正后的主瓣3 dB宽度、PSLR和ISLR都达到了理论值，校正前的PSLR和ISLR由于出现多个峰值而没有实际意义。

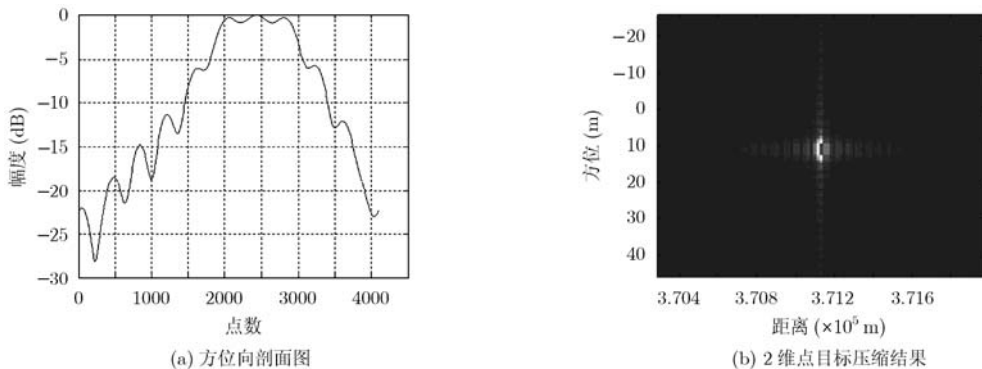


图6 校正前有源定标器点目标压缩结果

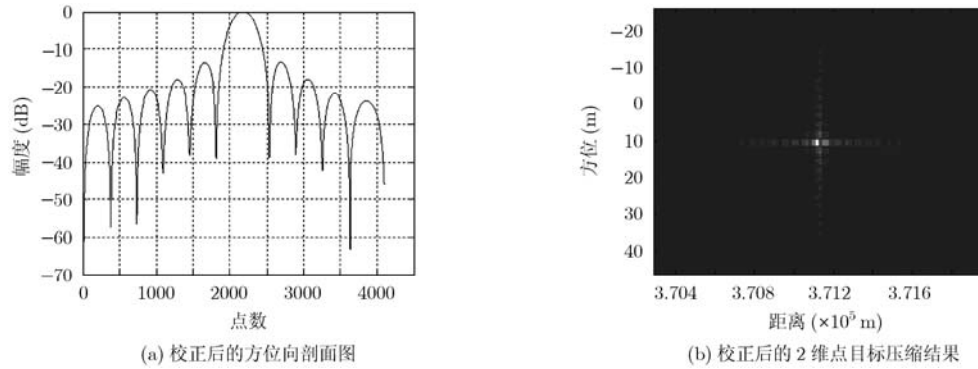


图7 校正后有源定标器点目标压缩结果

表3 校正前后点目标质量比较

	主瓣峰值	PSLR(dB)	ISLR(dB)	主瓣3 dB宽度(m)
校正前	510.7451	-0.3122	3.3263	3.1108
校正后	797.8461	-13.2245	-10.6397	0.8892

6 结论

通过建立高分辨率条件下延时有源定标器点目标成像质量分析模型,分析了高分辨率条件下不同延时有源定标器SAR成像质量产生的影响,分析结果表明,高分辨率条件下,延时有源定标器点目标成像质量影响比较严重。针对延时有源定标器点目标特性带来的影响,提出了误差校正方法,通过校正,可以大大降低延时有源定标器点目标特性的影响,因此,在高分辨率条件下利用延时有源定标器对SAR进行点目标质量评估和辐射校正时,应根据其延时量对源定标器转发信号进行校正。

参考文献

- [1] Shimada M, *et al.* PalSAR radiometric and geometric calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 3915-3932.
- [2] Schwerdt M, *et al.* Monostatic calibration of both TANDEM-X satellites[C]. IGARSS, Hawaii, USA, July 25-30, 2010: 2636-2639.
- [3] Zakharov A I and Sorochinskii M V. External calibration of a polarimetric synthetic aperture radar for a limited number of types of reference reflectors[J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, 55(10): 1102-1107.
- [4] Touzi R and Hawkins R K. On the use of transponder for high precision assessment & calibration of polarimetric radarsat-2. PolinSAR'11, Frascati, Jan. 24, 2011: 1-38.
- [5] Döring B, Schwerdt M, and Bauer R. TerraSAR-X calibration ground equipment[C]. WFMN07, Conference of ITG - Commission on Wave Propagation, Dresden, Germany, 2007, II_C4: 86-90.
- [6] Snoeij P, *et al.* Transponder development for Sentinel-1[C]. EUSAR, Aachen, Germany, June 7-10, 2010: 354-357.
- [7] Döring B J, *et al.* Highly accurate calibration target for multiple mode SAR systems[C]. EUSAR, Aachen, Germany, June 7-10, 2010: 354-357.
- [8] 耿波, 洪峻. 有源转发器延时对SAR定标测量的影响[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(12): 2240-2243.
Geng Bo and Hong Jun. Effect on SAR calibration from transponder time-delay[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(12): 2240-2243.
- [9] 张云华. 现代雷达理论与技术讲义. 中国科学院研究生院, 2010.
Zhang Yun-hua. Teaching Materials of Modern Radar Theory and Technology. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [10] 保铮, 刑孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第5章.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005, Chapter 5.

李亮: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为SAR系统定标技术研究、机载SAR系统设计。
洪峻: 男, 1960年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR定标技术、量化SAR图像应用等。
明峰: 男, 1977年生, 副研究员, 研究方向为雷达信号处理、SAR系统量化应用等。
胡继伟: 男, 1983年生, 研究实习员, 研究方向为SAR定标技术。