波束跃度对星载方位向扫描模式SAR图像质量的影响

李银伟[1],卢护林[2],刘俊豪[2],魏维伟[2]
(1.上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海200093;2.上海无线电设备研究所,上海201109)

摘　要: 针对星载方位向扫描模式合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统中天线无法实现连续扫描而引入成对回波的问题,提出了波束跃度对SAR成像质量影响的定量化分析方法。提出了一种广义的SAR成像几何模型,以模式因子区分不同的方位向扫描模式;结合傅里叶级数和泰勒级数展开推导了波束跃度下的方位向天线方向图,在此基础上建立了方位向回波信号模型;得到成对回波幅度和位置与波束跃度的定量关系,着重比较分析了波束跃度对不同方位向扫描模式SAR图像质量的影响。仿真结果验证了上述分析方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 方位向扫描模式; 波束跃度; 模式因子; 成对回波
中图分类号: TN 959.74　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.04.006

Effects of Beam Granularity on the Quality of Spaceborne Azimuth Scanning Mode Synthetic Aperture Radar Images

LI Yinwei[1], LU Hulin[2], LIU Junhao[2], WEI Weiwei[2]
(1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In terms of the problem of paired echoes in Synthetic Aperture Radar (SAR) images due to that antenna beams in SAR system cannot continuously scan the illuminated scenes, a quantitative analysis method for the effects of antenna beam granularity on the quality of SAR images is presented. First, a generalized SAR imaging model is proposed to distinguish different azimuth scanning modes with the mode factors. Second, based on Fourier series and Taylor series expansion, an antenna pattern formula in azimuth is derived with the azimuth antenna beam granularity, and thus an azimuth echo signal model of spaceborne azimuth scanning mode SAR is established. Finally, the quantitative relationship of the amplitudes and positions of paired-echoes and the antenna beam granularity is achieved, and the effects of beam granularity on the SAR image quality of different azimuth scanning modes are compared and analyzed emphatically. The simulation results verify the validity of the above analysis methods.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); azimuth scanning mode; beam granularity; mode factor; paired echo

0　引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波传感器,能够全天时、全天候对观测区域进行高分辨成像[1]。SAR系统可工作于多种模式,其中条带模式[2]和SCAN模式[3-4]是经典的工作模式。而高分辨率或宽测绘带覆盖是SAR成像许多应用的基本要求。因此,在上述经典工作模式基础上又发展出聚束模式[5-6]、滑动聚束模式[7-8]以及TOPS模式[9-10]等。聚束模式和滑动聚束模式相较于条带模式都能够较长时间地照射到地

收稿日期: 2019-12-18; **修回日期:** 2020-03-14
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41601508);上海市自然科学基金资助项目(15ZR1439500,16ZR1434900,17ZR1428700)
作者简介: 李银伟(1985—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为SAR/InSAR系统设计及信号处理、太赫兹SAR成像技术等。

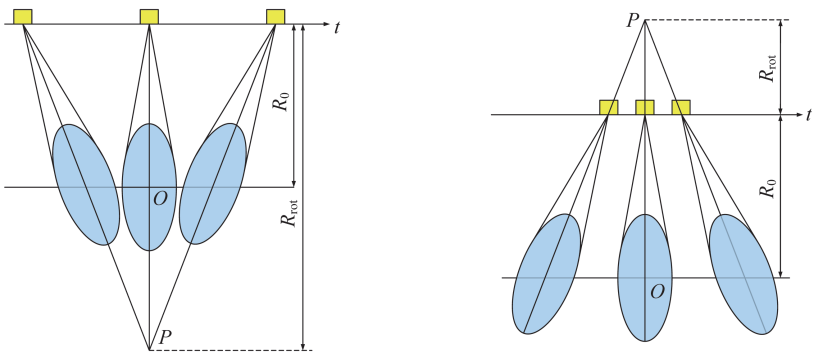
面目标，以减小方位向成像场景宽度的代价来实现更高的方位向分辨率；而TOPS模式在牺牲方位向分辨率的代价下不仅能够获得比条带模式更宽的距离向测绘带，而且很好地削弱SCAN模式的扇贝效应和模糊比与信噪比在方位向严重不一致问题[11]。上述3种模式SAR有个共同的特征：方位向波束扫描，因此，可以统称为方位向扫描模式SAR。

星载方位向扫描模式SAR系统能否实现设计指标，其严重依赖于天线方位向扫描能力的高低。在实际工作过程中，由于天线硬件的限制，方位向波束不可能进行连续扫描，通常都是采用波束跃度的控制方式进行步进式扫描。这会导致方位向天线方向图对目标产生周期性幅度调制，从而出现成对回波，最终引起图像质量的降低。文献[12]分析了波束跃度与成对回波幅度之间的定量化关系，但并未分析波束跃度与成对回波位置之间的映射关系。文献[13-15]分别分析了聚束模式、TOPS模式和滑动聚束模式的天线指向步进控制模型，虽然其给出了波束跃度与成对回波幅度和位置的定量关系，但都只是对单一扫描模式进行分析，并没有对上述3种模式进行系统性的比较分析。文献[16]虽然对比分析了聚束模式和滑动聚束模式下波束跃度的影响，但只是定性地描述其差别。而目前为了满足不同的应用需求，SAR卫星的标准成像模式包含上述3种工作模式。这使得卫星SAR系统设计中要综合考虑波束跃度。因此，在建立星载方位向扫描模式SAR统一成像几何模型的基础上，开展波束跃度对其图像质量的影响研究，定量化分析和比较3种扫描模式下波束跃度与成对回波关系的异同，对SAR卫星系统方位向扫描模式的顶层优化设计具有重要意义。

在分析方位向扫描模式SAR的成像原理后，首先提出了一种广义的星载方位向扫描模式SAR成像几何模型，以模式因子区分不同的方位向扫描模式；其次结合傅里叶级数展开和泰勒级数展开推导了波束跃度控制下的天线方向图，并在此基础上建立了方位向回波信号模型；最终得到成对回波幅度和位置与波束跃度的定量关系，着重比较了波束跃度对不同方位向扫描模式SAR图像质量的影响，为方位向扫描模式SAR系统参数详细设计提供理论基础。

1　方位向扫描模式SAR成像几何模型

图1为方位向扫描模式SAR的回波信号采集几何。SAR天线的方位向扫描可以使用一个虚拟的转动点P描述，雷达到场景中心O的最近斜距为R_0，而到转动中心P的最近斜距为R_{rot}。在回波信号采集期间内，雷达天线的波束是以虚拟点P为旋转中心由前至后（如图1(a)所示）或者由后至前（如图1(b)所示）的匀速转动。



(a) 虚拟点与天线照射区域在雷达的同一边　　(b) 虚拟点与天线照射区域在雷达的两边

图1　方位向扫描模式SAR的回波信号采集几何

Fig.1　Geometry of echo signal acquisition of azimuth scanning mode SAR

定义模式因子α

$$\alpha = 1 - \frac{R_0}{R_{rot}} \tag{1}$$

对于图1(a)所示的SAR成像模式，虚拟点与天线照射区域在雷达的同一边，有$R_{rot} \geqslant R_0 > 0$，于是$0 \leqslant \alpha < 1$；而对于图1(b)所示的SAR成像模式，虚拟点与天线照射区域在雷达的两边，有$R_0 > 0$，$R_{rot} < 0$，于是$\alpha > 1$。因此，不同模式因子下的SAR系统模式及性能指标见表1。由表1可知，模式因子直接影响SAR成像的方位向分辨率和成像场景宽度。随着α

逐渐增大,SAR成像的分辨率逐渐降低,而成像场景宽度逐渐增大。

表1 不同模式因子下的SAR系统模式及性能指标

Tab.1 SAR system modes and performance indices under different mode factors

模式因子	$\alpha=0$	$0<\alpha<1$	$\alpha=1$	$\alpha>1$
工作模式	聚束	滑动聚束	条带	TOPS
方位向分辨率	最高	降低	介于滑动聚束和TOPS之间	最低
方位向成像场景宽度	最小	增大	介于滑动聚束和TOPS之间	最大

2 波束跃度下的方位向回波信号模型

由图1方位向扫描模式SAR的回波信号采集几何可知,雷达天线波束是以虚拟点P为旋转中心由前至后(图1(a))或者由后至前(图1(b))进行扫描的,由此引入的波束瞬时旋转角度Φ为

$$\Phi=k_\phi t=\frac{vt}{R_{\mathrm{rot}}} \tag{2}$$

式中:k_ϕ为波束旋转角速度,且以顺时针旋转为正;v为不扫描情况下波束在地面的等效速度;t为方位向时间。

在理想情况下,当方位向扫描模式SAR利用均匀加权的天线发射和接收信号时,测绘带内某点目标受天线的方位向调制可表示为

$$\begin{aligned}W(t,\tau)&=G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\frac{D_a}{\lambda}\left(\frac{vt-v\tau}{R_0}-\Phi\right)\right]=\\&G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\frac{D_a v}{\lambda R_0}\left(t-\tau-(1-\alpha)t\right)\right]=\\&\begin{cases}G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\dfrac{D_a v}{\lambda R_0}\tau\right], & \alpha=0\\ G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\dfrac{D_a v}{\lambda R_0}\alpha t\right], & \alpha\neq 0\end{cases}\end{aligned} \tag{3}$$

式中:τ为点目标相对于点O的方位时间;G_0为天线增益;D_a为天线的方位向大小;λ为波长。

由式(3)可知,聚束模式时点目标的天线方向图为一常数,与τ有关,且τ的取值范围为$\left[-T_0/2,T_0/2\right]$和$T_0=\lambda R_0/D_a v$;而滑动聚束模式或TOPS模式时点目标的天线方向图与条带模式时类似,只是受常数因子α调制,且与τ无关。

然而,在方位向扫描模式SAR系统实际工作中,采用的相控阵天线无法进行连续扫描,只能以波束跃度为扫描间隔进行步进扫描[8]。此时式(2)中的波束瞬时旋转角度可以表示为

$$\Phi=k_\phi\cdot mT_N=\frac{v\cdot mT_N}{R_{\mathrm{rot}}}=m\cdot\Delta\Phi \tag{4}$$

式中:$m=\mathrm{INT}\left[t/T_N\right]$;$T_N$为天线波束步进扫描的量化时长;$\Delta\Phi=\dfrac{v}{R_{\mathrm{rot}}}T_N$为天线波束步进扫描的量化角度,即波束跃度。

因此,方位向扫描模式SAR实际工作过程中的天线方向图可表示为

$$\begin{aligned}W_{\mathrm{eq}}(t,\tau)&=G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\frac{D_a v}{\lambda R_0}\left(t-\tau-(1-\alpha)\cdot mT_N\right)\right]=\\&G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\frac{D_a v}{\lambda R_0}\left(\alpha t-\tau+(1-\alpha)\cdot\left(t-mT_N\right)\right)\right]=\\&\begin{cases}G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\dfrac{D_a v}{\lambda R_0}\left(\tau-\left(t-mT_N\right)\right)\right], & \alpha=0\\ G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\dfrac{D_a v\alpha}{\lambda R_0}\left(t+\dfrac{1-\alpha}{\alpha}\cdot\left(t-mT_N\right)\right)\right], & \alpha\neq 0\end{cases}\end{aligned} \tag{5}$$

令$f(t)=t-mT_N$,其为周期函数,对其进行傅里叶级数展开,即

$$f(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}a_n\cos\frac{2n\pi t}{T_N}+\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin\frac{2n\pi t}{T_N} \tag{6}$$

式中:

$$a_0=T_N,\ a_n=0,\ b_n=-\frac{T_N}{n\pi}$$

因此,式(5)可进一步表达成

$$W_{\mathrm{eq}}(t,\tau)=\begin{cases}G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\dfrac{D_a v}{\lambda R_0}\left(\tau-\dfrac{a_0}{2}-\sum\limits_{n=1}^{\infty}b_n\sin\dfrac{2n\pi t}{T_N}\right)\right], & \alpha=0\\ G_0\,\mathrm{sinc}^2\left[\dfrac{D_a v\alpha}{\lambda R_0}\left(t+\dfrac{1-\alpha}{\alpha}\cdot\left(\dfrac{a_0}{2}+\sum\limits_{n=1}^{\infty}b_n\sin\dfrac{2n\pi t}{T_N}\right)\right)\right], & \alpha\neq 0\end{cases} \tag{7}$$

当 $\alpha=0$ 时，对 $W_{\mathrm{eq}}(t,\tau)$ 进行关于 τ 的一阶泰勒级数展开，则

$$W_{\mathrm{eq}}(t,\tau)=W\left(t,\tau-\frac{a_0}{2}\right)-W_{\tau}'\left(t,\tau-\frac{a_0}{2}\right)\frac{1-\alpha}{\alpha}\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin\frac{2n\pi t}{T_N} \tag{8}$$

当 $\alpha\neq 0$ 时，对 $W_{\mathrm{eq}}(t,\tau)$ 进行关于 t 的一阶泰勒级数展开，则

$$W_{\mathrm{eq}}(t,\tau)=W\left(t+\frac{1-\alpha}{\alpha}\frac{a_0}{2},\tau\right)+W_{t}'\left(t+\frac{1-\alpha}{\alpha}\frac{a_0}{2},\tau\right)\frac{1-\alpha}{\alpha}\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin\frac{2n\pi t}{T_N} \tag{9}$$

方位向扫描模式SAR的回波信号在方位向为Chirp信号，将方位向频谱进行中心频率平移后，在天线波束跃度控制下不同位置处的点目标回波为

$$s_{i,\mathrm{eq}}(t)=W_{\mathrm{eq}}(t,\tau)\cdot\mathrm{rect}\left[\frac{t}{T_{\mathrm{s}}}\right]\exp\left\{-\mathrm{j}\pi k_a t^2\right\} \tag{10}$$

式中：T_{s} 为合成孔径时间；k_a 为方位向调频率，且

$$W_{\mathrm{eq}}(t,\tau)=\begin{cases}W\left(t,\tau-\frac{a_0}{2}\right)-W_{\tau}'\left(t,\tau-\frac{a_0}{2}\right)\frac{1-\alpha}{\alpha}\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin\frac{2n\pi t}{T_N}, & \alpha=0\\ W\left(t+\frac{1-\alpha}{\alpha}\frac{a_0}{2},\tau\right)+W_{t}'\left(t+\frac{1-\alpha}{\alpha}\frac{a_0}{2},\tau\right)\frac{1-\alpha}{\alpha}\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin\frac{2n\pi t}{T_N}, & \alpha\neq 0\end{cases} \tag{11}$$

3 波束跃度下的方位向回波信号模型

在理想情况下，方位向扫描模式SAR点目标的方位向回波为

$$s_i(t)=W(t,\tau)\cdot\mathrm{rect}\left[\frac{t}{T_{\mathrm{s}}}\right]\exp\left\{-\mathrm{j}\pi k_a t^2\right\} \tag{12}$$

通过匹配滤波器 $h(t)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\pi k_a t^2}$ 后，输出为

$$s_{\mathrm{o}}(t)=\exp\left\{\mathrm{j}\pi k_a t^2\right\}\int_{-\infty}^{+\infty}W(\eta,\tau)\cdot\mathrm{rect}\left[\frac{\eta}{T_{\mathrm{s}}}\right]\exp\left\{-\mathrm{j}2\pi k_a t\eta\right\}\mathrm{d}\eta \tag{13}$$

考虑波束跃度的影响，对点目标的回波信号 $s_{i,\mathrm{eq}}(t)$ 仍采用 $h(t)$ 进行脉冲压缩后可得

$$s_{\mathrm{o,eq}}(t)=\exp\left\{\mathrm{j}\pi k_a t^2\right\}\int_{-\infty}^{+\infty}W_{\mathrm{eq}}(\eta,\tau)\cdot\mathrm{rect}\left[\frac{\eta}{T_{\mathrm{s}}}\right]\exp\left\{-\mathrm{j}2\pi k_a t\eta\right\}\mathrm{d}\eta \tag{14}$$

将式(11)代入式(14)可以得到 $s_{\mathrm{o,eq}}(t)$ 的解析表达式为[1]

$$s_{\mathrm{o,eq}}(t)=\begin{cases}\frac{W\left(t,\tau-T_N/2\right)}{W(t,\tau)}s_{\mathrm{o}}(t)+\sum_{n=1}^{\infty}s_{\mathrm{op1}}(t,\tau,n), & \alpha=0\\ \exp\left(\mathrm{j}2\pi k_a t\frac{1-\alpha}{\alpha}\frac{T_N}{2}\right)s_{\mathrm{o}}(t)+\sum_{n=1}^{\infty}s_{\mathrm{op2}}(t,n), & \alpha\neq 0\end{cases} \tag{15}$$

式中：

$$s_{\mathrm{op1}}(t,\tau,n)=\mathrm{j}\frac{T_N}{n}\frac{W_{\tau}'\left(t,\tau-T_N/2\right)}{W(t,\tau)}\left[s_{\mathrm{o}}\left(t-\frac{n}{k_aT_N}\right)-s_{\mathrm{o}}\left(t+\frac{n}{k_aT_N}\right)\right] \tag{16}$$

$$\begin{aligned}s_{\mathrm{op2}}(t,n)=&\frac{1-\alpha}{\alpha}\left(1-\frac{k_aT_N}{n}t\right)\cdot s_{\mathrm{o}}\left(t-\frac{n}{k_aT_N}\right)\cdot\exp\left\{-\mathrm{j}\pi\left[\frac{n^2}{k_aT_N^2}-\frac{2nt}{T_N}+\frac{1-\alpha}{\alpha}\left(n-k_aT_Nt\right)\right]\right\}+\\&\frac{1-\alpha}{\alpha}\left(1+\frac{k_aT_N}{n}t\right)\cdot s_{\mathrm{o}}\left(t+\frac{n}{k_aT_N}\right)\cdot\exp\left\{-\mathrm{j}\pi\left[\frac{n^2}{k_aT_N^2}+\frac{2nt}{T_N}+\frac{1-\alpha}{\alpha}\left(-n-k_aT_Nt\right)\right]\right\}\end{aligned} \tag{17}$$

结合式(15)～式(17)可知，波束跃度使得主回波两侧出现无穷多对成对回波。成对回波出现在 $t=\pm\frac{n}{k_aT_N}$ $(n=1,2,\cdots,n)$ 处，随着波束跃度 $\Delta\Phi$ 增大，量化时长 T_N 增大，成对回波离主回波的主瓣越近且幅度变大，严重影响SAR图像质量；随着 n 增大，成对回波离主回波的主瓣变远且幅度变小，此时可忽略其对SAR图像质量的影响。因此，主回波两旁的第1对成对回波是影响SAR图像质量的关键因素，需要着重分析其位置和幅度。

当 $\alpha=0$ 时，$s_{\mathrm{op1}}(t,\tau,1)$ 的峰值位置为 $t_0=\pm\frac{1}{k_aT_N}$，$s_{\mathrm{op1}}(t,\tau,1)$ 峰值与主回波峰值的幅度比值为

$$E_{\mathrm{mr1}}=\left|\frac{W_{\tau}'\left(t,\tau-T_N/2\right)}{W\left(t,\tau-T_N/2\right)}\right|T_N=$$

$$\left|\frac{W_{\tau}'\left(t,\tau-T_N/2\right)}{W\left(t,\tau-T_N/2\right)}\right|\frac{R_0\cdot\Delta\Phi}{v}$$

当$\alpha\neq 0$时，$s_{\mathrm{op2}}(t,\tau,1)$的峰值位置为

$$t_0=\pm\frac{1}{k_aT_N}\pm\frac{D_av\alpha}{2\lambda k_aR_0}$$

$s_{\mathrm{op2}}(t,\tau,1)$峰值与主回波峰值的幅度比值为

$$E_{\mathrm{mr2}}=\frac{|1-\alpha|D_avT_N}{4\lambda R_0}=\frac{k_1}{4\theta_{\mathrm{bw}}}\Delta\Phi$$

式中：θ_{bw}为方位向波束宽度；k_1为波束宽度因子的比例常数。

由此可知：

1）当$\alpha=0$时，波束跃度引入的成对回波为单峰。成对回波的峰值位于$\pm 1/(k_aT_N)$处，只与调频率k_a和量化时长T_N有关，而成对回波的幅度E_{mr1}不仅与量化时长T_N或波束跃度$\Delta\Phi$有关，还与点目标所处的方位向时间τ有关。这是由于天线方向图的周期调制幅度与点目标所处的方位向时间有关。

2）当$\alpha\neq 0$时，由于模式因子α的影响，波束跃度引入的成对回波为双峰。由于$1/k_aT_N\gg D_av\alpha/(2\lambda k_aR_0)$，成对回波的峰值位于$\pm 1/(k_aT_N)$附近，即成对回波位置与$\alpha=0$时一样，仅和多普勒调频率$k_a$以及量化时长$T_N$有关；而成对回波的幅度$E_{\mathrm{mr2}}$仅正相关于波束跃度$\Delta\Phi$和波束宽度$\theta_{\mathrm{bw}}$的比值，即波束跃度相同时，同一系统中滑动聚束模式和TOPS模式的成对回波幅度也相同。

而$s_{\mathrm{op1}}(t,\tau,1)$或$s_{\mathrm{op2}}(t,\tau,1)$对$s_{\mathrm{o}}(t)$的影响比较复杂。峰值位置$t_0$的不同使得虚假目标对$s_{\mathrm{o}}(t)$的分辨率（Impulse Response Width，IRW）、峰值旁瓣比（Peak Side Lobe Ratio，PSLR）和积分旁瓣比（Integrated Side Lobe Ratio，ISLR）的影响也不同，见表2。

表2 不同峰值位置对IRW、PSLR和ISLR的影响

Tab.2 Effects of different peak positions on IRW，PSLR，and ISLR

成像指标	$\lvert t_0\rvert<1/k_aT_s$	$1/k_aT_s\leqslant\lvert t_0\rvert\leqslant 10/k_aT_s$	$\lvert t_0\rvert>10/k_aT_s$
IRW	降低	基本无影响	基本无影响
PSLR	基本无影响	增大（峰值与主回波峰值旁瓣重合或峰值幅度大于主回波的峰值旁瓣）	基本无影响
ISLR	减小	增大	基本无影响

由表2可知，方位向扫描模式SAR系统设计时需要尽量减小天线波束跃度，使得成对回波远离主回波，从而减小对该目标成像质量的影响；同时使得成对回波的峰值下降，减小对成对回波所处位置弱目标的影响。

4 仿真试验及结果分析

为了验证上述理论分析的正确性，对星载方位向扫描模式SAR中的点目标进行仿真实验，仿真参数见表3。

表3 仿真参数

Tab.3 Simulation parameters

参数	数值
中心频率/GHz	9.65
卫星高度/km	514
方位向天线长度/m	4.8
中心视角/(°)	32
信号带宽/MHz	50
信号采样率/MHz	60
方位向过采样因子	10
模式因子	0，0.4，0.6，6，10

在对点目标仿真前，先给出在不同模式因子下受不同波束跃度控制比率影响的方位向天线方向图，如图2所示。天线波束跃度控制比率ε定义为

$$\varepsilon=\Delta\Phi/\theta_{\mathrm{bw}} \tag{18}$$

由图2可知，在聚束模式下，天线方向图由理想情况下的常数被调制成周期性的，并且调制幅度不仅与波束跃度有关，还与点目标所在的方位向位置有关；在滑动聚束或TOPS模式下，天线方向图被锯齿调制，而且随着波束跃度的增大，锯齿调制的现象越明显。

不同模式因子下受不同波束跃度控制比率影响的点目标方位向脉冲压缩结果如图3所示。

图3中出现了明显的成对回波现象，而图3(a)

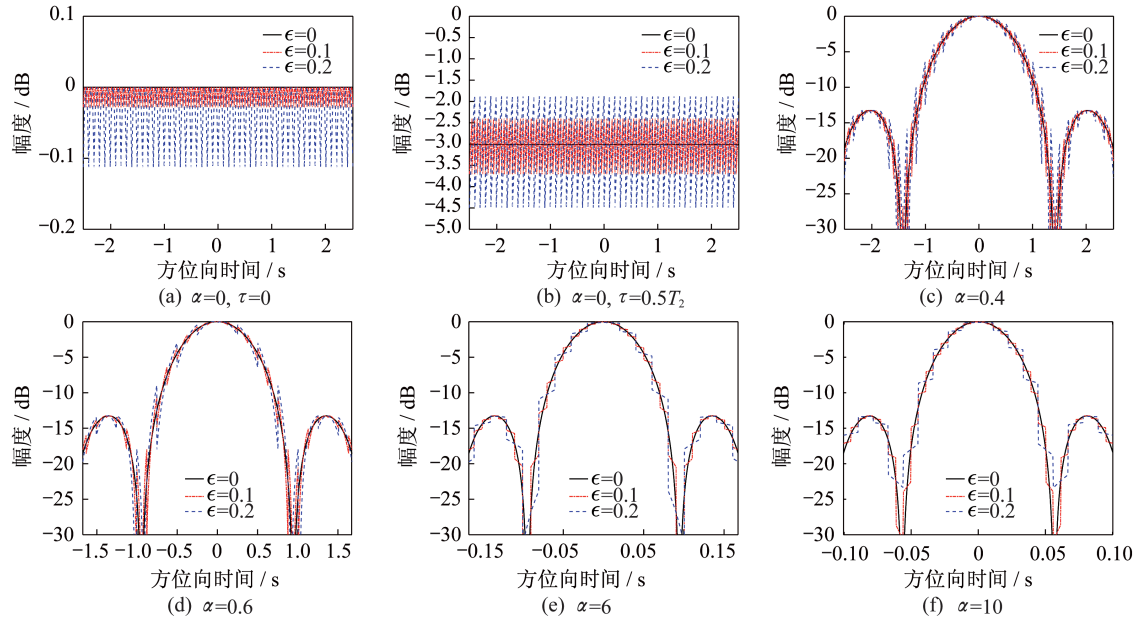


图 2　波束跃度对方位向天线方向图的影响

Fig. 2　Effects of beam granularity on the antenna pattern in azimuth

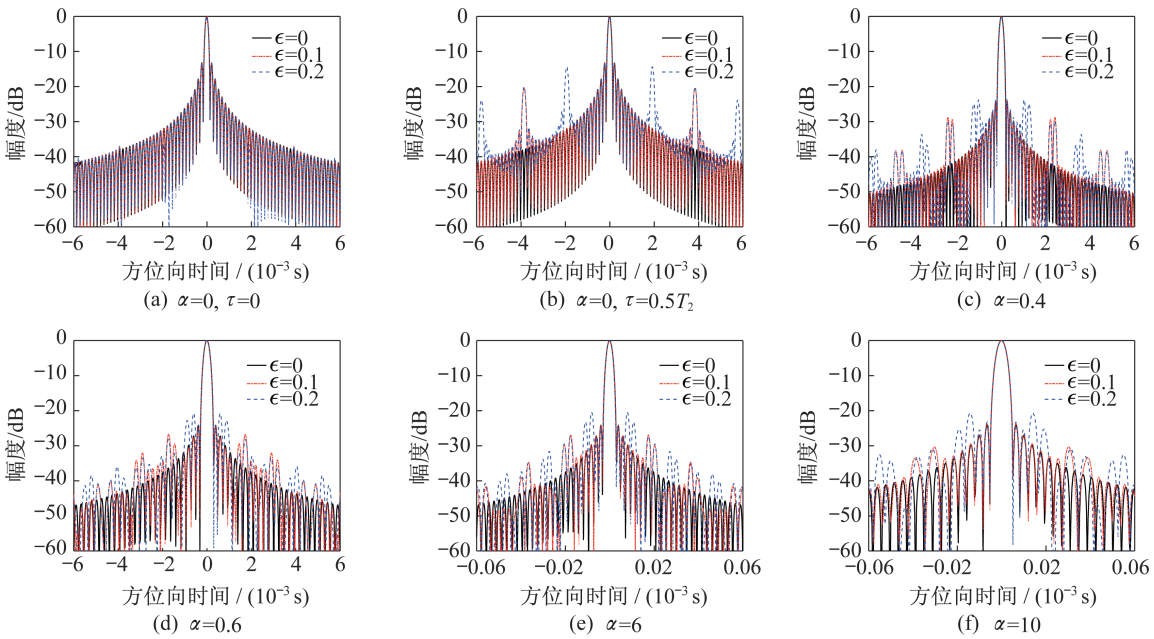


图 3　不同参数下点目标的方位向脉冲压缩结果

Fig. 3　Pulse compression results of the point target in azimuth with different parameters

除外。这是由于在上述参数下成对回波被主回波的旁瓣淹没。上述点目标方位向脉冲压缩后的成像质量指标见表4。分析图3和表4可知，成对回波出现在主回波两边的 $\pm n/(k_a T_N)$ 处，其位置随之增大，对SAR图像质量的影响也越大。而随着模式因子 α 的增大，方位向信号压缩后的分辨率逐渐降低，这是由于方位向带宽随着 α 增大而降低。由 $\alpha=0$ 变为 $\alpha\neq0$ 时第一旁瓣被压低，这是由于 $\alpha\neq0$ 时的天线方向图对方位向回波信号起到了锐化窗的作用，而 $\alpha\neq0$ 时的第一旁瓣基本相同，是由于此时的锐化窗基本相同。通过观察图3还可知，在 $\alpha=0$ 时，成对回波的峰值为单峰；而在 $\alpha\neq0$ 时，成对回波中心受 α 的影响而产生凹陷，使得其出现双峰值，并且随着 α 增大，双峰现象越明显。

表 4 成像质量指标仿真结果

Tab.4 Simulation results of the imaging quality indices

模式因子	波束跃度	第一成对回波幅度/dB	第一成对回波位置/ms	主瓣宽度/m	第一旁瓣幅度/dB
$\alpha=0$ $\tau=0$	$\varepsilon=0$	—	—	0.14	−13.26
	$\varepsilon=0.1$	—	—	0.14	−13.26
	$\varepsilon=0.2$	—	—	0.14	−13.26
$\alpha=0$ $\tau=0.5T_0$	$\varepsilon=0$	—	—	0.14	−13.26
	$\varepsilon=0.1$	−20.49	3.85	0.14	−13.26
	$\varepsilon=0.2$	−14.36	1.93	0.14	−13.26
$\alpha=0.4$	$\varepsilon=0$	—	—	0.17	−24.13
	$\varepsilon=0.1$	−28.72	2.31	0.17	−24.11
	$\varepsilon=0.2$	−23.75	1.16	0.18	−24.59
$\alpha=0.6$	$\varepsilon=0$	—	—	0.25	−24.13
	$\varepsilon=0.1$	−26.69	1.57	0.26	−24.25
	$\varepsilon=0.2$	−20.74	0.76	0.25	−24.01
$\alpha=6$	$\varepsilon=0$	—	—	2.51	−24.11
	$\varepsilon=0.1$	−26.88	19.18	2.51	−24.09
	$\varepsilon=0.2$	−20.45	9.61	2.52	−24.52
$\alpha=10$	$\varepsilon=0$	—	—	4.18	−24.13
	$\varepsilon=0.1$	−30.33	34.41	4.17	−24.30
	$\varepsilon=0.2$	−20.68	16.88	4.19	−24.19

通过分析表4还可知,随着波束跃度的增大,方位向脉冲压缩后峰值旁瓣比将增加,积分旁瓣比也增加。而通过对比第一成对回波幅度的理论值和仿真值,可发现仿真值大于理论值,同时波束跃度相同情况下第一成对回波幅度在$\alpha\neq0$时的仿真值有差别,这主要是由于理论分析中忽略泰勒级数展开中的高次项以及仿真中主回波旁瓣对成对回波的影响导致。因此,在实际方位向扫描模式SAR系统设计中,波束跃度的优化设计应考虑上述影响。

由前面理论分析和仿真可知,聚束模式下测绘带不同方位时间的点目标受波束跃度的影响不同,如图4所示。

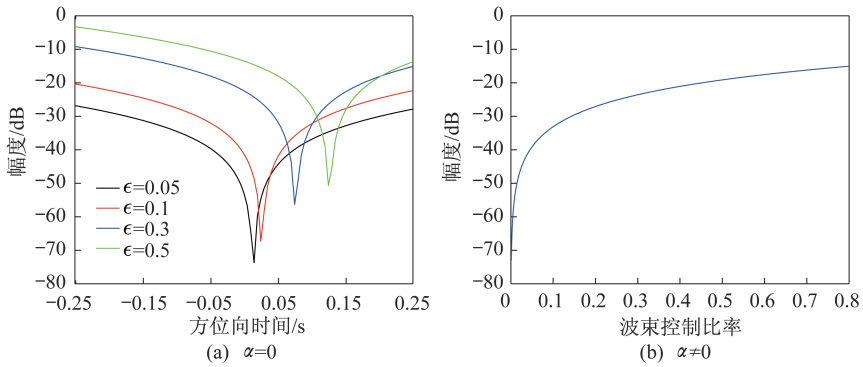


图 4 不同模式因子下成对回波峰值与波束跃度的关系

Fig.4 Relationship between the peak value of paired echoes and the beam granularity with different mode factors

聚束模式下第一成对回波幅度在特定的波束跃度控制比率时随测绘带内方位时间的变化关系,如图4(a)所示,以及滑动聚束或TOPS模式下第一成对回波幅度随波束跃度控制比率的变化关系,如图4(b)所示。由图4(a)可知,不同方位时间下成对回波的影响不同。成对回波对$\tau=T_N/2$处的点目

标影响最弱，以该点为中心向两端的影响逐渐增强，对$\tau=-T_0/2$处的点目标影响最强。由图4(b)可以看出，波束控制比率的增加也会增强对成对回波的影响。而通过对比图4(a)和图4(b)可知，在相同的波束跃度控制比率下，聚束模式下有一半的测绘区域受波束跃度的影响会大于滑动聚束模式或TOPS模式。因此，在包含有3种扫描模式SAR系统设计中，尤其要考虑波束跃度对聚束模式成像质量的影响。

4 结束语

星载方位向扫描模式SAR系统中的波束跃度会使压缩后的SAR图像在方位向出现无穷多对成对回波。3种扫描模式下成对回波的具体特征如下：

1）成对回波的位置相同，只是聚束模式下的成对回波为单峰，而滑动聚束和TOPS模式下的成对回波受模式因子的影响为双峰，且随着模式因子的增加，双峰更加明显。

2）在聚束模式下，成对回波的幅度不仅与波束跃度有关，还与目标的方位向位置有关；而在滑动聚束和TOPS模式下，成对回波的幅度相同，且仅与波束跃度有关。

3）波束跃度对聚束模式不同测绘区域的图像质量影响不同，但对其图像质量的最大影响超过对滑动聚束和TOPS模式图像质量的影响。

因此，在方位向扫描模式SAR系统的波束跃度优化设计中，需要综合考虑上述因素，同时还要考虑系统实现的难易程度，最终设计出满足成像指标且易于实现的波束跃度。

参考文献

[1] 陈筠力，李威．国外SAR卫星最新进展与趋势展望[J]．上海航天，2016，33(6)：1-19.

[2] DOGAN O, KARTAL M. Efficient strip-mode SAR raw-data simulation of fixed and moving targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 884-888.

[3] LIANG C R, FIELDING E J. Interferometry with ALOS-2 full-aperture ScanSAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5): 2739-2750.

[4] LIANG C R, FIELDING E J. Measuring azimuth deformation with L-band ALOS-2 ScanSAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5): 2725-2738.

[5] MAO X H, ZHU D Y. Two-dimensional autofocus for spotlight SAR polar format image [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2016, 2(4): 524-539.

[6] LI Y C, DENG H, QUAN Y H, et al. Sequence design for high squint spotlight SAR imaging on manoeuvring descending trajectory [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(2): 219-225.

[7] WU Y, SUN G C, YANG C, et al. Processing of very high resolution spaceborne sliding spotlight SAR data using velocity scaling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(3): 1505-1518.

[8] SUN G C, WU Y, YANG J, et al. Full-aperture focusing of very high resolution space borne squinted sliding spotlight SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 11(99): 1-13.

[9] YANG L, WANG G, LV H H. Efficient TOPS mode raw data simulator of extended scenes [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(6): 1065-1070.

[10] ZHANG S, SUN G C, XING M D. Full aperture imaging algorithm for highly squinted TOPSSAR [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(6): 1168-1175.

[11] ZAN F D, GUARNIERI A M. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans [J]. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2352-2360.

[12] META A, MITTERMAYER J, PRATS P, et al. TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and perfomance analysis [J]. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 2010, 48(2): 759-769.

[13] 王国栋，周荫清，李春升．星载聚束式SAR天线波束指向控制分析[J]．北京航空航天大学学报，2003，29(6)：484-488.

[14] 曾虹程，陈杰，杨威，等．波束跃度对星载SAR滑聚模式成像影响分析[J]．北京航空航天大学学报，2014，40(11)：1549-1554.

[15] 吴越，李春升，王鹏波，等．天线波束指向控制对TOPSAR成像质量的影响[J]．宇航学报，2012，33(4)：487-491.

[16] 蒋彦婷，周荫清，徐华平．机载混合模式SAR波束指向控制对图像质量的影响[J]．电子与信息学报，2008，30(2)：335-338.