

地球同步轨道SAR凝视成像变脉冲重复频率技术

李财品^{1,2}, 何明一¹

(1. 西北工业大学电子信息学院 西安 710000; 2. 中国空间技术研究院西安分院 西安 710000)

【摘要】实现对特定区域凝视观测成像是地球同步轨道SAR(GEO SAR)非常重要的应用。针对地球同步轨道SAR凝视观测回波大距离徙动造成信号接收窗口难以选择的问题,提出了一种地球同步轨道SAR凝视成像变脉冲重复频率(PRF)设计方法。给出了变PRF设计的准则,详细推导了周期性变PRF过程中脉冲丢失的位置,分析对成像质量的影响,采用后向投影算法对方位非均匀采样信号进行成像聚焦。最后仿真验证变PRF设计的有效性。

关键词 地球同步轨道SAR; 成像质量影响; 脉冲丢失位置; 变PRF

中图分类号 TN958 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.06.007

The Technology of Pulse Repetition Frequency Variation for Geosynchronous Orbit SAR with Staring Imaging

LI Cai-pin^{1,2} and HE Ming-yi¹

(1. School of Electrical and Information, Northwestern Polytechnic University Xi'an 710000;

2. China Academy of Space Technology(Xi'an) Xi'an 710000)

Abstract The staring observation of a certain region for geosynchronous orbit synthetic aperture radar (GEO SAR) is very important application. Due to the big SAR echo range migration in staring imaging which makes the signal reception window be difficult to choose, a pulse repetition frequency (PRF) variation method for geosynchronous orbit staring imaging is put forward. Firstly, the design criterion of pulse repetition frequency variation is given, and then both of the location of the missing pulse and the influence on imaging quality owing to pulse repetition frequency (PRF) variation are deduced in detail. The back projection (BP) algorithm is adapted to non-uniform sampling signal imaging focusing. Finally, the simulation is used to verify the effectiveness of the PRF variation. Numerical simulations have demonstrated the effectiveness of the approach proposed.

Key words geosynchronous orbit SAR; imaging quality effect; pulse lost positions; PRF variation

地球同步轨道SAR(geosynchronous orbit SAR, GEO SAR)具有重访周期短、观测范围广、可实现对特定区域凝视观测的特点,已经成为研究热点。相关文献对GEO SAR的成像机理^[1]、成像算法^[2]、系统设计^[3-5]等开展研究,但主要是基于条带模式下进行分析,而对于凝视成像模式研究处于初步阶段^[6]。GEO SAR凝视成像模式(通过小角度的天线相位扫描或者通过卫星姿态机动来实现)可实现对成像区域长达小时量级的驻留观测^[6],具有广泛的应用前景。然而,在凝视观测模式下,长合成孔径时间及复杂的轨道特性造成接收回波距离徙动大,使得回波接收窗的选取不仅需要考虑到成像测绘接收需求,而且也需要考虑距离徙动对接收回波影响。因此,脉冲重复频率(pulse repetition frequency, PRF)设

计将更加复杂。

文献[7]提出了可以采用变PRF的设计方法满足大距离徙动回波接收的要求,并且分析了变PRF能够降低大斜视数据存储量。而针对变PRF设计的具体实现,文献[8]提出了一种连续线变PRF的方法,给出了变PRF的约束条件,对比了快变及慢变下系统的性能。文献[9]介绍了快变、慢变、精细变化等3种周期性变PRF设计方法,并且对比了最佳线性无偏插值、简单线性插值、多通道重构3种重建方位向均匀采样的成像性能。文献[10]提出利用拉格朗日插值方法解决变PRF方位非均匀采样问题,并利用基于Stolt插值成像算法进行了点目标聚焦成像处理。文献[11-12]分析了周期性变PRF对天线方向图带来的变化,给出了其对成像质量的影响。然而,上述

收稿日期: 2015-03-23; 修回日期: 2016-06-30

基金项目: 部级基金

作者简介: 李财品(1984-), 男, 博士生, 主要从事微波遥感技术方面的研究。

文献并没有给出了周期性变PRF设计脉冲丢失位置的数学表达式,对于方位向非均匀采样的成像算法主要是基于频域的算法,需要进行复杂的插值计算或复杂的多通道重建操作。

本文针对GEO SAR凝视成像的特点,分析回波距离徙动特性,提出一种变PRF设计方法,详细推导了变PRF设计脉冲丢失位置的数学表达式,分析了变PRF对凝视成像质量的影响,并提出利用时域BP算法对方位向非均匀采样信号进行聚焦成像。

1 凝视观测成像

在GEO SAR凝视成像过程中,卫星与地面目标点的距离随时间不断变化。假设目标点在地球惯性坐标系下的坐标为 $[x_t, y_t, z_t]$,卫星在地球惯性坐标系下的位置坐标为 $[x_s, y_s, z_s]$ 。则卫星与目标的距离可以表示为:

$$R_{st} = \sqrt{(x_s - x_t)^2 + (y_s - y_t)^2 + (z_s - z_t)^2} \quad (1)$$

选取以下卫星轨道参数对卫星与目标距离进行仿真分析:倾角 36° ,偏心率为0,纬度幅角 90° ,目标点坐标为东经 150°E ,北纬 44°N 。则可以得到卫星星下点轨迹,如图1所示,卫星与目标点斜距变化如图2所示。

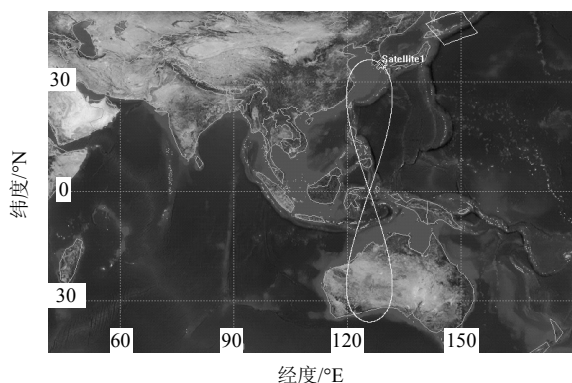


图1 卫星星下点轨迹示意图

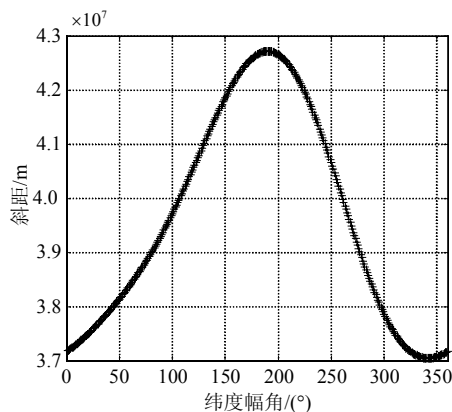


图2 GEOSAR凝视观测斜距变化

从图2可以看出,在凝视成像模式下目标点与卫星距离随时间不断变化,全轨道时间内变化的最大值达到了5 669 km。

而在一定时间内回波距离徙动(range cell migration, RCM)可以描述为:

$$\text{RCM} = \max(R_{st}) - \min(R_{st}) \quad (2)$$

根据脉冲信号回波接收原理,当距离徙动比回波接收窗口大时,部分回波信号会移出回波窗口,造成回波信号不能得到有效的记录。为了方便将距离徙动与观测测绘带比较,定义距离徙动-斜距测绘带比(RCM-range-swath-ratio)来衡量。不同合成孔径时间距离徙动-斜距测绘带比如表1所示。

表1 距离徙动—斜距测绘带比

合成孔径时间/h	距离徙动 RCM/km	地距测绘带 (ground-swath)/km	斜距测绘带 (range-swath)/km	RCM-range-swath-ratio
1	214	400	257	0.83
2	506	402	258	1.96
3	841	405	260	3.23
4	1 217	409	263	4.62

可见,当凝视观测超过一定的合成孔径时间后,距离徙动量远远大于测绘带回波宽度。此时需要进行回波窗口的移动调整以满足接收回波要求,而这个过程可以通过变PRF实现。

2 凝视成像变PRF设计

在PRF固定的情况下,信号距离徙动会造成回波信号起始位置的偏移,严重情况下甚至造成有用的回波信号移出接收窗口^[11]。如果能够根据回波信息实时调整回波窗口(变PRF设计),则能够一定程度上克服回波信号的距离徙动^[12]。因此, GEO SAR变PRF设计主要基于以下准则:

1) PRF选择的上限要满足距离模糊度要求,下限要满足方位模糊度要求。

2) PRF的选取能够适应距离徙动造成的回波窗口偏移。

根据上面的设计准则,对GEO SAR凝视成像模式下的PRF进行设计。首先对于PRF选择的上限是满足距离模糊度要求,下限是满足方位模糊度要求这一准则,与常规低轨SAR的选择PRF的规则相同。

对于凝视成像模式下PRF设计的第二个准则,有:假设PRF在一定周期内线性变化, M 表示一个周期内发射的脉冲总数, k 表示周期内第 k 个发射脉冲, PRI_k 表示第 k 个脉冲重复时间间隔,第 k 个发射脉冲的盲区定义为第 k 个脉冲经过地面反射后到达雷达

接收端时雷达正在发射周期内的第 $(k+m)$ 个脉冲^[10](主要原因是脉冲式雷达天线收发共用)。脉冲时序如图3所示。

此时, 脉冲盲区所处的位置可能会有以下两种情况。第一种情况, 如图3b所示, 第 k 个脉冲发射后经过一定时间延迟, 脉冲盲区落入到第 k 个脉冲后端(见图3b中的第 $(k+m)$ 脉冲); 第二种情况, 如图3c所示, 第 k 个脉冲发射后经过一定时间延迟, 脉冲盲区反而处于第 k 个脉冲前端(周期内, 见图3c中的第 $(k+m)$ 脉冲)。为了更直接说明上述关系, 假设变PRF一个周期内的脉冲数为3个, 分别以1, 2, 3标记, 若第2个脉冲发射后经过回波延时到达雷达接收机, 此时雷达系统正在发射周期内的第3个脉冲(脉冲盲区位置), 则与图3b描述的情况类似; 若第2个脉冲发射后经过回波延时到达雷达接收机, 此时雷达系统正在发射周期内的第1个脉冲(脉冲盲区位置), 则与图3c描述的情况类似。

根据上述描述, 脉冲时间关系满足以下表达式:

$$\begin{cases} \left| \sum_{i=k}^{k+m-1} \text{PRI}_i + NT - \frac{2R_{st}}{C} \right| < T_p \\ 1 \leq k \leq M - m \\ \left| T - \sum_{i=k+m-M}^{k-1} \text{PRI}_i + NT - \frac{2R_{st}}{C} \right| < T_p \\ M - m + 1 \leq k \leq M \end{cases} \quad (3)$$

式中, T 表示一个周期内发射 M 个脉冲总的脉冲重复时间之和; N 表示回波时延共经历多少个脉冲周期数; R_{st} 为目标点与卫星斜距; C 为光速; T_p 为脉冲宽度。

在合成孔径时间内, 由于脉冲数是周期性连续不间断发射, 对于斜距为 R_{st} 处, 脉冲丢失的位置在不同脉冲周期内是相同的^[10]。因此, 可以将上述式(3)中的 NT 省去。

假设两个相邻连续的脉冲重复时间间隔变化量为 ΔT , 则 $\text{PRI}_{k+1} - \text{PRI}_k = \Delta T$ 。

为了求得发射脉冲盲区位置即脉冲信号丢失位置, 对式(3)进行不同情况下的分析计算:

1) 当 $1 \leq k \leq M - m$ 时:

$$\begin{aligned} \sum_{i=k}^{k+m-1} \text{PRI}_i &= \pm T_p + \frac{2R_{st}}{C} \\ \Leftrightarrow \text{PRI}_k + \text{PRI}_{k+1} + \dots + \text{PRI}_{k+m-1} &= \pm T_p + \frac{2R_{st}}{C} \\ \Leftrightarrow m\text{PRI}_1 + m\Delta T k - m\Delta T + \frac{m(m-1)\Delta T}{2} &= \pm T_p + \frac{2R_{st}}{C} \end{aligned} \quad (4)$$

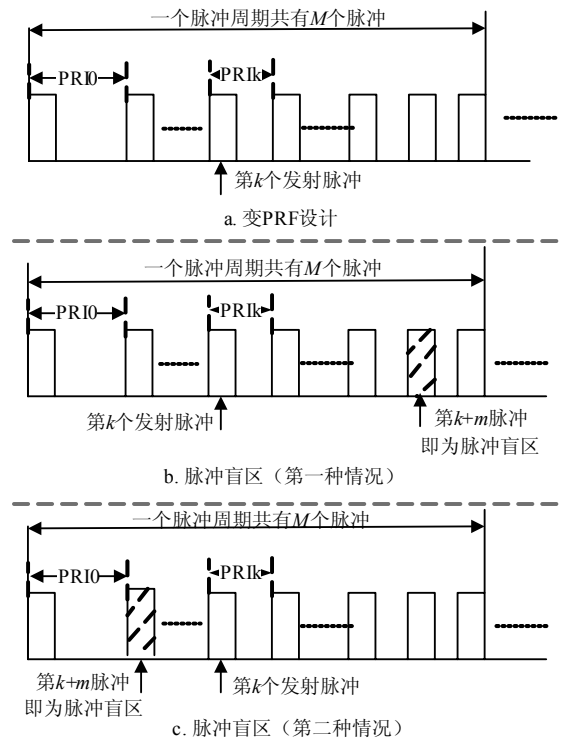


图3 发射脉冲与盲区示意图

可以得到:

$$k = \frac{\pm T_p + \frac{2R_{st}}{C} - \frac{m(m-1)\Delta T}{2} + m\Delta T - m\text{PRI}_1}{m\Delta T} \quad (5)$$

2) 当 $M - m + 1 \leq k \leq M$ 时:

$$\begin{aligned} T - \sum_{i=k+m-M}^{k-1} \text{PRI}_i &= \pm T_p + \frac{2R_{st}}{C} \\ \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{M-1} \text{PRI}_i - \sum_{i=k+m-M}^{k-1} \text{PRI}_i &= \pm T_p + \frac{2R_{st}}{C} \\ \Leftrightarrow M\text{PRI}_1 + \frac{M(M-1)}{2}\Delta T - & \\ (M-m)(\text{PRI}_1 + (k+m-M-1)\Delta T) - & \\ \frac{(M-m-1)(M-m)}{2}\Delta T &= \pm T_p + \frac{2R_{st}}{C} \end{aligned} \quad (6)$$

可以得到:

$$k = \frac{\pm T_p - \frac{2R_{st}}{C} + m\text{PRI}_1 + \Delta T \left(M^2 + (1-m)M + \frac{m^2}{2} - \frac{3m}{2} \right)}{(M-m)\Delta T} \quad (7)$$

确定脉冲信号丢失位置后, 对相邻脉冲的时间变化量 ΔT 进行分析。该时间变化量的选择要能够消除或者减轻距离徙动对接收回波的影响。首先根据同步轨道SAR斜距表达式特性^[13], 将其进行泰勒级数展开并表示成标量形式:

$$R_{st}(t_a) = R_0 + k_1 t_a + \frac{1}{2} k_2 t_a^2 + \frac{1}{6} k_3 t_a^3 + \frac{1}{24} k_4 t_a^4 + \dots \quad (8)$$

式中, R_0 为方位零时刻卫星到地面目标点的距离; k_1, k_2, k_3, \dots 分别为拟合卫星轨道与目标点斜距历程得到的各阶系数。

得到回波距离徙动变化量为:

$$RCM = k_1 t_a + \frac{1}{2} k_2 t_a^2 + \frac{1}{6} k_3 t_a^3 + \frac{1}{24} k_4 t_a^4 + \dots \quad (9)$$

而距离徙动中的时间一次项即距离走动对回波窗口影响最大^[7], 且距离走动是线性变化的, 因此可以

通过PRF的线性变化来适应距离走动造成的回波窗口偏移, 此时 ΔT 应该满足:

$$PRI_2 - PRI_1 = \frac{2k_1}{C} PRI_2 \quad (10)$$

$$\Delta T = \frac{2k_1 PRI_1}{C - 2k_1}$$

3 仿真实验

为了验证以上分析, 利用计算机进行仿真, 仿真参数如表2所示。

表2 仿真参数

轨道半长轴 /km	偏心率 /($^\circ$)	近地点幅角 /($^\circ$)	波束宽度 /($^\circ$)	脉冲重复频率 /Hz	轨道倾角 /($^\circ$)	升交点赤经 /($^\circ$)	中心频率 /GHz	视角 /($^\circ$)	信号带宽 /MHz
42 164	0	90	0.6	120~300	36	106	1.25	3	30

假设目标点位置为东经150°E, 北纬44°N, 任意选择轨道位置时间, 这里选取过近地点4 h处为合成孔径时间中心时刻, 设合成孔径时间为2 h, 则目标点特性随时间变化如图4所示。

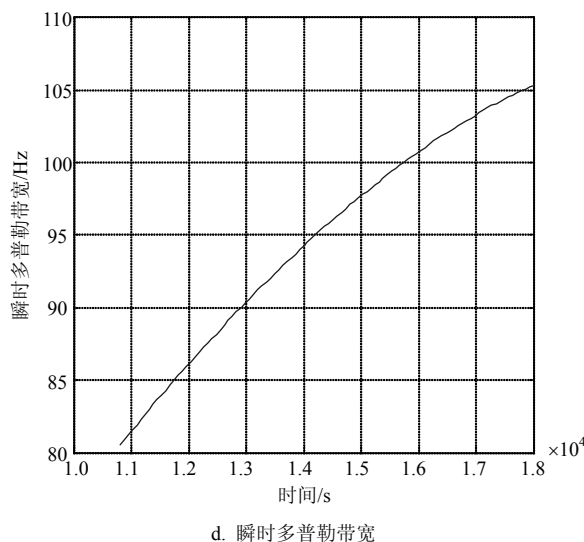
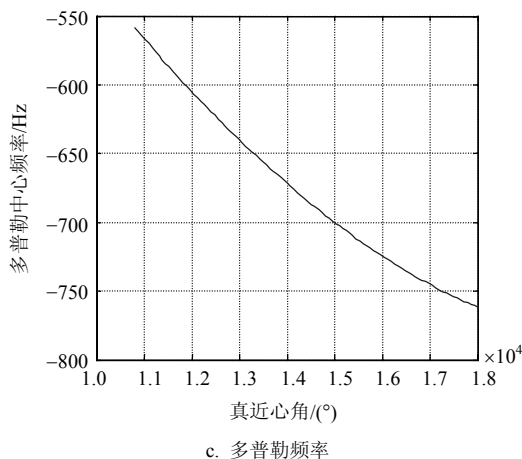
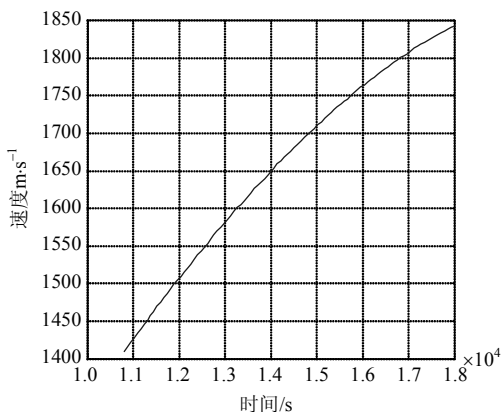
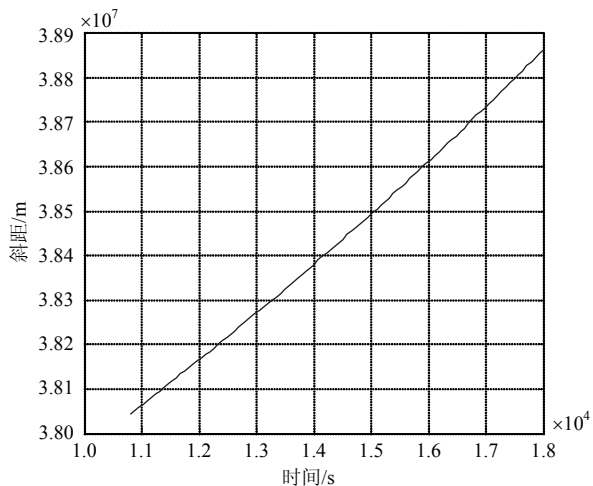


图4 目标点特性变化

根据上面目标特性的仿真结果及PRF选择规则, 为了使脉冲重复频率的选择满足模糊度的要求,

选择的脉冲重复频率至少为120 Hz。因此, 选择120 Hz作为脉冲重复频率的下限。

根据式(10)变PRF设计方法, 一个周期内PRF变化的曲线如下图5所示。

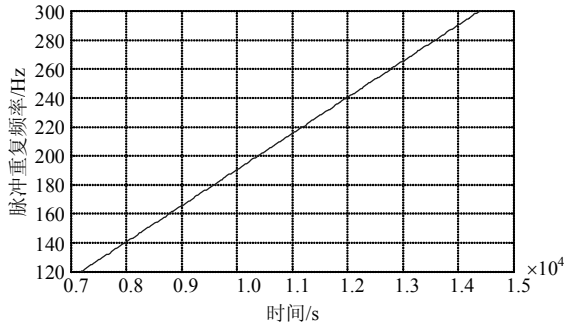
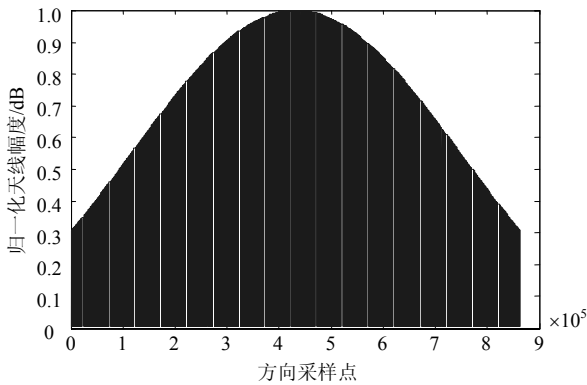
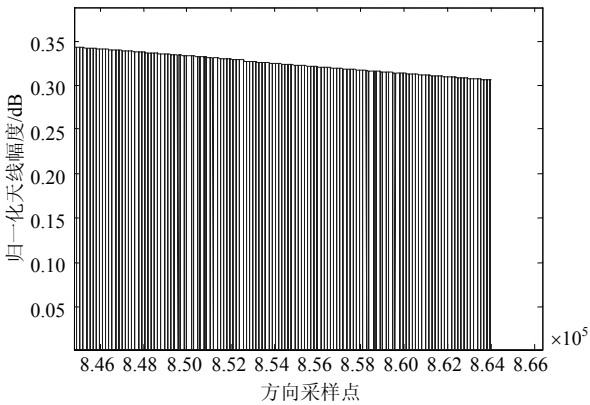


图5 PRF变化曲线

得到PRF变化规律后可以根据式(3)计算不同斜距脉冲丢失的时间位置。而脉冲在合成孔径时间内的丢失会引起天线方向图调制, 图6给出了天线方向图经调制后示意图。



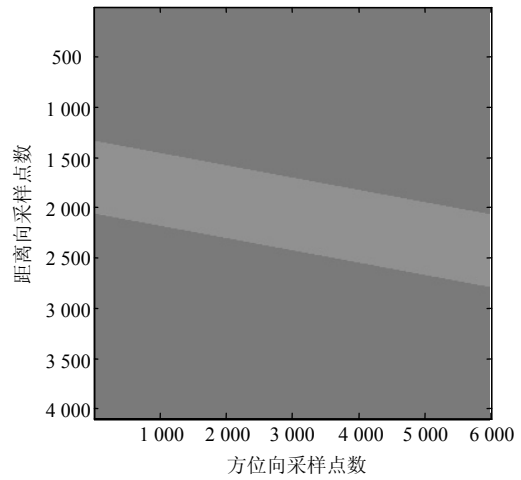
a. 脉冲丢失引起的天线方向图调制



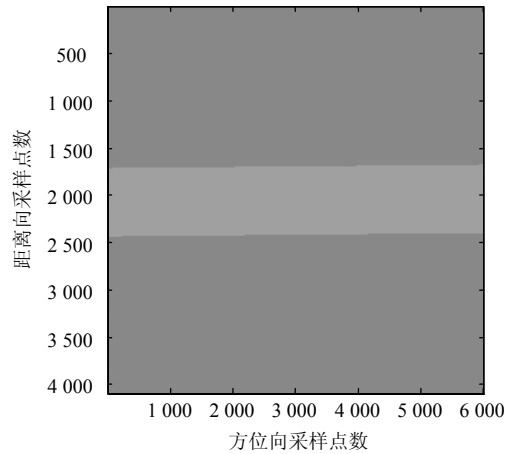
b. 局部放大图

图6 脉冲丢失引起的天线方向图调制示意图

将天线方向图调制信息加入雷达回波中并进行回波仿真, 图7给出了固定PRF与变PRF设计下回波幅度的对比(截取方位向一小块数据)。



a. 固定PRF回波幅度图



b. 变PRF回波幅度

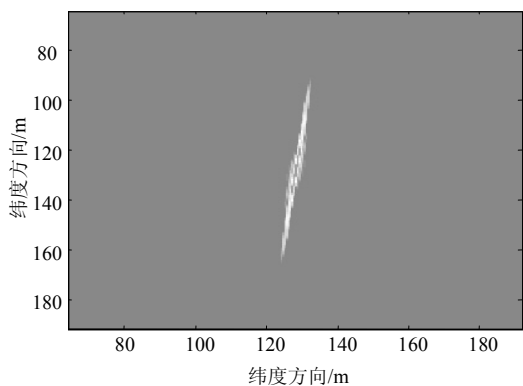
图7 固定PRF设计与变PRF设计回波幅度的变化

从图中可以看出, 经过变PRF设计后, 回波的距离走动得到了校正, 接收回波窗口时间由原来的 $T_p + 2RCM/C$ (点目标)变为近似于 T_p (点目标), 降低了对回波窗口长度需求。

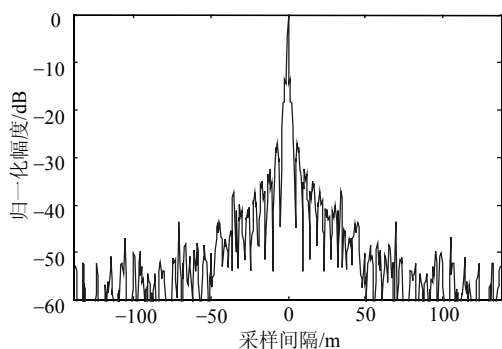
利用BP算法对变PRF下的回波信号进行成像仿真。由于BP算法可以看成是在时间域内对场景的点目标沿方位向逐个脉冲进行相干累加过程, 因此克服频域类算法方位向处理需要均匀采样的问题。成像结果如图8所示。

根据上述BP算法的仿真结果, 对目标点的成像性能指标进行评估, 结果如表3所示。

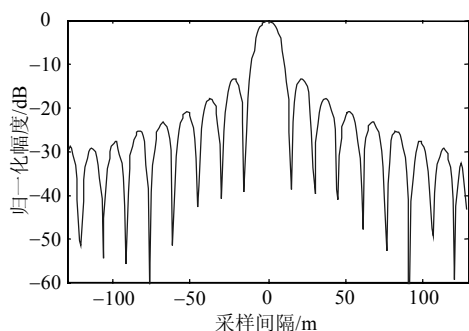
从点目标的性能分析表可以看出, 变PRF设计不会影响距离向成像, 主要是对方位向成像有影响, 造成了信号成对回波出现(主要是由于脉冲丢失造成的信号调制引起), 影响了信号旁瓣比, 造成积分旁瓣比与理论值相比稍微有所下降。



a. 点目标成像示意图



b. 方位向频谱剖面图



c. 距离向频谱剖面图

图8 BP算法点目标仿真

表3 点目标性能评估(未加窗)

	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB	分辨率/m
距离向	-13.31	-10.51	15.52
方位向	-13.54	-8.63	0.80

4 结束语

与常规低轨SAR的应用相比,凝视成像是同步轨道SAR重要的应用优势。本文针对地球同步轨道SAR凝视观测的特点,提出了一种变脉冲重复频率的方法,推导了变PRF丢失的位置表达式,给出了变PRF对凝视成像质量的影响。然而,本文分析的是假设PRF线性周期变化的情况,对于随机非周期的PRF变化下系统设计及成像性能分析是后继研究的一个方向。

参 考 文 献

- [1] WU Zhou-ting, HUANG Li-jia, HU Ding-hui, et al. Azimuth resolution analysis in geosynchronous SAR with azimuth variance property[J]. Electronics Letters, 2014, 50(6): 464-466.
- [2] HU Cheng, LONG Teng, LIU Zhi-peng, et al. An improved frequency domain focusing method in geosynchronous SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5514-5528.
- [3] RUIZ-RODON J, BTOQUETAS A, MAKHOUL E, et al. Nearly zero inclination geosynchronous sar mission analysis with long integration time for earth observation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6379-6391.
- [4] HOBBS S, MITCHELL C, FORTE B, et al. System design for geosynchronous synthetic aperture radar missions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(12): 7750-7763.
- [5] SUN Zhi-chao, WU Jun-jie, PEI Ji-fang, et al. Inclined geosynchronous spaceborne-airborne bistatic SAR: Performance analysis and mission design[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(1): 343-357.
- [6] LI Cai-pin, HE Ming-yi. A novel attitude steering strategy for GEO SAR staring imaging[C]//IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP). Chengdu: IEEE, 2015.
- [7] ZENG Hong-cheng, CHEN Jie, YANG Wei, et al. Image formation algorithm for highly-squint strip-map SAR onboard high-speed platform using continuous PRF variation[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Quebec, Canada: IEEE, 2014.
- [8] KRIEGER G, GEBERT N, YOUNIS M, et al. Advanced concepts for Ultra-Wide-Swath SAR imaging[C]//EUSAR. Friedrichshafen, Germany:[s.n.], 2008.
- [9] VILLANO M, KRIEGER G, MOREIRA A. Staggered-SAR for high-resolution wide-swath imaging[C]//IET Radar Conference. Glasgow, UK: IET, 2012.
- [10] VILLANO M, KRIEGER G, MOREIRA A. Staggered SAR: High-Resolution wide-swath imaging by continuous PRI variation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 4462-4487.
- [11] WU Yue, LI Chun-sheng, YANG Wei, et al. Effects of PRF variation on SweepSAR imaging quality[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 2271-2275.
- [12] ZHANG Yan, YU Ze, LI Chun-sheng. Effects of PRF variation on Space-borne SAR imaging[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing (IGARSS). Melbourne, Australia: IEEE, 2013.
- [13] 李德鑫, 孙造宇, 何峰, 等. 一种方位时变GEO SAR成像处理新算法[J]. 宇航学报, 2014, 35(9): 1065-1071.
LI Deng-xin, SUN Zao-yu, HE Feng, et al. A new algorithm for azimuth-variant GEO SAR imaging[J]. Journal of Aerospace, 2014, 35(9): 1065-1071.

编辑 税红