基于多通道天线高分辨率星载 SAR 实现方法研究

梁维斌 李春升 周荫清
(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 对基于多通道天线实现高分辨率星载 SAR 的方法进行了深入研究,建立了三通道天线 SAR 的回波信号模型,提出了一种回波处理方式,将单发三收模式下的回波数据转变为传统的单发单收模式下的回波数据,可用常规条带式成像方法进行成像处理. 对采用多通道天线实现高分辨率星载 SAR 涉及到的脉冲重复频率 PRF 偏离问题进行了深入分析和研究,推导出 PRF 偏离造成的虚假目标的理论位置和虚假目标与真实目标的峰值功率比值,计算机仿真试验证明了上述内容的有效性.

关 键 词: 高分辨率; 多通道天线; 星载 SAR; 脉冲重复频率; 虚假目标
中图分类号: TN 957
文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2004)09-0826-05

High resolution spaceborne SAR implementation method based on multiple phase centres antenna

Liang Weibin Li Chunsheng Zhou Yinqing
(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An implementation method of high resolution spaceborne SAR based on multiple phase centres (MPC) antenna was studied, especially to the tri-phase centers antenna, as can effectively resolve the impact of resolution and swath extension. The echo signal model was proposed, and a method of processing the echo signal was discussed. In this method, the echo was transformed to the standard echo as usual one phase central antenna, which can be processed by traditional strip-mode imaging algorithm. The PRF departure's influence on imaging performance was also deeply studied and the false target's position and relative magnitude was given. The result of computer simulation proves the validity of the content.

Key words: high resolution; multiple phase centres(MPC) antenna; spaceborne SAR; PRF; false target

随着空间对地观测要求的不断提高,高分辨率星载 SAR 成为竞相发展的热点. SAR 的分辨率分为距离分辨率和方位分辨率,其中方位分辨率是由雷达回波多普勒带宽决定的,高的方位分辨率要求宽的多普勒带宽. 方位向的脉冲重复频率(PRF)的选取要满足采样定理,因此高的方位分辨率就要求高的 PRF. 对于 SAR 方位向脉冲重复频率和测绘带宽度之间又存在近似反比的制约关系[1],因此提高方位分辨率和扩展测绘带宽度之间就存在一对矛盾,而这种矛盾对高分辨率星载 SAR 尤显突出. 例如对于条带式星载 SAR,分辨率是 10 ~ 30 m,观测带宽度为 80 ~ 100 km 左右[2]. 若提高到 5 m 分辨率,观测带宽度降低到 50 km 左右,如果分辨率提高到 1 m,观测带宽度将降低到 10 km 左右,这明显限制了星载 SAR 的观测能力.

收稿日期: 2003-06-18
作者简介: 梁维斌(1976-),男,山西临猗人,硕士生, lwb4728@tom.com.

为了解决星载 SAR 高分辨率和宽测绘带的矛盾,国外提出一种解决矛盾的新模式:多通道天线星载 SAR[3],本文采用三通道天线. 查阅国内外多种资料文献,这种方案处于初期研究阶段,本文基于这种方案,对涉及到的一些技术进行了深入研究.

1 多通道天线 SAR 原理和信号模型

1.1 原理

三通道天线 SAR 发收过程原理图[3]见图 1.

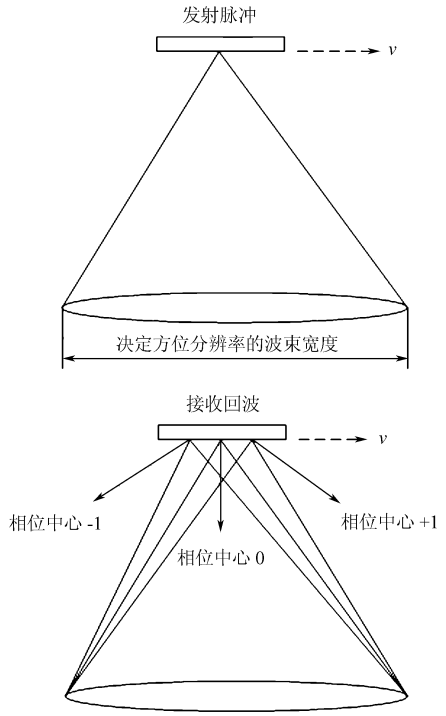


图 1　三通道天线 SAR 发收回波原理图

从上面的原理图可以看出,发射一个脉冲就可以在不同相位中心共接收到 N 个回波,相当于原来发射了 N 个脉冲,即等效的 PRF 为实际发射的 PRF 的 N 倍,即 $f_{\text{peff}}=N\cdot f_{\text{p}}$,这里 $N=3$.

通过这种多通道天线,在保证一定的分辨率的情况下,可以降低 PRF,从而扩展了测绘带的宽度,解决了星载 SAR 的高分辨率和宽测绘带的矛盾,提高了星载 SAR 的观测能力.

1.2 回波信号模型

在单发三收模式下,时刻 t_k 发射一个脉冲,脉冲重复频率为 f_{p},在各相位中心处(如图 1 示),点目标回波信号分别为

$$s_{-1}(\tau,t_k)=\sigma[h_{1,-1}(\tau,t_k)\otimes_\tau h_2(\tau)]$$
$$s_0(\tau,t_k)=\sigma[h_{1,0}(\tau,t_k)\otimes_\tau h_2(\tau)]$$
$$s_{+1}(\tau,t_k)=\sigma[h_{1,+1}(\tau,t_k)\otimes_\tau h_2(\tau)]$$

其中

$$h_{1,-1}(\tau,t_k)=W_{\text{a}}(t_k)\cdot \exp\left\{-\text{j}\frac{2\pi}{\lambda}\left[R(t_k)+R\left(t_k-\frac{d}{v}\right)\right]\right\}\cdot \delta\left[\tau-\frac{R(t_k)+R\left(t_k-\frac{d}{v}\right)}{c}\right]$$

$$h_{1,0}(\tau,t_k)=W_{\text{a}}(t_k)\exp\left\{-\text{j}\frac{4\pi}{\lambda}R(t_k)\right\}\delta\left[\tau-\frac{2R(t_k)}{c}\right]$$

$$h_{1,+1}(\tau,t_k)=W_{\text{a}}(t_k)\cdot \exp\left\{-\text{j}\frac{2\pi}{\lambda}\left[R(t_k)+R\left(t_k+\frac{d}{v}\right)\right]\right\}\cdot \delta\left[\tau-\frac{R(t_k)+R\left(t_k+\frac{d}{v}\right)}{c}\right]$$

$$h_2(\tau)=a(\tau)\exp\{-\text{j}\pi b\tau^2\}$$

式中,σ 为点目标雷达散射系数;b 为调频率;λ 为波长. 有 $t=kT_{\text{p}}+\tau$,$t_k=kT_{\text{p}}$,其中,t_k 为慢变化时间,也是时间 t 的采样(采样率为方位向脉冲发射频率 f_{p},即周期为 T_{p});τ 为快变化时间;$R(t_k)$ 为 t_k 时刻点目标到雷达的斜距;d,v 分别为多通道天线星载 SAR 的相位中心距离和卫星地面目标相对速度.

引入下面的近似式(对于一般星载 SAR 参数,下式的近似误差约为 10^{-7} m 量级)

$$R(t_k)+R\left(t_k\pm\frac{d}{v}\right)\approx 2R\left(t_k\pm\frac{d}{2v}\right)$$

上面回波公式可简化为

$$s_i(\tau,t_k)\approx\sigma\left[h_1\left(\tau,t_k+i\frac{d}{2v}\right)\otimes_\tau h_2(\tau)\right]\quad(1)$$

其中　　$i=-1,0,1$

$$h_1\left(\tau,t_k+i\frac{d}{2v}\right)=W_{\text{a}}(t_k)\cdot \exp\left\{-\text{j}\frac{4\pi}{\lambda}R\left(t_k+i\frac{d}{2v}\right)\right\}\cdot \delta\left[\tau-\frac{2R\left(t_k+i\frac{d}{2v}\right)}{c}\right]$$

$$h_2(\tau)=a(\tau)\exp\{-\text{j}\pi b\tau^2\}$$

下面将在这个回波模型的基础上研究三通道天线星载 SAR 的成像处理方法.

2 三通道天线星载 SAR 成像处理

在单发单收模式下,设脉冲重复频率为 $3f_{\text{p}}$,如果

$$\frac{v}{f_{\text{p}}}=\frac{3d}{2}\quad(2)$$

则在时刻 t_k 处相临的三个脉冲回波[2]有

$$S\left(\tau,t_k+i\frac{1}{3f_p}\right)=$$

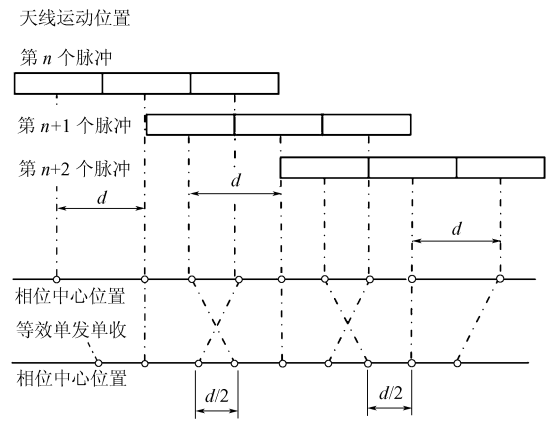
$$\sigma\left[h_1\left(\tau,t_k+i\frac{1}{3f_p}\right)\otimes_\tau h_2(\tau)\right]=$$

$$\sigma\left[h_1\left(\tau,t_k+i\frac{d}{2v}\right)\otimes_\tau h_2(\tau)\right]\approx s_i(\tau,t_k)\quad(3)$$

其中 $i=-1,0,1$.

所以,如果式(2)的条件满足,则单发三收模式情况下,相位中心距离为 d 的一组回波信号(式(1))可近似等于单发单收模式且脉冲重复频率为 $3f_p$ 情况下的相临三个回波信号(式(3)).

图 2 给出了满足转化条件式(2)的转化图示,(这里 PRF 为 f_p).



注:图中。表示相位中心位置.

图 2 天线运动位置和等效相位中心图

因此,可以把三通道天线星载 SAR 的回波数据转变为常规的单发单收模式情况下星载 SAR 的回波数据,从而可以用常规条带式成像方法进行成像处理.

下面给出满足式(2)条件的一组仿真结果.

仿真在假设距离向处理已经完成,距离徒动已经校正的条件下进行.

参数选择:

方位分辨率为 $\rho_a=1$ m

卫星速度 $v_a=7\ 500$ m/s

脉冲重复频率 $f_p=3\ 000$ Hz

相位中心距离 $d=1.666\ 7$ m

X 波段,波长为 $\lambda=0.03$ m

方位带宽为 $B_a=7\ 500$ Hz

在未进行加权处理并假设方位向天线为等增益情况下,仿真结果为

$$\rho_a=0.999\ \text{m}$$

$$I_{SRL}=-9.86\ \text{dB}$$

$$P_{SRL}=-13.26\ \text{dB}$$

3 PRF 偏离问题影响的仿真

上面仿真结果是在满足式(2)的条件下得出的,式中要求卫星与地面目标相对速度和脉冲重复频率 f_p 之间存在固定的关系,而实际上这种要求很难满足. 往往是要求的 PRF(设为 f_p,是随速度 v 变化的)与实际的 PRF(设为 F_p,是不随速度 v 变化的)是有一定偏差的,因为卫星速度是随时间不断变化的. 这种偏差反映在等效单发单收回波数据上是:由每同一方位脉冲接收的每三个回波其等效 PRF 为 $3f_p$,而实际的发射方位脉冲的频率是 F_p,而 $3f_p\neq 3F_p$,因此等效单发单收回波数据不是从方位向等间隔采样的结果. 这势必对成像造成一定的影响. 下面通过仿真来研究这种影响的程度.

下面给出在 3 中仿真条件和参数的情况下,星载 SAR 相对速度 v 保持不变(即由式(2)求得的 PRF 为 f_p,它保持不变),而实际的 PRF 为 F_p 连续变化时,各种性能指标与 PRF 的变化因子 m 的关系(注:实际的情形正好相反,但只研究它们的相对变化,因此并不影响结果的仿真.). 其中有

$$F_p=mf_p\quad(4)$$

注:m 的变化范围不能太大,一般有 $|m-1|\leqslant 0.10$.

仿真结果如图 3 ~ 图 6 所示.

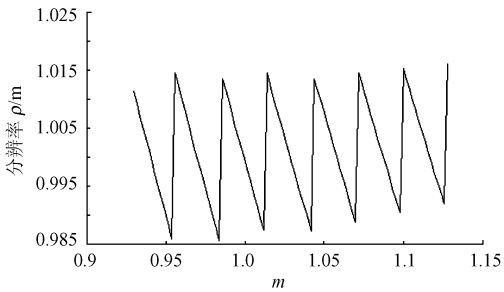


图 3 分辨率与 PRF 的变化因子 m 的关系图

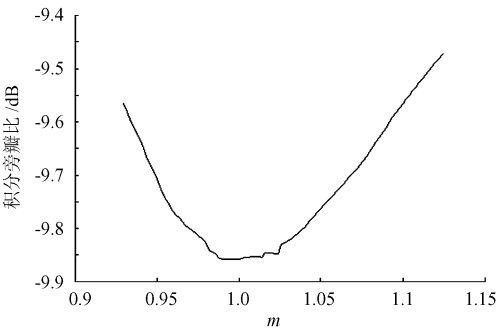


图 4 积分旁瓣比与 PRF 的变化因子 m 的关系图

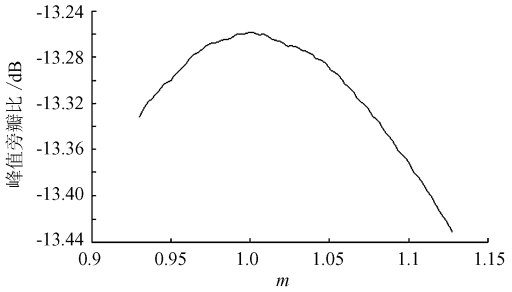


图 5　峰值旁瓣比与 PRF 的变化因子 m 的关系图

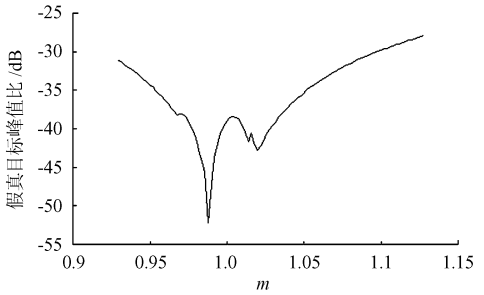


图 6　假真目标峰值比 Prft 与 PRF 的变化因子 m 的关系图

从以上仿真结果可以看出,F_p 偏离 f_p 会对方位压缩的性能造成不利的影响. 当变化范围在 10% 以内时对分辨率、积分旁瓣比、峰值旁瓣比的影响都比较小,而一个比较显著的影响是脉压后出现虚假目标. 本文推导出出现虚假目标的位置和虚假目标与真目标峰值功率比. 下面给出推导的结果.

4　PRF 偏差造成的虚假目标

设实际的 PRF 为 F_p,f_R 方位调频率,f_p 为要求的固定的 PRF. 且有 $F_p = mf_p$,$\frac{1}{f_p} = \frac{3d}{2v}$. 则在单发三收模式且为正侧视时,假设距离压缩已经完成,距离徒动已经校正,三通道天线星载 SAR 的点目标回波可表示为

$$s(k\tau_p) = \exp\{-j\pi f_R(k\tau_p + i\tau_e)^2\} \qquad (5)$$

其中

$$k = 3n + i \quad i = -1,0,1$$

$\tau_p = \frac{1}{3F_p}$,即实际 PRF 为 F_p,$\tau_e = \frac{d}{2v} - \tau_p$,且有 $|\tau_e| \ll \tau_p$,d,v 分别为多通道天线星载 SAR 的相位中心距离和卫星与地面目标相对速度. τ_e 是 $f_p \neq F_p$ 或 $m \neq 1$ 引入的误差项.

通过级数展开可以把式(5)分解为单发单收时的回波信号 $s_0(k\tau_p)$ 和由 $\tau_e \neq 0$ 引入误差信号 $s_e(k\tau_p)$ 的和的形式

$$s(k\tau_p) \approx s_0(k\tau_p) + s_e(k\tau_p)$$

经 $s_0(k\tau_p)$ 的匹配滤波器,可以得到下面形式的滤波结果

$$g(k\tau_p) = g_0(k\tau_p) + g_e(k\tau_p)$$

其中 $g_0(k\tau_p)$ 为单发单收时信号的脉压结果(真实目标像),$g_e(k\tau_p)$ 为由 PRF 偏离造成的误差信号 $s_e(k\tau_p)$ 成的虚假目标像. 经推导得到虚假目标偏离真实目标的位置和假真目标峰值功率比如下:

$$t = \pm\frac{F_p}{f_R} = \pm\frac{mf_p}{f_R}$$

$$r_{db} \approx 20\log\left\{\frac{b_1 T_s \omega_e}{480}\left[\frac{40 - (T_s\omega_e)^2}{3}\right]^{\frac{3}{2}}\right\} \qquad (6)$$

其中,$b_1 = 0.581\ 5$;T_s 为合成孔径时间;$\omega_e = 2\pi f_R \tau_e = 2\pi f_R \frac{m-1}{3mf_P}$.

在 3 中仿真参数的情况下,测的假目标位置和式(6)给出的完全一致,按式(6)计算出的假真目标峰值功率比与 PRF 的变化因子 m 的关系如图 7 所示,而实测结果如图 6 所示. 比较两图,在 $m = 0.97 \sim 1.03$ 时差别较大,这是由于在这个范围内虚假目标峰值并不突出(小于-38 dB),实测中很难区别开虚假目标和真实目标的旁瓣造成的. 而在这个范围之外实测的结果与式(6)计算的结果能很好地吻合,误差为 1 dB 左右.

关于虚假目标对系统总体性能的影响将会在后续文章中进行讨论.

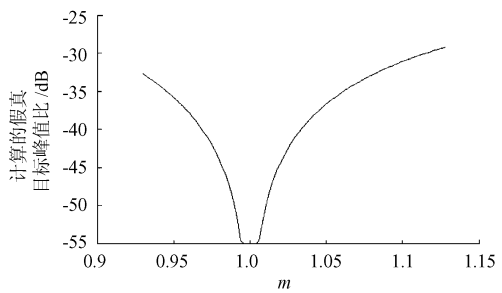


图 7　计算的假真目标峰值比 Prft 与 PRF 的变化因子 m 的关系图

5　总　结

通过上面的分析和仿真,可以看出,可以将多通道天线星载 SAR(单发三收模式)的回波数据转化为一定条件下的单发单收的回波数据,进而可以用传统的成像处理方法进行成像处理. 由于卫星速度的变化造成脉冲重复频率的偏离对方位向的脉压性能会造成一定的影响,在变化范围在 10% 以内时对分辨率、积分旁瓣比、峰值旁瓣比的影响都比较小,而比较大的影响是形成了虚假目

标,本文给出了其出现的位置和幅度大小,这有利于对其进行识别和处理. 通过本文的研究,同时论证了多通道天线星载 SAR 可以一定程度的解决星载 SAR 高分辨率和宽测绘带的矛盾,提高对地观测能力.

参考文献 (**References**)

[1] 张澄波. 综合孔径雷达:原理、系统分析与应用[M],北京:北京科学出版社,1989. 86 ~ 98
Zhang Chengbo. Synthetic aperture radar: theory, system analysis and application[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1989. 86 ~ 98(in Chinese)

[2] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京:科学出版社,2001. 1 ~ 7,154 ~ 157
Wei Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001. 1 ~ 7, 154 ~ 157(in Chinese)

[3] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR[J]. IEEE Proceedings-F, 1992, 139(2): 122

[4] 刘永坦. 雷达成像原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999
Liu Yongtan. Radar imaging theory[M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 1999(in Chinese)

[5] 黄 岩. 高分辨率星载合成孔径雷达成像处理技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学电子工程系,1999
Huang Yan. Study of high resolution spaceborne SAR inaging algorithm[D]. Beijing: Dept. of Electronic, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999(in Chinese)

[6] Wu Chialin, Jin Michael. Modeling and a correlation algorithm for spaceborne SAR signals[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1982, AES-18(5)

我校 5 项专利获国际发明展览会发明奖

第五届中国国际发明展览会于 2004 年 9 月 10 日至 13 日在上海隆重举行。此次展览会以“创新、交流、发展”为宗旨,吸引了来自全国各省市自治区、国务院有关部委以及国外众多展团参展。展览展示最新发明成果 1100 多项,这些项目都是经过有关部门推荐和筛选的,大部分项目技术比较成熟,具有较好的市场前景,很多项目已获得了专利权。在开幕式上中国发明协会理事长倪志福、中国发明协会常务副理长聂力等领导来到北航展台并仔细了解有关项目的具体应用情况。

为鼓励我国发明专利事业蓬勃发展,促进发明成果的推广应用,国防科工委组织了北航等 5 所高校参展,其中我校共有 7 个发明项目参展。

本次展览组委会特设立发明奖。经过有关专家严格评审,我校共有 5 项专利成果获奖,其中金奖 2 项,银奖 1 项,铜奖 2 项。2 项发明金奖分别是王田苗教授的“稳定性优先的仿鱼推进水下机器人”和周贤宾教授的“高精度反射器面板精密成形技术”;王华明教授的发明成果“一种高温耐磨耐蚀金属硅化物合金材料”获得银奖,张佐光教授的发明“一种复合材料高效高强度承力防弹板”和赵沁平教授的“数字博物馆”分别获得铜奖。通过此次参展,说明北航在发明专利成果方面具有较强的竞争实力。

摘自《北航》报第 636 期