DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2006.04.016
2006年 4月 北京航空航天大学学报 April 2006
第32卷 第4期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.4

高分辨率多通道天线星载SAR的MCCS成像算法

王鹏波 周荫清 陈 杰 李春升

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在分析经典条带成像算法在处理高分辨率多通道天线星载SAR(Synthetic Aperture Radar)回波信号方面局限性的基础上,提出适用于高分辨率多通道天线星载合成孔径雷达的多通道Chirp Scaling成像算法(MCCS, Multi-channel Chirp Scaling Algorithm).该算法利用补偿滤波器组来实现从高分辨率多通道天线星载SAR回波数据到传统条带SAR回波数据的等效转换,利用Chirp Scaling原理实现精确聚焦,进而从根本上摆脱了分布相位中心(DPC,Displaced Phase Center)等效条件对高分辨率多通道天线星载SAR的约束.最后通过计算机仿真结果验证了该算法的有效性.

关 键 词: 合成孔径雷达; 高分辨率; 雷达回波; 成像

中图分类号: TN 957

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0440-05

Multi-channel Chirp Scaling algorithm for high-resolution multi-channel antenna space-borne SAR imaging

Wang Pengbo Zhou Yinqing Chen Jie Li Chunsheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the analysis of the limitation that exists in the traditional imaging algorithms when processing the echo of high resolution multi-channel antenna space-borne SAR(Synthetic Aperture Radar), a novel MCCS (multi-channel Chirp Scaling algorithm) for high resolution multi-channel antenna space-borne SAR imaging is developed. The algorithm uses a filter banks to realize the conversion from the echo of high resolution multi-channel antenna space borne SAR to the echo of strip map SAR. When the filter banks are designed properly, the conversion is strictly equivalent. the ambiguity that caused by inadequately sampling can be completely avoided, and the dependence on DPC(displaced phase center) equivalent condition can be completely removed. But when using the traditional imaging algorithms, the DPC equivalent condition should be strictly satisfied. Then using the Chirp Scaling principle to accomplish imaging, and the precise focusing picture can be realized. Finally, the computer simulation showed the validity of the algorithm.

Key words: synthetic aperture radar; high resolution; radar echo; imaging algorithm

随着空间对地观测要求的不断提高,高分辨率、宽观测带星载合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)系统已经成为各国竞相发展的热点.对于传统星载SAR系统来说,方位分辨率与观测带宽度之间存在近似反比的关系[1],无法同时获得高分辨率和宽观测带.多通道模式[2]很好的缓解了这一矛盾.它利用时空等效原理,通过在空间上的增采样来实现时间采样率的降低,进而在不影响观测带宽度的前提下提高方位分辨率.

目前关于多通道天线星载SAR的文献较多,但大部分都是介绍利用多通道天线星载SAR模式来实现动目标检测.文献[2]论述了利用多通道天线模式实现高分辨率、宽观测带星载SAR的方法,并指出"当满足分布相位中心(DPC,Displaaced Phase Center)等效条件时,多通道天线星载SAR回波数据可近似等效为条带SAR回波数据".在

收稿日期: 2005-04-20

作者简介: 王鹏波(1979—),男,江西波阳人,博士生, wangpb7966@eyou.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

这一研究基础上,文献[3]提出了利用经典条带成像算法来处理高分辨率多通道天线星载 SAR 的回波信号,然而这种算法依赖于 DPC 等效条件的成立.本文针对高分辨率多通道天线星载 SAR 回波信号的特点,提出适用于高分辨率多通道天线星载 SAR 的 MCCS(Multi-channel Chirp Scaling Algorithm)成像算法,该算法利用补偿滤波器组来实现两种模式回波数据的等效转换,进而摆脱了对 DPC 等效条件的依赖,对于简化系统设计、保证成像质量都起到了积极的作用.

1　多通道天线星载 SAR 信号模型

图 1 给出了高分辨率多通道天线星载 SAR 的空间几何关系[2].

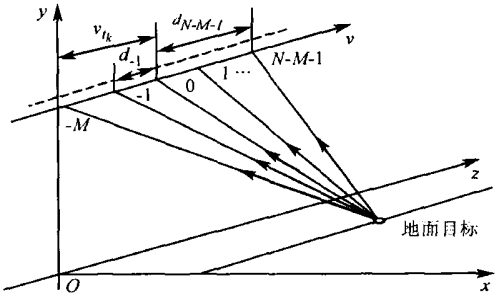


图 1　多通道天线星载 SAR 的空间几何关系

如图 1 所示,在沿卫星飞行方向分布了 N 个子天线,其中 0 为发射/接收子天线的相位中心,为接收子天线的相位中心,$i=-M,\cdots,-1,1,\cdots,N-M-1$,每个接收子天线的相位中心与发射/接收子天线相位中心间的间距为 d_i.发射时,雷达通过发射/接收子天线向地面发射线性调频信号,接收时,N 个子天线分别接收来自地面的散射回波信号.各天线接收到的回波信号可以表示为

$$s_i(\tau,t_k)\cong\sigma[h_{1,i}(\tau,t_k)\otimes_\tau h_2(\tau)] \tag{1}$$

其中

$$h_{1,i}(\tau,t_k)=W_a(t_k)\cdot\exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\left[R(t_k)+R\left(t_k-\frac{d_i}{v}\right)\right]\right\}\cdot\delta\left[\tau-\frac{R(t_k)+R\left(t_k-\frac{d_i}{v}\right)}{c}\right] \tag{2}$$

$$h_2(\tau)=a(\tau)\exp\{-j\pi b\tau^2\} \tag{3}$$

式中　$\otimes_\tau$ 表示对 τ 进行卷积;b 表示调频率;λ 表示波长;c 表示光速;$R(t)$ 为 t 时刻天线相位中心与地面目标间的斜距;v 表示卫星速度.

将 $R(t)\approx R_0+\frac{\lambda}{2}\left(f_d t+\frac{1}{2}f_r t^2\right)$ 带入(1)式,则方位向冲激响应可改写为

$$h_{1,i}(\tau,t_k)=W_a(t_k)\cdot\exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\left[2R\left(t_k-\frac{d_i}{2v}\right)+\frac{\lambda f_r d_i^2}{8v^2}\right]\right\}\cdot\delta\left[\tau-\frac{2R\left(t_k-\frac{d_i}{2v}\right)}{c}-\frac{\lambda f_r d_i^2}{8cv^2}\right] \tag{4}$$

忽略 Dirac 函数中 $\frac{\lambda f_r d_i^2}{8cv^2}$ 项的影响,各天线接收到的回波信号可看成是传统条带 SAR 回波信号通过系统传递函数为 $H_i(j\omega)=\exp\left(-j\frac{d_i}{2v}\omega\right)\cdot\exp\left(\frac{-\pi f_r d_i^2}{4v^2}\right)$ 的传递系统后,降采样所得到的结果.

对于高分辨率多通道天线星载 SAR 的回波信号,常规的处理方法[3]是在补偿相位误差 $\frac{\pi f_r d_i^2}{4v^2}$ 后,将各天线接收的回波信号依次交替放置,此时该信号可等效为天线长度等于子天线长度,脉冲重复频率为 $N\cdot f_{PRF}$ 的传统条带 SAR 回波信号,进而可以采用经典条带成像算法来处理合成后的回波数据.该处理方法成立的条件如下.

1) 相邻相位中心的间距 d 相等,即

$$d_i=i\cdot d \tag{5}$$

2) 满足 DPC 等效条件,即

$$\frac{1}{N\cdot f_{PRF}}=\frac{d}{2v} \tag{6}$$

这两个条件的引入一方面加大了系统设计的难度,使得整个系统的设计变得更加复杂,另一方面考虑到等式中各参数自身的相对独立性(卫星的速度受轨道高度的影响,脉冲重复频率则是在波位设计时确定,各天线相位中心的间距也会受到设计、安装误差及天线形变等影响),很难保证在整个工作过程中等式条件都得到满足.当等式条件不满足时,会造成回波信号在方位向出现周期性的非均匀采样,这相当于在等效信号中引入幅度误差和周期性相位误差,进而影响成像质量.因此消除成像处理对(5)式和(6)式的依赖对于优化系统设计、保证成像质量都具有十分重要的意义.

2　多通道星载 SAR 的 MCCS 算法

如图 2 所示,该算法包括两个部分:滤波器补偿处理和聚焦处理.通过滤波器补偿来实现两种

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

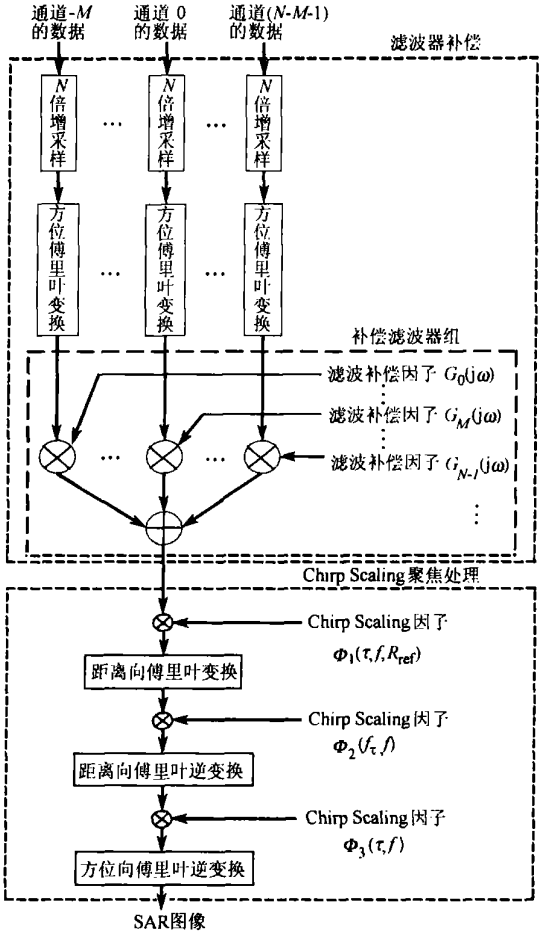


图 2 MCCS 成像算法流程图

模式回波数据的等效转换，进而摆脱(5)式和(6)式的约束，再利用 Chirp Scaling 原理来实现聚焦处理.

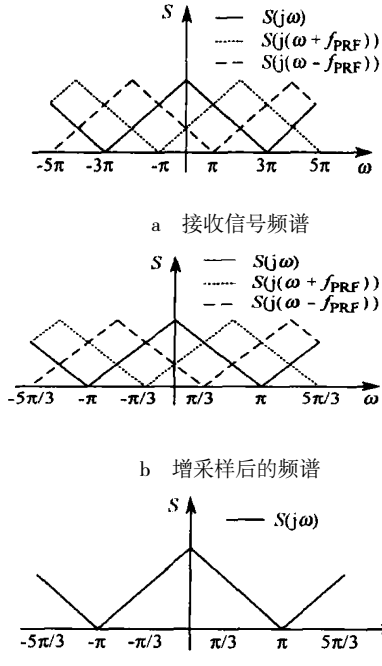
由(4)式可知，各天线接收到的回波信号可看成是传统条带 SAR 回波信号通过系统传递函数为

$$H_i(j\omega)=\exp\left\{-j\frac{d_i}{2v}\omega\right\}\cdot\exp\left\{-\frac{\pi f_r d_i^2}{4v^2}\right\}$$

的传递系统后，降采样所得到的结果.

由于脉冲重复频率的降低，使得每个天线接收到的回波信号均会发生频谱混叠.

若能利用 N 个接收天线接收到的回波信号来消除频谱混叠并重构出降采样前的信号频谱，就能实现从高分辨率多通道天线星载 SAR 回波信号到传统条带 SAR 回波信号的等效转换，这就是补偿滤波器组设计的原理. 图 3 以三通道为例，给出了滤波器补偿处理过程的示意图(注：图中三角形仅示意频谱所占范围，并不代表实际频谱).



a 接收信号频谱

b 增采样后的频谱

c 补偿后的频谱

图 3 滤波器补偿处理过程示意图

如图 3 所示，首先通过增采样来实现信号频谱扩展，此时在一个重复周期内，除了包含理想信号频谱外还包含了 N-1 个混叠过来的频谱. 然后通过补偿滤波器组来抑制混叠频谱的通过，进而恢复原始信号频谱. 如图 2 所示，通过补偿滤波器组后的回波信号可以表示为

$$\begin{bmatrix}S(j\omega)\\S(j(\omega+f_{PRF}))\\\vdots\\S(j(\omega+(N-1)\cdot f_{PRF}))\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sum_{i=0}^{N-1}\left[\sum_{k=0}^{N-1}S_0(j(\omega+k\cdot f_{PRF}))H_{-M+i}(j(\omega+k\cdot f_{PRF}))\right]\cdot G_{ik}(j\omega)\\\sum_{i=0}^{N-1}\left[\sum_{k=0}^{N-1}S_0(j(\omega+k\cdot f_{PRF}))H_{-M+i}(j(\omega+k\cdot f_{PRF}))\right]\cdot G_{ik}(j\omega)\\\vdots\\\sum_{i=0}^{N-1}\left[\sum_{k=0}^{N-1}S_0(j(\omega+k\cdot f_{PRF}))H_{-M+i}(j(\omega+k\cdot f_{PRF}))\right]\cdot G_{ik}(j\omega)\end{bmatrix}=$$

$$\boldsymbol{G}\cdot\boldsymbol{H}\cdot\begin{bmatrix}S_0(j\omega)\\S_0(j(\omega+f_{PRF}))\\\vdots\\S_0(j(\omega+(N-1)\cdot f_{PRF}))\end{bmatrix}\tag{7}$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中　$S_0(\mathrm{j}\omega)$为理想信号频谱;$S(\mathrm{j}\omega)$为重构频谱.

从(7)式可以看出当补偿滤波器矩阵满足式(8)时,通过补偿滤波器组后,便可恢复降采样前回波信号的频谱,实现从高分辨率多通道天线星载SAR 的回波信号到传统条带 SAR 回波信号的等效转换,该式也给出了各补偿滤波器传递据函数的构造方法.

$$\begin{bmatrix} H_{-M}(\mathrm{j}\omega) & H_{-M+1}(\mathrm{j}\omega) & \cdots & H_{N-M-1}(\mathrm{j}\omega) \\ H_{-M}(\mathrm{j}(\omega+f_{\mathrm{PRF}})) & H_{-M+1}(\mathrm{j}(\omega+f_{\mathrm{PRF}})) & \cdots & H_{N-M-1}(\mathrm{j}(\omega+f_{\mathrm{PRF}})) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{-M}(\mathrm{j}(\omega+(N-1)\cdot f_{\mathrm{PRF}})) & H_{-M+1}(\mathrm{j}(\omega+(N-1)\cdot f_{\mathrm{PRF}})) & \cdots & H_{N-M-1}(\mathrm{j}(\omega+(N-1)\cdot f_{\mathrm{PRF}})) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_{0,0}(\mathrm{j}\omega) & G_{1,0}(\mathrm{j}\omega) & \cdots & G_{N-1,0}(\mathrm{j}\omega) \\ G_{0,1}(\mathrm{j}\omega) & G_{1,1}(\mathrm{j}\omega) & \cdots & G_{N-1,1}(\mathrm{j}\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{0,N-1}(\mathrm{j}\omega) & G_{1,N-1}(\mathrm{j}\omega) & \cdots & G_{N-1,N-1}(\mathrm{j}\omega) \end{bmatrix} = \boldsymbol{I} \tag{8}$$

通过滤波器补偿后,回波数据已近似等效为传统条带SAR 回波数据,此时可采用 Chirp Scaling 原理来完成距离和方位聚焦,具体步骤参见文献[4].

3　计算机仿真

3.1　仿真参数

仿真参数见表 1.

表 1　仿真参数

参数	λ/m	B_w/MHz	N	d/m	D/m
数值	0.03	300	5	1.7	1.7

3.2　仿真结果

为验证成像算法的有效性,下面将从两个方面来进行仿真验证:

1) 调整脉冲重复频率,分别采用 CS 算法和本文所提出的 MCCS 算法进行成像仿真,对比仿真结果,进而验证 MCCS 算法的有效性;

2) 在地面场景的近距、中心和远距处布置点阵目标,通过回波仿真、成像处理及质量评估来验证 MCCS 算法能够实现场景内的一致成像.

成像处理中距离向采用均匀权函数,方位向采用系数为 1/3 的简化泰勒权.

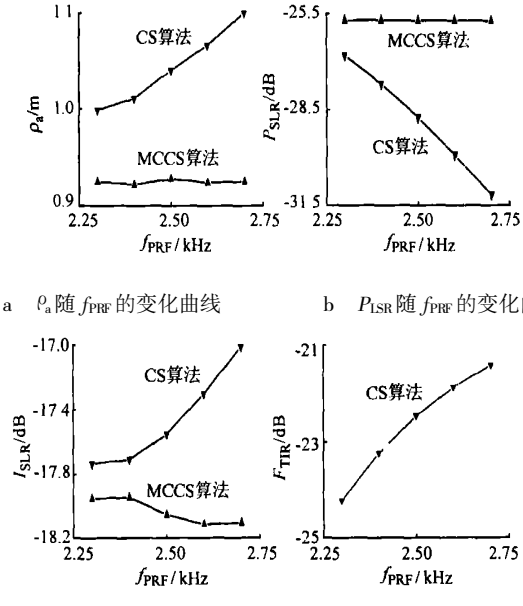
3.2.1　点目标仿真

将表 1 中所列的参数带入式(4)可知,在上述参数不满足 DPC 等效条件,此时若采用经典条带成像算法来处理该数据,在成像结果中会引入虚假目标,进而造成主瓣能量的泄漏,影响成像质量.为了定量的衡量虚假目标对主瓣能量的影响,本文中引入假真目标积分能量比(F_{TIR})来衡量虚假目标对主瓣能量的影响,其定义为

$$F_{\mathrm{TIR}} = 10\log\frac{E_{\mathrm{f}}}{E_{\mathrm{t}}}$$

式中　E_{f} 和 E_{t} 分别表示虚假目标能量和理想目标信号主瓣能量.

根据表 1 中的仿真参数,采用本文中所提出的 MCCS 算法和 CS 算法来进行成像仿真对比实验.图 4 给出了各项图像质量指标随脉冲重复频率的变化曲线.图 4 中 f_{PRF} 为脉冲重复频率;ρ_{a} 为方位向分辨率;P_{LSR} 峰值旁瓣比;I_{SLR} 为积分旁瓣比.



a　ρ_{a} 随 f_{PRF} 的变化曲线　　b　P_{LSR} 随 f_{PRF} 的变化曲线

c　I_{SLR} 随 f_{PRF} 的变化曲线　　d　F_{TIR} 随 f_{PRF} 的变化曲线

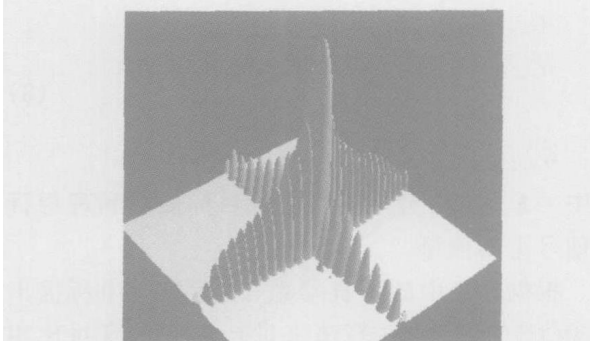
图 4　成像处理结果随 f_{PRF} 的变化曲线

从该组曲线中可见看出,在CS 算法的处理结果中出现波束展宽的现象,虽然峰值旁瓣比有所降低,但由于虚假目标的引入造成主瓣能量的泄漏,使得积分旁瓣比有所降低,其成像质量随 DPC 等效条件的偏离程度而改变,而 MCCS 算法不依赖于 DPC 等效条件,能够很好的避免上述情况的出现,且成像质量具有较好的一致性.

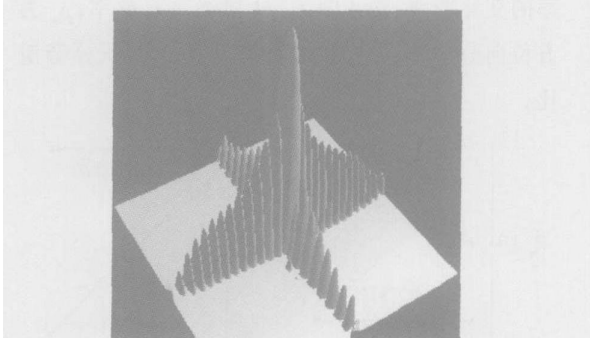
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.2.2 点阵目标仿真

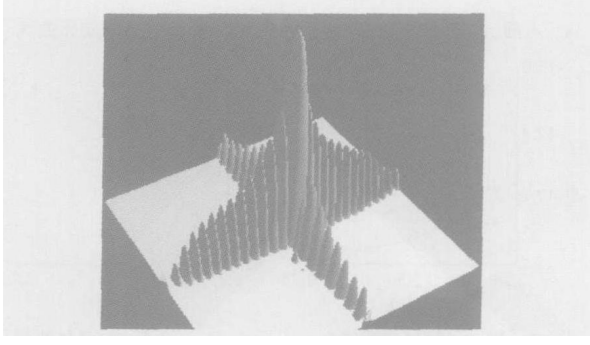
分别在地面场景的近距(−10 km),中心(0 m)和远距(10 km)布置3×3的点阵目标,通过回波仿真及成像处理来验证该算法的有效性.图5给出了各点阵中心点的三维处理结果.表2给出了各点阵的质量评估结果,其中各项指标均为9点平均结果.上述仿真结果表明该成像算法能够实现在观测带宽度内一致成像.



a 中心点



b 近距点



c 远距点

图5 点阵中心点的三维结果

表2 点阵目标图像质量评估结果

位置	ρ_a/m	P_{SLR}/dB	I_{SLR}/dB
近距点阵	0.928	−25.723	−18.271
中心点阵	0.928	−25.717	−18.061
远距点阵	0.928	−25.717	−18.247

4 结 论

高分辨率多通道天线星载SAR通过空间上的增采样来降低时间上的采样率,进而在不影响观测带宽度的情况下实现方位分辨率的提高.本文在建立高分辨率多通道天线星载SAR回波信号模型的基础上,分析了经典条带模式成像算法在处理该回波信号方面的局限性,并提出适用于高分辨率多通道天线星载SAR的MCCS成像算法,该算法利用补偿滤波器组来实现两种模式回波数据的等效转换,进而摆脱了DPC等效条件对高分辨率多通道天线星载SAR的约束,对于简化系统设计,保证成像质量都具有十分重要的意义.

参考文献 (References)

[1] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar systems and signal processing[M]. New York: John Wiley, 1991

[2] Heer M, Grafmueller B, Zahn R. A novel high resolution, wide swath SAR system[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 3: 1013～1015

[3] 梁维斌. 多通道天线高分辨率星载SAR技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学电子信息工程学院,2004
Liang Weibing. The studies of high resolution spaceborne SAR technique basedd on multiple phase centers antenna [D]. BeJing: Beihang University, School of Electronic and Information Engineering, 2004(in Chinese)

[4] 魏钟铨.合成孔径雷达卫星[M].北京:科学出版社, 2001.153～187
Wei Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite [M]. Beijing: Science Publishing House, 2001.153～187(in Chinese)

[5] 陈志愿,齐向阳,李建雄. 浅谈星载多相位中心方位向多波束SAR方位向非均匀采样信号的重构算法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26: 195～201
Chen Zhiyuan, Qi Xiangyang, Li Jianxiong. Elementary introduction of the reconstruction of nonuniformly sampled signals in azimuth of displaced phase centres multi-beam in azimuth spaceboene synthetic aperture radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2004, 26: 195～201(in Chinese)

[6] Nohara T J. Derivation of a 3-channel DPCA/Monopulse radar using phased array [J]. IEEE National Telesystems Conference, 1994. 243～249

[7] Brown J L. Multi-channel sampling of low-pass signal [J]. IEEE Trans Circuits Syst, 1981, 28: 101～106

[8] Johansson H, Lowenborg P. Reconstruction of nonuniformly sampled band-limited signals by means of digital fractional delay filters[J]. IEEE Trans, 2002, 50: 2757～2767

[9] Blum R S, Melvin W L, Wicks M C. An analysis of adaptive DPCA [C]. IEEE Radar Conference, 1996. 303～308

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net