

文章编号: 1001- 2486(2009) 02- 0064- 06

三维分布式星载 SAR 多星联合成像方法*

赖 涛, 杨科锋, 董 臻, 梁甸农

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 分布式小卫星 SAR 天线面小, 存在严重的多普勒模糊, 联合处理多颗卫星的回波可以有效消除模糊, 实现高分辨宽测绘带成像。以一发双收的分布式构型为例, 建立其回波信号模型并分析了两路回波信号之间的关系, 在补偿由切航向基线引起的包络差和部分相位差后, 得到两路回波信号频谱之间关系的解析表达式。根据回波谱之间的关系, 设计加权函数, 消除了回波的方位模糊, 最后采用传统成像算法完成成像。

关键词: 分布式星载 SAR; 切航向基线; 方位解模糊

中图分类号: TN958 文献标识码: A

A United Imaging Method for 3-D Distributed Space-borne SAR

LAI Tao, YANG Ke-feng, DONG Zhen, LIANG Dian-nong

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For a 3-D distributed space-borne SAR, small area antenna leads to serious Doppler ambiguity. Joint processing of all echoes from multiple antennas is able to eliminate Doppler ambiguity and obtain high resolution and wide swath. This paper firstly builds the echo model for the formation of one transmitting and two receivings. Then the relationship between the two received echoes is analyzed. After compensation for envelope difference and part of phase difference, the analytic expression which describes the frequency spectrum relationship between two echoes can be obtained accordingly. Based on this equation, two weight functions are designed to eliminate the Doppler ambiguity. Finally, a conventional imaging algorithm is used to get SAR images.

Key words: distributed space-borne SAR; baseline across track; eliminating Doppler ambiguity

传统星载合成孔径雷达受到最小天线面积的限制, 不能同时获取方位高分辨和距离宽测绘带。采用方位向多个接收天线可以有效缓解这个矛盾^[1-10]。严格沿航向排列的多个天线(卫星)具有最好的成像和 GMTI 能力。然而, 星载分布式 SAR 通常要求具有地面高程测绘功能, 卫星之间需存在较大的切航向基线, 形成三维分布构型。

切航向基线的存在, 使得各卫星观测几何结构不一致, 降低了不同卫星之间回波的相关性, 给成像带来了非常不利的影 响。首先, 各个卫星之间的数据存在严重的由切航向基线引起的包络误差; 其次, 切航向基线的存在, 导致了同一目标到不同卫星之间的相位差在一个孔径内存在严重的空变, 从而在进行相位补偿的时候更加复杂; 再次, 由于切航向基线的存在, 不同卫星对同一个目标的观测斜距不同, 导致不同卫星回波的方位调频率不一致。

文献[4-11]研究了线性排列的多个接收通道解方位模糊的问题。文献[12]以三维分布式 SAR 系统为例, 研究采用最大似然滤波和最小均方滤波来抑制成距离多普勒模糊, 但计算量巨大, 实际意义不大。文献[13]提出了一种空时频成像方法, 较好地补偿了由切航向基线引起的包络和相位误差, 利用多个回波的空域信息解多普勒模糊, 获得了较好的成像效果, 不过推导过程中采用多处近似, 在长切航向基线以及大测绘场景的条件下性能有所下降。

本文首先分析了各接收相位中心的回波历程, 补偿了由切航向基线导致的包络和相位差, 建立它们

* 收稿日期: 2008- 12- 28

基金项目: 国家部委基金资助项目(41307020203)

作者简介: 赖涛(1980-), 男, 博士生。

的方位谱之间的解析关系, 设计加权函数对各回波谱进行加权求和, 重建了无模糊回波, 然后采用传统成像算法完成成像。

1 分布式小卫星 SAR 回波模型

不失一般性, 以 2 个卫星组成的分布式系统为例, 2 颗星轨迹平行, 为一发双收结构。如图 1 所示, S_1 正侧视发射, S_1, S_2 同时接收, 设 S_1 坐标为 $(vt, 0, 0)$, S_2 坐标为 $(x_2 + vt, y_2, z_2)$, 其中 v 为卫星速度, t 为方位慢时间。设地面目标的坐标为 (x_n, y_n, z_n) , 考虑平坦地面, 则 $z_n = H$, 卫星 1 轨迹的垂直地距为 H 。则 S_1, S_2 接收的回波分别为

$$x(\tau, t) = \sum_n A_{1,n} p_r[\tau - 2R_1(t, n)/c] \times \exp[-j4\pi f_0 R_1(t, n)/c] \quad (1)$$

$$x'(\tau, t) = \sum_n A_{2,n} p_r\{\tau - [R_1(t, n) + R_2(t, n)]/c\} \times \exp[-j2\pi f_0 [R_1(t, n) + R_2(t, n)]/c] \quad (2)$$

τ 为距离快时间, f_0 为中心频率, 为分析简便, 假定 $A_{1,n} = A_{2,n} = A_n$, 即对同一个目标, 2 个卫星接收的回波具有相同幅度(观测几何近似的情况下基本满足)。式中 $p_r(\tau)$ 为发射信号。另有

$$R_1(t, n) = \sqrt{(x_n - vt)^2 + y_n^2 + z_n^2} \quad (3)$$

$$R_2(t, n) = \sqrt{(x_n - x_2 - vt)^2 + (y_n - y_2)^2 + (z_n - z_2)^2} \quad (4)$$

2 分布式小卫星 SAR 回波去相关分析和补偿

众所周知, 只有沿航向基线对成像有贡献, 而切航向基线用于 INSAR 测高程。因此首先应消除切航向基线的影响, 即对卫星 2 的数据进行相位和包络补偿, 从而将卫星 2 的轨迹平移到卫星 1 的轨迹上, 即保持沿航向基线不变, 使切航向基线等于零, 这样形成了沿航向的两个数据通道, 有利于成像处理。平移后 S_2 到目标的距离为

$$R_2'(t, n) = \sqrt{(x_n - x_2 - vt)^2 + y_n^2 + z_n^2} \quad (5)$$

则平移前后两者的历程相差

$$R_e(t, n) = R_2(t, n) - R_2'(t, n) = \sqrt{(x_n - x_2 - vt)^2 + (y_n - y_2)^2 + (z_n - z_2)^2} - \sqrt{(x_n - x_2 - vt)^2 + y_n^2 + z_n^2} \quad (6)$$

将上式在孔径中心时刻即 $t = x_n/v = t_n$ 处作泰勒展开, 并舍去 3 次以上高阶项(舍去误差, 后文将予以分析), 又因 $x_2 \ll y_n$ 和 z_n , 可近似为

$$R_e(t, n) \approx \left[\sqrt{x_2^2 + (y_n - y_2)^2 + (z_n - z_2)^2} - \sqrt{x_2^2 + y_n^2 + z_n^2} \right] + \left[\frac{-vx_2}{\sqrt{y_n^2 + z_n^2}} - \frac{-vx_2}{\sqrt{(y_n - y_2)^2 + (z_n - z_2)^2}} \right] (t - t_n) + \frac{1}{2} \left[-\frac{v^2}{\sqrt{y_n^2 + z_n^2}} + \frac{v^2}{\sqrt{(y_n - y_2)^2 + (z_n - z_2)^2}} \right] (t - t_n)^2 \quad (7)$$

R_e 为平移操作需要补偿的项。上式中, 第一项将导致需要补偿的包络差和固定相位差, 第二项将导致一次相位差, 第三项将导致二次相位差。

式(7)的第一项需要补偿两部分, 即包络补偿和相位补偿。随距离向空变的相位差的补偿可在距离时域完成, 对每一条距离线乘以以下补偿函数即可:

$$C_1(y_n, z_n) = \exp[j2\pi\lambda \cdot \{ \sqrt{x_2^2 + (y_n - y_2)^2 + (z_n - z_2)^2} - \sqrt{x_2^2 + y_n^2 + z_n^2} \}] \quad (8)$$

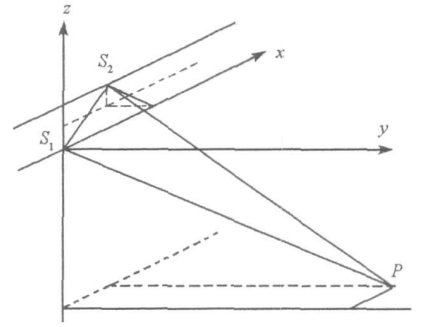


图 1 双星成像几何

Fig. 1 Imaging geometry of two satellites

再考虑包络的补偿。包络补偿通常在距离频域完成, 如果包络不随距离空变或者空变量远小于一个距离分辨单元, 则可以进行包络补偿。式(7)第一项需要补偿的包络随距离空变较严重, 须分割为子测绘再来处理。补偿方案为, 在二维时域, 将测绘带分成多个子测绘带, 使每个子测绘带内的包络差随距离变化小于四分之一距离单元, 子测绘带数据变换到距离频域, 乘以相同线性相位:

$$C_2(f_r, y_c, z_c) = \exp[j2\mathcal{Y}_r [\sqrt{x_2^2 + (y_c - y_2)^2 + (z_c - z_2)^2} - \sqrt{x_2^2 + y_c^2 + z_c^2}]] \quad (9)$$

其中, y_c, z_c 为子测绘带中心目标的坐标。

式(7)中的线性相位在方位频域的表现则为频移, 因为测绘几何结构没有随方位空变, 因此位于同一距离单元的所有目标的回波历程均相同, 线性相位移相同。补偿的方法为: 在将回波变换到方位频域后, 相应进行频谱循环移位即可完成补偿, 频谱移动量为

$$f_{\text{shift}}(y_n, z_n) = \frac{-wx_2}{\lambda} \left[\frac{1}{\sqrt{y_n^2 + z_n^2}} - \frac{1}{\sqrt{(y_n - y_2)^2 + (z_n - z_2)^2}} \right] \quad (10)$$

式(7)中的二次相位的补偿是最为关键也最为困难的。由于在方位频域存在模糊, 不能通过在频域乘以相应的二次相位函数来补偿; 在时域, 多个目标的混叠也使得无法有效补偿, 因此先不进行二次相位的补偿, 将这个问题带入下一步处理, 即设计合理的加权函数, 来消除二次相位的影响和解方位模糊。

卫星一的某条方位线(处于同一距离单元)信号可近似为(菲涅耳近似)

$$x(t) = \sum_n w_a(t - t_n) \times \exp[j\mathcal{Y}(k)(t - t_n)^2 + j2\mathcal{Y}_{dc}(t - t_n)] \quad (11)$$

而卫星二的某条方位线信号在完成常数相位和线性相位的补偿后, 并补偿常数相位^[11]

$$C_3(y_n, z_n) = \exp\left[j \frac{\mathcal{Y}_k x_2^2}{2\lambda \sqrt{y_n^2 + z_n^2}}\right] \quad (12)$$

后可以写为

$$x'(t) = \sum_n w_a(t - t_n + \Delta t) \times \exp[j\mathcal{Y}(k + \Delta k)(t - t_n + \Delta t)^2 + j2\mathcal{Y}_{dc}(t - t_n + \Delta t)] \quad (13)$$

其中 t_n 为目标 n 的孔径中间时刻, $w_a(\cdot)$ 为方位时域加权窗函数, 窗长为一个合成孔径时间长度; $k =$

$$-\frac{2v^2}{\lambda \sqrt{y_n^2 + z_n^2}}, \Delta k = \frac{v^2}{\lambda \sqrt{y_n^2 + z_n^2}} - \frac{v^2}{\lambda \sqrt{(y_n - y_2)^2 + (z_n - z_2)^2}}, \Delta t = \frac{x_2}{2v}。$$

将上两式作傅立叶变换: $x(t) \rightarrow X(w)$, $x'(t) \rightarrow X'(w)$, 两者之间有如下关系:

$$X'(w) = X(w) \times \exp(jw \Delta t + j \frac{\Delta k}{4\pi k^2} w^2) \quad (14)$$

3 回波解方位模糊方法^[14]

实际系统为实现较大的测绘带, 一般 PRF 会小于方位带宽, 因此两路回波均为欠采样信号, 也即存在方位模糊。在完成包络对齐和相位补偿之后, 卫星二的回波 $x'(t)$ 和卫星一的回波 $x(t)$ 将用来重建无方位模糊信号。通过联合处理两路信号, 消除方位模糊, 从而获得无模糊的回波信号, 然后采用传统成像算法完成成像。

设脉冲重复频率为 f_{PRF} , 则采样周期 $T = 1/f_{PRF}$, 双星离散回波信号的频谱分别为

$$Y_0(w) = \frac{1}{T} \sum_{m \in \mathcal{Z}} X(w - m \frac{2\pi}{T}) \quad (15)$$

$$Y_1(w) = \frac{1}{T} \sum_{m \in \mathcal{Z}} X'(w - m \frac{2\pi}{T}) = \frac{1}{T} \sum_{m \in \mathcal{Z}} X(w - m \frac{2\pi}{T}) e^{j(w - m \frac{2\pi}{T}) \Delta t} e^{j \frac{\Delta k}{4\pi k^2} (w - m \frac{2\pi}{T})^2} \quad (16)$$

其中 $X(w)$ 为 $x(t)$ 的傅立叶变换。对 2 个回波设计了 2 个加权函数 $F_0(w)$ 、 $F_1(w)$ 来消除方位模糊, 则两路信号加权求和后的频谱为

$$\hat{X}(w) = Y_0(w) F_0(w) + Y_1(w) F_1(w), \quad w \in [-2\pi/T, 2\pi/T] \quad (17)$$

由式(15)不难推导出

$$TY_0(w) = X(w) + X[w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}], \quad w \in [-2\pi/T, 2\pi/T] \quad (18)$$

其中 $\beta(w) = \begin{cases} 1, & w \in [0, 2\pi/T] \\ -1, & w \in [-2\pi/T, 0) \end{cases}$, 同理由式(16)可得

$$TY_1(w) = X(w) e^{jw\Delta t} e^{j\frac{\Delta k}{4\pi k^2} w^2} + X[w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}] e^{j[w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}]\Delta t} e^{j\frac{\Delta k}{4\pi k^2} [w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}]^2}, \quad w \in [-2\pi/T, 2\pi/T] \quad (19)$$

将式(17), (18)代入式(19)有

$$\begin{aligned} \hat{TX}(w) = & X(w) [F_0(w) + e^{jw\Delta t} e^{j\frac{\Delta k}{4\pi k^2} w^2} F_1(w)] + X[w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}] [F_0(w) \\ & + e^{j[w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}]\Delta t} e^{j\frac{\Delta k}{4\pi k^2} [w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}]^2} F_1(w)], \quad w \in [-2\pi/T, 2\pi/T] \end{aligned} \quad (20)$$

只需恢复位于 $[-2\pi/T, 2\pi/T]$ 区间的谱, 因此令 $F_0(w) = F_1(w) = 0, w \notin [-2\pi/T, 2\pi/T]$, 为无失真地恢复出原信号的谱, 式(20)还需满足:

$$\begin{cases} F_0(w) + e^{jw\Delta t} e^{j\frac{\Delta k}{4\pi k^2} w^2} F_1(w) = T \\ F_0(w) + e^{j[w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}]\Delta t} e^{j\frac{\Delta k}{4\pi k^2} [w - \beta(w) \frac{2\pi}{T}]^2} F_1(w) = 0 \end{cases}, \quad w \in [-2\pi/T, 2\pi/T] \quad (21)$$

解上面方程组可以得到 $F_0(w), F_1(w)$ 的解析表达式。

据上分析, 将整个信号处理的过程总结为两大部分: 第一大部分对非参考星信号进行补偿, 补偿其与参考星信号的去相关部分; 第二大部分对两颗星的信号进行联合处理, 重构无方位模糊回波。

(1) 第一部分, 卫星二数据处理

步骤 1, 在距离向上将回波分成多个子测绘带回波, 并变换到距离频域, 乘以时移因子 $C_2(f_r, y_c, z_c)$, 完成包络补偿, 同时乘以距离参考函数, 然后变换到距离时域, 完成距离压缩。

步骤 2, 在二维时域, 补偿随距离空变的相位, 方法为对每条距离线(某个脉冲的回波)乘以相位补偿因子 $C_1(y_n, z_n)$ 和 $C_3(y_n, z_n)$ 。

步骤 3, 将回波变换到距离多普勒域, 在多普勒域进行频谱循环移动, 频移量为 $f_{diff}(y_n, z_n)$ 。

(2) 第二部分, 双星数据联合处理

步骤 1, 在距离多普勒域, 对参考星的数据在方位维左移 PRF/2 或右移 PRF/2, 再分别左右互换, 形成两个维数与原矩阵相同的矩阵, 然后合并成一个矩阵, 其中方位维维数翻倍(即方位采样率翻倍); 对卫星二数据做相同操作。

步骤 2, 构造两个加权函数, 将步骤 1 获得的 2 个矩阵分别与对应的加权函数相乘, 然后二者相加, 即可获得无方位模糊的距离多普勒谱。

4 仿真和结果分析

以一发双收结构为仿真对象, 卫星一既发且收, 坐标为 (0, 0, 0), 卫星二只接收, 坐标为 (1500, 75, 1000, 1000), 其它参数见表 1。式(7)中一次项和二次项示于图 2, 包络的变化范围小于四分之一距离单元, 包络无需补偿, 不过与波长可比拟, 因此相位必须补偿。式(7)作泰勒展开舍去的 3 次及以上项的总和示于图 3, 可见最大的剩余误差小于 $\lambda/15$, 可以忽略。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

高度	场景中心下视角	发射天线长度	卫星速度	信号带宽	载频	PRF	采样率
514km	30°	2m	7450m/s	120MHz	9.65GHz	4000	150MHz

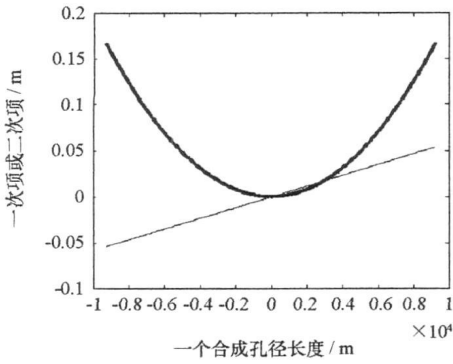


图2 一次项和二次项
Fig. 2 First term and second term

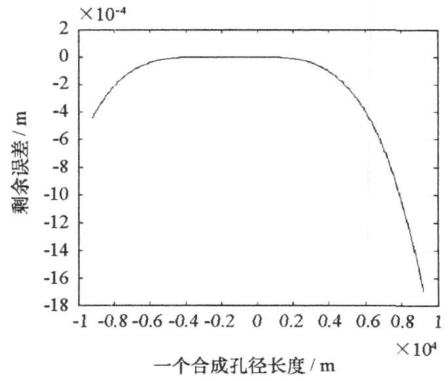
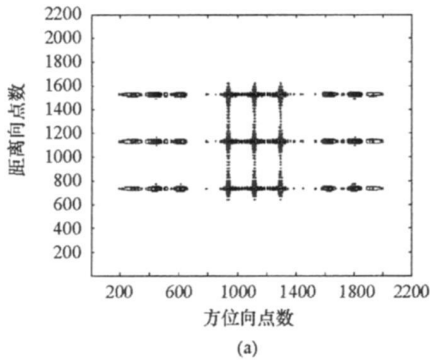
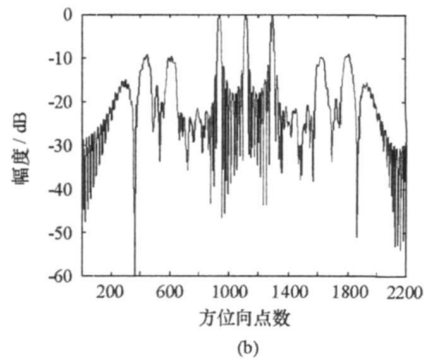


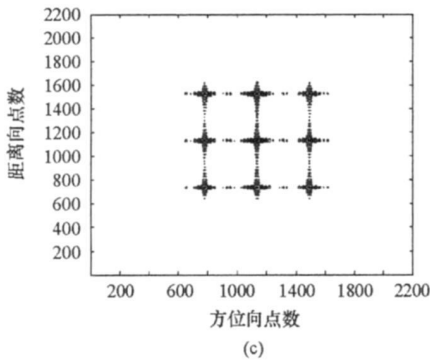
图3 剩余误差
Fig. 3 Residual errors



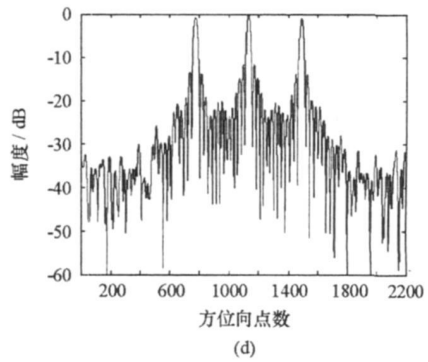
(a)



(b)



(c)



(d)

图4 仿真成像结果
Fig. 4 Simulation results

在场景中均匀布置了9个目标, 包络和相位补偿完成后, 未进行方位解模糊的二维成像结果和方位聚焦结果分别如图4(a)、(b)所示, 可见由于存在方位模糊, 方位向存在成对的假像。完成方位解模糊之后的成像结果示于图4(c)、(d), 成对假像得到了有效的抑制, 图像质量明显提高。需要说明的是, 从图像上来看, 解模糊后的图像的分辨率反而要差于解模糊前的图像, 原因是解模糊前数据的采样率为解模糊后的一半, 尺度相差2倍。本文回波重建的操作主要是快速傅立叶变换和复数乘法和加法, 因此计算量接近传统成像。

5 结论

本文研究了存在三维基线的分布式星载 SAR 的成像问题。以一发双收结构为例, 建立了两路回波的信号模型, 并补偿了两者之间由切航向基线引起的包络差和相位差, 而未补偿的相位差非常小, 对成像的影响非常细微, 因此即使在存在大的切航向基线的情况下, 依然可以得到很好的成像性能。

参考文献:

- [1] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR[C]//IEE Proc. Inst. Elect. Eng. F., 1992, 139(2): 122– 135.
- [2] Callaghan G D, Longstaff I D. Wide-swath Space borne SAR Using a Quad-element Array[C]//IEE Proc. – Radar Sonar Navig., 1999, 146(3): 159– 165.
- [3] Suess M, Grafmueller B, Azh R. A Novel High Resolution Wide Swath SAR System[C]//Proc. IGARSS' 01, 13– 19 July 2001, Sidney, Australia, 2001.
- [4] Heer C, Soualle F, Zahn R, et al. Investigation on a New High Resolution Wide Swath SAR Concept[C]//Proc. IGARSS' 03, Toulouse, France, 2003.
- [5] 李世强, 杨汝良. 天线相位中心偏移方位多波束合成孔径雷达的误差分析[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1436– 1440.
- [6] 马晓岩, 吴顺华, 向家彬. 速度与 PRF 失配对 MPC SAR 成像的影响及补偿方法研究[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2130– 2134.
- [7] Aguttes J P. The SAR Train Concept: Required Antenna Area Distributed over N Smaller Satellites, Increase of Performance by N[C]//IGARSS 2003, Toulouse, France, 2003: 542– 544.
- [8] 杨凤凤, 王敏, 梁甸农. 基于非均匀采样的小卫星分布式多通道 SAR 无模糊成像[J]. 电子学报, 2007, 35(9).
- [9] 马仑, 李真芳, 廖桂生. 一种稳健的利用分布式小卫星获取宽域、高分辨 SAR 图像的方法[J]. 航空学报, 2007, 28(5).
- [10] Li Z F, Wang H Y, Su T, et al. Generation of Wide-swath and High-resolution SAR Images from Multichannel Small Spaceborne SAR Systems[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(1): 82– 86.
- [11] Krieger G, Gebert N, Moreira A. Unambiguous SAR Signal Reconstruction from Nonuniform Displaced Phase Center Sampling[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(4): 260– 264.
- [12] Goodman N A, Lin S C, et al. Processing of Multiple-receiver Spaceborne Arrays for Wide-area SAR[J]. IEEE Trans. on GRS, 2002, 40: 841– 852.
- [13] 邢孟道, 等. 分布式小卫星雷达空时频成像方法研究[J]. 宇航学报, 2005, 26: 70– 77.
- [14] Lin Y P, et al. Periodically Nonuniform Sampling of Bandpass Signals[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Analog and Digital Signal Processing, 1998, 45(3): 340– 351.

(上接第 40 页)

参考文献:

- [1] Hrubesh L W. Aerogel applications[J]. Non-cryst. Solids, 1998, 225: 335– 342.
- [2] Fesmire J E. Aerogel Insulation Systems for Space Launch Application[J]. Cryogenics, 2006, 46: 111– 117.
- [3] Reim M, Korner W, Manara J, et al. Silica Aerogel Granulate Material for Thermal Insulation and Daylighting[J]. Solar Energy, 2005, 79: 131– 139.
- [4] 沈军, 周斌, 吴广明, 等. 纳米孔超级绝热材料气凝胶的制备与热学特性[J]. 过程工程学报, 2002, 2(4): 341– 345.
- [5] Carta D, Corrias A, Mountjoy G, et al. Structural Study of Highly Porous Nanocomposite Aerogels[J]. J. Non-cryst. Solids, 2007, 353: 1785– 1788.
- [6] Kamran D. Thermal Analysis and Design of Multi-layer Insulation for Reentry Aerodynamic Heating[R]. AIAA2001– 2834, 2001.
- [7] Kamran D. Design of High Temperature Multilayer Insulation for Reusable Launch Vehicles[D]. University of Virginia, 2000.
- [8] Spinnler M. Studies on High-temperature Multilayer Thermal Insulations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 1305– 1312.
- [9] Spinnler M. Theoretical Studies of High-temperature Multilayer Thermal Insulations Using Radiation Scaling[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 84: 477– 491.
- [10] 程远贵, 周勇, 朱家骅. 耐火纤维高温热导率的分形[J]. 化工学报, 2002, 53(11): 1193– 1192.
- [11] 姚草根, 吕宏军, 贾新潮, 等. 金属热防护系统材料与结构研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(2): 10– 13.
- [12] 夏德顺. 重复运载器金属热防护系统的述评[J]. 导弹与航天运载技术, 2002, 25(2): 21– 26.
- [13] 关春龙, 赫晓东. 可重复使用热防护系统防热结构及材料的研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(6): 7– 11.
- [14] 曹义, 程海峰, 肖加余, 等. 美国金属热防护系统研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(3): 9– 12.
- [15] 韩杰才, 陈贵清, 孟松鹤, 等. 新型 ARMOR 热防护系统[J]. 宇航学报, 2004, 25(3): 350– 353.
- [16] 赵颖. 2000 年世界运载器发展综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2001, 24(1): 16– 22.
- [17] Brewer W D, Wallace T A, Bird R K, et al. Alloys and Coating Development for Metallic TPS for Reusable Launch Vehicles[C]//2000 National Space Missile Materials Symposium, San Diego, California, February 28– March 2, 2000.
- [18] Cengel Y A. Heat Transfer, a Practical Approach (2nd edition)[M]. Boston: MCB McGraw-hill, 2003.
- [19] Lienhard J H. A Heat Transfer Textbook (3rd edition)[M]. Cambridge: Phlogiston Press, 2003.
- [20] Incropera F P, DeWitt D P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.