

11 477

三 院

○三三系



目 录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
321	穆 冬 朱兆达 张焕春	讲师	033	干涉合成孔径雷达成像技术研究	遥感技术与应用	001504	
322	赵 敏 江 帆	副教授	033	Delphi 与 Matlab 接口软件的设计	计算机自动测量与控制	000804	J
323	赵 敏 崔 海 王敬东 余瑞芬	副教授	033	用 MCA7707 进行传感器自补偿	仪表技术与传感器	000002	J
324	赵 敏 李明齐 江 帆	副教授	033	Win95 下 A/D 转换中断的编程与实现	计算机自动测量与控制	000801	J
325	赵 敏 王敬东 刘文波 经亚枝	副教授	033	测试工程教学实验环节改造的构想	南京航空航天大学学报 (社会科学版)	000202	
326	赵 敏 崔 海 王敬东 李明齐	副教授	033	用 Delphi 实现实时 A/D 转换的方法	数据采集与处理	001504	H
327	赵 敏 潘卫明 杨灿军	副教授	033	基于神经网络的数据融合技术在谐振式 密度传感器中的应用	传感技术学报	000003	J
328	潘为民 赵 敏 张进芳	副教授	033	Vc++ 下如何利用 Matlab 工具箱进行数 字信号处理	计算机与信息技术	000009	
329	尹奕光 刘文波 于盛林	博士	033	功率电子电路中的混沌现象	南京理工大学学报	002402	J
330	陈小平 于盛林 刘文波	博士	033	基于遗传算法的三次样条函数拟合	数据采集与处理	001502	H
331	陈小平 于盛林	博士	033	FIR Filter Design: Frequency-sampling Method Based on Evolutionary Protgramming	Proceedings of the 2000 年 Congress on Evolutionary Computation	2000	
332	陈小平 于盛林	博士	033	遗传算法在 FIR 滤波器设计———频 率抽样法中的应用	电子学报	002810	H
333	陈小平 于盛林	博士	033	FIR 滤波器设计: 基于进化规划的频率 采样技术	通信学报	002107	H
334	石 玉 陈小平 于盛林	博士	033	利用排序对遗传算法的改进和自适应交 叉概率	数据采集与处理	001502	H
335	刘文波 于盛林	讲师	033	An Application of Evolutionary frogrammi- ng in FIR Filtor Design With Frequency Sampling Method	南京航空航天大学学报 (英文版)	001702	J
336	刘文波 陈小平 石 玉	讲师	033	一种快速寻优的遗传交叉策略	南京航空航天大学学报 (计算机专刊)	0036 专	H

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
337	王六顺 刘文波 党万胜 卞巨伟	硕士	033	基于 DSP 的 ARINC429 通信板的研制	电子技术应用	000012	J
338	刘文波 蔡倩 孟爱东	讲师	033	强化毕业设计环节 提高学生科研素质	南京航空航天大学学报 (社科版)	0002 增	
339	刘文波 卞巨伟	讲师	033	实现 ARINC429 数字信息传输的方案设计	电子技术应用	000006	J
340	胡美叶 经亚枝	硕士	033	基于 VGA 的反走样线快速绘制算法及实现	扬州大学学报	000300	
341	毛良明 经亚枝 樊小明 张焕春	博士	033	反串线圈法间接位置检测技术在开关磁阻发电机系统中的应用研究	中国电机工程学报	002010	H

干涉合成孔径雷达成像技术研究

穆冬, 朱兆达, 张焕春

(南京航空航天大学 江苏 南京 210016)

摘要:用 SIR-C/X-SAR 的 X 波段的原始数据, 实现了真实数据下星载双航过 InSAR 的数字高度地图。首先给出了一种新的解释 InSAR 三维成像原理的数学描述。该描述对成像关系做了合理近似, 与以前的一些描述相比具有如下优点: ①把相位差与地表高度在距离线上直接联系在一起, 清晰地反映出它们之间的关系; ②指明了基线对高度测量的有效贡献在于其在斜距垂直方向的投影这一重要概念; ③可用于对测高精度与部分成像参数之间的关系做理论分析; ④可用于求取相位差值到地表高度值之间的转换系数; ⑤基本反映了成像处理的实际过程; ⑥可解释为何工程上可将相位差与高度之间近似看成线性关系。然后, 给出了一个完整的实现数字高度地图的数据处理过程, 并将整个过程分成 9 个环节, 逐一对各环节的目的和作用做了扼要说明。最后, 给出了包括单视 SAR 成像、干涉相位条纹、水平相差修正和干涉条纹的降噪滤波在内的处理过程中关键步骤的结果, 和最终的三维地貌成像结果。

关键词:干涉; 合成孔径雷达; 雷达成像; 数字高度地图

中图分类号: TN 958/TN 019 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0323(2000)04-0256-05

1 引言

干涉合成孔径雷达(InSAR)三维成像, 是合成孔径雷达(SAR)遥感技术的新发展。它用从相距很近的两个天线得出的两个 SAR 的复图像, 取得地面各点在两个复图中的相位差, 进而得出各点在两次成像中电波的路程差, 最后得出对地面各点地表高度的遥感, 形成三维地貌图, 又称数字高度地图。

InSAR 三维成像保有 SAR 成像的高分辨率、大范围、全天候、有一定的穿透能力等优点, 具有广泛的应用领域。实现 InSAR 三维成像的核心是其数据处理技术。InSAR 的数据采集分单航过和双航过两种方式^[1], 后者的数据处理较前者更为复杂。20 世纪从 90 年代初开始, 国际上争相开展 InSAR 三维成像研究^[2~4]。国内原始数据来源有限, 研究论文较少, 1996 年中国科学院遥感应应用研究所王超用 SIR-C 的 L 波段数据对我国新疆的昆仑山进行过 InSAR 三维成像研究^[5], 并成功地得到了三维地貌图, 同时对数据处理进行了较完整的研究。此外, 完整的数据处理过程尚未见报道。

近年来, InSAR 三维成像的理论和技術又有了新发展。作者用 SIR-C/X-SAR 中 X 波段的真实原始数据, 研究了双航过 InSAR 三维成像技术, 成功地得出了三维地貌图。

本文首先提出了一种新的解释 InSAR 三维成像原理的数学描述, 该描述在距离线上直接把地表高度与相位差联系在一起。然后结合作者的研究, 给出了完整的数据处理过程, 并分步骤做了扼要说明。最后给出了处理过程中关键步骤的结果和最终的数字高度地图。

2 基本原理

当两次 SAR 成像的轨道平行时, 它们的距离线可以重合, 单条距离线的成像几何关系可以用图 1 来表示。

图 1 中 y 为距离方向, $h(y)$ 为随 y 而变的地表高度, 其回波构成 SAR 的一条距离线。 A_1 和 A_2 分别为各航过的天线。 r_1 和 r_2 分别为天线 A_1 和 A_2 到地面点 y 的高度为 $h(y)$ 的地表的斜距, r_0 是天线 A_1 到地面点 y 的斜距, 它们都是 y 的函数。 H 是天线

收稿日期: 2000-08-09; 修订日期: 2000-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(60082002)资助。

作者简介: 穆冬(1961—), 男, 博士生, 主要从事合成孔径雷达研究。

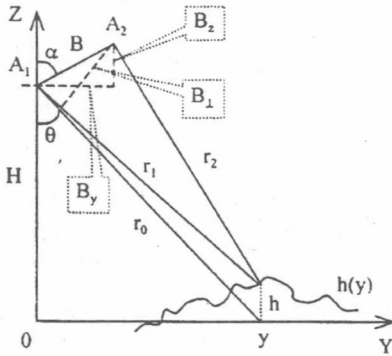


图1 距离线成像几何关系图

A_1 的轨道高度。 B 是两天线间距离,称为基线。 B_y 和 B_x 分别为 B 在 Y 轴和 Z 轴方向的投影, $B_{\perp}$ 为 B 在 r_0 的垂线方向的投影。 α 为 B 与 Z 轴间的夹角。

图1中的待求量为 $h(y)$ 。已知量为 H 、 B 、 α ,此外还有雷达波长 λ ,以及用干涉法求出的两次成像的相位差 Ψ_i 。且有:

$$\Psi_i = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) \quad (1)$$

由图1中的几何关系知:

$$r_2 = \sqrt{(H + B_x - h)^2 + (y - B_y)^2} \quad (2)$$

$$r_1 = \sqrt{(H - h)^2 + y^2} \quad (3)$$

(2)、(3)代入(1)得:

$$\Psi_i = \frac{4\pi}{\lambda} [\sqrt{(H + B_x - h)^2 + (y - B_y)^2} - \sqrt{(H - h)^2 + y^2}] \quad (4)$$

记(4)中 $h(y) \equiv 0$ 时的 Ψ_i 为 Ψ_0 。则 Ψ_0 表示地表为水平面时的两次成像的相位差。

$$\Psi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} [\sqrt{(H + B_x)^2 + (y - B_y)^2} - \sqrt{H^2 + y^2}] \quad (5)$$

记 $\Psi_h = \Psi_i - \Psi_0$, 则 Ψ_h 为地表高度 $h(y)$ 不为0时的相差 Ψ_i 与水平地面的相差 Ψ_0 之差。

$$\begin{aligned} \Psi_h = \frac{4\pi}{\lambda} & [\sqrt{(H + B_x - h)^2 + (y - B_y)^2} \\ & - \sqrt{(H - h)^2 + y^2} \\ & - \sqrt{(H + B_x)^2 + (y - B_y)^2} + \sqrt{H^2 + y^2}] \end{aligned} \quad (6)$$

整理(6)得:

$$\begin{aligned} \Psi_h = \frac{4\pi}{\lambda} r_0 & \left(\sqrt{1 + \frac{h^2 + B_x^2 + B_y^2 + 2HB_x - 2Hh - 2B_xh - 2yB_y}{r_0^2}} \right. \\ & \left. - \sqrt{1 + \frac{h^2 - 2Hh}{r_0^2}} - \sqrt{1 + \frac{B_x^2 + B_y^2 + 2HB_x - 2yB_y}{r_0^2}} + 1 \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $r_0 = \sqrt{H^2 + y^2}$ 。

工程上 B 远小于 r_0 , h 也远小于 r_0 (对于 SIR-C/X-SAR, 它们的量级为: $r_0 \approx 310$ km, $B \approx 60$ m, $h \approx 2$ km)。

对(7)泰勒展开,并做近似处理后得(附录):

$$h(y) = \frac{-\lambda \cdot (H^2 + y^2)}{4\pi \cdot B_{\perp} \cdot y} \Psi_h(y) \quad (8)$$

(8)清晰地表达了地表高度 $h(y)$ 与相差 $\Psi_h(y)$ 的关系,已知 $\Psi_h(y)$ 就可以求出 $h(y)$ 来。在 InSAR 三维成像中,利用 SAR 为相干成像而带有的相位信息,将地面各点在两次成像中的相差 Ψ_i 用干涉法求出,在其中减除假想的水平地面的相差 Ψ_0 得出 Ψ_h ,即可按(8)实现对地表高度 $h(y)$ 的遥感。

工程上见于 y 的变化范围(扫描带地面宽度 W_y)较其本身的取值要小得多(对于 SIR-C/X-SAR,场景中心的 $y \approx 230$ km, $W_y \approx 4$ km),多近似地将 $h(y)$ 和 $\Psi_h(y)$ 看成线性关系。

3 三维成像的实现

实现 InSAR 三维成像的过程复杂,步骤较多。

下面结合作者对 SIR-C/X-SAR 原始数据处理的方法,将实现过程分成9个部分,分别扼要说明。① SAR 成像。用 SAR 的成像算法,分别对各航过收集的原始数据做成像处理,得出两个地面二维单视复图。其作用是实现距离和方位向的二维成像,并得出图中各点的相位信息。此外,成像过程中对各航过得出的多普勒中心、多普勒带宽和各次成像斜距 r_1 和 r_2 的估值,也是三维成像的重要参数。② 像素配准。各航过独立进行,不能保证生成的两个二维复图中同样位置的像素对应于地面上的同一点。配准的目的是要使两个图中同样位置的像素对应地面同一回波点。像素配准用相关法,将两个复图的模做二维相关,依据相关峰的位置对一图做平移。这样的配准误差约为一个像素。③ 预滤波。用不同入射角得出的 SAR 图像中含有的地面信息的谱段不同,干涉时两图中相同谱段部分的信息产生所需的相干结果,不同谱段部分的信息则成为干扰^[6]。预滤波的目的是要滤除两图中谱段的不同部分,取得更好的相干性。入射角的不同可分解成高度和方位两个方向的分量,他们导致的谱段差别分别对应于距离向的波数平移和方位向的不同多普勒中心。相应地,预滤波处理也分别在距离和方位两个方向上进行。对方位向,依据各航过的多普勒中心和带宽,得出共同的多普勒谱段。对距离向,先估计谱段的平移量,依估值得出共同谱段。谱段平移量的估值用干涉法实现。对

像素配准过的两个单视复图做干涉,干涉相位条纹在距离向主频率与两次成像的入射角有关,从主频率中可以得出距离向谱段的平移量^[7]。同时,各航过的入射角也是三维成像的重要参数。在共同的距离和方位向谱段上,对原始数据重做各航过的 SAR 单视复图,得出的就是预滤波后的 SAR 图对。记为 X_1' 和 X_2' 。④亚像素配准。独立进行的两个航过的数据采集,使 X_1 中的像素对应的地面点,在 X_2' 中不会正好对应在同样位置的像素上,而是落入像素之间。而且,由不同的入射角得出的 X_1 和 X_2' ,其样点距在距离向上对应的地面距离也不同。亚像素配准以 X_1 为基准,找出 X_1 的各像素对应的地面点在 X_2' 中对应的像素之间的精确位置,按这一位置对 X_2' 进行插值得 X_2 ,使 X_1 和 X_2 中同样位置的各像素精确地对应于地面同一点。Gabriel 等的方法可以得出误差不大于 1/8 像素的配准结果^[8]。对于平行轨道, Gabriel 等的方法可以简化,对方位和距离向分别配准。⑤干涉。将 X_1 中各像素乘上 X_2 中的对应像素的共轭,其相角即为两次成像的相位差。但由于复数对其相角的周期性,干涉得出的不是直接两

次成像相位差的原值 Ψ ,而是其被周期折叠后的主值 Φ 。 $\Psi = \Phi + 2k\pi$ 。 Φ 表现为相位条纹。⑥水平相差修正。除去水平相差采用的是: $\Psi_h = \Psi_0 - \Psi$,使得 h 正比于 Ψ_h 。其中水平相位 Ψ_0 可依据两次成像的斜距和它们的入射角得出。 Ψ 则用干涉得出的相位条纹 Φ 替代。这样得出的不是 Ψ_h ,而是 Ψ_h 的主值 Φ_h 。 Φ_h 也是相位条纹。⑦降噪滤波。干涉得出的相位条纹中存在严重噪声,使相位展开无法进行。因此要滤波以降低噪声。滤波须考虑 Φ_h 仅为相位主值,要用特殊的方法滤波^[9]。⑧二维相位展开。依据折叠后的相位主值 Φ_h ,把折叠前的相位 Ψ_h 恢复出来。有多种展开方法^[10~12],笔者采用的是最小二乘法^[13]。将⑦和⑧放在⑥之后进行,是考虑到修正后的相位条纹较修正前的平坦,更便于滤波和展开的实施。⑨相位高度变换。由两次航过的斜距和它们的入射角的差求出 $B_\perp$,依据(8)将 Ψ_h 转换为 $h(y)$,最终实现对高度 $h(y)$ 的遥感。

4 结果

图 2 给出了成像处理的几个中间结果和最后结

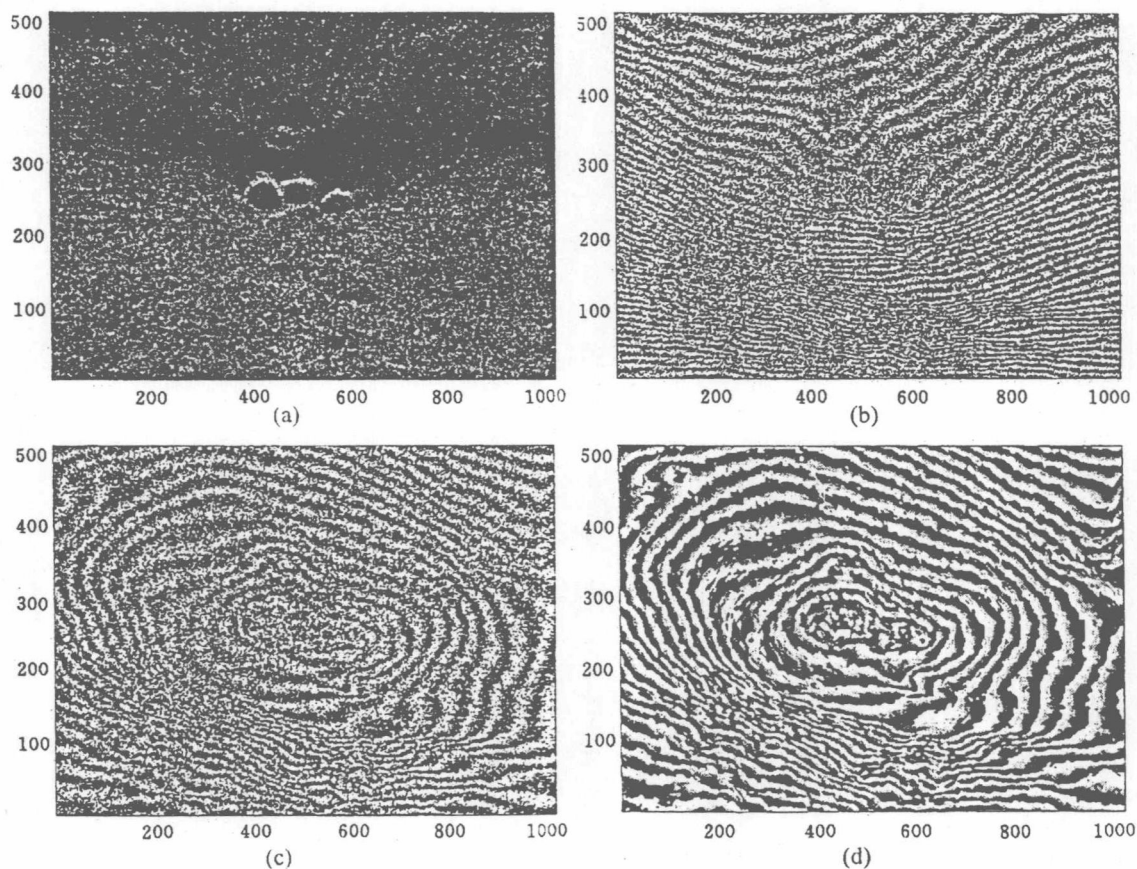


图 2 遥感结果(a~d)

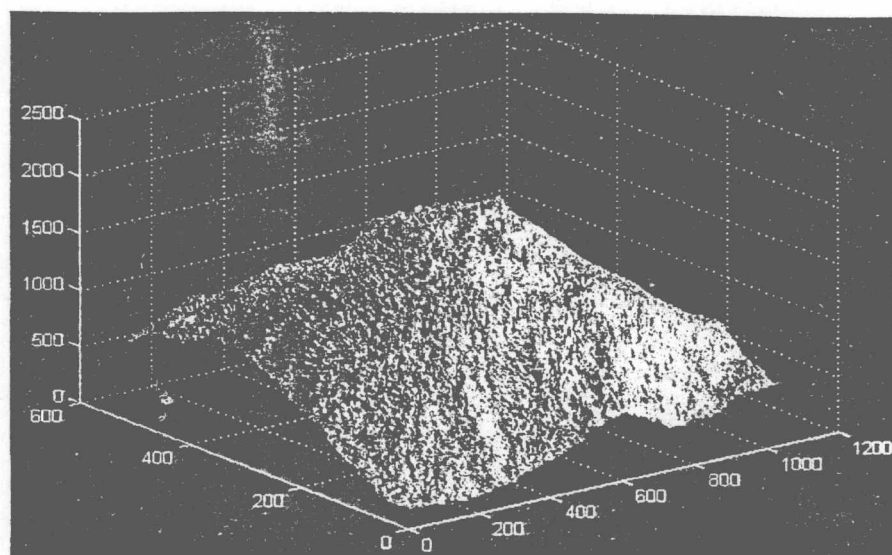


图2 遥感结果(e)

果,遥感对象是意大利西西里岛的埃塔纳火山。图2中各图的大小均为512点×1024点(距离向×方位向),对应的地面遥感范围约为4.5 km×4.3 km。图2(a)是SAR复图像 X_1 的模,图2(b)是 X_1 和 X_2 干

涉得出的相位条纹,图2(c)是水平相差修正后的相位条纹,图2(d)是降噪滤波后的相位条纹,图2(e)是三维地貌图(纵坐标的单位是m)。

5 附录

考虑到 $B \ll r_0$, $h \ll r_0$, 并且 $\frac{H}{r_0} = \cos\theta$, $\frac{y}{r_0} = \sin\theta$ 。(7)中各根号里的分式项的绝对值均小于1,且为 $O(\frac{1}{r_0})$ 量级。将(7)中各根号项按 $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 + O(x^3)$, ($|x| \ll 1$)展开得:

$$\Psi_h = \frac{4\pi \cdot r_0}{\lambda} \left\{ \frac{-B_x}{r_0^2} h + \frac{1}{8r_0^4} [(h^2 - 2Hh)^2 + (B_x^2 + B_y^2 + 2HB_x - 2yB_y)^2] - \frac{1}{8r_0^4} [(h^2 - 2Hh) + (B_x^2 + B_y^2 + 2HB_x) - 2yB_y]^2 + O\left(\frac{1}{r_0^3}\right) \right\} \quad (a)$$

整理(a)得:

$$\Psi_h = \frac{4\pi}{\lambda} \left\{ \frac{-B_x}{r_0} h + \frac{1}{r_0} (B_x \cos^2\theta - B_y \cos\theta \sin\theta) \cdot h + \frac{1}{2r_0^2} (3B_x^2 h \cos\theta - 3B_x h^2 \cos\theta + B_y^2 h \cos\theta + B_y h^2 \sin\theta - 2B_x B_y \sin\theta) + \frac{1}{4r_0^3} (2B_x h^3 + 2B_x^3 h + 2B_x B_y^2 h - 3B_x^2 h^2 - B_y^3 h^2) + O\left(\frac{1}{r_0^2}\right) \right\} \quad (b)$$

略去(b)中所有项 $O(\frac{1}{r_0^2})$, 并注意到 $B_x = B \cos\alpha$, $B_y = B \sin\alpha$, 可得:

$$\Psi_h = \frac{-4\pi \cdot B \cdot \sin\theta}{\lambda \cdot r_0} \sin(\alpha + \theta) \cdot h \quad (c)$$

整理(c), 注意 $\sin\theta = y/r_0$, $B \sin(\alpha + \theta) = B_{\perp}$, 即可得(8)。

致谢:笔者在此向德国宇航院(DLR)表示感谢,是他们的支持使得我们对InSAR三维成像的研究能针对真实数据进行,使得我们的方法能得到实践验证。

参考文献:

- [1] 张直中. 发展中的三维合成孔径雷达[J]. 现代雷达, 1999, 21(5): 6~13.
- [2] Lanari R, Fornaro G, Riccio D, et al. Generation of Digital Elevation Models by Using SIR-C/X-SAR Multifrequency Two-

- Pass Interferometry: The Etna Case Study[J]. IEEE Trans on GRS, 1996, 34(5): 1097~1114.
- [3] Fornaro G, Franceschetti G, Lanari R. A New Efficient Solution for DEM Generation in Interferometric SAR Processing[A]. In: Proc. EUSAR'96[C]. Konigswinter, 1996. 195~198.
- [4] Klemm R. Conference Report: EUSAR'96 Current Trends in SAR Technology [R]. IEEE AES Systems Magazine, Mar. 1997, 3~8.
- [5] 王超. 利用航天飞机成像雷达干涉数据提取数字高程模型[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 46~49.
- [6] Gatelli J, Guarnieri A M, Parizzi F, *et al.* The Wavenumber Shift in SAR Interferometry[J]. IEEE Trans on GRS, 1994, 32(4): 855~865.
- [7] Peati C, Rocca F. Improving Slant-Range Resolution with Multiple SAR Surveys[J]. IEEE Trans on AES, 1993, 29(1): 135~143.
- [8] Gabriel A K, Goldstein R M. Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results From SIR-B[J]. Int J Remote Sensing, 1988, 9(5): 857~872.
- [9] Candeias A L B, Mura J C, Dutra L V, *et al.* Interferogram Phase Noise Reduction Using Morphological and Modified Median Filters[A]. In: Proc IGARSS'95[C]. Firenze, 1995. 166~168.
- [10] Zebker H A, Yanping Lu. Phase Unwrapping Algorithms for Radar Interferometry: Residue-Cut, Least-Squares, and Synthesis Algorithms[J]. J Opt Soc Am A, 1998, 15(3): 586~598.
- [11] Davidson G W, Bamler R. Multiresolution Phase Unwrapping for SAR Interferometry[J]. IEEE Trans on GRS, 1999, 37(1): 163~174.
- [12] Xu W, Cumming I. A Region-Growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping[J]. IEEE Trans on GRS, 1999, 37(1): 124~134.
- [13] Pritt M D, Shipman J S. Least-Squares Two-Dimensional Phase Unwrapping Using FFT's[J]. IEEE Trans on GRS, 1994, 32(3): 706~708.

Study on Interferometric SAR 3-Dimensional Remote Sensing

MU Dong, ZHU Zhao-da, ZHANG Huan-chun

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Using the X-band raw data from SIR-C/X-SAR, we have succeeded in the formation of an actual spaceborne two-pass InSAR Digital Elevation Model. In this article, a new mathematical expression has been proposed to illustrate the principle of this 3D InSAR imaging technique. In the obtaining of this new expression, reasonable approximation was used. Compared with other principle illustrations, it has the following advantages: (1) With only one expression, the relation between the terrain height to be sensed and the phase difference of interferogram in a range line is clearly exposed. (2) An important concept is revealed that the valid component of baseline for height measuring is its projection in the direction vertical to the slant range. (3) It enabled the theoretical analysis of height measuring accuracy affected by some geographic parameters. (4) It can be used for the conversion of the phase difference to terrain height. (5) It suggests the course of signal processing of InSAR. (6) It shows why the relation between phase difference and terrain height is usually considered to be linear in practice. Then, a whole procedure of signal processing of InSAR is given. It is divided into nine steps, and functions of each step have been briefly explained. Last, results of some key steps such as single look complex image of SAR, phase fringe image of interferogram, flat earth modified phase fringe, noise reduced phase fringe, and the final 3D topography are shown.

Key words: Interferometry, Synthetic aperture radar, Radar imaging, Digital elevation model

Delphi 与 MatLab 接口软件的设计

赵敏¹, 江帆²

(1. 南京航空航天大学测试工程系, 江苏 南京 210016; 2. 中国航天电子基础研究院, 北京 100076)

摘要: 主要介绍了如何用 Delphi 语言调用 MatLab 引擎、Delphi 和 MatLab 程序进行数据交换的方法。它可以使用 Delphi 语言开发的程序有更强的数据处理功能。

关键词: Delphi; MatLab 软件接口

中图分类号: TP311.52

文献标识码: A

The Design of Software Interface between Delphi and MatLab

ZHAO Min¹, JIANG Fan²

(1. Department of Measuring Engineering, China Academy of Astronautics Basic Technology Beijing 100076, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: How to use Delphi to start MatLab engine and how to exchange data between Delphi and LatLab is discussed in this paper. This method can make Delphi more powerful for data processing.

Key words: Delphi; MatLab; software interface

Delphi 语言是一种功能强大的编程语言, 它采用基于窗口和面向对象的方法, 具有易学易用、开发效率高, 界面制作美观方便、可实现各种操作功能(包括对硬件的直接操作)等特点。可以说它兼有 Visual C++ 功能强大和 Visual Basic 易学灵活的优点, 被称为第四代编程语言。Delphi 还拥有强大的数据库引擎, 可以用于多种数据库结构, 它还能实现客户机/服务器工作方式、多层数据库结构模式等功能, 可以进行高效率的数据库管理。因此 Delphi 被越来越多的程序员所青睐。MatLab 是一种高效率的科学工程计算语言, 它在矩阵运算、数值计算、数字信号处理、系统识别、自动控制、神经网络、图形显示等方面比其它语言有难以比拟的优势。将 Delphi 和 MatLab 相结合, 利用 Delphi 灵活强大方便的编程能力, MatLab 强大的科学计算能力就可以开发出功能强大、操作灵活的系统软件。在研制一个传感器误差补偿装置的开发系统中, 我们采用了 Delphi 作为开发工具。该系统在对传感器的温度、非线性等误差进行补偿时, 需要对检测到的数据进行分析处理, 找出最佳的补偿方案。因此我们将开发系统和 MatLab 有机的结合在一起, 实现了开发系统和 MatLab 之间的程序调用和数据交换, 使得开发系统的功能大大增强。本文主要介绍了在 Delphi 下如何启动 MatLab、如何执行

MatLab 的命令以及如何进行数据交换的方法。这些方法对于使用 Delphi 语言作为系统的开发工具, 进行有关信号的分析和数据处理的各种软件系统以及虚拟仪器、数据采集与控制系统都有一定参考价值。

1 MatLab 的数据引擎

MatLab 本身没有提供和 Delphi 之间的接口程序, 但它提供了和 Visual C++ 之间的接口函数。可以利用 MatLab 和 VC 之间的接口函数, 通过编写合适的动态连接库来间接地实现。MatLab 和 VC 的接口有几种, 我们选用了一种在 VC 下通过 MatLab 引擎(engine)使用 MatLab 功能的方法, 再通过动态连接库做成了 Delphi 与 MatLab 的接口函数。MatLab 引擎的 C 语言调用函数见表 1。

表 1 MatLab 引擎的 C 语言调用函数

函数名	功能
EngOpen	打开 MatLab 引擎
EngEvalString	在 MatLab 引擎中执行一条命令
EngPutArray	将数据放入 MatLab 引擎, 通过它可以将程序中的已知数据放入 MatLab 引擎中
EngGetArray	从 MatLab 引擎中取出数据, 利用该函数可以将 MatLab 的计算结果取回
EngClose	关闭 MatLab 引擎

在使用表 1 所示的 MatLab 引擎函数时, 要用到 MatLab 数组(mxArray), MatLab 引擎利用这个数据类型来进行各种数据处理工作。MatLab 中的各种变量, 包括标量、矢量、矩阵、字符串等都是用这种 MatLab 数组来进行存储的。MatLab 提供了 C 语言下的 MatLab 数组(mxArray)的格式, 定义了它的

收稿日期: 2000-01-10

作者简介: 赵敏(1959-), 男, 江苏南京市人, 南京航空航天大学测试工程系副教授, 硕士, 主要从事仪器及测试系统方面的研究。

数据结构。Delphi 下没有对应的 MatLab 数组，但利用动态连接库可以巧妙地解决这个问题。

2 动态连接库的设计

在我们设计的开发系统中，利用 Delphi 语言设计了人机界面，向导化的操作流程，图形界面，数据(库)管理功能等。此外还有一块就是传感器的数据分析，其过程是先得到传感器的测试数据，将这些数据送入 MatLab 进行分析，选择合适的处理函数后，找到最佳补偿结果，然后将结果送回开发系统中最后实现传感器的误差补偿。为了实现上述目的，设计了相应的几个函数。这些函数都放在 DpLab.Dll 动态连接库中。DpLab.Dll 的基本组成如下：

(1) 头函数

```
#include "stdafx.h"
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include "engine.h"// 在 MatLab \ extern \ include 下，将它拷入当前目录
```

```
Engine * ep = NULL; // MatLab 引擎，全局变量
mxArray * PA = NULL; // MatLab 数组指针。可根据需要定义多个 mxArray 指针变量
```

(2) 打开 MatLab 引擎函数：

```
extern "C" __declspec(dllexport) int MatOpenEng(far char * cc)
{
    if(ep) return 0; // 如果已打开则退出
    if(! (ep = engOpen(cc))) return -1;
    else return 1;
}
```

如果 MatLab 安装在本地计算机上，字符串 cc 中的内容为“\ 0”，如果系统为客户机/服务器(Client/Server)的工作方式，MatLab 安装在主机“host”上，可输入“\\ host \ Matlib”。

(3) 关闭 MatLab 引擎的函数

```
extern "C" __declspec(dllexport) int MatCloseEng(void)
{
    if(ep)
    {
        if(PA) mxDestroyArray(PA); // 释放 PA
        engClose(ep);
        ep = NULL;
        return 1;
    }
    else return 0;
}
```

(4) 执行 MatLab 命令函数：

```
extern "C" __declspec(dllexport) int MatExec(far char * cc)
{
    if(! ep) return 0;
    engEvalString(ep, cc); // cc 中放 MatLab 命令
    return 1;
}
```

(5) 根据已知数据创建 mxArray 变量：

```
extern "C" __declspec(dllexport) int MatCreateDoubleD(char * cc,
int num, double dd[])
{
    if(! ep) return 0;
    if(num < 1) return -1;
    PA = mxCreateDoubleMatrix(1, num, mxREAL);
    mxSetName(PA, fh[Getfh(cc)]); // 指定 MatLab 中变量名，它必须是静态字符串！
    memcpy((char *)mxGetPr(PA), (char *)dd, num * sizeof(double));
    engPutArray(ep, PA);
    return 1;
}
```

式中：

cc: MatLab 变量名

num: 数据的个数

dd: 已知数据

(6) 获取 MatLab 数据：

```
extern "C" __declspec(dllexport) int MatGetDoubleData(char * cc,
int num, double dd[])
{
    mxArray * result;
    double * pData;
    int i;
    if(! ep) return 0;
    if(num < 1) return -1;
    result = engGetArray(ep, fh[Getfh(cc)]);
    if(result)
    {
        pData = (double *)mxGetData(result);
        for(i = 0; i < num; i++) dd[i] = pData[i];
        mxDestroyArray(result);
        return 1;
    }
    return 0;
}
```

式中：

cc: MatLab 变量名

num: 数据的个数

dd: 返回数据

还可以根据需要定义其它一些函数如获取变量名函数 int Getfh(char cc[])等等。这些函数写好以后，可以用 VC 进行编译，将编译好的动态连接库 DpLab.Dll 复制到 Windows \ system 下。

3 各种函数在 Delphi 中的运用

为了在 Delphi 中使用动态连接库函数，首先要对这些函数作如下声明：

```
function MatOpenEng(p: PChar): Integer; stdcall; external 'DpLab.dll';
function MatCloseEng: Integer; stdcall; external 'DPLAB.DLL';
function MatExec(p: PChar): Integer; stdcall; external 'DPLAB.DLL';
function MatCreateDoubleD(p: Pointer; num: Integer; dd: array of
```



```
double):Integer;stdcall; external 'DPLAB.DLL';
function MatGetDoubleData(p: Pointer; num: Integer; dd: array of
double):Integer;stdcall; external 'DPLAB.DLL';
```

函数声明了以后,就可以方便地使用它们了。在 Delphi 中打开 MatLab 引擎可用这样一条语句:

```
MatOpenEng(PChar( \ 0'));
```

关闭 MatLab 引擎则没用:

```
MatCloseEng;
```

下面的程序给出了从 MatLab 中获取数据的方法,函数 MatGetDoubleData 通过变量 cc 指定 MatLab 中的数据变量名,该变量应是已经定义好的:

```
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
```

```
var
```

```
dd:array[0..10] of double;
```

```
cc:Char;
```

```
i:Integer;
```

```
begin
```

```
cc:= 'D'; // MatLab 中的变量名
```

```
MatGetDoubleData(@cc, 10, dd);
```

```
ListBox1.Clear; // 在一个列表框内显示读出的数据
```

```
for i:= 0 to 4 do begin
```

```
ListBox1.Items.Add(Format('% .2f, [dd[i]]));
```

```
end;
```

```
end;
```

在 Delphi 中执行 MatLab 命令十分方便,下面的程序给出了 Delphi 在 MatLab 中用 $\sin(r)/r$ 函数画

出三维图形的方法。

```
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
MatExec(PChar('x= -8; .5;8;'));
```

```
MatExec(PChar('y=x'';'));
```

```
MatExec(PChar('X= ones(size(y)) * x;'));
```

```
MatExec(PChar('Y= y * ones(size(x));'));
```

```
MatExec(PChar('R= sqrt(X.^2 + Y.^2) + eps;'));
```

```
MatExec(PChar('Z= sin(R)./R;'));
```

```
MatExec(PChar('mesh(Z);'));
```

```
end;
```

用 Delphi 调用 MatLab 引擎,可以使 Delphi 的信号处理功能大为增强,程序更为灵活,这在我们的开发系统软件中得到了体现。本文所提供的动态连接库实际上是一个示范性的例子,根据实际需要还可以开发出功能更强大的函数,以满足不同应用场合的需要。本文所使用的 Delphi 语言版本为 4.0, MatLab 的版本为 5.1,动态连接库的编译软件为 VC++ 6.0。

参考文献:

- [1]陈磊. VC 下利用 MATLAB 引擎的程序设计[J]. 电脑编程技巧与维护, 1999, 2.
- [2]张培强. MATLAB 语言 - 演算纸式的科学与工程计算语言[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1995, 11.
- [3](美)Richard C. Leinecker, 等. 张艳, 等译. Visual C++ 6 宝典[M]. 电子工业出版社, 1999, 4.

(上接第 12 页)

[2]Pierrel. Goupillaud, Signal Design in the VIBROSEIS System [J], Geophysics, 1976, 6(41):1291~1304.

[3]B. M. Gurbuz, Upsweep Signals With High Frequency Attenuation and Their Use in the Construction of VIBROSEIS Synthetic Seismograms[J]. Geophysical Prospecting, 1982, (30): 432~443.

[4]林君, 程德福. 微型机卡式仪器原理、设计及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.

[5]张子三, 林君, 于生宝. 可控震源线性扫描的优化设计[J]. 石油仪器, 1998, (1): 1~5.

[6]张子三. 便携式高频可控震源系统扫描技术的研究[D]. 长春科技大学硕士学位论文, 1998.

[7]陈祖斌. 可控震源 - 大地耦合模型研究[D]. 长春科技大学硕士学位论文, 1999.

(上接第 14 页)

Microsoft Interdev 和 C++ Builder 开发建立诊断专家系统和信号分析系统。

诊断时, 客户端微机利用 WWW 浏览器登录诊断服务器, 并在交互式网页中, 利用表单提供故障征兆信息和数据文件, 并请求诊断服务。诊断服务器调用诊断资源进行诊断得到诊断结果, 并利用交互式网页和

Java 小程序返回给客户机。

4 结论与展望

本文提出了基于 Internet 的远程故障诊断系统的设计, 并利用实验室的设备和局域网环境初步完成了远程故障诊断系统的实现, 它包括数据采集系统, 网络远程信号处理系统和远程诊断专家系统等。为了使系统具有更大的灵活性和适用性, 利用 CORBA 技术初步实现了分布式计算并在远程信号处理系统中得到了应用。机械设备故障诊断的复杂性决定对一些疑难故障需要多专家多诊断系统的协同诊断, 针对这一点提出了基于 agent 的故障诊断系统的设想, 并作了一些初步探索, 这将是以后的研究方向。

参考文献:

- [1]来五星, 轩建平, 等. 基于 Internet 远程诊断中心设计方法[C]. 第一届全国诊断工程技术学术会议论文集, 1998, 10.
- [2]何岭松, 王俊峰, 杨叔子. 设备故障诊断网上开放实验室建设[J]. 振动工程学报, 1998, 11(4).
- [3]OMG: CORBA 2.0/IIOP Specification, Object Management Group[DB/OL]. <http://www.omg.org>. 1997.
- [4]李世杰. Active Server Pages(ASP)2.0 网页设计手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

用 MCA7707 进行传感器自补偿

赵敏 崔海 王敬东 余瑞芬

南京航空航天大学测试工程系 南京市 210016

【摘要】文中以硅压阻传感器为例,系统地阐述了采用 MCA7707 进行传感器实时自补偿的原理和应用。文章首先介绍了 MCA7707 的结构和性能,然后详细讨论了补偿的原理,通过大量的公式逐步阐明了补偿的步骤和实现的可能性,最后对实验数据进行了分析,证明利用 MCA7707 对传感器进行实时补偿是可行的,可以在实践中推广和应用。

关键词: MCA7707 漂移 实时 自补偿 误差

The Self-Compensation of Sensor Using MCA7707

Zhao Ming · Cui Hai · Wang Jingdong · Yu Ruifeng

Department of Testing Engineering, Nanjing University of Aerospace, Nanjing 210016

Abstract: The principle and application of real-time self-compensation of sensor using MCA7707 is systematically introduced in this paper, in which the silicon pressure resistor sensor is used as example. Firstly, the structure and feature of MCA7706 is introduced. The compensation principle is then discussed in detail, both the step of compensation and the probability of realization are also introduced by lots of equations gradually. Finally, a large amount of experimental data is analyzed. It proves that the real-time compensation using MCA7707 is feasible and can be introduced and applied in practice.

Key Words: MCA7707, Offset, Real-time, Self-compensation, Error

1 引言

一般说来,传感器在使用过程中都有温漂、时漂或某些固有参数发生变化的现象。为了提高测量精度需要进行补偿。实时自补偿国内外许多科研工作者都进行过研究,一些研究成果已经运用于实践。本文探讨了利用美国 MCA 公司产生的 MCA7707 芯片,使硅压阻传感器的压力信号与温度信号进行互相补偿和解耦,从而实现实时温度、非线性自补偿的方案。

2 MCA7707 简介

MCA7707 是一种高品质的复合信号单芯片系统,适用于电阻式传感器的电子修正和补偿。它使得传感器 3 种传统的工艺操作成为一个自动的过程。

(1) 预热操作:在预热状态下获取传感器的性能参数;

(2) 校准和补偿操作:接收和存储获得的修正及补偿参数;

(3) 最终测试操作:在脱机状态下验证修正和补偿后的性能。

MCA7707 补偿措施以作为温度信号的压阻式敏

感桥路电压为基础,通过调节电路中 D/A 转换器的偏置和增益来修正和补偿一阶温度误差,通过查表和对一阶系数进行线性插值来补偿剩余的原高阶误差,可以把 $-40 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 内的总误差限制在传感器固有重复性误差的 $\pm 0.1\%$ 以内,还产生一个按比例放大的输出信号。

MCA7707 通过可编程 EEPROM 芯片存储满量程输出(FSO),满量程输出温度系数(FSO TC),满量程温度非线性度,偏置(OFFSET),偏置温度系数(OFFSET TC),偏置温度非线性度,压力非线性度等 7 种修正系数。它可处理超过 1kHz 带宽的信号,并通过在矢量表中查询偏置温度系数和量程温度系数的不同代码实现对复杂的传感器误差进行修正。MCA7707 特别适用于压阻式传感器,但也可用于其它类型的传感器,如应变片式(带温度敏感元件)传感器等。

3 MCA7707 的组成部分及工作原理

MCA7707 主要由 4 个功能块组成:可编程仪表放大器;可编程传感器激励电流源;5 个 16 位 D/A 转换器;一个带数字增益和数字偏置修正的 12 位 A/D 转

换器,一个可选择数字压力输出的双通道差动模拟开关。

3.1 可编程仪表放大器

可编程仪表放大器是一个差分放大器,用于传感器的量程修正,可通过调整三位 PGA 数字位设置传感器的电桥电流,以实现所需的理想量程。

3.2 可编程传感器激励电流源

可编程传感器激励电流源用电流镜实现,可用于进行传感器灵敏度的修正,通过量程温度系数转换器和量程线性转换器的反馈,控制激励电流源产生的电流的大小,以实现要求的理想量程。

3.3 数/模转换器

MCA7707 含有 5 个 16 位的数/模转换:偏置系数转换器(OFST D/A);量程系数转换器(FSO D/A);线性系数转换器(LIN D/A);偏置温度系数转换器(OTC D/A);量程温度系数转换器(FSOTC D/A)。

每个转换器均有参考电压:量程系数转换器和偏置系数转换器为 V_{dd} ;量程温度系数转换器和偏置温度系数转换器为 V_{BBUF} ;线性系数转换器的参考电压被接到引脚上,通常与 V_{out} 相连。量程温度系数转换器和线性系数转换器的输出由缓冲方式得到,可以驱动外部反馈电阻。

偏置系数转换器和量程系数转换器是静态转换器,系数不会变化。偏置温度系数转换器和量程温度系数转换器都是动态的,相应地修正偏置温度系数误差和量程温度系数误差,系数是一个由 120 个值构成的序列中的一个值,但对每一个转换器是独立的,且其系数是由与温度成正比的 V_{BBUF} 决定的。线性系数转换器也是动态的,因为其系数是以 V_{out} 为依据变化,是一个由 8 个可能值组成的序列中的某一个值。

3.4 模/数转换器

MCA7707 的模/数转换器有 16 位的分辨率和 12 位的精度,每次转换需要大约 16000 Fclks,其差动输入端接到多路选择器,该选择器在 V_{BBUF} 或 V_{out} 的模/数转换器输出通过电路发出去时,它表示的是对数字增益和偏置修正未进行任何数字处理的 12 位数值。

4 MCA7707 补偿工作原理

4.1 MCA7707 的参数描述

在介绍 MCA7707 的补偿原理前,首先要定义一下所使用的符号并作一些状态假设。

4.1.1 传感器的参数定义

V_s 为差分传感器的低级输出; I_b 为传感器激励电流; T 为温度,℃; V_b 为传感器激励电压; R_b 为传感器

桥路阻抗; P 为传感器机械激励(压力); S 为传感器机械激励灵敏度; V_{of} 为每伏桥路电压的传感器偏置。

4.1.2 仿真器参数定义

V_{out} 为仿真器输出电压; V_{dd} 为仿真器电源正端;PGA 为信号路径可编程增益放大器的增益;AA 为电流镜增益(比例); V_{ss} 为仿真器电源地端;AGND 为模拟地($V_{dd}/2$); I_{SRC} 为电流源参考电流; V_{BBUF} 为电桥缓冲输出电压。

4.1.3 EEPROM 参数描述

α 为量程系数(设置基本激励电流); g 为偏置系数(设置零位压力输出); x 为量程线性系数; β 为量程温度系数; d 为偏置温度系数。

4.1.4 外部元件参数

R_{ISRC} 为与 I_{SRC} 和 V_{ss} 相连的电阻; R_{LIN} 为量程线性反馈电阻(设置 FSO 线性补偿); R_{STC} 为量程温度系数反馈电阻(设置 I_b 温度补偿)。

4.2 MCA7707 的初始修正

4.2.1 量程系数修正

量程系数修正可通过 2 种调节方法实现。第一种是用 3 位字调节 PGA 的增益倍数以设置粗略的增益放大倍数,以满足所需的理想量程;第二种修正就是用 16 位字对电桥电流进行调整。为了实现偏置温度系数和量程温度系数的线性补偿,两个 DAC 的参考输入与电桥电压相连,输出电压由随温度变化的电桥电压决定,通过调整乘数可实现温度斜率补偿。第一种调整方法在前面已经介绍过了,这里不再重复。下面介绍第二种调整方法。见图 1。

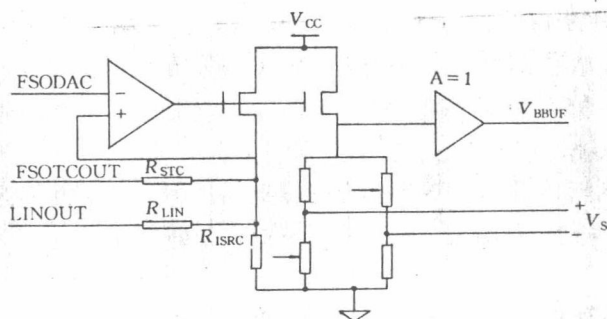


图 1 电桥驱动电路

在没有电阻 R_{STC} 和 R_{LIN} 时, I_{SRC} 端流出的电流“ i ”与因子 AA 相乘,得电桥激励电流,定义如下:

$$I_b = AA \cdot i \quad (1)$$

由于电阻 R_{ISRC} 上的电压与量程转换器的输出值相同,所以可用它设置电桥的激励电流,实际上也就同时决定了模块的量程系数。因此在等式(1)中用通过

电桥的电流代替“ i ”，并假设 V_{ss} 等于零，且将 $I_b = V_b / R_b$ 代入得：

$$V_b = AA \cdot R_b \cdot (\alpha \cdot V_{dd} / R_{ISRC}) \quad (2)$$

电阻 R_{STC} 的驱动臂与量程温度系数转换器的输出相连，使电桥电压可反馈回电流源以控制循环。电桥电压随温度变化，反馈路径就变成了量程温度系数补偿反馈，将其加入等式(2)中得：

$$V_b = AA \cdot R_b \cdot [\alpha \cdot V_{dd} / R_{ISRC} + (\alpha \cdot V_{dd} - \beta \cdot V_b) / R_{STC}] \quad (3)$$

电阻 R_{LIN} 的驱动臂与 LINOUT 相连，该缓冲器的输入量程线性转换器的输出，这样 7707 输出电压的一部分就反馈回电流源。

现在可完善电桥电压的等式并解出 V_b ，得完整的电桥电压为：

$$V_b = \frac{\frac{\alpha \cdot V_{dd}}{R_{ISRC}} + \frac{\alpha \cdot V_{dd}}{R_{STC}} + \frac{\alpha \cdot V_{dd} - \chi \cdot V_{out}}{R_{LIN}}}{\frac{1}{AA \cdot R_b} + \frac{\beta}{R_{STC}}} \quad (4)$$

$$V_{out} = \frac{\frac{\alpha \cdot V_{dd}}{R_{ISRC}} + \frac{\alpha \cdot V_{dd}}{R_{STC}} + \frac{\alpha \cdot V_{dd} - \chi \cdot V_{out}}{R_{LIN}} \cdot (S_{ensor} \cdot PGA + 2\delta) + 2\gamma V_{dd} - 2 \times AGND}{1 + \frac{\gamma \cdot (S_{ensor} \cdot PGA + 2\delta)}{R_{LIN} \cdot \left(\frac{1}{AA \cdot R_b} + \frac{\beta}{R_{STC}} \right)}} \quad (11)$$

上式表述 MCA7707 模拟通道实现的完整传递功能。大多数硅压阻传感器的压力线性度非常好，不需

4.2.2 偏置系数修正

初始偏置修正可用 16 位数字乘以提供电压的一部分实现，产生一个流入 PGA 总和点的电压来补偿传感器的偏置。由于传感器输出电压 $V_s = INP - IN$ ，则芯片输出电压为：

$$V_{out} = V_s \cdot PGA + OFFSET + OTC \quad (5)$$

OFFSET 和 OTC 表示为：

$$OFFSET = 2 \cdot \gamma \cdot V_{dd} \quad (6)$$

$$OTC = 2 \times (\delta \cdot V_b - AGND) \quad (7)$$

则输出电压为：

$$V_{out} = V_s \cdot PGA + 2\gamma V_{dd} + 2 \times (\delta \cdot V_b - AGND) \quad (8)$$

通用传感器的输出定义如下：

$$V_s = V_b \cdot (S \cdot P + V_{of}) + M_{isc} \quad (9)$$

M_{isc} 指其它误差，主要指非重要性误差，因 7707 只处理重复性误差，上式可简化如下：

$$V_s = V_b \cdot S_{ensor} \quad (10)$$

把等式(4)和(10)代入(8)得，得 MCA7707 的传递函数为：

压力线性修正，因素 χ 和 R_{LIN} 可忽略，上式可简化为：

$$V_{out} = V_{dd} \cdot \left[\frac{\frac{\alpha}{R_{ISRC}} + \frac{\alpha}{R_{STC}}}{\frac{1}{AA \cdot R_b} + \frac{\beta}{R_{STC}}} \cdot S_{ensor} \cdot PGA + 2\delta \right) + 2\gamma - 1 \quad (12)$$

4.3 MCA7707 线性补偿

MCA7707 用 2 个 16 位 DAC 对量程温度系数和偏置温度系数误差进行修正，这两个系数随温度变化，这是 7707 可进行精确温度补偿的原因。

4.3.1 量程温度系数补偿

由于用恒流源激励传感器，而传感器输入阻抗 R_b 随温度变化，因此传感器电桥电压 V_b 与 R_b 随温度作同向变化，而硅 PRTS 的灵敏度随温度反向变化，这种变化量一般小于 TCR 的变化量，因此在恒温源作用下，大多数的硅 PRTS 有明显的非线性量程温度系数误差。理想 TCR 和 TCS 大小相等，符号相反，因此理想量程不随温度变化。在无法调整 TCR 时，可调整激

励电流使它作为 TCR 的补充，这就是 MCA7707 的补偿原理。7707 的可编码电流源有一个反馈系统，可以使 TCR 减少到 TCS 相等，称为量程温度系数补偿。

回到前面导出 V_b 的等式并消除包括 R_{LIN} 原项(压力线性修正)得：

$$V_b = \alpha \cdot V_{dd} \cdot \frac{1/R_{ISRC} + 1/R_{STC}}{1/(AA \cdot R_b) + \beta/R_{STC}}$$

在任何给定温度下， R_{STC} 、 R_{ISRC} 、 AA 、 R_b 和 V_{dd} 是不变和独立的，因此可以建立一种简单模式来保存传递函数。

$$V_b = \frac{\alpha \cdot K_1}{1 + \beta/K_2} \quad (13)$$

现在根据一个等式和两个未知数 K_1 和 K_2 , 得到了理想的 V_b , 根据经验选择产生理想 V_b 的两个 α_s 和 β_s 来得到 K_1 和 K_2 的值。 α 和 β 赋的值应在 0~65536 内以产生能直接得出量程系数和量程温度系数存储器中数据的 K_1 和 K_2 。在同一温度下有下面两个等式:

$$V_b = \frac{\alpha \cdot K_1}{1 + \beta_1/K_2} \text{ 和 } V_b = \frac{\alpha_2 \cdot K_1}{1 + \beta_2/K_2} (\alpha_1 \neq \alpha_2, \beta_1 \neq \beta_2)$$

求出 K_1 和 K_2 代入 V_b :

$$V_b = \frac{\alpha \cdot \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2 \cdot \alpha_1 - \alpha_2 \cdot \beta_1}}{1 + \frac{\beta}{\beta_2 \cdot \alpha_1 - \alpha_2 \cdot \beta_2}} \quad (14)$$

为实现满足在两个不同温度点的两个等式的单独 α 和 β 的解算方法, 并根据每一温度下 V_b 的不同值设置关于式(14)中的两个系统, 并把两个温度中低者记为“C”, 高者记为“H”。

经简化, 可明确地求出 α 和 β 并用下面形式来表示。

$$\lambda = \beta_1 H \cdot (\alpha_2 C - \alpha_1 C) + \beta_2 C \cdot (\alpha_2 H - \alpha_1 H) + \beta_2 H (\alpha_1 C - \alpha_2 C) + \beta_1 C (\alpha_1 H - \alpha_2 H) \quad (15)$$

$$\alpha = [\alpha_1 H \cdot (\beta_2 H \cdot \alpha_1 C - \beta_1 H \cdot \alpha_2 C + \beta_1 C \cdot \alpha_2 C - \beta_2 C \cdot \alpha_1 C) + \alpha_2 H \cdot (\beta_1 H \cdot \alpha_2 C - \beta_1 C \cdot \alpha_2 C + \beta_2 C \cdot \alpha_1 C - \beta_2 H \cdot \alpha_1 C)] / \lambda \quad (16)$$

$$\beta = [\beta_2 C \cdot (\beta_1 H \cdot \alpha_2 C - \beta_2 H \cdot \alpha_1 C + \beta_1 H \cdot \alpha_1 C - \beta_2 H \cdot \alpha_1 C) + \beta_1 C \cdot (\beta_2 H \cdot \alpha_1 C - \beta_1 C \cdot \alpha_2 H + \beta_1 C \cdot \alpha_2 C - \beta_1 H \cdot \alpha_2 H)] / \lambda \quad (17)$$

通过上式的 α 和 β 设置量程系数和量程温度系数后, 迫使 V_b 的温度系数斜率与 TCS 相反, 然后对 - 阶量程温度误差进行补偿, 同时补偿量程系数。

4.3.2 偏置温度系数补偿

MCA7707 线性偏置温度系数补偿的基础是: 决定温度点上 V_b 变化的比例系数需加在信号路径的结点上, 以消除线性或 - 阶偏置温度系数误差。补偿需满足下列关系

$$(V_{out} H - V_{out} C) + OTC \cdot (V_b H - V_b C) = 0$$

通过因子 a 得到增益, 并把增益加在 7707 上, 以扩大偏置温度系数补偿范围, 进一步减小系数 OTC_{code} 的值。用一个装入 OTCDAC 中的值为表示系数得:

$$OTC_{code} = OTCDAC_{range} \frac{OTC}{OTC_{gain}}$$

式中: OTC_{gain} 是通过总和点的增益; $OTCDAC_{range}$ 是偏置温度系数转换器的满刻度代码。

将上面两个等式合并得:

$$OTC_{code} = \frac{OTCDAC_{range} \cdot (V_{out} C - V_{out} H)}{OTC_{gain} \cdot (V_b H - V_b C)}$$

信号路径总和点的信号增益 OTC_{gain} 根据经验来决定: 只要 OTC_{code} 暂时为满量程, 改变电桥激励电压并测量输出引脚“7”上的结果, 该值约为 1.57。用等价的数代替 $OTCDAC_{range}$ 和 OTC_{gain} 达到最终的解算方案得下式:

$$OTC_{code} = \frac{65535 \times (V_{out} C - V_{out} H)}{1.57 \times (V_b H - V_b C)} \quad (18)$$

4.3.3 压力线性修正

压力线性通过将输出电压反馈到电流源来修正。在恒定的电流作用下, 输出电压在压力作用下为非线性, 需进行压力线性修正。补偿将采用下面的单一化函数:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{g \cdot A \cdot P}{1 - \chi \cdot A \cdot P}$$

式中: χ 是 DAC 所置的反馈分割系数, 可为正或负; g 是传感器修正系数; A 是 PGA 的增益; P 是压力。

MCA7707 通过一个 16 位的 DAC 对 V_{out} 到 V_b 的反馈循环进行编程, 从而调整作为压力函数的传感器。修正是由轻微地调整作为压力函数的 V_b 来实现的, 而 V_b 是作为量程温度系数和偏置温度系数修正的矢量表的温度参考。因此, 任何 V_b 变化, 都被 7707 作为温度变化处理。

MCA7707 的线性修正还有一个特点: 测量未修正误差的值, 然后任选一个小的值给 χ 。测完线性误差后, 就可建立线性修正总量和存储在线性 DAC 中的系数之间的线性关系, 以此来预知线性系数 χ 的大小。矢量表用来修正非线性传感器误差, 采用的方法是对线性系数进行小的调整, 以对模拟信号路径特性作轻微地改变。模/数转换器将电桥激励电压 V_b 数字化后的输出存入存储器队列中, 用这种方法可将不同的量程温度系数和偏置温度系数作为温度的函数装入模拟信号通道。量程系数和偏置温度系数矢量表各含有 120 个元素。工作时, 7707 次/s 访问数次 EEPROM, 如温度不变, 被装入两个温度系数 DAC 中对应的两个元素将引起量程和偏置的变化。在进行矢量表补偿的技术中最具性的是该矢量表只修正非线性误差, 而线性误差则在纯模拟方式中进行修正, 降低了量化误差。

5 硅压阻式传感器的测试结果

根据 MCA7707 的补偿原理, 我们做了许多实验, 并且获得了大量的数据, 实验结果证明, MCA7707 对

硅压阻式传感器进行的温度误差实时补偿和修正是完全可行的。

5.1 EEPROM 的补偿矢量表数据

在一个温度循环内(- 40~60℃),按照操作步骤,执

行 MCA 公司提供的开发软件,获得一组与温度有关的量程温度修正系数和偏置温度修正系数,即补偿矢量表,存入外部 EEPROM 中,补偿矢量表如表 1 所示。

表 1 MCA7707 补偿硅压阻传感器的矢量表

0x00	0082	c6d7	2a78	34f8	ffff	0008	ffff	ffff	1686	167d	1674	166a	1661	1658	164e	1645
0x10	163c	1633	1629	1620	1617	160d	1604	15fb	15f1	15e8	15df	15d5	15cc	15c3	15ba	15b0
0x20	15a7	159e	1594	1588	1582	1578	156f	1566	155c	1553	154a	1541	1537	152e	1525	151b
0x30	1512	1509	14ff	14f6	14ed	14e3	14c8	14c8	14c8	14bf	14b6	14ad	14a3	149a	1491	1487
0x40	147e	1475	146b	1462	1459	144f	1442	1435	1428	141a	1400	1400	13f2	13e5	13d8	13ca
0x50	13bd	13b0	13a2	13a1	13a0	139e	139d	139c	139a	1399	1397	1396	1395	1393	1392	1390
0x60	1393	1397	139a	139e	13a1	13a5	13a8	13ac	13af	13b3	13b6	13ba	13bd	13c0	13c3	13c6
0x70	13c9	13cc	13cf	13d2	13d5	13d8	13db	13de	13e1	13e4	13e8	13eb	13ee	13f1	13f4	13f7
0x80	0800	0800	0800	0800	0800	0800	0800	0800	5c06	5b53	5aa1	59ee	593c	5889	57d7	5724
0x90	5672	55df	550d	545b	53a8	52f6	5243	5191	50de	502c	4f79	4ec7	4e14	4d62	4caf	4bfa
0xa0	4b4b	4a98	49e6	4933	4881	47ce	471c	4669	45b7	4504	4452	439f	42ed	423b	4188	40b6
0xb0	4023	3f71	3ebe	3e0c	3d59	3ca7	3a90	3a90	3a90	39de	392c	3879	37c7	3714	3662	35af
0xc0	34fd	344a	3398	32e5	3233	3180	314f	311e	30ed	30bc	308a	3059	3028	2ff7	2fc5	2f94
0xd0	2f63	2f32	2f00	2ef9	2ef2	2eea	2ee3	2edc	2ed4	2ecd	2ec5	2ebe	2eb7	2eaf	2ea8	2ea0
0xe0	2ec4	2ee8	2f0c	2f30	2f54	2f78	2f9c	2fc0	2fe4	3008	302c	3050	3066	307c	3093	30a9
0xf0	30bf	30d6	30ec	3103	3119	312f	3146	315c	3173	3189	31a0	31b6	31cc	31e3	31f9	320f

5.2 实验结果分析

表 2 和表 3 是硅压阻传感器补偿前后的输出数据表。从这两个表中可以看出经过补偿后,传感器的输

出性能得到了显著地改善,补偿后传感器的温度误差比补偿前明显地降低了。

表 2 硅压阻式传感器补偿前数据表

量程 /kPa	20℃ 基准值 /V	- 40℃ 基准值 /V	与 20℃ 差值 /V	相对误差 /%	60℃ 基准值 /V	与 20℃ 差值 /V	相对误差 /%
0	0.328	0.360	0.032	0.75	0.312	0.016	0.37
20	1.142	1.189	0.047	1.10	1.139	0.003	0.07
40	2.007	2.075	0.068	1.60	2.016	0.009	0.21
60	2.689	2.938	0.069	1.62	2.889	0.200	0.47
80	3.727	3.802	0.075	1.77	3.757	0.300	0.71
100	4.557	4.664	0.087	2.05	4.627	0.500	1.18

表 3 硅压阻式传感器补偿后数据表

量程 /kPa	20℃ 基准值 /V	- 40℃ 基准值 /V	与 20℃ 差值 /V	相对误差 /%	60℃ 基准值 /V	与 20℃ 差值 /V	相对误差 /%
0	0.499	0.499	0.000	0.000	0.500	0.001	0.025
20	1.263	1.266	0.002	0.002	1.266	0.003	0.075
40	2.075	2.077	0.002	0.002	2.080	0.005	0.125
60	2.884	2.885	0.001	0.001	2.891	0.007	0.175
80	3.689	3.683	0.007	0.007	3.684	0.005	0.125
100	4.494	4.490	0.004	0.004	4.490	0.004	0.100

(下转第 39 页)