

文章编号: 1001- 2486(2008) 01- 0057- 06

## 阿基米德螺旋天线的群延迟和 UWB-SAR 系统延迟的补偿研究\*

王 建, 周智敏, 宋 千

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 将 Archimedean 天线的群延迟分为色散部分和非色散部分。利用 Archimedean 螺旋线的几何特性揭示了其固有的色散特性, 有效地解决了该类天线群延迟未知情况下的补偿问题; 将天线群延迟的非色散部分等效为附加系统延迟, 利用定标体形成的曲线特征, 提出了一种基于 Hough 变换(HT) 的延迟系统估计方法, 并利用曲线的对称性降低 HT 的维数, 提高估计速度。轨道超宽带 SAR 数据的处理结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 阿基米德螺旋天线; 色散补偿; 超宽带 SAR; Hough 变换

**中图分类号:** TN958      **文献标识码:** A

## Compensation of Archimedean spiral Antenna Group Delay and UWB-SAR System Delay

WANG Jian, ZHOU Zhi-min, SONG Qian

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

**Abstract:** The group delay of the Archimedean spiral antenna was cataloged into the dispersion part and the constant part. Then a geometrical analysis was used to reveal the inherent dispersion property of the antenna's group delay. As a result, it effectively compensated the unknown antenna with its geometry measured. The constant group delay of the antenna was added into the system delay as a whole, and the whole delay was estimated through the Hough transformation of the hyperbola of a calibration marker (e. g. trihedral), as one of the curve parameters is the system delay. By an estimation of the azimuth location of the nadir of the curve using its symmetrical property, the dimension of the Hough transformation is further eliminated, so the method is efficient. Rail Ultra Wide Band SAR (UWB-SAR) data processing result verified the compensation method.

**Key words:** Archimedean spiral antenna; dispersion compensation; UWB-SAR; Hough transformation

超宽带合成孔径雷达(UWB-SAR)具有穿透地表对埋地目标进行高分辨成像的能力, 而采用 UWB-SAR 技术的探地雷达是目前探雷技术的重要研究方向之一, 形成对常规的红外、声学等探雷手段的有效补充。UWB-SAR 探雷又分为下视模式和前视(斜视)模式。这两种模式具有不同的优缺点, 下视模式覆盖面积有限, 安全性低, 但是探测率高; 而前视模式覆盖面大, 安全性高, 但其探测率一般要低一些; 因此这两种探雷方式能够形成优势互补。国内对下视探雷技术的研究比较深入, 而对前视探雷技术的研究还处于起步阶段。

圆极化天线体积和重量更小, 易于形成轻巧的探雷系统, 因此在探地雷达系统中被经常采用。而在各类圆极化天线中, Archimedean 螺旋圆极化天线具有良好的低频和宽带辐射特性, 但是也存在很强的色散特性, 不加补偿将严重影响成像质量<sup>[1]</sup>。文献[2]提出了利用天线传输特性, 通过差分估计天线的群延迟的方法, 并利用曲线拟合差分结果, 但是拟合的结果不单是天线的群延迟, 而是传输线、天线以及天线间传输共同作用的结果。这种方法虽然也可以有效地补偿天线的色散效应, 但是没有揭示天线固有的群延迟特性。本文将天线群延迟特性分解为色散部分和非色散部分, 提出了利用天线几何估计建立群延迟经验公式的色散部分补偿方法, 同时将非色散部分等效为系统延迟。

同时提出了借助于外部定标体(如角反射器)的系统延迟补偿方法, 该方法利用定标体在回波中近

\* 收稿日期: 2007- 04- 24

作者简介: 王建(1981-), 男, 博士生。

似呈现的双曲线特性,通过 Hough 变换(HT)分析曲线参数,得到系统延迟的估计。由于曲线参数有三个,HT 的计算量将很大,因此本文提出了一种分步估计方法,先用利用曲线对称性估计方位参数,然后利用 HT 估计另外两个参数,这种方法估计精度高,同时显著减小了参数估计的计算量。

## 1 Archimedean 螺旋天线群延迟特性

阿基米德螺旋曲线为一动点以常速沿射线向外运动,同时又以固定的角速度绕极点转动形成的特定轨迹。本文采用的 Archimedean 螺旋天线如图 1 所示,其中  $O$  为极点,螺旋线展开速度为  $a = \Delta R / 2\pi$ ,  $\Delta R$  为相邻螺旋线间隔,即图 1 左图中的  $A_0A_1$  的间距;  $\varphi$  为螺旋线旋转的弧度。则弧长可表示为<sup>[3]</sup>:

$$L_{OM}(\varphi) = \frac{a}{2}(\varphi \sqrt{\varphi^2 + 1} + \text{Arsh } \varphi) \quad (1)$$

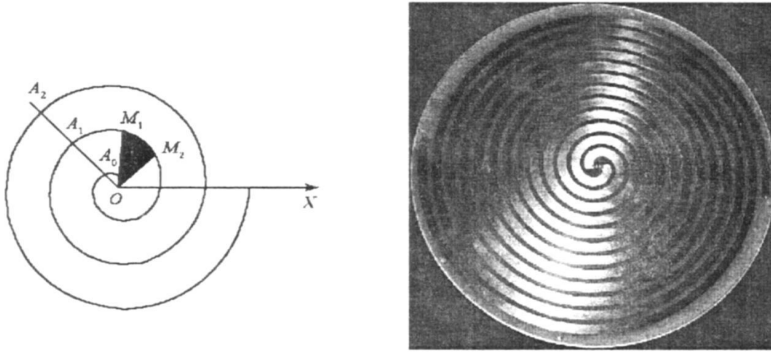


图 1 Archimedean 螺旋天线

Fig. 1 Archimedean spiral antenna

文献[2]虽然也是根据几何关系给出了 Archimedean 天线群延迟的经验公式,但是所给公式反映的是传输线、天线以及天线传输共同作用的结果,当天线间隔变化,公式也随之变化,没有揭示 Archimedean 螺旋天线固有的群延迟特性。实际上,Archimedean 天线的群延迟是其固有特性,通过实验分析发现:可以将天线群延迟特性分解为色散部分和非色散部分。色散部分是由于天线辐射造成的,非色散部分是由于天线接头和内部传输造成的。

一般可认为,Archimedean 天线色散部分的形成机理:对发射信号来说,不同波长的信号分量从周长为整数倍波长的螺旋线辐射出去<sup>[4]</sup>,即天线内环辐射高频信号,外环辐射低频信号,因此低频分量的群延迟比高频分量的大。由此特性,可根据天线的几何形状计算出天线的群延迟,该特性可以用一个隐函数表示:

$$\begin{cases} f = c/[L_{OM}(\varphi + 2\pi) - L_{OM}(\varphi)] \\ \tau_d = 2L_{OM}(\varphi) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $c$  为自由空间的光速, $f$  为辐射信号分量的频率, $\tau_d$  为对应的群延迟。某一典型的 Archimedean 右旋天线的色散特性如图 2 所示,测量时收发天线的间隔分别是 0、0.55m 和 1m,对应从左到右的三个小图中各有一条较光滑的曲线和上下两条波动较大的曲线,其中光滑曲线是按照公式(2)计算出的经验值;顶端波动曲线是测量结果(已经减去了与天线间隔有关的固定的群延迟);而在 0 附近波动的底端曲线是两者的误差;三幅小图的结果也验证 Archimedean 天线群延迟的色散部分具有不随天线间隔而变化的特性。在随后测量中还发现这种特性主要与螺旋线结构有关,不随天线极化的变化而改变,为以后天线阵的色散补偿工作提供了很大的方便。

从图 2 中还可发现:几乎在整个高频频段内,经验群延迟与测量值之差都在  $\pm 0.5\text{ns}$  之内,而在低频端存在较大的误差。这是由于天线的尺寸有限,当发射信号频率小于某一值时,信号将不能被有效地辐射,如图 3 所示,在低频端天线的增益急剧衰减。由于天线增益的衰减,信噪比很低,测量出的群延迟出现明显的抖动,因而此时的结果本身不具有太大的意义。天线辐射频率的下限也可以从天线几何结构

中计算:

$$f_{stop} = \frac{Kc(\varphi_{max}^2 + 2)}{2\pi a(\varphi_{max}^3 + 1)^{1.5}} \quad (3)$$

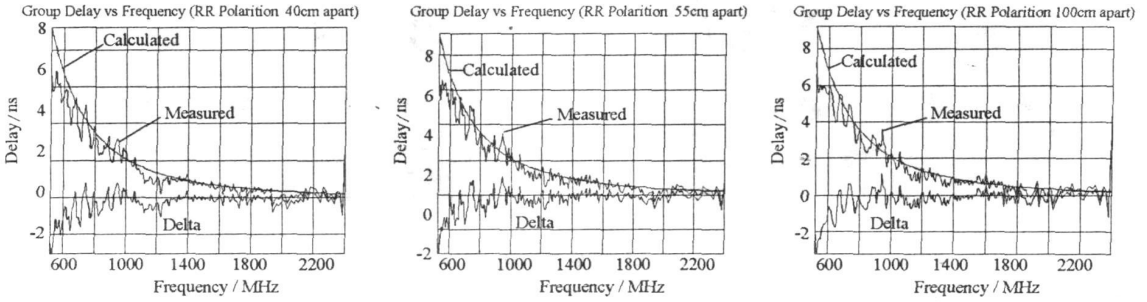


图 2 不同间隔下天线的群延迟色散曲线

Fig. 2 Group delay of archimedean spiral antenna

式中  $\varphi_{max}$  为螺旋线旋转的最大弧度。(3) 式也是经验公式, 当  $0.8 \leq K \leq 1.2$  时, 可以认为天线性能出现降低, 天线正常辐射到辐射截止的过渡带。通常情况下, 当发射信号接近这段频率时, 群延迟的变化将变缓, 并且近似线性增加。由于最大的群延迟也不会超过  $2L_{OM}(\varphi_{max})$  引起的传输延迟, 为了保持低频段天线群延迟的一致性, 可以用直线拟合这段数据, 拟合公式为:

$$\tau_d(f) = \frac{(f_{stop2} - f) \tau_d(f_{stop1}) + (f - f_{stop1}) 2L_{OM}(\varphi_{max})/c}{f_{stop2} - f_{stop1}} \quad (4)$$

其中,  $f_{stop2}$  为截止段的频率上限, 可取  $K = 1.2$ , 由(3)式计算;  $f_{stop1}$  为截止段的频率下限, 可取  $K = 0.8$ , 由(3)式计算;  $\tau_d(f_{stop1})$  为按照(2)式计算出的对应于  $f_{stop1}$  的群延迟。

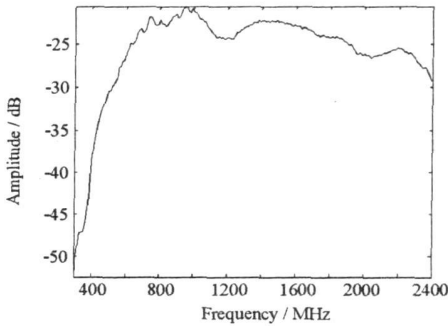


图 3 天线传输幅频特性

Fig. 3 Transmission amplitude vs. frequency

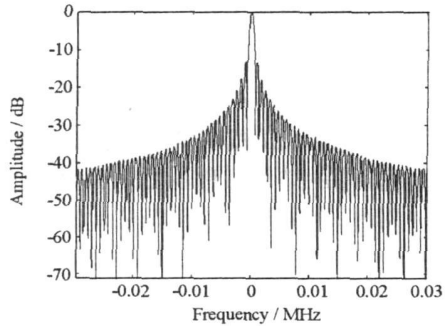


图 4 脉冲压缩结果

Fig. 4 Pulse compression

多次测量天线的群延迟, 然后取平均, 可以有效减小测量过程中引入的噪声, 积分平均后的结果就获得了天线的相位补偿函数。利用该补偿函数补偿后的脉冲压缩如图 4 所示, 由于还补偿了天线增益幅度的不平坦性, 因此图 4 的压缩结果几乎接近于理想 sinc 函数。可见基于测量数据的补偿是有效的, 而在后面的实际数据处理时, 将经验公式的补偿结果与测量数据比较, 以验证经验公式的有效性。图 5 是录取的角反射器的回波信号, 天线色散造成距离分辨率的降低如左图所示; 而采用经验公式补偿后距离分辨率提高, 如右图所示。

天线群延迟的非色散(线性)部分, 造成信号时域波形的整体后移, 可以等效于信号通过一段传输线引起的时间延迟, 经过天线色散补偿后, 其群延迟的剩余部分可以在系统延迟补偿中予以消除。

## 2 系统延迟补偿

由于 SAR 的分辨率非常高, 系统传输延迟将造成图像的散焦, 必须予以补偿。SAR 系统的延迟主

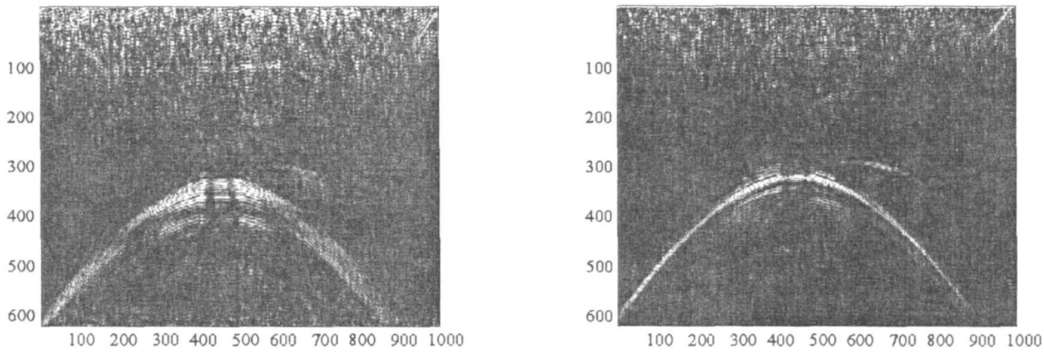


图5 角反射器的时域图像(左图为原始图像,右图为经验公式补偿后图像)

Fig. 5 Reflector in time domain (left before compensation, right after compensation)

要包括:传输线延迟、天线延迟和自由空间延迟。天线延迟的色散部分在前一节已经获得了补偿,但是还有一个固定延迟分量无法补偿;传输线一般是非色散的,其群延迟为一定值;而自由空间延迟是目标和天线位置的函数,是在成像过程中需要利用的量。因此可以建立模型来反映经过天线色散补偿后的回波信号:

$$r(x) = \Delta r + \sqrt{R_0^2 + \left(x - x_0 - \frac{\Delta TR}{2}\right)^2} + \sqrt{R_0^2 + \left(x - x_0 + \frac{\Delta TR}{2}\right)^2} \quad (5)$$

其中有三个未知参数:天线色散补偿后剩余的固定延迟的等效传输长度与传输线长度之和  $\Delta r$ 、目标距离位置  $R_0$  和目标方位位置  $x_0$ 。可以基于图像对比度最优的原则,通过穷举法估计以上参数,但是这种方法非常耗时。因此我们提出了一种利用外部定标体的参数估计方法,该方法利用了HT的思想。

HT是一种将边缘图像投影到参数空间,通过寻找参数空间的最大值估计曲线参数的方法<sup>[5]</sup>。该方法具有一定的抗噪声性能,但是当噪声较大时会影响估计性能,因此在场景中放置一个定标体(如角反射器),此时接收数据图像中将出现一条明显的曲线(近似为双曲线),如图5所示,由于信噪比较高,利用该曲线估计系统参数能够显著提高估计精度。

(5)式描述的曲线有三个参数,需要建立一个三维参数空间,而三参数的HT计算量很大,虽然人们提出了很多改进的HT如概率RT等方法降低计算量<sup>[6]</sup>,但这些方法的实现复杂。结合曲线特征,本文提出了一种更简便的结合对称性估计和HT的参数估计方法,大大缩短了估计时间。由于(5)式描述的曲线关于  $x_0$  对称,利用该特性首先估计出  $x_0$  的值,可以将三维参数空间降为二维,提高HT的效率。但是对称性估计对噪声很敏感,由于曲线的强度远高于背景,可以认为背景为高斯白噪声,将回波数据二值化,这样图像中将只剩下近似双曲线,然后在每个距离上采用(6)式估计对称中心,最后取平均就得到了  $x_0$  的估计。

$$y(m) = \frac{\sum_{p=m-1}^{N-m} S(m-p)S(m+p)}{\sum_{p=1}^N S^2(p)} \quad (6)$$

其中,  $S(n)$  为某个距离上的方位采样信号,  $N$  为采样点数。然后按照(5)式对应的曲线参数进行HT,可以得到曲线在参数空间的投影,如图6所示,接着寻找参数空间的最大点,就可以得到  $\Delta r$  和  $R_0$  的估计,最后将接收数据整体向前移动  $\Delta r$  就完成了系统延迟的校正。

### 3 试验结果

为了验证所提出的天线色散补偿方法和系统延迟补偿方法的有效性,利用轨道试验UWB-SAR系统录取了两组数据,记为数据1和数据2。数据1记录了地表放置0.5m角反射器的场景,数据2记录了埋有11颗金属反坦克地雷的场景,系统采用LBP算法进行成像<sup>[7]</sup>。UWB-SAR系统发射冲击信号, -10dB的带宽约为1GHz,合成孔径长度为22m,中心斜距为8m。

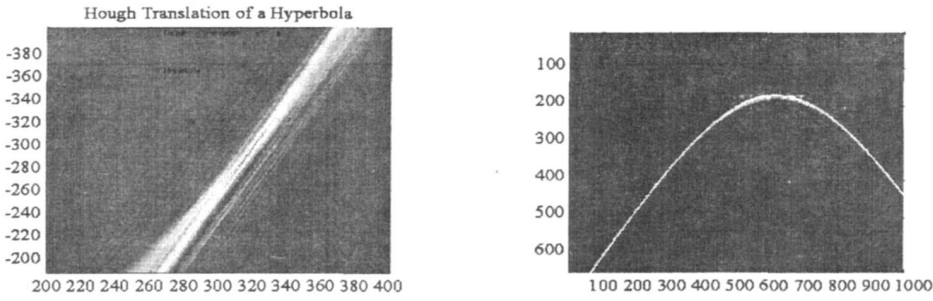


图 6 图 5 中曲线的 Hough 变换结果

Fig. 6 Hough transformation of the curve in Fig. 5

对于数据 1, 如果仅仅补偿天线色散而不补偿系统延迟, 则系统延迟存在 6.6ns 的误差(测量值), 此时 0.5m 角反射器的距离分辨率和方位分辨率分别展宽 36% 和 324%。可见补偿系统延迟是系统正常工作的前提, 下面的处理都是在系统延迟补偿后进行的。

图 7 显示了数据 1 的成像结果。当未补偿天线色散时, 距离分辨明显恶化, 比采用测量数据补偿的结果相比展宽 52%, 而采用经验公式补偿的距离分辨率仅仅展宽 2%; 色散主要造成波形的展宽, 并且由于已经进行过系统延迟补偿, 因此色散对方位的影响较小, 未补偿和采用经验公式补偿的方位向分辨率均仅展宽 5%。表 1 显示了 0.5m 角反射器的分辨率、峰值旁瓣比(PSLR)积分和积分旁瓣比(ISLR)等指标在不同处理方法下的差异。

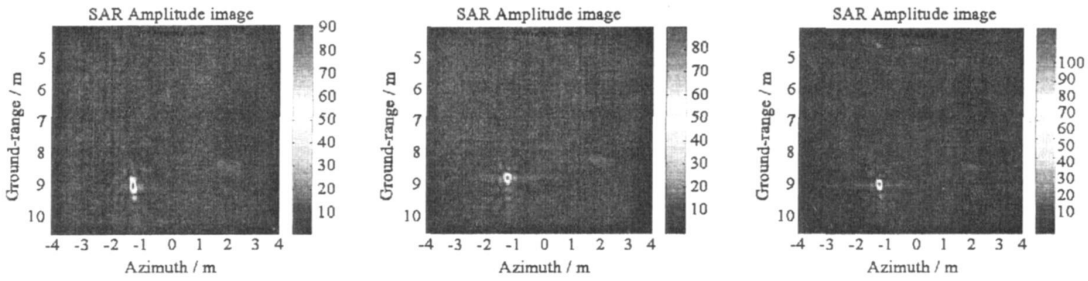


图 7 数据 1 图像(左图未补偿色散, 中图测量数据补偿, 右图经验公式补偿)

Fig. 7 Image of data 1 (left is the reflector without dispersion compensation; middle is the one with measured data compensation; right is the one with empirical delay compensation)

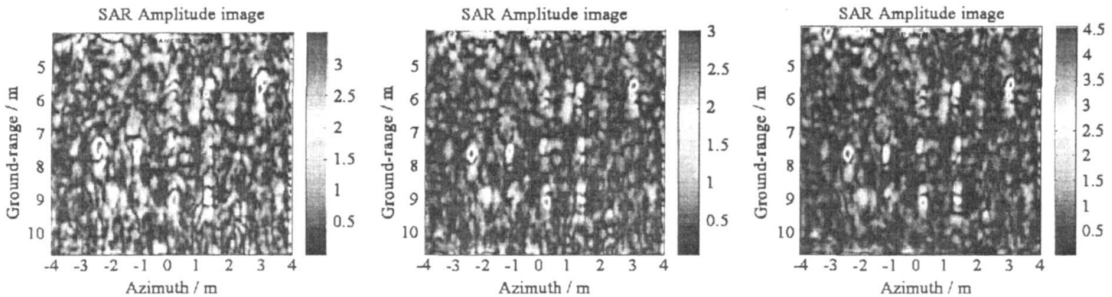


图 8 数据 2 图像(左图未补偿色散, 中图测量数据补偿, 右图经验公式补偿)

Fig. 8 Image of data 2 (left is the mines without dispersion compensation; middle are the ones with measured data compensation; right is the ones with empirical delay compensation)

图 8 显示了数据 2 的成像结果。图 8 左图是未补偿色散的结果, 此时的背景噪声很高, 地雷距离向出现了散焦现象, 同时方位向的聚焦也受到了影响; 中图是采用测量数据补偿的结果; 右图是采用经验公式补偿的结果, 可以发现经过这两种补偿后, 背景噪声显著降低, 距离分辨率得到了明显改善, 方位分辨率也提高了。

表1 角反射器图像的主瓣和旁瓣大小

Tab. 1 Minelobe and sidelobe level of the reflector

补偿方法	距离分辨率 (m)	距离 PSLR (dB)	距离 ISLR (dB)	方位分辨率 (m)	方位 PSLR (dB)	方位 ISLR (dB)
未补偿系统	0.2940	-11.84	-2.079	0.6620	-14.48	-8.47
未补偿色散	0.3280	-11.27	-6.79	0.1640	-14.27	-1.54
测量数据	0.2160	-16.47	-5.79	0.1560	-15.70	-1.46
经验公式	0.2200	-16.92	-6.34	0.1640	-15.75	-1.23

当采用相同型号的不同天线录取相同场景的数据时,采用经验公式的补偿结果也同样非常优良,因此验证了该方法可以有效补偿相同类型的不同天线。

#### 4 结束语

将 Archimedean 天线的群延迟分为色散部分和非色散部分,利用 Archimedean 螺旋线的几何特性揭示了天线固有的色散特性,有效地解决了天线特性未知情况下的补偿问题。将天线群延迟的非色散部分等效为附加系统延迟,利用外部定标体(如角反射器)在回波域近似呈现为双曲线的特性,提出了基于 Hough 变换的延迟估计方法,并利用曲线的对称性降低 HT 的维数,提高了系统延迟补偿的效率。轨道数据的处理结果验证了所提方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] Lacko P R, Franck C C, et al. Archimedean spiral and Log-spiral Antenna Compensation [C]//SPIE, April 2002, 4742: 230-236.
- [2] Lacko P R, Clark W W, Sherbondy K. Studies of Ground Penetrating Radar Antennas [C]//2<sup>th</sup> International Workshop on Advanced GPR, Delft, Netherlands, May, 2003: 24-29.
- [3] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社,1979: 398-399.
- [4] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002: 381.
- [5] Illingworth J, Kittler J. A Survey of the Hough Transform [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1988, 44 (2): 87-116.
- [6] 袁卫鹏, 施鹏飞. 模糊随机 Hough 变换算法[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36: 1825-1828.
- [7] Yegulalp A F. Fast Backprojection Algorithm for Synthetic Aperture Radar [C]//IEEE Radar Conference, Massachusetts, USA, April 1999: 60-65.

(上接第 36 页)

#### 4 结论

面向分布式寄存器的新调度策略改进了原有策略中对寄存器分配失败基本块的处理过程。不管基于何种基本块重划分方法,最多反馈 6 次、平均反馈 2 次就可以编译成功。由于新策略算法考虑了全局情况,降低了通讯调度复杂度,可以有效减少编译尝试的随机数个数和通信调度时间,实验中老策略大多尝试 200 个随机数仍无结果,而新策略编译成功时尝试随机数个数都在 30 以内。研究发现,编译成功率和编译效率是部分矛盾的。例如,横割拥有较好的编译效率但成功率却较低,为了编译成功可能要反馈更多的次数,而重划分基本块又会带来性能的下降;纵割虽然成功率较高,编译效率却较低;因此必须在编译成功率和编译效率之间综合考虑并进行折衷。基于启发式规则的调度策略(-all)由于考虑了上一次调度的反馈结果,可以更“聪明”地选择合适的割方法,因此在编译成功率和编译效率上都可以取得较好的效果。

#### 参考文献:

- [1] Rixner S, Dally W J, et al. A Bandwidth-efficient Architecture for Media Processing [C]//The 31st Annual ACM/IEEE International Symposium on Microarchitecture, USA, 1998.
- [2] Dally W J, Erez M, et al. Merrimac: Supercomputing with Streams [C]//SC 03, USA, 2003.
- [3] Sankaralingam K, et al. Exploiting ILP, TLP, and DLP with the Polymorphic TRIPS architecture [C]//The 30<sup>th</sup> Annual International Symposium on Computer Architecture, USA, 2003.
- [4] Flachs B, et al. A Streaming Processor Unit for a CELL Processor [C]//IEEE International Solid-state Circuits Conference, USA, 2005.
- [5] Mattson P. A Programming System for the Imagine Media Processor [D]. Dept. of Electrical Engineering., Ph. D. Thesis, Stanford University, 2001.
- [6] Wen M, et al. FT64: Scientific Computing with Streams [C]//Hipe 2007, India, 2007.
- [7] Mattson P, et al. Imagine Programming System Developer's Guide [EB]. <http://cva.stanford.edu>
- [8] Cormen T H, Leiserson C E, et al. Introduction to Algorithms (Second Edition) [M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [9] 袁国兴,等. 评几种高档微处理器在运算科学计算问题时的性能[EB]. <http://www.cwv.com.cn>.