

信息科学与技术学院

041 系

15

南 京 航 空 航 天 大 学

信
息
科
学
与
技
术
学
院

(信息与通信工程系卷)

信息科学与技术学院2006年发表论文目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
1	赵 军	博士生	041-2	多约束实数权的直接数据域算法在空时自适应处理中的应用	南京航空航天大学学报	2006. 38. 06	
	朱兆达	教授	041-2				
2	关振红	博士生	041-2	块自适应球形矢量量化算法压缩SAR原始数据	航空学报	2006. 27. 01	
	朱兆达	教授	041-2				
	朱岱寅	副研	041-2				
3	邓振淼	博士生	041-2	PSK伪码速率估计	南京航空航天大学学报	2006. 38. 01	
	刘 渝	教授	041-2				
	梁 帅	工程师	外				
4	邓振淼	博士生	041-2	正弦波频率估计的修正Rife算法	数据采集与处理	2006. 21. 04	
	刘 渝	教授	041-2				
	王志忠	硕士生	041-2				
5	黄慧慧	硕士生	041-2	连续波背景下多信号处理方法	数据采集与处理	2006. 21. 03	
	刘 渝	教授	041-2				
	邓振淼	博士生	041-2				
6	钱云襄	硕士生	041-2	线性调频连续波信号参数估计算法	现代雷达	2006. 28. 03	
	刘 渝	教授	041-2				
	黄慧慧	硕士生	041-2				
7	武小红	博士生	041-2	基于非欧式距离的可能性C-均值聚类	南京航空航天大学学报	2006. 38. 06	
	周建江	教授	041-2				
	李海林	讲师	041-2				
	胡彩平		041-2				
8	武小红	博士生	041-2	An Improved Possibilistic C-Means	“Joint IAPR International workshop on Structural and Syntactic Pattern Recognition and Statistical Techniques in Pattern Recognition” 会议交流(2006)		
	周建江	教授	041-2	Algorithm Based on Kernel Methods			
9	武小红	博士生	041-2	Kernel Fuzzy-Possibilistic c-Means	“Inetrnational Conference on Sensing, Computing and Automation” 会议交流(2006)		
	周建江	教授	041-2	Clustering Algorithm			
10	武小红	博士生	041-2	Alternative Possibilistic Fuzzy	“Journal of Computational Information Systems” 会议交流(2006)		
	周建江	教授	041-2	c-Means Clustering Algorithm			
11	武小红	博士生	041-2	Fuzzy Discriminant Analysis With	Pattern Recognition	2006. 39. 11	
	周建江	教授	041-2	Kernel Methods			
12	武小红	博士生	041-2	Kernel-induced Distance K-nearest-	“The First International Conference on Complex Systems and Applications” 会议交流(2006)		
	周建江	教授	041-2	neighbor Algorithm			
13	武小红	博士生	041-2	Allied fuzzy c-means clustering	南京航空航天大学学报(英文版)	2006. 23. 03	
	周建江	教授	041-2	model			
14	连小华	博士生	041-2	应用于微型飞行器阵列天线的自适应波束	南京航空航天大学学报	2006. 38. 03	
	周建江	教授	041-2	形成器			
15	连小华	博士生	041-2	2-D DOA Estimation for Unifoem	第七届“国际天线传播与电磁理论”会议交流(2006)		
	周建江	教授	041-2	circular Arrays With PM			
16	朱岱寅	副研	041-2	ISAR Range Alignment by Minimizing the	“IEEE AES Society” 会议交流(2006)		
	汪 玲	讲师	041-2	Enteopy of the Average Range Profile			

信息科学与技术学院2006年发表论文目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
17	李 晨 朱岱寅	博士生 副研	041-2 041-2	The Detection of Deception Jamming against SAR Based on Dual-Aperture Antenna Cross-Track Interferometry	“CIE国际雷达(CIERadar)”会议交流(2006)		
18	刘苗苗 黎 宁	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于快速均值漂移和水平集方法的图像分割技术	南京航空航天大学学报	2006. 38. 06	
19	赵亮亮 黎 宁	硕士生 副教授	041-2 041-2	一种基于全局约束的立体匹配算法	“第十三届全国图像图形学学术会议”交流(2006)		
20	胡培成 黎 宁	硕士生 副教授	041-2 041-2	一种新的基于消失点的摄像机标定方法	“第十三届全国图像图形学学术会议”交流(2006)		
21	吴 园 黎 宁 刘苗苗	硕士生 副教授 硕士生	041-2 041-2 041-2	一种基于快速水平集方法的运动车辆检测	“第十三届全国图像图形学学术会议”交流(2006)		
22	吴文怡 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于Contour let变换的红外弱小目标检测新方法	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
23	吴文怡 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于多级滤波器的红外图像序列小目标检测算法	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
24	潘 喆 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	二维Otsu阈值分割方法的改进	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
25	潘 喆 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	图像阈值选取快速算法的改进及其实验比较	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		
26	谢 静 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于Contour let变换的免疫数字水印技术	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		
27	谢 静 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于Contour let变换的图像盲水印算法	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
28	张建涛 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	与G. 729B编码器相结合的双端检测回声消除器	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
29	张建涛 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	一种新变步长LMS算法及其在回声消除中的应用	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		
30	丁 坚 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于纹理特征与数学形态学的车牌定位	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
31	丁 坚 (吴一全)	硕士生 副教授	041-2 041-2)	LMS自适应滤波算法最佳步长研究	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		
32	郭建平 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	结合分形的小波零树嵌入式图像编码	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
33	罗子娟 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于Contour let变换的图像融合研究	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
34	罗子娟 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于Contour let变换的红外图像序列小目标检测方法	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
35	付晓莉 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于角点信息和惯性主轴的车牌倾斜校正方法	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
36	郝红杰 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于Krawtchouk矩和小波变换的数字水印算法	“第13届全国图像图形学学术会议”交流(2006)		
37	郝红杰 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	一种抗几何攻击的数字图像版权保护算法	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		

信息科学与技术学院2006年发表论文目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
38	孙明利 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	一种改进的小波零树编码算法	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		
39	黄 骥 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于差分和颜色对特征点的车牌定位方法	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		
40	王国栋 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	微型飞行器中遥测数据嵌入视频图像方法研究	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		
41	王国栋 吴一全 周建江	硕士生 副教授 副教授	041-2 041-2 041-2	微型飞行器视频信息和遥测数据混合传输研究	“第13届全国图像图形学学术会议”交流(2006)		
42	李晓燕 吴一全	硕士生 副教授	041-2 041-2	基于小波包变换的图像融合方法	“第21届南京地区研究生通信年会”会议交流(2006)		
43	徐剑峰 吴一全 周建江	硕士生 副教授 副教授	041-2 041-2 041-2	基于SSDA匹配的车牌字符识别中问题的研究	应用科技	2006. 33. 09	
44	徐剑峰 吴一全 周建江	硕士生 副教授 副教授	041-2 041-2 041-2	基于目标与相关背景的多特征融合跟踪小目标	“南京航空航天大学第八届研究生学术会议”交流(2006)		
45	徐剑峰 吴一全 周建江	硕士生 副教授 副教授	041-2 041-2 041-2	基于像素点对误差累加的最佳阈值选取与一种边界检测新算法	红外与激光工程	2006. 35 增刊	
46	李 勇 朱岱寅 朱兆达	讲师 副研 教授	041-2 041-2 041-2	机载合成孔径雷达大斜视高分辨率重叠子孔径成像算法研究	电子学报(英文版)	2006. 28. 09	
47	李 勇 朱岱寅 朱兆达	讲师 副研 教授	041-2 041-2 041-2	Study on Geometric Distortion Correction in the Subaperture Processing for High Squint Airborne SAR Imaging	电子学报(英文版)	2006. 15. 01	
48	张小飞 徐大专	讲师 教授	041-2 041-2	均匀圆阵中盲联合角度和时延估计方法	通信学报	2006. 27. 12	
49	张小飞 徐 锐 徐大专	讲师 教授	041-2 041-2 041-2	一种改进的广义旁瓣相消的波束形成算法	中国空间科学技术	2006. 00. 05	
50	张小飞 徐大专	讲师 教授	041-2 041-2	一种新的盲联合角度一时延估计方法	哈尔滨工业大学学报	2006. 38. 11	
51	张小飞 徐大专	讲师 教授	041-2 041-2	一种新的频域自适应波束形成算法	兵工学报	2006. 27. 02	
52	张小飞 黄希珠 徐大专	讲师 教授	041-2 041-2 041-2	BLIND PARAFAC SIGNAL DETECTION FOR UNIFORM CIRCULAR ARRAY WITH POLARIZATION SENSITIVE ANTENNAS	南京航空航天大学学报(英文版)	2006. 23. 04	
53	张小飞 徐大专	讲师 教授	041-2 041-2	PARAFAC Multiuser Detection for SIMO-CDMA System	“International Conference on Communications, Circuits and Systems”会议交流(2006)		

信息科学与技术学院2006年发表论文目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
54	张小飞 徐大专	讲师 教授	041-2 041-2	Blind PARAFAC Receiver for Space-Time Block-Coded CDMA System	“International Conference on Communications, Circuits and Systems” 会议交流(2006)		
55	张小飞 徐大专	讲师 教授	041-2 041-2	Improved Adaptive Beamforming Algorithm Based on Wavelet Transform	“International Conference on Communications, Circuits and Systems” 会议交流(2006)		
56	汪 玲 朱兆达	讲师 教授	041-2 041-2	一种基于最大修正峰度的ISAR距离对准算法	南京航空航天大学学报	2006. 38. 06	
57	汪 玲 朱岱寅 朱兆达	讲师 副研 教授	041-2 041-2 041-2	Range Alignment in ISAR Motion Compensation Based on Minimum Sum	“CIE International Conference on Radar” 会议交流(2006)		
58	王旭东 刘 渝	讲师 教授	041-2 041-2	全并行结构FFT的FPGA实现	南京航空航天大学学报	2006. 38. 01	
59	王旭东 刘 渝	讲师 教授	041-2 041-2	正弦波频率估计的修正Rife算法及其FPGA 实现	全国第十届信号与信息处理第四届DSP应 用技术联合学术会议交流(2006)		
60	虞湘宾	博士后	041-2	Performance Analysis of Multi-carrier CDMA System Based on Complex Wavelet Packet and Space-time Block Codes in Rayleigh Fading Channel	Journal of Circuits, Systems and Computers	2006. 15. 01	
61	虞湘宾	博士后	041-2	Differential Space-time Coding Scheme using Star Quadrature Amplitude Modulation Method	EURASIP Journal on Applied Signal Processing	2006. 2006. 03	
62	虞湘宾	博士后	041-2	Uplink Performance of CWP-MC-CDMA System with Space Diversity Combining Technique over Rayleigh Fading Channel	Journal of Electronics(China)	2006. 23. 06	
63	虞湘宾	博士后	041-2	Multiuser receiver scheme for a full- rate space-time block coded CDMA System	“ICCCAS” 会议交流(2006)		

多约束实数权的直接数据域算法 在空时自适应处理中的应用

赵 军 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京, 210016)

摘要:传统的空时自适应处理算法通过权矢量幅度和相位的改变来实现, 本文研究了空时自适应处理中一种改进的直接数据域(Direct data domain, DDD)算法。该方法仅通过权矢量幅度的改变, 对一次样本数据进行处理, 有效地抑制杂波和干扰, 实现对目标信号的正确估计。采用实数权减小了运算量, 降低系统的复杂程度。当目标信号的方向与天线波束指向有偏差时, 采用多约束的方法, 保证系统在目标信号方向的增益。仿真结果表明该方法的有效性。

关键词:多约束; 实数权; 直接数据域算法; 空时自适应处理

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2006)06-0687-05

Space-Time Adaptive Processing Using Multiple Constraints of Real Weights Based on Direct Data Domain Approach

Zhao Jun, Zhu Zhaoda

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of
Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Traditional space-time adaptive processing algorithms can be implemented in the airborne radar system by changing both the amplitude and the phase of weights associated with each array element. An improved direct data domain(DDD) method is studied in the space-time adaptive processing. Based on a single snapshot, the algorithm can estimate the interest signal and null interference. The amplitude variation with the fixed phase for weights connected with the space-time data reduce the computational complexity. By implementing multiple space-time constraints, the system gain is maintained on the interest signal when the signal arrivals slightly offset in angle, Doppler, or both. Simulation results prove the effectiveness of the method.

Key words: multiple constraints; real weight; direct data domain approach; space-time adaptive processing

引 言

自 Sarkar 提出直接数据域最小二乘(Direct data domain least squares, D³LS)算法^[1-2]以来, D³LS 算法在空时自适应处理(Space-time adaptive processing, STAP)中得到广泛应用。与传统的

STAP 方法相比, 该方法根据一次快拍数据来计算自适应权矢量, 而无需间接数据(通常从相邻距离单元中选取)来估计协方差矩阵, 因而适用于剧烈变化的非均匀环境^[3]。

D³LS 方法通过自适应地改变权矢量来实现波束控制, 一方面, 由于通常情况下自适应权值是复

基金项目: 航空科学基金(05D52027)资助项目。

收稿日期: 2006-06-14; 修订日期: 2006-09-19

作者简介: 赵军, 男, 博士研究生, 1974 年 10 月生; 朱兆达(联系人), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zzdee@nuaa.edu.cn。

数,即通过幅度和相位的同时改变实现波束控制,当阵元数 N 和相干处理的脉冲数 K 较大时,系统的复杂程度和运算量较大;另一方面,直接数据域的方法需要知道目标信号(Signal of interest, SOI)的信息(角度,多普勒频率),当目标的参数估计不准确时, D^3LS 算法的性能会明显下降。Choi 在空域自适应处理中提出了采用实数加权的方法^[4],即仅通过幅度的改变实现波束控制。本文将该方法应用到空时自适应处理中,降低系统的复杂程度,减小运算量。对于目标信号的角度、多普勒频率或两者同时与天线波束指向略有偏差时,将多约束的方法^[5]加以推广,采用多约束实数加权的方法,保护目标不被抑制,有效地实现目标信号的估计,仿真结果表明了该算法有效性。

1 基于 D^3LS 算法的空时自适应处理

假定 N 元的均匀线阵,相邻阵元间距为 d ,一个相干处理间隔内脉冲数为 K ,对于给定某个采样时刻,对于第 k 个脉冲,第 n 个天线的回波信号可以表示为^[6-7]

$$X_{n,k} = \alpha \exp(j2\pi(n-1)d \sin \theta_s / \lambda + j2\pi(k-1)f_d / f_r) + \text{杂波} + \text{干扰} + \text{噪声} \quad (1)$$

式中: α 表示目标信号的幅值; θ_s 和 f_d 分别为目标信号的角度和多普勒频率; f_r 为脉冲重复频率。

N 个天线的 K 个脉冲的回波数据可构成 $N \times K$ 维矩阵

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1K} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2K} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{N1} & X_{N1} & \cdots & X_{NK} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵 X 中,由于目标信号在相邻行、列之间的相位差分别为 $z_s = \exp(j2\pi d \sin(\theta_s) / \lambda)$ 和 $z_t = \exp(j2\pi f_d / f_r)$,矩阵 X 的第 n 行、第 k 列元素和相邻的空域、时域和空时域元素,按照方程

$$X(n, k) - X(n+1, k) \cdot z_s^{-1} \quad (3)$$

$$X(n, k) - X(n, k+1) \cdot z_t^{-1} \quad (4)$$

$$X(n, k) - X(n+1, k+1) \cdot z_s^{-1} \cdot z_t^{-1} \quad (5)$$

相减可以去除目标信号,只剩余干扰成分。

为了使加权后干扰成分的输出最小,同时保证系统在目标信号方向的增益,可以采用如图 1 所示滑窗方法由式(3~5)建立矩阵方程

$$FW = Y \quad (6)$$

式中: F 为系统矩阵; W 为空时权矢量; Y 为约束矢量,其第一行元素为 C ,其余元素为 0, C 为任意常数。

矩阵 F 的第一行为约束行,用来保证系统为目标信号方向的增益,记为 $F(1, :) = [1, z_s, z_s^2, \cdots, z_s^{N_s-1}, z_t, z_s z_t, \cdots, z_s^{N_s-1} z_t, \cdots, z_t^{N_t-1}, z_s z_t^{N_t-1}, \cdots, z_s^{N_s-1} z_t^{N_t-1}]$,其中 N_s 和 N_t 分别表示滑窗的空域和时域维数,矩阵 F 的其余行包含目标信号对消后的剩余成分。

前向计算时,滑窗从矩阵 X 的最左上角开始,对给定滑窗分别与相邻空域、时域和时空域滑窗对应元素相减后按照先空后时的顺序排成一行,共得到矩阵 F 的 3 行元素,然后滑窗向右移动一个位置,得到另外 3 行元素,当窗滑动到最右边时,向下移动一行,并平移到最左边,以此类推,直到第 $Q-1$ 行,这里 $Q = N_s \cdot N_t$,表示自由度的乘积。与之类似,可以得到后向计算和前后向计算的方法^[1,8]。

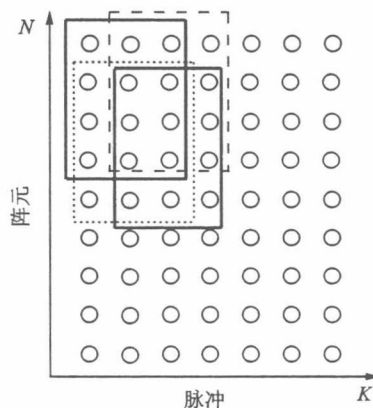


图 1 空时快拍数据

采用共轭梯度法^[9-10]矩阵方程(6),然后利用式

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{n=1}^{N_s} W((k-1)N_s + n) X(n, k) \quad (7)$$

估计目标信号的幅度^[5],并与给定门限相比较,判断目标是否存在。

2 基于 D^3LS 算法的多约束实数权空时自适应处理

2.1 前向计算

由矩阵方程(6)可以看出,由于 F 和 Y 均为复数,采用共轭梯度法求解时, W 一般也为复数,也就是既有幅度加权,也有相位加权,在空时自适应处理中,当 N 和 K 较大时,采用复数加权运算很大。同时,在矩阵方程中,约束条件是建立在天线照射方向(天线的波束指向中心和多普勒频率中心),而实际的目标信号并不一定恰好出现在该位置,当目标出现在天线的主波束或多普勒通带范围内的某个位

置,但其角度、多普勒频率或两者同时与约束方向略有偏差时,目标信号被当成干扰而被抑制。为解决这两个问题,采用多约束实数加权的方法。

在实数权自适应处理中,天线方向性图呈对称性^[4],为防止目标信号被当成干扰而被对消掉,首先把目标信号的波束指向变到 0° ,在多普勒域也作同样考虑,为此作变换

$$Tr(n, k) = \frac{\exp(j2\pi((n-1)d\sin\theta_0/\lambda + (k-1)f_0/f_r))}{\exp(j2\pi((n-1)d\sin\theta_s/\lambda + (k-1)f_d/f_r))} \quad (8)$$

式中: $\theta_0=0$; $f_0=0$; $n=1, 2, \dots, N$; $k=1, 2, \dots, K$ 。

设变换后的矩阵为 $\bar{X}$,其第 n 行,第 k 列元素为

$$\bar{X}(n, k) = X(n, k)Tr(n, k) \quad (9)$$

与第1节类似,利用空时滑窗在样本数据滑动,相邻窗内对应元素相减,构造矩阵方程

$$\bar{F}\bar{W} = \bar{Y} \quad (10)$$

当目标信号与天线照射方向有偏差时,为了保护目标信号不被当作干扰抑制,采用实数权多约束的方法保证系统在主波束和多普勒通带范围内的增益,即在系统矩阵 $\bar{F}$ 中设置 L 个约束行,其中第 l 行为

$\bar{F}(l, :) = [1, \bar{z}_{sl}, \bar{z}_{sl}^2, \dots, \bar{z}_{sl}^{N_s-1}, \bar{z}_{ul}, \bar{z}_{sl}\bar{z}_{ul}, \dots, \bar{z}_{sl}^{N_s-1}\bar{z}_{ul}, \dots, \bar{z}_{ul}^{N_t-1}, \bar{z}_{sl}\bar{z}_{ul}^{N_t-1}, \dots, \bar{z}_{sl}^{N_s-1}\bar{z}_{ul}^{N_t-1}]$,其中 $\bar{z}_{sl} = \exp(j2\pi d\sin(\theta_l)/\lambda)$, $\bar{z}_{ul} = \exp(j2\pi f_l/f_r)$, θ_l 和 f_l 分别表示第 l 约束位置的角度和多普勒频率, $Y = [C_1, C_2, \dots, C_L, 0, \dots, 0]^T$,其中 C_l ($l=1, 2, \dots, L$)为复数,表示系统在第 l 个方向的增益。

为了得到实的权矢量 W ,把方程(10)按照实部和虚部对应相等构成新的实数矩阵方程

$$F_R W_R = Y_R \quad (11)$$

式中

$$F_R = \begin{bmatrix} \text{Re}(\bar{F}_{1,1}) & \text{Re}(\bar{F}_{1,2}) & \dots & \text{Re}(\bar{F}_{1,Q}) \\ \text{Re}(\bar{F}_{2,1}) & \text{Re}(\bar{F}_{2,2}) & \dots & \text{Re}(\bar{F}_{2,Q}) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \text{Re}(\bar{F}_{Q,1}) & \text{Re}(\bar{F}_{Q,2}) & \dots & \text{Re}(\bar{F}_{Q,Q}) \\ \text{Im}(\bar{F}_{1,1}) & \text{Im}(\bar{F}_{1,2}) & \dots & \text{Im}(\bar{F}_{1,Q}) \\ \text{Im}(\bar{F}_{2,1}) & \text{Im}(\bar{F}_{2,2}) & \dots & \text{Im}(\bar{F}_{2,Q}) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \text{Im}(\bar{F}_{Q,1}) & \text{Im}(\bar{F}_{Q,2}) & \dots & \text{Im}(\bar{F}_{Q,Q}) \end{bmatrix}$$

其中: $\bar{F}_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, Q$; $j=1, 2, \dots, Q$)表示矩阵 $\bar{F}$ 的第 i 行第 j 列元素; $\text{Re}()$ 和 $\text{Im}()$ 分别表示实部和虚部; $Y_R = [\text{Re}(C_1), \dots, \text{Re}(C_L), 0, \dots, 0,$

$\text{Im}(C_1), \dots, \text{Im}(C_L), 0, \dots, 0]^T$ 。

同样采用共轭梯度法解此实数矩阵方程,可以得到实的权矢量 W 。

这里需要指出的是,采用式(11)不仅可以得到实的权矢量,而且由于对样本数据按照实部和虚部对应相等构建新的矩阵方程,与式(10)相比,独立样本个数增加了1倍。空域和时域滑窗最大值分别可以取 $N_s = (N+0.5)/1.5$ 和 $N_t = (K+0.5)/1.5$,而采用复数权时,空域和时域滑窗的维数最大值分别取 $N_s = (N+1)/2$ 和 $N_t = (K+1)/2$,空域和时域的自由度都增加了约20%,从而使系统有更多的自由度来孤立抑制干扰,并且采用共轭梯度法解复数方程(10)的运算量约为 $4o[(N_s N_t)^2]$,而解与之对应的实系数方程(11)的运算量约 $2o[(N_s N_t)^2]$ ^[10]。

2.2 后向计算

先对样本矩阵 $\bar{X}$ 中元素取共轭,空时窗滑动时从样本矩阵的右下角开始,按照与前向计算相反的顺序滑动,通过相邻滑窗对应元素相减,与方程(11)类似,可以得到实数矩阵方程

$$B_R W_R = Y_R \quad (12)$$

后向计算时,目标信号的幅度估计值为

$$\hat{\alpha} = \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{n=1}^{N_s} W_R((k-1)N_s+n) \bar{X}^* \cdot (N+1-n, K+1-k) \quad (13)$$

2.3 前后向计算

在前后向计算中,数据样本不仅包括前向计算的数据,而且包括后向计算的数据,与前两种方法相比,独立样本个数增加了1倍。

采用前后向计算时,可以得到方程

$$[FB]_R W_R = Y_R \quad (14)$$

此时空域滑窗最大值 $N_s = (N+0.5)/1.25$,时域滑窗最大值 $N_t = (K+0.5)/1.25$,空域和时域自由度与复数加权前后向算法相比,也分别增加了约20%。

3 仿真计算

为对多约束实加权直接数据域算法的性能进行分析,做仿真如下:假定天线阵元个数为10,相干处理脉冲数为16,阵元间距等于二分之一波长,目标信号的方向假定为 0° ,归一化的多普勒频率为0.2,一个功率为40 dB孤立干扰方向与目标信号方向相同,归一化的多普勒频率为0.5,3个宽带

噪声干扰,占有所有多普勒带宽,方向分别为 -50° 、 -20° 和 20° ,功率均为30 dB,平均输入信干噪比约为 -41 dB。

3.1 单约束时实数权的空时自适应处理

首先考察单个约束时的情况,这里假定回波信号的角度和多普勒频率与约束方向指向一致。前向和后向计算中,空域和时域滑窗的长度分别取 $N_s=7$ 和 $N_t=11$,前后向计算中, $N_s=8$ 和 $N_t=12$,目标信号的幅度由1均匀变化到10,分别采用前向、后向和前后向单约束实数权直接数据域算法,得到幅度估计值和天线方向性图,如图2,3所示。

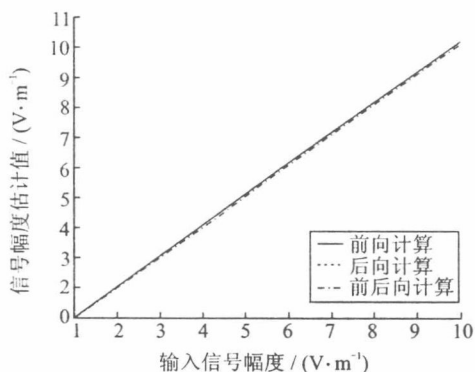


图2 目标信号的幅度估计

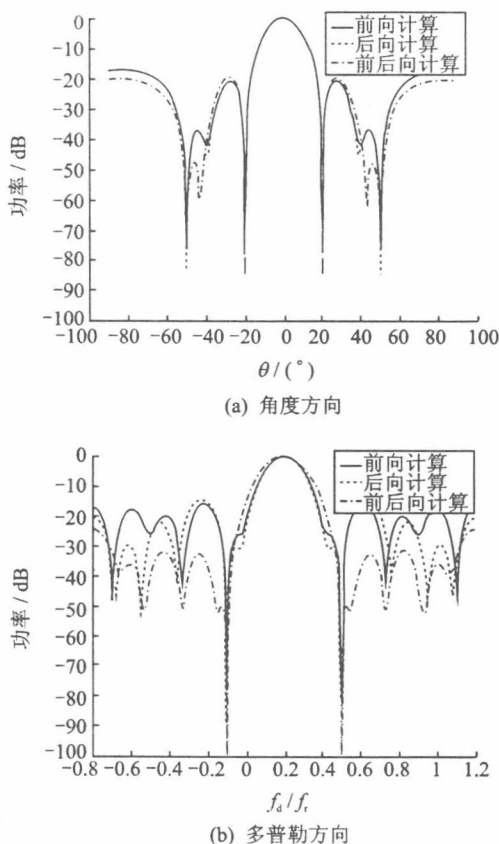


图3 单个约束时天线的方向性图

由图2,3可以看出,采用实数权前向、后向和前后向算法都能有效抑制杂波和干扰,实现对目标信号幅度的准确估计,而且在干扰方向形成很深的“凹口”来抑制孤立干扰和宽带噪声干扰。由于仅通过一次样本数据实现对于干扰和杂波的有效抑制,因此该方法适应于非均匀杂波环境。

由直接数据域算法输出的信干噪比定义^[5]

$$R_{\text{SIN,out}} = 20\lg(\alpha_s/|\alpha_s - \hat{\alpha}_s|) \quad (15)$$

式中: α_s 是目标信号的幅度; $\hat{\alpha}_s$ 是其估计值。由式(15),采用前向、后向和前后向计算,经100次样本平均后,输出的信干噪比分别为24.7、24.8和25.4 dB。

3.2 多约束时实数加权的空时自适应处理

仿真环境与前面完全相同,但实际目标信号的角度为 3° ,归一化多普勒频率为0.25,而系统的约束方向仍保持在 0° 和多普勒频率为0.2,在天线照射方向附近分别采用5个和9个约束,保护在天线主波束范围内和多普勒通带内的目标信号,约束条件中波束指向的分布如图4所示。

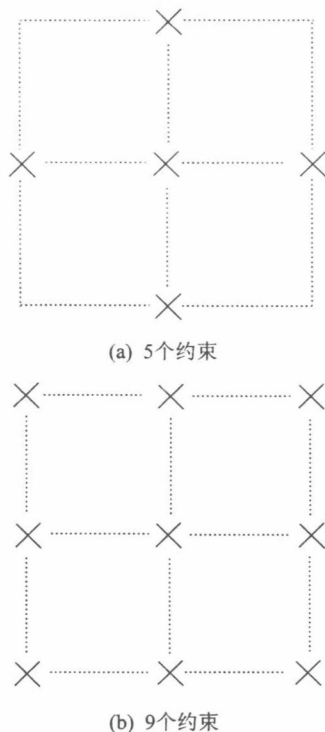


图4 空时约束分布图

当输入信号幅度从1到10均匀变化时,分别采用单个约束、5个约束和9个约束,每种情况下得到100个样本取其平均值,得到目标信号幅度的估计值如图5所示,输出的信干噪比如表1所示。

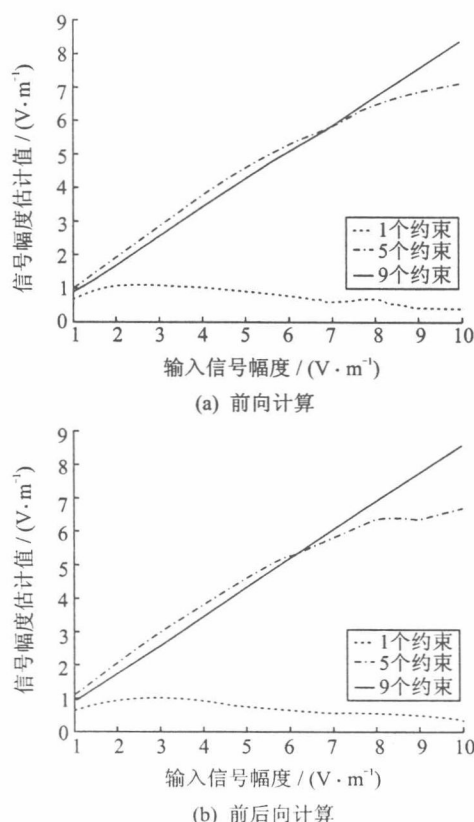


图5 多约束条件下目标信号的幅度估计

表1 多约束条件下输出信干噪比 dB

约束条件	单个约束	5个约束	9个约束
前向计算	-3.1	4.97	5.46
前后向计算	-1.2	4.73	5.80

由图5和表1可以看出,单个约束条件下当目标信号与天线波束指向有偏差时,系统在目标信号方向增益下降很快,输出信干噪比明显下降,而采用多约束后,即使回波信号与波束指向略有偏差,也能保证目标信号不被当作干扰而被完全抑制,使系统在目标信号方向保持较高的输出信干噪比。但这样付出的代价是系统自由度的降低。

4 结束语

本文研究了空时自适应处理中一种改进的直接数据域算法,该方法仅通过幅度加权,有效地抑制干扰和杂波,实现目标信号的估计,与相同条件

下复数加权相比,系统空域和时域自由度分别增加了约20%。采用多约束的方法,当目标信号的参数与真实值略有偏离时,保证系统在目标信号方向的增益。与传统DDD算法相比,该方法降低了系统的复杂程度,运算量较小,便于实时处理。

参考文献:

- [1] Sarkar T K, Wang H, Park S, et al. A deterministic least-square approach to space-time adaptive processing [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2001, 49(1): 91-103.
- [2] Sarkar T K, Adve R. Space-time adaptive processing using circular arrays [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43(1): 138-143.
- [3] Wicks M C, Rangaswamy M, Adve R, et al. Space-time adaptive processing knowledge-based systems for adaptive radar [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1): 51-65.
- [4] Choi W, Sarkar T K, Wang H, et al. Adaptive processing using real weight based on a direct data domain least squares approach [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2006, 54(1): 182-190.
- [5] Carlo J T, Sarkar T K, Wicks M C. A least square multiple constraint direct data domain approach for STAP [C]//Proceedings of the 2003 IEEE Radar Conference. New York: IEEE Aerospace and Electronic System Society, 2003: 431-438.
- [6] Ward J. Space-time adaptive processing for airborne radar [R]. Technical report 1015, Lexington, MA: Lincoln Lab, 1994.
- [7] 王永良, 彭应宁. 空时自适应处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [8] 文小琴, 韩崇昭. 空时自适应处理的直接数据域方法 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 2901-2907.
- [9] Sarkar T K, Koh J, Adve R. A pragmatic approach to adaptive antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(2): 39-53.
- [10] Sarkar T K, Sangruji N. An adaptive nulling system for a narrowband signal with a look direction constraint utilizing the conjugate gradient method [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(7): 940-944.

文章编号:1000-6893(2006)01-0082-05

块自适应球形矢量量化算法压缩 SAR 原始数据

关振红, 朱兆达, 朱岱寅

(南京航空航天大学 信息学院, 江苏 南京 210016)

Compression of SAR Raw Data by Block Adaptive Spherical Vector Quantization

GUAN Zhen-hong, ZHU Zhao-da, ZHU Dai-yin

(College of Information Science and Technology, Nanjing University Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

摘 要: 提出使用块自适应球形矢量量化算法压缩 SAR 原始数据, 该算法充分利用 SAR 原始数据经过自适应块处理之后在较小的数据块范围内具有稳定高斯分布的特点, 使用格型矢量技术中的球形码书量化器进行量化, 可以提高算法的压缩性能。通过运用球形矢量量化算法对 SAR 原始数据进行压缩、解压缩获取相应的 SAR 图像与块自适应量化和块自适应矢量量化经过同样过程得到 SAR 图像进行比较分析, 得出块自适应球形格矢量量化算法是算法复杂度和算法性能之间比较好的折中。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 球形矢量量化; 块自适应量化; 矢量量化

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A

Abstract: In this paper, we propose to employ the block adaptive spherical vector quantization for compression of synthetic aperture radar (SAR) raw data. This algorithm exploits the known result that a blockwise normalized SAR raw signal is a Gaussian stationary process. With the comparison and analysis of quality parameters computed on the image, the proposed block adaptive spherical vector quantization shows an interesting performance-complexity trade-off, with respect to other algorithms such as the block adaptive quantization and the block adaptive vector quantization.

Key words: SAR; spherical vector quantization; block adaptive quantization; vector quantization

SAR 原始数据压缩最常用的算法是块自适应量化(BAQ)^[1], 因为其简单和易于实施而被应用于美国火星探测的 Magellan 任务, 在美国太空总署的 SIR-C/X-SAR 任务中也采用了此算法进行数据传输。目前新提出的算法都是以 BAQ 算法为基础, 而算法压缩性能的改善也是较 BAQ 算法性能提高程度作为标准。目前国内外学者已经提出一些新的算法, 如: 基于矢量量化技术的块自适应矢量量化(BAVQ)^[2]、网格型矢量量化(TCVQ)^[3,4]; 基于变换域编码技术的 FFT 变换域编码(FFT-BAQ)^[5]、基于小波变换子带编码(WT-BAQ)^[6] 算法等等。这些算法都是建立于 BAQ 算法基础上, 寻求高斯信号的最佳量化。块自适应矢量量化(BAVQ)算法将矢量量化技术与 BAQ 算法结合起来, 其中码书设计和输入矢量 Voronoi 胞腔的划分采用 LBG^[7] 算法, 有时也称这种矢量量化算法为 LBG-BAVQ。BAQ 算法运算复杂度低, 但性能差。LBG-BAVQ 算法则相反。

本文研究兼顾算法性能和运算复杂度的途

径, 提出将格型量化技术中的球形矢量量化与块自适应量化算法结合, 形成块自适应球形矢量量化(BASVQ)算法, 文中重点讨论了块自适应球形矢量量化算法的原理、复杂度及性能, 分析了各种算法成像结果并给出了结论。

1 块自适应球形矢量量化算法

1979 年, Gersho 指出最优熵约束矢量量化应该具有格的形式^[8]。格是多维欧基里德空间中的一个有规律网格, 此网格满足李代数的一定关系。假设 $\mathbf{R}^k$ 为 k 维实欧氏空间, $\mathbf{R}^n$ 是其子空间 ($k \geq n$)。设 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n$ 是 $\mathbf{R}^n$ 中 n 个线性独立的矢量, 则 n 维格 Λ_n 是 n 维矢量集合^[9]

$$\Lambda_n = \{\mathbf{Y} \in \mathbf{R}^n \mid \mathbf{Y} = \mathbf{u}_1 a_1 + \mathbf{u}_2 a_2 + \dots + \mathbf{u}_n a_n\} \quad (1)$$

式中: $a_1, a_2, \dots, a_n$ 为任意整数。如果用 G_n 表示 n 维最佳格矢量量化误差, 则 G_n 满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} G_n = 1/2\pi e \approx 1.12 \quad (2)$$

这说明通过增加矢量的维数可以获得更好的性能。但当格点维数 n 很大时, 找到最佳格点分布非常困

难。目前学者 $n \leq 24$ 对的整数型格已经做了较多研究,常用的格包括 D_4 格、 E_8 格及 A_{16} 格等。

格型矢量量化器的特点是构造一定几何形状的网格,以格点作为量化矢量,将信号空间划分为胞腔。相对于基于训练的矢量量化器来说,格型矢量量化器的码书构造方便、量化复杂度低,可以进行高维格矢量量化。球形矢量量化器是一种特殊的格型矢量量化器,其码书的几何形状为超球体(以下简称球)^[10]。需要注意的一点是,理论上的球形矢量量化器码书为无限大,而球形矢量量化器在实际应用时应根据一定的规则确定球体的半径,使球的体积(码书大小)为有限值,此时球形矢量量化器才能应用于实际工程。

1.1 数据归一化处理

块自适应球形矢量量化算法以 BAQ 算法为基础,即首先对 SAR 原始数据进行分块归一化处理,这是由 SAR 原始数据分布特性决定的。SAR 原始数据在距离向和方位向都是方差缓变的零均值高斯分布信号,图 1 给出了实测 SAR 原始数据在距离向连续计算 64 个数据块的标准差曲线。从图中可以看出,未经归一化处理的 SAR 原始数据块标准差值并不相同并且成缓慢变化趋势。通过计算一部实测 SAR 回波的实部数据的动态范围,我们得到归一化处理前的信号幅度变化范围是 $(-14\ 339.5, 514\ 366.4)$,而归一化后的变化范围是 $(-4.99393, 5.17556)$ 。可见经过分块归一化处理后数据在每个小块内不但具有稳定方差,并且动态范围变小。工程上分块大小应遵循以下原则:分块必须足够小以保证每一分块中估计出的方差值恒定;分块必须足够大以保证能有效地估计出每一分块的方差值^[3]。一般地,分块的大小取为: 32×32 (方位 $\times$ 距离)。

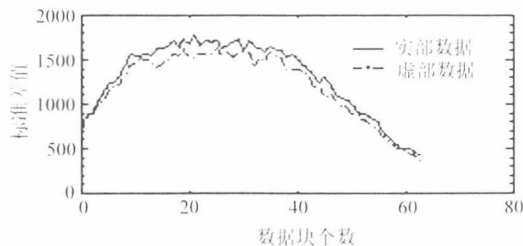


图 1 SAR 原始数据各个分块标准差

Fig. 1 The standard deviations of SAR raw data blocks of small size

1.2 块自适应球形矢量量化算法

经过归一化处理后的 SAR 原始数据的每一

小块可以看成标准高斯分布信号,这样格型矢量量化器的码书是球形,相应的压缩算法为块自适应球形矢量量化(BASVQ),球形码书的半径可以通过下式确定^[11]

$$\theta_A(q) = \sum_{Y \in A} q \|Y\|_2^2 = \sum_{m=0}^{+\infty} [q^m] N_m \quad (3)$$

图 2 是球形矢量量化示意图,根据 SAR 原始数据特点,结合文献[12,13]中的算法,BASVQ 算法的球形量化步骤如下:

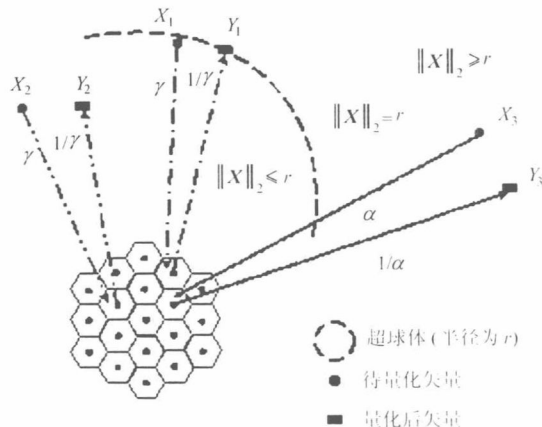


图 2 球形矢量量化示意图

Fig. 2 Spherical vector quantization scheme

第 1 步 选择一个最佳的标量因子 γ ,具体实现时可以通过迭代的方法对零均值单位方差高斯信号在不同编码数据率(比特/采样)条件下得到标准标量因子表。

第 2 步 输入矢量 X 除以标量因子 γ 得到 $\hat{X}$,计算 $\hat{X}$ 的范数 $\|\hat{X}\|_2$,设球的半径为 r ,如果 $\|\hat{X}\|_2 \geq r$ 则转第 3 步,否则运用文献[14]提出的快速算法求出 $\hat{X}$ 对应的格点 $\hat{Y}$ 。求格点 $\hat{Y}$ 的范数 $\|\hat{Y}\|_2$,如果 $\|\hat{Y}\|_2 \leq r$,则 $\hat{Y}$ 就是求得的格点,转到第 5 步,否则转第 4 步。

第 3 步 将 $\hat{X}$ 投影到球面上,得到球面上投影矢量 $\tilde{X}$,求出 $\tilde{X}$ 的整型格点 $\hat{\tilde{X}}$ 。因为投影操作,相当于原来标量因子已经发生,新的标量因子用 α 表示,对 α 进行量化编码并与对应格点索引随信道一同传送,这样减小了量化误差,但同时增加了编码数据率,在实际量化时要兼顾两方面考虑。如果 $\|\hat{\tilde{X}}\|_2 \leq r$ 转第 5 步,否则转第 4 步。

第 4 步 对给定格点求出与该格点只有一个分量不同并且在球面内或球面上所有最近邻格点,在这些近邻格点找出与 $\hat{X}$ 或 $\hat{\tilde{X}}$ 欧氏距离最小的近邻格点作为新的格点。如果没有符合条件的格点,则继续减小这些近邻格点各个分量值,重复

上述过程直到找到一个符合条件的值为止。一般情况下这一过程只需迭代一到二次即可求得最佳的格点。最后转第 5 步。

第 5 步 已经找到输入矢量的最近格点,算法结束。

找到了某个输入矢量的最近格点就相当于在码书中找到了离输入矢量距离最近的码字,接下来是确定格点的索引。同其它矢量量化器一样,在格型矢量量化器中确定某个格点的索引也是一个很重要的问题,尤其在格点数很多的情况下。一些常用的格如 D_4 格、 E_8 格,都有求格点索引的快速算法^[14]。

2 算法复杂度分析

SAR 原始数据压缩算法不仅要考虑算法的性能,还要求算法的运算量低并且占用的存储空间少,以下讨论都是对 SAR 原始数据实部或虚部进行分析的结果。表 1 列出了输出编码比特率为 2 bit/采样时算法复杂度情况,表中 N_r 为距离向数据长度, N 是对原始数据归一化操作中块的长度。其中 LBG-BAVQ1 和 BASVQ1 算法采用 4 维矢量,而 LBG-BAVQ2 和 BASVQ2 算法采用 8 维矢量。假设待压缩的原始数据为 2048×2048 浮点数矩阵,则可取 $N_r = 2048$, $N = 32$ 。

表 1 各种算法的硬件需求和计算复杂度 (2bit/采样)

Table 1 Hardware requirements and computational complexityes for the analyzed algorithms (2bits/sample)

算 法	存储空间 bytes		操作/采样(加法及乘法次数)	SHARC 运算时间/ μ s
	RAM	ROM		
BAQ	$2N_r N$	—	8	0.10
LBG-BAVQ 1	$2N_r N$	4k	$4+2 \times 256$	6.45
LBG-BAVQ 2	$2N_r N$	2M	$4+2 \times 65536$	1638.50
BASVQ 1	$2N_r N$	—	$4+2 \times 16$	0.46
BASVQ 2	$2N_r N$	—	$4+2 \times 40$	1.04

就算法的空间复杂度来看,BAQ 算法的 RAM 存储区主要用来存放原始数据、估计块数据的均值和方差以及将对数据进行归一化操作,其中估计方差和均值有优化的方法而占用更少内存,现在的讨论基于最一般的方法。由于 LBG-BAVQ 和 BASVQ 两种算法以 BAQ 算法为基础,可以认为它们使用 RAM 相同;而 LBG-BAVQ 需要固定大小的码书,在 DSP 实现时一般采用 ROM 存储,并且码书大小随着矢量维数的增加成指数增加,而 BASVQ 算法的码书是有规律的格点,无需 ROM 存储。

下面讨论算法的时间复杂度。目前 DSP 实现时,加法及乘法运算一般都可以在同一时钟周期内

完成,因此,将算法中每一个浮点数加法和乘法各看成一个操作。BAQ 算法量化一个采样值需要 2 次操作估计均值,2 次操作进行数据归一化及 4 次操作进行 Lloyd-Max 编码。LBG-BAVQ 和 BASVQ 两种算法每个采样除了 4 次操作进行估计均值及数据归一化外还要进行更为复杂的向量运算,其中 LBG-BAVQ 算法运算量主要是对每个输入矢量穷尽搜索相应码字,同时还应包括计算码字索引的运算量。BASVQ 算法的运算量主要是对输入矢量乘比例因子、求矢量能量、计算最近格点、去除比例因子及求格点索引等运算,通常 4 维格型量化索引可以采用查表法,8 维以上格型量化通常采用快速算法。由于算法的实现方式以及具体数据分布特性的差别,表中给出的数据只是作者实现算法时的参考值,而且表中数据不包括求码字索引及进行熵编码的运算量。从表中可以看出,BASVQ 算法由于采用约束型矢量搜索算法而极大降低了算法的复杂度,采用 8 维矢量的 BASVQ 算法运算量也远小于采用 4 维矢量的穷尽型矢量量化 LBG-BAVQ 算法。

表中最后一项为以上算法使用采用 AD 公司推出的超级哈佛结构处理器 ADSP21060—SHARC 的运算参考时间,SHARC 对浮点数运算的操作速度为 80 MFLOPS。

3 实验结果

为了进一步检验 BASVQ 算法性能,对实测 SAR 原始数据分别运用以上讨论的算法进行压缩、解压缩处理并成像,通过比较图像及相应图像域参数来判断各个算法性能。实验中采用两部不同参数的机载 SAR 原始数据,比较算法的量化信噪比(SNR)以及图像的分辨率等参数。表 2 和表 3 分别给出了当输出编码比特率为 2bit/采样时 BAQ、LBG-BAVQ 及 BASVQ 3 种算法对两组数据进行压缩时性能参数。实验中 LBG-BAVQ 算法采用 4 维矢量,而 BASVQ 算法分别采用 4 维及 8 维矢量,其中 4 维 BASVQ 算法采用 D_4 格,而 8 维 BASVQ 算法采用 E_8 格。

表 2 几种算法对第 1 组数据的成像分析结果

Table 2 Results of image quality analysis for several algorithms (data 1)

算 法	比特率 (bit/采样)	SNR/dB	分辨率/m	
			方位	距离
原始数据	8.00	—	3.06	3.14
BAQ	2.00	12.4513	3.06	3.14
BASVQ 1	2.00	13.4736	3.06	3.14
BAVQ 1	2.00	14.6373	3.06	3.14
BASVQ 2	2.00	14.5622	3.06	3.14

表3 几种算法对第2组数据的成像分析结果

Table 3 Results of image quality analysis for several algorithms (data 2)

算 法	比特率 /(bit/采样)	SNR/dB	分辨率/m	
			方位	距离
原始数据	8.00	—	1.00	1.00
BAQ	2.00	12.9624	1.08	1.00
BASVQ 1	2.00	13.8628	1.08	1.00
BAVQ 1	2.00	14.6987	1.08	1.00
BASVQ 2	2.00	14.7973	1.08	1.00

从表中可以看出,在编码比特率为 2bit/采样条件下,BASVQ 和 LBG-BAVQ 算法性能均优于 BAQ 算法性能,4 维 LBG-BAVQ 性能强于 4 维 BASVQ 算法。当矢量维数增大到 8 时,8 维 BASVQ 与 4 维 LBG-BAVQ 性能相当,并比 4 维 BASVQ 信噪比提高 1 dB 以上。从表中也可以看出,第 1 组数据图像分辨率(3.06×3.44)较低,此时几种压缩算法对图像的分辨率几乎没有影响,而第 2 组数据图像分辨率(1.0×1.0)较高,此时采用上述压缩算法进行处理时,图像的方位分辨率略有降低,而距离分辨率几乎不受影响,这也说明以上几种压缩算法均可以用于工程实际。

图 3 和图 4 给出了采用上述压缩算法处理的压缩数据与没经过压缩处理的原始数据相应的成像结果,限于篇幅关系,文中只给出经过截取的部分图像。

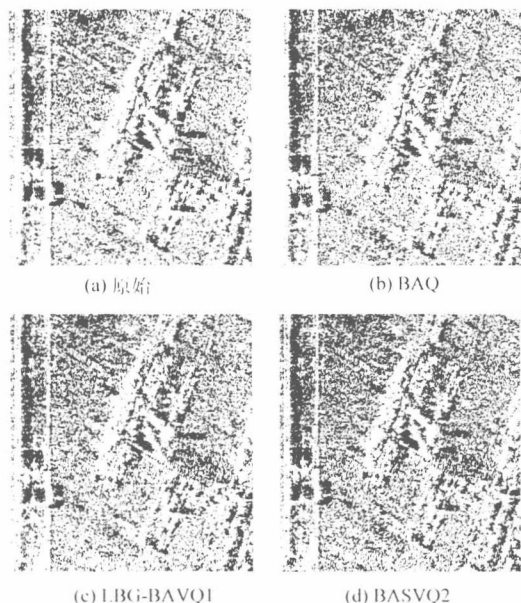


图3 第1组数据压缩后成像结果

Fig. 3 Images obtained from data 1 compressed by using analyzed algorithms

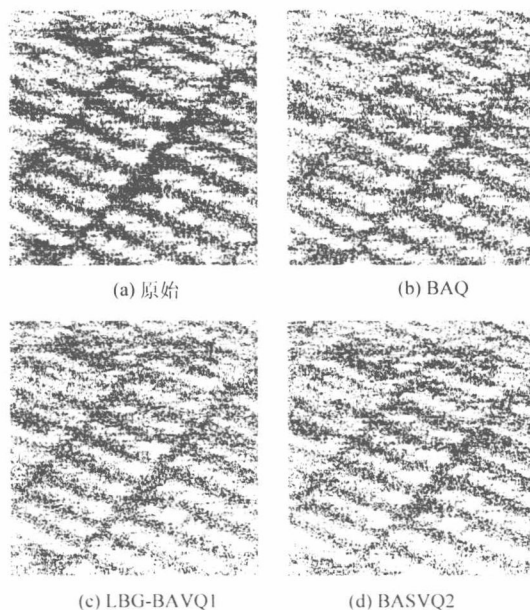


图4 第2组数据压缩后成像结果

Fig. 4 Images obtained from data 2 compressed by using analyzed algorithms

4 结 论

基于 LBG 的矢量量化算法在量化前需要训练码书,训练数据的多少以及统计特性都会对矢量量化结果造成影响,这样要求训练数据必须能尽可能反映所有地形地貌的回波特征。BASVQ 算法只与原始数据统计特性有关,不受训练集的约束、不需要大量的欧氏距离计算及比较。另外,在运用 LBG-BAVQ 算法时,过载噪声由于矢量远偏离码书中的码字而增大。相反在 BASVQ 算法中,这些矢量都有最近的格点,因此噪声得以减小^[1]。格型矢量量化技术比较适合 SAR 原始数据压缩,它是压缩性能与算法效率之间比较好的折中。

总的来说,如果需要相对较好的压缩性能又能忍受一定程度算法的复杂度,矢量量化技术是首选的压缩 SAR 原始数据的方法,而块自适应球形矢量量化是约束型矢量量化技术在 SAR 原始数据压缩中一种有意的尝试。

参 考 文 献

- [1] Kwok R. Adaptive quantization of magellan SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(4): 375-383.
- [2] Moreira A, Blasler F. Fusion of block adaptive and vector quantizer for efficient SAR data compression[A]. IG AR SS[C]. Tokyo: 1993. 1583-1585.
- [3] 谢海慧,黄顺吉. 网格型矢量量化在 SAR 原始数据压缩中

- 的应用研究[J]. 信号处理, 2001, 20(1): 63-68.
- Xie H H, Huang S J. Application of TC-VQ at SAR raw data compression[J]. Signal Processing, 2001, 20(1): 63-68. (in Chinese)
- [1] Owens J W, Marcellin M W, Hunt B R, *et al*. Compression of synthetic aperture radar video phase history data using trellis coded quantization techniques [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2): 1080-1085.
- [5] Benz U, Strodl K, Morcia A. A comparison for SAR raw data compression[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(5): 1266-1276.
- [6] Pascasio V, Schirinzì G. SAR raw data compression by subband coding[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(3): 964-976.
- [7] Linde Y, Buzo Z, Gray R M. An algorithm for vector quantizer design[J]. IEEE Trans Commun, 1980, 28(1): 84-95.
- [8] Gersho A, Gray R M. Vector quantization and signal compression[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992, 25-75.
- [9] Gersho A. Asymptotic optimal block quantization[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1982, 28(2): 139-149.
- [10] 孙圣和, 陆哲明. 矢量量化技术及应用[M]. 北京: 科学出版社出版社, 2002, 106-115.
- Sun S H, Lu Z M. Vector quantization techniques and applications[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2002, 106-115. (in Chinese)
- [11] Conway J H, Slone J A. Sphere packings, lattices and groups[M]. New York: Springer Verlag, 1988, 6-125.
- [12] Jeong D G, Gibson J D. Uniform and piecewise uniform lattice vector quantization for memoryless gaussian and laplacian sources[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39(3): 139-149.
- [13] Barlaud M, Gaidon T. Pyramidal lattice vector quantization for multiscale image coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, 3(4): 368-381.
- [14] Conway J H, Slone J A. A fast encoding method for lattice codes and quantizers[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(3): 820-824.
- [15] Moureaux J M, Gauthier P, Barlaud M, *et al*. Vector quantization of raw SAR data[A]. IGARSS[C]. Australia, 1994, 189-192.

作者简介:



关振红(1972-) 男,满族,讲师,博士在读,研究方向:雷达信号处理。
E-mail: zhenhongguan@sina.com
电话: 13851855281



朱岱寅(1971-) 男,博士,副研究员,研究方向:雷达信号处理。



朱兆达(1939-) 男,教授、博导,研究方向:雷达信号处理、信号检测。

(责任编辑:李泓洁)