

采用高阶累积量的调频步进信号逆合成孔径雷达成像新方法

张龙^{1,2}, 苏军海¹, 张磊¹, 邢孟道¹

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安; 2. 西安工程大学电子与信息学院, 710048, 西安)

摘要: 针对在调频步进信号逆合成孔径雷达(ISAR)成像中回波脉冲综合相参化变弱的问题,提出了一种高阶累积量(HOC)频域带宽合成方法. 首先建立回波信号在噪声下的 HOC 表达式,然后对脉组内子脉冲间的误差相位进行估计,再合成一个大带宽线性调频信号,从而获得高分辨一维距离像,最后在方位多普勒域用距离瞬时多普勒方法获得高分辨 ISAR 图像. 与传统方法相比, HOC 方法可较好地用于在低信噪比下调频步进信号频带综合. 仿真数据处理结果表明, HOC 方法在信噪比低于 5 dB 时,其成像效果明显优于传统方法.

关键词: 调频步进信号;高阶累积量;低信噪比;频带综合

中图分类号: TN957. 51 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)04-0087-06

A New Method for Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Linear Modulated Stepped Frequency Signals Using High Order Cumulants

ZHANG Long^{1,2}, SU Junhai¹, ZHANG Lei¹, XING Mengdao¹

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A band coherent processing method using high order cumulants (HOC) is proposed to improve the weakness of pulses synthesis in inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging of linear modulated stepping frequency signals. Equations of HOC for echoes with Gaussian noise are given, and phase errors between sub-pulses are evaluated. Then a wideband chirp signal is formed by combining the coherent processed sub-pulses, and high range resolution profiles are obtained. Finally, a high resolution ISAR image is generated by applying the range instantaneous Doppler method in cross-range. Simulation and comparisons with the conventional methods show that the HOC method does work properly for bandwidth synthesis under low signal-to-noise ratios (SNR) and that the performance of HOC method outperforms the conventional methods considerably when SNR is below 5dB.

Keywords: linear modulated stepped frequency signal; high order cumulant; low signal to noise ratio; bandwidth synthesis

线性调频步进信号兼有调频信号和步进频率信号的特点,通过对一组线性调频步进信号的带宽合成处理,可获得与大时宽带宽线性调频信号相同的距离分辨率^[1]. 文献[2]提出的时域带宽合成法,通

收稿日期: 2009-09-17. 作者简介: 张龙(1975—),男,博士生;邢孟道(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(60890072);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090203120013);陕西省自然科学基金资助项目(2009JQ8022,2009ZKC02-13);陕西省教育厅自然科学专项资助项目(09JK468);西安工程大学基础研究资助项目(09XG06).

过相位校正使得各个子脉冲间的相位相互衔接,这对运动目标参数估计的精度提出了很高的要求.文献[3]采用的带宽合成法虽然运算量较小,但在低信噪比下由于目标的运动参数估计精度不高而基本失效.本文提出一种基于高阶累积量(HOC)的带宽相参化舰船目标逆合成孔径雷达(ISAR)成像方法.该方法利用高阶累积量可以消除高斯随机噪声这一特点^[4],建立回波信号的高阶累积量表达式,由子脉冲回波数据求得其累积量的估计值,通过求解累积量矩阵的最大特征值所对应的特征向量,获得子脉冲间的误差相位信息,即无需估计目标的运动参数,就可补偿由平动引起的子脉冲间的相位差,由瞬时带宽较小的多个子脉冲合成一个等效的大带宽线性调频信号.

1 目标回波信号分析

假设雷达发射的一组线性调频步进信号由 M 个调频子脉冲组成, M 为脉冲总数,其中第 m 个子脉冲信号为

$$s_m(t) = u(t) \exp(j2\pi f_m t), \quad m = 1, \dots, M \quad (1)$$

式中: $u(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j\pi \mu t^2)$ 为调频子脉冲, T_p 为子脉冲宽度; $\hat{t}$ 为电波传播时间,称为快时间; $\text{rect}(\cdot)$ 为门函数; $\mu = \frac{B_s}{T_p}$ 为发射信号调频率, B_s 为子脉冲带宽; $f_m = f_0 + m\Delta f$ 为第 m 个子脉冲信号载频(m 为脉冲序号), Δf 为载频步进量. 发射信号频率的波形变化可参考文献[3].

由于舰船目标的运动符合 stop-go 模型,考虑到其转速较慢,一般不超过 0.05 rad/s ,同时一个脉组的观测时间一般不超过 0.1 s ,故在一个脉组内由于转动引起的距离变化量可以忽略. 发射第 m 个子脉冲信号时,目标上某一散射点与雷达间的距离可以表示为

$$R_m = R_0 - V_T m T_r - \frac{1}{2} a (m T_r)^2 \quad (2)$$

式中: R_0 为散射点的初始位置; V_T 为目标的径向速度; a 为径向加速度; T_r 为脉冲重复周期. 第 m 个子脉冲回波经过混频后得到的信号为

$$s_m(t) = \sigma u\left(t - \frac{2R_m}{c}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi f_m R_m}{c}\right) \quad (3)$$

式中: c 为光速; σ 为散射点强度. 对式(3)进行匹配滤波后得到信号的频域表达式为

$$S_m(f) = \sigma \text{rect}\left(\frac{f}{B_s}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi f_0 R_0}{c}\right).$$

$$\exp\left(-j \frac{4\pi(f + m\Delta f)R_0}{c}\right) \cdot \exp(j\Phi_m(f)) \exp(j\Phi_{0m}) \quad (4)$$

其中

$$\Phi_m(f) = \frac{4\pi f}{c} \left[V_T m T_r + \frac{1}{2} a (m T_r)^2 \right]$$

$$\Phi_{0m} = \frac{4\pi(f_0 + m\Delta f)}{c} \left[V_T m T_r + \frac{1}{2} a (m T_r)^2 \right]$$

由式(4)可以看出,子脉冲一维距离像的距离分辨率由基带频率 f 的支撑域决定. 线性调频步进信号带宽合成的目的就是要将各个子脉冲的频域数据合成为一个大支撑域数据,从而得到高分辨的一维距离像.

式(4)中第3个指数项 $\Phi_m(f)$ 表示由于目标的平动而引起的距离和方位的耦合,是非线性相位项,是引起脉组内包络移动的主要原因,一般认为其补偿精度为 $1/4$ 个距离单元. 由于一个脉组子脉冲数目有限且观测时间一般不超过 0.1 s ,因此对相位项 $\Phi_m(f)$ 的补偿是较容易实现的,如通过传统的包络对齐方法^[5]即可实现脉组内各子脉冲一维距离像的对齐.

式(4)中第4个指数项 Φ_{0m} 是由子脉冲载频跳变和目标相对于雷达的径向运动而引入的初始相位项,距离脉压后将直接影响高分辨距离像的合成,此项的补偿精度为 $\pi/4$. 显然,通过运动参数估计来实现对 Φ_{0m} 的精确补偿是不现实的. 同时,在信噪比较低时,由于一个脉组内子脉冲的载频是跳变的,因而传统的自聚焦方法和参数估计方法^[5]也无法应用到此处. 为此,本文提出一种基于高阶累积量的子脉冲带宽相参化处理方法.

2 基于高阶累积量的带宽相参化处理

舰船目标由于受海杂波和噪声的影响,其回波的信噪比通常较低. 在此情况下,文献[3]提出的基于相邻子脉冲带宽相参化的传统方法会有较大误差,直接影响一维距离像的合成,而传统基于二阶统计量的相关函数和功率谱等方法也无法取得好的效果. 由于高阶累积量(HOC)具有消除回波中随机高斯噪声成分影响的特性,故采用 HOC 方法对低信噪比下的回波信号进行处理.

用包络对齐法对加性噪声影响下的式(4)中的 $\Phi_m(f)$ 进行补偿,可得

$$S_m(f) = \rho_0 d_m + w_m, \quad m = 1, \dots, M \quad (5)$$

式中: $\rho_0 = \sigma \text{rect}\left(\frac{f}{B_s}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi f_0 R_0}{c}\right)$; $d_m = \exp\left(-j \frac{4\pi(f+m\Delta f)R_0}{c}\right) \exp(j\Phi_{0m})$; w_m 为加性高斯白噪声,其均值为0,方差为 σ^2 . 对相位 Φ_{0m} 能否进行精确的补偿是合成高分辨一维距离像的关键.

这里用四阶累积量来进行 Φ_{0m} 的估计,定义子脉冲的四阶累积量为

$$C_4 = \text{cum}(S_{ri}, S_{rj}^*, S_{rj}, S_{ri}^*) \quad (6)$$

式中: $r=1, \dots, N$ 为距离单元序号; $*$ 为求共轭; $\text{cum}(\cdot)$ 表示求累积量; S_{ri}, S_{rj} 分别代表第 i 与第 j 个子脉冲,且 $1 \leq i, j \leq M$. 将式(5)代入式(6),得

$$C_4 = \text{cum}(\rho_0 d_i + w_i, \rho_0^* d_j^* + w_j^*, \rho_0 d_j + w_j, \rho_0^* d_i^* + w_i^*) \quad (7)$$

由于噪声 w_m 与信号 $\rho_0 d_m$ ($i, j \in m$) 独立,因此可得

$$C_4 = \text{cum}(\rho_0 d_i, \rho_0^* d_j^*, \rho_0 d_j, \rho_0^* d_i^*) + \text{cum}(w_i, w_j^*, w_j, w_i^*) \quad (8)$$

由于高斯噪声的四阶累积量为0,故式(8)最终可化简为

$$C_4 = \|\rho_0\|^4 d_i d_j^* d_j d_i^* = \|\rho_0\|^4 d_i d_j^* \quad (9)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为2范数. 将式(9)改写为

$$C_4 = K D D^H \quad (10)$$

式中: $K = \|\rho_0\|^4$; $D = [d_1, d_2, \dots, d_M]^T$. 将 $d_m = \exp\left(-j \frac{4\pi(f+m\Delta f)R_0}{c}\right) \exp(j\Phi_{0m})$ 代入式(10),得

$$C_4 = K \begin{bmatrix} 1 & A^{-1}B^{-3} & \dots & A^{-(M-1)}B^{(1-M^2)} \\ A^1B^3 & 1 & \dots & A^{-(M-2)}B^{(2-M^2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{M-1}B^{M^2-1} & A^{M-2}B^{M^2-2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $A = \exp\left(-j \frac{2\pi}{c}(2R\Delta f - 2f_0 V_T T_r - f_0 a T_r)\right)$;

$B = \exp\left(j \frac{2\pi}{c}(2\Delta f V T_r + \Delta f a T_r)\right)$.

由式(11)可知,矩阵 C_4 的秩为1,求解其最大特征值所对应的特征向量即可获得脉组内子脉冲的相位误差信息. 实际处理中,以脉组内第一个子脉冲为基准补充其余子脉冲的相位误差,这样可以消除由于平动造成的相位误差,使其成为等效的静止目标. C_4 的估计值为

$$\hat{C}_4 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |\bar{S}_j|^2 \bar{S}_i \bar{S}_j^* \quad (12)$$

式中: $\bar{S}_i = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N S_{ri}$ 为一个脉组内所有距离单元第 i 次回波信号脉冲压缩后的均值.

3 频域带宽合成

在一个脉组内完成包络对齐和相位补偿后,将运动目标补偿成等效的静止目标,借助于频域带宽合成方法进行子脉冲带宽合成,即在频域将各个子脉冲的频谱拼接起来就可实现调频步进信号的带宽合成. 将每个子脉冲的频谱按第 $M/2$ 个子脉冲的中心频谱为对称轴进行平移,即第 m 个子脉冲频移 $(m - M/2)\Delta f$ 后在频域进行拼接,合成一个大带宽线性调频信号. 这样在脉冲压缩后,分辨率提高为原来的 M 倍,具体做法可参考文献[3].

4 成像流程图

基于 HOC 带宽相参化的调频步进信号 ISAR 成像处理流程图如图1所示. 若发射 N 个脉组才能有足够的积累时间进行方位成像,则所对应的总成像积累时间 $T_{\text{all}} = NMT_r$. 一维距离像中峰值对应的是散射点在当前脉组内第1个子脉冲信号发出时的初始位置,因此经过上面的补偿和合成处理只是消除了目标在脉组内的运动. 目标在脉组间的运动仍然需要补偿,此时的平动补偿可利用包络对齐和自聚焦算法来完成. 后续的成像处理与常规的 ISAR 成像算法完全相同,例如可以选择距离瞬时多普勒(RID)方法^[6-7],这里就不再赘述. 图1中虚线框内的部分为一个脉组内基于 HOC 方法的子脉冲带宽相参化处理过程.

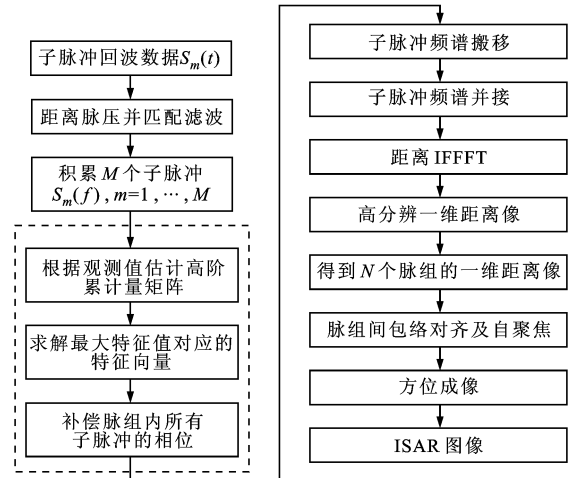


图1 步进频信号 ISAR 成像流程

5 仿真与实测数据处理结果

仿真实验以 19 个散射点的舰船模型为例,模型的俯视图如图 2a 所示,其舰长和舰宽分别为 60 m 和 40 m. 仿真参数如下:中心频率为 9 GHz,频率步进量 40 MHz,发射信号带宽为 40 MHz,采样频率 80 MHz,脉冲重复频率为 2 kHz,目标初始距离为 40 km,目标的径向运动速度为 20 m/s,加速度为 2 m/s²,转动角速度为 0.05 rad/s,脉组数为 128,子脉冲个数为 16,合成后的距离分辨率为 0.234 4 m.

图 2b 是静止目标与采用 HOC 方法以及直接频域合成的运动目标一维距离像对比. 可以看出,采用 HOC 方法后,运动目标与静止目标的包络基本重合,即目标的平动得到了有效的补偿,而直接频域合成的一维距离像有严重的变形. 图 2c 与图 2d 分别为文献[5]中的传统方法与 HOC 方法获得的目标距离包络. 可以明显看出,由于传统方法受噪声影响较大,故合成后的距离包络是错开的,而 HOC 方法可较好地实现包络对齐. 图 2e 与图 2f 分别为传统方法与 HOC 方法的目标 ISAR 成像对比,显然 HOC 方法的图像聚焦效果明显优于传统方法,反映了目标的几何细节特征.

现以仿真模型船首最右侧的点为例进行 HOC 方法的成像质量评估与分析. 图 3 所示为信噪比为 5 dB 时,传统方法与 HOC 方法的距离向脉压剖面图对比. 其质量评估数据如表 1 所示. 可以看出,采

用 HOC 方法后,点目标的分辨率、峰值旁瓣比与积分旁瓣比都有了明显的改善.

表 1 信噪比为 5 dB 时距离向脉压评估结果(未加窗)

方法	分辨率/m	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB
传统方法	0.323 0	-12.640 7	-8.234 7
HOC 方法	0.274 1	-13.263 1	-8.689 4

图 4 为两种方法在 100 次 Monte Carlo 实验基础上的积分旁瓣比 (ISLR) 对比,可以看出在信噪比较高(如 20~30 dB)时,传统方法和 HOC 方法都能获得较低的积分旁瓣比. 这说明高信噪比下,两种方法都适用,但随信噪比的降低,尤其是在 5 dB 以下时,HOC 方法所获得的积分旁瓣比较传统方法明显要低,所获得的目标像的聚焦效果要明显优于传统方法,故 HOC 方法的信噪比门限可取为 5 dB.

图 5 为实测舰船数据的处理结果,其参数如下:目标与雷达间的距离为 20 km,雷达工作在 X 波段,发射线性调频步进信号,子脉冲带宽 80 MHz,脉冲重复频率为 2 kHz,频率步进量 40 MHz,每个脉组内有 16 个子脉冲. 由系统参数可知,带宽合成前子脉冲的距离分辨率为 1.875 m,合成后带宽为 640 MHz,对应的距离分辨率为 0.234 4 m. 成像积累时间内共发射了 512 个脉组,共发射了 8 192 次脉冲,总的积累时间约为 4 s.

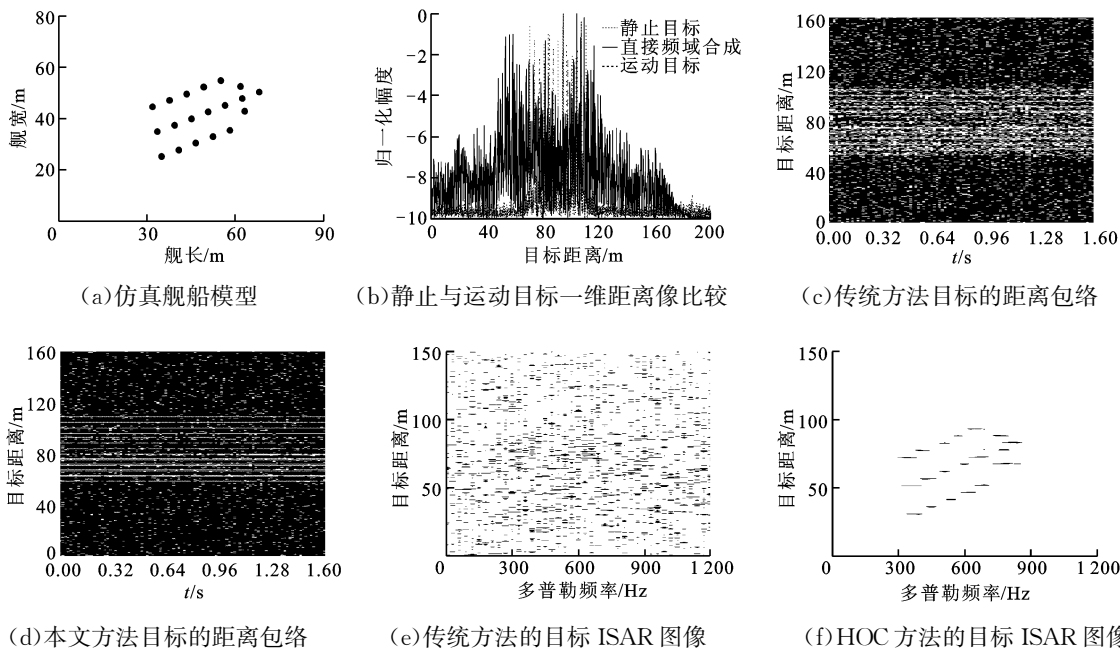
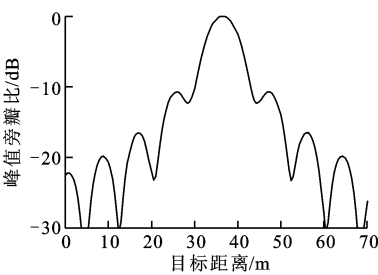
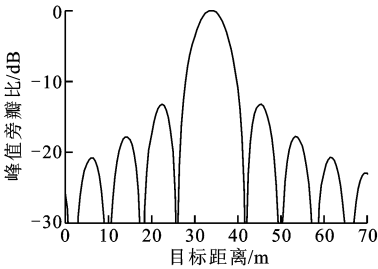


图 2 目标的一维距离像及带宽合成前后 ISAR 图像对比



(a)传统方法距离向脉压剖面图



(b) HOC方法距离向脉压剖面图

图 3 点目标距离向脉压剖面对比(未加窗)

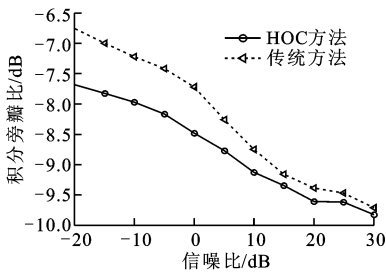
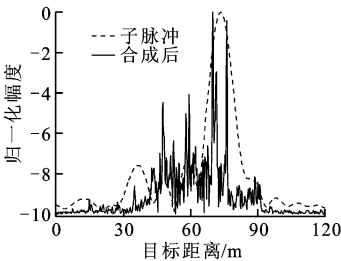
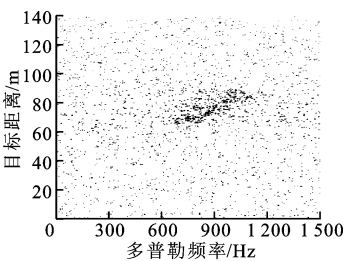


图 4 2 种方法的积分旁瓣对比

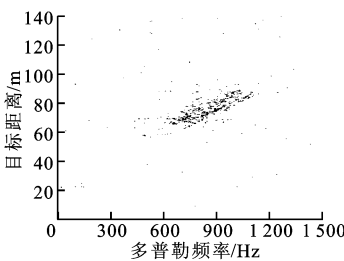
图 5a 为一个脉组内子脉冲合成前、后的一维距离像. 可以看出,合成后子脉冲的距离分辨率得到了



(a)一维距离像的对比



(b)传统方法的 RID 像



(c)本文 HOC 方法的 RID 像

图 5 实测数据的处理结果

明显的提高. 图 5b 与图 5c 分别为传统方法和本文 HOC 方法的 RID 成像结果. 在低信噪比下,图 5b 只能看出大致舰船轮廓,而图 5c 则可以清晰地分辨出船头、船尾以及桅杆等局部细节特征,实现了对舰船目标的高分辨成像.

HOC 方法的时间复杂度为 $O(NM^3)$,其中 N 为脉组数, M 为一个脉组内子脉冲个数. 传统方法的时间复杂度为 $O(N_r I_b N_r)$,其中 N_r 为距离单元数. 对比 2 种方法的复杂度 HOC 方法的计算复杂度比传统频域带宽合成方法大致高出 1 个数量级. 由于 HOC 方法涉及到求解矩阵特征向量的过程,故其运算量较大,故目前无法在雷达系统实时信号处理系统中应用,但由于其获得的成像效果要远远优于传统方法,可用于 ISAR 成像后处理.

6 结 论

本文在对线性调频步进信号分析的基础上,针对传统方法存在的问题,提出了一种基于 HOC 带宽相参化的脉冲综合方法. 利用 HOC 对高斯噪声抑制的优良特性,通过建立回波信号 HOC 的表达式,解算其最大特征值所对应的特征向量,估计脉组内由于运动引起的子脉冲间的相位误差,进行子脉冲相干化处理,将一个脉组内多个小带宽子脉冲合成为一个等效的大带宽线性调频信号,实现了距离高分辨的目的. 最后,通过仿真与实测数据处理结果的比较和分析,验证了 HOC 方法的有效性. 仿真结果表明,在信噪比低于 5 dB 时,HOC 方法的成像效果明显优于传统方法.

参考文献:

[1] WEHEER D R. High resolution radar [M]. New York, USA: Artech House, 1995: 1-15.
[2] 张焕颖,张守宏,李强. 调频步进雷达目标抽取算法及系统参数设计[J]. 电子学报,2007, 35(6): 1153-

1158.
ZHANG Huanying, ZHANG Shouhong, LI Qiang. Target extracting algorithm and system parameter design in stepped frequency modulated radar[J]. Acta Electronics Sinica,2007, 35(6): 1153-1158.

- [3] GAO Zhaozhao, XING Mengdao, ZHANG Shouhong, et al. Experimental results on ISAR imaging with stepped frequency waveforms[J]. IET Electronics Letters, 2009, 45(1): 77-79.
- [4] SHE Zhishun, LIU Yushi. Autofocus for ISAR imaging using higher order statistics[J]. IEEE Geoscience Remote Sensing Letters, 2008, 5(2): 299-302.
- [5] 李亚超, 梁毅, 邢孟道, 等. 基于线性调频步进 ISAR 参数估计和成像算法研究[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2464-2471.
- LI Yachao, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. Estimation of motion parameters and research of imaging algorithm based on LMFS ISAR[J]. Acta Electronics Sinica, 2008, 36(12): 2464-2471.
- [6] 王勇, 姜义成. 基于 Chirplet 自适应分解的舰船目标 ISAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 982-984.
- WANG Yong, JIANG Yicheng. The ISAR imaging of ship based on adaptive Chirplet decomposition [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(6): 982-984.
- [7] 李丽亚, 刘宏伟, 纠博, 等. 斜视干涉逆合成孔径雷达成像算法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1290-1294.
- LI Liya, LIU Hongwei, JIU Bo, et al. An interferometric inverse synthetic aperture radar imaging algorithm for squint model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(10): 1290-1294.

(编辑 刘杨)

(上接第 42 页)

- [4] BENER A B, OZADALI V, ILHAN E S. Semantic matchmaker with precondition and effect matching using SWRL [J]. Expert Syst Appl, 2009, 36(5): 9371-9377.
- [5] BAADER F, LUTZ C, MILICIC M, et al. A description logic based approach to reasoning about web services [C]//Proceedings of the WWW 2005 Workshop on Web Service Semantics. New York, USA: ACM 2005: 636-647.
- [6] WANG Hai, LI Zengzhi, FAN Lin. An unabridged method concerning capability matchmaking of web services web intelligence [C]//2006 IEEE/WIC/ACM International Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 662-665.
- [7] PAOLUCCI M. Semantic matching of web services capabilities, in the semantic web [C]//1st International Semantic Web Conference Proceedings. Berlin, German: Springer-Verlag, 2002: 333-347.

[本刊相关文献链接]

以语义规则刻画服务请求的 Top-k Web 服务发现方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 35-38.

一种等价类区分的多属性评价指标约简算法. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 26-29.

一种支持大规模应用层组播的混合拓扑覆盖网络. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 11-14.

一种分段测量保证 QoS 约束的任播通信模型. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 44-49.

重配置与周期再生相结合的软件再生模型. 西安交

通大学学报, 2010, 44(1): 91-95.

无线传感器网络地理位置路由度量方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 55-59.

可废除并发签名机制. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 45-49.

基于隐马尔可夫模型的无线局域网媒体接入控制层入侵检测方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 26-39.

面向变异分析的协议安全测试方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 11-15.

面向 Web 服务总线集成的分阶段优先级事件驱动架构. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 16-20.

自适应滤波实时网络流量异常检测方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 1-5.

动态短信通信复杂网络演化模型研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 5-9.

一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 33-37.

基于自愈技术的无线传感器网络基站生存模型. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 950-953.

一种基于子网保护的蠕虫传播模型及其应用. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 788-790.

一种基于证明树反演的安全漏洞定位方法. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 439-443.

应用控制的 Web 服务器磁盘缓冲方法. 西安交通大学学报, 2007, 41(2): 153-157.

(编辑 苗凌)