

基于速度模板匹配的扫描间杂波抑制方法

Scan-to-Scan Clutter Suppression Algorithm Based on Velocity Template

关键, 李秀友, 黄勇, 张林

(海军航空工程学院信息融合技术研究所, 山东 烟台 264001)



关键

关键(1968-),男,辽宁锦州人,教授,博导,海军航空工程学院电子工程系主任、教授。2000年毕业于清华大学获博士学位。国家百千万人才工程国家级人选,获中国科协“求是杰出青年实用工程奖”,获全国优秀博士学位论文奖,获国家科技进步二等奖1项、军队科技进步一等奖2项,山东省技术发明一等奖1项,授权发明专利26项,发表论文195篇,出版专著2部。主要研究方向为雷达信号与数据处理、海上目标探测与信息融合。

0 引言

海杂波产生的物理机理十分复杂,受风速、风向和海底结构等众多因素的影响,海表面强回波会使微弱目标信号湮没在杂波中,严重影响对海雷达探测性能。当雷达处于低擦地角工作模式时,特别是逆风区域会出现大量强海尖峰,传统基于单帧回波的恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测技术会导致

针对雷达杂波中单帧检测虚警概率高的问题,提出了基于速度模板匹配的扫描间积累杂波抑制方法。该方法首先根据场景中目标运动特征构造不同速度和加速度的运动模板,覆盖所有可能的目标运动轨迹。利用不同的模板去匹配场景中的运动目标,实现目标的二元积累和检测判决,积累过程中根据多普勒信息对CFAR点迹进行辅助判决,进一步剔除雷达杂波虚警对扫描间积累性能的影响。最后,通过实测海杂波数据验证所提方法的有效性。

关键词: 雷达杂波; 虚警概率; 速度模板; 扫描间积累; 海杂波

中图分类号: TN953

文章编号: 1671-637X(2017)01-0001-05

大量虚警^[1]。对于复杂的近海岸环境,存在岛屿、海礁及海陆交界线等非均匀场景,单帧CFAR处理也会出现大量的剩余杂波,造成虚警率上升^[2-4]。因此,扫描间积累技术广泛应用于雷达信号处理领域,可以有效抑制海杂波引起的虚警。对海探测雷达为了有效检测强海杂波背景下的微弱目标,通常采用扫描间积累技术、分形和混沌等非线性处理技术。由于分形和混沌技术对脉冲数及运算量等要求较高,在实际工程应用中还存在一定难度^[5-9],因而扫描间积累技术更具有工程应用价值。

本文针对单帧恒虚警处理虚警概率高的问题,提出基于速度模板匹配的能量积累方法。综合利用目标扫描间信息抑制杂波虚警点,首先,通过构造不同速度和加速度的运动模板以覆盖所有可能的目标运动轨迹;其次,利用多个不同的模板去遍历匹配场景中的运动目标,实现目标能量积累和检测判决,并利用多普勒信息对CFAR点迹进行筛选,降低虚警点误关联对检测性能

的影响;最后,通过实测海杂波数据验证所提方法的有效性。

1 海杂波特性分析

对于高分辨率雷达的海杂波,通常建模为K分布模型^[10-11],由于K分布基于复合高斯模型理论,将海杂波建模为强相关纹理分离和散斑分离的乘积,能够描述海杂波的相关性,并能够较好地拟合海杂波的长拖尾特性,这些特性使得K分布广泛应用于海杂波统计特性建模。

海杂波慢变的纹理分量服从Gamma分布,其概率密度函数 $f(\gamma)$ 为

$$f(\gamma) = \frac{2b^{2\gamma} \gamma^{2\gamma-1} \exp(-b^2 \gamma^2)}{\Gamma(\gamma)} \quad (1)$$

式中, $0 \leq \gamma < \infty$ 。海杂波快变的散斑分量服从瑞利分布,其概率密度函数 $f(x|\gamma)$ 为

$$f(x|\gamma) = \frac{\pi x}{2\gamma^2} \exp\left(-\frac{\pi x^2}{4\gamma^2}\right) \quad (2)$$

因此,K分布的概率密度函数为^[10]

$$f(x) = \int_0^{\infty} f(x|\gamma) f(\gamma) d\gamma = \frac{4c}{\Gamma(\gamma)} (cx)^\gamma \cdot K_{\gamma-1}(2cx) \quad (3)$$

基金项目: 国家自然科学基金(61471382, 61201445); 山东省自然科学基金(2015ZRA06052); “泰山学者”建设工程专项经费

式中: $0 \leq x \leq \infty$; $c = b\sqrt{\frac{\pi}{4}}$, b 为 Gamma 分布的尺度参数; γ 为形状参数, 反映了杂波拖尾程度, 对于距离高分辨力雷达海杂波, $0.1 < \gamma \leq \infty$; $K_{\gamma-1}(x)$ 为 $\gamma-1$ 阶第二类修正贝塞尔函数。

海杂波, 特别是强海尖峰的出现过程服从一定的规律, 与海表面破碎浪的形成过程存在对应关系。因此, 海尖峰也在破碎浪消失时变弱, 存在的时间为秒数量级。图 1 给出了某雷达同一距离门的实测回波数据包络, 从图中可以看出, 在 5 s 和 8 s 时刻附近, 该距离门海杂波功率水平突然增强, 即出现了海尖峰, 且海尖峰持续时间为秒数量级。

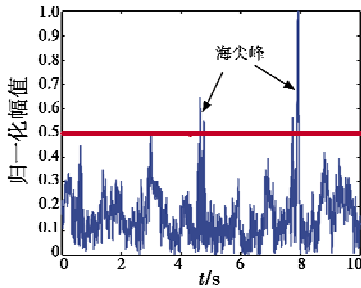


图 1 海杂波幅度包络随时间起伏特性

Fig. 1 Sea clutter amplitude fluctuates with time

海尖峰会造成实测海杂波数据统计特性出现长拖尾现象, 其概率密度函数偏离瑞利分布或对数正态分布。图 2 给出了实测海杂波经验概率分布函数与不同模型概率分布函数曲线的拟合情况, 从拖尾部分可以看出, 瑞利分布和对数正态分布偏离海杂波直方图, 而 K 分布能够较好地拟合实测数据的拖尾部分, 表明实测海杂波数据服从 K 分布, 图中为了凸显尾部信息, 给出了 1-CDF 的值。

通常采用经典的 CA-CFAR 检测器进行海杂波中的目标检测, 对给定目标的检测概率为

$$P_d = \int_0^{\infty} \Pr\{D > T_z\} f_z(z) dz \quad (4)$$

式中, D 为检验统计量, $\Pr\{D > T_z\}$ 表

示目标加杂波的检测概率, 且有^[1]

$$\Pr\{D > T_z\} = \int_0^{\infty} \left\{ \int_{T_z}^{\infty} \frac{2x}{\bar{A}_t^2 + \frac{4y^2}{\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{\bar{A}_t^2 + \frac{4y^2}{\pi}}\right] dx \right\} \cdot f(y) dy = \int_0^{\infty} \frac{2b^{2\gamma}}{\Gamma(\gamma)} y^{2\gamma-1} \exp\left[-\frac{(T_z)^2}{\bar{A}_t^2 + \frac{4y^2}{\pi}} - b^2 y^2\right] dy \quad (5)$$

式中, \bar{A}_t^2 为目标回波信号功率水平。

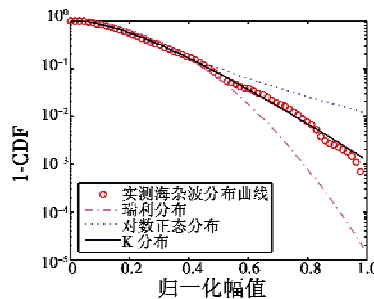


图 2 实测海杂波数据与不同模型的拟合结果

Fig. 2 Fitting of sea clutter data with different models

图 3 给出了 CA-CFAR 检测器的检测性能与形状参数 γ 、虚警概率和参考单元数目 R 的关系。图 3 为检测概率 $P_d = 0.5$ 时的检测器性能损失与分布形状参数 γ 的关系曲线。

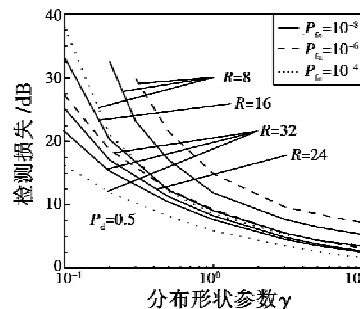


图 3 检测器性能损失与模型参数 γ 的关系

Fig. 3 The relation between performance loss of detector and parameter γ

从图 3 可以看出, 检测性能损失随分布模型形状参数 γ 变化明显, 且与参考单元数及虚警概率有

关。参考单元数目越小, 且虚警概率值 P_{fa} 设定得越低, 则检测器对杂波拖尾部分就越敏感^[1]。

2 基于速度模板匹配的扫描间积累方法

扫描间积累技术充分利用了目标与海杂波在时间相关性上的差异, 目标幅度在扫描间相对稳定, 相关性较强, 能够实现有效扫描间长时间积累, 而海杂波长时间相关性较弱, 扫描间起伏较大, 海尖峰等强杂波持续时间短, 积累增益有限, 因此, 扫描间积累被认为是抑制海杂波的有效手段。但是在高海情背景下, 海杂波回波幅度大, 过第一级 CFAR 门限的虚警点较密集, 传统的扫描间幅度积累方法无法有效抑制杂波, 信杂比改善不明显。当目标存在一定径向运动速度时, 目标在扫描间存在跨距离单元走动现象, 常规的扫描间积累方法会导致增益下降。因此, 需要建立不同的速度模板匹配不同运动速度的目标, 实现能量的最佳积累。

2.1 点迹信息提取

在第一级 CFAR 处理过程中需要对目标多个脉冲回波进行积累, 目标在 (r_0, θ_0) 位置附近区域过第一级 CFAR 门限点幅值记为 $x_{(i,j)}$, 其中, $(i,j) \in (I_0, J_0)$, I_0, J_0 分别为距离和方位向连通的区域, 则认为该区域点属于同一个目标, 将该区域数据记为矩阵 $X_{(r_0, \theta_0)}$, 同时记录该距离单元的多普勒速度估计值 \hat{v}_0 (MTD 处理基于频域检测, 记录过第一级 CFAR 门限的多普勒通道, 经过换算可得目标多普勒速度信息), 并采用二维加权矩估计法分别估计目标距离和方位质心点, 估计表达式为

$$\begin{cases} \hat{r}_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in (I_0, J_0)} x_{(r_0, \theta_0)} r_i}{\sum_{(i,j) \in (I_0, J_0)} x_{(r_0, \theta_0)}} \\ \hat{\theta}_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in (I_0, J_0)} x_{(r_0, \theta_0)} \theta_j}{\sum_{(i,j) \in (I_0, J_0)} x_{(r_0, \theta_0)}} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 完备的速度模板构造

根据距离分辨率 ΔR 、方位分辨率 $\Delta\theta$ 、天线扫描周期 T 、脉冲重复频率 f_{PRF} 等雷达系统参数,以及所关注目标最大运动速度 V_{max} 与最大加速度 α_{max} 计算模板参数。如海面舰船目标速度的范围可设为 $V_{\text{max}} = \pm 60$ n mile/h,加速度范围设为 $\alpha_{\text{max}} = \pm 5$ m/s²,以下简称慢速运动模板。雷达对海工作模式下,往往要兼顾海面慢速运动目标及低空飞行目标,则设置并行的慢速运动和快速运动两个模板,快速运动模板目标速度范围设为 $V_{\text{max}} = \pm 250$ m/s,加速度范围设为 $\alpha_{\text{max}} = \pm 10$ m/s²,上述速度及加速度范围尽可能覆盖所有可能目标。模板扫描间积累次数 M 要根据天线扫描周期 T 及海尖峰持续时间设定(海尖峰持续时间 T_s 最长为 2~3 s),要使得积累时间内目标速度相对稳定,且远大于海尖峰持续时间,通常设为 $M \cdot T \geq 3T_s$ 。加速度模板的划分要使得相邻两个加速度模板在积累时间内至少相差一个距离门,否则根据距离分辨单元量化后模板冗余,即

$$\frac{\alpha_{\text{max}}}{L-1}(M-1)^2 T^2 \geq \Delta R \quad (7)$$

和

$$L \leq \frac{\alpha_{\text{max}}}{\Delta R}(M-1)^2 T^2 + 1 \quad (8)$$

将加速度等间隔分成 L 档,加速度间隔为 $\Delta\alpha = \frac{2\alpha_{\text{max}}}{L-1}$, L 档加速度由小到大依次表示为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L$ 。速度模板的划分按照同样的准则,此处给出最大模板数为

$$\frac{2V_{\text{max}}}{N-1}(M-1)T = \Delta v(M-1)T \geq \Delta R \quad (9)$$

则相邻两档速度的间隔可以为 $\Delta v = \frac{2V_{\text{max}}}{(N-1)}$ 。同样可得

$$N \leq \frac{2V_{\text{max}}(M-1)T}{\Delta R} + 1 \quad (10)$$

N 档速度由小到大依次表示为 v_1, v_2, \dots, v_N 。

2.3 模板匹配与搜索

匀加速运动模板按照不同的加速度划分,当加速度为零时则对应匀速模板,将每个速度 v_n ($n=1, 2, \dots, N$) 与天线扫描周期(电扫描雷达波束回访周期) T 相乘,则 $v_n T$ 表示相邻两次扫描间该速度模板对应的距离走动,前 $M-1$ 次连续扫描的距离走动量为 $[-(M-1)v_n T, \dots, -2v_n T, -v_n T]$,为了连续覆盖所有速度值,即使得设计的模板是完备的,需要对离散模板设置搜索波门,则前 $M-1$ 次扫描距离搜索波门表示为 $[-(M-1) \cdot (v_n \pm \Delta v/2)T, \dots, -2(v_n \pm \Delta v/2)T, -(v_n \pm \Delta v/2) \cdot T]$ 。当目标加速度不为零时,前 $M-1$ 个扫描周期内第 l 个加速度 α_l ($l=1, 2, \dots, L$)、第 n 档速度 v_n 所对应的距离走动量表示为 $[-(M-1)v_n T + 0.5\alpha_l(M-1)^2 T^2, \dots, -2 \cdot v_n T + 0.5\alpha_l(2T)^2, -v_n T + 0.5 \cdot \alpha_l T^2]$ 。同理,为了连续覆盖所有加速度值,需要增大加速度搜索区间。

2.4 基于多普勒信息的虚警剔除

为了降低速度模板与目标运动失配造成的漏检,综合考虑了目标的速度和加速度信息,并且在对海工作模式下扩大了搜索维度,但是这会致密集海尖峰背景下出现误关联,提高虚警概率。因此,利用目标多普勒信息进行辅助判决,进一步剔除模板中的海尖峰,目标多普勒速度需要满足

$$\left| \frac{(\hat{v}_{0,-m} + \alpha_l m - v_n)}{v_{\text{PRF}}} - \text{int}\left(\frac{\hat{v}_{0,-m} + \alpha_l m - v_n}{v_{\text{PRF}}}\right) \right| \leq \beta \frac{|\Delta v| + |\Delta\alpha m T|}{v_{\text{PRF}}} \quad (11)$$

式中: $\text{int}(\cdot)$ 表示取整数; $\hat{v}_{0,-m}$ 为第 m 次扫描测得的目标多普勒速度; α_l 为第 l 个加速度; v_n 为第 n 个

速度模板对应的速度; v_{PRF} 为脉冲重复频率对应的最大不模糊速度; Δv 和 $\Delta\alpha$ 分别为速度模板及加速度模板的间隔; β 为置信度系数。

2.5 二元积累检测

根据第一级检验虚警概率 $P_{\text{fa},\text{sp}}$ 和二元检测的虚警概率计算第二级门限值。当检测单元中不存在目标的条件下,二元检测的虚警概率为

$$P_{\text{fa}}(M) = \sum_{k=K}^M \frac{M!}{k!(M-k)!} (P_{\text{fa},\text{sp}})^k \cdot (1 - P_{\text{fa},\text{sp}})^{M-k} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{fa},\text{sp}}$ 表示单帧回波第一级检验产生的虚警概率; K 为第二级门限(整数, $1 \leq K \leq M$)。将二元积累结果与门限值 K 比较,当积累数值大于 K 时,认为存在目标,否则,认为不存在目标,最后输出判决结果。具体处理流程如图 4 所示。

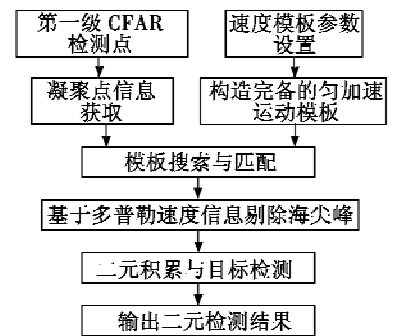


图 4 基于速度模板匹配的扫描间积累方法流程图

Fig. 4 Flow chart of clutter suppression algorithm based on velocity template

3 实验结果及分析

实验所用数据来自某 X 波段岸基对海监视雷达,该雷达系统架于高 80 m 的固定平台上,距离海岸线约 200 m,可对航道进出轮船及海上各类目标进行全天候观测。数据采集时,雷达开启边扫描边跟踪工作模式,并采用数据记录仪采集雷达回波中频信号。

图 5 给出了顺风区域、侧风区

域和逆风区域实测数据的单次扫描 CFAR 处理结果。从图中可以看出,在相同的检测门限条件下,图 5a 对应的顺风区域虚警点相对较少,图 5c 对应的逆风区域虚警点最多,图 5b 对应的侧风区域虚警点在两者之间,主要是由于逆风区域存在大量回波幅度较强的海尖峰过 CFAR 检测门限造成的大量虚警。

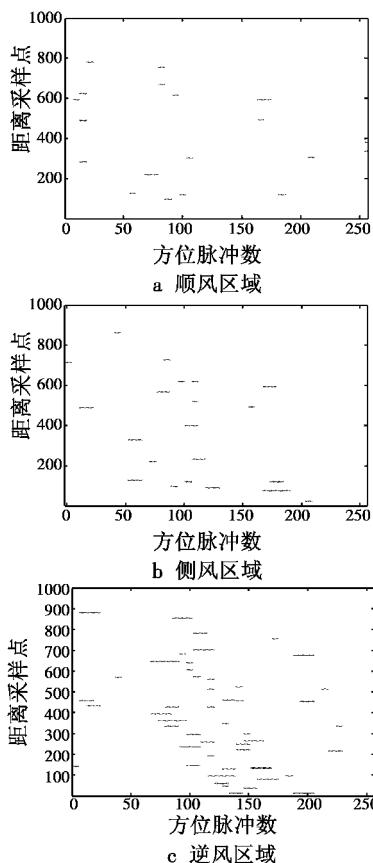


图5 单次扫描 CFAR 处理结果
Fig. 5 CFAR detection result of single scanning

针对该雷达数据将本文算法中运动目标速度范围设为 $V_{\max} = \pm 60$ n mile/h, 加速度范围设为 $\alpha_{\max} = \pm 5$ m/s^2 , 二元判决门限采用 3/5 准则, 并利用目标的多普勒信息对匹配点进行判断, 进一步剔除虚警点。图 6 为上述顺风、侧风和逆风区域 CFAR 处理输出经过本文基于速度模板匹配的扫描间积累检测结果。从图中可以看出, 图 6 相对于图 5 的虚警点明显降低, 较好地抑制了海尖峰等造成的大量虚警, 并能够稳定地检

测出运动目标, 由于算法中考虑了目标的各种运动状态, 因此, 目标运动不会对本文算法的检测性能造成损失。

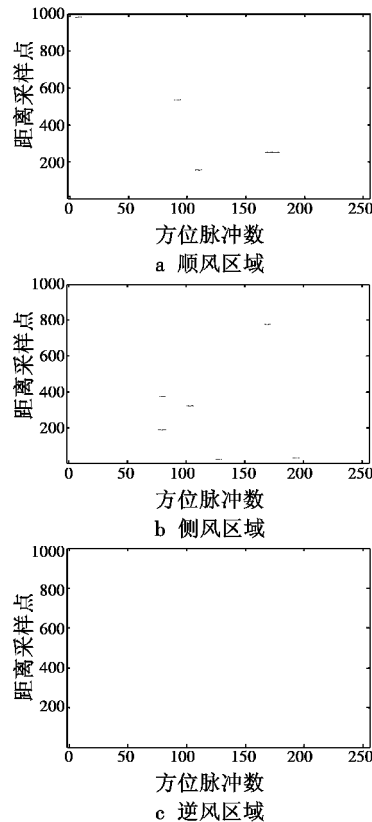


图6 本文算法处理结果
Fig. 6 Detection result of the proposed algorithm

4 结束语

本文针对搜索雷达单帧数据恒虚警处理虚警率高的问题, 利用目标帧间距离变化和 Doppler 信息以抑制海杂波虚警点, 所提出的基于速度模板匹配的能量积累方法较好地抑制了海尖峰等虚警, 并能够稳定地检测出运动目标, 降低目标运动造成的检测性能损失, 最后通过实测对海杂波数据验证所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [2] WATTS S. Cell-averaging CFAR gain

in spatially correlated K-distributed clutter [J]. IEE Proceedings Radar, Sonar Navigation, 1996, 143(5):321-327.

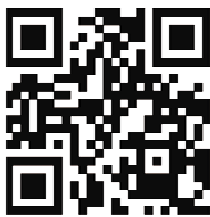
- [3] WARD K D, TOUGH R J A, WATTS S. Sea clutter: scattering, the K-distribution and radar performance [M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [4] SHI Y L, SHUI P L. Target detection in high-resolution sea clutter via block-adaptive clutter suppression [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2011, 5(1):48-57.
- [5] 杜干, 张守宏. 分形模型在海上雷达目标检测中的应用 [J]. 电波科学学报, 1998, 13(4):377-381.
- [6] 谢文录, 章倩苓, 陈彦辉, 等. 杂波中信号检测的分形方法研究 [J]. 电子科学学报, 1999, 21(5):628-633.
- [7] 杜干, 张守宏. 高阶分形特征在雷达信号检测中的应用 [J]. 电子学报, 2000, 28(3):90-92.
- [8] XU X K. Low observable targets detection by joint fractal properties of sea clutter; an experimental study of IPIX OHGR datasets [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(4):1425-1429.
- [9] GUAN J, LIU N B, ZHANG J, et al. Multifractal correlation characteristic for radar detecting low-observable target in sea clutter [J]. Signal Processing, 2010, 90(2):523-535.
- [10] WARD K D. Compound representation of high resolution sea clutter [J]. Electronics Letters, 1981, 17(16):561-563.
- [11] JAO J. Amplitude distribution of composite terrain radar clutter and the K-distribution [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984, 32(10):1049-1062.

Abstract: In order to solve the problem of high Constant False Alarm Rate (CFAR) in single frame detection of radar clutter, a scan-to-scan accumulation algorithm based on velocity template is proposed in this paper. Firstly, velocity templates of different velocities and accelerations are constructed based on the movement characteristics of the targets, covering all the possible target trajectories. Secondly, the velocity templates are used to match different moving targets for making binary accumulation and detection judgment. During the accumulation, Doppler velocity information is used for assistant judgment, thus can further reduce the influence of the false alarms to detection performance. Finally, simulation results show that this algorithm can effectively suppress the radar clutter.

Key words: radar clutter; false alarm rate; velocity template; scan-to-scan accumulation; sea clutter

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。



请扫描二维码关注我刊

下 期 要 目

基于 PJND 的平视显示器可读性评价方法
非相似双余度机载告警计算机系统设计及实现
遥感图像中的机场跑道检测算法
机载光电稳定平台自抗扰控制研究
一种旋翼式无人机的视觉着陆位姿估计方法
基于分块的尺度自适应 CSK 跟踪算法

多弹协同技术在防空导弹发展中的应用探讨
自适应模型更新的粒子滤波视觉跟踪
基于 Jakes 模型的机内无线信道建模与仿真
GPS 空间信号可用性评估算法
多传感器可变参数互补滤波算法设计
机载稳定平台伺服系统故障分析及诊断方法研究