

文章编号: 2095-4980(2013)06-0886-05

甚高频雷达回波对海冰的检测

赵 耀

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

摘 要:通过推导海冰层的全极化脉冲波时域 Mueller 矩阵解, 提出空基甚高频(VHF, 30 MHz ~ 300 MHz)雷达窄脉冲检测海冰层的方法。海冰层的雷达脉冲极化回波主要由海冰上下两层随机粗糙面、海冰层中空气泡的体散射以及面-体相互作用几种散射机制的回波组成。通过改变海冰的特征参数(海冰层厚、含盐量、介电常数、界面粗糙度等), 对海冰雷达回波进行数值模拟来验证本文提出的方法是否可行。结果表明, 本模型可用于检测海冰, 对海冰的层厚和分层结构进行反演或者估算。

关键词: 散射模型; Mueller 矩阵; 海冰层探测; 数值模拟

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201306.0886

Sea ice layer exploration with Very High Frequency radar echoes

ZHAO Yao

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Based on the time domain Mueller matrix solution, a method for Very High Frequency(VHF, 30 MHz–300 MHz) radar pulse penetration on sea ice is developed. The polarimetric radar pulse echoes contain echoes from top and bottom interfaces, volumetric scattering of air-bubbles and interface–volume interactions. By changing model parameters such as the layer thickness, salinity, dielectric constant and interfacial roughness, the radar pulse echoes on sea ice are numerically simulated to verify the feasibility of the proposed method. The results demonstrate that the model can be used to explore sea ice, and the information such as depth and other structure properties can be inversed and estimated.

Key words: scattering model; Mueller matrix; sea ice layer exploration; numerical simulation

海冰包括咸水冰(由海水直接冻结而成)、大陆冰川、河冰及湖冰。在微波遥感中, 按发展的阶段, 可分为初生冰、初期冰、一年冰和多年冰 4 大类^[1]; 根据运动状态的不同, 可分为固定冰和流冰。海冰对全球气候变化和海岸工程建设有着极大的影响, 也是海洋资源开发的重要组成部分。20 世纪 40 年代以来, 临海高纬度国家陆续开展海冰观测和研究工作。通过利用岸站、车载及航空等测量方法, 使用声呐、雷达及卫星等多种仪器对海冰和冰山进行观测, 通过数理统计和动力学数值方法发布冰山险情和海冰预报。

近几十年来, 星载、机载遥感与对地观测技术应用于大气、海洋和灾害检测等领域^[2]。传统的海冰遥感观测主要是利用可见光和红外遥感图像, 如美国国家海洋大气局的第三代实用气象观测卫星、中分辨率成像光谱仪和星载微波辐射计等。近十多年来, 微波遥感在全天候、全天时检测方面发展迅速, 如, 合成孔径成像雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术的发展, 欧空局雷达环境卫星 ENVISAT ASAR(C 波段)、日本对地观测卫星(Advanced Land Observing Satellite, ALOS)陆地观测卫星搭载的 PALSAR(L 波段)等, 它们具备高分辨率、全天候、全天时观测、可穿透性等特点。然而, 目前多数海冰物理参数的研究, 如海冰层介电常数、厚度和下表层的介电常数等, 均基于雷达谱的表面反射率和雷达回波出现的距离位置^[3], 缺乏对雷达电磁波在海冰表面的反射与次表层内传播、衰减和反射的定量数值模拟。

甚高频(VHF)雷达不受云雾影响, 而且对太阳光照条件也不敏感, 可全天候、全天时提供高分辨率的遥感图像, 对海冰的粗糙度和盐度敏感, 可以鉴别不同类型的海冰, 对海冰的特征进行分类与识别。因此用 VHF 雷达动态监测海冰, 可监测与预警海冰的变化。

1 海冰的仿真模型和理论推导

海冰是由纯冰和随机分布的非球形盐溶液杂质及空气泡等组成的混合物。盐溶液的介电常数很大,针形的盐溶液杂质对海冰的介电特性产生很大的影响^[4],空气泡也极大地改变了海冰的介电特性,尤其是显著增加了海冰的散射特性。本文将海冰层看作一层有耗介质层,海冰的上下界面为随机粗糙面,以纯冰和盐溶液杂质混合物为背景介质,海冰层中分布有随机分布与取向的空气泡散射体。由矢量辐射传输(Vector Radiative Transfer, VRT)方程,推导该模型的脉冲波 Mueller 矩阵解。通过海冰介电常数等特征参数的变化,获得脉冲雷达回波的数值模拟图像。VHF 雷达检测不同条件下雷达距离回波的差异,反映不同条件下海冰的层结构物理特征。

如图 1 所示,海冰层(1)为纯冰和溶盐杂质组成的混合物,厚度为 d ;海水(2)上面附有一层球形的空气泡。一般情况下,海冰层下的海水表面为粗糙面,面散射起主要作用。本文参考文献[5]提出的粗糙面上混杂粒子层全极化散射的方法进行数值模拟。VRT 方程见文献[6],由于下垫面为粗糙面,其边界条件应改为:

$$\mathbf{I}(\theta, \phi, z = -d) = \int_0^{2\pi} d\phi'' \int_0^{\pi/2} d\theta'' \sin \theta'' \bar{\mathbf{M}}_f(\theta, \phi, \theta'', \phi'') \mathbf{I}(\theta'', \phi'', z = -d) \quad (1)$$

式中: Stokes 矢量 $\mathbf{I}$ 表示极化波的辐射强度; θ 表示球坐标系中入射波矢量与 z 轴的夹角, $0 \leq \theta < \pi/2$; ϕ 表示球坐标系中入射波矢量在 xoy 平面上投影与 x 轴夹角; θ'', ϕ'' 为散射波矢量在球坐标系中的对应角度; $\bar{\mathbf{M}}_f$ 为粗糙面散射 Mueller 矩阵。

参考文献[5]的方法,先写出形式解,忽略多次散射,可以根据边界条件确定形式解中的待定系数,代入即可求得零阶散射,反复迭代,依次解得一阶甚至更高阶的散射,限于篇幅,详细求解过程略去。

可得包括面散射和体散射的一阶散射 Mueller 矩阵:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}(\theta, \Omega_0) = & \exp[-d\mu^{-1}\bar{\kappa}_e(\theta)] \bar{\mathbf{M}}_f(\theta, \Omega_0) \exp[-d\mu^{-1}\bar{\kappa}_e(\Omega_0)] + \\ & \mu^{-1} \int_{-d}^0 dz' \exp[z'\mu^{-1}\bar{\kappa}_e(\theta)] \bar{\mathbf{P}}(\theta, \Omega_0) \exp[z'\mu^{-1}\bar{\kappa}_e(\Omega_0)] + \\ & \mu^{-1} \int_{-d}^0 dz' \exp[z'\mu^{-1}\bar{\kappa}_e(\theta)] \int d\theta' \sin \theta' \bar{\mathbf{P}}(\theta, \theta') \exp[-(d-z')\mu'^{-1}\bar{\kappa}_e(\theta')] \bar{\mathbf{M}}_f(\theta', \Omega_0) \exp[-d\mu_0^{-1}\bar{\kappa}_e(\Omega_0)] + \\ & \mu^{-1} \exp[-d\mu^{-1}\bar{\kappa}_e(\theta)] \int d\theta'' \sin \theta'' \bar{\mathbf{M}}_f(\theta, \Omega'') \int_{-d}^0 dz' \exp[-(d-z')\mu''^{-1}\bar{\kappa}_e(\Omega'')] \bar{\mathbf{P}}(\Omega'', \Omega_0) \exp[z'\mu_0^{-1}\bar{\kappa}_e(\Omega_0)] + \\ & \mu^{-1} \exp[-d\mu^{-1}\bar{\kappa}_e(\theta)] \int d\theta'' \sin \theta'' \bar{\mathbf{M}}_f(\theta, \Omega'') \exp[-(d-z')\mu''^{-1}\bar{\kappa}_e(\Omega'')] \int d\theta' \sin \theta' \bar{\mathbf{P}}(\theta', \theta') \cdot \\ & \exp[-(d-z')\mu'^{-1}\bar{\kappa}_e(\theta')] \bar{\mathbf{M}}_f(\theta', \Omega_0) \exp[-d\mu_0^{-1}\bar{\kappa}_e(\Omega_0)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\bar{\kappa}_e$ 是 Stokes 矢量在粒子层中散射与吸收的系数矩阵; $\bar{\mathbf{P}}(\theta_i, \theta_s)$ 表示从 (θ_i, ϕ_i) 散射至 (θ_s, ϕ_s) 的转化矩阵^[7]。 $\mu_0 = \cos \theta_0$, $\mu = \cos \theta$, $\mu' = \cos \theta'$, $\mu'' = \cos \theta''$, 变量 μ 和 θ 加“ $\sim$ ”表示第一次散射之后的磁导率和角度,加“ $\sim$ ”表示第二次散射之后的磁导率和角度;向上行 $\theta = (\theta, \phi)$, 向下行 $\Omega = (\pi - \theta, \phi)$ 。

用迭代积分方程法(Integral Equation Method, IEM)粗糙面的 Mueller 矩阵代入 $\bar{\mathbf{M}}_f$ 以及随机取向的消光矩阵和相矩阵,即可对海冰进行 VRT 建模。不考虑粒子间的高阶散射耦合,则对于粒子(空气泡)所得到的 Mueller 矩阵解,根据散射体占空比加权平均即可得到总的 Mueller 矩阵解。

用椭圆角 χ ($-45^\circ \leq \chi \leq 45^\circ$) 和方位角 ψ ($0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$) 描述入射椭圆极化波,则归一化的入射 Stoke 矢量可表示成:

$$\bar{\mathbf{I}}_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 - \cos 2\chi \cos 2\psi) & \frac{1}{2}(1 + \cos 2\chi \cos 2\psi) & -\cos 2\chi \sin 2\psi & \sin 2\chi \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

易见,当 $\chi = 0^\circ, \psi = 0^\circ$ 或 180° 时,为水平极化(H); $\chi = 0^\circ, \psi = 90^\circ$ 时为垂直极化(V)。在后向散射方向上接收到的同极化散射功率为:

$$P_n = \frac{1}{2} I_{VS} (I - \cos 2\chi \cos 2\psi) + \frac{1}{2} (1 + \cos 2\chi \cos 2\psi) I_{HS} + \frac{1}{2} U_S \cos 2\chi \sin 2\psi + \frac{1}{2} V_S \sin 2\chi \quad (4)$$

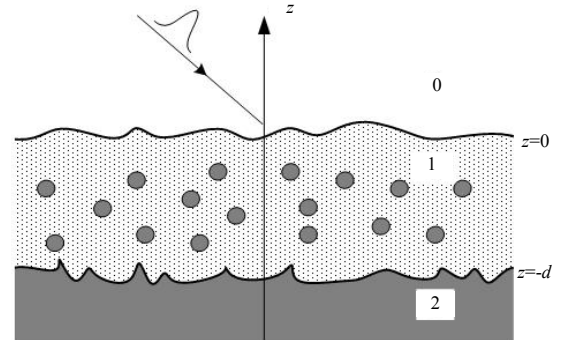


Fig.1 Geometry of sea ice model

图 1 海冰层模型

式中: 下标 n 表示入射波是归一化的; $I_s = \bar{M} \cdot I_0$ 为散射 Stokes 矢量; U_s, V_s 表示散射 stokes 矢量 I_s 的第 3 个参数和第 4 个参数(参见 Stokes 矢量的定义或参见文献[6])。这样, 同极化、去极化后向散射系数 σ_c, σ_d 分别定义为:

$$\sigma_c = 4\pi \cos \theta_0 P_n, \quad \sigma_d = 4\pi \cos \theta_0 (I_{VS} + I_{HS} - P_n) \quad (5)$$

代入 $\chi = 0^\circ, \psi = 0^\circ$ 或者 $\chi = 0^\circ, \psi = 90^\circ$, 可得到水平同极化后向散射系数 σ_{HH} 、垂直同极化后向散射系数 σ_{VV} 以及交叉极化后向散射系数 σ_{HV} 。

$$\sigma_{HH} = 4\pi \cos \theta_0 \bar{M}(2, 2), \quad \sigma_{VV} = 4\pi \cos \theta_0 \bar{M}(1, 1), \quad \sigma_{HV} = 4\pi \cos \theta_0 \bar{M}(1, 2) \quad (6)$$

式中 $\bar{M}(1, 1), \bar{M}(2, 2), \bar{M}(1, 2)$ 为 Mueller 矩阵的相应元素。

2 不同情况下海冰模型设置

在海冰形成过程的初期, 当海面平静没有风浪时, 较长的冰晶在海表面形成很平滑的薄冰层。如果海面有风浪, 晶体在海水中悬浮, 海风和海浪凝聚冰晶, 通过持续的堆积, 海绵状冰形成。随着海冰的生长, 海绵状冰变硬, 形成表面粗糙的饼状浮冰。通常在河流入海口的附近, 入海口近岸的海水盐度较低, 形成低盐度的海冰, 它与同时期生成的海冰的介电常数等电磁特性不同。在海冰沿岸往往分布大量陆地固定冰, 对陆地冰和海冰、浮冰的区分对于冰缘线的研究有很大帮助。

固定冰表面光滑, 面积较大, 在 SAR 图像中的特点是大面积、低亮度及均匀。潮流导致海冰垂直于水平运动, 固定冰边缘因断裂等原因导致破碎, 其表面粗糙度增加, 使得后向散射增大, 在遥感图像表现为亮度较大的区域。淡水冰与低盐度冰后向散射更高, 在 SAR 图像中也表现为高亮区域, 因此并不能很好地区分海冰类型。VHF 雷达与 SAR 相比, 穿透深度更深, 能更好地区分海冰层下的介质, 对于区分不同类型的海冰具有优势。

3 下视雷达脉冲回波数值模拟

雷达承载在飞行器上, 向地面发射调频脉冲, 通过脉冲压缩提高距离向的分辨力。通过合成孔径雷达成像算法可得高分辨力的回波图像。如果探测海冰层结构, 本文应用的 VHF 波段有很高的穿透能力, 带宽为 100 MHz, 载频为 100 MHz。雷达采用偶极子天线, 发射功率为 800 W, 天线阻抗为 50 Ω 。通过脉冲压缩, 理论上距离向分辨力可达到 1.5 m。

本文模拟海冰层在距离向形成的雷达回波轮廓线, 雷达的窄脉冲经过幅度调制, 为 Gaussian 型入射脉冲波^[8]。入射波的脉冲半功率宽度定为 5 ns, 可实现 1.5 m 的等效距离向分辨力。

以海冰变化导致介电常数等物理参数的变化^[9], 对雷达回波进行数值模拟。典型的模型参数: 海冰层厚 100 cm, 入射角为 30°, 图 2 给出了 4 种模型(参数如表 1 所示)设置下极化通道(VV, HH)的雷达回波轮廓线。

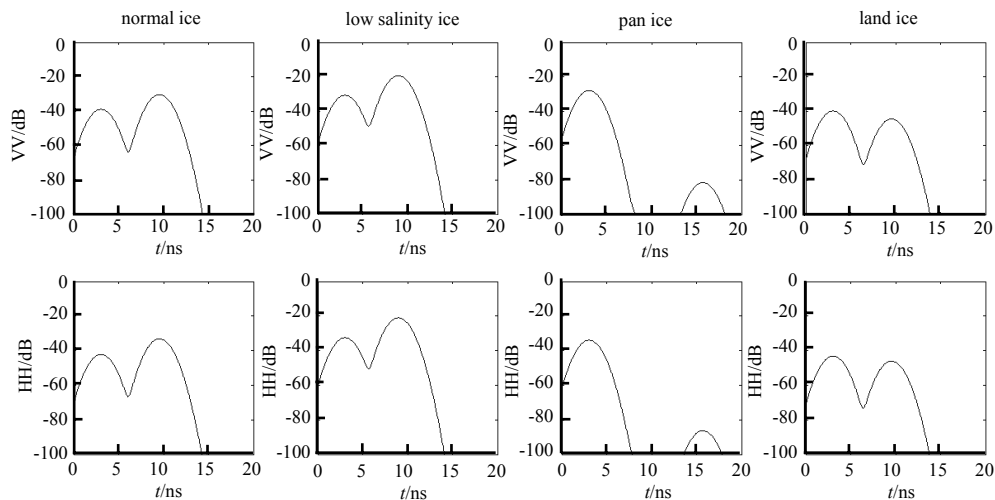


Fig.2 Radar echo of the polarimetric channels(VV, HH)

图 2 典型参数设置的雷达回波模拟

表 1 模型参数
Table1 Sea ice parameters

	normal ice	$f=100\text{ MHz}$ low salinity ice	pan ice	land ice
rough surface between 0-1	fluctuation variance 2 cm correlation length 15 cm	fluctuation variance 2 cm correlation length 15 cm	fluctuation variance 3 cm correlation length 15 cm	fluctuation variance 2 cm correlation length 15 cm
dielectric constant of pure ice and salt solution impurity, ϵ_1	3.328 0+i0.012 5 salinity=10‰	2.884 7+i0.002 1 salinity=1‰	3.328 0+i0.012 5 salinity=10‰	3.328 0+i0.012 5 salinity=10‰
dielectric constant of air bubbles, ϵ_s	ϵ_0 0.025 cm random distribution 0.1			
size of bubbles(radius)				
orientation of bubbles				
fraction volume of air bubbles				
dielectric constant of layer 2, ϵ_2	sea water 85.324 3+i54.920 4	sea water 87.433 1+i28.919 9	sea water 85.324 3+i54.920 4	rock 6+i0.1
rough surface between 1-2	fluctuation variance 2 cm correlation length 20 cm		fluctuation variance 2 cm correlation length 40 cm	

对比 4 种模型回波, 得出以下结论: 盐度的减少致使海冰介电常数虚部减小, 海冰层的衰减减小, 低盐度海水的介电常数与正常盐度海水相比实部增加, 虚部减小, 导致底层回波的反射增加, 吸收减少。饼状浮冰的表面与常见情况相比, 粗糙度的增加, 明显增强上表面的散射, 减弱了其相干透射, 因此海冰层散射减小(仅经过相干透射); 影响下表面散射的主要是相干透射, 海冰层散射随着粗糙度增加而减小。海冰与陆地冰相比, 海水使得来自底层的波峰显著增强。

根据以上的脉冲回波模拟结果, 可以看出, VHF 雷达回波波形初步反映了海冰层结构的特征。应用高分辨率 VHF 雷达探测技术, 在水平方向将不同像素的雷达回波排列成雷达回波图像。现假设一处地形: 有一高于海平面的岛屿, 岛屿上与海面上覆盖着海冰, 横切剖面如图 3 所示, 根据其介质介电常数、层厚, 对该剖面进行模拟, 在水平方向上每隔 1.5 m 计算一个回波, 其 VV,HH 雷达回波图如图 4 所示。

图 4 中海冰上下表面的轮廓容易识别, 海冰层的层厚也容易识别, 说明了本文提出的模型和方法的可行性。通过下界面界线的亮度, 可以很好地区分陆地冰与海冰。通过雷达回波的极化信息, 可以估算或者反演海冰的厚度或者地貌。

4 结论

本文提出用 VHF 雷达窄脉冲探测海冰层结构的方案。通过推导时域的 VHF 雷达脉冲波 Mueller 矩阵解, 在设定各有关物理参数的条件下, 对极化脉冲雷达回波进行数值模拟。由模拟结果看出, 雷达距离程回波与海冰类型密切相关, 盐度以及海冰粗糙程度的不同, 明显改变了雷达回波的强度分布。通过检测雷达距离程回波的差异, 可以很好地区分不同的海冰类型。

参考文献:

[1] BAI Shan,LIU Qinzheng,WU huiding. Relation of ice conditions to climate change in the Bohai Sea of China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001,20(3):331-342.

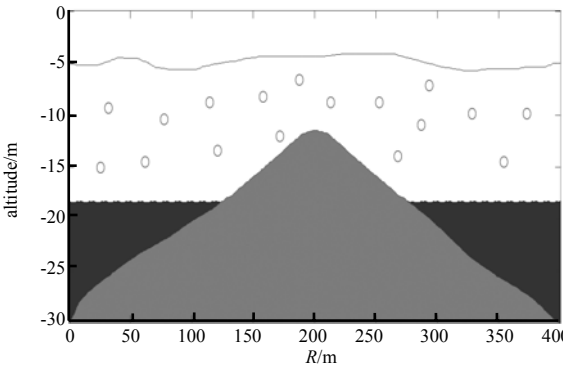


Fig.3 Terrain cross section in hypothesis
图 3 假设地形横切剖面

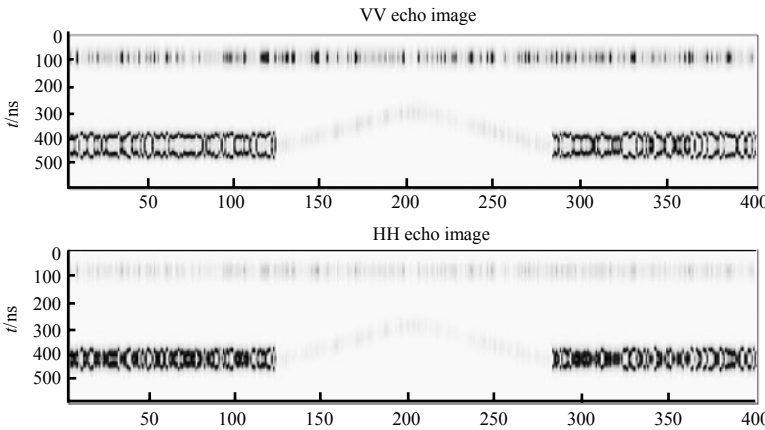


Fig.4 Two-dimensional radar echo map of terrain hypothesis
图 4 假设地形的二维雷达回波图

- [2] 吴培中. 世界卫星海洋遥感三十年[J]. 国土资源遥感, 2000(1):2-10. (WU Peizhong. 30 years for satellite ocean remote sensing in the world[J]. Remote Sensing for Land&Resources, 2000(1):2-10.)
- [3] Huang J,Hussein Z A,Petros A. A VHF Microstrip Antenna with Wide-Bandwidth and Dual-Polarization for Sea Ice Thickness Measurement[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(10):2718-2722.
- [4] 金亚秋,张俊荣,赵仁宇. 海冰微波辐射的数值模式和遥感试验测量[J]. 环境遥感, 1992,7(1):32-40. (JIN Yaqiu, ZHANG Junrong,ZHAO Renyu. Remote sensing of sea ice by multi-frequency microwave radiometers and numerical modeling of radiative transfer[J]. Remote Sensing of Environment, 1992,7(1):32-40.)
- [5] 徐丰,金亚秋. 粗糙面上混杂非球形粒子层全极化散射数值模拟[J]. 微波学报, 2005,21(6):1-7. (XU Feng,JIN Yaqiu. Numerical simulation of fully polarimetric scattering from a layer of hybrid non-spherical particles above a randomly rough surface[J]. Journal of Microwaves, 2005,21(6):1-7.)
- [6] Jin Y Q. A Mueller matrix approach to complete polarimetric scattering from a layer of non-uniformly oriented, non-spherical scatters[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1992,48(3):295-306.
- [7] Ulaby F T,Moore R K,Fung A K. Microwave Remote Sensing(Vol. 3):From Theory to Applications[M]. California:Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
- [8] 金亚秋,徐丰. 分层介质HF雷达回波对泥石流地区的检测与预警[J]. 中国科学:地球科学, 2012,42(2):230-237. (JIN Yaqiu,XU Feng. Monitoring and Early Warning the Debris Flow and Landslides Using HF Radar Pulse Echoes from Layering Land Media[J]. Science China:Earth Sciences, 2012,42(2):230-237.)
- [9] Klein L,Swift C T. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequency[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1977,25(1):104-111.

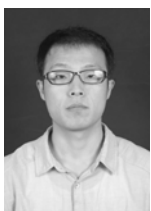
作者简介:



赵 耀(1988-),男,山东省泰安市人,硕士,主要研究方向为空间遥感技术.email:xtzhaoyao@163.com.

(上接第885页)

作者简介:



汪 勇(1988-),男,陕西省榆林市人,硕士,主要研究方向为信号分析与识别.email:wangyong37@126.com.

段田东(1965-),男,江西省九江市人,副教授,主要研究方向为通信信号处理、短波通信.

刘瑞东(1961-),男,山东省临沂市人,副教授,主要研究方向为自动化控制.

徐文艳(1983-),女,安徽省阜阳市人,讲师,主要研究方向为通信信号处理、短波通信.