

各向同性电离层低频一跳天波时延特性研究

周丽丽^{*①④} 闫晶晶^② 穆中林^③ 王桥桥^② 刘承琳^② 何立风^①

^①(陕西科技大学电子信息与人工智能学院 西安 710021)

^②(陕西科技大学电气与控制工程学院 西安 710021)

^③(空军工程大学航空工程学院 西安 710038)

^④(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

摘 要: 低频天波的准确预测对于低电离层探测、远程导航授时具有重要意义。该文基于传统“波跳”理论和FDTD方法对地-电离层波导中天波传播时延特性进行研究。结合天地波时域分离技术,给出了100 kHz载频罗兰-C信号在均匀/指数渐变各向同性电离层条件下,距发射台200 km范围内采用两种方法计算的一跳天波时延随收发距离的变化规律。与“波跳”理论相比,该方法可同时考虑地面不规则、电离层昼夜参数分布不均匀的影响,计算精度更高。

关键词: 低频电波; “波跳”理论; 一跳天波; 时延

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1606-05

DOI: 10.11999/JEIT190528

Study on Time Delay Characteristics of Low Frequency One-hop Sky Waves in the Isotropic Ionosphere

ZHOU Lili^{①④} YAN Jingjing^② MU Zhonglin^③ WANG Qiaoqiao^②
LIU Chenglin^② HE Lifeng^①

^①(School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

^②(School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

^③(College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

^④(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Accurate prediction of low-frequency sky-wave has significance for the lower ionosphere detection and remote navigation timing. The characteristics of sky-wave propagation time delay in the Earth-ionosphere waveguide are studied in this paper based on the traditional wave-hop theory and FDTD method. Time delay variations of 100 kHz one-hop sky waves are given under homogeneous/exponentially graded isotropic ionosphere waveguide models. The great-circle distance between the transmitter and the receiver is within 200 km. Together with a sky- and ground-wave separation technique in the time domain, the narrow-band Loran-C signals are employed in two methods. Compared to the results of wave-hop theory, the method in this paper has higher calculation accuracy by considering the influence of irregular earth and inhomogeneous distribution of ionospheric day-night parameters at the same time.

Key words: Low-frequency wave; Wave-hop theory; One-hop sky wave; Time delay

收稿日期: 2019-07-11; 改回日期: 2020-02-20; 网络出版: 2020-03-25

*通信作者: 周丽丽 zhoulili@sust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61401261), 中国博士后科学基金(2016M600803)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401261), China Postdoctoral Science Foundation (2016M600803)

1 引言

地面、低电离层对低频(30~300 kHz)电波具有良好的反射特性。当辐射源位于地和电离层之间, 低频电波信号将在地面和电离层之间多次反射。相较于地形地物、大气折射等物理因素, 电离层稳定性最差, 使得天波信号特性不仅具有明显的昼夜、季节时变效应^[1,2], 且易受太阳和地球物理事件的影响产生异常随机扰动。为克服电离层的相位污染^[3], 低频导航授时中采用纯地波信号, 导致系统的潜在性能发掘受限。目前低频天波传播预测主要基于“波跳”、“波导”等理论^[4-6], 适用于高度理想化传播信道, 对于任意电子浓度、碰撞频率剖面模式下的场预测严重失真^[7]。近年, 文献^[8-10]将FDTD方法用于地-电离层波导中电波传播研究, 关注总场的幅度效应, 模型多为平面/球面光滑分层结构, 网格剖分尺度集中于 $10^3 \sim 10^4$ m量级甚至更高, 不考虑地形起伏影响。本文则根据天地波信号到达时刻的迟滞性^[11,12], 结合FDTD总场、散射场模型技术对其进行时域分离, 研究近距离低频一跳天波场的传播时延扩展, 采用的地理信息尺度更加精细化(FDTD网格剖分尺度为10 m量级), 可同时兼顾地面不规则和电离层电参数分布不均匀的影响。

2 模型算法

2.1 波跳理论模型

基于球面分层模型结构, 位于地面的低频发射天线可以理想化为垂直电偶极子。根据电波信号在地、电离层中的多径传播方式, 接收总场可等效为沿地面绕射的地波和各跳天波之和, 地面上的电场垂直分量可表示为^[4]

$$E_z = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \quad (1)$$

其中

$$E_0 = 3\sqrt{10}\sqrt{P_t} \frac{\exp(-jk_0 d)}{d} W \quad (2)$$

表示沿地面传播的地波, P_t 是发射功率, W 是地波衰减因子, d 是收发点大圆距离。

$$E_1 = 6\sqrt{10}\sqrt{P_t} \frac{\exp(-jk_0 L_1)}{L_1} \cos^2 \varphi R_s D F_t F_r \quad (3)$$

表示一跳天波, L_1 是一跳天波射线总长度; φ 是一跳天波在地面上的出射角和到达角; R_s 是一跳天波的电离层反射系数; D 是由电离层球面弯曲引起的会聚系数; F_t 和 F_r 则分别表示由于地面的曲率和有限电导率引起的发射点和接收点天线的背景因子。

以上变量均采用国际单位制。 L_1 , D , F_t , F_r , R_s 等几何参量计算复杂, 根据接收点所处区域(如照明区、焦散区、阴影区), 电离层模型(均匀、指数渐变)不同, 采用不同的近似方法处理等效。由式(3), 一跳天波的总时延可表示为

$$t = \frac{k_0 L_1}{\omega} + \frac{|\varphi_1|}{\omega} \quad (4)$$

其中, ω 是电波角频率。

$$\varphi_1 = \varphi_{R_s} + \varphi_{F_t} + \varphi_{F_r} \quad (5)$$

φ_{R_s} , φ_{F_t} , φ_{F_r} 分别是 R_s , F_t 和 F_r 对应的相角。

采用几何光学近似方法, 在照明区, F_t , F_r 可进一步表示为

$$F_{t,r} = \frac{1 + R_g}{2} \quad (6)$$

其中 R_g 是地面反射系数, 可表示为

$$R_g = \frac{\sin \varphi - \Delta_g}{\sin \varphi + \Delta_g} \quad (7)$$

Δ_g 是地面归一化表面阻抗, 可表示为

$$\Delta_g = \frac{\sqrt{\varepsilon_g - \cos^2 \varphi - j\sigma_g/\omega\varepsilon_0}}{\varepsilon_g - j\sigma_g/\omega\varepsilon_0} \quad (8)$$

其中 ε_g 是地面相对介电常数, ε_0 是真空介电常数, σ_g 是地面电导率。

不考虑地磁影响, 对于单一频率, 电离层可视为电导率为 σ_s , 相对介电常数为 ε_s 的普通有耗介质^[8,9]。

$$\sigma_s = \frac{\varepsilon_0 \omega_0^2 v}{\omega^2 + v^2} \quad (9)$$

$$\varepsilon_s = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + v^2} \quad (10)$$

其中 v 是电离层电子和中性粒子的碰撞频率, ω_0 是电离层等离子体频率, 可进一步表示为

$$\omega_0^2 = \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0} \quad (11)$$

其中 e 和 m 分别是一个电子的电荷和质量, N 是电子密度。对于各向同性均匀电离层, R_s 通过式(12)计算, 可表示为

$$R_s = \frac{\varepsilon'_s \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon'_s - \sin^2 \theta_i}}{\varepsilon'_s \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon'_s - \sin^2 \theta_i}} \quad (12)$$

其中 θ_i 为天波入射角, 且 $\varepsilon'_s = \varepsilon_s - j\sigma_s/(\varepsilon_0 \omega)$ 。当传播大圆距离较近, 忽略地球曲率, $D = 1$ 。

为了突显地表参数、地形起伏对时延的影响, 地波领域常以良导体表面传播时延或海水表面传播时延为参考, 扣除1次时延, 研究2次时延、附加2次时延变化规律^[13,14]。本文对一跳天波时延特性研究中, 以天波在真空中射线传播为参考, 分析

式(4)中 φ_1 部分对应的时延效应,并将该部分时延称为天波2次时延,以便同时研究地、电离层对一跳天波时延的影响。

2.2 基于FDTD的天地波分离技术

假设地面与 φ 方向一致,可利用2维柱坐标FDTD方法求解低频电波传播问题,如图1(a)所示:左侧为轴对称边界,右侧为PML边界,底部为有耗地面。通过对FDTD上边界的不同设置,可得到地-电离层波导总场模型和纯地波场模型。总场模型中,在上边界附近填充不同参数的媒质,模拟电离层,根据仿真模型的不同,下文示例中上边界分别设置为PEC或PML边界;地波场模型中上边界设置为PML边界。电偶极子源位于对称轴上,空间步长为18.75 m,时间步长根据Courant稳定条件设定。

分别采用FDTD两种模型计算天地波总场和纯地波场,将两个结果相减,即可得到从电离层边界反射的天波场,并从中分离出一跳天波。信号源采用窄带罗兰-C信号,其载波频率是100 kHz。一跳天波2次时延提取方式参考地波时延提取方法^[14]。低频地波传播理论中,收发点的传播时延 T 可表示为

$$T = \frac{n_s d}{c} + t_w \quad (13)$$

其中 n_s 是传播路径上地面附近大气折射指数(下文 $n_s = 1$); d 是收发点大圆距离; $c = 299792458$ m/s,为真空中的光速; $\frac{n_s d}{c}$ 为1次时延, t_w 为2次时延。如图1(b)所示,一跳天波 t_w 获取方法为

$$t_w = T_0 - \frac{L_1}{n_s c} - \Delta t + \tau_0 \quad (14)$$

其中 T_0 是一跳天波信号第3载波周期正向过0点时刻(与当前接收机时延测量时刻一致); $\Delta t = 30$ μ s,为信号波形起始时刻与提取时刻的差值; $\tau_0 \approx 2.5$ μ s,是激励电流与辐射场信号的初相差。

3 计算结果

结合传统的波跳理论和FDTD方法,该部分模

拟了3种不同地-电离层波导模型下,地面接收到的一跳天波的时延变化。收发点大圆距离总长为200 km。辐射源功率为1 kW。

3.1 平地面、均匀电离层波导模型

该部分通过与波跳理论方法的比较,验证了FDTD分离方案的有效性。图2所示的是平地面、均匀电离层波导模型对应的一跳天波二次时延计算结果。地面电参数为 $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\epsilon_r = 13$ 。电离层电参数分别为(1) $\sigma = \infty$, $\epsilon_r = 1$ (PEC); (2) $\sigma = 2.1571 \times 10^{-6}$ S/m, $\epsilon_r = 0.9342$ ($\nu = 3.7045 \times 10^6$ s $^{-1}$, $N = 2.9171 \times 10^8$ m $^{-3}$)。电离层底部离地高度设置为60 km。在第2种情况下,电离层顶部设置PML边界截断。

由图2可以看出,对于平地面-均匀电离层模型,当大圆距离大于10 km时,两种算法结果获得良好的一致性,大圆距离较近时,误差较大,该误差主要来源于理论算法中辐射模式近似、FDTD中PML边界反射及数值色散等。

3.2 平地面、指数渐变电离层波导模型

一跳天波传播特性受低电离层影响较大,由于夜间电离层D层消失,其存在明显的昼夜效应。该部分给出了平地面、指数渐变(垂直方向)电离层波导模型对应的一跳天波2次时延结果。电离层采用经典昼夜指数模型^[4],电子密度和碰撞频率为

$$N = 1.43 \times 10^{13} e^{-0.15h'} e^{(\beta-0.15)(h-h')} \quad (15)$$

$$\nu = 1.816 \times 10^{11} e^{-0.15h} \quad (16)$$

其中 h 是离地高度,单位为km。白天模型中, $\beta = 0.3$, $h' = 72$ km; 夜晚模型中, $\beta = 0.5$, $h' = 87$ km。地面电参数为 $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\epsilon_r = 13$ 。

图3(a)和图3(b)分别给出了电离层采用白天、夜晚模型时一跳天波2次时延计算结果。白天模型中电离层顶部高度分别取60 km,70 km及73 km; 夜晚模型中电离层离地高度分别取为84 km,86 km及88 km。电离层底部起始高度为30 km,电离层

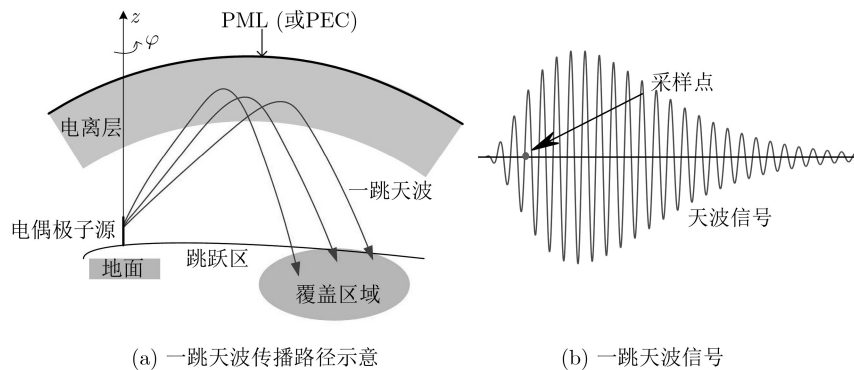


图1 低频天地波传播示意图

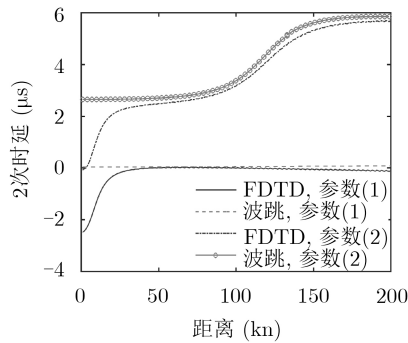


图2 平地、均匀电离层波导模型的一跳天波2次时延

顶部均设置为PEC边界。由于指数电离层模型参数沿垂直方向上渐变不均匀, 电离层导电效应由弱及强, 在电离层顶部反射最强, 式(4) L_1 计算中, 电离层反射高度均以电离层顶部高度为准。

从图3(a)和图3(b)中可以看出, 由于电子密度、碰撞频率及反射高度不同, 夜晚模型下一跳天波2次时延绝对值要大于白天模型下的结果。图3(a)白天模型中, 当电离层高度为73 km时, 2次时延曲线后面出现一定的振荡效应, 该效应是由于随着电离层入射深度与PEC边界反射高度的增加, 一跳天波信号减弱, 各种多径耦合效应增强造成的。

图4则给出了日落时分, 传播路径上存在跨越昼夜过渡区域情况下, 低频一跳天波的2次时延计

算结果。电离层分为两段, 电参数在垂直和水平方向上同时不均匀。第1段长度为50 km, 采用上述白天模型, 电离层顶部高度为60 km; 第2段长度为150 km, 采用夜晚模型, 电离层顶部高度取84 km。电离层顶部为阶跃突跳PEC边界。

从图4中可以看出, 电离层分段不均匀时, 一跳天波2次时延出现剧烈突跳现象, 由于波型复杂, 存在多模干涉, 时延特性变化也随之复杂。此例电离层日落过渡区域参数模型采用了突变模型, 可能夸大实际电离层昼夜变化导致的2次时延波动, 且此时仍以过0点时刻提取时延信息会存在由多模干涉引起的起伏扰动现象。

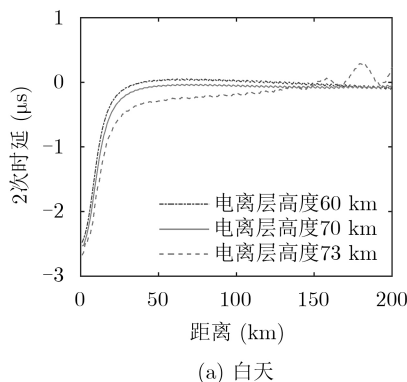
3.3 复杂地面、指数渐变电离层波导模型

图5给出了当地球表面含有一个高斯形状的山时, 地面上接收到的地波和一跳天波2次时延计算结果。电离层采用上述白天模型。传播路径的地形函数为

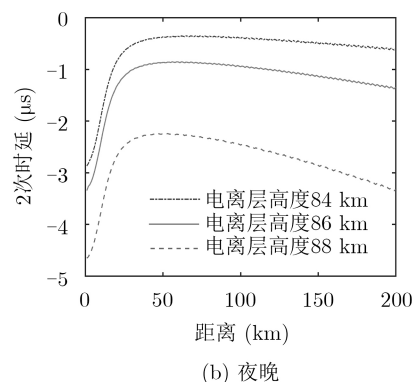
$$h(d) = H e^{-9[(d-d_0)/l]^2} \quad (17)$$

其中 $H = 1.5$ km, $d_0 = 50$ km, $l = 8$ km。地面电参数为 $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\epsilon_r = 13$ 。

从图5中可以看出, 地面情况复杂时, 在地面接收到的一跳天波2次时延变化趋势亦随之复杂, 先减弱后增强, 最后逐渐恢复至稳定。天波的2次时延在山前跳变值要大于地波2次时延的结果。



(a) 白天



(b) 夜晚

图3 平地、指数渐变(垂直方向)电离层波导模型的一跳天波2次时延

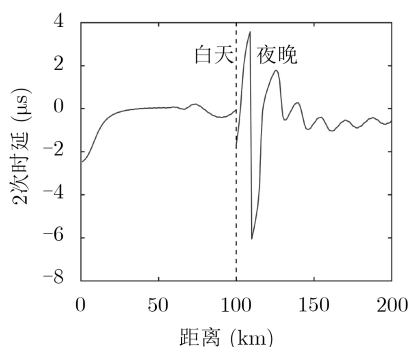


图4 平地、跨昼夜过渡区域电离层波导模型的一跳天波2次时延

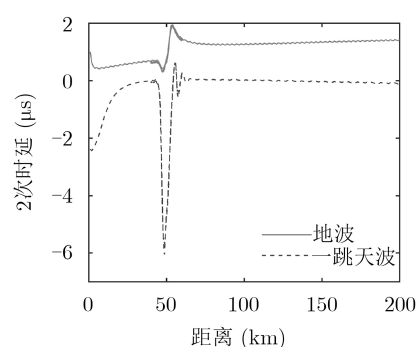


图5 复杂地面、指数渐变(垂直方向)电离层波导模型的一跳天波2次时延

4 结束语

复杂地、电离层中低频电波传播特性预测对其在空间领域的应用拓展至关重要^[15,16]。本文将天地波合成场进行了分离,首次给出了不规则地面条件下指数渐变电离层情况时一跳天波时延的变化规律,在一定程度上突破了传统天波预测理论瓶颈,对天波特性的分析更进一步,下一步将引入各向异性电离层效应分析。由于实际电离层的复杂性,天波的变化规律亦会更加复杂。本文结果对于复杂地形区域天波的分析方法具有一定的借鉴意义,进一步为“天地波识别”中电离层模式、时延跟踪点测定提供依据。

参 考 文 献

- [1] WANG J C H. Seasonal variation of LF/MF sky-wave field strengths[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2008, 54(3): 437–440. doi: [10.1109/TBC.2008.919390](#).
- [2] PU Yurong, YANG Hongjuan, WANG Lili, *et al.* Analysis and modeling of temporal variation properties for LF ground-wave propagation delay[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(4): 641–645. doi: [10.1109/LAWP.2019.2900271](#).
- [3] 于文启, 陈建文, 李雪. 天波超视距雷达电离层相位污染时频校正方法综合性能评估[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(4): 992–1001. doi: [10.11999/JEIT170701](#).
YU Wenqi, CHEN Jianwen, and LI Xue. Comprehensive performance evaluation of ionosphere phase contamination time-frequency correction approaches in over-the-horizon radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 992–1001. doi: [10.11999/JEIT170701](#).
- [4] WAKAI N, KURIHARA N, and OTSUKA A. Numerical method for calculating LF sky-wave, ground-wave and their resultant wave field strengths[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(5): 288–290. doi: [10.1049/el:20040207](#).
- [5] CUMMER S A. Modeling electromagnetic propagation in the earth-ionosphere waveguide[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(9): 1420–1429. doi: [10.1109/8.898776](#).
- [6] XU Honglei, GU Tingting, ZHENG Juan, *et al.* LF sky wave propagation excited by a horizontal electric dipole towards understanding of its radiation mechanism[J]. *ACES Journal*, 2018, 33(6): 657–664.
- [7] 刘军. 低频时码授时系统中的若干理论与工程设计实验研究[D]. [博士论文], 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2002.
LIU Jun. The theory and the technique of engineering on low-frequency time-code in time service system[D]. [Ph.D. dissertation], National Time Service Center Chinese Academy of Sciences, 2002.
- [8] THÉVENOT M, BÉRENGER J P, MONÉDIÈRE T, *et al.* A FDTD scheme for the computation of VLF-LF propagation in the anisotropic earth-ionosphere waveguide[J]. *Annales Des Télécommunications*, 1999, 54(5/6): 297–310. doi: [10.1007/BF02995540](#).
- [9] BÉRENGER J P. FDTD computation of VLF-LF propagation in the earth-ionosphere waveguide[J]. *Annales Des Télécommunications*, 2002, 57(11/12): 1059–1090. doi: [10.1007/BF02999454](#).
- [10] TEKBAŞ K, COSTEN F, BÉRENGER J P, *et al.* Subcell modeling of frequency-dependent thin layers in the FDTD method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(1): 278–286. doi: [10.1109/TAP.2016.2628712](#).
- [11] LI Yun, HUA Yu, YAN Baorong, *et al.* Experimental study on a modified method for propagation delay of long wave signal[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(9): 1716–1720. doi: [10.1109/LAWP.2019.2926734](#).
- [12] ZHANG Kai, WAN Guobin, LI Minchao, *et al.* Skywave delay estimation in enhanced Loran based on extended invariance principle weighted fourier transform and relaxation algorithm[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(8): 1344–1349. doi: [10.1049/iet-rsn.2018.5651](#).
- [13] SON P W, RHEE J H, and SEO J. Novel multichain-based Loran positioning algorithm for resilient navigation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(2): 666–679. doi: [10.1109/TAES.2017.2762438](#).
- [14] ZHOU Lili, XI Xiaoli, ZHANG Jinsheng, *et al.* A new method for Loran-C ASF calculation over irregular terrain[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3): 1738–1744. doi: [10.1109/TAES.2013.6558016](#).
- [15] QIN Zilong, CUMMER S A, CHEN Mingli, *et al.* A comparative study of the ray theory model with the finite difference time domain model for lightning spheric transmission in earth-ionosphere waveguide[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124(6): 3335–3349. doi: [10.1029/2018JD029440](#).
- [16] KISELEVA O, BRANDELIK A, HÜBNER C, *et al.* A new far-field low-frequency electromagnetic method for measurement of temporal variations in subsurface electrical conductivity averaged over a transect[J]. *Near Surface Geophysics*, 2018, 16(5): 573–590. doi: [10.1002/nsg.12009](#).

周丽丽: 女, 1981年生, 副教授, 研究方向为电波传播与电磁场计算。
闫晶晶: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为电波传播与电磁场计算。
穆中林: 男, 1981年生, 讲师, 研究方向为电波传播、导航与控制。
王桥桥: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为控制工程。
刘承琳: 女, 1998年生, 本科生, 研究方向为控制工程。
何立凤: 男, 1962年生, 教授, 研究方向为模式识别与人工智能。

责任编辑: 阮 望