

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.018

引用格式:周朋,张海勇,贺寅,等.大气波导在海上通信中的应用[J].电讯技术,2014,54(8):1134-1139. [ZHOU Peng, ZHANG Hai-yong, HE Yin, et al. Application of Atmospheric Duct in Maritime Communications[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(8): 1134-1139.]

大气波导在海上通信中的应用*

周朋**, 张海勇, 贺寅, 王睿

(海军大连舰艇学院 通信系, 辽宁 大连 116018)

摘要:大气波导的存在使电磁波实现超视距传播,在增加海上通信距离的同时使海上电磁波传播变得复杂。为丰富大气波导在海上通信中应用的方法和手段,研究了大气波导形成、分类以及不同类型大气波导修正折射指数轮廓线形式及形成原因,分析了电磁波在大气波导环境中实现超视距传播条件,理论研究及仿真验证了大气波导环境下超视距通信参数选择,包括电磁波临界入射角和最低陷获频率。根据海上实际气象环境特点和战场条件需求,提出大气波导在海上通信中的具体应用,对提高海上远距离通信保障能力、获取战场电磁优势具有重要意义。

关键词:海上通信;大气波导;超视距通信;临界入射角;最低陷获频率

中图分类号:TN928 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1134-06

Application of Atmospheric Duct in Maritime Communications

ZHOU Peng, ZHANG Hai-yong, HE Yin, WANG Rui

(Department of Communication, Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: The existence of atmospheric duct makes beyond-the-horizon propagation of electromagnetic waves come true, and it can extend maritime communication distance but makes the propagations of electromagnetic waves complicated at the same time. In order to enrich the methods and means of atmospheric duct in maritime communications application, this paper studies the forms and classifications of atmospheric duct and the forming reasons and outlines of modified refractive index of different ducts, analyzes the conditions for realizing beyond-the-horizon propagation, and theoretically studies and simulates the selection of parameters of beyond-the-horizon communication, including electromagnetic waves' critical angles of incidence and the lowest trapping frequencies. According to the features of maritime environments and the demands of battlefields, it offers the applications of atmospheric ducts in maritime communications, which is of great meaning for enhancing the protection capabilities of long distance communications and acquiring electromagnetic superiority.

Key words: maritime communication; atmospheric duct; beyond-the-horizon communication; critical angles of incidence; lowest trapping frequency

1 引言

电磁波在大气环境中传播,受到大气折射的影

响,会出现负折射、超折射和陷获折射等异常传播现象。大气波导是电磁波传播过程中,电波射线向下

* 收稿日期:2014-03-24;修回日期:2014-05-20 Received date:2014-03-24;Revised date:2014-05-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11374001)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 11374001)

** 通讯作者:zhoupeng051111@126.com Corresponding author: zhoupeng051111@126.com

弯曲的曲率大于地球表面的曲率, 从而将电磁波能量陷获在波导结构内形成波导传播的一种陷获折射现象^[1]。大气波导的出现, 对雷达探测、通信系统等有着重要影响。目前, 国外对大气波导已有深入研究, 实际应用主要结合雷达探测系统, 而在通信方面, 更多的是集中在对大气波导海上超视距通信的理论研究和可行性分析等方面, 处于实验测试阶段, 因此, 大气波导在海上通信方面的研究前景广泛。大气波导在实现海上超视距通信的同时, 存在电磁波传播盲区及电磁干扰等现象, 因此, 研究大气波导超视距传输具有重要意义。测量数据分析表明, 我国沿海海域是大气波导高概率发生区, 尤其是蒸发波导, 在低纬度海域发生概率一般在 80% 左右, 平均高度 10 m 左右^[2], 可见, 大气波导已成为影响海上通信的重要因素。本文主要根据电磁波形成大气波导传播的条件, 在大气波导环境不同的背景需求下提出通信装备发射参数选择依据并进行应用分析。

2 大气波导类型及电磁波传播条件

2.1 大气波导的形成及分类

大气波导是一种特殊的大气现象, 电磁波在大气环境中传播时, 当大气修正折射指数 M 满足 $dM/dh < 0$ (h 为地面以上高度) 时, 大气中出现陷获折射现象, 此时, 电磁波会被限制在一定厚度的大气层内经上下边界来回反射向前传播, 就像在金属波导管中传播一样, 这种现象称为大气波导。大气波导的出现可以使电磁波以较少的损耗向前传播, 传播距离可以达到正常条件下的数倍, 形成电磁波的超视距传输。

大气波导通常分为 3 类: 表面波导、悬空波导和蒸发波导。表面波导和悬空波导是由于暖干气团平移入相对冷湿的海面时, 暖干气团覆盖到冷湿界面形成的大气波导, 下边界接地称为表面波导, 下边界悬空称为悬空波导; 蒸发波导是由于海面水汽蒸发使湿度在很小的垂直高度内发生锐减形成的一类特殊波导。3 种波导大气修正折射指数轮廓线如图 1~3 所示, 大气波导厚度为 d , 研究大气波导的高度和大气修正折射指数轮廓线, 对电磁波超视距通信研究有重要意义。

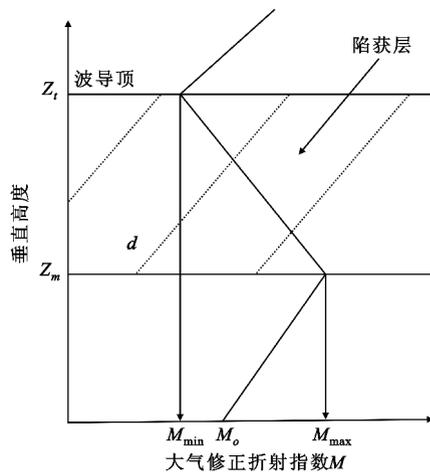


图 1 表面波导大气修正折射指数轮廓线
Fig. 1 Atmospheric correction refractive index contour of surface ducting

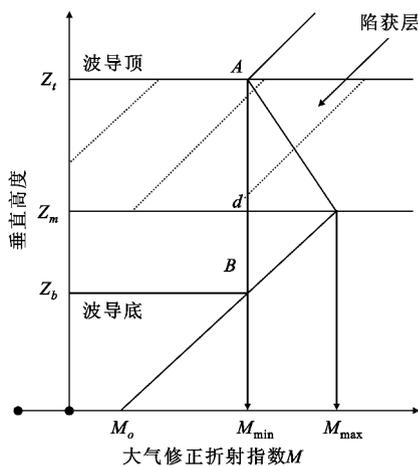


图 2 悬空波导大气修正折射指数轮廓线
Fig. 2 Atmospheric correction refractive index contour of vacant ducting

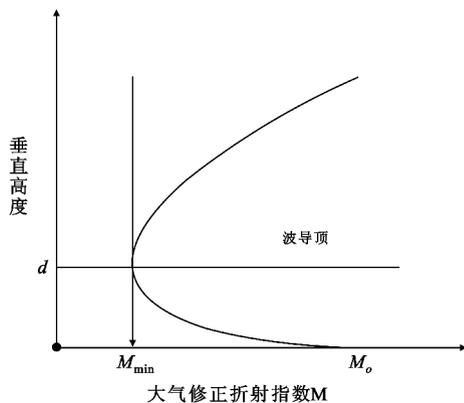


图 3 蒸发波导大气修正折射指数轮廓线
Fig. 3 Atmospheric correction refractive index contour of evaporation ducting

2.2 电磁波在大气波导中传播条件

大气中出现陷获折射时, 会存在大气波导, 满足

电磁波在大气波导中传播还应具备如下条件^[2]：

(1) 近地层一定高度上必须存在大气波导, 即满足 $dM/dh < 0$ 的大气层结;

(2) 电磁波的频率必须满足高于一定频率, 即最低陷获频率 f_{\min} ;

(3) 电磁波的发射仰角必须小于一定角度, 即临界入射角 Φ_c ;

(4) 电磁波发射源必须处于适当的位置, 即满足发射天线在波导层内或距波导层很近的位置。

3 大气波导超视距通信参数选取

电磁波在大气波导中实现超视距传播, 需满足上述四个条件, 通过对大气波导的预测预报及对以往数据的积累研究, 可以探测大气波导的存在, 并准确得到大气波导高度, 以此确定发射天线高度。

3.1 天线临界入射角 Φ_c

在满足其他三个条件的情况下, 不同发射仰角的电磁波传播路线如图 4 所示。BD 段为大气陷获层, B 点位于陷获层底所在高度, 大气修正折射指数为 M_{\max} , D 点位于陷获层顶所在高度, 大气修正折射指数为 M_{\min} , 大气波导厚度为 AD 之间高度, 现假设发射天线位于 C 点所在高度处, 大气修正折射指数为 M_0 , 初始发射仰角为 Φ_0 。取电磁波传播到某一高度 h 时的仰角为 Φ , 大气修正折射指数为 M , 根据射线轨迹方程, 电磁波仰角与大气修正折射指数有如下关系:

$$\Phi^2 - \Phi_0^2 = 2(M - M_0) \times 10^{-6} \quad (1)$$

显然, 电磁波的仰角随大气修正折射指数的增大而增大、减小而减小。

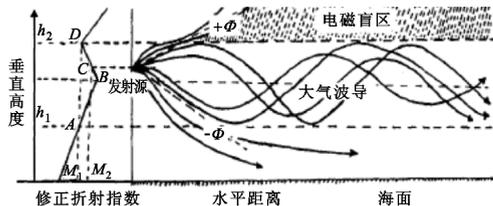


图 4 电磁波在大气波导中传播

Fig. 4 Electromagnetic wave propagation in the atmosphere ducting

根据图 4, 在陷获层 BD 范围内, 大气修正折射指数随高度的增加而递减, 因此, 当发射源在波导层内以一定仰角向上发射电磁波时, 电磁波仰角随传播距离的增加是不断减小的, 若选择合适的初始仰

角, 可使电磁波传播到陷获顶所在高度时, 其仰角恰好等于零, 此时的初始仰角 Φ_0 即为临界入射角, 记作 Φ_c , 可得

$$\Phi_c = \pm \sqrt{2(\Delta M)} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, ΔM 称为波导强度, $\Delta M = M_0 - M_{\min}$ 。根据分层介质中的电波全反射理论可知, 电磁波在到达陷获层顶时发生全反射, 向下传播。此时, 大气修正折射指数随高度的降低而增大, 电磁波的仰角同时随高度的降低而增大, 当电磁波穿过陷获层向下传播过程中, 大气修正折射指数又随高度的降低而减小, 从而使得电磁波仰角随高度的降低而减小, 当电磁波传播到 A 点高度处时, 即电磁波传播到与波导顶相同大气修正折射指数的高度处时, 电磁波仰角又恰好为零, 发生全反射, 开始向上传播, 如此反复, 电磁波会被限制在 AD 波导层之间向前传播。

当电磁波的初始仰角大于临界入射角 Φ_c 时, 电磁波传播到波导顶高度时, 电磁波仰角仍大于零, 此时不会发生全反射, 电磁波将穿透波导层向上传播; 而电磁波的初始仰角小于临界入射角 Φ_c 时, 电磁波在未到达波导顶高度时仰角已经为零, 发生全反射开始向下传播。因此, 只有天线初始发射仰角小于或等于临界入射角 Φ_c 时, 电磁波才会被限制在波导层内形成超视距传播。电磁波初始向下传播为初始俯角时原理相同, 本文不再论述。

在其他条件不变的情况下, 临界入射角随波导强度变化曲线仿真结果如图 5 所示, 选取波导强度从 0 逐渐增大到 200。可以看出: 临界入射角一般较小, 约 1° 左右, 因此, 只有与波导边界夹角较小的电磁波才能形成波导传播; 在满足波导传播的条件下, 电磁波临界入射角随波导强度增加而变大; 临界入射角越大, 大气波导所能波获得电磁波范围越大。

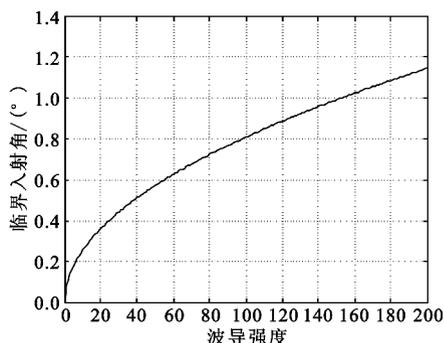


图 5 临界入射角随波导强度变化曲线

Fig. 5 The critical angle of incidence curve with intensity of ducting

3.2 最低陷获频率 f_{\min}

根据对分层介质中的平面波研究表明,上下边界均在垂直分层不均匀介质内的波导,例如悬空波导,其传输模式满足

$$\int_{z_b}^{z_t} n(z) \sin \Phi dz = \frac{2l+1}{4} \lambda_0 \quad (3)$$

上边界位于垂直分层水平均匀的介质中,下边界是理想导体的波导,例如表面波导和蒸发波导,其传播模式满足

$$\int_{z_b}^{z_t} n(z) \sin \Phi dz = \frac{4l+3}{4} \lambda_0 \quad (4)$$

其中, Z_b 、 Z_t 为波导上、下边界所在高度, $n(z)$ 为垂直分层介质中的大气折射率, Φ 为电磁波仰角, l 是正整数, l 取不同的值对应不同的波导传输模式, λ_0 是电磁波的波长。实际大气环境中的大气波导,大气折射率 $n(z)$ 用大气修正折射率 $m(z)$ 代替。

悬空波导传播模式为

$$\int_{z_b}^{z_t} m(z) \sin \Phi dz = \frac{2l+1}{4} \lambda_0 \quad (5)$$

所以

$$\lambda_0 = \frac{4}{2l+1} \int_{z_b}^{z_t} m(z) \sin \Phi dz \quad (6)$$

其中:

$$m(z) \sin \Phi = \sqrt{m^2(z) - m^2(z) \cos^2 \Phi} = \sqrt{[m(z) - m(z) \cos \Phi][m(z) + m(z) \cos \Phi]} \quad (7)$$

根据分层介质中折射定律有

$$m(z) \cos \Phi = m(z_t) \quad (8)$$

因为 $m(z) \approx 1$, 所以

$$m(z) \sin \Phi = \sqrt{2} \sqrt{m(z) - m(z_t)} \quad (9)$$

大气修正折射指数 $M(z) = [m(z) - 1] 10^6$, 代入式(9)得

$$m(z) \sin \Phi = \sqrt{2} \times 10^{-3} \sqrt{M(z) - M(z_t)} \quad (10)$$

代入(6)可得

$$\lambda_0 = \frac{4\sqrt{2} \times 10^{-3}}{2l+1} \int_{z_b}^{z_t} \sqrt{M(z) - M(z_t)} dz \quad (11)$$

当 l 取零时, 波长 λ_0 取最大值, 即对应的频率为最低陷获频率 f_{\min} :

$$f_{\min} = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{\sqrt{2} c \times 10^3}{8} \left(\int_{z_b}^{z_t} \sqrt{M(z) - M(z_t)} dz \right)^{-1} \quad (12)$$

取大气修正折射指数如图 2 所示, c 取真空中光速, $c = 2.997\ 956 \times 10^8$ m/s, 悬空波导厚度单位取 m, 最低陷获频率 f_{\min} 单位取 GHz, 可得最低陷获频率如下:

$$f_{\min} \approx 79.4945 (\sqrt{M_{\max} - M_{\min}} d)^{-1} \quad (13)$$

可见悬空波导的最低陷获频率由 M_{\max} 与 M_{\min} 之差及波导厚度 d 决定。

表面波导及蒸发波导传播模式为

$$\int_0^{z_t} m(z) \sin \Phi dz = \frac{4l+3}{4} \lambda_0 \quad (14)$$

按照上述方法计算得到的波导最低陷获频率 f_{\min} 为

$$f_{\min} = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{3\sqrt{2} c \times 10^3}{16} \left(\int_{z_b}^{z_t} \sqrt{M(z) - M(z_t)} dz \right)^{-1} \quad (15)$$

取大气修正折射指数如图 1 所示的表面波导, 大气修正折射指数如图 3 所示的蒸发波导, c 取真空中光速, $c = 2.997\ 956 \times 10^8$ m/s, 波导厚度单位取 m, 最低陷获频率 f_{\min} 单位取 GHz 时, 可得表面波导最低陷获频率 f_{\min} 如下:

$$f_{\min} \approx 119.2417 (\sqrt{M_0 - M_{\min}} d)^{-1} \quad (16)$$

蒸发波导最低陷获频率 f_{\min} 如下:

$$f_{\min} = \frac{c}{\lambda_{\max}} = 79.4945 \left(\int_{z_0}^d \sqrt{M(z) - M(d)} dz \right)^{-1} \quad (17)$$

其中, Z_0 为海面粗糙度高度, d 为蒸发波导高度, 因为蒸发波导大气修正折射指数随垂直高度并非简单的线性变化, 所以蒸发波导大气修正折射指数轮廓线描述相对复杂。目前, 关于蒸发波导预测的方法很多, 包括 P-J 模式、MGB 模式和 Flux 模式等, 不同模式分别适用于不同的条件, 各自优点不尽相同, 根据蒸发波导预测模型, 确定大气修正折射指数轮廓线后, 再利用式(17)即可确定蒸发波导的最低陷获频率。

在其他条件不变的情况下, 图 6 为取不同大气修正折射指数梯度下蒸发波导最低陷获频率随波导高度变化的仿真结果曲线, 为方便计算, 选取大气修正折射指数垂直梯度为常数, 不同大气修正折射指数垂直梯度已在图中标注, 实际大气波导环境下尤其是蒸发波导大气修正折射指数随距离变化为曲线, 与实际结果略有差异, 但频率随波导高度变化趋

势相同。可以看出,受蒸发波导影响的主要是微波频段的通信;同一大气修正折射指数梯度下,波导高度越高所能陷获的电磁波最低频率越低;在相同波导高度下,大气修正折射指数梯度越大,所能陷获的电磁波最低频率越低。

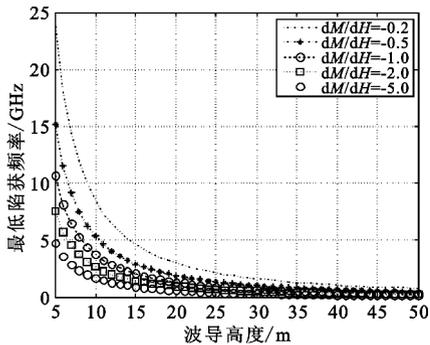


图6 最低陷获频率随波导高度变化曲线

Fig. 6 Curves of minimum trapping frequency varying with height of ducting

4 大气波导在海上通信中的应用

进入21世纪,海上通信建设得到了迅速的发展^[3]。本文通过对大气波导超视距通信条件和参数的研究,确定电磁波在大气波导中实现超视距通信的临界入射角 Φ_c 及最低陷获频率 f_{\min} ,对海上通信系统意义重大。

4.1 大气波导可实现海上远距离通信

研究表明:受蒸发波导影响的电磁波一般是频率高于3 GHz的微波,受表面波导影响的电磁波一般是频率高于100 MHz的超短波^[4]。大气波导将电磁波陷获在波导层内实现超视距传播,没有中继设备的情况下,微波频段的通信仅能实现视距通信,在大气波导条件下根据电磁波在大气波导中的传播条件,调整发射天线高度,选择超短波/微波的发射频率 f_0 及仰角 Φ_0 ,且同时满足 $f_0 \geq f_{\min}$ 、 $\Phi_0 \leq \Phi_c$,可实现电磁波的超视距传播,达到超视距通信的目的,使通信距离倍增。大气波导超视距通信可应用于舰舰通信、舰岸通信以及舰艇编队内部通信,扩大舰艇间的有效通信距离,提高远距离通信可靠度;也可应用于反潜飞机,在不存在大气波导的条件下,反潜机在反潜探测的同时,为保持与母舰有效通信,探测范围有限,当海面存在大气波导时,可使反潜机在视距之外作战的同时仍能与控制舰保持通信联系。

4.2 大气波导可应用于通信对抗

海上通信信号具有密集度高、复杂性强的特点^[5],尤其在大气波导环境下,电磁波的超视距传播在增大有效通信距离的同时也增大暴露目标的概率,尤其在舰艇选择隐蔽行动时,如果海面存在大气波导,选取的通信参数可实现超视距通信,则无法达到隐蔽目的。因此,在海上静默反侦察时,若遇到大气波导现象,应按照大气波导超视距传输的条件要求,选取不能超视距通信的参数,如改变天线高度、采用小于最低陷获频率 f_{\min} 发射频率或大于临界仰角 Φ_c 的入射角的电磁波等措施。反之,当敌方利用大气波导超视距通信时,也为我方侦查抓捕目标提供了一种参考手段。

4.3 大气波导超视距传输存在电磁盲区

如图4,大气波导由于受陷获作用的影响,在波导顶端形成波导顶盲区,在电磁波传输过程中波导底层一定间隔内电磁波无法到达形成跳跃盲区^[6],电磁盲区使得通信范围无法覆盖到整个区域,处于盲区内的目标无法接收信息完成有效通信。因此,利用大气波导超视距通信时,应尽量减小电磁盲区的影响,天线顶端处于顶端盲区的目标,可适当调整天线位置避开电磁盲区的干扰;通过改变电磁波发射参数,例如在超视距通信范围内改变发射频率,使跳跃盲区覆盖区域改变,跳过目标所在位置;或在允许范围内移动目标位置来降低跳跃盲区的影响,达到最佳效果。同样,大气波导电磁盲区也是我方攻击的薄弱环节,是对敌方海上通信进行干扰的突破口。

5 结论

海上远距离通信一直是通信领域的重点难点问题,本文针对海上远距离通信的特点和存在的困难,研究了大气波导环境下电磁波超视距传输的条件及存在不足,分析了电磁波在大气波导环境中实现超视距通信参数要求,根据波导类型,讨论了不同波导在电磁波不同传输模式下超视距通信参数选择,对电磁波在大气波导环境中发射仰角和发射频率进行了详尽描述和仿真验证。研究表明,满足一定条件的电磁波可形成波导传播,传播距离增大,对通信系统产生显著影响,根据这种影响结合海战场环境特性,本文从三个方面提出大气波导在海上超视距通信中的应用分析,根据不同态势需求,选取不同的通信

系统发射参数,对海上远距离通信提供参考依据、通信指挥员提供辅助决策等具有重要的指导意义。本文是以较为理想的实际环境为基础进行研究的,理论依据较强,进一步完善还需大量的海上实验,将海上实际环境因素考虑其中并不断修正来达到最佳效果。

参考文献:

- [1] 赵小龙. 电磁波在大气波导环境中的特性及其应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2008:13-14.
ZHAO Xiao-long. Research on Propagation Characteristic of Electromagnetic Wave and its Application in Atmospheric Duct[D]. Xi'an: Xidian University, 2008: 13-14. (in Chinese)
- [2] 戴福山,李群,董双林,等. 大气波导及其军事应用[M]. 北京:解放军出版社,2002:115-124.
DAI Fu-shan, LI Qun, DONG Shuang-lin, et al. Ducting and Its Military Applications[M]. Beijing:PLA Publishing House,2002:115-124. (in Chinese)
- [3] 吕振肃,刘忠学,王连胜,等. 现代通信与信息技术在海上通信中的应用展望[J]. 电讯技术, 2011, 51(4): 126-130.
LV Zhen-su, LIU Zhong-xue, WANG Lian-sheng, et al. Application Prospect of Modern Communication and Information Technology in Maritime Communications[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(4): 126-130. (in Chinese)
- [4] 张瑜,吴少华. 大气波导传播类型及特性分析[J]. 电波科学学报,2009,24(1):185-190.
ZHANG Yu, WU Shao-hua. Analysis of types and characteristics of atmospheric duct Propagation[J]. Chinese Journal of Radio Science,2009,24(1):185-190. (in Chinese)
- [5] 黄慰,刘震. 舰载通信信号侦察接收系统[J]. 电讯技术,2011,51(3):4-8.

HUANG Wei, LIU Zhen. Ship-borne Communication Signals Reconnaissance Receiver System[J]. Telecommunication Engineering,2011,51(3):4-8. (in Chinese)

- [6] 王华. 大气波导对舰载超短波地波影响的研究[J]. 舰船科学技术,2004,26(1):39-41.

WANG Hua. the effect of duct condition on shipborne ultrashort wave communication[J]. Ship Science and Technology,2004,26(1):39-41. (in Chinese)

作者简介:



周朋(1989—),男,吉林四平人,2012年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为通信系统;

ZHOU Peng was born in Siping, Jilin Province, in 1989. He received the B. S. degree in 2012. He is now a graduate student. His research concerns communication systems.

Email:zhoupeng051111@126.com

张海勇(1966—),男,辽宁朝阳人,博士,教授、博士生导师,主要研究方向为通信与信息系统;

ZHANG Hai-yong was born in Chaoyang, Liaoning Province, in 1966. He is now a professor with the Ph. D. degree and also the Ph. D. supervisor. His research direction is communication and information system.

贺寅(1986—),男,甘肃庄浪人,主要研究方向为通信系统;

HE Yin was born in Zhuanglang, Gansu Province, in 1986. His research direction is communication systems.

王睿(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要研究方向为通信指挥。

WANG Rui was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1982. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns communication command.