

# 海上 VHF/UHF 频段信道环境 及其空时频率选择性

王 峰<sup>1</sup>, 吴 畏<sup>1</sup>, 彭 茜<sup>1</sup>, 赵二虎<sup>2</sup>, 何晓新<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军 91655 部队, 北京 100036; 2. 中国科学院计算技术研究所专项技术研究中心, 北京 100190;  
3. 中国科学院软件研究所天基综合信息系统技术重点实验室, 北京 100190)

**摘 要:** 已有的针对海上 VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) 频段信道环境的研究, 在电波传播特性和底噪特性方面缺少试验数据支撑. 本文在 VHF/UHF 频段上做了一系列海上通信试验, 基于试验数据, 分析了传统电波传播模型对海上视距、超视距、视距超视距临界等传播路径的适用性. 同时本文提出了空时二维海上频率选择性信道分析方法, 从空间、时间二维视角下定量描述了海上无线信道演变现象, 对空时频率迁移和空时频率衰变的概念做了定义. 结论可用于海上电波传播建模和异常现象分析.

**关键词:** 海上电波传播; VHF/UHF; 无线信道; 空时频率选择性; 蒸发波导

**中图分类号:** TP92; O451 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)06-1523-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.035

## Maritime Wireless Channel Environment at VHF/UHF Bands and Its Space-Time Frequency Selectivity

WANG Feng<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, PENG Qian<sup>1</sup>, ZHAO Er-hu<sup>2</sup>, HE Xiao-xin<sup>3</sup>

(1. The Unit 91655 of PLA, Beijing 100036, China;  
2. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The existing studies on maritime wireless channel environment at VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) Bands lack experimental data in aspects of radio propagation and background noise. Therefore, we carried out a series of maritime wireless communication experiments to estimate adaptivity of the existing radio propagation models to within-the-horizon path, transhorizon path and just critical path. Moreover, we presented a method to analyse the maritime frequency-selective channel quantificationally from space-time perspective, and defined concepts of space-time frequency migration and declination. The results can be applied to maritime radio propagation modelling and abnormal phenomena analysing.

**Key words:** maritime radio propagation; VHF and UHF; wireless channel; space-time frequency selectivity; evaporation duct

### 1 引言

舰船通信已由近海延伸到远海, 为提高海上无线通信能力, 掌握制信息权, 需对海上无线信道环境做试验性研究, 以获取海上无线信道环境特征. 目前海上无线信道环境的研究多针对特定的窄带工作频段, 在传统理论模型的基础上辅之以参数化修正. 如文献[1, 2]

根据两次中国东海海面覆盖测试的数据, 分析并拟合出了一种海面传播模型 HPMoS (Huawei Propagation Model over Sea), 该模型主要针对 GSM 900MHz 频段的海上传播进行修正, 取得较好的误差效果. 文献[3]针对 GSM 1800MHz 频段, 在中国福建漳州海域进行了海面信号衰落测试, 并对比分析了自由空间模型、Two-Ray 模型的预测精度. 文献[4]在文献[3]的实测数据基础

上,对比分析了 Longley-Rice 模型、Okumura-Hata 模型的理论预测结果与实测数据的误差.文献[5,6]均针对某海域 156MHz 单频点的引航实测数据做了分析,不同之处在于文献[5]验证了 Longley-Rice 模型比 Okumura-Hata 模型更加适合描述海上无线传播,而文献[6]重点验证了 ITU-R P. 1546-3 模型在描述海上无线传播方面的准确性,但两者的数据样本都非常有限,频点单一,不足以支撑分析结论.文献[7]针对地波 100kHz 频段开展了海上试验,根据实测数据验证了 Millington 算法在海上地波场强预测上的准确性.文献[8]针对 AIS 所在的 VHF 频段做了海上试验,验证了 Longley-Rice 模型在局部海域的适用性,并对该模型做了分段式修正,但无实测数据对修正模型加以验证.文献[9]针对 3GHz/5GHz/10GHz 频段的海上无线传播,对 Two-Ray 模型和 PE 模型(Parabolic Equation model)进行了对比分析,验证了 PE 模型在蒸发波导情况下的传播损耗计算准确度优势.文献[10]在文献[9]的基础上进一步对 PE 模型中的海面粗糙度影响性做了分析,对比了 Miller-Brown 模型反射系数和包含阴影效应的反射系数两者在计算 PE 传播损耗时的差别,但未给出试验性结论.文献[11]针对 2GHz 信号开展了海上通信测试,并对比分析了 Okumura-Hata 模型、COST 231-Hata 模型和 ITU-R P. 1546-2 模型,通过与实测值比较,验证了 ITU-R 模型的预测准确率达到 50%.文献[12]针对海面自主无人航行器的 2.5GHz 海上通信频率,采用 APM 模型计算其链路损耗,同时采用 Nakagami-m 模型来描述信道衰落特征,展示了蒸发波导对宽带频率分集的影响.可以看出,针对海上 VHF/UHF 频段信道环境研究,目前尚缺乏海上试验数据支撑.

本文针对 VHF/UHF 频段海上电波传播做了一系列海上试验,通过对试验数据的分析和与现有海上电波传播理论的仿真对比,总结了不同场景下适用的传播模型.继而本文将实测数据与理论结果之间的误差做精细化放大分析,从空间、时间二维视角下发现了海上无线信道演变现象,基于此提出了空时二维海上频率选择性信道分析方法,可对海上电波传播异常现象做定量分析.

## 2 海上试验

海上 VHF/UHF 频段电波传播试验,包括视距、超视距、视距超视距临界等三种电波传播场景.试验采用超短波电台,工作频段涵盖 VHF/UHF,具有无线通信、信道质量感知、频谱检测等功能.接收机频率平坦性误差小于  $\pm 0.5$  dB,射频通道具有 AGC(Automatic Gain Control,自动增益控制)特性,最大补偿约 90dB,计算出的接收信号强度误差小于  $\pm 1$  dB.发射机功率稳定性误

差小于  $\pm 0.5$  dB,频率平坦性误差小于  $\pm 0.5$  dB.天线为全向垂直极化,增益 0dBi,频率平坦性误差低于  $\pm 0.5$  dB.上述指标特性误差在分析海上大尺度信道衰落过程中可以忽略其影响.针对某条测试链路,在两端分别部署一部电台,其中一台用于发送无线信号,另一台用于检测信号强度.为保障测试数据的准确性,分别选择不同的发射功率、不同的发射频率、不同的发送时间进行多次重复测量并取平均值进行记录.

## 3 数据分析

论文采用传统电波传播模型进行预测,并与实测数据进行对比.传统海上电波传播模型主要包括自由空间模型、Two-Ray 模型、HPMoS 模型、Okumura-Hata 模型、Longley-Rice 模型、ITU P1546-3 模型和 PE 模型.

### 3.1 损耗计算方法

自由空间模型<sup>[13]</sup>是电波在理想空间的传输损耗,如下所示.

$$L(\text{dB}) = 32.44 + 20\log d + 20\log f \quad (1)$$

其中, $d$ 是链路距离,单位 km; $f$ 是发射频率,单位 MHz.

Two-Ray 模型<sup>[3,13]</sup>考虑了强反射路径和直射径同时存在情况下的损耗,如下所示.

$$L(\text{dB}) = 120 + 40\log d - 20\log h_t - 20\log h_r \quad (2)$$

其中, $d$ 是链路距离,单位 km; $h_t$ 是发射天线高度, $h_r$ 是接收天线高度,单位 m.

HPMoS 模型将传播路径按照收发双方的视距范围划分为三段,如下所示.

$$L(\text{dB}) = \begin{cases} 32.44 + 20\log f + 10\gamma\log d, & d \leq d_1 \\ 32.44 + 20\log f + 10\gamma\log d + 6(d - d_1)/d_2, & d_1 \leq d \leq d_1 + d_2 \\ 32.44 + 20\log f + 10\gamma\log d - 20\log[0.5e^{(0.45 - 0.62)v}], & d_1 + d_2 \leq d \end{cases} \quad (3)$$

其中, $f$ 是发射频率,单位 MHz; $\gamma$ 为路径损耗斜率,一般取值范围为 2.6 ~ 3.4; $d$ 为测试点与基站之间距离; $d_1$ 是从基站到基站可视点距离,单位 km; $d_2$ 是从基站可视距离点到基站和终端合并可视距离点的距离,单位 km; $v$ 为绕射损耗修正项,计算方法参见文献[2].

Okumura-Hata 模型<sup>[4,14]</sup>在 Okumura 数据<sup>[15]</sup>基础上获取了不同地形下的损耗经验公式,其中适用于海面开阔区域的损耗计算如下所示.

$$L(\text{dB}) = 69.55 + 26.16\log f - 13.82\log h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55\log h_r)(\log d)^\gamma + K \quad (4)$$

式中, $d$ 为链路距离,单位 km; $f$ 为发射频率,单位 MHz; $h_t, h_r$ 为发天线、收天线有效高度,单位 m; $K$ 为地形修正因子, $a(h_r)$ 为接收天线高度修正因子, $\gamma$ 为距离修正因子.

Longley-Rice 模型的损耗由自由空间损耗和媒介传输参考损耗组成,具体可分为视距损耗、绕射损耗、散射损耗等情况,如下所示.

$$L(\text{dB}) = L_{\text{free}} + L_{\text{ref}} \quad (5)$$

其中,  $L_{\text{free}}$  为自由空间损耗,由等式(1)来计算;  $L_{\text{ref}}$  为媒介传输参考损耗,计算方法参见文献[8,16].

ITU P1546-3 模型<sup>[6,16]</sup> 提供了 100MHz 和 600MHz 在海面路径 50% 时间及 50% 位置概率的传播曲线,先利用等式(6)~(8)对距离  $d$ 、频率  $f$  和发射天线高度  $h_t$  进行内插计算,得出特定条件下的场强值,如下.

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \log(d/d_{\text{inf}}) / \log(d_{\text{sup}}/d_{\text{inf}}) \text{dB} (\mu\text{V}/\text{m}) \quad (6)$$

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \log(f/f_{\text{inf}}) / \log(f_{\text{sup}}/f_{\text{inf}}) \text{dB} (\mu\text{V}/\text{m}) \quad (7)$$

$$E = E_{\text{inf}} + (E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}) \log(h_t/h_{\text{inf}}) / \log(h_{\text{sup}}/h_{\text{inf}}) \text{dB} (\mu\text{V}/\text{m}) \quad (8)$$

其中,  $d, f, h_t$  依次为通信距离、频率、发射天线高度;  $d_{\text{inf}}, f_{\text{inf}}, h_{\text{inf}}$  依次为曲线中小于  $d$ 、小于  $f$ 、小于  $h_t$  的最接近距离;  $d_{\text{sup}}, f_{\text{sup}}, h_{\text{sup}}$  依次为曲线中大于  $d$ 、大于  $f$ 、大于  $h_t$  的最接近距离;  $E_{\text{inf}}$  依次为  $d_{\text{inf}}, f_{\text{inf}}, h_{\text{inf}}$  处的场强值;  $E_{\text{sup}}$  依次为  $d_{\text{sup}}, f_{\text{sup}}, h_{\text{sup}}$  处的场强值. 在此基础上,根据等式(9)计算出相应的传播损耗  $L$ ,如下.

$$L(\text{dB}) = 139.3 - E + 20 \log f \quad (9)$$

其中,  $E$  为 1kW 发射功率下的接收点场强,单位 dB ( $\mu\text{V}/\text{m}$ );  $f$  为通信频率,单位 MHz.

PE 模型的损耗计算由自由空间的传播损耗和蒸发波导环境中的电波衰减因子组成,如下所示.

$$L(\text{dB}) = L_{\text{free}} + L_{\text{media}} \quad (10)$$

其中,  $L_{\text{free}}$  为自由空间损耗,由等式(1)来计算;  $L_{\text{media}}$  为媒介传播损耗,计算方法参见文献[17~19].

### 3.2 海面粗糙度对损耗计算的影响

海浪和海杂波是影响海上无线信道的不可忽视的因素,且在不同海况特征下,对各个频段的影响性也有所不同. 海浪和海杂波对电波传播造成的影响主要来源于海面粗糙度的变化. 论文中参与比对的 PE 模型考虑了海面粗糙度,并将海面粗糙度特征作为损耗计算的关键输入参量.

PE 模型在计算过程中,将海面特征作为一个重要的边界条件加以描述,不同的海面特征意味着不同的边界条件,也就意味着不同的传播损耗预测结果. 对于粗糙海面的电波传播问题,理想的表面传导条件是不适用的,需要定义一个阻抗边界条件,如下所示.

$$\left. \frac{\partial u(x, z)}{\partial z} \right|_{z=0} + \alpha u(x, z) \Big|_{z=0} = 0 \quad (11)$$

式中,  $\alpha$  为表面阻抗系数,计算方法参见文献[10,11].

Two-Ray 模型同时考虑了直射波和反射波的影响,

如图 1 所示<sup>[20~23]</sup>. 该模型同样也将海面粗糙度作为主要的损耗计算因子. 从 A 处发射的信号,通过直射径与反射径到达 B 处的相位差  $\varphi$  可表示如下.

$$\varphi = 2\pi \frac{d_D - d_1 - d_2}{\lambda} \quad (12)$$

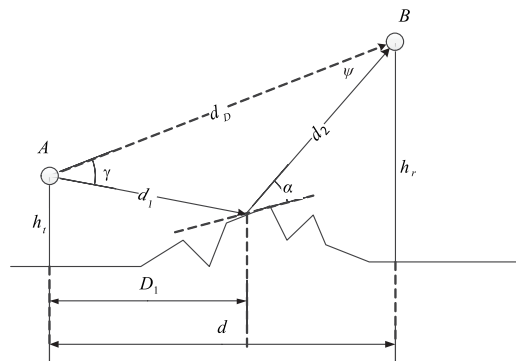


图1 海上Two-Ray电波传播模型

在自由空间传播模型的基础上,引入相位差和海面反射系数进行修正,可得 Two-Ray 模型的衰减计算方法,如下所示.

$$L(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left( 4\pi \frac{d}{\lambda} |1 + \Gamma \cdot e^{j\varphi}|^{-1} \right) \quad (13)$$

式中,  $\Gamma$  为非涅耳反射系数,试验所用垂直极化天线的反射系数用  $\Gamma_v$  表示,计算方法参见文献[20].

### 3.3 海上传播损耗特征

本节针对不同的海上传播距离对比分析已有传播模型与实测值的差距. 从图 2(a) 可以看出, 7km 视距路径下, HPMoS 模型的预测值与实测值最为接近, 但不同频率上的预测值均低于实测值, 仍存在 3~20dB 的误差范围. 从图 2(b)、图 2(c) 可以看出, 在 48km、53km 等超视距条件下, 多种传播方式并存, 含有绕射、散射等衰减分量, Longley-Rice 模型的预测值与实测值较为接近, 误差在 5dB 以内, 其余模型则相差较大, 超过 30dB. 从图 2(d) 可以看出, 在 70km 超视距路径下, 此时实际损耗介于 Longley-Rice 与 Two-Ray 预测值之间. 其中, 在 200MHz~350MHz 频段内, 与 Two-Ray 模型较为接近; 在 350MHz~500MHz 频段内, 与 Longley-Rice 模型较为接近. 二者误差均在  $10 \pm 2\text{dB}$ , 其余模型则相差较大.

### 3.4 不同距离的损耗特征

为直观获取海上不同距离下的传播变化特征, 论文将依次分析 VHF、UHF 频段在不同距离下的损耗情况. 图 3(a) 展示了 VHF 频段 30~88MHz 信号在三条不同距离路径下的损耗, 图 3(b) 展示了 UHF 频段 225~512MHz 信号在三条不同路径下的损耗. 可以看出: 随着海上通信距离的增加, 不同频率的损耗都将逐渐增大; 在  $d=7\text{km}$  视距路径下, 随着频率的增加, 衰减也有

上涨趋势,但并不明显;在超视距路径下(如  $d = 48\text{km}$ 、 $d = 70\text{km}$ ),随着频率的增加,衰减幅度增大的趋势明显,

可见散射衰减已占主要成分.

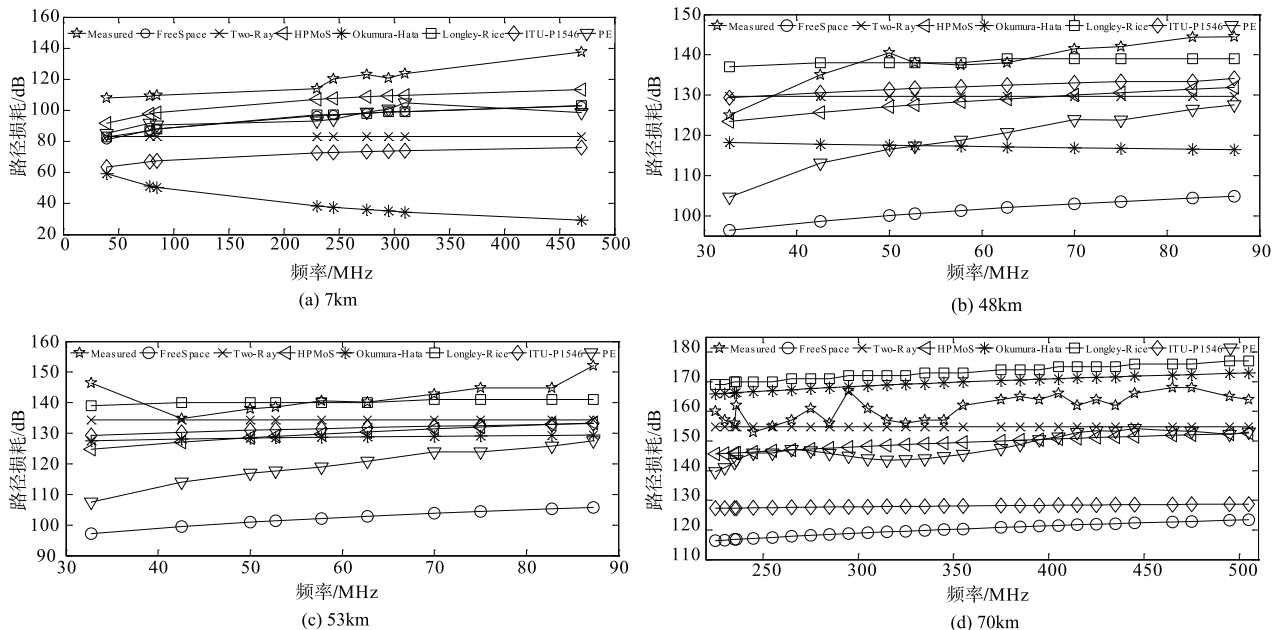


图2 海上电波传播损耗预测值与实测值对比

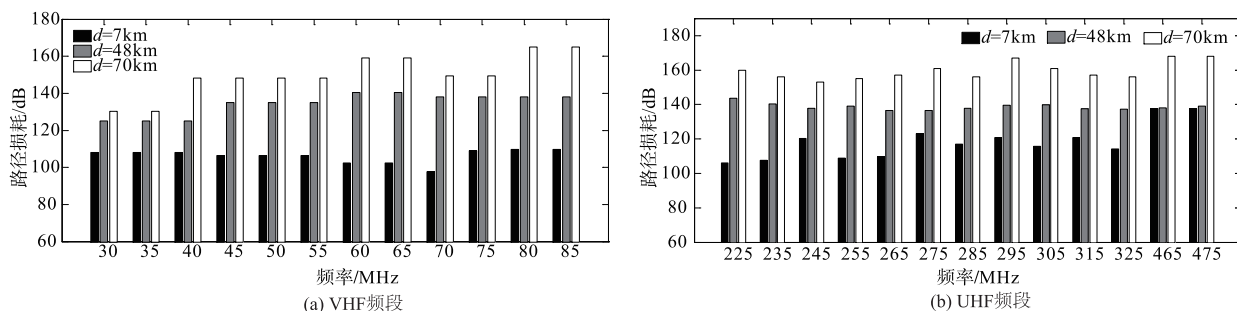


图3 海上电波传播衰减随距离变化趋势

### 3.5 海上底噪分析

除链路损耗外,海上底噪特征也是影响无线通信质量的关键性因素,直接体现为接收信号 SNR 的变化.图 4 对比了海上底噪特征和内陆底噪特征.图 5 列出了海上接收信号场强和接收信号 SNR 的对比关系.

从图 4 可以看出,海上 VHF 频段的底噪较低,约处于  $-80 \sim -110\text{dBm}$  之间,平均值约为  $-100\text{dBm}$ ,而且存在明显的底噪尖峰;内陆 VHF 频段的底噪很高,约处于  $-60 \sim -90\text{dBm}$  区间内,平均值约为  $-80\text{dBm}$ .从图 5 可以看出,VHF 频段的频率选择性较弱,接收信号的 SNR 受底噪影响较大,尤其在底噪尖峰处的 SNR 明显变小.可以得出结论:海上电磁环境较内陆电磁环境良好.在非对抗情况下,海上超短波通信在可靠的通信范围内基本不存在选频困难的问题;在对抗情况下,海上良好的电磁环境更加易于暴露所使用的频谱情况,容

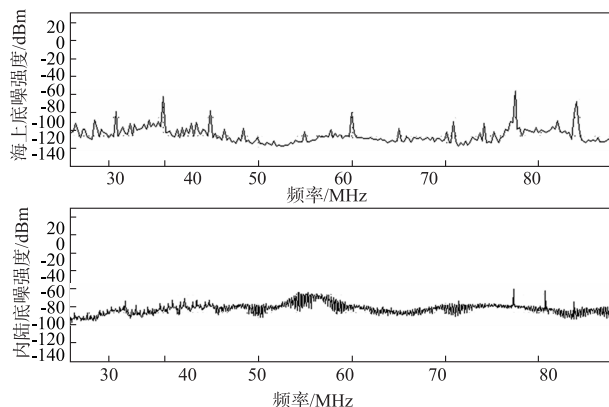


图4 海上与内陆底噪对比

易被施加干扰,因此海上超短波通信应将研究重点放在高速抗干扰波形设计上.

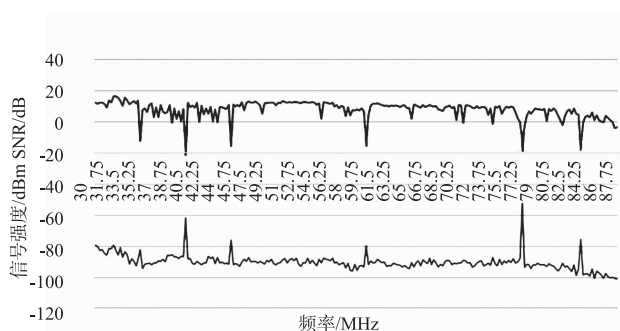


图5 海上链路接收信号SNR与信号强度对比

#### 4 空时频率选择性

为获取不同时段的海上电波传播特征以及验证蒸发波导在试验海域的存在性,选择了 40km 路径作为持续观测对象.图 6 给出了不同时段 UHF 链路实测衰减,图 7 将不同时段实测平均衰减与传统模型预测值做了对比.

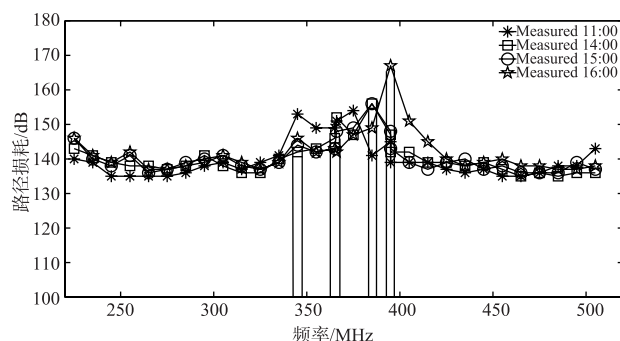


图6 不同时段的路径损耗变化

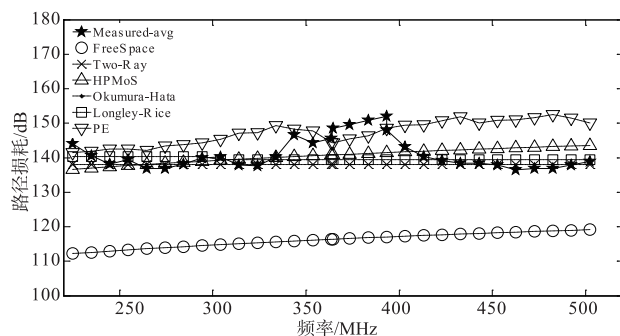


图7 实测值与预测值对比

从图 7 可以看出,频段 225 ~ 350MHz 和 430 ~ 512MHz 的衰减较为平坦,频段 350 ~ 430MHz 的衰减有明显起伏,可以理解为海上无线信道在特定时间内对 UHF 中的某一特定窄带频段具有频率选择性,表现为链路衰减的显著增大.从图 6 的实测数据可以看出,UHF 频段 225 ~ 350MHz 和 430 ~ 512MHz 在一天内的变化不明显,频段 350 ~ 430MHz 在一天内不同时刻的变化较大,最大起伏达到 20dB,从 11:00 的峰值衰减

149dB@355MHz,到 16:00 的峰值衰减增长为 167dB@395MHz,可见海上无线信道的频率选择性具有时移特性.下面给出海上空时频率选择性的定性描述.

**定义 1** 海上空时频率选择性:海上无线信道对特定窄带频段所施加的异常链路衰减现象,表现为该频段的链路衰减峰值随时间的递增变化,以及衰减峰值频点随时间的同步迁移.

**定义 2** 假设  $t_1$  时刻的峰值衰减频率为  $f_1$ ,  $t_2$  时刻的峰值衰减频率为  $f_2$ ,则空时频率迁移速率  $v_{fs}$  可定义为等式(14).

$$v_{fs} = \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{|f_2 - f_1|}{t_2 - t_1}, t_2 \geq t_1 \quad (14)$$

**定义 3** 假设  $t_1$  时刻  $f_1$  的峰值衰减为  $L_1$ ,  $t_2$  时刻  $f_2$  的峰值衰减为  $L_2$ ,则空时频率衰减变化率  $v_{fs}$  可定义为等式(15).

$$v_{fs} = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{|L_2 - L_1|}{f_2 - f_1}, f_2 \geq f_1 \quad (15)$$

根据等式(14)、(15)可以计算出 40km 路径空时频率迁移速率为  $v_{fs} = \frac{395 - 355}{16 - 11} = 10\text{MHz/h}$ ,空时频率

衰减变化率为  $v_{fs} = \frac{167 - 149}{395 - 355} = 0.45\text{dB/MHz}$ .

从图 7 的整体趋势上可以看出,实测的链路衰减与 Two-Ray 模型的预测值更为接近,多数频点误差小于 5dB,个别异常频点误差小于 10dB.根据试验点发端和收端的天线高度,可以计算出海上视距距离  $d_{los}^{[8]}$ .

$$d_{los} = 4.12(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) = 4.12 \times (\sqrt{60} + \sqrt{3}) \approx 39.05\text{km} \quad (16)$$

其中,  $h_t$  为发端天线高度,  $h_r$  为收端天线高度.两点直线距离为 40km,与 39.05km 接近,因此两点间为视距与超视距临界路径.又由于两点间的菲涅耳区距离  $d_{FZ}^{[13,24]}$  为等式(17),远小于两点的直线距离 40km,因此即使将该条路径作为视距路径的话,应该采用 Two-Ray 模型对其进行描述,两者结论吻合.同时也印证了图 2(c)、图 2(d)视距超视距临界路径更加适合 Longley-Rice 模型的结论.

$$d_{FZ} \approx \frac{h_t \cdot h_r \cdot f}{24000} = \frac{60 \times 3 \times f}{24000} \in [1.68, 3.84]\text{km} \quad (17)$$

#### 5 蒸发波导判定

蒸发波导一般对大于 3GHz 的频率产生影响<sup>[9]</sup>,至于试验所用 UHF 频段是否存在蒸发波导现象,我们可以从两方面加以分析.从定性角度来看,图 3(b)列出了不同距离下 UHF 频段电波传播衰减,从视距 7km 到超视距 70km.如果存在超视距蒸发波导现象,则期望图 3(b)从某一频点之后能够出现明显的下降拐点,然而

图3(b)并未出现,因此直观上反映出无蒸发波导存在;从定量角度来看,图7列出了40km超视距路径下的实测值和PE预测值,可以看出,除若干异常频点外,实测损耗均低于PE损耗,这与蒸发波导可以降低链路损耗的事实是违背的.可以判定,在此次特定的试验环境下未发现UHF频段蒸发波导传输现象.

## 6 结论

本文在VHF/UHF频段上做了一系列海上通信试验,通过将试验数据与已有海上电波传播模型比对,总结了已有电波传播模型在海上的适用性:HPMoS模型较适合描述视距路径的传播损耗;Two-Ray模型较适合描述视距超视距临界路径的传播损耗;Longley-Rice模型较适合描述超视距路径的传播损耗.同时,从空间、时间二维视角下发现了海上无线信道演变现象,即海上空时频率选择性.论文给出其定义,并做了定量分析.最后通过将PE预测值与实测值比对,从定性和定量两个角度排除了蒸发波导存在的可能性.上述结论可用于海上电波传播的异常现象分析.

**致谢** 感谢中国科学院计算技术研究所专项技术研究中心徐勇军博士对论文的帮助.

## 参考文献

- [1] 何群,黄云鹏.关于海面无线传播模型的探讨[J].邮电设计技术,2004,(2):36-39.  
HE Qun,HUANG Yun-peng. Discussion on radio propagation model over sea level[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2004, (2): 36-39. (in Chinese)
- [2] 李赤卫.华为海面无线传播模型[R].深圳:华为技术有限公司,2006.
- [3] 曾艳军.移动通信中电波传播特性研究及传播模型校正与应用[D].杭州:浙江工业大学,2003.
- [4] 王祖良,樊文生,郑林华.海面电波传播损耗模型研究与仿真[J].电波科学学报,2008,23(6):1095-1099.  
WANG Zu-liang,FAN Wen-sheng,ZHENG Lin-hua. Study and simulation on sea surface propagation prediction model[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(6): 1095-1099. (in Chinese)
- [5] 徐红艳,尉明明,冯玉珉.海上移动通信预测模型的选择[J].北京交通大学学报,2005,29(2):65-68.  
XU Hong-yan,WEI Ming-ming,FENG Yu-min. Selecting prediction model for sea mobile communication[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(2): 65-68. (in Chinese)
- [6] 陈江彦.采用ITU-R P.1546-3建议书的海上VHF无线覆盖预测方法[J].航海技术,2009,(3):39-42.  
CHEN Jiang-yan. Method of the recommendation ITU-R P.1546-3 for VHF field-strength prediction over sea propagation[J]. Marine Technology, 2009, (3): 39-42. (in Chinese)
- [7] 詹金林,陈永冰,李文魁,韩冰,朱儒. Millington方法与罗兰C电波传播预测[J].船电技术,2009,29(6):6-9.  
ZHAN Jin-lin,CHEN Yong-bing,LI Wen-kui,HAN Bing,ZHU Ru. Millington's method and forecasting of Loran C signals propagation[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2009, 29(6): 6-9. (in Chinese)
- [8] 邵立杰. AIS海上电波传播模型研究[D].大连:大连海事大学,2014.
- [9] 王文琰,周新力,肖金光. PE模型预测蒸发波导中电波传播损耗[J].通信技术,2012,45(06):64-66.  
WANG Wen-yan,ZHOU Xin-li,XIAO Jin-guang. Prediction of electromagnetic wave propagation loss in evaporation duct with PE model[J]. Communications Technology, 2012, 45(6): 64-66. (in Chinese)
- [10] 刘勇,周新力,金慧琴,王文琰.粗糙海面对电波传播的影响研究[J].无线电工程,2012,42(3):38-40,46.  
LIU Yong,ZHOU Xin-li,JIN Hui-qin,WANG Wen-yan. Research on influence of rough sea surface on radio wave propagation[J]. Radio Engineering, 2012, 42(3): 38-40, 46. (in Chinese)
- [11] KUN Yang, Terje Roste, Fritz Bekkadal, Torbjorn Ekman. Channel characterization of mobile radio channel over sea at 2 GHz[A]. 2010 Mediterranean Microwave Symposium (MMS)[C]. New Jersey, USA: IEEE Press, 2010. 389-392.
- [12] A COKER, L STRAATEMEIER, T ROGERS, P VALDEZ, D COOKSEY, K GRIENGLING. Maritime channel modeling and simulation for efficient wideband communications between autonomous unmanned surface vehicles[A]. Proceedings of 2013 IEEE Conference on Oceans[C]. New Jersey, USA: IEEE Press, 2013. 1-9.
- [13] D ADAMY. EW103: Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare[M]. Massachusetts, USA: Artech House, 2009.
- [14] M HATA. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980, 29(3): 317-325.
- [15] Y OKUMURA, E OHMORI, T KAWANO, K FUKUDA. Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service[J]. Review of the Electrical Communication Laboratory, 1968, 16(9-10): 825-873.
- [16] P L RICE, A G LONGLEY, K A NORTON, A P BAR-SIS. Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communication Circuits[R]. Colorado, Boulder, USA: Envi-

ronmental Science Services Administration, 1967.

- [17] 田斌, 蔡豪. 蒸发波导伪折射率模型特性[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(12): 73–75.  
TIAN Bin, CHA Hao. Study on the characteristic of pseudo-refractivity evaporation duct model[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(12): 73–75. (in Chinese)
- [18] 刘成国, 黄际英, 江长荫, 蔺发军. 用伪折射率和相似理论计算海上蒸发波导剖面[J]. 电子学报, 2001, 29(7): 970–972.  
LIU Cheng-guo, HUANG Ji-ying, JIANG Chang-yin, LIN Fa-jun. Modeling evaporation duct over sea with pseudo-refractivity and similarity theory[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7): 970–972. (in Chinese)
- [19] 左雷, 蔡豪, 田斌, 田树森. 海上蒸发波导 PJ 模型在我国海区的适应性初步研究[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1100–1103.  
ZUO Lei, CHA Hao, TIAN Bin, TIAN Shu-sen. An initial study on the applicability of Paulus-Jeske model of evaporation duct in Chinese sea areas[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1100–1103. (in Chinese)
- [20] C SOMMER, S JOERER, F DRESSLER. On the applicability of two-ray path loss models for vehicular network simulation[A]. Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Networking Conference [C]. New Jersey, USA: IEEE Press, 2012. 64–69.
- [21] M BACCO, E FERRO, A GOTTA. UAVs in WSNs for agricultural applications: an analysis of the two-ray radio propagation model[A]. Proceedings of 2014 IEEE Conference on Sensors [C]. New Jersey, USA: IEEE Press, 2014. 130–133.
- [22] S LOYKA, A KOUKI, F GAGNON. Fade depth prediction on wireless microwave links using two-ray multipath model[A]. Proceedings of 2001 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering [C]. New Jersey, USA: IEEE, 2001. 493–498.
- [23] S LOYKA, A KOUKI. Using two ray multipath model for microwave link budget analysis[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43(5): 31–36.
- [24] A G LONGLEY, P L RICE. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain: A Computer Method – 1968[R]. Colorado, Boulder, USA: Environmental Science Services Administration, 1968.

### 作者简介



王 峰 男, 1977 年生, 高级工程师, 主要从事通信与信息系统、物联网应用等方面的理论及应用研究.



吴 畏 男, 1980 年生, 高级工程师, 主要从事宽带移动通信、无线通信组网等方面的技术应用研究.

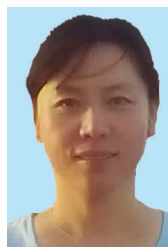


彭 茜 女, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事无线通信、宽带移动通信、无线通信网等方面的理论及应用研究.



赵二虎(通信作者) 男, 1985 年生, 工程师, 主要从事软件无线电、通信抗干扰、电波传播等方面的技术研究.

E-mail: zhaorhu@ict.ac.cn



何晓新 女, 1966 年生, 研究员, 主要从事无线通信、认知无线网络等方面的技术研究.