

doi: 10.3969/j.issn.1002-0802.2014.11.015

## 基于信噪比估算的短波通信辅助决策模型研究<sup>\*</sup>

董 航<sup>1</sup> 徐 池<sup>1</sup> 易 涛<sup>2</sup> 韩 东<sup>1</sup>

(1. 海军大连舰艇学院 辽宁 大连 116018; 2. 65334 部队 吉林 延吉 133000)

**摘 要:** 为满足复杂战场条件下通信指挥员的短波通信决策需求,对场强预测模型和噪声模型进行简化和参数程序化,提出了以短波通信信噪比估算为基础的态势可视化模型,可视化的实现有利于通信指挥员直观地掌握短波通信的整体态势;构建和定义了以信噪比估算模型函数为基础的短波辅助决策模型,根据函数的可控因子,运用数学分析方法对输入参数进行合理配置,为最佳通信效果的实现提供辅助决策信息。通过仿真预测结果和参考数据的对比,验证了仿真模型的合理性,对短波通信的辅助决策研究有一定的参考价值。

**关键词:** 短波 信噪比 辅助决策

**中图分类号:** TN925 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-0802(2014)11-1313-05

## HF Communication Aid Decision-Making Model based on SNR Evaluation

DONG Hang<sup>1</sup>, XU Chi<sup>1</sup>, YI Tao<sup>2</sup>, HAN Dong<sup>1</sup>

(1. Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning 116018, China; 2. Unit 65334 of PLA, Yanji Jilin 133000, China)

**Abstract:** In order to meet the communication commander's demands on HF communication aid-decision-making in complicated battlefield, the field-intensity prediction model and noise model are simplified and parameter programmed, thus a situation-visualized model based on the evaluation of SNR is proposed, visualization implementation is beneficial to communication commander in grasping the overall situation intuitively. Meanwhile, HF aid-decision-making model based on the model function of SNR evaluation is constructed and defined. According to the controllable factors of function, input parameter is reasonably allocated via mathematical analysis, thus the aid decision-making information is provided to achieve optimum communication. Rationality of the simulation model is verified through the comparison of between simulation prediction result and reference data, and the proposed model can serve as a reference for the research of HF communication aid decision-making.

**Key words:** HF; SNR; aid decision-making

### 0 引 言

短波通信是中远程通信的重要手段之一,因其抗毁性强、通信设备成本低廉、易实现等优点而在军事领域广泛运用。军事应用方面,除去短波通信设备具备的基本通信能力,当前短波通信的组织运用中缺乏有效的辅助决策工具,通信指挥员无法获取

定量、科学的辅助决策信息,难以根据不同作战条件实时调整通信组织方案、通信系统运转参数。通信计算模型是实现通信指挥辅助决策的基础和前提。目前,用于通信计算的短波预测软件主要有 ION-CAP、ICEPAC 和 PropMan,上述成果为指挥决策提供的辅助信息有限且不直观。美国海军开发的通信

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-09-01;修回日期:2014-10-08 Received date:2014-09-01;Revised date:2014-10-08  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.11374001)  
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(11374001)

评估工具 NCAT 是模型预测、效能评估和辅助决策有效结合典型案例<sup>[1]</sup>, 取得了巨大的军事效益。

在构建短波通信信噪比估算模型的基础上, 突出短波通信组织方案的要素特点, 将预测模型与通信指挥、辅助决策紧密结合, 研究短波通信辅助决策模型, 为通信指挥员提供调控短波通信资源、提高短波通信效能的辅助决策工具。

## 1 短波通信信噪比估算模型的构建

短波频段的电波传播有地波传播和天波传播两种形式, 其中天波传播是短波通信主要的传播方式。

### 1.1 短波场强预测模型

#### 1.1.1 地波传播场强预测

海上短波地波在传播所受到的衰减主要有自由空间传播扩散引起的自然衰减和海面对电波的吸收。当海面地波传播距离  $r \geq 80f^{-1/3}$  时, 必须考虑地球曲率的影响, 远距离海面地波场强使用绕射公式计算<sup>[2]</sup>:

$$E_d = 104.8 - 10 \lg r - 3.33 \lg \lambda - 20 \lg \frac{1}{\delta^2} - 0.468 \operatorname{Im}(\tau_0) \frac{r}{\sqrt{\lambda}} + 10 \lg(P \cdot G) \quad (1)$$

式中  $E_d$  为地波场强有效值  $r$  为接收点距离发射点的距离  $\lambda$  为短波波长  $P$  为发射机功率  $G$  为天线增益系数  $\delta$  为与给定波长和相对介电常数和电导率相关的实数  $\operatorname{Im}(\tau_0)$  是  $|\delta|$  的函数。其中,

$$|\delta| = 0.002924 \sqrt[3]{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{(\varepsilon_r - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2}}{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_r$  和  $\sigma$  分别为海面的相对介电常数和电导率。  $\operatorname{Im}(\tau_0)$  一般通过曲线查询确定, 不便于计算机仿真实现, 采用分段函数方式, 给出典型海面上地波传播的  $\operatorname{Im}(\tau_0)$  计算公式:

$$\operatorname{Im}(\tau_0) = 0.7 \times \exp(0.305/|\delta|) \quad (3)$$

计算地波传播场强时需要考虑地球曲率和粗糙海面引起的附加衰减因子的影响。通过建立附加衰减  $A_s$  数据库的方法, 通信指挥员可根据当前通信距离、频率和海况确定具体的附加衰减  $A_s$  值, 对估算的光滑海面地波场强值进行修正。表 1 为不同海况条件下, 地波通信频率为 5 MHz 时粗糙海面相对均匀光滑海面的附加衰减  $A_s$  与距离的关系。

表 1 5 MHz 不同海况、不同通信距离的附加衰减  
Table 1 Additional attenuation of 5MHz frequency under different sea conditions and communication distances

距离/km	50	80	100	150	200	300
海况 1	0.20	0.55	0.75	0.85	1.00	1.25
海况 2	2.50	4.00	4.30	5.75	6.00	7.00
海况 3	5.00	6.10	6.45	7.50	8.20	10.0
海况 4	6.50	8.10	8.70	9.75	10.5	12.3
海况 5	8.80	10.2	10.4	11.5	12.5	15.0
海况 6	10.0	11.9	12.1	13.0	14.1	16.7

计算地波传播场强时需要考虑地球曲率和粗糙海面引起的附加衰减因子的影响。通过建立附加衰减  $A_s$  数据库的方法, 通信指挥员可根据当前通信距离、频率和海况确定具体的附加衰减  $A_s$  值, 对估算的光滑海面地波场强值进行修正。表 1 为不同海况条件下, 地波通信频率为 5 MHz 时粗糙海面相对均匀光滑海面的附加衰减  $A_s$  与距离的关系。

#### 1.1.2 天波传播场强预测

天波传播是短波通信主要的传播方式, 发射功率、工作频率、天线增益、传播损耗、时间季节、地理位置都是影响天波传播的重要因素。天波场强计算主要参考 ITU-R P. 533-11 计算流程, 同时根据实际运用对模型进行了适当的简化处理。短波天波接收点场强  $E_t$  可用下式计算:

$$E_t = 137.2 + 20 \lg f + 10 \lg P + G_t - L_{bf} - L_i - L_g - Y_p \quad (4)$$

式中  $E_t$  为天波传播时接收点信号强度;  $f$  为工作频率;  $P$  为发射机发射功率;  $G_t$  为天线增益;  $L_{bf}$  自由空间传输的传输损耗;  $L_i$  电离层吸收损耗;  $L_g$  地面反射损耗;  $Y_p$  额外系统损耗。

##### (1) 自由空间基本传输损耗 $L_{bf}$

自由空间基本传输损耗是无线电波离开发射天线后因几何扩散而引起的能量损失。  $L_{bf}$  的计算公式为:

$$L_{bf}(dB) = 32.44 + 20 \lg f + 20 \lg(r) \quad (5)$$

式中  $f$  为工作频率,  $r$  为电波传播有效路径。有效路径的求取可由大圆距离、地球半径、天线仰角等参数利用三角形正弦定理求得。

##### (2) 电离层吸收损耗 $L_i$

电离层的吸收损耗是无线电传播中的第二大项损耗。通过对一些参数进行量化或建立数据库查询的方法, 实现参数计算程序化, 进而应用半经验公式进行计算。

计算电离层吸收损耗工程中常利用以下半经验公式:

$$L_i = I \frac{677 \cdot 2 \sec i_{100}}{(f + f_H)^{1.98} + 10.2} \text{ (dB)} \quad (6)$$

$$I = (1 + 0.0037 R_{12}) (\cos 0.881 \chi)^{1.3} \quad (7)$$

$$i_{100} = \arcsin(0.985 \cos \Delta) \quad (8)$$

式中  $I$  为吸收系数;  $i_{100}$  为 100 km 高度处电波入射角,  $\Delta$  为射线仰角;  $f_H$  为 100 km 高处磁旋频率, 工程上常根据吸收区纬度查询 100 km 磁旋频率, 仿真计算中对重点地区运用典型值的方法简化处理。如反射点位于北纬  $22^\circ \sim 35^\circ$   $f_H = 1.3$  MHz, 北纬  $35^\circ \sim 45^\circ$   $f_H = 1.4$  MHz, 北纬  $45^\circ \sim 55^\circ$   $f_H = 1.5$  MHz;  $\overline{R_{12}}$  为太阳黑子数“12 月滑动平均值”;  $\chi$  为太阳顶角。

### (3) 地面反射损耗 $L_g$

地面损耗是电波经由地面反射发生的, 这种损耗只是两跳以上的电波传输模式才有。为较简单地估算地面反射损耗, 海面反射每次取 1 dB, 陆地反射每次取 4 dB。

### (4) 额外系统损耗 $Y_p$

额外系统损耗是指除自由空间基本传输损耗、电离层吸收损耗、地面反射损耗以外的其他原因造成的损耗总和, 要求精确计算比较困难。在保证 90% 的时间可靠性的条件下, 可根据接收点的实际参数查表估算出额外系统损耗值。

## 1.2 噪声模型

信号场强这一参数对于通信指挥员而言相对抽象, 信噪比是通信信号的关键参数, 是衡量通信质量的重要指标, 也是通信指挥员根据装备使用环境有效预测、判断短波通信实际效能的重要依据。因此, 考虑到辅助决策模型的实用性和适用范围, 可以场强预测模型为基础构建和嵌入噪声模型。根据短波通信的特点和军事应用背景, 在 10 MHz 以下, 大气噪声是主要影响因素, 在 10 MHz 以上人为噪声影响为主。

### (1) 大气噪声模型

大气噪声又叫天电噪声, 主要由雷电引起, 地球上任意地点的大气噪声是世界性雷电与本地雷电辐射叠加的效果<sup>[2]</sup>。噪声的传播受电离层的影响, 其强度随频率、时间、季节、地理位置及气候变化。大气噪声的计算主要方法和依据有 CCIR-322 报告和 ITU-R P. 372-10 推荐书中所提供的一套全球大气噪声分布图, 可依照步骤查询图表得到计算大气噪

声的各种参数, 最终计算得到大气噪声。国际电联也提供了用于计算大气噪声的程序模块 NOISE-DAT, 考虑到插图计算的低效和不精确性以及辅助决策模型的兼容问题。根据美国国家电信和信息管理局(NTIA) 85-173 报告提供的底层数据, 采用傅里叶正弦技术和多项式插值方法建立计算大气噪声中值的通用数学模型。

### (2) 人为无线电噪声

人为无线电噪声主要是工业、电气、电器设备和设施的辐射干扰, 这些干扰电平随频率、地区不同而异<sup>[3]</sup>。ITU P. 372-10 给出了工业区(城市)、居民区(住宅)、乡村(农村)等几种环境下计算人为无线电噪声的经验公式(适用于 0.2 ~ 250 MHz)。考虑到舰艇是个电磁环境恶劣的场所, 多频段多设备挤在狭窄的空间里, 可以最大级别的城市人为无线电噪声数据代表舰艇人工噪声。

## 2 短波信噪比估算的可视化

信息态势的可视化是辅助决策中的重要内容<sup>[4]</sup>, 在实际通信过程中, 对指定区域内每一个接收点的信噪比进行估算, 耗时费力, 且结果不够清晰直观。可采用通用的电子海图软件开发包, 便于与其他系统的集成, 常用的开发包可提供地理信息的可视化功能, 具有漫游、缩放、地理信息查询等功能。通信指挥员根据参数分布态势可以预测短波通信可通范围, 为通信方案的制定提供定量的、科学的辅助参数。图 1 为发射点位于(160°E, 20°N), 太阳黑子数为 110, 发射频率为 15 MHz, 发射天线为鞭状天线等条件下的信噪比可视化示意图。

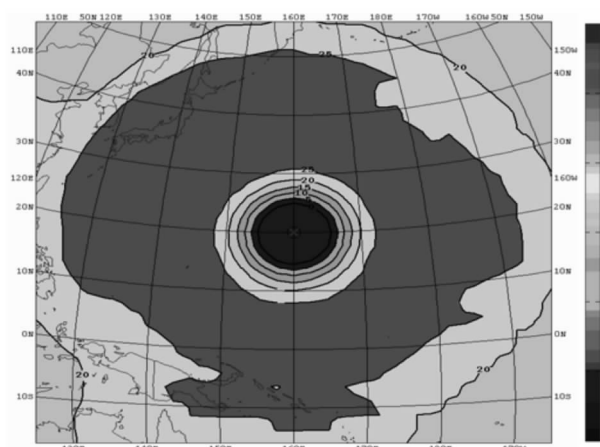


图 1 信噪比可视化示意图  
Fig. 1 Visual diagram of SNR

实际运用中需要结合具体的天线参数,可运用 NEC 软件仿真天线场分布,计算出短波通信用天线在不同参数下的增益数据,建立短波天线增益数据库信息,对天线信息进行查询<sup>[5]</sup>。

对于天波传播而言,修正地面反射损耗等相关参数,就可以将仿真输出结果与短波通信经验数据相比较。运用上述模型对发射点位置(160.4°E, 39.9°N)、接收点位置(113.3°E, 23.2°N)、通信时间 2010 年 1 月、太阳黑子数  $R_{12}=120$ 、发射功率  $P=1.6\text{ kW}$  的情况进行仿真。

图 2 中,仿真数据与参考数据未完全重合,主要原因在于计算额外损耗时,参考数据中所有时间点选用的都是 14 dB,而仿真模型中在计算额外损耗时是根据发射点的地方时确定具体数值的,且损耗值都大于 14 dB,消除这一误差可以发现两者数据吻合度较高。

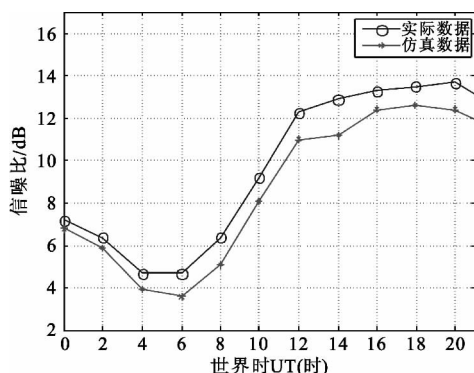


图 2 信噪比估算值与实测值比较  
Fig. 2 Comparison of SNR estimation value and the measured value

### 3 基于信噪比的短波辅助决策模型

根据实际应用环境,及时调整通信组织方案、通信系统运转参数以保持短波通信效能是通信指挥员指挥决策的重要内容<sup>[6]</sup>。通信方案和系统参数调整的辅助决策内容包括:在对通信时机、工作频率、发信功率计算分析的基础上,估算电离层传播可通频率段,选择合适的工作频率;对影响传播场强的各项参数,如时间、通信舰位、发信功率、天线进行配置,分别进行计算,从而得到最佳辅助决策方案,为指挥员提供辅助决策信息。根据上述分析,定义短波通信辅助决策函数为  $F$ 。

$$F = 20\lg E - 20\lg E_n \quad (9)$$

式中  $E$  为短波传播场强预测模型函数,  $E_n$  为噪声模型函数。场强模型函数  $E$  是多变量函数,受多个变量影响,即

$$E = \Phi\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_N\} \quad (10)$$

式中  $v_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$  是第  $i$  个影响预测场强  $E$  的变量,  $N$  为变量个数,根据短波传播方式的不同,变量也不同。以天波为例,  $v_i$  包括发射机功率、工作日期及时间、发射接收舰位、工作频率、太阳黑子数等。将变量分为两类:指挥员决策可控因子和固定因子,可控因子是指指挥员在决策中根据具体通信要求可以人为调整控制的参数,固定因子是指在当前环境下无法改变的参数。

设  $N=10$ , 因子选择矩阵为  $U_i = (0, \rho, \dots, 1, \dots, \rho)^T$ , 即选择第  $i$  项参数, 式中第  $i$  项就为 1。参数矩阵为:

$$T = (P_t, f, G_t, t_j, x_1, y_1, x_2, y_2, \theta, h)^T \quad (11)$$

式中  $P_t$  为发射机发射功率;  $f$  为通信工作频率;  $G_t$  为天线增益系数;  $t_j$  为通信工作时间;  $x_1, y_1, x_2, y_2$  分别为发射点和接收点的地理经纬度;  $\theta$  为天线仰角;  $h$  为电离层虚高。

其中,

$$v_i = T \cdot U_i = (P_t, f, G_t, t_j, x_1, y_1, x_2, y_2, R_{12}, h)^T \times (0, \rho, \dots, 1, \dots, \rho)^T \quad (12)$$

改变参数  $v_i$  的不同配置组合,通过多次运算得到短波传播场强预测的最佳解  $E_{opt}$ ,结合噪声参数,将计算结果与短波通信不同工作种类所需高频信噪比进行比较,得到满足条件的短波通信辅助决策函数最佳解  $F_{opt}$ 。表 2 中提供了部分工作种类的最小高频信噪比<sup>[7]</sup>。

表 2 部分工作种类所需带宽和高频信噪比  
Table 1 Part types required bandwidth and HF SNR

工作种类	ITU 对应发射类型	高频信噪比 (dB/Hz)	带宽 /kHz
边带报 (CW)	A1A	38	3
单边带话 (SSB)	J3E	48/72	3
调幅兼容话 (AM)	H3E( A3E)	51/75	3
移频印字报 (FSK)	F1B	32/42	0.3

通过计算机仿真,可以改变以往纯经验型的指挥决策,从定量的角度出发,辅助通信指挥员快速进行复杂的仿真,检验和估算各种情况、要素对通信产

生的影响,提高了通信指挥员的决策效率,增强通信指挥员决策的科学性和针对性。图 3 为基于信噪比估算的短波通信辅助决策模型的工作流程图。

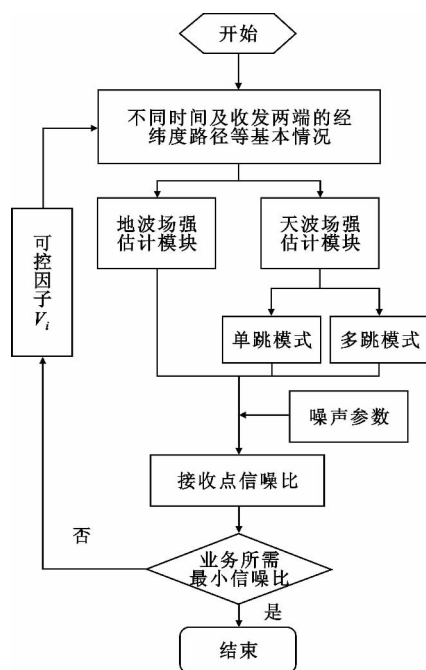


图 3 辅助决策流程

Fig. 3 Aid decision-making flow chart

## 4 结 语

通过对经典场强预测模型的适当简化,建立了相应的子模型数据库,一定程度上实现了预测模型“本地化”。借助计算机仿真功能,通过模型输入参数的改变求解辅助决策模型函数的最佳值,可为通信指挥员提供定量的辅助决策信息,辅助指挥员主动调整通信状态参数,在一定程度上避开不利的传播信道,提高短波通信效能;实现了关键参数的可视化,可为通信指挥员提供形象、直观的短波通信态势信息,能够提高短波通信效能。研究中选用的是经验性的统计预测模型,模型精度随着底层参数的不断增加还有较大提升空间,提高模型精度是后续的研究重点。

## 参考文献:

- [1] T. A. Hepner. User's Guide for the Naval Communications Assessment Tool (NCAT) software Version 3.0 [R]. USA: Space and Naval Warfare Systems Center, 2000.

- [2] 熊皓. 无线电波传播 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 652-663.  
XIONG Hao. Radio Waves Propagation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 652-663.
- [3] TIAN Xiao-ping, LU Ji-hua. Shortwave Propagation over Oceans and HF Propagation Prediction Model [J]. Computational Intelligence and Software Engineering, 2009, 32(01): 11-13.
- [4] 焦培南, 张忠治. 雷达环境与电波传播特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 42-43.  
JIAO Pei-nan, ZHANG Zhong-zhi. Radar Environment and Wave Propagation Characteristic [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 42-43.
- [5] 王琴, 黄金权. 短波天波通信链路计算模型研究 [J]. 通信技术, 2010, 43(10): 14-16.  
WANG Qin, HUANG Jin-quan. Study on Calculation Model for HF Sky Wave Communication Link [J]. Communication Technology, 2010, 43(10): 14-16.
- [6] 李加祥. 海上作战指挥辅助决策技术的发展趋势 [J]. 海军大连舰艇学院学报, 2010, 30(02): 8-11.  
LI Jia-xiang. Development Trend of the Sea Battle Command Auxiliary Decision Technique [J]. Journal of Naval Journal of Dalian Naval Academy, 2010, 30(02): 8-11.
- [7] 宋吉鹏, 乔晓林. 天波传播预测及辅助决策分析 [J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(02): 50-53.  
SONG Ji-peng, QIAO Xiao-lin. Sky Wave Propagation Prediction and Auxiliary Decision Analysis [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(02): 50-53.

## 作者简介:



董 航(1992—),女,学士,主要研究方向为通信系统分析与应用;

DONG Hang (1992—), female, B. Sci., majoring in communication system analysis and application.

徐 池(1984—),男,硕士,讲师,主要研究方向为通信系统分析与应用;

XU Chi (1984—), male, M. Sci., lecturer, majoring in communication system analysis and application.

易 涛(1983—),男,硕士,参谋,主要研究方向为军事通信;

YI Tao (1983—), male, M. Sci., staff officer, majoring in military communication.

韩 东(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为水声通信。

HAN Dong (1978—), male, Ph. D., lecturer, majoring in underwater acoustic communication.