

文章编号: 1001-893X(2012)09-1508-05

基于信道特性分析的短波远距离地空通信^{*}

刘满堂

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:短波天波信道(时变信道)的衰落特性是影响远距离短波通信质量的主要因素, 准确分析预测短波信道传输特性是通信成功的基础。结合工程试验分析了影响短波通信质量的诸多因素, 选择最佳的通信信道, 成功实现了远距离短波地空通信。分析预测-选择信道频率-静态测试-短波通信的方法, 对短波通信系统远距离通信能力考核试验具有参考价值。

关键词:短波通信; 天波; 电离层; 时变信道; 地空通信

中图分类号: TN919.3 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.018

HF Long Range Air-ground Communication Based on Channel Characteristic Analysis

LIU Man-tang

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Fading characteristic of HF sky-wave channel is the main factor to influence long range HF communication quality. Predicting HF propagation characteristic precisely is an element for successful communication. Factors influencing HF communication quality are analysed along with engineering experiment. By choosing the best channel long range air-ground HF communication is realized. The method of predicting-frequency preference-static test-communication can provide good reference for long range communication test of HF systems.

Key words: HF communication; sky-wave; ionosphere; time-variable channel; air-ground communication

现代航空通信系统中, 短波链路通常作为卫星通信备用手段。但是, 短波信道是典型的时变信道, 电离层衰落的影响使短波远距离通信质量不稳定, 限制了短波通信的应用。近年来, 短波通信技术重新被重视并获得应用, 其主要原因在于克服其自身缺陷的技术方面的发展^[1]。为了进一步提高航空通信系统远距离地空通信质量, 本文提出基于信道特性分析的短波远距离地空通信方法, 并结合工程试飞试验验证了其有效性。实践证明这种方法能够提升短波远距离数据和话音通信成功率, 保障通信质量。

1 短波信道特点和计算模型

1.1 信道特点

短波信道依靠电离层反射实现远距离通信链

接, 电波传输路径上的电离层的状态是短波链路链接的关键^[2]。远距离短波信道传输特点:

- (1) 信道传输函数模量 $|K_e(\omega, t)|$ 具有时变特性;
- (2) 信号传播时延具有时变特性;
- (3) 多经传输形成信号衰落、波形展宽产生码间串扰、限制数据传输速率;
- (4) 电离层快速移动产生多普勒频移, 信号相位起伏导致数据错误接收。

1.2 信道计算模型

短波信道传输模型可以用图 1 所示框图来表示。其中, 信道基本传播损耗 L_p 可通过经典理论计算, 外部输入噪声功率, 可以通过仪器测量获得, 快衰落的防护度 MR 根据通信可靠性要求确定, 最小

^{*} 收稿日期: 2012-08-02; 修回日期: 2012-09-13

信噪比 $\gamma_{0\min}$ 指标也可实验室测试获得。

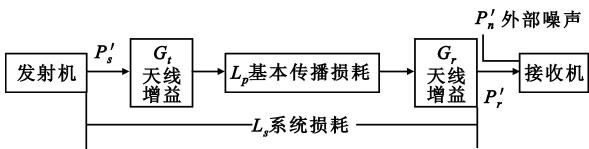


图 1 短波信道计算模型
Fig.1 HF channel calculation model

图 1 中各参数满足下列关系式:

$$L_s = 10 \lg(P_t/P_r)$$

$$L_s = L_p - G_t - G_r$$

式中, L_s 代表信道损耗, L_p 代表信道基本损耗, G_t 代表发射增益, G_r 代表接收增益。

当已知最小信噪比 $\gamma_{0\min}$ 和 P'_n 输入噪声总功率时,最小信号应该为

$$P_{r\min} = P'_n + \gamma_{0\min}(\text{dB})$$

当通信线路接收端的信噪功率比 γ_0 高于 $\gamma_{0\min}$ 称之为可靠通信。可靠性为 99%,则表示一天内有 1%的时间 $\gamma_0 < \gamma_{0\min}$ 。

1.3 信道频率特性

短波远距离传输信道,当短波电磁信号以角度 θ 投射时,其最高可用频率^[3](MUF)用下式计算:

$$MUF = \sqrt{\frac{80.8 N_n (1 + \frac{2h}{\alpha})}{\sin^2 \theta + \frac{2h}{\alpha}}} \tag{1}$$

式中, α 为地球半径, h 为电离层反射点至地面高度。

由于 MUF 是可返回地面的临界频率,且电离层参数随时间变化,故 MUF 传播条件很难长时间保持。实际工程中,通常选取比 MUF 低 15% 的频率作为最佳信道频率^[3]。

现在,短波通信预测分析可以利用互联网资源,如从网上获取试验日太阳黑子数和 K 指数等共享参数,利用 W6ELprop 短波通信预测软件运算取得建议频率,为远距离短波通信提供技术支持。

2 远距离短波信道特性分析

短波信道传输特性分析、预测是实现远距离短波通信的基础,通信试验结果又以工程实践的形式验证理论分析的有效性。为获取信道传输特性对短波通信质量的影响之分析结果在工程试飞中的应用

价值,作者结合某机载短波系统远距离地空通信试飞试验进行了有益的探索,这次远距离短波空地试验参试系统包括机载短波系统和地面短波系统两部分,其中地面短波系统布设 A 地,加装机载短波系统的飞机布设在距离 A 地约 1 200 km 的 B 地机场,飞行试验中,飞机在该机场空域巡航飞行。

远距离短波空地通信试验最重要的工作是在空中试飞试验之前进行的,如与试飞准备同步开展的信道损耗、天线特性等分析,机载、地面短波天线端口噪声电平及信号电平测试,信噪比预测等。以下分别介绍信道特性分析、天线损耗、信号电平预测分析等过程及结果。

2.1 远距离短波链路损耗特性

2.1.1 信道基本损耗

预测远距离短波信道传输基本损耗 L_p ,需要先计算自由空间损耗 L_{p0} 和电离层吸收损耗 L_a ,预估额外系统损耗。

白天进行试飞试验,电磁波主要依靠 F 层电离层反射($h_e = 330 \text{ km}$)。

地面短波系统与机载短波系统间自由空间传播损耗(信道频率 14.5 MHz)为

$$L_{p0} = 32.44 + 20 \lg f + 20 \lg r = 115.7 \text{ dB}$$

2.1.2 电离层吸收损耗

电离层吸收损耗分为偏移吸收和非偏移吸收,偏移吸收指在反射区附近电波被吸收,通常可以忽略不计,非偏移吸收指电离层 D、E 层的吸收(D、E 层只是白天存在)。

电离层吸收损耗用 L_a 表示,首先要明确电波通过电离层 100 km 处的纬度,然后根据此纬度点的磁旋频率 f_H 和改进型磁旋角 $|x|$ 的值来求出吸收因子 $A_T(0,0)$ 和 L_a 。

本次远距离短波地空通信,信道模式为 1F,电波通过 M 、 N 点穿过 E 层,见图 3, L_a 以 M 、 N 两点之平均值较合适:

$$L_a = \frac{1}{2} (L_{aM} + L_{aN}) \tag{2}$$

计算中,信道频率 $f = 10.5 \text{ MHz}$, $\chi = 50^\circ$,磁旋频率 $f_H = 1.38 \text{ MHz}$,改进型磁倾角 $|\chi| = 48^\circ$,吸收因子 $A_T(0,0)$ 为 320 ~ 340。太阳黑子数取 52.3,通信仰角取 26° 。

经计算电离层吸收损耗预估值 $L_a = 9.12 \text{ dB}$ 。

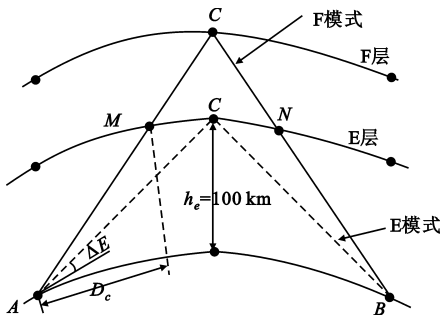


图3 求电离层吸收损耗的两种模式
Fig.3 Two modes for ionosphere absorption calculation

2.1.3 额外系统损耗

额外系统损耗即自由空间传播损耗、电离层吸收损耗、地面反射损耗之外的损耗,如极区吸收损耗、 E_s 层附加损耗等,额外系统损耗用 Y_p 表示。额外系统损耗定量计算较难,通常采用综合估计值,即利用大量电路实测天波传播损耗数据,减去自由空间传播损耗、电离层吸收损耗、地面反射损耗后得到^[4]。参考相关资料和工程试验数据,额外系统损耗取值为 $Y_p = 5\text{ dB}$ 。

将 L_{p0} 、 L_a 、 Y_p 代入下式可以计算出所分析远距离短波信道基本损耗:

$$L_p = L_{p0} + L_a + Y_p = 115.7\text{ dB} + 9.12\text{ dB} + 5\text{ dB} = 130.12\text{ dB}$$

短波通信的一跳距离最远可以达到4 000 km,而本次地空短波试飞通信距离在1 200 km之内,只考虑一跳的方式传播,不存在多跳地面反射损耗。

2.2 天线损耗

2.2.1 机载天线

机载天线采用机载斜拉钢索天线,是典型的窄带天线,阻抗随频率变化较大,实测某机载短波上天线 Smith 圆图如图 4 所示。

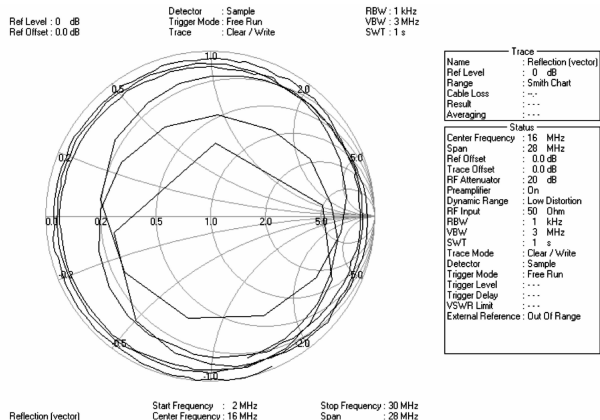


图4 机载短波天线阻抗 Smith 圆图
Fig.4 Smith chart of airborne HF antenna impedance

从圆图上可看出,机载天线阻抗实部、虚部变化很大,需与机载天线调谐器配合使用才能实现端机与天线阻抗匹配。短波频段波长较长,无法准确测量机载钢索天线装机状态性能参数,通常只能定性考量其损耗。

2.2.2 地面天线

地面短波站天线采用 HTDS - 30 - 10 - 1 可转动式对数周期天线,其主要技术指标:频率范围 6 ~ 26 MHz,天线增益 5 ~ 9 dBi,波瓣宽度 35° ~ 55°,承受功率大于等于1 kW,极化方式为线极化。

相对于机载天线,地面天线不受重量、机构尺寸、架设方式等条件限制,性能优于机载天线,损耗可以忽略不计。计算链路增益时直接采用给定的天线参数。

2.2.3 天线极化损耗

由于 Faraday 旋转作用,电波离开电离层时的极化方式变为椭圆极化,用线极化天线接收椭圆极化信号^[5],天线极化损耗为 $Y_g = 3\text{ dB}$ 。

2.3 信号电平计算分析

已知地面短波系统发射功率为 60 dBm (1 000 W),天线架设在 4 层办公楼顶无遮挡。机载短波系统发射功率为 56 dBm (400 W),假设机载钢索天线增益在工作频段内为 -5 ~ -9 dBi,计算系统损耗时,机载天线和地面天线增益正负相抵消,即 $G_r + G_t = 0$ 。

将已知参数代入下式:

$$P_{r\text{ground}} = P_t + G_r + G_t - L_{p0} - L_a - Y_g$$

$$P_{r\text{air}} = P_t + G_r + G_t - L_p + Y_g$$

计算出机载天线和地面天线端口信号电平:

$$P_{r\text{ground}} = -77.12\text{ dBm}$$

$$P_{r\text{air}} = -73.12\text{ dBm}$$

3 静态测试

3.1 噪声电平测试

短波频段虽然比较拥挤,但还是可以选择相对安静频点,选择噪声电平低、干扰信号弱的频段进行通信试验,才能取得比较理想的通信效果。

测试数据表明,地处中心城市短波地面系统,2 ~ 8 MHz 频段噪底约 -65 dBm;8 ~ 20 MHz 频段内,噪底约 -80 ~ -97 dBm,还存在其他强辐射信号,如图 5 所示。

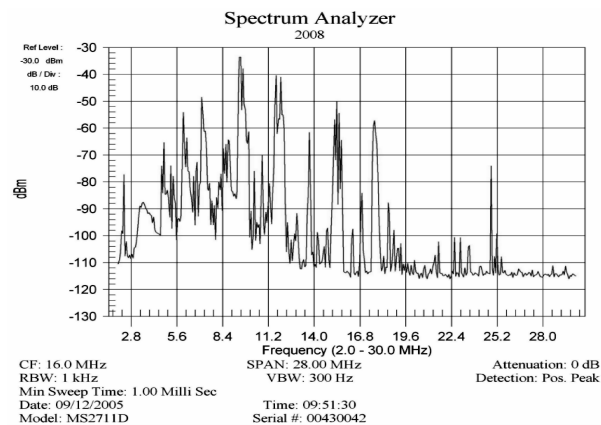


图 5 地面短波天线端口噪声谱

Fig.5 Noise level at ground HF antenna port

数据还表明,飞机起降机场电磁环境明显好于城市,故机载短波天线端口噪声略低于地面天线端口噪声电平,6~11 MHz频段内噪底为-97 dBm左右,2~30 MHz内其他段噪底为-105~-112 dBm。机载系统加电状态下短波天线端口噪声如图 6 所示。

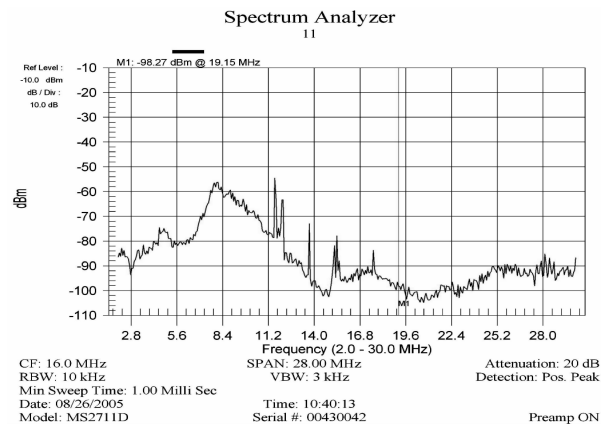


图 6 机载短波天线端口噪声谱

Fig.6 Noise level at airborne HF antenna port

3.2 信号电平测试

(1)最小信号电平

正常通信状态,短波接收机端口最小信号、噪底、信噪比应满足下式:

$$P_{\gamma\min} = Y_{\min} + P'_n \quad (3)$$

$$Y_{\min} = P_{\gamma\min} - P'_n \quad (4)$$

最小信噪比理论值为 10 dB,为保证远距离短波通信可靠性,需增加衰落防护裕量,即 $MR = 4$ dB,短波接收机天线端口最小信噪比取值应不小于 14 dB,即 $Y_{\min} = 14$ dB。

根据天线端口噪声电平测试结果,取地面短波系

统天线端口噪声电平中值 $P'_{\text{ground}} = -90$ dBm、机载短波系统天线端口噪声电平中值 $P'_{\text{airn}} = -100$ dBm 时,将天线端口噪声值、信噪比值代入下式:

$$P_{r\min} = P'_n + \gamma_{0\min} \text{ (dB)}$$

分别求得保证短波远距离地空通信情况下,要求地面和机载短波天线端口最小信号电平值是:

$$P_{r\min\text{ ground}} = -76 \text{ dBm}, P_{r\min\text{ air}} = -84 \text{ dBm}。$$

显然,地面系统天线端口信号电平预测值与 $P_{r\min\text{ ground}}$ 相当,机载系统天线端口信号电平预测值大于 $P_{r\min\text{ air}}$,理论分析结果表明,系统技术状态和信道传输特性基本满足 1 200 km 地空远距离短波通信要求。

(2)实测天线端口信号电平值

机载、地面短波系统同时加电工作,地面发射时,机载系统接收;当机载系统发射时,地面接收,实测发射方短波信号经电离层反射传输到达接收天线端口电平值,测试结果见图 7 和图 8。

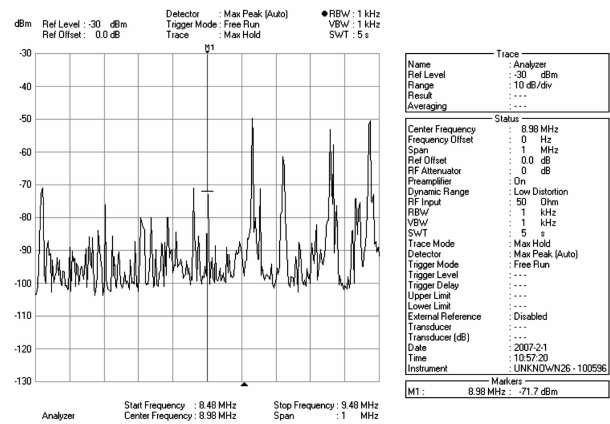


图 7 地面短波天线端口接收信号谱

Fig.7 Signal level at ground HF antenna port

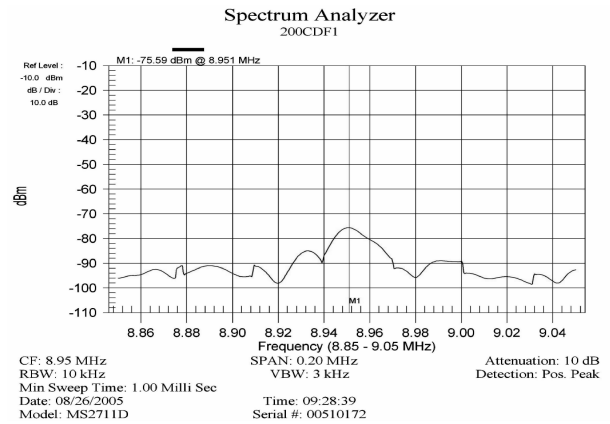


图 8 机载短波天线端口接收信号谱

Fig.8 Signal level at airborne HF antenna port

A 地地面站和 B 地的机载短波台互为发射源,实际测试各自接收对方的信号效果及实际电平,与分析预测结果基本相符。实际测试结果如下:

$$P_{r\text{ground}} = -71.7 \text{ dBm} > P_{r\text{min ground}}$$

$$P_{r\text{air}} = -75 \text{ dBm} > P_{r\text{min air}}$$

4 试验频率选择和试验验证

4.1 试验频率选择

依靠电离层反射传输的信道频率特性,决定了在给定距离和方向的路径上,只能用有限的频段带。当其他主要传播影响确定后,可以预测波道频率。相对于短波定点通信,地空远距离试飞试验信道频率选择更加重要^[6]。选择步骤如下:

(1)测试地面和机载系统经 W6ELprop 确定频率范围内噪声电平,选取噪声分别小于各自噪声电平并满足信噪比要求的频率;

(2)将初步遴选的频点加载至地面、机载短波系统中,飞机停放起降机场停机坪,与远端地面短波系统各波道分别进行话音通信,选择通信效果好的频点进行数据通信;

(3)记录频点及对应通信时间、通信质量等信息,通信试验结束后,进行综合评估,确定通信质量好且稳定的频点为试飞波道。

4.2 远距离地空通信验证

为验证基于信道特性分析短波远距离地空通信方法的实用性,根据 A、B 两点短波天波信道特性分析结果及选取的通信实验频率,在信道特性分析基础上,选择确定短波远距离地空通信频率,结合某工程短波地空试飞进行远距离地空通信试验。试验结果表明:话音、数据通信稳定可靠,话音质量达 5 分(话音通信质量以五分制评估,通信效果最好为 5 分);数传应答率达到了 65% 的目标值。

5 结束语

相对于传统的依靠电离层变化预测值选择通信频率窗口的方法,基于信道特性分析的短波远距离通信,在继承传统的基础上,充分利用新的计算机技术、新的测试技术,使得分析预测结果更准确,能够

避免由于信道特预测失误对通信质量的影响,提高通信成功率。但是,基于信道特性分析的短波远距离通信方法,并不能解决信道快衰落影响通信的问题。综合应用基于信道特性分析的频率选择技术、基于频谱感知的通信频率管理技术等,才能使短波通信适应现代航空通信系统的功能需求。

参考文献:

- [1] 赵志法.现代短波通信的现状与发展[J].现代军事通信,1998,6(3):39-45.
ZHAO Zhi-fa. Current and Development of Modern HF Communication[J]. Modern Military Communication, 1998, 6(3): 39-45. (in Chinese)
- [2] 苏恩.远距离短波通信的中断[J].电波科学学报,1990,5(4):60-66.
SU Ken. Interrupt of Remote HF Communication[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1990, 5(4): 60-66. (in Chinese)
- [3] 王林志,谢绍斌.基于 ITS 的短波链路频率指配与电磁计算[J].空军工程大学学报,2006,7(3):77-81.
WANG Lin-zhi, XIE Shao-bin. Frequency Assignment and Electromagnetism Calculation in Short-wave Link Calculation Based on ITS[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2006, 7(3): 77-81. (in Chinese)
- [4] 王睿,张海勇,杨曦.远距离短波通信最低可用频率的计算[J].舰船科学技术,2008,30(6):83-85.
WANG Rui, ZHANG Hai-yong, YANG Xi. Calculation of the lowest useable frequency for long distance HF communication [J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(6): 83-85. (in Chinese)
- [5] 陈菊.天线极化失配的理论分析及应用[J].空间电子技术,1998(4):48-53.
CHEN Ju. Theory Analysis and Application of Antenna Polarization Mismatch[J]. Space Electronic Technology, 1998(4): 48-53. (in Chinese)
- [6] Liu Gang, Ren Qing-hua, Liu Yun-jiang, et al. Research of Frequency Choosing Strategy on the Route for HF Air-Ground Communication Based on SNR[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Wireless communications, networking and mobile computing. Beijing: IEEE, 2009: 1569-1572.

作者简介:

刘满堂(1962—),男,陕西扶风人,高级工程师,主要从事航空通信系统总体技术研究。

LIU Man-tang was born in Fufeng, Shaanxi Province, in 1962. He is now a senior engineer. His research concerns aeronautical communication system.

Email: lmt19602004@126.com