

## 短波信道频率相对时延的实测分析

邹显炳\* 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**利用电离层斜向探测系统分别对三条短波路径进行了时延测试,在单模传播数据曲线拟合的基础上,计算了短波信道频率相对时延值,重点分析了电离层单模传播情况下频率相对时延与频率间隔、传播路径及工作频率的变化特征。分析表明短波跳频系统在单模工作时,中午时段的频率相对时延最大,跳频频点间隔越小、路径越大频率相对时延的影响越小。

**关键词** 短波; 斜向探测; 单模传播; 频率相对时延

中图分类号 TN92 文献标识码 A

## Measurements and analysis of Frequency Relative Time Delay(FRTD) on HF Channel

Zou Xianbing Li Shaoqian

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper presents the results of HF channel time delay measurements on 580 km, 940 km and 1 380 km paths using oblique ionospheric sounder equipment, and gives a curve fitting data processing methods to deal with measurements data of single mode. The variety characteristics of single mode FRTD is discussed on the basis of analysis of calculating results, it indicates that the FRTD values decrease with frequency interval getting small and paths distance increasing, the maximum FRTD value in a day appears at noon.

**Key words** shortwave; oblique ionospheric sounder; frequency relative time delay; single mode propagation

由于电离层是一种色散媒质使得高频信道为变参信道,电磁信号经过电离层传输后会发生诸如吸收、极化改变、聚焦散焦、倾斜效应、多径延迟、幅度衰落、相位起伏、多谱勒频移、电磁骚扰等各种传播现象,使信号产生畸变,主要表现为时间选择性衰落和频率选择性衰落。这些传播特性对高频数字通信具有重要影响。其中对通信误码率影响较大的特性有多径延迟、相位起伏、幅度衰落,也是通信系统设计最为关注的内容<sup>[1]</sup>。

电离层由于多模传播造成的多径延迟主要表现为频率选择性衰落,可以用时延散布来描述。通常是由分析接收信号的能量二阶矩统计值(时延散布)来表征电离层传播的多径效应,其典型值2 ms。有分析表明,多径延迟随工作频率升高而变小,近似服从正态分布<sup>[2]</sup>。工作频率低时,出现的传播模式较多,时延散布可达ms量级,文献[2]给出1 380 km路径上 $f=0.4$  MUF时的时延散布值为0.97 ms,更多情况下,多径延迟都比该值大。随着频率升高,多径延迟减小,在靠近最高可用频率(MUF)时,时延散布保持为某一最小值,这时的时延散布主要是单模传播下漫反射造成的脉冲展宽,频率更高则信号开始穿透电离层,信号急剧减弱,到最后收不到信号。另一方面,最大多径时延随着距离增加呈现先下降后上升的变化趋势,在4 000 km

2003年9月3日收稿

\*男 28岁 硕士 讲师 主要从事短波通信、无线通信和高速数字系统方面的研究

左右中等距离上,最大多径时延有最小值为2~3 ms<sup>[1,3,4]</sup>。由此可以看出,不论是频率剖面还是路径剖面的多径延迟一般为ms量级。

对于短波跳频通信系统来说,高速跳频具有抵抗由于信号多径展宽使误码率上升的好处,只要跳速足够高就足以对抗因传播模式不同产生的多径时延差,如5 000跳/s的跳频系统就可以对抗0.2 ms的多径延迟<sup>[5]</sup>,这时更应该考虑的是不同频率电波在同一传播模式下的时延扩展问题<sup>[6]</sup>,也就是前面提到的单模传播下漫反射造成的脉冲展宽。为区分通常所说的多径延迟,文献[7]将之定义为频率相对时延,并详细介绍了其计算方法。更严谨地,定义单模传播下漫反射造成的时延扩展为单模频率相对时延,以下简称“频率相对时延”。

短波高速跳频技术面临的新问题是频率相对时延对跳频带宽和跳速的影响<sup>[6]</sup>。频率相对时延对跳频速率和跳频带宽的影响的仿真分析结果为<sup>[7]</sup>:1)在近中距离(100~1 000 km),频率相对时延随距离增大而减小;2)日出和日落时段频率相对时延起伏较大,中午与晚上其值较稳定;3)相同时刻频率相对时延随着工作频率升高而增大。并由此得出在短波信道能够进行高速跳频的结论。以下将利用电离层的实测数据并结合电离层的实际特性分析频率相对时延与传播距离、工作频率、频率间隔及周日时刻的变化特性。

## 1 时延测试与数据处理

为了分析频率相对时延的真实特性,利用数字式电离层斜向探测系统同时对三条短波路径进行了一天连续测试<sup>[8]</sup>,三条路径分别为:新乡至青岛580 km,测试时间间隔1h;新乡至重庆940 km,测试时间间隔2 h;新乡至广州1 380 km,测试时间间隔为2 h。斜向探测系统组成如图1所示。

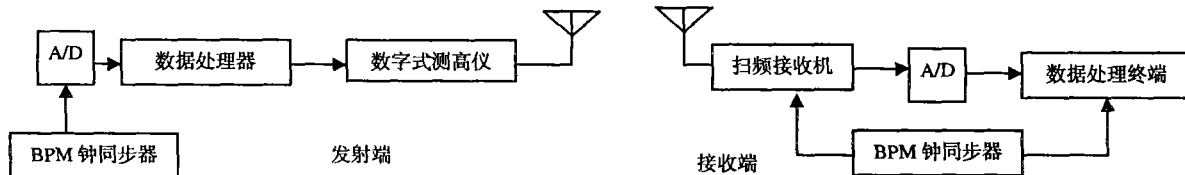


图1 斜向探测系统组成

测试时系统发射端在短波频段内以一定的频率间隔进行扫频,在每一扫频点的驻留时间内发射若干脉冲,接收端同时开始扫频接收,经数据处理输出测试结果。测试过程中,系统的脉冲个数、脉冲宽度及脉冲重复频率都可以设置。测试精度主要决定于收发两端的频率同步和时间同步精度,只要收发两地的起始频率、终止频率、频率步长、脉冲重复频率、每个频率的持续时间做到一致,就能保证良好的频率同步。时间同步是利用BPM短波钟实现,其精度主要决定于GPS短波授时系统的精度和A/D转换器精度。整个系统的测试精度小于10 μs。

实际测试的各类参数设置如下:频率范围在2~30 MHz;频率步长在50 kHz;脉冲宽度在66 μs,扫频速度在1 000 ms;每频脉冲数100。

测试得到了大量的离散数据,非单模传播数据对应的是一个频点有几个时延值。数据处理的第一步工作是整理出单模(一跳F层)传播数据。

受测试系统的频率分辨率与接收灵敏度和去干扰能力限制的影响,测试结果的频率最小间隔为10 kHz。由于信道是时变的,所以导致测试数据的频点间隔不固定(频率间隔两两彼此不同),使得从原始数据中直接得到某固定频率间隔相对时延的样本数量非常有限,有时根本就没有。将离散曲线拟合成连续曲线就能解决样本数量不足的问题。数据处理的第二步工作采用最小二乘法对单模传播时延数据进行拟合,拟合结果表明,单模传播的绝对时延与频率的关系基本接近于三次曲线,拟合的均方根误差平均值如表1所示,从表中看出大部分为10 μs左右(与测试误差相当)。采用的拟合公式为

$$\tau = \alpha_3 f^3 + \alpha_2 f^2 + \alpha_1 f + \alpha_0 \quad (1)$$

式中  $\tau$  为绝对时延值,  $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$  为拟合系数,  $f$  为工作频率,均方根误差平均值  $\bar{\sigma}$  由下式计算

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\tau_i - \tau_{0i})^2} \quad (2)$$

式中  $\tau_i$  为拟合时延值,  $\tau_{0i}$  为实测时延值,  $N$  为测试数据样本数。

表1 单模传播拟合曲线  $\bar{\sigma}$  值

单位:  $\mu\text{s}$

路径/km	00点	01点	02点	03点	04点	05点	06点	07点	08点	09点	10点	11点
580	8.0	7.6	7.3	7.7	7.4	9.1	12.5	8.0	10.5	9.7	10.9	12.5
940			10.5		10.8		10.4		6.1		10.5	
1 380	10.5		7.9		10.3		1.0		12.3		11.2	

路径/km	12点	13点	14点	15点	16点	17点	18点	19点	20点	21点	22点	23点
580	14.7	13.5	10.0	9.3		15.4		11.0	9.7	9.1	9.0	7.7
940	8.8		7.9		12.1		9.1		11.1			
1 380	14.0		14.0		9.6		13.6		9.3		11.7	

## 2 结果分析

### 2.1 频率相对时延的计算结果

由式(1)可推导出频率相对时延与工作频率及频率间隔的关系, 如欲求频率间隔为  $\Delta f$  的相对时延值, 只要将  $f + \Delta f$  代入式(1), 得到  $\tau' = \alpha_3(f + \Delta f)^3 + \alpha_2(f + \Delta f)^2 + \alpha_1(f + \Delta f) + \alpha_0$ , 与式(1)相减得

$$\Delta\tau = \tau' - \tau = (3\alpha_3\Delta f)f^2 + (3\alpha_3\Delta f^2 + 2\alpha_2\Delta f)f + (\alpha_3\Delta f^3 + \alpha_2\Delta f^2 + \alpha_1\Delta f) \quad (3)$$

或

$$\Delta\tau = \tau' - \tau = \alpha_3\Delta f^3 + (3\alpha_3f + \alpha_2)\Delta f^2 + (3\alpha_3f^2 + 2\alpha_2f + \alpha_1)\Delta f \quad (4)$$

式中  $\Delta\tau$  为工作频率  $f$ 、 $\Delta f$  为频率间隔、 $D$  为传播距离及  $t$  时间的函数, 即  $\Delta\tau = \Delta\tau(f, \Delta f, D, t)$ , 式(3)和式(4)表明,  $\Delta\tau$  受  $D$  及  $t$  的影响主要体现在拟合系数随  $D$  和  $t$  的变化。

对于相同的  $D$  和  $t$ , 由式(3)可知, 如果  $\Delta f$  取固定值, 相对时延与频率的关系为抛物型。抛物曲线大部分情况开口向上, 当  $\Delta f$  改变时顶点的横坐标  $f$  的值变化甚小。

式(4)则表明, 如果  $f$  取固定值,  $\Delta\tau$  随  $\Delta f$  的变化为过原点的三次曲线。

应该强调的是, 以上公式仅仅是为测试数据拟合所得的结果, 并不表示  $\Delta\tau$  的一般特性。利用式(3)或式(4)计算的各项路径  $\Delta\tau$  最大值如表2所示, 从表中得知, 最大频率相对时延随距离增大而减小, 并随  $\Delta f$  增大而增大, 都在中午时段出现。

表2 不同路径不同频率间隔的最大频率相对时延 单位:  $\mu\text{s}$

$\Delta f$ /MHz	580 km	940 km	1 380 km
0.05	13.1	8.7	6.4
0.1	26.5	17.5	12.9
0.5	145.0	96.2	72.8
1.0	323.6	215.5	167.5
1.5	539.6	360.9	287.1
2.0	796.7	535.5	434.5

### 2.2 频率相对时延的变化特征

作为一般分析, 下面考察频率相对时延平均值  $\overline{\Delta\tau}$  的变化情况, 该值反映了频率相对时延随  $D$ ,  $t$ ,  $\Delta f$  的整体变化趋势。其均值计算方法如下: 对于每一测试时刻, 给定  $\Delta f$  值, 利用式(3)在使用的频段内求间隔为  $\Delta f$  的相对时延平均值  $\overline{\Delta\tau}$ , 可得出

$$\overline{\Delta\tau} = \frac{1}{MUF - LUF} \int_{LUF}^{MUF} \Delta\tau(\Delta f, f, D, t) df \quad (5)$$

式中  $MUF$  为最高观测频率,  $LUF$  为最低观测频率。令  $\Delta f$  分别为 50 kHz、500 kHz、1.5 MHz 得到了频率

相对时延均值如图2~图4所示。

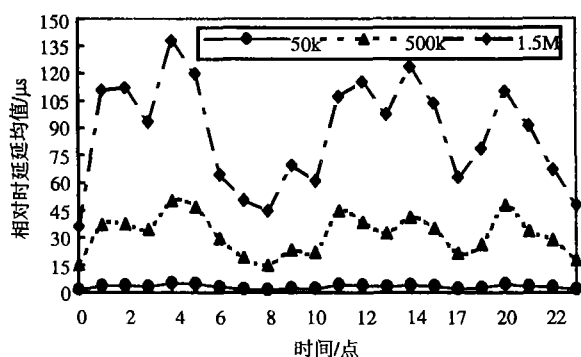


图2 580 km 频率相对时延均值图

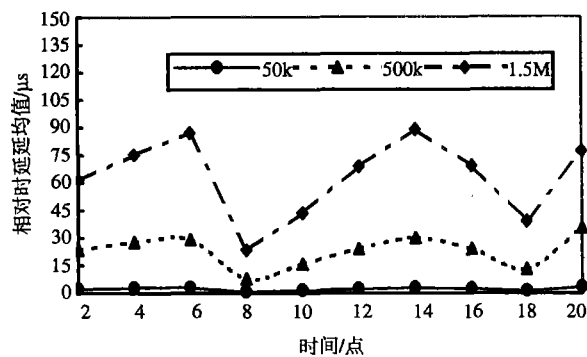


图3 940 km 频率相对时延均值图

图中分别体现了单模传播时 $\overline{\Delta\tau}$ 随 $\Delta f$ 、 $D$ 和周日时刻 $t$ 的变化情况,其中主要结论有以下几点:

1)  $\overline{\Delta\tau}$ 随频率间隔的变宽而增大,实际数值表明 $\overline{\Delta\tau}$ 随 $\Delta f$ 的增大几乎是线性递增的;2)在相同时刻,对于相同的频率间隔,相对时延随距离的增大而变小;3)由于中午时段的可用频率达到最高,相对时延均值在中午时刻达到最大值,这种现象与多径延迟的变化情况恰恰相反。从图中还可看出,日出和日落时段 $\overline{\Delta\tau}$ 的起伏较大,这主要是电离层传播模式急剧变化所造成的。

测试工作是在春天进行的,按照电离层的季节变化特性,春季电离层的流动较夏季快,变化也较大,所以夏季的频率相对时延应相对小些。

### 3 结束语

高频信道的频率相对时延是限制短波高速跳频通信系统跳速提高的重要因素,在理论上全面分析高频信道各种传播模式的频率相对时延是很困难的,利用斜向探测系统对电离层进行时延测试需要做大量的工作,测试结果的分析也很复杂。本文对短波信道单模传播频率相对时延的测试分析结果有助于进一步了解短波信道漫散射特性,为实际的短波高速跳频通信系统的研究工作提供了重要参考,具有一定的实用价值。

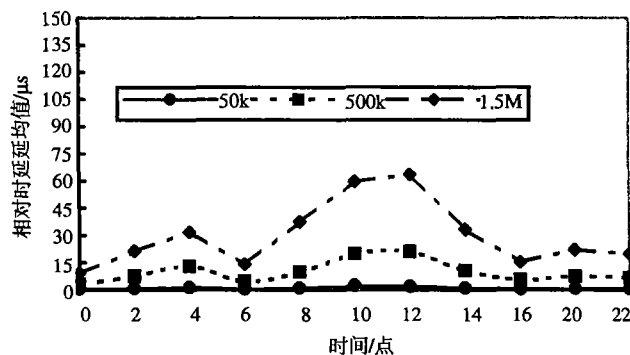


图4 1380 km 频率相对时延均值图

### 参 考 文 献

- [1] 戴耀森. 高频时变信道[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1985
- [2] 陈玉春, 周国鼎. 电离层信道参数与工作频率的关系[J]. 通信学报, 1984, 5(2): 48-56
- [3] Kenneth D. Ionospheric radio[M]. IEE Electromagnetic Waves Series, 1989
- [4] John M G. HF Communications Science and Technology[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992
- [5] 蔡臻详. 短波跳频抗干扰技术体制研究[J]. 无线电通信技术, 2001, 27(3): 42-44
- [6] 姚富强, 王清泉. 短波通信抗干扰体制若干问题的探讨[C]. 军事通信技术, 1994, (49): 27-32
- [7] 李少谦, 李富详. 频率相对时延对短波高速跳频系统的影响[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(9): 339-344
- [8] 黄昌理, 罗玉来, 黄汝言. 数字式电离层斜向探测系统[J]. 电波科学学报, 1994, 9(4): 81-88