

## 基于 IFFT 频谱相除的罗兰 C 天地波识别新算法

朱银兵<sup>①②</sup> 许江宁<sup>①</sup> 王红星<sup>②</sup> 曹可劲<sup>①</sup> 胡东亮<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(海军工程大学导航工程系 武汉 430033)

<sup>②</sup>(海军航空工程学院电子工程系 烟台 264001)

**摘要:** 目前模拟接收机的周期识别复杂、识别时间长, 而相关文献提出的算法在罗兰 C 天地波到达时间间隔小于  $50 \mu\text{s}$  时估计误差大。为了准确估计时间间隔小于  $50 \mu\text{s}$  的天地波到达时刻, 在 IFFT 频谱相除技术基础上提出天地波分别识别的新算法。在证明了方法可行性的基础上, 采用该算法仿真分析了天波以及地波自动识别的准确性。结果表明, 利用该算法, 天地波自动识别的准确率分别可达 99.6% 和 98.6% 以上, 相对 USCG 标准可改善信噪比 6dB。

**关键词:** 天地波识别; 罗兰 C; IFFT 频谱相除

**中图分类号:** TN961

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2009)05-1153-04

## A New Loran C Sky-Wave and Ground-Wave Identification Algorithm Based on IFFT Spectral Division

Zhu Yin-bing<sup>①②</sup> Xu Jiang-ning<sup>①</sup> Wang Hong-xing<sup>②</sup> Cao Ke-jing<sup>①</sup> Hu Dong-liang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Department of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

<sup>②</sup>(Department of Electronic Engineering, NAEL, Yantai 264001, China)

**Abstract:** For present analog Loran C receiver, it is very complicated and takes a long time to complete cycle identification. Moreover, estimate error when arriving time of sky-wave and ground-wave is less than  $50 \mu\text{s}$  under algorithms presented by some relative documents is intolerant. For estimating the arriving time of sky-wave and ground-wave exactly, a new algorithm for the detection is presented based on IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) spectral division. After proving its feasibility, veracity of arriving time for sky-wave and ground-wave is simulated. The results show that using the new algorithm, veracity of arriving time for sky-wave and ground-wave can get up to 99.6% and no less than 98.6% respectively, and signal to noise ratio (SNR) can be improved 6dB relative to the standard of USCG.

**Key words:** Sky-wave and ground-wave detection; Loran C; IFFT spectral division

### 1 引言

在天地波识别中, 为了保证罗兰C接收机测量精度, 要求用纯地波定位。而罗兰C接收机接收到的是天地波合成信号, 而且通常天波信号的幅度比地波幅度强得多。实际测量表明天波相对地波的延迟在  $35 \sim 500 \mu\text{s}$  之间<sup>[1]</sup>, 因此地波选择的时间一般不超过  $37.5 \mu\text{s}$ 。但是, 采样点位置的选择非常复杂: 太迟会带来很大的天波误差; 太早又会因为罗兰C脉冲在信号上升沿的采样点幅度不够而导致信噪比(SNR)降低, 在高连续波干扰(CWI)的地方, 选择合适的采样点尤为困难。避开天波干扰的传统方法是将采样点选在信号前沿  $30 \mu\text{s}$  正向过零点处。但由于接收机内采用窄带前端带通滤波器, 减少了  $30 \mu\text{s}$  过零处采样点的信号能量。因此, 一种具有潜力的解决天波问题的方法是接收机根据天波干扰环境的变化调

节到一个最佳的采样点, 将测量点调整到天波到来前的最后一个过零点使信号的能量得到充分地利用。在该方面, 文献[2-7]采用了IFFT频谱相除技术进行天地波自动识别, 文献[8,9]在FFT频谱相除技术的基础上提出利用MUSIC算法实现天地波自动识别。虽然上述文献的分析结果能够很好地自动识别天地波的到达时刻, 但是, 当天波相对地波的延迟小于  $50 \mu\text{s}$  时, 运用上述方法得到的结果误差将大大增加, 以至不能准确地估计出天地波的到达时刻。因此, 本文在已有的IFFT频谱相除技术的基础上, 提出利用可靠的天波估计实现小于  $50 \mu\text{s}$  间隔的地波到达时刻准确估计的一种新算法, 以实现天地波的自动识别。

### 2 IFFT 频谱相除技术

罗兰 C 接收机接收到的信号是由地波信号、天波信号、噪声以及干扰等组成的合成信号。为了使分析简单, 假定天波和地波具有完全相同的包络形状, 只是具有不同的幅度和时间上的延迟。因此, 在时域可以将接收到的合成信号表示

为

$$x_c(t) = x_g(t) + \sum_{n=1}^N k_n x_g(t - \tau_n) + i(t) \quad (1)$$

式中  $x_g(t)$  为地波信号(即需要的罗兰C信号),  $k_n$  为天波的幅度,  $\tau_n$  为天波相对于地波的延迟时间,  $i(t)$  为干扰和噪声的合并。对式(1)两边同时取傅里叶变换得到接收机接收到的信号的频域形式为

$$X_c(f) = X_g(f) \left[ 1 + \sum_{n=1}^N k_n \exp(j2\pi f \tau_n) \right] + I(f) \quad (2)$$

式中  $X_c(f)$ ,  $X_g(f)$  和  $I(f)$  分别为  $x_c(t)$ ,  $x_g(t)$  和  $i(t)$  的傅里叶变换。

设  $X_0(f)$  为罗兰 C 标准脉冲信号的频谱,  $k_g$  为与罗兰 C 信号幅度有关的常数。将式(2)得到的合成信号的频谱在频域除以标准罗兰 C 脉冲的频谱可得<sup>[2-7]</sup>

$$\frac{X_c(f)}{X_0(f)} = \frac{X_g(f)}{X_0(f)} \left[ 1 + \sum_{n=1}^N k_n \exp(j2\pi f \tau_n) \right] + \frac{I(f)}{X_0(f)} \quad (3)$$

对式(3)进行 IFFT 可得

$$F^{-1} \left[ \frac{X_c(f)}{X_0(f)} \right] = k_g \left[ \delta(t) + \sum_{n=1}^N k_n \delta(t - \tau_n) \right] + F^{-1} \left[ \frac{I(f)}{X_0(f)} \right] \quad (4)$$

由式(4)即可得到天波以及地波的到达时间。式中,  $t$  即为地波的到达时间,  $\tau_n$  为第  $n$  次天波相对地波的延迟时间。

### 3 算法设计与分析

#### 3.1 算法设计

文献[2-9]的仿真结果表明, 仅采用 IFFT 频谱相除技术进行一次处理在天地波的时间间隔小于  $50 \mu\text{s}$  时的估计结果误差较大, 尤其是对于地波到达时刻的估计会产生较大的误差, 导致无法选择正确的过零点以实现周期识别。为了在天地波的时间间隔小于  $50 \mu\text{s}$  的情况下实现天地波到达时刻的准确识别, 本文所设计的仿真算法流程图如图 1 所示。

具体实现步骤如下:

- (1)产生天地波及噪声混合信号;
- (2)对混合信号进行 IFFT 频谱相除, 根据结果估计天波的到达时刻以及天地波的强度比;
- (3)根据估计的强度比以及接收到信号的峰值估计地波的幅值, 进而在估计的天波到达时刻产生 20dB 强度的伪天波信号;
- (4)将混合信号减去伪天波信号, 消除天波干扰的影响;

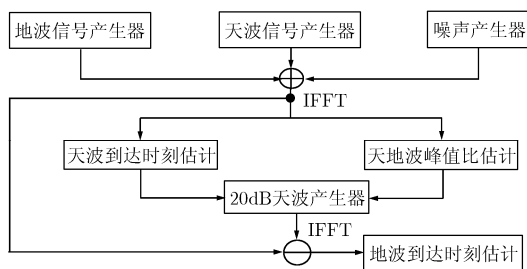


图 1 算法流程图

(5)将消除天波影响后的信号再次进行 IFFT 频谱相除, 从而准确地估计出地波的到达时刻。

#### 3.2 算法分析

罗兰 C 接收机实际接收的天波信号的强度大于地波信号的两倍以上, 即  $\text{SGR} \geq 6\text{dB}$  (SGR: 天波与地波峰值比)。美国海岸警卫队(United State Coast Guard, USCG)发布的接收机最低性能标准规定信噪比  $\text{SNR} \geq -10\text{dB}$ 。为了证明天波到达时刻估计的可靠性, 本文在  $\text{SGR} = 6\text{dB}$ , 天线输入端信噪比  $\text{SNR} = -16\text{dB}$ , 天地波时间间隔分别为  $30 \mu\text{s}$  和  $40 \mu\text{s}$  (天波到达时刻为  $130 \mu\text{s}$ ) 的条件下分别进行了 500 次独立的仿真, 结果都只有 2 次估计错误, 估计可信度为 99.6%, 且估计误差均为  $+5 \mu\text{s}$ 。两次的运行结果分别如图 2, 图 3 所示。

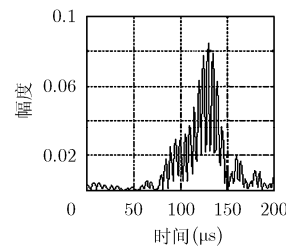


图 2 天地波时间间隔  $30 \mu\text{s}$  时的天波到达时刻估计

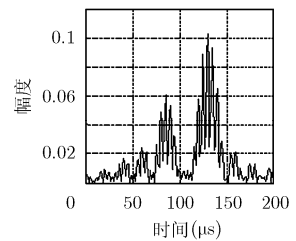


图 3 天地波时间间隔  $40 \mu\text{s}$  时的天波到达时刻估计

为了证明产生 20dB 伪天波的可行性, 即估计天地波幅值比的可行性, 本文对不同天地波时间间隔下不同幅度比天地波合成信号的幅度比进行了多次独立估计, 结果如表 1 所示。

由表 1 可见, 天地波时间间隔小于  $100 \mu\text{s}$  时, 估计误差基本都为负值, 即估计的结果偏低, 从而解算出的地波幅值比真实值大, 由此产生的伪天波信号比实际需求大, 因此, 流程图中的减法将使得消除天波影响后的混合信号中的 SGR 更高, 将更加有利于地波到达时刻的估计, 能够满足  $50 \mu\text{s}$  时间间隔以下天地波自动识别的需求。

### 4 性能仿真分析

根据 USCG 发布的接收机最低性能标准, 天地波幅值比 SGR 不能超过 12dB, 因此本文算法中产生的为天波信号选择为 20dB, 目的是在最差的条件下保证消除天波干扰后混合信号的  $\text{SGR} \leq -8\text{dB}$ , 以实现地波到达时刻的准确识别。

由于前面的分析已经说明天波到达时刻是可以可靠估计的, 为分析天地波时间间隔小于  $50 \mu\text{s}$  时的识别能力, 本文主要分析小于  $50 \mu\text{s}$  时间间隔时的地波识别能力。为此, 本文在天线输入端信噪比  $\text{SNR} = -16\text{dB}$ ,  $\text{SGR} = -8\text{dB}$  以及  $-10\text{dB}$ , 天地波时间间隔分别为  $30 \mu\text{s}$  和  $40 \mu\text{s}$  的条件下对地波到达时刻进行了多次独立仿真。

图 4, 图 5 是在  $\text{SGR} = -8\text{dB}$ , 天地波到达时间间隔分别为  $30 \mu\text{s}$  和  $40 \mu\text{s}$ , 地波到达时刻分别为  $100 \mu\text{s}$  和  $90 \mu\text{s}$  的仿

表 1 不同时间间隔下天地波幅度比估计

天地波间隔 ( $\mu\text{s}$ )	真实天地 波幅值比	估计天地 波幅值比	估计 误差
	1	0.9856	-0.0144
35	1.9953	1.5884	-0.4069
	3.9811	2.3179	-1.6632
40	1	1.0141	-0.0141
	1.9953	1.9096	-0.0857
	3.9811	3.3384	-0.6427
	1	1.0053	-0.0053
50	1.9953	1.7072	-0.2881
	3.9811	2.7523	-1.2288
60	1	0.9960	-0.0040
	1.9953	1.9568	-0.0385
	3.9811	3.5213	-0.4598
	1	1	0
100	1.9953	1.9783	-0.0170
	3.9811	3.8965	-0.0846
120	1	0.9980	-0.0020
	1.9953	2	0.0047
	3.9811	4.0020	0.0209

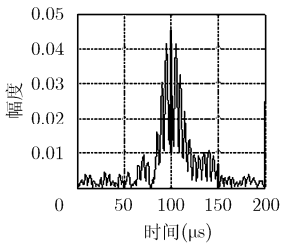


图 4 地波 100  $\mu\text{s}$  时刻到达, 间隔 30  $\mu\text{s}$  时的地波到达时刻估计

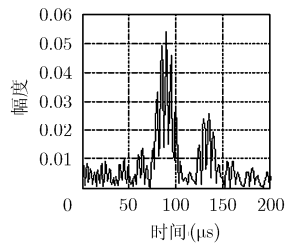


图 5 地波 90  $\mu\text{s}$  时刻到达, 间隔 40  $\mu\text{s}$  时的地波到达时刻估计

真结果; 图 6, 图 7 是在  $\text{SGR}=-10\text{dB}$ , 天地波到达时间间隔分别为 30  $\mu\text{s}$  和 40  $\mu\text{s}$ , 地波到达时刻为 100  $\mu\text{s}$  的仿真结果; 图 8 是在  $\text{SGR}=-15\text{dB}$ , 时间间隔分别为 30  $\mu\text{s}$ , 地波到达时刻为 90  $\mu\text{s}$  的仿真结果。

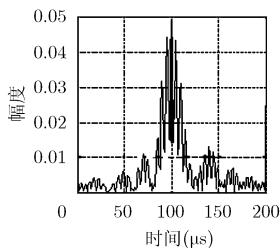


图 6 地波 100  $\mu\text{s}$  时刻到达, 间隔 30  $\mu\text{s}$  时的地波到达时刻估计

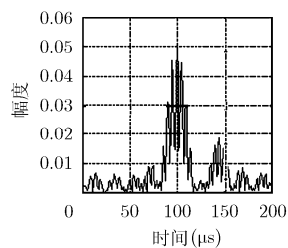


图 7 地波 100  $\mu\text{s}$  时刻到达, 间隔 40  $\mu\text{s}$  时的地波到达时刻估计

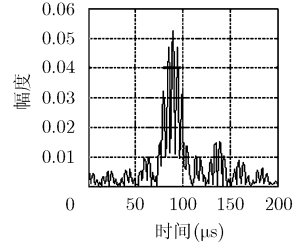


图 8 地波 90  $\mu\text{s}$  时刻到达, 间隔 30  $\mu\text{s}$  时的地波到达时刻估计

为了验证地波到达时刻估计的可靠性, 本文对图 4-图 8 的结果各进行了 500 次独立的仿真, 统计结果如表 2 所示。

表 2 不同条件的地波到达时刻估计

SGR(dB)	天地波 间隔( $\mu\text{s}$ )	估计 正确率	估计错误 次数	到达时间 误差( $\mu\text{s}$ )
-8	30	98.6%	7	-5(地波)
	40			
-10	30	99.0%	5	-5(地波)
	40			
-15	30	99.4%	3	-5(地波)

由表 2 可见,  $\text{SGR} \leq -8\text{dB}$  时, 地波到达时刻估计的准确率达 98.6% 以上, 且每次的估计误差都为 -5  $\mu\text{s}$ 。由前面分析可知本文算法能够保证消除天波干扰后的混合信号的  $\text{SGR}$  不超过 -8dB, 因此采用本文算法能够有效估计天地波的到达时刻, 实现天地波的自动识别。而且, 仿真发现在  $\text{SNR}=-20\text{dB}$  时, 估计准确性不低于 91%。

同时, 由前面分析可知, 天地波到达时刻的估计误差分别为 +5  $\mu\text{s}$  和 -5  $\mu\text{s}$ , 只有罗兰 C 信号的半个周期, 因而在此估计的基础上对估计时刻前后两个峰值运用峰值比或其他方法将能有效地实现零点调整, 进一步增强估计的准确性。

### 5 结束语

本文在已有的 IFFT 频谱相除技术基础上, 指出了目前存在的不足, 为 50  $\mu\text{s}$  时间间隔以下的天地波自动识别提出了可行的新方法, 并证明了本文所提出方法的可行性。仿真和数据分析表明, 本文方法对于天地波到达时刻的估计准确率分别高达 99.6% 和 98.6% 以上, 而且相对 USCG 发布的标准, 本文算法可改善信噪比 6dB。该方法简单易实现, 而且结合现有的峰值比等方法能够有效地实现过零点的调整, 增强估计的准确性。而且此方法同样适于时间间隔大于 50  $\mu\text{s}$  时的天地波自动识别。因此, 该算法对数字化罗兰 C 接收机天地波自动识别具有重要参考价值。

### 参考文献

[1] Radio Technical Commission for Marine Services, U.S. Federal Communication Commission. Minimum Performance Standards (MPS)-Marine Loran-C Receiving Equipment,

- Report of Special Committee No. 70, December 1977.
- [2] Mohammed A, Chemnitz H, and Last D. Full performance analysis of IFFT spectral-division technique for skywave identification in Loran-C receivers[C]. Proc. 31st Annual Convention and Technical Symposium, International Loran Association(ILA31), Washington, DC, 2002: 1-10.
- [3] Mohammed A and Last D. Loran-C skywave delay detection using ARMA algorithm[J]. *Electronic Letters*, 1998, 34(17): 1654-1655.
- [4] Mohammed A F and Last J D. Loran-C skywave delay detection using rational modelling techniques[C]. Sixth International Conference on Radio Receivers and Associated Systems, Bath, 1995: 100-104.
- [5] Mohammed A and Last D. IFFT technique for skywave detection in Loran-C receivers[J]. *Electronic Letters*, 2001, 37(6): 398-400.
- [6] 张田仓, 罗锐. IFFT 频谱相除技术在罗兰 C 接收机中的应用[J]. *导航*, 2004(3): 102-107.  
Zhang Tian-cang and Luo Rui. Usage of spectrum division technique in Loran-C receiver[J]. *Navigation*, 2004(3): 102-107.
- [7] 张田仓, 唐争. 用于罗兰 C 接收机天波识别的 IFFT 频谱相技术探讨[J]. *信息与电子工程*, 2004, 2(4): 274-278.  
Zhang Tian-cang and Tang Zheng. IFFT spectral-division technique for skywave identification receivers[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2004, 2(4): 274-278.
- [8] 胡东亮, 杨迎春, 范菊红. 基于 MUSIC 算法的罗兰 C 接收机天地波自动识别方法研究[J]. *海军工程大学学报*, 2006, 18(3): 7-9.  
Hu Dong-liang, Yang Ying-chun, and Fan Ju-hong. Loran-C receiver sky-wave detection based on MUSIC algorithms[J]. *Journal of Naval University of Engineer*, 2006, 18(3): 7-9.
- [9] 杨迎春, 杨新峰. 一种高分辨率的罗兰 C 接收机天波延迟估计技术[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(7): 295-298.  
Yang Ying-chun and Yang Xin-feng. A high resolution technique for Loran-C skywave delay estimation[J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(7): 295-298.
- 朱银兵: 男, 1978年生, 博士, 研究方向为无线电导航.  
许江宁: 男, 1964年生, 教授, 研究方向为惯性导航及GPS卫星导航.