

## 有效估计塔康测距信号多径时延的方法

田孝华 李睿 王维康  
(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

**摘要:** 该文利用塔康测距信号收发已知且能量集中的特点, 在原有的频谱相除方法的基础上, 提出采用功率谱密度函数并引入补偿因子进行频谱相除的方法, 对接收信号中多径时延进行估计。该方法首先利用功率谱密度函数与本地参考信号的频谱相除, 并通过补偿因子使带外噪声的能量不会因相除而得到很大加强; 再利用反傅里叶变换从接收信号中恢复有用信号的波形; 最后利用恢复的波形对多径时延进行估计。计算机仿真验证了算法的有效性。

**关键词:** 无线电导航; 测距信号; 塔康; 多径时延; 频谱相除

中图分类号: TN961

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2273-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01187

## An Efficient Time Delay Estimation Algorithm for Multipath Signal of Distance Signal in TACAN System

Tian Xiao-hua Li Rui Wang Wei-kang

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Based of known waveform, known period and concentrated energy of distance signal in TACAN system, an efficient time delay estimation algorithm for multipath signal of distance signal is presented in this paper, according to the former frequency spectral division algorithm. Firstly, the crosspower spectrum function is divided by frequency spectrum of referenced signal. And the energy of out-of-band noise is not enhanced via using compensation factor. Then, the useful signal is restored from receiving signal via IFFT. Finally, the delay is estimated from restored signal. Its effectiveness is verified with the simulation results.

**Key words:** Radio navigation; Distance signal; TACAN; Multipath delay; Frequency spectral division

### 1 引言

塔康是“战术空中导航”(TACTical Air Navigation)英文缩写“TACAN”的汉语译音名称。由于该系统的有效作用距离在近程范围内且只用于航空导航, 所以又称为航空近程导航系统。塔康系统是根据军事需求, 由美军从民用导航系统的甚高频全向信标(VOR)和测距器系统(DME)发展起来的。该系统把 DME 测距和 VOR 测向(测角)结合起来, 让 VOR 在原来的 U/V 频段提高到 DME 的 L 频段上工作, 以缩小工作在超高频波段的 VOR 全向信标的体积。塔康系统能够直观提供方位、距离指示, 并实现单台定位, 能够直接导出位置坐标。作为军用标准导航系统, 其主要功能是建立航线、归航、空中战术机动和作为位置坐标传感器。

塔康定位的基础是测距和测位。在国际民航目前采用的标准近程导航中采用两套独立的系统来分

别完成。测距利用 DME 测距系统, 它和塔康测距功能的信号体制相类似, 设备之间可以兼容; 测位采用 VOR(或 DVOR)系统, 其测角方法与塔康测位功能相类似, 但信号体制根本不同, 不能兼容。DME 和 VOR 是两个不同频段, 不同信号体制, 相互独立的单功能系统。而塔康测距、测位则不然, 它是在统一的频道和信号体制基础上来实现的。因而在系统中可以做到信道共用。塔康测距信号是以双脉冲形式传输的。如果在传输过程中出现多径干扰的存在, 接收设备在收到应答信号后就无法正确解算出飞机的距离; 而且, 多径干扰的存在, 会大大占用塔康系统的交通容量<sup>[1]</sup>。(塔康系统的交通容量是指一个塔康的地面台能够同时容纳与其配合工作实现极坐标定位的机载设备最大数。)

### 2 塔康系统测距基本原理

塔康系统是通过测量飞机距地面信标的距离, 获得以信标为参考点的圆位置线, 采用极坐标定位原理实现飞机的定位。距离测量采用“询问/回答”式脉冲测距原理, 又称二次雷达测距技术, 这种技术是通过对无线电脉冲信号在询问器和应答器之间

2009-09-08 收到, 2010-01-25 改回

陕西省自然科学基金项目(FJ08F06)资助课题

通信作者: 田孝华 xht65@sina.com

往返时间的测量获得距离信息的。其基本工作原理是机载设备的询问器发射询问脉冲,被塔康信标的应答器接收,经固定的时间延时,应答器向机上询问器发射回答信号。机上设备收到回答信号后,根据询问发射和回答接收之间的时间间隔,就可算出询问器和应答器之间的距离。脉冲测距系统由脉冲发射机和脉冲接收机两部分组成,原理如图 1,图 2 所示<sup>[2]</sup>。

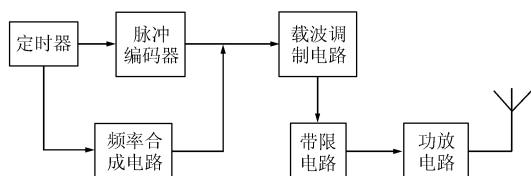


图 1 测距发射机

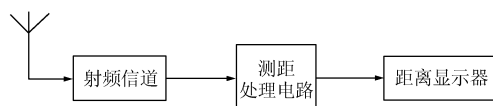


图 2 测距接收机

塔康地面信标发射的信号是射频脉冲编码信号,它包含 3 种功能信息:方位信息、距离应答信息、信标台识别信息。其中距离应答信号为测距器应答脉冲序列,采用脉冲对的形式,用于距离测量。

塔康信号标准中规定<sup>[1]</sup>,所有塔康信号的射频脉冲包络均应该是准钟形,在 0.5 电平其宽度为 3.5  $\mu\text{s}$ <sup>[3]</sup>,这是为了保证系统发射频谱指标和邻道抑制指标所必须的。因此,信号的表达式为

$$s(t) = e^{-\beta t^2} \quad (1)$$

其中  $\beta = -\frac{\ln 0.5}{1.75^2}$ 。

### 3 多径干扰参数估计的方法

#### 3.1 传统的参数估计方法<sup>[4-6]</sup>

在时域可以将接收到的合成信号表示为

$$x(t) = \alpha s(t) + \sum_{i=1}^n \beta_i s(t + \tau_i) + n(t) \quad (2)$$

其中  $x(t)$  是接收信号,  $s(t)$  是发射的原始信号,  $\alpha$  是直达波幅度衰减,  $\beta_i$  是多径信号幅度衰减,  $\tau_i$  是多径信号相对直达波的时延,  $n(t)$  是噪声。

将此接收信号通过 FFT 变换到频域,得

$$X(f) = \alpha S(f) + \sum_{i=1}^n \beta_i S(f) e^{-j2\pi f \tau_i} + N(f) \quad (3)$$

对式(3)变形如下:

$$X(f) = S(f) \left[ \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i \exp(-j2\pi f \tau_i) \right] + N(f) \quad (4)$$

由此可看出,多径信号与直达波之间在频谱上只有相位上的差异。则可考虑采用基于逆快速傅里叶变换(Inverted Fast Fourier Transform, IFFT)频谱相除技术进行时延估计。由于导航信号是收发已知的,在频域将得到的合成信号的频谱除以已知的标准发射信号的频谱,得到

$$\begin{aligned} \frac{X(f)}{S(f)} &= \frac{S(f)}{S(f)} \left[ \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i \exp(-j2\pi f \tau_i) \right] + \frac{N(f)}{S(f)} \\ &= \left[ \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i \exp(-j2\pi f \tau_i) \right] + \frac{N(f)}{S(f)} \end{aligned} \quad (5)$$

然后对式(5)进行 IFFT 得到多径时延的估计

$$F^{-1} \left[ \frac{X(f)}{S(f)} \right] = \left[ \alpha \delta(t) + \sum_{i=1}^n \beta_i \delta(t - \tau_i) \right] + F^{-1} \frac{N(f)}{S(f)} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,时延位置将会出现冲激峰。但是当信噪比不是很大时,噪声的影响不能忽略。式(6)等号右边第二项会对估计的结果造成较大影响,冲激峰会淹没在噪声信号的能量中。因此,本文引入互功率谱代替频谱进行相除。

#### 3.2 改进的参数估计方法

本文提出将传统方法中用接收信号频谱与参考信号频谱相除的方法,改进为采用接收信号与参考信号的互功率谱与参考信号频谱的共轭进行相除,再通过 IFFT 从接收信号中恢复有用信号的波形。采用互功率谱是为了利用信号与噪声之间不相关的性质来抑制噪声的影响<sup>[7]</sup>。根据互功率谱的定义,得

$$\begin{aligned} G_{12}(f) &= \alpha S(f) S^*(f) + \sum_{i=1}^n \beta_i S(f) S^*(f) e^{-j2\pi f \tau_i} \\ &\quad + S(f) N^*(f) \end{aligned} \quad (7)$$

由于信号与噪声不相关,式(7)中第 3 项等于零,则式(7)改写为

$$G_{12}(f) = \alpha S(f) S^*(f) + \sum_{i=1}^n \beta_i S(f) S^*(f) e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (8)$$

然后与本地参考信号频谱的共轭相除,得

$$\frac{G_{12}(f)}{S^*(f)} = \alpha S(f) + \sum_{i=1}^n \beta_i S(f) e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (9)$$

对式(9)做逆快速傅里叶变换,对有用信号的波形进行恢复。变换后得

$$f^{-1} \left( \frac{G_{12}(f)}{S^*(f)} \right) = \alpha s(t) + \sum_{i=1}^n \beta_i s(t + \tau_i) \quad (10)$$

式(10)是在理想情况下推导出的理论值。通过互功率谱与本地参考信号的频谱进行相除,可以有效抑制噪声,恢复出信号的波形<sup>[8,9]</sup>。但在实际应用中,由于信号的带宽很窄,本地信号的能量都集中在很窄的带宽里,而带外能量趋于零。因此,在频谱相除的过程中,带外噪声的存在会使相除后噪声的影

响变得很大,有用信号会淹没在噪声中,无法对信号波形进行有效的恢复。因此,本文提出在频谱相除过程中增加一个补偿因子,来抵消带外噪声的影响。具体方法如式(11)所示,根据互功率谱的定义,有

$$\frac{G_{12}(f)}{S^*(f) + \psi} = \alpha S'(f) + \sum_{i=1}^n \beta_i S'(f) e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (11)$$

其中  $\psi$  是补偿因子,它是一个与噪声功率有关的变量。 $S'(f)$  是信号频谱的近似值,它的近似程度与补偿因子的选取选取有关。补偿因子与噪声功率之间的关系如式(12)所示:

$$\psi = \begin{cases} \sqrt{\bar{P}_n}, & -10 \leq \text{SNR} < 0 \\ \sqrt{\bar{P}_n} \cdot (1 + \text{SNR} / 10), & 0 \leq \text{SNR} \leq 10 \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\bar{P}_n$  是噪声平均功率。因为在本地信号的频谱中,带外能量趋于零。所以在本地信号的频谱中增加一个补偿因子,使得在相除的过程中整个频带上都具有一定能量,从而使得带外噪声不会变得很大。虽然补偿因子也会对信号的频谱造成影响,但是,由于塔康信号是双脉冲信号,信号能量比较集中,因此补偿因子在带内的能量对信号的影响很小。根据接收信号中信号能量的不同,补偿因子也要做相应的调整。随着信噪比的增加,接收信号中信号的增强,补偿因子也随着增加。通过仿真验证,引入补偿因子后,在较低的信噪比条件下,依然可以较好地恢复出接收信号波形。

## 4 计算机仿真

假设接收信号由直达波信号和多径信号组成。直达波信号的幅度设为1,多径信号的幅度为0.787,多径信号相对直达波的延迟为4.2  $\mu\text{s}$ 。系统中的噪声为加性高斯白噪声,采样率为10 MHz(采样间隔0.1  $\mu\text{s}$ )。

### 4.1 仿真验证本文方法的有效性

信噪比取0 dB,图3所示为接收信号的波形。可以看出,噪声对接收信号波形的影响很大。

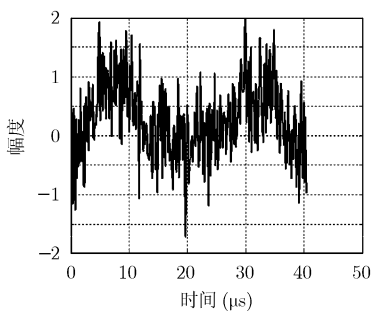


图3 接收信号波形

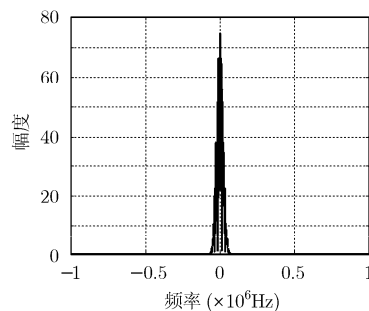


图4 互功率谱密度

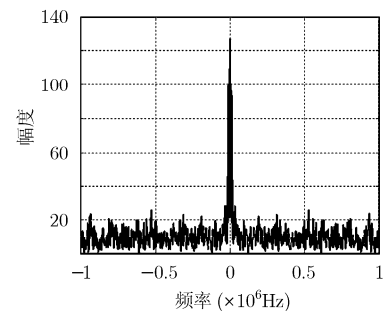


图5 没有补偿因子时相除后的输出波形

图4所示是互功率谱密度函数的输出波形。可以看出,由于信号与噪声不相关,函数能量基本上是接收信号与本地参考信号相关产生的,大部分都集中在带内。图5所示是没有补偿因子的情况下互功率谱函数与本地参考信号在频谱相除后的输出波形。可以看出,由于本地参考信号带外能量趋于零,虽然互功率谱函数带外能量较小,但是相除后带外噪声的能量被大大增强了,严重影响了对有用信号波形的恢复。

图6所示是有补偿因子的情况下互功率谱函数与本地参考信号在频谱相除后的输出波形。可以看出,由于引入的补偿因子,使得整个频带上都有能量分布,在相除后,带外噪声能量得到了有效的抑制,没有被放大的情况。图7所示为通过本文方法恢复的有用信号波形。从图中可以看出,塔康信号的双脉冲峰以及每个脉冲峰的多径波形已经得到有效的恢复。虽然带外噪声的影响仍然存在,但其能量与有用信号相比已经小了很多。当然,补偿因子的引入会导致一些波形的失真,但由于塔康信号能量集中,这样的失真对时延估计的影响比较小。因此,利用图中A、B两点就可以估计出多径时延,说明利用本文所提的带补偿因子的互功率谱相除法可以有效抑制噪声,估计有用信号中的多径时延。

### 4.2 不同信噪比下的估计性能

信噪比分别取-10 dB, -5 dB, 0 dB和5 dB,根据本文所提算法,对接收信号中信号的波形进行恢复。恢复后的波形分别如图8、图9、图10、图11所示。

从以上4幅图可以看出,引入补偿因子以后,有效地抑制了带外噪声的能量,可以较准确地恢复信号的波形,估计出信号中的多径时延。

## 5 结束语

本文利用塔康信号收发已知且能量集中的特点,在原有的频谱相除算法基础上,提出通过互功率谱进行频谱相除来恢复信号波形。并提出引入补

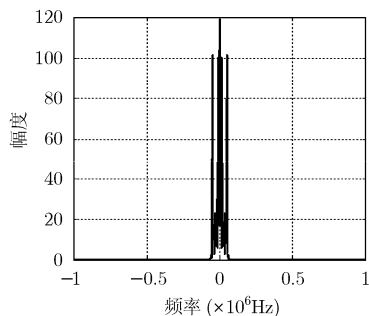


图 6 有补偿因子时相除后的输出波形

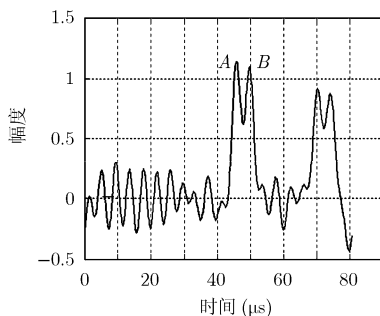


图 7 频谱相除后恢复的波形

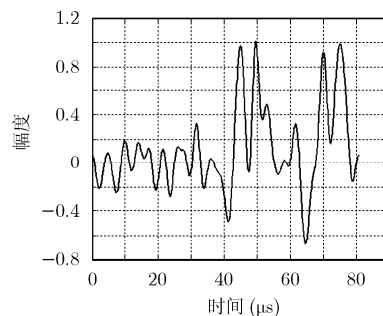


图 8 信噪比-10 dB 时恢复的波形

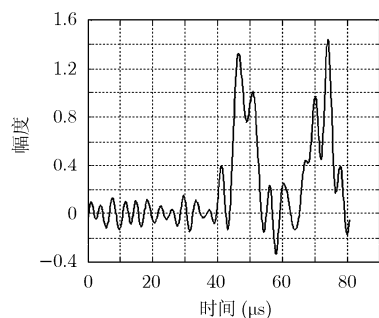


图 9 信噪比-5 dB 时恢复的波形

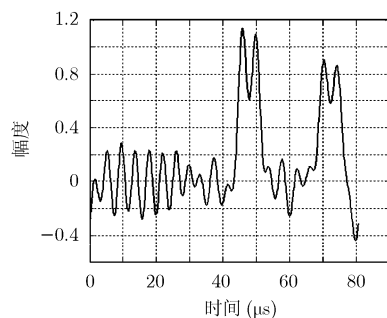


图 10 信噪比 0 dB 时恢复的波形

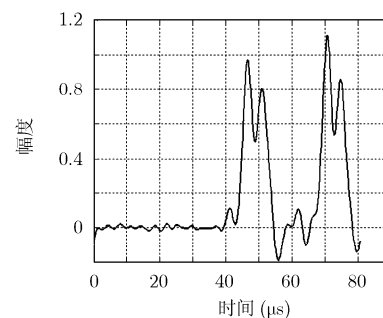


图 11 信噪比 5 dB 时恢复的波形

偿因子,以减少在频谱相除过程中带外噪声能量的影响。通过仿真验证,改进后的算法能有效抑制噪声,恢复塔康信号的波形,准确估计出有用信号中的多径时延。

### 参考文献

- [1] 张忠兴, 李晓明, 张景伟等. 无线电导航理论与系统[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998, 第 7 章.
- [2] 吴德伟. 现代航空导航系统[M]. 西安: 空军工程大学电讯工程学院, 2008, 第 6 章.
- [3] 李一兵, 伊立峰, 叶方等. 在特定场地条件下塔康信号传播特性的分析[J]. 信息技术, 2005, (6): 38-40.  
Li Yi-bing, Yi Li-feng, and Ye Fang. Tacan signal's analysis of the propagation characteristic under the condition of specific place[J]. *Information Technology*, 2005, (6): 38-40.
- [4] 于忠, 郭兴阳, 张岳彤等. 着陆导航信道多径时延估计[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(6): 1464-1467.  
Yu Zhong, Guo Xing-yang, and Zhang Yue-tong. Multipath time delay estimation for landing navigation channel[J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(6): 1464-1467.
- [5] Mohammed A F. Effect of Loran-C signal parameters on skywave delay estimation of IFFT technique[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(14): 1091-1093.
- [6] 张田仓, 唐争. 用于罗兰 C 接收机天地波识别的 IFFT 频谱相除技术探讨[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.
- [7] 朱银兵, 许江宁, 王红星等. 基于 IFFT 频谱相除的罗兰 C 天地波识别新算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1154-1156.  
Zhu Yin-bing, Xu Jiang-ning, and Wang Hong-xing, et al. A New Loran C sky-wave and ground-wave identification algorithm based on IFFT spectral division[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1154-1156.
- [8] 马晓红, 陆晓燕, 殷福亮. 改进的互功率谱相位时延估计方法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(1): 53-59.  
Ma Xiao-hong, Lu Xiao-yan, and Yin Fu-liang. Time delay estimation by using modified crosspower spectrum phase technique[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(1): 53-59.
- [9] 吴海荣, 刘仁志. 一种基于 FFT/IFFT 技术的罗兰 C 天地波识别新算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(3): 317-320.  
Wu Hai-rong and Liu Ren-zhi. A new algorithm for sky-wave and ground-wave detection of loran C based on FFT/IFFT technology[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2009, 24(3): 317-320.

田孝华: 男, 1965 年生, 教授, 研究方向为导航信号处理、无线电导航与定位。

李睿: 男, 1981 年生, 硕士, 研究方向为无线电导航。

王维康: 男, 1985 年生, 硕士, 研究方向为无线电导航。