

# 基于倒谱域相关的时差/频差联合估计算法

耿志辉<sup>1</sup>, 柏如龙<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 63891 部队, 河南 洛阳 471003;

2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

**摘要** 提出一种基于倒谱域相关的时差/频差联合估计算法, 同时估计双传感器平台接收到的 2 路信号中的时延分量和频偏分量。与传统的基于二(四)阶相关复模糊函数法相比, 新算法借鉴时域卷积等价于频域乘积的思想, 将频域卷积等价于倒谱域相关, 将时差频差二维搜索问题转化为先频差、后时差的 2 个一维搜索问题, 由此实现时差/频差的快速联合估计。

**关键词** 倒谱域相关; 复模糊函数; 时差; 频差

中图分类号 TN967

文献标识码 A

文章编号 1003-3106(2007)11-0026-02

## Joint Estimation of TDOA and FDOA Based on Cepstrum Field Correlation

GENG Zhi-hui<sup>1</sup>, BAI Ru-long<sup>2</sup>

(1. The Unit 63891 of PLA, Luoyang He'nan 471003, China;

2. The 54th Research Institution of CETC, Shijiazhang Hebei 050081, China)

**Abstract** A New algorithm for joint estimation of TDOA/FDOA has been proposed based on cepstrum field correlation in this paper. Meanwhile estimation of time delay and frequency shift between two signals received by two sensors platform are performed. Compared with traditional CAF methods based on second order (or fourth order) correlation, the new algorithm uses time domain convolution's equivalence to frequency domain production for reference, which makes frequency domain convolution equivalent to cepstrum domain correlation and converts TDOA/FDOA 2-dimension search problem into two 1-dimension search problems of FDOA first and then TDOA. Thus the fast joint estimation for TDOA/FDOA can be implemented.

**Key words** cepstrum field correlation; complex ambiguity function; time difference of arrival; frequency difference of arrival

### 0 引言

升空侦察平台具有覆盖范围广、限制少和机动灵活等诸多优点, 在未来战争中其作用日益增强。由于地面辐射源与 2 个升空平台之间存在相对运动, 导致接收到的 2 路信号中不仅含有时延分量, 同时还含有频偏分量, 为了能够同时精确地测量这 2 个分量, 就需要进行时差和频差的联合估计。

传统的基于二(四)阶相关复模糊函数法, 其基本原理都是通过滑动调整时延分量, 仅当时延对齐时才能检测到代表频偏分量的离散谱线, 因此这 2 种方法都需要进行二维搜索, 计算量大, 计算效率低。从分析双传感器观测信号的频谱结构出发, 提出一种快速联合估计算法。

### 1 算法原理

#### 1.1 信号模型

假设  $\{S(t)\}$  为感兴趣的零均值平稳信号, 双传

感器观测数据样本表示为:

$$\begin{cases} X(n) = S(n) + W_1(n) \\ Y(n) = B \cdot S(n - \Delta D) \exp\{j2\pi\Delta f(n - \Delta D)/f_s + \phi\} + W_2(n), n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $B$  为双传感器观测数据间的相对增益偏差;  $\phi \in [-\pi, \pi]$  为相应的相移;  $\Delta D$  为到达时差;  $\Delta f$  为到达频差;  $f_s$  为采样率;  $W_1(n)$ 、 $W_2(n)$  为加性高斯平稳白噪声, 均值为零, 且与信号互相独立。

#### 1.2 理论推导

假设信号  $S(t)$  的傅里叶变换表示为  $F(j\omega)$ ,

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(t) \exp(-j\omega t) dt = F(j\omega), \quad (2)$$

则信号  $S(t - \Delta t) \exp(j2\pi\Delta f(t - \Delta t))$  的傅里叶变换为:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} S(t - \Delta t) \exp(j2\pi\Delta f(t - \Delta t)) \exp(-j\omega t) dt \stackrel{t' = t - \Delta t}{=} \\ & \exp(-j(\omega\Delta t)) \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \exp(-j(\omega - 2\pi\Delta f)t) dt = \\ & \exp(-j\omega\Delta t) \cdot F(j(\omega - 2\pi\Delta f)). \end{aligned} \quad (3)$$

收稿日期: 2007-05-21

离散样本序列  $S(n)$  的傅里叶变换为  $F(j\omega)$ ,  $S(n - \Delta D) \exp\{j2\pi\Delta f(n - \Delta D)/f_s + j\phi\}$  的傅里叶变换为:

$$H(j\omega) = F(j(\omega - 2\pi\Delta f/f_s)) \cdot \exp(j\phi - j\omega\Delta D).$$

显然二者是相关的,当  $F(j\omega)$  与  $H(j\omega)$  的相对滑动量为  $2\pi\Delta f/f_s$  时,二者的相关值具有一定的峰值输出。

$$\begin{aligned} F(j\omega) \cdot H^*(j(\omega + 2\pi\Delta f/f_s)) = \\ F(j\omega) \cdot F^*(j\omega) \cdot \exp(j(\omega + 2\pi\Delta f/f_s)\Delta D - j\phi) = \\ F(j\omega) \cdot F^*(j\omega) \cdot \exp(j(\omega\Delta D + \phi')). \end{aligned}$$

式中,  $\phi' = 2\pi\Delta f/f_s \Delta D - \phi$ 。对式(4)的输出进行谱分析,即可获得对应于时差  $\Delta D$  的离散谱线。

在搜索  $F(j\omega)$  与  $H(j\omega)$  的相对滑动量时,借鉴时域卷积等价于频域乘积的思想,通过计算  $F(j\omega)$  与  $H(j\omega)$  的频域乘积代替  $F(j\omega)$  与  $H(j\omega)$  的卷积运算,检测输出峰值位置,快速估计频偏分量  $\Delta f$ 。由于这里是对时域样本序列的连续 2 次 FFT 运算,可以采用倒谱域的相关运算实现到达频差  $\Delta f$  的估计,其原理框图如图 1 所示。

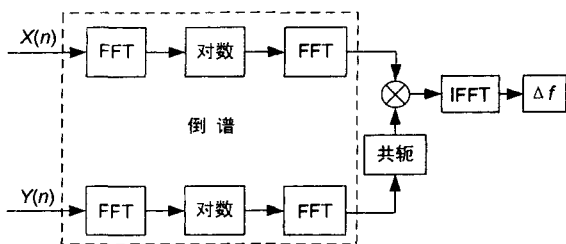


图 1 倒谱域相关估计频差

在估计出到达频差  $\Delta f$  后,有 2 种方法估计到达时差  $\Delta D$ :①根据估计的到达频差  $\Delta f$ ,调整  $F(j\omega)$  与  $H(j\omega)$  对齐,对式(4)的输出进行谱分析,检测代表到达时差  $\Delta D$  的离散谱线;②根据估计的到达频差  $\Delta f$ ,对 2 路时域信号进行频偏补偿,频域对齐后再估计时差  $\Delta D$ 。

### 1.3 性能分析

假设图 1 中计算 IFFT 时的序列长度为  $N$ ,采样率为  $f_s$ ,则到达频差  $\Delta f$  的估计精度为  $f_s/(2N)$ 。到达时差  $\Delta D$  的估计精度为  $T_s/2$ ,其中  $T_s$  为采样间隔。从这里可以看出时差与频差的估计精度是互相制约的,提高采样率  $f_s$ ,则可减小采样间隔  $T_s$ ,提高时差估计精度;而采样率的提高,在序列长度  $N$  一定的条件下,将会导致频差  $\Delta f$  估计精度的下降。

因此需要综合考虑  $N$ 、 $f_s$  参数的选择,使其同时满足  $\Delta D$ 、 $\Delta f$  的精度要求。

## 2 仿真结果

仿真条件设置如下:信号调制样式为 QPSK,中心频率  $f_c = 140$  MHz,信息码速率  $f_b = 6$  Mbps,采样率  $f_s = 60$  Msps,信号到达时差  $\Delta D = 800 T_s$ ,信号到达频差  $\Delta f = 8\ 192$  Hz,2 路信号的输入信噪比分别为  $SNR_1 = 5$  dB、 $SNR_2 = -10$  dB。截取  $N = 65\ 536$  点的样本序列进行倒谱域的相关运算,估计到达频差,结果如图 2 所示。

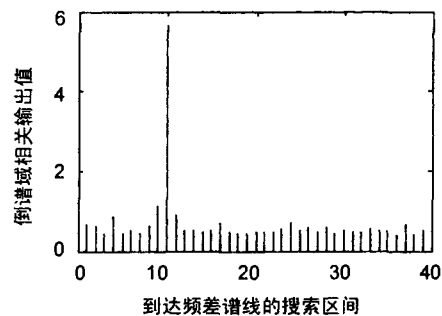


图 2 到达频差估计结果

图 2 中输出峰值位置对应的序号为 10,由此计算出到达频差的估计值  $\Delta f_e = 9f_s/N = 8\ 239.75$  Hz,估计偏差为 47.75 Hz。利用估计的频差可以分别在时域或频域对 2 路信号进行频偏调整后,再估计到达时差。在时域进行频偏调整是利用估计的到达频差  $\Delta f_e$  对一路信号进行变频,实现频谱对齐后的时差估计结果如图 3 所示。

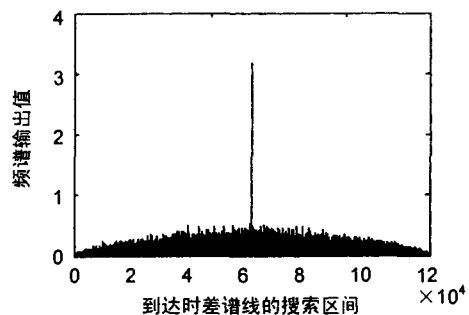


图 3 时域实现频谱对齐估计到达时差

图 3 中检测出的峰值位置为 64 735,由此计算出到达时差  $\Delta D_e = 65\ 536 - 64\ 735 = 801 (T_s)$ ,估计偏差为  $1 T_s$ 。

(下转第 58 页)

行测试仪表硬件设计时,需选择量化间隔小,即量化位数高的 ADC 模块。

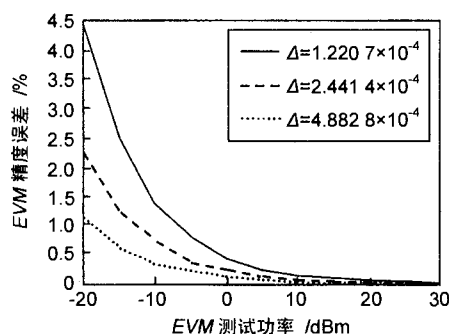


图2 量化间隔和信号功率对 EVM 精度误差的影响

在量化位数等于 14、量化间隔等于  $1.2207 \times 10^{-4}$  的条件下, EVM 不确定度与信号功率和 EVM 测量值的变化关系曲线如图 3 所示。可以看出,随着发射功率的提高, EVM 测试不确定度递减。待测发射机的 EVM 指标越小,其测量不确定度越大。

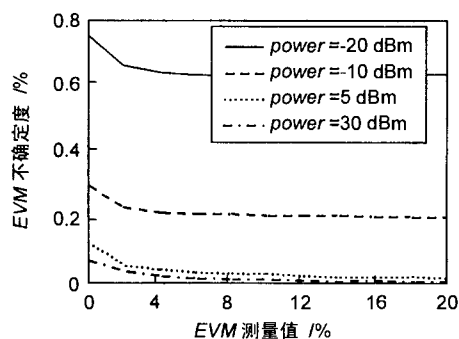


图3 EVM 不确定度变化曲线

(上接第 27 页)

### 3 结束语

介绍了一种基于倒谱域相关的时差/频差联合估计算法,理论分析及实验仿真表明,该算法能够将二维搜索问题转化为 2 个一维搜索问题,快速实现时差频差的联合高精度估计,且算法对输入信号的调制样式及 2 路增益偏差都具有较强的适应性。

#### 参考文献

- [1] 吴大正. 信号与线形系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

### 5 结束语

本文从无线发射机 EVM 测试的概念、模型出发,结合 EVM 测试算法,给出了不确定度分析模型,并具体分析了 EVM 误差产生来源,从而确定了影响 EVM 不确定度的因素。根据 EVM 不确定度算法,量化分析了主要因素对 EVM 测试不确定度的影响。最后,搭建仿真平台,仿真结果显示出各因素对 EVM 测试不确定度影响的变化曲线。为分析和评价 EVM 测量结果的可信程度提供了可靠的理论分析,具有一定的实际指导意义。

#### 参考文献

- [1] 金磊,王冰,李春媛,等. 基于迭代的时分同步码分多址系统终端误差矢量一致性测试算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006(2): 253 - 258.
- [2] 范秀利,郑建宏,陈莉. TD-SCDMA 的 EVM 测试及分析[J]. 重庆邮电学院学报, 2005(2): 156 - 159.
- [3] 陆秋捷,郑建宏,聂能. TD-SCDMA 终端发射调制质量指标的研究[J]. 重庆邮电学院学报, 2005(5): 541 - 546.
- [4] POTTER C. Uncertainty and Design Budgets Applied to Error Vector Magnitude (EVM) for Digital Modulation Systems [J]. IEEE, 2002(2): 103 - 109.
- [5] JJF1059 - 1999. 测量不确定度的评定与表示[M]. 北京: 中国计量出版社, 1999.
- [6] Manufacturing Part Numbers: E4440 - 90286. Specifications Guide. Agilent Technologies PSA Series Spectrum Analyzers[S].

#### 作者简介

李云鹏 女, (1981 - ), 宁夏大学在读硕士研究生。研究方向: 无线通信系统。

- [2] SHIN D C, NIKIAS C L. Complex Ambiguity Functions Using Nonstationary Higher Order Cumulant Estimates [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1995, SP - 43(11): 2649 - 2664.
- [3] NILCHI A R N, MATHEWS V J. An Efficient Algorithm for Joint Estimation of Differential Time Delays and Frequency Offsets[C]. Proc. ICASSP, 1992: 309 - 312.
- [4] 朱朝晖. 时差定位原理及其应用[J]. 无线电工程, 2006, 36(8): 51 - 52.
- [5] 齐晓东, 刘志文, 徐友根. 时差频差联合估计算法研究[J]. 无线电通信技术, 2006, 32(1): 17 - 18.

#### 作者简介

耿志辉 男, (1974 - ), 中国人民解放军 63891 部队工程师。主要研究方向: 通信对抗、数字信号处理。