

基于相参脉冲时频估计的到达时间差精确估计算法研究

龚享依 杨广平

(南京电子技术研究所 南京 210013)

摘要: 在介绍了利用到达时间差进行多站无源定位的方法后, 该文在高精度定位要求下讨论了现有到达时间差估计方法, 针对相参脉冲雷达信号提出了一种简化的时频相关方法: 频率补偿到达时间差估计算法, 避免了频率-时间二维搜索计算。这种方法具有估计精度高、计算量小、适用条件宽的优点。仿真试验验证了上述结论。

关键词: 无源定位; 到达时间差; 时频相关; 频率补偿

中图分类号: TN971

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1058-03

New Time-Frequency Algorithm for the Estimation of Time Difference of Arrival for Coherent Pulses

Gong Xiang-yi Yang Guang-ping

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: A new algorithm is proposed for Time Difference of Arrival(TDOA) estimation from a train of coherent pulses in additive Gaussian noise, named it as 'frequency compensation TDOA estimation'. It is shown to be a algorithm with small estimation error, small computation and good applicability. Simulations are given to support these conclusion.

Key words: Passive emitter location; Time Difference of Arrival(TDOA); Time-frequency correlation; Frequency compensation

1 前言

利用多个观测站接收目标辐射源的信号, 通过估计各个观测站接收信号之间的到达时间差, 可以完成对目标辐射源的定位^[1]。假设待定的辐射源位置为 (x, y, z) , 其发射信号到主站 (x_0, y_0, z_0) 和副站 (x_i, y_i, z_i) 的到达时间差 ξ_i 的表达式为

$$\xi_i = \left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} - \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \right) / c + v_i \quad (1)$$

其中 c 电磁波传播速度, 一般取值为 3×10^8 m/s, v_i 为各个到达时间差的测量误差。对于目标的三维定位, 在满足可观测条件下, 至少需要 4 个观测站才能解算出目标辐射源的位置^[1,2]。为了提高对目标辐射源的定位精度, 通常可以采用两种途径: 合理配置各个观测站的几何位置, 提高到达时间差的估计精度。由于受到地理环境限制与通信距离限制, 观测站的几何位置受到一定的限制。如果采用新的到达时间差估计算法, 提高其估计精度, 就可以提高定位精度。因此如何从信号中得到高精度的到达时间差估计值是这一类定位方法的关键技术。

如果对各个接收站的中频信号进行处理, 利用各个观测站接收信号进行相关, 可以得到更高精度的到达时间差估计结果, 但是考虑到各个接收信号的多普勒频率差, 可能会影响这种方法的估计精度。由此考虑到利用时间-频率二维相关

的方法, 同时估计到达时间差和多普勒频率差, 这种方法具有两个优点: (1)由于考虑了信号之间的频率差的影响, 得到的时间差估计精度可以提高; (2)利用得到的多普勒频率差估计值, 可以完成对目标辐射源速度的估计, 不但能够对其定位, 而且可以完成对其跟踪。但是时频相关估计方法需要进行二维搜索计算, 在工程实践中难以满足实时性要求。针对相参的脉冲雷达信号, 分析其信号形式后, 论文提出了首先进行频率差估计, 在频率补偿后, 利用相关方法得到到达时间差的估计值。

论文第 2 节讨论了接收到的雷达信号的数学模型, 讨论了现有的 3 种到达时间差估计方法, 并对其进行了简单的分析; 第 3 节针对相参雷达信号讨论了频率补偿的到达时间差估计方法, 并分析了这种方法的特点; 第 4 节进行了仿真试验验证; 最后终结全文。

2 信号数学模型与相关估计方法分析

考虑相参雷达脉冲串信号(论文不考虑脉内调制的情况, 仅讨论脉冲多普勒雷达的信号形式), 目标辐射源发射的信号经各个观测站的接收器的带通滤波、下变频等处理得到中频信号, 对各个脉冲宽度内进行采样得到

$$z_i(n + Kp) = A_i(n + Kp - \tau_i) e^{j(\phi_0 + 2\pi(f_c + f_{dt})(n + Kp - \tau_i)\Delta)} + \varepsilon_i(n + Kp), \\ n = 0, 1, \dots, N_s - 1, \quad p = 0, 1, \dots, P - 1, \quad i = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

其中下标 i 为第 i 个观测站对应的参数, τ_i 为接收信号与发射信号的延时, Δ 为采样间隔 $\Delta = 1/f_s$, N_s 为每个脉冲内的采样数据的数目, P 为观测期间的脉冲个数, $A(n + Kp)$ 为第 p 个脉冲的幅度, ϕ_0 为整个观测期间恒定的初始相位, K 为脉冲周期 T_r 对应的采样数, f_c 为信号的中心频率, f_d 为接收信号的多普勒频率, 假设 ε 为复高斯白噪声, 方差为 σ^2 。因为信号从辐射源到接收器只进行了单程传播, 可以认为接收到的雷达相参脉冲信号的信噪比较高, 一般大于 5dB^[3]。

传统的到达时间差估计方法是通过测量目标辐射源到达各个观测站的时间得到到达时间差, 针对雷达信号, 一般采用测量它的视频信号的上升沿或者下降沿得到其到达时间, 然后比较各个副站与中心站的到达时间, 得到到达时间差。这种方法具有测量方法简单、工程实现容易的特点, 但是存在以下缺点: (1) 到达时间差的测量精度不够高, 不能够满足高精度定位的要求; (2) 不适用于缓慢上升沿的雷达信号的到达时间差; (3) 没有充分利用接收信号的信息, 如各个观测站接收信号的多普勒频率差。

如果对各个观测站的接收信号直接进行时间相关, 可以通过搜索相关函数的最大值估计到达时间差, 具体表达式为

$$\hat{\xi}_i = \arg \max_{\xi_i} \left| \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{N_s-1} (z_i^*(n + Kp - \xi_i) z_0(n + Kp)) \right|, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

其中*表示复数共轭, $|\cdot|$ 为取模计算。如果副站的接收信号 $z_i(n + Kp)$ 与主站的接收信号 $z_0(n + Kp)$ 之间没有多普勒频率差, 根据参数估计理论, 在高斯白噪声的条件下, 利用式(3)可以得到到达时间差的最优估计^[4,5]。但是由于各个观测站的几何位置不同, 空中运动的目标辐射源与各个观测站的径向速度也不同, 导致式(2)中的多普勒频率 f_{di} 也不同, 从而使得利用式(3)的到达时间差估计精度下降^[6]。例如对于 1000kHz 的多普勒频率差, 相参脉冲信号长度为 1ms 时, 如果利用式(3), 在真实的到达时间差处的相关值达到最小, 通过仿真计算, 其到达时间差估计误差高达 100ns。

为了得到更好的估计结果, 在考虑多普勒频率差的情况下, 通常采用时频相关方法, 通过在频率域和时间域搜索最大值, 其具体的计算公式为

$$\left(\hat{\xi}_i, \Delta \hat{f}_{di} \right) = \arg \max_{\xi_i, \Delta f_{di}} \left| \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{N_s-1} \left(z_i^*(n + Kp - \xi_i) e^{-j2\pi \Delta f_{di} (n + Kp - \xi_i) \Delta} \cdot z_0(n + Kp) \right) \right|, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

其中 Δf_{di} 为多普勒频率差。根据参数估计理论, 在高斯白噪声的条件下, 利用式(4)可以得到到达时间差的最优估计^[4,5]。利用式(4)对接收信号进行时频相关, 不但可以得到观测站接收信号的到达时间差估计值 $\hat{\xi}_i$, 而且可以估计这些信号之间的多普勒频率差 $\Delta \hat{f}_{di}$, 使得系统不但可以完成定位功能, 而且可以估计目标辐射源的速度, 从而完成对目标的定位和跟踪。但是在式(4)中, 需要进行二维的搜索计算, 当参数估计

精度比较高时, 搜索步长较小, 计算量比较大, 很难满足实时要求(在论文的第3节将对其进行定量分析)。

3 频率补偿到达时间差估计算法

如式(2)所示, 各个观测站接收到的单一雷达相参脉冲信号具有以下两个特点: (1) 接收信号的载频不变, 多普勒频率变化微小, 所以可以认为信号中心频率不变; (2) 接收信号为包络 $A_i(n + Kp - \tau_i)$ 与正弦信号的乘积, 频率差与时间差并没有耦合现象。根据这两个特点, 可以首先估计出 $z_i(n + Kp)$ 和 $z_0(n + Kp)$ 的频率差 $\Delta \hat{f}_{di}$, 然后对 $z_i(n + Kp)$ 进行频率补偿, 进而利用简单的时间域相关方法得到到达时间差估计值 $\hat{\xi}_i$ 。

根据以上思路, 频率补偿到达时间差估计算法的具体步骤如下:

- (1) 估计 $z_i(n + Kp)$ 和 $z_0(n + Kp)$ 的频率差 $\Delta \hat{f}_{di}$ 。
- (2) 利用 $\Delta \hat{f}_{di}$ 对 $z_i(n + Kp)$ 进行频率补偿, 得到新的信号 $z_i^c(n + Kp)$ 。
- (3) 利用时间相关方法, 计算 $z_i^c(n + Kp)$ 和 $z_0(n + Kp)$ 的相关函数, 通过插值方法得到到达时间差的估计值。

下面对算法的各步骤进行说明。在算法的第(1)步中, 可以采用频率相关的方法计算两个信号的频率差, 其计算公式为

$$\Delta \hat{f}_{di} = \arg \max_{\Delta f_{di}} \left| \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{N_s-1} \left(z_i^*(n + Kp) \cdot e^{-j2\pi \Delta f_{di} (n + Kp) \Delta} z_0(n + Kp) \right) \right| \quad (5)$$

在第(1)步中同样可以采用单独估计信号频率, 然后计算频率差的方法。文献[7]提出了相参脉冲信号的载波频率精确估计算法, 其估计精度可以达到赫兹数量级, 实测数据验证了该算法的有效性。

在第(2)步中, 利用式(5)的频率差估计值 $\Delta \hat{f}_{di}$ 对 $z_i(n + Kp)$ 进行频率补偿, 得到新的信号 $z_i^c(n + Kp)$, 其计算公式为

$$z_i^c(n + Kp) = z_i(n + Kp) e^{-j2\pi \Delta \hat{f}_{di} (n + Kp) \Delta} \quad (6)$$

在第(3)步中, 利用简单的时间相关方法, 对频率补偿后的信号进行相关计算, 得到到达时间差的估计值:

$$\hat{\xi}_i = \arg \max_{\xi_i} \left| \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{N_s-1} \left(z_i^c(n + Kp - \xi_i) z_0(n + Kp) \right) \right| \quad (7)$$

在对离散信号进行处理时, 由于受到采样间隔的限制, 会出现栅栏效应, 所以对得到的相关函数进行插值处理, 可以得到更好的估计结果^[8]。

由于频率补偿到达时间差估计算法单独对频率差和时间差进行估计, 只需要两次一维搜索计算。假设频率搜索次数为 N_f , 时间差搜索次数为 N_t 。在算法的第(1)步需要 $2N_f PN_s$ 次乘法计算和 $N_f (PN_s - 1)$ 次加法计算; 在算法的第(2)步需要 PN_s 次乘法计算; 第(3)步需要 $N_t PN_s$ 次乘法计算和 $N_t (PN_s - 1)$ 次加法计算; 算法计算量主要集中在算法

的第(1)步和第(3)步, 总共大约为 $2N_fPN_s + N_tPN_s$ 次乘法计算, $N_fPN_s + N_tPN_s$ 次加法计算。如果采用式(4)时间频率相关的方法, 需要 $2N_fN_tPN_s$ 次乘法计算和 $N_fN_t(PN_s - 1)$ 加法计算。例如频率搜索次数为 100, 时间差搜索次数为 100, $P = 10$, $N_s = 200$ 的情况下, 本文算法一共需要 3×10^5 乘法计算、 10^5 加法计算, 而时频相关算法需要 2×10^7 次乘法计算、 10^7 次加法计算。频率补偿算法的计算量明显小于时频相关算法。

4 仿真试验

为了验证频率补偿到达时间差估计算法的可行性, 设计仿真试验, 仿真算法与信号的信噪比、多普勒频率差、脉冲个数之间的关系, 并且与间接视频估计方法、简单时间相关方法、时频相关估计方法比较。

首先, 假设接收信号的脉冲个数 $P=8$, 脉冲重复频率为 10kHz, 脉冲宽度为 $2\mu\text{s}$, 两个信号的多普勒频率差 $\Delta f_{di} = 1\text{kHz}$, 采样速率为 200MHz。信号的信噪比从 5dB 增加到 20dB, 一共进行 50 次仿真试验, 图 1 显示了频率补偿算法与其它 3 种算法的到达时间差估计方差与信噪比的统计曲线。从图中可以看出: 频率补偿算法和时频相关算法的估计精度最好; 在低信噪比的情况下, 间接视频估计方法的误差比较大。

假设两个接收信号的信噪比为 8dB, 它们的多普勒频率差由 200Hz 增加到 2000Hz, 其它的参数与图 1 的仿真参数相同, 一共进行 50 次仿真试验, 图 2 显示了 4 种到达时间差估计方法的估计方差与多普勒频率差的统计曲线。从图中可以看出: 频率补偿算法与直接时频方法的估计误差比较小; 随着频率差变大, 直接相关方法的估计性能明显下降, 其它 3 种算法的估计精度与频率差的变化关系不大。

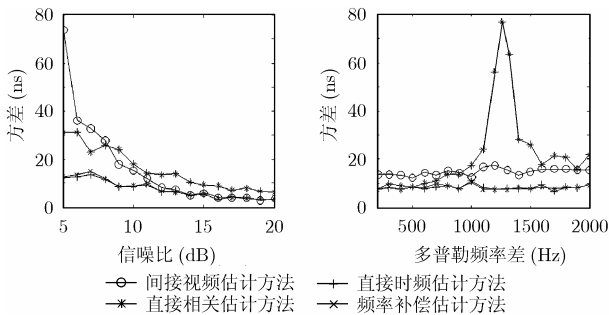


图 1 4 种方法的到达时间差估计方差与信噪比的仿真统计曲线

图 2 4 种方法的到达时间差估计方差与多普勒频率差的仿真统计曲线

假设两个接收信号的信噪比为 8dB, 接收信号的脉冲个数由 4 个增加到 20 个, 其它的参数与图 1 的仿真参数相同, 一共进行 50 次仿真试验, 图 3 显示了 4 种到达时间差估计方法的估计方差与脉冲个数的统计曲线。从图中可以看出: 随着脉冲个数的增大, 除简单相关法外, 其它 3 种算法的估计精度都有所提高; 频率补偿算法与时频相关方法的估计精度比较高; 由于简单相关方法没有考虑频率差的因素, 在脉冲数为 10, 20 处出现峰值。

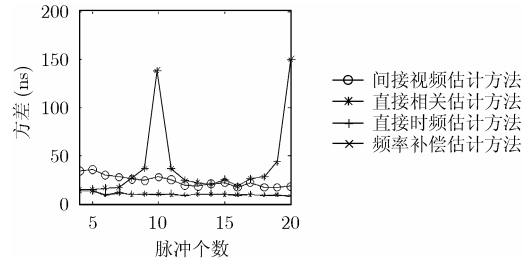


图 3 到达时间差估计方差与脉冲个数的仿真统计曲线

从以上 3 个仿真试验可以得到以下结论: 第一, 频率补偿算法的估计精度与时频相关算法得到的到达时间差估计误差相当, 算法的估计精度接近于最优估计; 第二, 频率补偿算法适用于信噪比、多普勒频率差、脉冲个数等参数变化比较大的范围。

5 结束语

本文在利用到达时间差多站无源精确定位的背景下, 针对接收到的相参雷达信号, 在传统的到达时间差估计方法的基础上, 根据相参脉冲信号的时间与频率的特点, 提出了一种频率补偿到达时间差估计算法。通过理论分析和仿真试验, 表明这种算法具有计算量小、到达时间差估计精度高、适用条件宽的优点。

参考文献

- [1] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术, 北京: 国防工业出版社, 1996 年 5 月: 181-187.
- [2] Torrieri D J. Statistical theory of passive location systems. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1984, 20(2): 183-198.
- [3] Becker K. New algorithm for frequency estimation from short coherent pulses of a sinusoidal signal, *IEE Proc.-F*, 1990, 137(4): 283-288.
- [4] Yaakov Bar-Shalom. Estimation and Tracking, Principles, Techniques, and Software, Boston, London: Artech House, 1998: 105-106.
- [5] 罗鹏飞. 统计信号处理. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999 年 11 月: 16-17.
- [6] Rickard T. Signal decorrelation effects due to differential Doppler, Nineteenth Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers(IEEE), 1985: 570-575.
- [7] 龚享钦, 周良柱. 一种关于相参脉冲信号频率的最优估计算法. *电子与信息学报*, 2004, 26(10): 1594-1600. GongXiang-yi and ZhouLiang-zhu. New optimum algorithm for frequency estimation form coherent pulses, *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(10): 1594-1600.
- [8] 熊洪允, 曾绍标, 毛云英. 应用数学基础, 天津: 天津大学出版社, 1998 年 3 月: 305-306.

龚享钦: 男, 1973 年生, 博士, 研究方向为现代信号处理、单站无源定位技术。

杨广平: 男, 1961 年生, 研究员, 研究方向是雷达系统设计、无源雷达技术。