

软件抗距离模糊技术在 异步水声跟踪定位中的应用分析^{*}

梁国龙[†] 杨 春 王 燕 陈晓忠

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘要 异步水声定位系统可在目标信号发射时刻未知时对目标跟踪定位,此时发射和接收时钟存在固定时差。对于基于时延测量的长基线异步定位系统,当信号传播时延大于脉冲重复周期时,就会出现距离模糊。本文提出了在异步水声跟踪定位系统中软件抗模糊的思想,探讨了一种利用目标参考位置抗模糊的算法。从异步定位模型出发,得出等价的抗模糊准则,依据准则推导了算法及相应的参考位置取值范围,分析并克服了固定时差对算法的影响。海试结果验证了算法的可行性和有效性。

关键词 跟踪定位, 异步, 抗距离模糊

Feasibility of resolving range ambiguities by software in an asynchronous underwater acoustic tracking system

LIANG Guo-Long YANG Chun WANG Yan CHEN Xiao-Zhong

(Inst. of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract Asynchronous acoustic positioning system can locate a target when signal's emitting time is unknown. In this case there is a stable time difference between the emitter's and the receiver's clocks. For long-baseline asynchronous positioning systems based on measure of time-delay, range ambiguities appear when pulse's propagating time is longer than its repetition period. In this article an idea of resolving range ambiguities in asynchronous acoustic positioning systems by software is presented and a method of resolving ambiguities by target's reference location is discussed. The equivalence rule is obtained in terms of the asynchronous positioning modal, and an algorithm of resolving ambiguities and its responding reference scope are derived, and the influence of time difference is analyzed and overcome as well. The proposed method was proved to be

2004-07-25 收稿; 2005-07-12 定稿

^{*} 哈尔滨工程大学校内基金资助

作者简介: 梁国龙 (1964-), 男, 吉林省农安人。哈尔滨工程大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事信号处理、水声工程、水声通信、鱼雷自导研究。

杨春 (1976-), 女, 河南省淮阳人。哈尔滨工程大学博士研究生。王燕 (1973-), 女, 辽宁省沈阳市人。哈尔滨工程大学副教授, 在职博士生。陈晓忠 (1965-), 男, 辽宁省葫芦岛人。哈尔滨工程大学博士研究生。

[†] 通讯联系人 Email: liangguolong@hrbeu.edu.cn

feasible and valid by sea trails.

Key words Tracking and positioning, Asynchronous, Resolving range ambiguity by software

1 引言

当目标信号发射时刻未知时, 仍可对目标进行跟踪定位。此时, 跟踪系统接收机和目标信标虽仍以相同的周期工作, 但两者存在一个初始时差, 该时差在整个过程中是固定不变的。对于超短基线定位系统, 常用的测量方法是测量信号到达各阵元的时延差, 计算目标的斜距和方位, 但测量精度低。时延差的高精度测量需要进一步测量相位差, 但这样易引起相位模糊, 反映在距离上也会产生距离模糊^[1~4]。对于异步方式的长基线定位系统, 异步方式仍可采用时延测量进行定位, 当信号传播时延大于同步周期时同样存在距离模糊问题。抗距离模糊可采用硬件、软件等多种方法, 后者在脉冲形式单一且不含距离信息等硬件方法无能为力的情况下有着广阔的应用空间。对于异步跟踪定位系统, 通常情况下目标是在一定误差范围内按预定就位点就位的, 该位置可以作为所求目标位置的参考; 利用这一先验信息可以有效地抗模糊, 这也是本文所述算法的出发点。只需实时自动更新参考位置, 即可完成对目标的无模糊跟踪定位。文章 [1] 已经对同步跟踪系统中该算法的实现机理作了论证。在异步跟踪系统中, 由于存在异步时差, 这种软件抗模糊方法是否仍然可行, 如何实现, 效果如何, 本文将就这些问题展开讨论。

2 定位模型

系统异步工作时, 时延测量定位模型为:

$$\begin{aligned} & (x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 \\ & = c^2(t_i - \Delta t_s)^2, \quad i = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) 中 (x_i, y_i, z_i) 和 (x_s, y_s, z_s) 分别是阵元 i 和声源 s (目标) 的空间位置, t_i 为目标信号到

阵元 i 的传播时延。 Δt_s 为信号发射时刻相对接收机时钟的时间, Δt_s 为未知量。

上述模型在阵元数 $M \geq 4$ 时, 可直接求解, $M \geq 5$ 时, 可以得到线性解^[5]。然而当信号传播时延大于其重复周期时, 仍然存在距离模糊问题^[1]。考虑信号单程传播, 具体关系为

$$\begin{aligned} t - \Delta t_s &= \tau + nT, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N, \\ N &= \left\lfloor \frac{r_{\max}}{cT} \right\rfloor \end{aligned} \quad (2)$$

其中 T 为系统同步周期, n 为周期数, τ 为系统记录时延, $r_{\max}$ 为系统最大作用距离, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示截尾方式取整。

3 算法原理

算法的基本原理是利用目标的参考位置确定传播周期数 n , 从而消除距离模糊。

3.1 异步时差对算法的影响

在上述定位模型中, 考虑平面问题, 将阵元 i 、 j ($i \neq j$, 下文同) 对应方程联立可得对应曲线的交点 (x_s, y_s) 的轨迹; 由于信号到两阵元的时延差恒定, 所以该轨迹是以两阵元位置为焦点的双曲线, 目标位于这些双曲线的交点。因此, 异步时差虽然未知, 但只要有足够的独立方程, 仍然可以定位。

设目标真实点信号到阵元 i 的传播时延为 t_{reli} , 用 x' 表示信息量 x 在 Δt_s 影响下的值, 有如下关系:

$$n'_{\text{reli}} = \left\lfloor \frac{t'_{\text{reli}}}{T} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{t_{\text{reli}} - \Delta t_s}{T} \right\rfloor \quad (3)$$

$$\tau'_{\text{reli}} = (t_{\text{reli}} - \Delta t_s) \bmod (T) \quad (4)$$

其中, $\bmod$ 为求余运算, $\forall x, y \in \text{实数}$, $x \bmod(y) = x - \left\lfloor \frac{x}{y} \right\rfloor \times y$ 。由 (3)、(4) 式可知,

时差 Δt_s 虽不影响定位但对信号传播周期数和测量时延均有影响, 具体有以下几种情况:

(1) 若

$$\begin{aligned} 0 \leq \tau_{\text{reli}} - \Delta t_s < T, n'_{\text{reli}} &= n_{\text{reli}}; \\ \tau'_{\text{reli}} &= \tau_{\text{reli}} - \Delta t_s \end{aligned} \quad (5)$$

(2) 若

$$\begin{aligned} -T \leq \tau_{\text{reli}} - \Delta t_s < 0, n'_{\text{reli}} &= n_{\text{reli}} - 1; \\ \tau'_{\text{reli}} &= \tau_{\text{reli}} - \Delta t_s + T \end{aligned} \quad (6)$$

(3) 若

$$\begin{aligned} T \leq \tau_{\text{reli}} - \Delta t_s < 2T, n'_{\text{reli}} &= n_{\text{reli}} + 1; \\ \tau'_{\text{reli}} &= \tau_{\text{reli}} - \Delta t_s - T \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 抗模糊准则

设对应于目标的信息量 x , 待确定的信息量为 x'' 。根据对模型的讨论, 可知下式需成立:

$$t''_{\text{relj}} - t''_{\text{reli}} = t'_{\text{relj}} - t'_{\text{reli}} = t_{\text{relj}} - t_{\text{reli}} \quad (8)$$

第二个等号自然成立, 故只需证第一个等号成立。知

$$\begin{cases} t''_{\text{reli}} = n''_{\text{reli}} \times T + \tau''_{\text{reli}} \\ t'_{\text{reli}} = n'_{\text{reli}} \times T + \tau'_{\text{reli}} \end{cases} \quad (9)$$

τ'_{reli} 包含了目标真实位置 (含固定时差) 的信息, 所以这个参量是必须利用的。考虑到要满足 (8) 式, 不妨令

$$\tau''_{\text{reli}} = \tau'_{\text{reli}} \quad (10)$$

得

$$n''_{\text{relj}} - n''_{\text{reli}} = n'_{\text{relj}} - n'_{\text{reli}} \quad (11)$$

也即

$$n''_{\text{relj}} - n'_{\text{relj}} = n''_{\text{reli}} - n'_{\text{reli}} \quad (12)$$

式 (11) 表示在参考点影响前后, 信号到两浮标的传播周期数之差不变; 式 (12) 表明在参考点的影响下, 阵元 j 增加的周期数与阵元 i 增加的周期数相同。上述两式构成了算法抗模糊的准则。

3.3 准则实现与条件限制

本文中所指的参考位置总是相对于真实位置而言的, 即无固定时差的影响。设阵元 i 接收到信号的两个位置 — 参考点和真实点 — 处的传播时延之差为 Δt_{ri} 。我们有

$$t_{\text{refi}} = t_{\text{reli}} + \Delta t_{ri} = n_{\text{reli}} \times T + \tau_{\text{reli}} + \Delta t_{ri} \quad (13)$$

Δt_{ri} 的范围关系到参考点的取值范围, 下面会有详细论证, 这里姑且认为 $\Delta t_{ri} \in R$ (实数集)。由于 n''_{reli} 为正整数, 不妨令

$$n''_{\text{reli}} = \left\| \frac{t_{\text{refi}} - \tau'_{\text{reli}}}{T} + \lambda \right\| \quad (14)$$

这里 $\lambda \in R$, 将 (13) 式代入 (14) 式得

$$n''_{\text{reli}} = n_{\text{reli}} + \left\| \frac{\tau_{\text{reli}} + \Delta t_{ri} - \tau'_{\text{reli}} + \lambda T}{T} \right\| \quad (15)$$

而

$$n'_{\text{reli}} = \left\| \frac{t_{\text{reli}} - \Delta t_s}{T} \right\| = n_{\text{reli}} + \left\| \frac{\tau_{\text{reli}} - \Delta t_s}{T} \right\| \quad (16)$$

观察 (5)~(7) 式发现三种情况满足同一规律:

$$\tau_{\text{reli}} - \tau'_{\text{reli}} = \Delta t_s + \left\| \frac{\tau_{\text{reli}} - \Delta t_s}{T} \right\| \times T \quad (17)$$

将 (15)、(16) 和 (17) 代入 (12) 式, 得

$$\left\| \frac{\Delta t_{ri} + \Delta t_s + \lambda T}{T} \right\| = \left\| \frac{\Delta t_{rj} + \Delta t_s + \lambda T}{T} \right\| \quad (18)$$

令 $\lambda = \lambda \bmod(1)$, 即限定 $\lambda \in [0, 1)$ 上式依然成立, 由于对任一阵元 Δt_s 和 λT 并不加以区分, 故令

$$\xi = |\Delta t_s + \lambda T| \bmod(T) \quad (19)$$

代入 (18) 式化为

$$\left\| \frac{\Delta t_{ri} + \xi}{T} \right\| = \left\| \frac{\Delta t_{rj} + \xi}{T} \right\|, \quad \xi \in [0, T) \quad (20)$$

(20) 式表明在参考点的影响下, 阵元 j 与阵元 i 增加了相同周期数。其成立的范围也即参考位置的取值范围。(14) 式即是确定周期数的算法, 通过上述讨论知, λ 只需在 $[0, 1)$ 内取值就足够了。

至此, 我们按照准则推出了等价的算法及相应的参考点取值范围, 在下一节里, 我们将通过仿真讨论参考点取值范围的各种情况。

3.4 算法仿真及改进

由上文可以看出, 影响参考点误差范围的直接因素是 ξ , 这里首先讨论 ξ 的取值对参考点可行范围的影响。如果仅考虑平面问题, 三个阵元即可定位, 这里讨论四元方阵, 计算阵中可无模糊定位的区域。图 1 至图 4 各图中, 四角的圆点代表阵元位置, 中间圆的圆心代表目标真实位置, 圆的半径为 $r = cT/2$ (这是为了与该算法用于同步方式的可行范围作比较), 阴影部分表示对于给定的 ξ 值满足式 (20) 的参考位置取值范围。

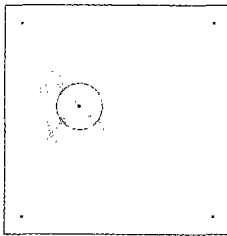


图 1 $\xi = 0$

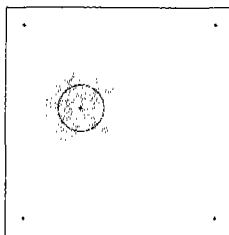


图 2 $\xi = T/4$

分析仿真结果: 一是距离目标真实点越远, 参考点可行的区域越小, 越离散, 越难以利用。二是当 ξ 取值临近 $T/2$ 时, 可行区域几

乎覆盖了同步方式下参考点的取值范围, 这种效果是令人满意的。而 ξ 越靠近整周期, 效果就越差。由于 ξ 实质为 Δt_s 和 λ 的函数, Δt_s 是固定的但是未知的, 我们将致力于寻找一种优化的算法, 使得无论 Δt_s 为何值, 都能得到满意的参考点取值范围。

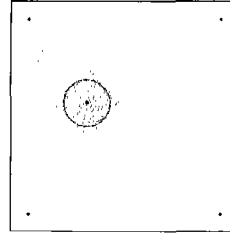


图 3 $\xi = T/2$

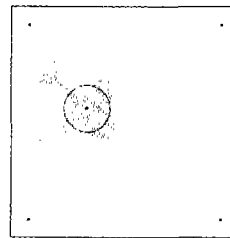


图 4 $\xi = 3T/4$

观察图 2 和图 4, 图中两 ξ 值相差半个同步周期, 发现它们的可行区域在空间上具有互补性。设想取两个 ξ 值: ξ_1 和 ξ_2 , 满足 $|\xi_2 - \xi_1| = T/2$, 将对应 ξ_1 和 ξ_2 的取值范围取并集, 就可以得到满意的结果。不妨取 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1/2$, Δt_s 取值 $-T/2 \sim T/2$, 若 $\Delta t_s = -T/2$, 则 λ_2 确定的范围效果差; 若 $\Delta t_s = 0$, 则 λ_1 确定的范围效果差。将算法改进后, 结果如下图 5 和图 6。可以看到参考位置可行区域覆盖了以目标为中心半径为 $cT/2$ 的圆。

这样, 我们对算法加以改进: 采用上述不同的参数进行两次解算, 则可以保守地限定参考点取值范围与同步系统相同, 即目标的 $cT/2$ 邻域, 文章 [1] 已经讨论过, 这是一个容易满足的范围容限。这样, 无论异步时差为何值, 该算法保证真解在其中。而更多的情况是, 参

考点落入了多个可行范围的交集, 选解就更有利。

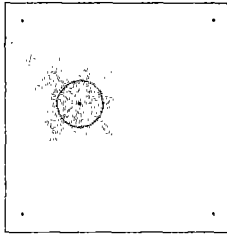


图 5 $\Delta t_s = -T/2$

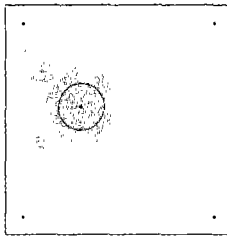


图 6 $\Delta t_s = 0$

4 海试结果

2002 年 3 月在某海域进行了水下目标跟踪系统海上试验, 图 7 给出某次实时异步跟踪轨迹。三条目标船分别拖不同频率的同步声源, 同步周期 0.8s。浮标布阵约 4.2km×4.2km, 图中 4 个圆点代表浮标, 圆点右下方数字代表浮标编号和位置, 实测声速 1529.6m/s。目标初始位置由目标船携带的 DGPS 提供。图中三目标轨迹清晰、连续, 验证了算法的稳健性和有效性。

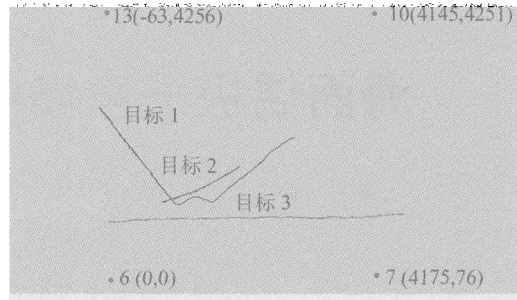


图 7 三目标异步跟踪轨迹

5 结论

本文主要讨论了异步水声跟踪系统的一种软件抗模糊方法——参考位置标示法。算法的关键是目标参考位置的动态范围, 在异步跟踪时, 该范围与未知的异步时差有关, 改进后的算法消除了这一未知因素, 使范围趋于稳定, 保证了算法的可行性。该算法不仅具有硬件抗模糊无法具有的优点, 而且与同步定位系统的软件算法相比, 在出现同步时钟精度低甚至漂移等情况下具有更广阔的应用空间。

参 考 文 献

- 1 梁国龙, 杨春, 陈晓忠等. 应用声学, 2005, 24(5):1~5.
- 2 杨春. 水声跟踪定位中的抗距离模糊技术研究. 哈尔滨工程大学硕士论文, 2003,9~48.
- 3 赵羽. 界面反射对水下目标定位的影响分析. 哈尔滨工程大学硕士论文, 2001,41~43.
- 4 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声纳技术, 第一版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000,124~138.
- 5 陈晓忠, 梁国龙, 王逸林. 声学学报, 2003, 28(4):357~362.