

文章编号: 1004-4353(2017)03-0216-04

利用超声波多普勒效应进行目标定位

柯伟, 王成, 郭振平*

(延边大学理学院 物理系, 吉林 延吉 133002)

摘要: 分析了超声波对动态目标定位时产生的频移现象, 并将其应用于目标测速. 利用多普勒效应测速, 对传统的定位方法加上速度修正, 解决了传统定位对于较高速物体定位时产生的滞后现象. 利用 3 个不在同一直线上的波源, 将多普勒效应的动态定位推广到二维平面和三维空间的运动情形中, 并给出了解析表达式, 还探讨了目标物体运动加速度对定位结果的影响.

关键词: 超声波; 多普勒效应; 目标测速; 目标定位

中图分类号: O412.1 **文献标识码:** A

Dynamic target positioning with the ultrasonic Doppler effect

KE Wei, WANG Cheng, GUO Zhenping*

(*Department of Physics, College of Science, Yanbian University, Yanji 133002, China*)

Abstract: The frequency shift phenomenon of the ultrasonic target is analyzed and applied to the target velocity measurement. Using the Doppler effect velocity measurement, the traditional positioning method is added to the speed correction, which solves the hysteresis caused by the traditional positioning of the higher speed object. The dynamic positioning of the Doppler effect is extended to the motion of the two-dimensional plane and the three-dimensional space through three wave sources which are not on the same straight line, and the analytic expression is given. The possible effect of the acceleration of the target object on the positioning results is also discussed.

Keywords: ultrasonic wave; the Doppler effect; target velocity measurement; dynamic positioning

近年来, 国内外学者对超声波多普勒效应进行了广泛的研究并在医疗诊断^[1-7]、医学成像^[8]、车速检测^[9]、目标测距^[10-12]等方面取得广泛应用. 然而, 在利用超声波测距与定位时, 传统方法只考虑声波的发射与接收的时间差, 因此只对静态目标或者极低速的目标具有较高的测量精度. 2014 年, K.Gadek 等^[13]利用沃尔什函数的相位编码算法, 优化了适用于静止物体的定位方法. 为了解决对于较高速物体定位时产生的滞后现象, H.Timlelt 等^[14]基于瞬时频率模型, 提出了新的迭代算法, 研究了可以测定动态目标距离的方法. 这种方法可通过目标物体所发出的声波被动地进行目标测距, 但是无法对目标的距离进行主动测定. 本文通过分析超声波对动态目标定位时产生的频移, 利用 3 个不在同一直线上的波源, 探讨应用多普勒效应对二维平面和三维空间下的运动目标进行测速和定位的新方法.

1 用多普勒效应进行目标测速和测距

如图 1 所示, S 处有一超声波源, 波速为 u , 频率为 f_s , 物体 A 以速度 v_R 向右运动, AS 连线和 v_R 的

方向成 θ 角, A 接收到的入射波的频率为 f_1 , S 接收到相距 l 的 A 反射波的频率为 f' . 虽然速度 v_R 的方向不在 AS 的连线上,但是它在连线上的分量 v_R' 仍满足多普勒效应公式^[12].

设 t_1 时刻 S 发射一束超声波, A 作为观察者接受声波, 并将声波沿原方向反射; 在反射声波过程中, A 成为波源发射反射波, 而 S 此时作为观察者于 t_2 时刻接收到反射波, 其多普勒频移为 $\Delta f = f' - f_s$. 应用波源和观察者相互趋近的多普勒效应公式^[12] 可以求得 A 在波源与观察者两者连线上的分速度为 $v = \frac{f' - f_s}{f' + f_s} u = \frac{\Delta f}{2f_s + \Delta f} u$.

传统超声波定位法是利用波源发射声波到接受反射声波之间的时间差 ($\Delta t = t_2 - t_1$) 来确定目标距离 ($l = \frac{u}{2} \Delta t$). 显然, 如果目标物体处于运动状态时, 传统方法的定位精度就将大大下降, 因此此时有必要利用多普勒效应对定位结果进行修正. 修正方法是应在传统超声波定位结果的基础上减去物体在声波返回时所运动的距离, 即 $l = \frac{\Delta t u}{2} (1 - \frac{\Delta f}{2f_s + \Delta f})$, 此结果即为应用多普勒效应修正后的目标距离.

2 二维平面目标定位

如图 2 所示, 在二维平面上建立一个平面直角坐标系, 在 $S_1(0, R_1), S_2(-R_2, 0), S_3(0, -R_1)$ 3 点处设置 3 个波源. 某时刻, 波源 S_1 探测到物体 A 的距离为 $l_1 = \frac{\Delta t_1 u}{2} (1 - \frac{\Delta f_1}{2f_s + \Delta f_1})$, 满足如下方程:

$$x^2 + (y - R_1)^2 = l_1^2. \tag{1}$$

波源 S_2 探测到物体 A 的距离为 $l_2 = \frac{\Delta t_2 u}{2} (1 - \frac{\Delta f_2}{2f_s + \Delta f_2})$, 满足如下方程:

$$(x + R_2)^2 + y^2 = l_2^2. \tag{2}$$

波源 S_3 探测到物体 A 的距离为 $l_3 = \frac{\Delta t_3 u}{2} (1 - \frac{\Delta f_3}{2f_s + \Delta f_3})$, 满足如下方程:

$$x^2 + (y + R_1)^2 = l_3^2. \tag{3}$$

联立方程(1)–(3), 可求得 A 点坐标为:

$$x_A = \frac{\sqrt{16l_2^2R_1^2 - (l_3^2 - l_1^2)^2} - 4R_1R_2}{4R_1},$$
$$y_A = \frac{l_3^2 - l_1^2}{4R_1},$$

该坐标点就是待测的目标位置.

3 三维空间目标定位

在近场区域建立一个如图 3 所示的空间直角坐标系, xoy -平面为近场区域的地平面, z 上半轴为空域, z 下半轴为地表以下. 假设定位的目标点不位于 z 下半轴. 其中 $O(0, 0, 0)$ 为坐标系原点, 并且为零号波源的位置, $S_1(0, R_1, 0)$ 为 1 号波源位置, $S_2(R_2, 0, 0)$ 为 2 号波源位置. A 点为某时刻目标出现的位

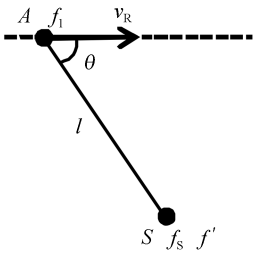


图 1 超声波多普勒测速

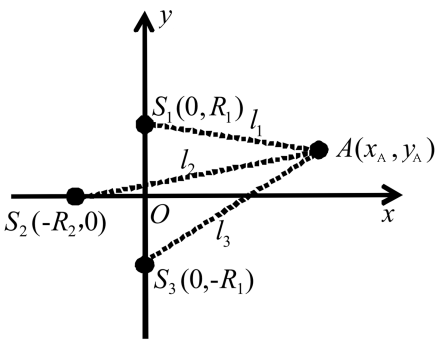


图 2 二维平面目标定位

置, 3 个波源位置分别探测到的 A 的距离为 $l_0 = \frac{\Delta t_0 u}{2} (1 - \frac{\Delta f_0}{2f_s + \Delta f_0})$, $l_1 = \frac{\Delta t_1 u}{2} (1 - \frac{\Delta f_1}{2f_s + \Delta f_1})$, $l_2 = \frac{\Delta t_2 u}{2} (1 - \frac{\Delta f_2}{2f_s + \Delta f_2})$. 与零号波源位置距离为 l_0 的所有点满足球方程:

$$x^2 + y^2 + z^2 = l_0^2. \quad (4)$$

与 1 号波源位置距离为 l_1 的所有点满足球方程:

$$x^2 + (y - R_1)^2 + z^2 = l_1^2. \quad (5)$$

与 2 号波源位置距离为 l_2 的所有点满足球方程:

$$(x - R_2)^2 + y^2 + z^2 = l_2^2. \quad (6)$$

联立方程(4)~(6), 并考虑定位目标的 z 轴坐标值是正定的, 得:

$$x_A = \frac{l_0^2 - l_2^2 + R_2^2}{2R_2},$$

$$y_A = \frac{l_0^2 - l_1^2 + R_1^2}{2R_1}$$

$$z_A = \frac{\sqrt{|-(l_0^2 - l_2^2)^2 R_1^2 - [(l_0^2 - l_1^2)^2 - 2(l_1^2 + l_2^2)R_1^2 + R_1^4]R_2^2 - R_1^2 R_2^4|}}{2R_1 R_2},$$

此坐标即为要测的目标位置.

4 结果与讨论

以上分别讨论了多普勒效应测速与目标测距, 并运用于二维平面与三维空间的目标定位中. 在长时间持续跟踪定位过程中, 记录每一时刻的位置点, 还可以得到目标的轨迹图, 由此得到目标的轨迹、运动方向、高度、速度等信息. 当目标物体静止时, 波源 S 所探测到的多普勒频移 $\Delta f = 0$, $l = \frac{\Delta t u}{2} (1 - \frac{\Delta f}{2f_s + \Delta f})$ 退化为 $l = \frac{\Delta t u}{2}$, 与传统超声波定位方法结果一致. 这说明超声波多普勒效应定位法不仅可以定位动态目标, 还可以定位静态目标.

应该指出, 一般情况下目标物体的运动不是匀速直线运动, 会存在加速度, 而且加速度也会影响到观察者所接受到的频率^[13-14], 进而会对修正结果产生影响. 在利用多普勒效应修正传统超声波定位结果时, 本文方法是将传统方法得到的结果减去物体在声波返回时所运动的这段距离, 这段距离可利用多普勒效应测得的速度直接与时间相乘得到, 如果目标物体有加速度, 此结果会存在一定的偏差. 但是在实际情况下, 加速度的数量级与定位所用超声波的频率、波速等的数量级存在较大差距, 实际探测计算过程中可以忽略加速度对此部分的影响.

5 结论

本文提出的方法可以主动地对动态目标进行距离测定, 并且从单波源目标测速与目标主动定位开始, 得到二维平面和三维空间下的目标定位的结果. 利用超声波多普勒效应定位法测得的目标距离为

$$l = \frac{\Delta t u}{2} (1 - \frac{\Delta f}{2f_s + \Delta f}), \text{ 二维平面下目标定位坐标的结果是: } x_A = \frac{\sqrt{16l_2^2 R_1^2 - (l_3^2 - l_1^2)^2} - 4R_1 R_2}{4R_1},$$

$$y_A = \frac{l_3^2 - l_1^2}{4R_1}, \text{ 其中 } l_i = \frac{\Delta t_i u}{2} (1 - \frac{\Delta f_i}{2f_s - \Delta f_i}), i = 1, 2, 3. \text{ 三维空间下目标定位的结果为:}$$

$$x_A = \frac{l_0^2 - l_2^2 + R_2^2}{2R_2}, \quad y_A = \frac{l_0^2 - l_1^2 + R_1^2}{2R_1},$$

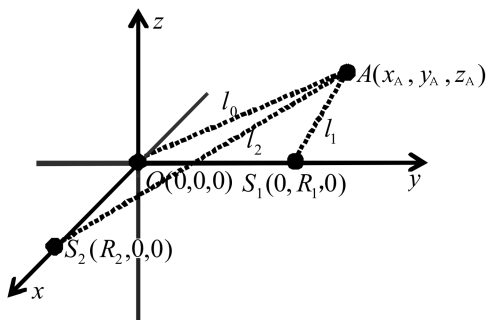


图 3 三维空间目标定位

$$z_A = \frac{\sqrt{|-(l_0^2 - l_2^2)^2 R_1^2 - [(l_0^2 - l_1^2)^2 - 2(l_1^2 + l_2^2)R_1^2 + R_1^4]R_2^2 - R_1^2 R_2^4|}}{2R_1 R_2},$$

其中 $l_j = \frac{\Delta t_j u}{2} (1 - \frac{\Delta f_j}{2f_s - \Delta f_j})$, $j = 0, 1, 2$.

参考文献:

- [1] Halm B M, Kessler D O. Color flow Doppler point of care ultrasound to evaluate vessels before infant lumbar puncture[J]. Journal of Emergency Medicine, 2017,52(1):70-73.
- [2] Kalra A, Harris K M, Maron B A, et al. Relation of Doppler tissue imaging parameters with heart failure progression in hypertrophic cardiomyopathy[J]. The American Journal of Cardiology, 2016,117(11):1808-1814.
- [3] Lima M S, Nader M F F, Franco L P, et al. Evaluation of pulmonary hypertension in pediatric population with oral breather syndrome by using Doppler echo cardio graphic parameters[J]. Brazilian Journal of Otorhinolaryngology, 2017,83(3):292-298.
- [4] Teichgräber U, Gebel M, Benter T, et al. Characterisation of hepatic venous flow via duplex Doppler sonography[J]. Ultraschall in Med, 1997,18(6):267-271.
- [5] Bos S D, Mensink H J. Can duplex Doppler ultrasound replace computerized tomography in staging patients with renal cell carcinoma? [J]. Scandinavian Journal of Urology and Nephrology, 1998,32(2):87-91.
- [6] Dijana N, Viktor T, Dusan H, et al. Duplex Doppler sonography in portal hypertension[J]. Medicinski Pregled, 2007,60(3/4):161-167.
- [7] Cristina C M, Renê G, Souza d O I R, et al. Thyroid nodules: evaluation with power Doppler and duplex Doppler ultrasound[J]. Otolaryngology-Head and Neck Surgery, 2005,132(6):874-882.
- [8] Gallay L J, Bélanger M C, Nadeau M E. Prospective evaluation of Doppler echocardiography, tissue Doppler imaging and biomarkers measurement for the detection of doxorubicin-induced cardiotoxicity in dogs: a pilot study[J]. Research in Veterinary Science, 2016,105:153-159.
- [9] 周博,马戎. 基于多普勒的车辆测速仪[J]. 机械与电子,2014(2):70-72.
- [10] 张海鹰,高艳丽. 超声波测距技术研究[J]. 仪表技术,2011(9):58-60.
- [11] 邹轶. 近距离高精度超声波测距系统的设计[D]. 大连:大连理工大学,2009:1-2.
- [12] 黄双印,郭振平. 多普勒效应与观察者相对声源位置的关系[J]. 大学物理,2016,35(5):46-49.
- [13] Gadek K, Jaraczewski M. Novel ultrasonic distance measuring system based on correlation method [J]. Archives of Electrical Engineering, 2014,63(3):385-392.
- [14] Timlelt H, Remram Y, Belouchrani A. Closed-form solution to motion parameter estimation of an acoustic source exploiting Doppler effect[J]. Digital Signal Processing, 2017,63:35-43.
- [15] 武璇,黄双印,郭振平. 非惯性运动下声波的多普勒效应[J]. 延边大学学报(自然科学版),2015,41(3):215-218.
- [16] 徐帅博,杨宝军,郭振平. 声源作匀速圆周运动时的多普勒效应[J]. 延边大学学报(自然科学版),2016,42(4):319-320.