

一种用于低空声源目标超视距被动声定位的新方法

张晓 高勇

(四川大学电子信息学院 成都 610065)

摘要: 该文提出了一种用于低空声源目标超视距被动声定位的新算法。该算法根据低空声源目标的声信号在定位反射点的基础上定位目标点,能有效降低声信号超视距传播误差的影响,提高定位精度,为雷达进一步跟踪和定位提供重要信息。仿真结果表明在时延估计精确的情况下,该方法对隐蔽于山后的低空声源目标的位置有较好的估计效果。

关键词: 低空目标;超视距;时延估计;定位

中图分类号: TN912.16

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1136-04

A New Algorithm for NLOS Acoustic Passive Localization of Low Altitude Targets

Zhang Xiao Gao Yong

(College of Electronics & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A new algorithm for NLOS(Non-Line-Of-Sight) passive acoustic localization of low altitude targets is presented. Based on target reflection point, the target point can be localized. This approach can reduce the NLOS error caused by acoustic propagation effectively, to increase localizing precision and provide important information for the radar to track and localize. Simulation results show that the algorithm have good effectiveness to estimate the low altitude target's position especially which hiding behind a mountain when time-delay estimation is high enough.

Key words: Helicopter; NLOS(Non-Line-Of-Sight); Time delay estimation; Localization

1 引言

低空飞行目标在攻击上的优异性能,已在历次战争中得到了验证^[1]。对隐蔽在山后的低空目标的定位涉及到超视距定位问题,如果能够及时、有效地探测和定位隐蔽于山后的低空声目标,将为己方部队的指挥决策提供正确参考,为部队的快速反应赢得宝贵的时间。低空目标不仅雷达反射面积小,而且对于隐蔽于山后的低空目标,主动探测雷达由于没有回波信号,无法进行探测和发现目标,不能为武器打击系统提供位置信息^[2]。随着各种传感器的组网和信息融合技术的发展,被动声探测系统不失为一种好的选择,有可能对隐蔽于山后的低空声源目标进行定位。

由于隐蔽于山后的低空声源目标和用于探测的声传感器之间没有直达波分量,因此以往已有的利用直达波进行定位的研究成果无法直接继承。例如:反直升机地雷、反坦克地雷的声探测机制都是基于被动声探测系统和被探测目标之间有直达声波^[3],如果这一前提不再存在,则无法进行定位。目前对超视距定位的研究比较多的还是在移动通信中利用基站与移动台是合作方的优势通过多个基站对移动台进

行超视距定位,以及在基于无线电波电子侦察中借助升空平台的支持对目标进行超视距定位^[4]。但对隐蔽于山后的低空声源目标进行定位,由于可供利用的信息较少,也没有升空平台、卫星等的支持,与被探测方又是非合作方,导致对隐蔽于山后的低空声源目标的定位的难度很大,需要寻找新的处理方法。在公开文献报道中,尚未见有对隐蔽于山后的低空声源目标进行定位的研究报道。本文针对隐蔽于山后的低空声源目标的定位问题,开展了初步研究,提出了一种对隐蔽于山后的低空声源目标进行超视距定位的新方法,即首先定位反射点,然后通过估计各反射点之间的时延从而得到目标点的位置,所进行的计算机仿真实验表明,该方法是有效的。

2 确定反射点

2.1 求解反射点方程的建立

本文提出的用于超视距定位的新方法,是在先定位反射点的基础上然后再定位目标点的位置。所以,如何定位反射点,是本文提出的用于超视距定位的新方法的关键。

图1中,假定 S 为隐蔽于山后的低空声源目标,隐蔽于山后的低空声源目标的声信号经空间 F_1, F_2, F_3, F_4 4个反射点(其它山体上反射系数较大而吸收系数较小的物体,如表面较光洁的石头等)反射后,被 R_1, R_2, R_3, R_4 4个声传感器所

构成的阵列接收, F_1, F_2, F_3, F_4 为空间中声信号反射最强的 4 个反射点。 R_1, R_2, R_3, R_4 排成边长为 d 的矩形。此时的声传播距离远大于声源尺寸, 声源可以看作点声源, 声波可以看作球面波。一般在山区地形情况下, 假定有 4 个反射点(即有 4 条多径)的情况是成立的。实际中可能接收到超过 4 条多径信号, 我们只需取其中 4 个能量最强的多径信号即可进行超视距定位, 其它更弱的多径信号可不用。

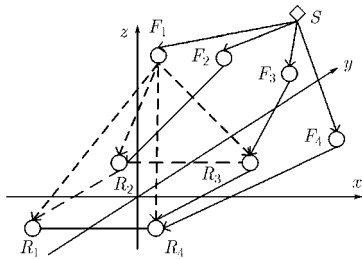


图 1 低空目标、反射点、声传感器阵列位置示意图

在图 1 中, F_1, R_1, R_2 3 点组成一个三角形, 根据几何原理可知, 三角形的两条边之差小于第三条边, 所以 F_1 到 R_1 的距离与 F_1 到 R_2 的距离之差小于 R_1 到 R_2 的距离, 也就是说, 声信号从 F_1 到 R_1, R_2 之间的时延的绝对值小于声信号从 R_1 到 R_2 的传播时间($d/c, c$ 为声速, 一般取 $c = 340 \text{ m/s}, d = 1.45 \text{ m}^{[3]}$), 在区间 $[-d/c, d/c]$ 内。

在一般情况下, 反射点之间的距离远大于传感器之间的距离, 所以, 各个声传感器之间接收到的来自于不同反射点的声信号之间的时延都比较大, 远大于 R_1 到 R_2 的传播时间 (d/c), 在区间 $[-d/c, d/c]$ 外。综上可得: 声信号经不同反射点到达各个声传感器之间的时延一般远大于声信号经同一个反射点到达各个声传感器之间的时延。

图 1 中每一个声传感器均接收到至少 4 条多径信号, 对 R_1 与 R_2 接收到的信号进行时延估计得到至少 16 个值, 对 R_2 与 R_3 接收到的信号进行时延估计得到至少 16 个值, 对 R_3 与 R_4 接收到的信号进行时延估计得到至少 16 个值, 一共有 3 组至少 48 个值。

根据上述几何推导, 在空间中至少有 4 个反射点的条件下, 对 R_1 与 R_2 接收到的信号进行时延估计得到的值中, 至少有 4 个时延估计值在区间 $[-d/c, d/c]$ 内, 分别为经过 F_1, F_2, F_3, F_4 到达传感器 R_1 与 R_2 的声信号的时延估计值。通过剔除区间 $[-d/c, d/c]$ 外的时延估计值, 可以剔除经过不同反射点到达传感器的时延估计值。取此区间内相关性最强的 4 个时延估计值, 即分别为信号从 F_1, F_2, F_3, F_4 到 R_1 与 R_2 之间的时延估计值 $\tau_{121}, \tau_{122}, \tau_{123}, \tau_{124}$ 。

同理, 对 R_2 与 R_3 接收到的信号进行时延估计得到的值中, 取区间 $[-d/c, d/c]$ 内相关性最强的 4 个时延估计值, 即分别为信号从 F_1, F_2, F_3, F_4 到 R_2 与 R_3 之间的时延估计值 $\tau_{231}, \tau_{232}, \tau_{233}, \tau_{234}$ 。

对 R_3 与 R_4 接收到的信号进行时延估计得到的值中, 取区间 $[-d/c, d/c]$ 内相关性最强的 4 个时延估计值, 即为信号从 F_1, F_2, F_3, F_4 到 R_3 与 R_4 之间的时延估计值 $\tau_{341}, \tau_{342}, \tau_{343}, \tau_{344}$ 。每一组的 4 个时延估计值暂时还无法与位置点 F_1, F_2, F_3, F_4 一一配对, 需要作以下进一步的处理。

设 R_1, R_2, R_3, R_4 的坐标分别为 $(-d/2, -d/2, 0), (-d/2, d/2, 0), (d/2, d/2, 0), (d/2, -d/2, 0)$, 反射点的坐标为 (x, y, z) , 根据图 1 建立反射点的方程:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 + z^2} - \sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2 + z^2} &= c\tau_{12} \\ \sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2 + z^2} - \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2 + z^2} &= c\tau_{23} \\ \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2 + z^2} - \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 + z^2} &= c\tau_{34} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 τ_{12} 为各反射点到 R_1, R_2 的时延, τ_{23} 为各反射点到 R_2, R_3 的时延, τ_{34} 为各反射点到 R_3, R_4 的时延。在 $\tau_{12} = \tau_{121}, \tau_{23} = \tau_{231}, \tau_{34} = \tau_{341}$ 时, 可求解出点 F_1 的位置; 在 $\tau_{12} = \tau_{122}, \tau_{23} = \tau_{232}, \tau_{34} = \tau_{342}$ 时, 可求解出点 F_2 的位置; 在 $\tau_{12} = \tau_{123}, \tau_{23} = \tau_{233}, \tau_{34} = \tau_{343}$ 时, 可求解出点 F_3 的位置; 在 $\tau_{12} = \tau_{124}, \tau_{23} = \tau_{234}, \tau_{34} = \tau_{344}$ 时, 可求解出点 F_4 的位置。但 $\tau_{121}, \tau_{122}, \tau_{123}, \tau_{124}$ 相互混合在一起而无法区分, $\tau_{231}, \tau_{232}, \tau_{233}, \tau_{234}$ 也混合在一起无法区分, $\tau_{341}, \tau_{342}, \tau_{343}, \tau_{344}$ 也是同样情况。所以, 将 $\tau_{121}, \tau_{122}, \tau_{123}, \tau_{124}$ 分别代替 τ_{12} , 将 $\tau_{231}, \tau_{232}, \tau_{233}, \tau_{234}$ 分别代替 τ_{23} , $\tau_{341}, \tau_{342}, \tau_{343}, \tau_{344}$ 分别代替 τ_{34} 代入方程式组(1)中, 这样可得到 64 个方程组。

2.2 野值的剔除

这 64 个方程组中, 至少 4 组有解(分别为 F_1, F_2, F_3, F_4 各自的位置), 在所有这些方程组的解中, 除各反射点位置以外的解均为野值, 可以依据一定的规则剔除。

从上文中知, 上述方程组中所有的时延估计值在区间 $[-d/c, d/c]$ 内(一般取 $d/c = 1.45/340 = 4.265 \text{ ms}$), 假定反射点离图 1 中原点的距离为 1205.7m, 由于 4 维表示困难, 因此做 3 维切片, 假定 τ_{23} 估计准确无误差为 2.831ms, 此时, 由方程组(1)计算得到反射点到图 1 中原点的距离(即 $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$) 与 τ_{12}, τ_{34} 的关系在整个可能的范围 $[-d/c, d/c]$ 内如图 2 所示。

由于受计算机处理能力的限制, 图 2 中的 τ_{12} 和 τ_{34} 的取值间隔较大, 不能描绘目标点距离 R 的峰值点。此时, 点 (τ_{12}, τ_{34}) 在图 2 所示的平面上随机分布。由此可以看出, 在整个可能的范围内, 除了点 (τ_{12}, τ_{34}) 在点 $(4.265 \text{ ms}, -4.265 \text{ ms})$ 与点 $(-4.265 \text{ ms}, 4.265 \text{ ms})$ 的连线上及其附近时, 其它情况下计算得出的距离 R 接近于零, 远小于实际值。

取图 2 中一小范围, 减小时间间隔, 得出反射点到传感器的距离 R 与 τ_{12}, τ_{34} 的关系在该小范围如图 3 所示。

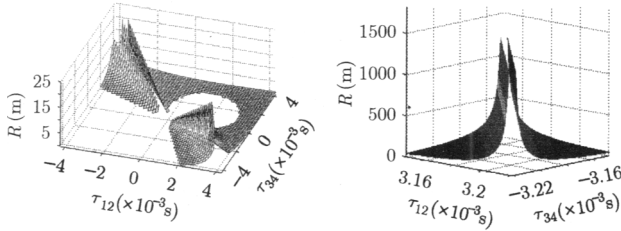


图2 整个可能范围内
距离与时延关系图

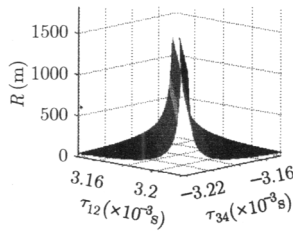


图3 小范围内
距离与时延关系图

当低空目标隐藏在山后时,一般来说,反射点都位于周围的山体上,离传感器都有一定的距离,所以,可以假定反射点离传感器距离在100m以上,而且,由于传感器安装在地面上,低空目标在地平面上方行动,在垂直方向上,低空目标高于或平行于传感器所处的位置,由此可以剔除在地平面以下的点即 $z < 0$ 的点。计算在上述条件下可以剔除的野值为99.76%。

同上方法,当假定在 τ_{23} 存在估计误差且 τ_{23} 的估计值比真实值小时,经计算后得到可剔除野值的百分比大于上述条件下的百分比;反过来,当假定在 τ_{23} 存在估计误差且 τ_{23} 的估计值比真实值大时,经计算得到目标的坐标 (x, y, z) 中 z 的值小于零,所以此时的野值可以完全剔除。

然后再结合实际的地理情况(例如:根据某一地区的等高线地图等地理位置信息)在数据关联和信息融合时排除其它野值。当采用多个如图1所示的传感器阵列组网来检测同一目标时,由于野值的分布是杂乱的,而目标却是固定的,可以利用寻找公共解的方式剔除野值。此外,还可以借鉴雷达信号处理中剔除野值的研究成果^[5],进一步提高定位精度。

3 计算目标点的位置

得到 F_1, F_2, F_3, F_4 的位置之后,计算 F_1 到 R_1, F_2 到 R_2, F_3 到 R_3, F_4 到 R_4 的传播时间 $\tau_{11}, \tau_{22}, \tau_{33}, \tau_{44}$ 和4个反射点方位角。根据 F_1, F_2, F_3, F_4 的方位角,用波束形成的方法,分别提取出如图1所示的从目标点 S 经 F_1 到 R_1, F_2 到 R_2, F_3 到 R_3, F_4 到 R_4 的声信号 $S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{44}$ 。

求解 S_{11} 与 S_{22} 之间的时延 τ_{1122} ,因为 $\tau_{1122} = \tilde{\tau}_{12} + \tau_{22} - \tau_{11}$,其中, $\tilde{\tau}_{12}$ 为信号从目标点 S 到 F_1, F_2 之间的时延,而 τ_{11} 和 τ_{22} 已在前面的处理中求出,因此可以计算出 $\tilde{\tau}_{12}$ 。同理,可计算出 $\tilde{\tau}_{23}, \tilde{\tau}_{34}$ 。

设反射点 F_1, F_2, F_3, F_4 的坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4)$,可以建立以下方程组来求解目标点 S 的位置,设目标点的坐标为 (x, y, z) :

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \\ - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} &= c\tilde{\tau}_{12} \\ \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \\ - \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} &= c\tilde{\tau}_{23} \\ \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} \\ - \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} &= c\tilde{\tau}_{34} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

该方程组的解即为目标点 S 的位置,但在实际的情况中,由于存在估计误差,目标的位置不再是一个点,而是一个模糊区。

将方程组(2)改写为

$$\left. \begin{aligned} c\tilde{\tau}_{12} - \rho &\leq \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \\ -\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} &\leq c\tilde{\tau}_{12} + \rho \\ c\tilde{\tau}_{23} - \rho &\leq \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \\ -\sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} &\leq c\tilde{\tau}_{23} + \rho \\ c\tilde{\tau}_{34} - \rho &\leq \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} \\ -\sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} &\leq c\tilde{\tau}_{34} + \rho \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

满足式(3)的所有点的集合称为模糊区, ρ 为自由度。 ρ 越大,模糊区越大, ρ 越小,模糊区也就越小直至没有,可以将模糊区内所有 S 点的位置进行平均得到最终估计值。为提高定位精度,降低误差,可以将多次测量计算出的目标点 S 的位置进行平均。

4 仿真试验及其结果

假设目标点 S 的坐标为 $(1000, 920, 45)$,空间中声信号反射最强的4个反射点分别为 $F_1(800, 640, 50), F_2(720, 640, 50), F_3(800, 960, 40), F_4(640, 640, 40)$, R_1 与 R_2 之间的时延估计误差为 $-10\mu\text{s}$, R_2 与 R_3, R_3 与 R_4 之间的时延估计误差为 $10\mu\text{s}$,自由度 $\rho = 1\text{m}$ 。根据本文所提供的原理,计算得出的低空声源目标的位置模糊区在以目标点为中心,半径为21.24m的圆内,其形状近似为长方体。图4是将模糊区内所有 S 点的位置进行平均得到最终估计值,图中符号‘o’表示低空目标、反射点的实际位置,符号‘*’表示估计位置,直线表示声信号的传播路径。

当接收到的信号中存在直达波时,可以看作是其中一个反射点无限接近于目标点,此时该方法仍然成立。

设目标点 S 的坐标在 $z = 45\text{m}, x \in [950\text{m}, 1050\text{m}], y \in [870\text{m}, 970\text{m}]$ 区域内, x 和 y 均以2m为步进取值,得到 50×50 个预设的目标点,设此时 R_1 与 R_2 之间的时延估计误差为 $-10\mu\text{s}$, R_2 与 R_3, R_3 与 R_4 之间的时延估计误差为 $10\mu\text{s}$,自由度 $\rho = 1\text{m}$ 。

计算估计值 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 到真值点 (x, y, z) 的距离误差 $e = \sqrt{(\hat{x}-x)^2 + (\hat{y}-y)^2 + (\hat{z}-z)^2}$,作出误差分布情况如图5所示。

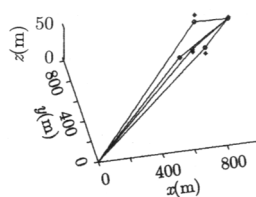


图4 低空声源目标、
反射点位置示意图

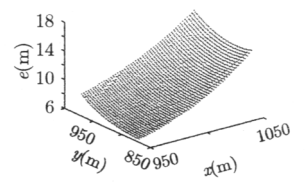


图5 算法误差分布情况

由图 5 可以看出,误差随着目标点到传感器距离的增加而增加。当目标点到传感器距离在 1500m 内时,误差在 20m 内,说明该方法是有有效的。

5 结束语

在对隐蔽于山后的低空目标定位时,由于可供利用的信息少,导致难度很大。针对这种情况,本文从理论上探讨了对隐蔽于山后的低空声源目标进行超视距定位的可行性,在假定所接收到的声信号是低空声源目标发出的声信号的前提下(限于篇幅,声信号检测识别部分将另文发表),提出了一种新的超视距定位方法。仿真结果表明,该方法是有有效的,能够大致找出隐藏于山后的低空声源目标的位置,可以为雷达进行进一步的跟踪和定位提供重要引导信息,也便于在指挥决策时将该传感器阵列所属地区划为重点监视和关注地区。所做的研究工作是初步的,也有待于进一步完善,但这毕竟提供了一种对隐蔽于山后的低空声源目标进行超视距定位的方法。当前对低空声源目标声信号的进一步检测和识别、如何减小定位模糊区的工作也正在进行。

参 考 文 献

- [1] 李红民,王炬,郭蕾. 国外武装直升机光电系统的发展动态[J]. 电光与控制, 2005, 12(1): 86-89.
Li Hong-min, Wang Ju, and Guo Lei. Development of electro-optic systems of overseas armed-helicopter [J]. *Electronics Optics & Control*, 2005, 12(1): 86-89.
- [2] 彭家庭. 近来的局部战争对陆基防空雷达的需求[J]. 中国工程科学, 1999, 1(12): 19-23.
Peng Jia-ting. Impact of recent regional wars on requirements of ground air defense radars[J]. *Engineering science*, 1999, 1(12): 19-23.
- [3] 杨亦春. 反直机智能雷声复合引信技术. [博士论文], 南京理工大学, 2000: 1-54.
Yang Yi-chun. The Combination Fuze technology of Anti-helicopter mine [D]. [Ph. D thesis] Nanjing University of Science and Technology, 2000: 1-54.
- [4] 何友, 修建娟, 唐小明等. 基于时差信息的超视距目标定位与跟踪[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1917-1920.
He You, Xiu Jian-juan, and Tang Xiao-ming, et al. Location and tracking of the over-the-horizon target on TDOA [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12): 1917-1920.
- [5] 何友, 修建娟, 张晶炜, 关欣. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 79-80.
He You, Xiu Jian-juan, Zhang Jing-wei, and Guan Xin. Radar Data Processing with Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 79-80.

张 晓: 女, 1983 年生, 硕士生, 研究方向为时延估计技术、高阶统计量、超视距定位等。

高 勇: 男, 1969 年生, 博士, 副教授, 研究兴趣为阵列信号处理、软件无线电、通信抗干扰抗截获技术、声信号处理、嵌入式系统开发等。