

运动观测站对固定辐射源频差定位算法

刘聪锋¹, 杨 洁², 王奉帅¹

(1. 西安电子科技大学, 电子对抗研究所, 陕西西安 710071; 2. 西安邮电学院通信与信息工程学院, 陕西西安 710121)

摘 要: 针对频差定位中的运动观测站对固定辐射源的定位场景, 提出了一种目标位置直接求解频差定位算法, 解决了基于频差定位方法的算法求解问题. 所提方法利用目标相对于参考站的极坐标表示公式, 巧妙借助频差定位方程的形式, 按照先求解目标的方位角, 再求解目标的径向距离, 最终获得目标准确位置的直接求解公式. 其中对算法进行了详细的分析, 讨论了求解过程中目标方位角和径向距离的求解模糊及其处理方法, 并利用仿真分析验证了理论分析的正确性, 为频差定位算法的应用提供了理论基础.

关键词: 无源定位; 频差定位; 直接求解法; GDOP 分析

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 05-0907-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.008

FDOA Location Algorithm for Fixed Emitter with Moving Observer

LIU Cong-feng¹, YANG Jie², WANG Feng-shuai¹

(1. Research Institute of Electronic Countermeasure, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. School of Communication and Information, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China)

Abstract: Based on the FDOA (frequency difference of arrival) location of the radiative source using moving observations, an FDOA location algorithm which solves the location of the target directly is proposed, which overcomes the difficulty in solving FDOA location algorithm. The proposed algorithm utilizes the polar coordinates to express the target coordinate relative to reference station, the algorithm uses the form of the FDOA location equation with skill, firstly, calculates the azimuth of the target, and then solves the radial range between the target and reference station, finally the equation with which the accurate location of the target can be determined directly is obtained. In this paper, an elaborate analysis of the algorithm is given, the ambiguity of azimuth and radial range as well as the solving method are discussed, simultaneously, simulation analysis shows that the theoretical analysis is correct, which provides the application of FDOA location algorithm with theoretical basis.

Key words: passive location; FDOA location; direct solution; GDOP analysis

1 引言

无源定位是指侦察设备不向被探测目标发射无线电信号, 只通过接收电磁波信号对目标做出定位的一项技术, 它是电子对抗的一个重要组成部分^[1~3]. 无源定位具有作用距离远、隐蔽性好等优点, 对于提高系统在电子战环境下的生存能力具有重要作用. 随着测量技术、信号截获和处理技术的发展, 无源定位技术在电子战系统中占据着越来越重要的地位. 无源定位实质上是定位方法与定位算法的融合.

利用多普勒效应定位在雷达、声纳、无源定位系统和卫星定位导航中具有广泛的应用. 一个应用实例就是在水下, 利用声纳对辐射源的无源定位, 这些声纳拦截语音辐射信号并且测量多普勒频移. 多普勒频差定位是利用目标与观测站之间的相对运动产生多普勒频移的

原理实现的, 即利用观测站收到的目标信号多普勒频率差来确定辐射源位置. 利用多普勒频差实现目标定位的思想提出的比较早, 但是一直很难给出封闭形式的解, 尽管还提出了利用频差测量的混合定位算法^[4~9], 同样无法给出可操作的求解公式或方法, 对于借助现代滤波算法或迭代算法实现的频差定位, 其初始状态的选择和收敛问题很难解决^[10,11].

本文针对频差定位中的运动观测站对固定辐射源的定位场景, 提出了一种直接目标位置求解频差定位算法, 解决了频差定位中的算法求解问题.

2 多普勒频差定位原理

对于分布式小卫星侦察系统、编队飞机侦察系统或同一侦察飞机在不同位置分别观测以实现监视区域中的固定辐射源定位任务, 都可以建模为若干运动观测站

对固定辐射源的定位模型. 在三维空间中, 两个运动观测站分别接收固定辐射源的电磁波, 并进行辐射源信号的频率测量, 所得频率差确定一个多普勒定位曲面, 同理, 三个观测站可得两组独立的多普勒曲面, 进而相交获得定位曲线, 因此利用空间四个运动观测站即可实现固定辐射源的位置测量. 不失一般性, 假设运动观察站 S_i 的位置坐标为 $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, 速度为 $\mathbf{v}_i = [v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}]^T$, 式中 $i=0, 1, 2, 3$, 而固定辐射源 T 的位置坐标为 $\mathbf{x}_T = [x, y, z]^T$.

如果假设观测站 S_0 为参考站, 则第 i ($i=1, 2, 3$) 个观测站接收辐射源信号相对于参考站接收信号的多普勒频差 Δf_i 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta f_i &= \frac{f_c \mathbf{v}_i^T (\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_i)}{c \|\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_i\|} - \frac{f_c \mathbf{v}_0^T (\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_0)}{c \|\mathbf{x}_T - \mathbf{x}_0\|} \\ &= \frac{f_c}{c} \left[\frac{v_{xi}(x - x_i) + v_{yi}(y - y_i) + v_{zi}(z - z_i)}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{v_{x0}(x - x_0) + v_{y0}(y - y_0) + v_{z0}(z - z_0)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \right] \quad (1) \end{aligned}$$

式中, f_c 表示固定辐射源的辐射信号中心频率, 而 c 表示电磁波的传播速度.

为了更加直观地说明频差定位的原理, 下面以三站二维定位为例. 对于二维频差定位, 相应的定位原理如图 1 所示. 对于二维目标定位, 只需三个观察站, 其中任意两个观测站可获得一条多普勒定位取线, 两个独立的多普勒曲线相交即可获得辐射源的位置.

从图 1 可以看出, 利用多普勒频差定位时, 等频差曲线的交点有两个, 其中一个点为目标的真实位置, 而另一个为模糊点. 为了去掉模糊点, 一种方法是增加观测站, 从而再增加一组独立的频差曲线进行模糊消除, 而另一种方法是利用任何一个观测站多次观测的频率估计值, 即可得到目标相对于观测站的大致方位, 进而消除模糊定位点.

3 目标位置的求解

不失一般性, 此处考虑二维平面频差定位场景. 假设运动观察站 S_i 的位置坐标为 $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i]^T$, 速度为 $\mathbf{v}_i = [v_{xi}, v_{yi}]^T$, 其中 $i=0, 1, 2$, 而固定辐射源 T 的位置坐标为 $\mathbf{x}_T = [x, y]^T$. 取 S_0 站为参考站, 根据多普勒效应, 可得在每个观测站所测到的辐射信号频率为

$$f_0 = f_c + \frac{f_c}{c} \cdot \frac{v_{x0}(x - x_0) + v_{y0}(y - y_0)}{r_0} \quad (2)$$

$$f_1 = f_c + \frac{f_c}{c} \cdot \frac{v_{x1}(x - x_1) + v_{y1}(y - y_1)}{r_1} \quad (3)$$

$$f_2 = f_c + \frac{f_c}{c} \cdot \frac{v_{x2}(x - x_2) + v_{y2}(y - y_2)}{r_2} \quad (4)$$

其中 r_i ($i=0, 1, 2$) 为目标到观测站 i 的径向距离.

参考图 1 中的几何关系, 假设目标距观测站 S_0 的距离为 r , 方位角为 θ , 则有

$$\begin{cases} x = r \cos \theta + x_0 \\ y = r \sin \theta + y_0 \end{cases} \quad (5)$$

为了后面表示方便, 令

$$\begin{cases} x_{10} = x_1 - x_0, & y_{10} = y_1 - y_0 \\ x_{20} = x_2 - x_0, & y_{20} = y_2 - y_0 \\ r = r_0 \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)分别代入式(2)、(3)、(4), 并利用式(6)中的简化符号可得

$$f_0 = f_c + \frac{f_c}{c} \cdot (v_{x0} \cos \theta + v_{y0} \sin \theta) \quad (7)$$

$$f_1 = f_c + \frac{f_c}{c} \cdot \frac{v_{x1}(r \cos \theta - x_{10}) + v_{y1}(r \sin \theta - y_{10})}{\sqrt{(r \cos \theta - x_{10})^2 + (r \sin \theta - y_{10})^2}} \quad (8)$$

$$f_2 = f_c + \frac{f_c}{c} \cdot \frac{v_{x2}(r \cos \theta - x_{20}) + v_{y2}(r \sin \theta - y_{20})}{\sqrt{(r \cos \theta - x_{20})^2 + (r \sin \theta - y_{20})^2}} \quad (9)$$

对式(7)进行变形, 可得

$$\frac{c}{f_c} \cdot \frac{(f_0 - f_c)}{\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}} = \frac{v_{x0} \cos \theta}{\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}} + \frac{v_{y0} \sin \theta}{\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}} \quad (10)$$

若令

$$\frac{v_{x0}}{\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}} = \cos \alpha, \quad \frac{v_{y0}}{\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}} = \sin \alpha \quad (11)$$

即角度 α 表示观测站 S_1 的运动速度相对于参考坐标的方位角. 则有

$$\frac{c}{f_c} \cdot \frac{(f_0 - f_c)}{\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}} = \cos \alpha \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta = \cos(\alpha - \theta) \quad (12)$$

因此, 该式的求解是由参考观测站的运动速度方位角与目标相对于参考站的方位角之差决定. 利用该式可得:

$$\theta = \alpha \pm \arccos \left(\frac{c}{f_c} \cdot \frac{f_0 - f_c}{\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2}} \right) \quad (13)$$

当 $\alpha - \theta \in [0, \pi)$ 时, 由上式取负号, 而当 $\alpha - \theta \in [-\pi, 0)$ 时, 上式取正号.

为了求解的方便, 令

$$\Delta f_i = f_i - f_0, \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

因此, 利用式(8)、(9)分别减去式(7)可得

$$\begin{aligned} \frac{c}{f_c} \cdot \Delta f_i &= \frac{v_{xi}(r \cos \theta - x_{i0}) + v_{yi}(r \sin \theta - y_{i0})}{\sqrt{(r \cos \theta - x_{i0})^2 + (r \sin \theta - y_{i0})^2}} \\ &\quad - (v_{x0} \cos \theta + v_{y0} \sin \theta), \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (15)$$

为了简化表示, 令

$$k = \frac{c}{f_c} \cdot \Delta f_i + (v_{x0} \cos \theta + v_{y0} \sin \theta), \quad i = 1, 2 \quad (16)$$

故式(16)可简化为

$$k = \frac{v_{xi}(r\cos\theta - x_{i0}) + v_{yi}(r\sin\theta - y_{i0})}{\sqrt{(r\cos\theta - x_{i0})^2 + (r\sin\theta - y_{i0})^2}}, \quad i = 1, 2 \quad (17)$$

对该式进行变形可得

$$\begin{aligned} & r^2(k^2 - (v_{xi}\cos\theta + v_{yi}\sin\theta)^2) \\ & + 2r(k^2 + v_{xi}^2 + v_{yi}^2)(x_{i0}\cos\theta + y_{i0}\sin\theta) \\ & + k^2(x_{i0}^2 + y_{i0}^2) - (v_{xi}^2x_{i0}^2 + v_{yi}^2y_{i0}^2) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

令

$$\begin{cases} a = k^2 - (v_{xi}\cos\theta + v_{yi}\sin\theta)^2 \\ b = (k^2 + v_{xi}^2 + v_{yi}^2)(x_{i0}\cos\theta + y_{i0}\sin\theta) \\ c = k^2(x_{i0}^2 + y_{i0}^2) - (v_{xi}^2x_{i0}^2 + v_{yi}^2y_{i0}^2) \end{cases} \quad (19)$$

则有

$$ar^2 + 2br + c = 0 \quad (20)$$

因此求解该式即可得 r 。显然当 $b^2 - ac < 0$ 时方程无解, 而当 $b^2 - ac \geq 0$ 时, 有

$$r = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - ac}}{a} \quad (21)$$

通过上面的分析可知, 对于平面三站频差定位, 目标位置的求解结果分别取决于观测站与目标之间的几何关系, 以及观测站的运动状态。然而对于该求解方法, 如何消除定位求解中的模糊问题将成为该算法实现的关键, 下面将对该问题进行讨论。

4 解的存在性讨论

利用式(13)求解 θ 时有两个结果, 若选取 $\theta = \alpha - \arccos((c/f_c) \cdot (f_0 - f_c) / \sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2})$, 联立式(7)和式(8), 一般情况下, 可以解得两个解 r_{11}, r_{12} , 此时再联立式(7)和式(9), 一般情况下, 也可解得两个解 r_{21}, r_{22} , 若无解, 说明 θ 取的不对或者此点不可观测。因为一个 θ 角对应一个距离 r , 因此如果 θ 取的正确, r_{11}, r_{12} , 中就有一个准确解, 同理, r_{21}, r_{22} , 中也有一个准确解, 这两个解

是相等的, 因此只要比较 r_{11}, r_{12} 和 r_{21}, r_{22} 的取值, 如果其中两个具有相同的数值, 则为所求的解。

同理若取 $\theta = \alpha + \arccos((c/f_c)(f_0 - f_c) / \sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2})$, 具体分析方法同上。

为了验证以上分析的正确性, 进行了如下仿真分析。观测站坐标分别为 $S_0(0,0)$ km, $S_1(-5,5)$ km, $S_2(5,5)$ km, 各站的速度矢量分别为 $V_0(0.2,0)$ km/s, $V_1(0.2,0)$ km/s, $V_2(0.2,0)$ km/s。以 S_0 为参考站, 图 2 给出了在该观测站配置下, 利用公式 $\theta = \alpha \pm \arccos((c/f_c)(f_0 - f_c)$

$/\sqrt{v_{x0}^2 + v_{y0}^2})$ 计算目标方位角时的正负号取值分布情况。图中绿色(浅色)区域表示计算 θ 的公式中取“+”号, 而红色(深色)区域表示取“-”号。而图 3 中的红色(深色)区域给出了定位算法中的无解或模糊区域。

从图 2 可以看出, 对于三角布站场景, 以参考站为分界线, 上下两个区域的取值符号截然不同, 即观测站的中间和上方区域都取“+”号, 而观测站的下方几乎都取“-”号。利用该仿真结果, 就为实际定位中算法的实现提供了参考依据。由于随着观测站的运动, 空间某一区域相对于观测站的几何位置也将改变, 进而相应的区域符号也会改变, 故只要准确获得观测站上下区域的计算公式取值符号即可。

从图 3 可以看出, 算法的无解或模糊区域均处于各站的连线上, 其中分布的离散点可能是由数值计算近似或误差引起的。根据运动观测站对固定辐射源的定位特点可知, 辐射源相对于观测站的位置会随着时间的变化而变化, 故一般不会一直与观测站共线。所以对于无解或模糊区域的目标定位问题会随着观测站位置的变化而有所改善。

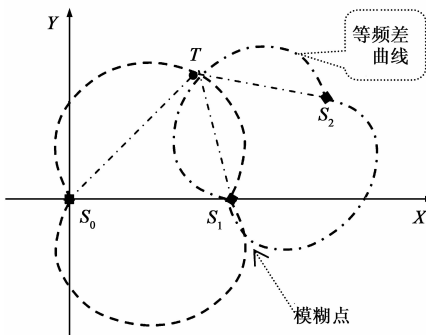


图1 二维频差定位原理图

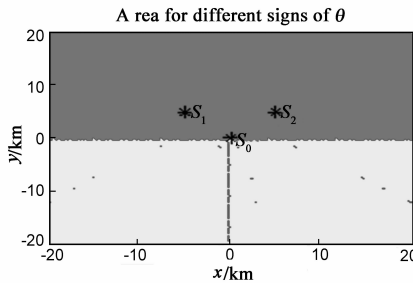


图2 计算角度 θ 时的正负号取值区域

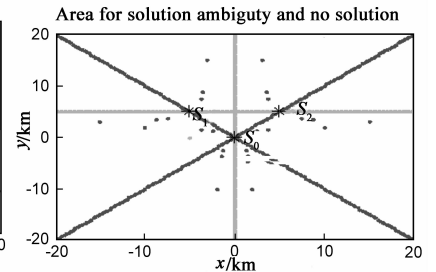


图3 定位算法中的无解或模糊区域

5 性能分析

为了分析算法的定位性能, 进行如下仿真。当三个观测站以直线方式运动时, 频差定位的 GDOP 如图 4 所示, 其中观测站的坐标分别为 $S_0(0,0)$ km, $S_1(-5,0)$

km, $S_2(5,0)$ km。信号载频 $f_c = 5 \times 10^9$ Hz, 各站速度矢量分别为 $V_0(0.2,0)$ km/s, $V_1(0.2,0)$ km/s, $V_2(0.2,0)$ km/s。站址误差 $\sigma_s = 5$ m, 测频误差 $\Delta f = 10$ Hz, 速度误差 $\Delta v = 5$ m/s。当三个观测站以三角方式布站时, 算法的 GDOP 如图 5 所示, 其中观测站的坐标分别为 $S_0(0,0)$

km, $S_1(-5,5)$ km, $S_2(5,5)$ km, 速度矢量同前。

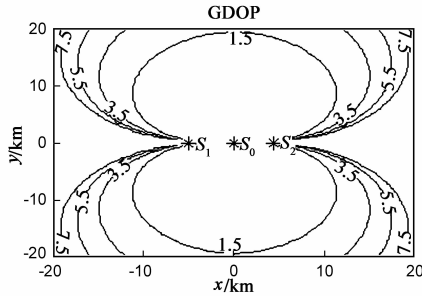


图4 直线布站GDOP曲线(沿X轴运动)

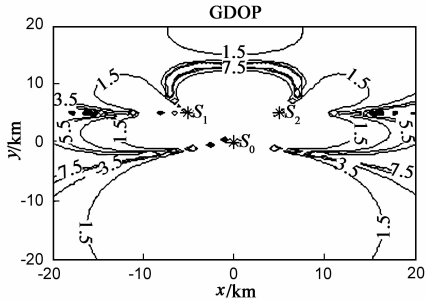


图5 三角布站GDOP曲线(沿X轴运动)

通过比较两图可知,三角布站的频差定位 GDOP 优于直线布站,而且三角布站的角尖方向 GDOP 优于角内区域,该结果也为实际布站方案提供了参考.如对于编队飞行的飞机,采用三角编队飞行可以获得较好的定位结果,然而对于单机定位,进行曲线飞行的定位结果要优于直线飞行。

6 结论

频差定位作为无源定位技术中的主要定位体制,由于无法给出其准确的求解公式或求解方法,一直制约该算法的实际应用,尽管提出了迭代法和混合定位法,但是算法实现和定位性能受制于算法的收敛性.本文针对频差定位提出了一种直接求解方法,解决了该定位算法的求解难题,其中进行了详细的仿真分析,验证了所提方法的正确性和有效性.通过该文的研究,为频差定位算法的实际应用提供了理论基础和技术参考。

参考文献

- [1] Carter, Clifford G. Time delay estimation for passive sonar signal processing [J]. IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1981, 29(6): 463 - 470.
- [2] Ehud Weinstein. Optimal source localization and tracking from passive array measurements [J]. IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1982, 30(2): 69 - 76.
- [3] Rappaport T S, Reed J H, Woerner B D. Position location using

wireless communications on highways of the future [J]. IEEE Communications Magazine. 1996, 14(10): 33 - 41.

- [4] Darko Musicki, Koch Wolfgang. Geolocation using TDOA and FDOA Measurements [A]. Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion [C]. FUSION2008, Cologne, Germany, IEEE, June. 30-July. 3, 2008. 147 - 151.
- [5] Sun Xiaoyan, Li Jiandong, Huang Pengyu, et al. Total Least-Squares Solution of Active Target Localization Using TDOA and FDOA Measurements in WSN [A]. Proceedings-22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops/Symposia [C]. AINA2008, Gino-wan, Okinawa, Japan, IEEE, March. 25 - 28. 2008. 995 - 999.
- [6] Musicki D, Kaune R, Koch W. Mobile emitter geolocation and tracking using tDOA and FDOA measurements [J]. IEEE Trans. Signal Processing. 2010, 58(3): 1863 - 1874.
- [7] Wei He-Wen, Peng Rong, Wan Qun, et al. Multidimensional scaling analysis for passive moving target localization with TDOA and FDOA measurements [J]. IEEE Trans. Signal Processing. 2010, 58(3): 1677 - 1688.
- [8] Wu shilong, Luo Jingqing, Gong Liangliang. Joint FDOA and TDOA location algorithm and performance analysis of dual-satellite formations [A]. 2010 2nd International Conference on Signal Processing System, ICSPS [C]. Dalian, China, IEEE, July. 5 - 7. 2010. 339 - 342.
- [9] K C Ho, Wenwei Xu. An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements [J]. IEEE Trans Signal Processing. 2004, 52(9): 2453 - 2463.
- [10] Fu S J, Vian J L, Grose D L. Determination of ground emitter location [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 1988, 3(12): 15 - 18.
- [11] Tobias M, Lanterman A D. Probability hypothesis density-based multitarget tracking with bistatic range and doppler observations [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation. 2005, 152(3): 195 - 205.

作者简介



刘聪锋 男, 1973年7月1日出生于陕西蓝田, 博士后, 副教授. 分别于1996、1999年获解放军电子工程学院学士、硕士学位, 2008年获西安电子科技大学博士学位. 1999 - 2004年在西安卫星测控中心从事卫星测控总体、无线电测控总体工作, 2004年10月转业到西安电子科技大学电子工程学院从事教学、科研工作. 主要研究方向为阵列信号处理、电子侦察与干扰, 电子战系统设计与仿真.

E-mail: cfliu@mail.xidian.edu.cn

杨洁 女, 1976年出生, 陕西西安人. 副教授, 主要研究方向为自适应信号处理、阵列信号处理及其应用.

王奉帅 男, 1986年出生于山东济南, 西安电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为无源定位.