2018年12月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

#### 文章编号: 2095-4980(2018)06-0984-06

# 基于多普勒频率与距离和的目标定位

田明辉,马 敏,张文祎

(中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230088)

摘 要:针对无源探测系统,提出一种基于多普勒频率与距离和测量的目标定位算法。建立 无源探测系统中探测定位的数学模型与基于多普勒频率测量的计算关系,给出目标位置的求解过 程和模糊解的处理方法。仿真实验中利用 STK 建模工具构建了典型的场景,并分析了算法的定位 精确度。实验证明,利用对目标多普勒频率与距离和的测量对目标进行定位的算法是有效的。

关键词:多普勒频率;距离和;目标定位;无源探测

中图分类号: TN957.51 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA201806.0984

# Target localization based on Doppler frequency and range sum

TIAN Minghui, MA Min, ZHANG Wenyi

(No. 38 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui 230088, China)

**Abstract:** An algorithm for target localization based on Doppler frequency and azimuth measurement in passive detection system is proposed. The mathematical model and the computational relationship are constructed for passive detection system. Also the computation progress for target localization and the process for fuzzy solution are given. In the simulation experiment, a typical scene is constructed by using the STK modeling tool, and the precision of target localization is also analyzed. Finally, the conclusion is given that the algorithm for target localization based on Doppler frequency and azimuth measurement is effective.

Keywords: Doppler frequency; range sum; target localization; passive detection

近年来国内外兴起的新型无源探测<sup>[1-4]</sup>系统,通过测量目标反射的信号,确定目标位置信息,具有更为显著的隐蔽性和反隐身性。基于多普勒频率与距离和测量的目标定位是无源探测系统中的一项重要技术<sup>[5-8]</sup>。系统通 过测量目标反射信号的多普勒频率、目标至发射站的距离与目标至接收站的距离之和,实现对目标位置的解算。 从而,利用连续多帧的观测数据,解算在"向站"或"背站"飞行时的目标航迹。

无源探测系统自身并不发射信号,而是利用外辐射源的直达波和目标反射的信号进行相关参数测量,因此需要对信号进行相参积累,达到一定的信噪比之后进行参数测量<sup>[9-12]</sup>。在参数测量过程中,由于信号带宽的约束,通常对目标的距离和方位角的直接测量误差较大,但对目标的多普勒频率测量精确度较高。

本文针对基于多普勒频率与距离和测量的目标定位展开讨论,通过建立目标的定位解算数学模型和多普勒计 算模型,给出一套完整的目标位置解算过程和模糊解的处理办法。仿真实验中考虑实际工程中对目标测量参数的 误差,分析了定位算法的定位精确度。

#### 1 数学模型

#### 1.1 基础模型建立

如图 1 所示, 假定  $(x_i, y_i), (x_0, y_0)$  为信号发射站和接收站的直角 坐标位置。 $(t'_1, \sigma R_1, f_1), (t'_2, \sigma R_2, f_2), (t'_3, \sigma R_3, f_3)$  为不少于 3 次的测量 值, 测量值包括: 测量时刻的时间  $t'_i$ , 发射站-目标-接收站之间的距

离和 $\sigma R_i$ ,  $f_i$ 为 $t'_i$ 时刻的测得的目标多普勒值,并且目标相对接收站进行匀速"向站"或"背站"运动。



图 1 距离测算方法

若待定目标 T 位置为(x,y),信号发射源 S 的位置为(x<sub>s</sub>,y<sub>s</sub>),接收站 R 的位置为(x<sub>R</sub>,y<sub>R</sub>),S 站到目标的距离为  $R_s$ , R 站到目标的距离为  $R_R$ ,通过信号发射时间和接收时间的时间差可以测距离和  $\sigma R$ :

$$\begin{cases} R_{\rm R} = \sqrt{(x - x_{\rm R})^2 + (y - y_{\rm R})^2} \\ R_{\rm S} = \sqrt{(x - x_{\rm S})^2 + (y - y_{\rm S})^2} \\ \sigma R = R_{\rm S} + R_{\rm R} \end{cases}$$
(1)

对定位方程(1)进行移项、平方,整理后得:

$$(x_{\rm R} - x_{\rm S})x + (y_{\rm R} - y_{\rm S})y = P - \sigma RR_{\rm R}$$
<sup>(2)</sup>

式中:

$$P = \frac{1}{2} \left[ d_{\rm R}^2 + (\sigma R)^2 - d_{\rm S}^2 \right], \quad d_i = x_i^2 + y_i^2$$
(3)

#### 1.2 无源探测系统中的多普勒频率

根据相关文献可知,无源探测系统中的多普勒公式为:

$$f = \frac{2\nu}{\lambda} \cos \delta \cos \frac{\beta}{2} \tag{4}$$

由于假定目标是"向"接收站或"背"接收站运动,所以 $\delta = \frac{\beta}{2}$ (见图 2),因此

$$f = \frac{2\nu}{\lambda} \cos^2 \frac{\beta}{2} \tag{5}$$

对该式进行变换,可得式(6):

$$v = \frac{f\lambda}{2\cos^2\frac{\beta}{2}} = \frac{f\lambda}{1+\cos\beta}$$

因为 $|ST| + |TR| = \sigma R$ , |TR| = R, |SR| = c, 根据余弦定理可知:

$$\cos\beta = \frac{R^2 + (\sigma R - R)^2 - c^2}{2R(\sigma R - R)}$$
(7)

所以,

$$1 + \cos\beta = \frac{(\sigma R)^2 - c^2}{2R(\sigma R - R)}$$
(8)

将式(8)代入式(6),可得

$$v = \frac{2f\lambda R(\sigma R - R)}{(\sigma R)^2 - c^2} = \frac{2f\lambda}{(\sigma R)^2 - c^2} (\sigma R R - R^2) = mR - nR^2$$
(9)

(6)

式中:

$$m = \frac{2f\lambda\sigma R}{(\sigma R)^2 - c^2}, \quad n = \frac{2f\lambda}{(\sigma R)^2 - c^2}$$
(10)

# 2 解算方法

2.1 基本方法

如图 3 所示,目标在运动过程中,每次测量可建立一个方程。若时刻  $t_i$ 测量获得  $(t'_i, \sigma R_i, f_i)$ , 假定目标的位置  $T_i$ 为  $(x_i, y_i)$ ,可建立方程:

$$(x_0 - x_0')x_i + (y_0 - y_0')y_i = P_i - \sigma R_i R_i$$
(11)

式中  $R_i$  是未知值,表示目标在  $t_i$  时刻同接收站 R 之间的距离。对于 3 次测量,可建立如下方程组:



Fig.3 Application scene for angle measurement based on Doppler value 图 3 基于多普勒值测角的应用场景



Fig.2 Geometry graph of Doppler frequency in passive detection system图 2 无源探测系统中的多普勒几何图

$$\begin{cases} (x_0 - x'_0)x_1 + (y_0 - y'_0)y_1 = P_1 - \sigma R_1 R_1 \\ (x_0 - x'_0)x_2 + (y_0 - y'_0)y_2 = P_2 - \sigma R_2 R_2 \\ (x_0 - x'_0)x_3 + (y_0 - y'_0)y_3 = P_3 - \sigma R_3 R_3 \end{cases}$$
(12)

令  $p = x_0 - x'_0, q = y_0 - y'_0$ , 可得:

$$\begin{cases} p(x_2 - x_1) + q(y_2 - y_1) = P_2 - P_1 - \sigma R_2 R_2 + \sigma R_1 R_1 \\ p(x_3 - x_1) + q(y_3 - y_1) = P_3 - P_1 - \sigma R_3 R_3 + \sigma R_1 R_1 \end{cases}$$
(13)

对于 3 个时间点,可求得  $t'_3, t'_2 \oplus t'_1$ 测量时间间隔,  $t_1 = t'_2 - t'_1, t_2 = t'_3 - t'_1$ ,由于目标匀速运动,若目标运动速度为 v,目标的方向角度为  $\theta$ ,则

$$\begin{cases} x_2 - x_1 = vt_1 \cos \theta, y_2 - y_1 = vt_1 \sin \theta \\ x_3 - x_1 = vt_2 \cos \theta, y_3 - y_1 = vt_2 \sin \theta \end{cases}$$
(14)

根据式(13)可知, 
$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \Big[ (\sigma R_2)^2 - (\sigma R_1)^2 \Big], P_3 - P_1 = \frac{1}{2} \Big[ (\sigma R_3)^2 - (\sigma R_1)^2 \Big],$$
  

$$\begin{cases} P_2 - P_1 - \sigma R_2 R_2 + \sigma R_1 R_1 = \frac{1}{2} \Big[ (\sigma R_2)^2 - (\sigma R_1)^2 \Big] - \sigma R_2 R_2 + \sigma R_1 R_1 \\ P_3 - P_1 - \sigma R_3 R_3 + \sigma R_1 R_1 = \frac{1}{2} \Big[ (\sigma R_3)^2 - (\sigma R_1)^2 \Big] - \sigma R_3 R_3 + \sigma R_1 R_1 \end{cases}$$
(15)

同样,由于目标匀速"向/背"接收站做直线运动,不难得出 $R_2 = R_1 + vt_1, R_3 = R_1 + vt_2$ 。因此,式(15)可转化为:

$$\begin{bmatrix} pt_{1}v\cos\theta + qt_{1}v\sin\theta + (\sigma R_{2} - \sigma R_{1})R_{1} = \frac{1}{2} [(\sigma R_{2})^{2} - (\sigma R_{1})^{2}] - \sigma R_{2}vt_{1} \quad (1) \\ pt_{2}v\cos\theta + qt_{2}v\sin\theta + (\sigma R_{3} - \sigma R_{1})R_{1} = \frac{1}{2} [(\sigma R_{3})^{2} - (\sigma R_{1})^{2}] - \sigma R_{3}vt_{2} \quad (2) \end{bmatrix}$$

根据目标匀速运动的性质,结合式(10),可知, $v = m_1 R_1 - n_1 R_1^2$ ,其中, $m_i, n_i$ 的取值和 $\sigma R_i, f_i$ 相关,为已知值。 现设  $k = t_2/t_1$ ,经过化简整理,可得

$$aR_1^2 + bR_1 + c = 0 (17)$$

$$\vec{x} \div: a = n_1(\sigma R_3 t_2 - k\sigma R_2 t_1); b = k(\sigma R_2 - \sigma R_1) - (\sigma R_3 - \sigma R_1) - m_1(\sigma R_3 t_2 - k\sigma R_2 t_1); c = \frac{1}{2} \left[ \sigma R_3^2 - \sigma R_1^2 - k(\sigma R_2^2 - \sigma R_1^2) \right]_{\circ}$$

a,b,c是关于已知测量值 ( $t'_i,\sigma R_i,f_i$ )的方程,因此,将a,b,c相关测量值代入方程后,很容易计算出数值。根据一元二次方程的通解公式,可知

$$R_{1} = \frac{-b \pm \sqrt{b^{2} - 4ac}}{2a}$$
(18)

由于 $v = m_1 R_1 - n_1 R_1^2$ ,根据 $R_1 求出 v$ ,将 $R_1, v$ 代入式(16)中的(1),可得方程

$$\alpha \cos\theta + \beta \sin\theta = \gamma \tag{19}$$
$$\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$$

式中: $\alpha = pt_1$ ; $\beta = qt_1$ ; $\gamma = \frac{1}{2} [(\sigma R_2)^2 - (\sigma R_1)^2] - \sigma R_2 vt_1 - (\sigma R_2 - \sigma R_1)R_1 \circ \alpha, \beta, \lambda$ 是可以求算的已知值,对式(19)进行变换, 可得关于 cos  $\theta$  的一元二次方程:

$$(\alpha^{2} + \beta^{2})\cos^{2}\theta - 2a\lambda\cos\theta + (\lambda^{2} - \beta^{2}) = 0$$
(20)

解该方程,可得出 $\theta$ 值。

需要指出的是,若"发射站-接收站"直线 line 1 和 x 轴不重合,则此处求得的  $\theta$  值含义是"目标-接收站"直线(图 4 中的 line 2)同 x 轴的夹角,实际需获得的是直线 line 2 和直线 line 1 之间的夹角  $\psi$ 。

为求取夹角 $\psi$ ,须先求取 line 1 和 x 轴之间的斜率:

$$\tan \varphi = \frac{y_0 - y'_0}{x_0 - x'_0}$$
(21)

如图 4 所示,  $\psi = \pi - \varphi - \theta$ , 且



第16卷

$$\tan\psi = \tan(\pi - \varphi - \theta) = -\tan(\varphi + \theta) = -\frac{\tan\varphi + \tan\theta}{1 - \tan\varphi\tan\theta}$$
(22)

 $\tan \varphi$ ,  $\tan \theta$  值均可获得,因此可进一步解算出 $\psi$  值。

### 2.2 模糊解处理

1) R<sub>1</sub>模糊解的处理

在解算  $R_1$ 的过程中,会存在 2 个值,记为  $R_1,R_{1b}$ ,其中只有一个是真值,由式(9)可知  $v = m_1R_1 - n_1R_1^2$ ,因此 对于不同的  $R_1$ ,可以获得 2 个不同的速度值  $v_1,v_{1b}$ 。因为  $R_2 = R_1 + vt_1$ ,  $R_3 = R_1 + vt_2$  ( $R_1$ 和  $v_1$ 对应,  $R_{1b}$ 和  $v_{1b}$ 对应), 且目标始终匀速运动,所以同时满足  $v = m_2R_2 - n_2R_2^2$ 和  $v = m_3R_3 - n_3R_3^2$ ,因此可求得的  $v_2,v_{2b}$ 和  $v_3,v_{3b}$ 。

接下来,验证 v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub>, v<sub>3</sub>和 v<sub>1b</sub>, v<sub>2b</sub>, v<sub>3b</sub>之间的差值大小,若差值过大,则为假解。通过该方法,可以排除掉 R<sub>1</sub>的模糊解,获取真实的 R<sub>1</sub>值。

ψ模糊解的处理

解方程(20)会获得 2 个  $\cos\theta$  解,等价于 2 个  $\theta$  值,这 2 个解 分别关于 line 1 对称,如图 4 中的 line 2 和 line 3 均为满足要求的 解。根据实际场景中辐射信号的来源方向,可以排除其中一个。 line 1 和 line 2 两条直线之间的位置关系不同,将导致  $\psi$  值的求算 公式存在差异。

比较图 4 和图 5,由于"发射站-接收站"直线 line 1 和 x 轴 之间的位置和角度关系不同,导致角度  $\psi$ , $\theta$ , $\varphi$ 之间的关系不同, 此时

$$\tan \psi = \tan(\theta - \varphi) = -\frac{\tan \varphi - \tan \theta}{1 + \tan \varphi \tan \theta}$$
(23)

由于解算之前,无法预知 line 1 和 line 2 之间的位置关系, 也就无法排除 $\psi$ 的模糊解。

为解决上述问题,本仿真同时应用式(22)~(23)两种夹角计算 公式,这样在一次解算中将获得 4 个 $\psi$ 值。由于正确的 $\psi_i, \psi_j$ 值 是关于 line 1 对称的,即 $\psi_i + \psi_j = 0$ ,若对 4 个 $\psi$ 值进行两两组合, 并利用 $\psi_i + \psi_j = 0$ 的约束条件,可以排除 $\psi$ 的模糊解。

#### 3 仿真实验

实验采用 STK(8.0)专业建模仿真工具,生成空中运动目标的

飞行轨迹、观测站对目标的多普勒观测数据和距离和量测数据。再结合 Matlab(2012a)软件进行算法模型仿真计算,图 6 为 STK 建模仿真工具中设定的仿真场景图。

#### 3.1 仿真条件

如图 6 所示, 仿真实验中设定空中目标进行匀速直线"向站"飞行运动,飞行速度为 240 m/s,飞行时长为 20 min,飞行总距离为 288 km,飞行高度为 8 km,飞行起点和终点大地坐标分别为(113.828 6E,33.355 5N),(115.767 3E, 31.226 9N),发射站的大地坐标为(113.827 0E, 31.034 9N),接收站的大地坐标为(115.946 0E, 31.047 8N),高度均 为海拔 1 km,对目标的观测数据率为 1 Hz,多普勒测量精确度为 1 Hz,距离和测量精确度为 1.5 km。

#### 3.2 仿真结果

基于上述仿真条件,解算出目标的方位值,方位误差均方根 < 0.6°,如图 7 所示。获得目标方位后,解算目标距离,距离误差均方根 < 600 m,目标距离方位曲线如图 8 所示。在以接收站为站心的极坐标系下目标航迹的连续多帧定位效果如图 9 所示。

从以上仿真实验结果可以得出: a) 通过对目标多普勒频率和距离和的测量,可以解算出"向站/背站"飞行的目标位置; b) 利用连读多帧地观测数据,可以形成目标的"向站/背站"飞行的航迹; c) 针对形成的目标航迹可以结合后续的滤波算法进一步提高目标航迹的精确度。



Fig.5 Other relationship of angle between lines 图 5 另一种直线之间的夹角关系



图 6 STK 软件建模仿真场景设定图







Fig.8 Comparison graph between calculation value and true value for target range-Azimuth 图 8 目标距离方位解算值和真值对比图

# 4 结论

本文给出了一种无源探测系统中基于多普勒频率与距离和 的目标定位算法。通过仿真实验分析,本文算法具有以下特点:

1) 仅需要对目标的多普勒频率与距离和进行测量,对于实际应用中由于条件因素所限的无源探测系统要求较少。

2)由于无源探测系统中的多普勒频率测量精确度较高,因此通过本文算法求解出的目标位置精确度较好,后期通过航迹滤波可进一步提高目标航迹精确度。

3) 文中给出的计算模型对于无源探测系统或电子侦察系统 具有较为广泛的工程应用价值和参考意义。



Fig.9 Comparison graph between calculation value and true value for target location in polar coordinates 图9 目标连读多帧定位解算值与真值对比图

# 参考文献:

- [1] 宋徽. 多站无源定位技术的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007. (SONG Hui. Research for passive location techniques with multiple stations[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2007.)
- [2] 郁亮.单站无源定位跟踪技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2006. (YU Liang. Research for single observer passive location and tracking technology[D]. Chengdu, China: University of Electronics Science and Technology of China, 2006.)
- [3] 孙仲康,郭福成,冯道旺. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (SUN Zhongkang,GUO Fucheng, FENG Daowang. Passive location and tracking technology by single observer[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [4] 何明浩. 雷达对抗信息处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2010. (HE Minghao. Radar countermeasure information processing[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2010.)
- [5] 刘莎,刘以安,戴娟. 基于多普勒频率变化率的单站无源测距方法[J]. 计算机仿真, 2012,29(2):11-14. (LIU Sha,LIU Yian,DAI Juan. Single-observer passive ranging method based on Doppler changing rate[J]. Computer Simulation, 2012, 29(2):11-14.)
- [6] 安玮,孙仲康.利用多普勒变化率的单站无源定位测距技术[C]// 雷达无源定位跟踪技术研讨会论文集.北京:[s.n.], 2001(3):41-45. (AN Wei,SUN Zhongkang. Single observer passive ranging technique using Doppler changing rate[C]// Proceeding of Symposium on Passive Location and Tracking of Radar. Beijing:[s.n.], 2001(3):41-45.)
- [7] 刘聪锋. 无源定位与跟踪[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011. (LIU Congfeng. Passive location and tracking[M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 2011.)
- [8] 王杰贵,罗景青,靳学明. 对机动目标单站无源定位的最大似然估计[J]. 现代雷达, 2006,28(1):49-54. (WANG Jiegui, LUO Jingqing,JIN Xueming. Maximum likelihood estimation of algorithm for passive location of maneuvering target by single station[J]. Modern Radar, 2006,28(1):49-54.)