

一种对深空探测器信标信号的无源定位方法

沈小马¹, 吕斌涛², 孙威², 刘阳², 叶建设², 卞韩城³

(1. 北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 3. 酒泉卫星发射中心, 酒泉 732750)

摘要: 针对返回式深空探测器着陆回收过程中, 使用测控网络、搜救卫星网络和区域定位网络时的信息不足之处, 提出增加基于长基线时差体制无源定位信息的方法。根据返回式深空探测器信标的正弦调制包络特性, 采用改进的双谱线算法对高精度频率进行估计, 使用离散时间傅立叶变换算法进行初相和到达时间估计, 并对信标信号时差测量精度进行了仿真。根据时差定位系统误差分布模型和信标信号时差测量精度, 对信标信号时差定位精度分布进行了仿真, 结果表明在100 km半径范围内定位误差均小于1 km。使用四方形布站方式, 对深空探测器的返回器进行定位和动态跟踪模拟, 结果表明距离误差优于1 km, 方位误差优于1'。在多站时差无源定位方法的基础上, 提出利用多普勒频差信息进一步实现对目标二维速度信息估计。针对高动态小目标、大着陆范围的返回式深空探测器解决了低空探测难题, 实现了无缝隙无源探测定位, 显著提升了着陆预报精度, 为后续深空探测活动及任务规划奠定了技术基础。

关键词: 返回式深空探测器; 信标; 无源定位; 时差; 多普勒频差

中图分类号: V525

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)03-0276-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20200054

引用格式: 沈小马, 吕斌涛, 孙威, 等. 一种对深空探测器信标信号的无源定位方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(3): 276-283.

Reference format: SHEN X M, LV B T, SUN W, et al. A method of passive location of the returnable spacecraft beacon[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(3): 276-283.

引言

深空探测器按照探测目标可分为月球探测器, 如“嫦娥三号”(Chang'E-3, CE-3)和“嫦娥四号”(Chang'E-4, CE-4)落月探测器、“嫦娥五号”采样返回探测器, 太阳探测器、行星及星际探测器(如火星、木星、小行星的采样返回式探测器等), 可帮助人类研究太阳系及宇宙的起源、演变和现状, 进一步了解空间现象和地球自然系统之间的关系, 进而拓展人类生存的空间。深空采样返回探测器具有体积小、重量轻、速度快、示位能力相对较弱, 在地球返回时的着陆区范围较大, 返回时机受地面气象条件关联性大的特点。对携带样品的高速弹道式再入深空返回器实现快速空间定位、安全回收, 提高着陆预报精度, 是确保整个深空探测航天工程任务圆满顺利完成的关键。根据搜救任务组织模式, 构建测控信息网、搜救卫星信息网和区域定位信息网^[1]。在返回阶段, 测控信息网目前使用主动式靶场测量雷达和S频段统一测控设备^[2-3]对返回式探测器进行跟踪探测。

搜救卫星信息网使用国际救援组织的搜救卫星

(COSPAS-SARSAT)^[4-5], 对返回式探测器的信标信号进行定位和解调, 将定位结果传至中国极低轨道搜救任务控制中心。区域定向信息网中使用飞机和直升机载超短波定向仪对信标信号进行搜索测向^[6]。主动式靶场雷达和统一S波段(Unified S-Band, USB)测控设备使用地面单站部署形式, 当着陆位置偏差较大时, 由于地球曲率条件限制, 对返回式探测器的低空测量能力受限, 着陆点预报误差也相应增大。刘磊等^[6]对到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)无源定位系统的原理与影响因素进行了分析, 可以应用到对返回式探测器的无源定位中。杨洁等^[7]提出基于修正Rife算法的雷达信号载频估计, 可以应用到对信标调制包络的频率估计中。

搜救卫星信息网对返回式探测器的测量实时性较差。机载超短波定向仪对返回式探测器信标的测角精度不高, 不能直接获取距离信息, 测向交叉定位误差较大。针对以上不足, 需要拓展其它测量手段, 增强对返回式探测器定位性能, 提高搜索效率。通常对各类无线电辐射源(含无线电信标)的定位可以使用无源定位手段, 定位体制包括长基线时差定位、测向交

又定位、单站无源定位等^[7-8]。长基线时差定位相比其它手段精度较高，因而得到了广泛应用，应用领域包括移动通信和防空警戒^[9]。

本文基于多站长基线时差定位原理^[10]和信标信号包络具体特性分析，提出了一种对返回式探测器信标信号的长基线时差体制多站无源定位方法。实现了对深空返回式探测器进行快速精确定位，并通过仿真计算表明定位精度满足使用需求。

1 长基线时差体制无源定位

时差定位法基于辐射源发射的信号到达两个观测站的距离差（距离差 = 时间差 × 光速）规定了一组以两观测站为焦点的双曲线^[11]。因此若在二维平面内有3个观测站组成两条基线，则两组双曲线的交点就决定了平面内目标的位置，如图1所示。

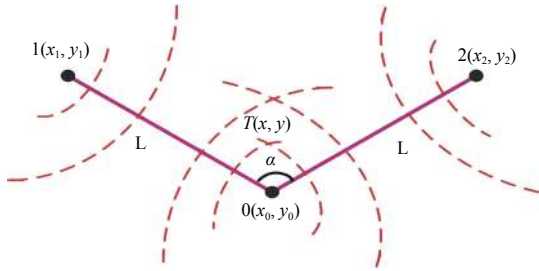


图1 双曲线定位

Fig. 1 The hyperbolic location

对于三维空间的目标，需要4个测量站组成3条基线，测量3个距离差就可对目标定位。设定目标位置 (x, y, z) ，主站坐标 (x_0, y_0, z_0) ，副站坐标 (x_i, y_i, z_i) ($i = 1, 2, 3$)，测得相应时差 τ_i ($i = 1, 2, 3$)，即 $\Delta r_i = c\tau_i$ 为已知量，求解目标位置 (x, y, z) 。

目标到各副站的距离为

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (1)$$

目标到主站的距离为

$$r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (2)$$

目标到各副站距离与到主站的距离差为

$$\Delta r_i = r_i - r_0 = c\tau_i \quad (3)$$

根据3个时差测量值，可以得到3个距离差，通过方程求解可以得到目标的三维坐标 (x, y, z) 。由式(3)得到

$$(\Delta r_i + r_0)^2 = r_i^2 \quad (4)$$

对式(4)整理，代入 r_i^2 和 r_0^2 的表达式得到

$$\begin{aligned} \Delta r_i^2 + 2\Delta r_i r_0 = & \\ -2(x_i - x_0)x - 2(y_i - y_0)y - 2(z_i - z_0)z + & \\ (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) - (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) & \end{aligned} \quad (5)$$

以 r_0 为参变量，令

$$d_i^2 = (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \quad (6)$$

$$d_0^2 = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)代入式(5)得到

$$\begin{aligned} (x_i - x_0)x + (y_i - y_0)y + (z_i - z_0)z = & \\ -\Delta r_i r_0 + \frac{1}{2}(d_i^2 - d_0^2 - \Delta r_i^2) & \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\Delta r_1 \\ -\Delta r_2 \\ -\Delta r_3 \end{bmatrix} r_0 + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$l_i = \frac{1}{2}(d_i^2 - d_0^2 - \Delta r_i^2) \quad (12)$$

使用行列式方法求解得到如下系数

$$a_1 = \frac{\begin{vmatrix} \Delta r_1 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ \Delta r_2 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ \Delta r_3 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{vmatrix}}{|\mathbf{A}|} \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{\begin{vmatrix} x_1 - x_0 & \Delta r_1 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & \Delta r_2 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & \Delta r_3 & z_3 - z_0 \end{vmatrix}}{|\mathbf{A}|} \quad (14)$$

$$a_3 = \frac{\begin{vmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & \Delta r_1 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & \Delta r_2 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & \Delta r_3 \end{vmatrix}}{|\mathbf{A}|} \quad (15)$$

$$b_1 = \frac{\begin{vmatrix} l_1 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ l_2 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ l_3 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{vmatrix}}{|\mathbf{A}|} \quad (16)$$

$$b_2 = \frac{\begin{vmatrix} x_1 - x_0 & l_1 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & l_2 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & l_3 & z_3 - z_0 \end{vmatrix}}{|\mathbf{A}|} \quad (17)$$

$$b_3 = \frac{\begin{vmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & l_1 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & l_2 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & l_3 \end{vmatrix}}{|\mathbf{A}|} \quad (18)$$

则对应目标位置的表达式为

$$\begin{cases} x = a_1 r_0 + b_1 \\ y = a_2 r_0 + b_2 \\ z = a_3 r_0 + b_3 \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)带入式(2), 得到

$$Ar_0^2 + 2Br_0 + C = 0 \quad (20)$$

其中二次方程的系数为

$$\begin{cases} A = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 - 1 \\ B = a_1(b_1 - x_0) + a_2(b_2 - y_0) + a_3(b_3 - z_0) \\ C = (b_1 - x_0)^2 + (b_2 - y_0)^2 + (b_3 - z_0)^2 \end{cases} \quad (21)$$

得到

$$r_0 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (22)$$

代入式(19)得到目标位置。当已知各站位置, 并测量3个时差, 可确定目标位置。由此得到了基于时差测量的4站三维目标定位解法。

2 信标信号时差测量分析

2.1 信标信号特性

在返回式探测器上通常会安装信标机, 在探测器出黑障或开伞后发射无线电信标信号, 一般使用甚高频(Very High Frequency, VHF)和特高频(Ultra High Frequency, UHF)频段。为了区别于其它信号, 对信号进行特定调制。典型的是使用幅度调制, 调制包络为单频正弦波。在地面使用多个接收处理站对信号进行测量, 通常包括一个主站和多个副站。对于多站系统而言, 主站和某个副站接收AM调制形式信标信号 $S_0(t)$ 和 $S_1(t)$ 分别为

$$S_0(t) = [1 + m_a \cos(2\pi t/T_m + \phi_0)] \cos(2\pi f_c t + \theta_0) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} S_1(t) &= \{1 + m_a \cos[2\pi(t - \tau)/T_m + \phi_0]\} \cos(2\pi f_c t + \theta_1) \\ &= \{1 + m_a \cos[2\pi t/T_m + (\phi_0 - 2\pi\tau/T_m)]\} \cos(2\pi f_c t + \theta_1) \\ &= [1 + m_a \cos(2\pi t/T_m + \phi_1)] \cos(2\pi f_c t + \theta_1) \end{aligned} \quad (24)$$

其中: t 为时间; m_a 为调制度; T_m 为正弦调制信号周期; τ 为主、副站接收信号时差; f_c 为射频载波频率; ϕ_0 为主站调制信号初相; ϕ_1 为副站调制信号初相; θ_0 为主站载波信号初相; θ_1 为副站载波信号初相。

正弦调幅信标信号时域波形如图2所示。对于空间上分置的两个接收站, 若接收机本振间不相参, 则多个站接收信号的中频相位无特定关系, 而调制包络体现了信号间的时差关系, 两路有时差关系的信标信号正弦包络如图3所示。

与脉冲调制信号所不同是信标信号的调制包络为

正弦连续波, 特征时间不如脉冲前沿显著。包络变换缓慢, 利用幅度特征点提取特征时间比较困难。利用正弦信号相位与频率之间的关系, 可以得到主、副站信号的到达时差为

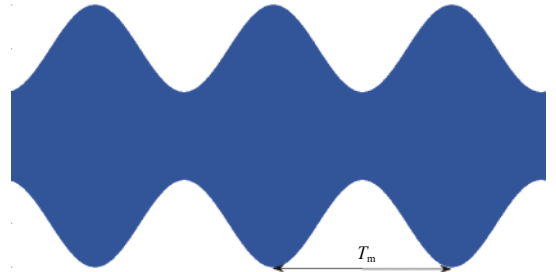


图2 信标信号时域波形示意图

Fig. 2 The beacon signal waveform of time domain

$$\tau = t_1 - t_0 = \frac{\phi_1}{2\pi f_{m_1}} - \frac{\phi_0}{2\pi f_{m_0}} \quad (25)$$

其中: t_0 和 t_1 分别为主副站信号的到达时间, f_{m_0} 和 f_{m_1} 分别为主副站信号调制频率估计值。

由式(25)可知, 时差测量问题转化为求正弦包络信号的频率和初相问题, 其中对调制包络频率参数估计尤为重要。

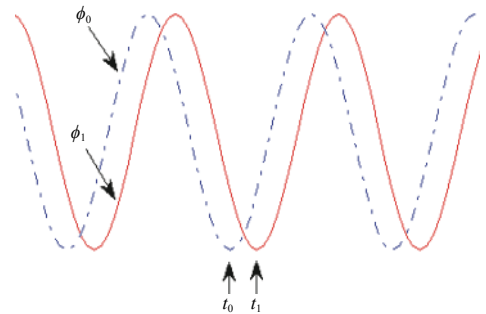


图3 信标信号正弦波包络时差相差对应关系

Fig. 3 The phase difference and time difference for sinusoidal envelope of the beacon

2.2 调制包络频率相位估计及时差测量

对调制正弦波包络频率估计可以使用常规的Rife(双谱线)算法^[12], 但该算法对信噪比要求较高, 并且被估计频率位于量化频率点附近时频率估计误差较大。因此采用改进的Rife算法^[13]进行频率估计, 其采用频移技术将信号的频谱移动 δ_k 量化单位, 使得被估计频率尽量接近两相邻谱线中心, 然后再进行估计。

移频因子 δ_k 为

$$\delta_k = \frac{1}{2} - \frac{|X_{k_0+\alpha}|}{|X_{k_0}| + |X_{k_0+\alpha}|} \quad (26)$$

基于频移和DTFT技术,采用改进的Rife算法频率估计公式为

$$\hat{f} = \frac{f_s}{N} \cdot \left(k_0 - \alpha \delta_k + \frac{\alpha \cdot |X_{k_0 - \alpha \delta_k + \alpha}|}{|X_{k_0 - \alpha \delta_k + \alpha}| + |X_{k_0 - \alpha \delta_k}|} \right) \quad (27)$$

其中:当 $|X_{k_0+0.5}| > |X_{k_0-0.5}|$ 时, $\alpha = 1$; 当 $|X_{k_0+0.5}| < |X_{k_0-0.5}|$ 时, $\alpha = -1$ 。

改进的Rife算法具有稳定良好的频率估计性能,计算量较小,易于硬件实现,能对信号进行实时处理。

根据调制包络频率估计,基于DTFT算法对正弦信号初相为

$$\phi = \text{Arg} \left(\sum_{i=0}^{N-1} x(n) e^{j \frac{2\pi n \hat{f}}{N}} \right) \quad (28)$$

其中: ϕ 为包络初相; $x(n)$ 为信号包络采样点; N 为采样点数; f_s 为采样频率; \hat{f} 为调制包络频率估计值。

通过对主站及其副站接收信号包络的频率和相位估计,并利用式(25)可以得到对应的时差。

2.3 时差解模糊

当信标信号包络的调制周期为 T_m ,对于最大 $\pm T_m/2$ 的时延不会产生模糊,对应主、副站间距离小于 $c \cdot T_m/2$ 测量时不会产生模糊,其中 c 为光速。布站时应尽量保证基线长度满足时差不模糊要求。

当主站与某个副站间距离大于 $c \cdot T_m/2$ 时,则目标到达两站间的时差会出现模糊现象,此时需要进行解模糊处理。

首先利用其它主、副站间距离小于 $c \cdot T_m/2$ 的时差进行定位,确定目标粗略位置;其次基于粗略位置信息,求出站间距离大于 $c \cdot T_m/2$ 的主、副站的粗略但无模糊时差 ΔT_1 。利用系统测量的精确但有模糊时差 Δt ,求解模糊数 k ,进而得到精确且无模糊时差 ΔT_2 为

$$k = \text{int} \left(\frac{\Delta T_1 - \Delta t}{T_m} \right) \quad (29)$$

$$\Delta T_2 = k T_m + \Delta t \quad (30)$$

代入所有无模糊的时差,进一步求解得到目标的精确位置。

2.4 信标信号时差测量精度仿真

信标信号时差测量精度仿真时,对理想信标信号加上不同信噪比对应的窄带噪声,采样率取1 MHz,处理时长取1 s,使用式(28)的方法计算包络信号的初始相位,根据式(25)计算时差,蒙特卡罗次数按500计,统计时差的均方根误差,得到在不同信噪比条件下,信标信号时差测量精度,如图4所示。

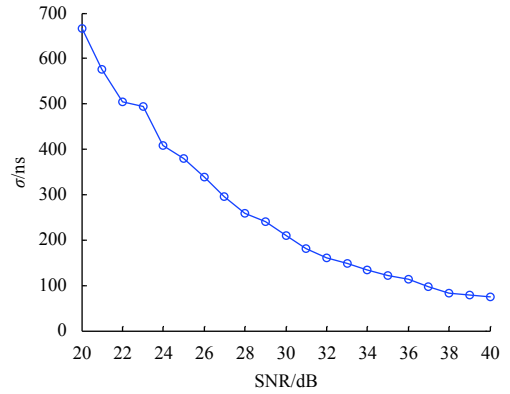


图4 不同信噪比条件下信标信号时差测量精度
Fig. 4 The relationship between TDOA precision and SNR of the beacon

3 信标信号无源定位精度分析

3.1 无源定位精度

在三维无源定位场合中,需要用4个观测站进行时差测量,目标到各个观测站的距离差为^[4]

$$\Delta r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (31)$$

其中:目标位置 (x,y,z) ,主站坐标 (x_0,y_0,z_0) ,副站坐标 (x_i,y_i,z_i) , $(i=1,2,3)$ 。

对距离差求偏导得

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta r_i}{\partial x} = \frac{x-x_i}{r_i} - \frac{x-x_0}{r_0} \\ \frac{\partial \Delta r_i}{\partial y} = \frac{y-y_i}{r_i} - \frac{y-y_0}{r_0} \\ \frac{\partial \Delta r_i}{\partial z} = \frac{z-z_i}{z_i} - \frac{z-z_0}{z_0} \end{cases} \quad (32)$$

等价于

$$\begin{bmatrix} d\Delta r_1 \\ d\Delta r_2 \\ d\Delta r_3 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{r_1} - \frac{x-x_0}{r_0} & \frac{y-y_1}{r_1} - \frac{y-y_0}{r_0} & \frac{z-z_1}{r_1} - \frac{z-z_0}{r_0} \\ \frac{x-x_2}{r_2} - \frac{x-x_0}{r_0} & \frac{y-y_2}{r_2} - \frac{y-y_0}{r_0} & \frac{z-z_2}{r_2} - \frac{z-z_0}{r_0} \\ \frac{x-x_3}{r_3} - \frac{x-x_0}{r_0} & \frac{y-y_3}{r_3} - \frac{y-y_0}{r_0} & \frac{z-z_3}{r_3} - \frac{z-z_0}{r_0} \end{bmatrix} \quad (34)$$

则:

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} d\Delta r_1 \\ d\Delta r_2 \\ d\Delta r_3 \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} d\tau_1 \\ d\tau_2 \\ d\tau_3 \end{bmatrix} c \quad (35)$$

其中: c 为光速。

定位误差协方差矩阵为

$$\begin{aligned}
\mathbf{P} &= \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{bmatrix} = \mathbf{E} \left\{ \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx & dy & dz \end{bmatrix} \right\} \\
&= \mathbf{H}^{-1} \mathbf{E} \left\{ \begin{bmatrix} d_{r_1} \\ d_{r_2} \\ d_{r_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{r_1} & d_{r_2} & d_{r_3} \end{bmatrix} \right\} \mathbf{H}^{-T} c^2 \\
&= \mathbf{H}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{r_1}^2 & \sigma_{r_1 r_2} & \sigma_{r_1 r_3} \\ \sigma_{r_2 r_1} & \sigma_{r_2}^2 & \sigma_{r_2 r_3} \\ \sigma_{r_3 r_1} & \sigma_{r_3 r_2} & \sigma_{r_3}^2 \end{bmatrix} \mathbf{H}^{-T} c^2 \\
&= \mathbf{H}^{-1} \mathbf{Q}_1 \mathbf{H}^{-T} c^2
\end{aligned} \tag{36}$$

其中

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} (\sigma_\tau c)^2 \tag{37}$$

其中： σ_τ 为时差测量误差。计算目标定位圆概率误差

$$CEP = 0.75 \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \tag{38}$$

根据分析区域内目标不同位置，可以得到目标定位圆概率误差分布。

3.2 信标信号无源定位精度仿真

对返回式探测器进行搜索时，通常使用直升机在理论着陆点周围采用四方形进行空中布站，边长取40 km，分析区域取 $(\pm 150 \text{ km}) \times (\pm 120 \text{ km})$ 。时差精度按240 ns设定。信噪比与距离平方成反比。利用式(32)~(36)，得到目标的圆概率误差分布，结果如图5所示。

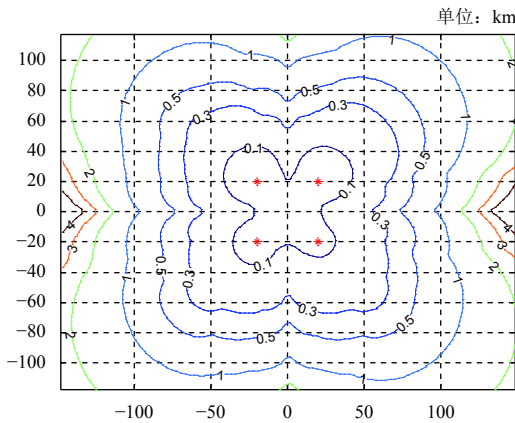


图5 时差定位系统圆概率误差分布图
Fig. 5 CEP distribution of TDOA location system

从图5可以看出在四方形布站条件下，目标距离越远时定位误差越大，而且定位误差随目标角度变化不大，近似各向同性分布。在100 km半径范围内定位误差小于1 km，可以满足返回式探测器搜索定位需求。

3.3 航迹跟踪精度仿真

返回式探测器通常在开伞至着陆前发射信标信号，时差体制无源定位系统可以对运动过程中的返回

器目标进行跟踪，站址为四方形布站，边长40 km，仿真航迹和布站如图6所示。对定位点迹使用常规 α - β 滤波^[1]，目标定位跟踪时距离误差和方位误差如图7~8所示。

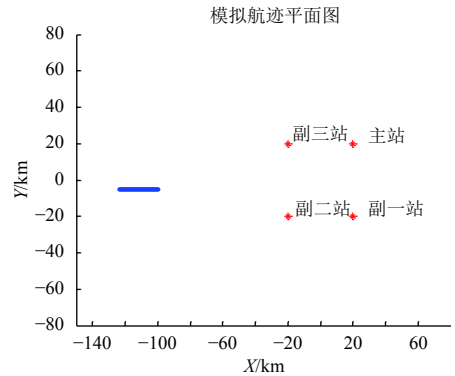


图6 目标轨迹和站址分布图
Fig. 6 Distribution of Target track and Station

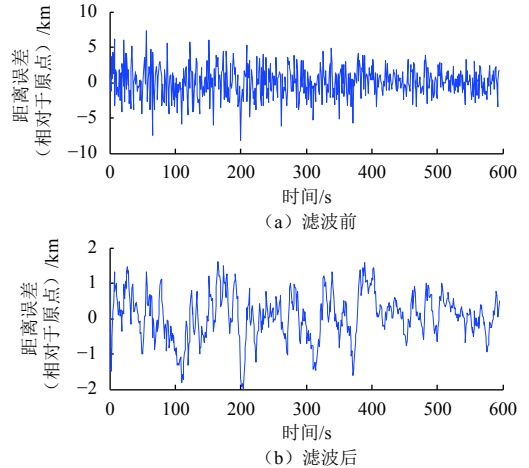


图7 时差定位目标跟踪距离误差
Fig. 7 Distance Error of tracking of TDOA location system

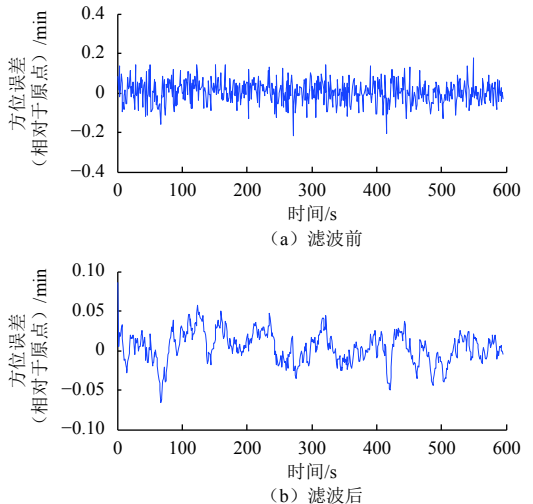


图8 时差定位目标跟踪方位误差
Fig. 8 Azimuth Error of tracking of TDOA location system

可见对返回式探测器的信标信号进行时差定位处理，经航迹滤波后，距离误差小于1 km，方位误差小于1 min，定位性能优良，可以满足实际工程中的搜索定位需求。

4 目标速度测量分析

4.1 速度测量

对于主动雷达而言，通常测量目标的多普勒频率，也就是目标回波的载波频率和发射波形载波频率的差值来计算目标速度^[14]。多普勒频率与目标速度以及波长的关系为

$$\begin{cases} f_d = \frac{2v}{\lambda} \\ v = \frac{f_d \lambda}{2} = \frac{f_d c}{2f_c} \end{cases} \quad (39)$$

其中： v 为目标径向速度； λ 为载波波长； f_c 为载波频

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{(x-x_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} - \frac{(x-x_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} & \frac{(y-y_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} - \frac{(y-y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} \\ \frac{(x-x_2)}{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}} - \frac{(x-x_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} & \frac{(y-y_2)}{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}} - \frac{(y-y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} \\ \frac{(x-x_3)}{\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}} - \frac{(x-x_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} & \frac{(y-y_3)}{\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}} - \frac{(y-y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}} \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

使用最小二乘算法对目标速度进行估计得到

$$\mathbf{V} = \frac{c}{f_c} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{F}_d \quad (43)$$

使用时差定位的目标位置和测量的目标多普勒频差，可以求得目标速度。

4.2 仿真分析

设置目标速度设为40 m/s，多普勒频差均方根误差设为1 Hz。目标仿真航迹和布站如图9所示。利用式

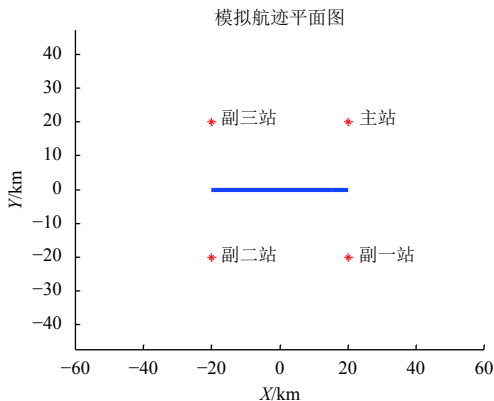


图9 目标轨迹和站址分布图

Fig. 9 Distribution of Target track and Station

率； f_d 为多普勒频率。

对于无源定位系统而言，作为纯接收系统信标信号不能发射频率精确值，不能像主动雷达直接获得目标的多普勒频率，但可以测量多个接收站接收信号频率差值，来对目标进行速度估计。

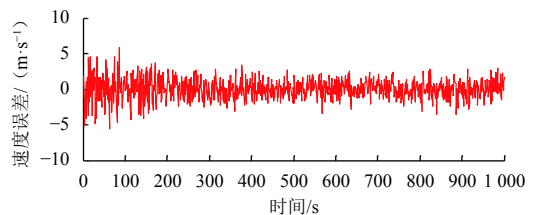
由于水平布站时各站高度差别不大，目标在垂直方向的速度引起多普勒频差较小，通常可以忽略不计，对目标速度的估计可使用二维模型，运动目标发射主副接收站接收的信号频差 F_d 为

$$\mathbf{F}_d = \frac{f_c}{c} \mathbf{A} \mathbf{V} \quad (40)$$

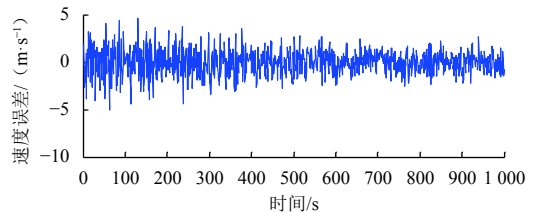
其中

$$\mathbf{F}_d = \begin{bmatrix} f_{d_{10}} \\ f_{d_{20}} \\ f_{d_{30}} \end{bmatrix} \quad (41)$$

(43)得到速度估计误差，如图10所示。仿真结果速度误差均方根误差优于1.5 m/s。



(a) 目标X方向速度误差(均方根误差1.4 m/s)



(b) 目标Y方向速度误差(均方根误差1.3 m/s)

图10 速度估计误差

Fig. 10 Velocity Error of the Target

5 结论

本文提出了针对返回式深空探测器信标信号的长基线无源时差定位方法，通过对信标信号包络频率、

相位以及时差等参数的测量算法分析和定位精度仿真,结果表明在适当布站情况下对100 km范围内返回器定位误差优于1 km,可以作为对现有测控信息、搜救卫星信息和区域定位信息的有效补充,具有一定的工程实现意义。这对于高动态小目标、大着陆范围的返回式深空探测器解决了低空探测难题,显著提升了着陆预报精度,为后续深空探测活动及任务规划奠定了技术基础。

参 考 文 献

- [1] 董光亮,李海涛,郝万宏,等. 中国深空测控系统建设与技术发展[J]. 深空探测学报(中英文),2018,5(2):99-114.
DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 99-114.
- [2] 徐茂格,施为华. 深空微波测距测速现状及发展建议[J]. 深空探测学报(中英文),2018,5(2):141-147.
XU M G, SHI W H. Development of deep space radio ranging and velocity measurement technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 141-147.
- [3] 候鹰. 中国载人航天工程着陆场系统总体技术创新[J]. 载人航天, 2004, 5(10): 59-64.
- [4] 刘嘉兴. 载人航天USB测控系统及其关键技术[J]. 宇航学报, 2005, 26(6): 743-747.
LIU J X. Key technologies of the USB TT&C system for manned space flight[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(6): 743-747.
- [5] 许建忠,王祖林,郭旭静. 统一S波段卫星测控系统的仿真实现[J]. 航天控制, 2009, 27(5): 65-66.
XU J Z, WANG Z L, GUO X J. The USB TT&C system and realization of simulation[J]. Aerospace Control, 2009, 27(5): 65-66.
- [6] 孙威. 全球卫星搜救系统在载人航任务搜索回收中的应用[J]. 载人航天, 2003(3): 60-64.
- [7] 曾晖. 全球卫星搜索与救援系统的现状与未来[J]. 航天器工程, 2007, 16(5): 60-64.
ZENG H. Present and future status of global satellite search and rescue system[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(5): 60-64.
- [8] 卞韩城. 载人航天航空救援体系建设探讨[J]. 载人航天, 2010(1): 31-35.
BIAN H C. On the system construction of astronautic search and rescue with aircraft[J]. Manned Spacecraft, 2010(1): 31-35.
- [9] 杨建华. 雷达无源定位技术的发展与战术应用[J]. 中国电子科学院学报, 2009, 6(4): 601-605.
YANG J H. The latest development of radar passive localization technology and its applications[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009, 6(4): 601-605.
- [10] 李建春,刘方正,章四兵. 分布式多传感器无源定位综述[J]. 舰船电子工程, 2013(9): 28-29.
LI J C, LIU F Z, ZHANG S B. Review of the passive location technology based on distributed multi-sensor[J]. Ship Electronic Engineering, 2013(9): 28-29.
- [11] 王小英,江怡帆,赵悦. 三维移动目标无源定位算法[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(3): 280-281.
WANG X Y, JIANG Y F, ZHAO Y. An algebraic geometric probabilistic passive location method for three-dimensional moving target[J]. Radar Science and Technology, 2019, 17(3): 280-281.
- [12] 刘磊,姚剑,谢学锋,等. TDOA无源定位系统的原理与影响因素分析[J]. 无线电通信技术, 2017, 4: 42-43.
LIU L, YAO J, XIE X F, et al. Principle and influencing factors analysis of TDOA passive location system[J]. Wireless Communication Technology, 2017, 4: 42-43.
- [13] 杜检来,方堃,刘刚,等. 一种低信噪比条件下的深空探测载波捕获算法[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(2): 164-169.
DU J L, FANG K, LIU G, et al. A deep space exploration carrier capture algorithm with low SNR[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 164-169.
- [14] 刘聪峰. 无源定位与跟踪[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011.
- [15] 刘福东,陈志远. 基于Rife算法的频率估计及其FPGA实现[J]. 工业控制计算机, 2017, 27(4): 89-92.
LIU F D, CHEN Z Y. Frequency estimation based on rife algorithm and its implementation on FPGA[J]. Industrial Control Computer, 2017, 27(4): 89-92.
- [16] 杨洁,王美花. 基于修正Rife算法的雷达信号载频估计[J]. 西安邮电大学学报, 2017, 22(6): 62-63.
YANG J, WANG M H. Carrier frequency estimation of the radar signal based on the modified Rife algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2017, 22(6): 62-63.
- [17] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1995.

作者简介:

沈小马(1978-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:雷达总体与无源定位技术。

通讯地址:北京市142信箱203分箱(100854)

E-mail: horse_shen@qq.com

吕斌涛(1972-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:航天测控系统与回收。**本文通讯作者。**

通讯地址:北京市114信箱(100094)

E-mail: lmj7616@163.com

A Method of Passive Location of the Returnable Spacecraft Beacon

SHEN Xiaoma¹, LV Bintao², SUN Wei², LIU Yang², YE Jianshe², BIAN Hancheng³

(1. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

3. Jiuquan Satellite Launch Center of China, Jiuquan 732750, China)

Abstract: During the landing procedure of a recoverable spacecraft, measurement and control information, COSPAS/SARSAT system information and regional location information are often used. According to the deficiencies of above method, the long baseline TDOA technique is suggested. Firstly the principles of TDOA system and the solution of TDOA equations are proposed. The features of the beacon's sinusoidal envelop are analyzed. High precision frequency estimation method based on modified Rife algorithm and TOA estimation method based on DTFT phase evaluation algorithm are suggested. Simulations on TDOA precision are given. Location precision distribution of the beacon is simulated. The stationary location error is less than 1km when the target range is less than 100km. When the square style of the receiving stations is applied, the dynamical tracking and filtering process is simulated. The results show that range error is less than 1km and azimuth error is less than 1minute during the tracking procedure. Finally the two-dimension velocity estimation method based on the FDOA information is analyzed.

Keywords: returnable spacecraft; beacon; passive location; time difference of arrival; frequency difference of arrival

Highlights:

- The passive location technique as effective supplement is first introduced.
- The character of space beacon is fully analyzed, and the high precision modulation frequency and time difference measurement are introduced.
- According to the simulation results, the range error is less than 1 km, the azimuth error is less than 1 minute, the velocity error is less than 1.5 m/s.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 刘勇]