

引用格式:薛艳荣,肖波,李雨薇,等.基于时差频差的双星无源定位地基差分技术研究[J].时间频率学报,2022,45(4):294-300.

基于时差频差的双星无源定位 地基差分技术研究

薛艳荣^{1,2}, 肖波^{1,2}, 李雨薇^{1,2}, 刘娅^{1,2}, 李孝辉^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了进一步改善基于到达时间差和到达频率差的双星无源定位系统的定位误差,进而提高系统的定位精度,针对该系统的误差分布规律,给出了双星无源定位差分技术的概念,并分析了该项差分技术和全球卫星导航系统(GNSS)差分技术的区别。给出双星无源定位地基差分方法,即位置差分 and 伪距差分方法,分析这两种方法的优缺点,研究了两种方法的适用范围。结果表明,利用差分技术对双星无源定位系统的误差修正后,可以改善系统的定位精度,定位精度可由 10~20 km 提高到优于 5 km。

关键词:双星无源定位;到达时间差;到达频率差;定位精度

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2022-04-0294-07

Research on ground-based differential technology in dual-satellite passive positioning system basing on time difference of arrival and frequency difference of arrival

XUE Yan-rong^{1,2}, XIAO Bo^{1,2}, LI Yu-wei^{1,2}, LIU Ya^{1,2}, LI Xiao-hui^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the positioning error of dual-satellite passive positioning system based on the time difference of arrival and frequency difference of arrival, and further improve the positioning accuracy of the system, according to the error distribution law of dual-satellite passive positioning system, the concept of dual-satellite passive positioning differential technology is given. The difference between this differential technology and GNSS differential technology is analyzed. On this basis, the ground-based differential technology of dual-satellite passive positioning system, namely the position differential technology and the pseudo-range differential technology, is given. The advantages and disadvantages of these two methods are analyzed, and the application scope of the two methods is investigated. The results show that after the error correction of dual-satellite passive location system by using differential technology, the positioning accuracy of the system can be improved from 10 to 20 km to better than 5 km.

Key words: dual-satellite passive positioning; time difference of arrival; frequency difference of arrival; positioning accuracy

收稿日期:2021-11-17;接受日期:2022-03-25

基金项目:中国科学院青年创新促进会资助项目(2018444);中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”资助项目(XAB2021YN24)

0 引言

双星时差频差无源定位系统是利用两颗卫星通过测量地面同一个辐射源的时差和频差信息来实现对信号源的精确定位,具有成本低、调制周期短、技术相对比较成熟等特点,除此之外,该系统还具有作用距离远、隐蔽性好,所需平台数少等优点,因而具有极强的生存能力和反隐身能力,目前成为具有良好应用前景的一种无源定位方式。国外在 20 世纪 70 年代初期提出了无源定位系统理论,主要是利用到达时间差(TDOA)和测向来定位。80 年代初期出现了时差频差定位技术的一些研究成果,S. Stein 给出了时差和频差的估计精度 Cramer-Rao 下限和测量方法,同期 D. J. Torrieri 深入研究了对于静态发射机的两种重要无源定位体系即时差和测向定位体系的性能分析^[1-4]。90 年代 K. C. Ho 和 Y. T. Chan 给出了双星时差频差定位的解析求解算法。目前国内的学者对双星无源定位系统的研究也获得了一些成果。张勇等^[5]学者提出了一种双星时差频差无源定位的解析计算方法,算法将复杂的时差、频差定位方程组简化为简单的 6 次实系数多项式方程,降低了方程组的计算复杂度,并得到了该算法定位误差的几何精度因子(GDOP)分布。郭福成等^[6]学者提出了另一种不同的解算目标三维位置的方法,将原来的高次方程组简化为线性方程组进行了求解,并在一定的条件下获得了定位误差的解析表达式。但是当前的研究主要集中在时差频差定位方程的优化求解问题上^[7-9],由这些算法获得的定位精度还是相对较差,这对于卫星干扰源的定位造成很大的困扰。因此,要进一步提高定位精度,需要探索新的定位体制。

本文从双星定位误差与卫星导航定位误差的相似性出发^[10-11],结合 GNSS(Global Navigation Satellite System)差分技术,研究双星时差频差无源定位地基差分定位方法,即位置差分 and 伪距差分,利用两种差分技术对定位误差修正后可以进一步提高定位精度。

1 双星时差频差无源定位位置差分定位方法

定位精度高低决定着对目标监测定位的准确性。双星无源定位系统定位精度目前只能达到 10~20 km,尚不能满足高精度用户需求。因此改善双星无源定位系统的精度具有重要的研究价值。差分方法在该系统中的实施是一项有效的改善定位精度的技术。

1.1 双星时差频差无源定位解算

假设在某一时刻, $(x_s, y_s, z_s), i = 1, 2$ 是卫星位置,两颗卫星的速度矢量为 $\vec{v}_i = (v_{ix}, v_{iy}, v_{iz}), i = 1, 2$,地面目标到卫星 1 和卫星 2 的距离分别为 r_1, r_2 ,地面目标信号的频率为 f_0 ,光速为 c, a 是地球半长轴, b 是地球半短轴。 Δt 是测量的地面目标信号到达两颗卫星的到达时间差, Δf 是测量的地面目标到达两颗卫星的到达频率差, $\Delta f_1, \Delta f_2$ 分别为两卫星相对于地面目标的多普勒频移, (x, y, z) 是待求的地面目标位置。由到达时间差和到达频差及地球椭球方程可得如下方程:

$$\Delta t = \frac{r_1 - r_2}{c}, \quad (1)$$

$$\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2, \quad (2)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1, \quad (3)$$

式(1)~(3)中,

$$r_1 = \sqrt{(x_{s1} - x)^2 + (y_{s1} - y)^2 + (z_{s1} - z)^2}, \quad (4)$$

$$r_2 = \sqrt{(x_{s2} - x)^2 + (y_{s2} - y)^2 + (z_{s2} - z)^2}, \quad (5)$$

$$\Delta f_1 = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{r}_1}{\|\vec{r}_1\|} = \frac{f_0}{c \cdot r_1} [v_{1x}(x_{s1} - x) + v_{1y}(y_{s1} - y) + v_{1z}(z_{s1} - z)], \quad (6)$$

$$\Delta f_2 = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\vec{v}_2 \cdot \vec{r}_2}{\|\vec{r}_2\|} = \frac{f_0}{c \cdot r_2} [v_{2x}(x_{s2} - x) + v_{2y}(y_{s2} - y) + v_{2z}(z_{s2} - z)]. \quad (7)$$

由 3 个方程 3 个未知量即可解出地面目标位置,算法可用牛顿迭代法解算。由式(1)、(2)和(3),令

$$F_1(x, y, z) = \sqrt{(x_{s1} - x)^2 + (y_{s1} - y)^2 + (z_{s1} - z)^2} - \sqrt{(x_{s2} - x)^2 + (y_{s2} - y)^2 + (z_{s2} - z)^2} - c\Delta t, \quad (8)$$

$$F_2(x, y, z) = \frac{f_0}{c} \cdot \left(\frac{x_{s2} - x}{r_2} v_{2x} + \frac{y_{s2} - y}{r_2} v_{2y} + \frac{z_{s2} - z}{r_2} v_{2z} - \frac{x_{s1} - x}{r_1} v_{1x} - \frac{y_{s1} - y}{r_1} v_{1y} - \frac{z_{s1} - z}{r_1} v_{1z} \right) - \Delta f, \quad (9)$$

$$F_3(x, y, z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} - 1. \quad (10)$$

设 $\begin{cases} x = \hat{x} + \Delta x \\ y = \hat{y} + \Delta y \\ z = \hat{z} + \Delta z \end{cases}$, 其中 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 表示近似位置, $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 表示真实位置与近似位置之间的偏离。故有

$$\begin{cases} F_1 = (\hat{x} + \Delta x, \hat{y} + \Delta y, \hat{z} + \Delta z) = 0 \\ F_2 = (\hat{x} + \Delta x, \hat{y} + \Delta y, \hat{z} + \Delta z) = 0. \\ F_3 = (\hat{x} + \Delta x, \hat{y} + \Delta y, \hat{z} + \Delta z) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)的3个式子用泰勒级数在 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 处展开:

$$\begin{cases} F_1 = (\hat{x} + \Delta x, \hat{y} + \Delta y, \hat{z} + \Delta z) = F_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) + \frac{\partial F_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{x}} \cdot \Delta x + \frac{\partial F_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{y}} \cdot \Delta y + \frac{\partial F_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{z}} \cdot \Delta z \\ F_2 = (\hat{x} + \Delta x, \hat{y} + \Delta y, \hat{z} + \Delta z) = F_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) + \frac{\partial F_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{x}} \cdot \Delta x + \frac{\partial F_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{y}} \cdot \Delta y + \frac{\partial F_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{z}} \cdot \Delta z \\ F_3 = (\hat{x} + \Delta x, \hat{y} + \Delta y, \hat{z} + \Delta z) = F_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) + \frac{\partial F_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{x}} \cdot \Delta x + \frac{\partial F_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{y}} \cdot \Delta y + \frac{\partial F_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{z}} \cdot \Delta z \end{cases}, \quad (12)$$

将式(12)写成矩阵形式如下:

$$-\begin{bmatrix} F_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ F_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ F_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial F_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial F_1(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{z}} \\ \frac{\partial F_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial F_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial F_2(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{z}} \\ \frac{\partial F_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial F_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial F_3(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial \hat{z}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}, \quad (13)$$

令

$$\mathbf{K}(x, y, z) = \begin{bmatrix} F_1(x, y, z) \\ F_2(x, y, z) \\ F_3(x, y, z) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{F}(x, y, z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial z} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial z} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y} & \frac{\partial F_3}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

若第 n 次迭代近似值为 $(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})$, 则第 $n+1$ 次迭代值的牛顿迭代式为

$$(x^{(n+1)}, y^{(n+1)}, z^{(n+1)}) - (x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)}) = -(\mathbf{F}(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})^{-1} \cdot \mathbf{K}(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)}))^T, \quad (16)$$

$$\text{令 } \mathbf{H}(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)}) = -(\mathbf{F}(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})^{-1} \cdot \mathbf{K}(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)}))^T, \quad (17)$$

则式(16)变为

$$(x^{(n+1)}, y^{(n+1)}, z^{(n+1)}) - (x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)}) = \mathbf{H}(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)}). \quad (18)$$

因此对于给定的初始值 $(x^{(0)}, y^{(0)}, z^{(0)})$ 及其任意小的 $\epsilon > 0$,若迭代第 $n+1$ 次后能够使 $|\mathbf{H}(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})| < \epsilon$,则该算法收敛,方程的解为 $(x^{(n+1)}, y^{(n+1)}, z^{(n+1)})$ 。

1.2 双星时差频差无源定位位置差分原理

GNSS位置差分是GNSS局域差分的最简形式,但在GNSS应用上有一定的局限性,主要是因为用户和基准站必须观测相同的卫星组合,否则使用的位置改正数会出错。而在双星时差频差无源定位系统中,卫星及其数目是固定的,不存在卫星基准站和用户使用不同卫星组合而出现改正错误的情况。同时,对地面所有辐射源定位都采用相同的系统配置,两者误差的相关性更强,位置差分的应用空间更大。因此,可以使用位置差分对双星无源定位进行误差改正来提高系统定位精度。

双星时差频差无源定位的位置差分是指,对于已知辐射源A的真实位置 (x_1, y_1, z_1) ,由于卫星速度误差,卫星位置误差与多普勒测量误差等误差,利用牛顿迭代法得到A的解算位置 (x, y, z) 是存在误差的,计算A的真实位置与解算位置的误差 ΔX_1 :

$$\Delta X_1 = (x, y, z) - (x_1, y_1, z_1). \quad (19)$$

对于未知辐射源B的真实位置 (x_2, y_2, z_2) ,通过迭代算法可以获得解算位置 (x', y', z') ,用 ΔX_1 修正B的解算位置,可获得B的接近真实位置的解 (x'_2, y'_2, z'_2) :

$$(x'_2, y'_2, z'_2) = (x', y', z') + \Delta X_1. \quad (20)$$

则B的位置差分定位误差 ΔX 为

$$\Delta X = (x'_2, y'_2, z'_2) - (x_2, y_2, z_2) = (x, y, z) - (x_1, y_1, z_1) - [(x_2, y_2, z_2) - (x', y', z')]. \quad (21)$$

由于A、B相距较近(1 000 km之内)引起定位误差的系统误差相关性很强,因此将已知辐射源所得的位置改正数应用于未知辐射源的定位,可以提高定位精度。

1.3 仿真试验

为了验证位置差分在双星无源定位系统中的应用,对双星时差频差无源定位位置差分定位误差进行仿真。地球椭球长半轴取 $a=6\,378\,137$ m,短半轴取 $b=6\,356\,752.314$ m,光速取 $c=299\,792\,458$ m/s,辐射源发射载波频率10 GHz。假设两颗卫星接收到辐射源地面目标信号时的经纬分别为东经125°,北纬29.4°、东经125°,北纬30.5°,轨道高度为1 100 km,并加入星历误差。根据当前的误差控制水平,取时间差测量精度 $\sigma_t=100$ ns,多普勒频率差测量精度 $\sigma_f=10$ Hz,并设卫星1和卫星2的速度相同,分别为 $v_{1x}=v_{2x}=743.8$ m/s, $v_{1y}=v_{2y}=3\,228.6$ m/s, $v_{1z}=v_{2z}=6\,503.2$ m/s。通过选取未知辐射源与已知辐射源相差500 km进行位置差分仿真试验,其结果如图1所示。

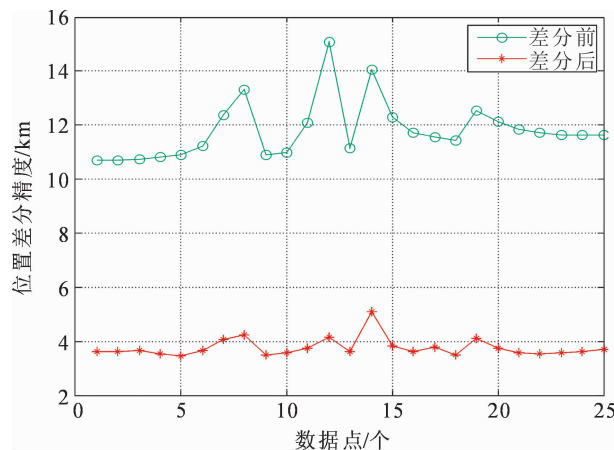


图1 未知辐射源与已知辐射源相差500 km的位置差分前后对比

通过对未知辐射源进行位置差分,差分后定位精度控制在 5 km 以内,因此可以使用位置差分方法来改善未知辐射源的定位精度。但是,使用位置差分方法是有条件限制的,对于已知辐射源的选取至关重要。建议选取距离相近的已知辐射源与未知辐射源进行差分。

2 双星时差频差无源定位伪距差分定位方法

GNSS 伪距差分是目前应用较为广泛的一种对 GNSS 定位误差进行改正的技术。其基本原理是基准站的接收机测得它到卫星的距离,因为星历误差、星钟误差和大气传播延迟误差的存在,测量的伪距并不等于接收机到卫星的真实距离。将根据星历计算得到的伪距作为真值,真实伪距与含有误差的测量值加以比较得到伪距改正数,然后将所有可视卫星的伪距改正数广播给用户,用户利用该改正数来改正相应的伪距观测测量。鉴于双星时差频差无源定位在定位时观测量存在误差,可以参照 GNSS 伪距差分过程中的误差修正原理,将伪距差分应用于双星无源定位中对时差频差观测量进行差分修正^[12-14]。再者,对地面所有辐射源定位都采用相同的系统配置,两者误差的相关性更强,伪距差分的应用空间可观。因此,可以使用伪距差分方法对双星无源定位进行误差改正来提高系统定位精度。

2.1 双星时差频差无源定位伪距差分原理

双星时差频差无源定位的伪距差分原理如图 2 所示。

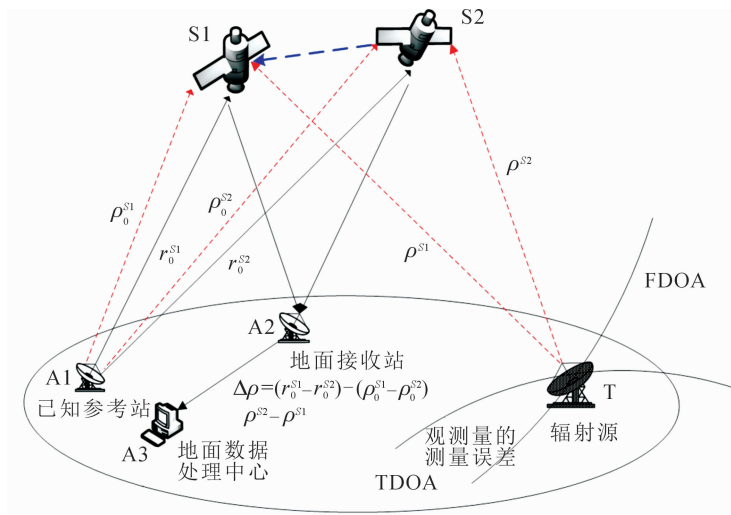


图 2 双星时差频差无源定位的伪距差分原理

设参考站的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 未知辐射源的坐标为 (x, y, z) , 首先测量卫星 1 和卫星 2 到参考站的伪距差为

$$\rho_0^{s2} - \rho_0^{s1} = r_0^{s2} - r_0^{s1} + \Delta\rho_0^s - \Delta\rho_0, \quad (22)$$

式(22)中, r_0^{s1} 、 r_0^{s2} 分别为卫星 1 和卫星 2 到参考站的几何距离, $\Delta\rho_0^s$ 表示与地面参考站位置和卫星位置有关的测距误差, $\Delta\rho_0$ 表示与接收机有关的测距误差。可以根据已知参考站的位置与卫星广播星历计算获得, 即:

$$r_0^{s2} = \sqrt{(x_{s2} - x_0)^2 + (y_{s2} - y_0)^2 + (z_{s2} - z_0)^2}, \quad (23)$$

$$r_0^{s1} = \sqrt{(x_{s1} - x_0)^2 + (y_{s1} - y_0)^2 + (z_{s1} - z_0)^2}. \quad (24)$$

卫星的伪距改正数由式(25) 计算得到:

$$\Delta\rho = (r_0^{s1} - r_0^{s2}) - (\rho_0^{s1} - \rho_0^{s2}). \quad (25)$$

未知辐射源到卫星 1 和卫星 2 的伪距分别为 ρ^{s2} 、 ρ^{s1} , 利用伪距改正数 $\Delta\rho$ 改正未知辐射源的伪距差, 得到接近真值的到达时间差 $\Delta t'$:

$$c\Delta t' = \rho^2 - \rho^1 + \Delta\rho = \sqrt{(x_{s1} - x)^2 + (y_{s1} - y)^2 + (z_{s1} - z)^2} - \sqrt{(x_{s2} - x)^2 + (y_{s2} - y)^2 + (z_{s2} - z)^2} \quad (26)$$

类似地,对未知辐射源的到达频率差进行改正。首先测量参考站到卫星 1 和卫星 2 的到达频率差为 Δf_r , 利用已知参考站的位置、卫星广播星历以及卫星真实速度可以获得参考站到卫星 1 和卫星 2 的接近真值的到达频率差 Δf_0 :

$$\frac{c\Delta f_0}{f_0} = \frac{x_{s2} - x_0}{r_2} v_{x2} + \frac{y_{s2} - y_0}{r_2} v_{y2} + \frac{z_{s2} - z_0}{r_2} v_{z2} - \frac{x_{s1} - x_0}{r_1} v_{x1} - \frac{y_{s1} - y_0}{r_1} v_{y1} - \frac{z_{s1} - z_0}{r_1} v_{z1} \quad (27)$$

卫星的频率改正数由式(28)计算得到:

$$\Delta F = \Delta f_0 - \Delta f_r \quad (28)$$

未知辐射源到卫星 1 和卫星 2 的到达频率差为 Δf , 利用频率改正数 ΔF 改正未知辐射源的到达频率差, 得到接近真值的到达频率差 $\Delta f'$:

$$\frac{c\Delta f'}{f_0} = \frac{c(\Delta f + \Delta F)}{f_0} = \frac{x_{s2} - x}{r_2} v_{x2} + \frac{y_{s2} - y}{r_2} v_{y2} + \frac{z_{s2} - z}{r_2} v_{z2} - \frac{x_{s1} - x}{r_1} v_{x1} - \frac{y_{s1} - y}{r_1} v_{y1} - \frac{z_{s1} - z}{r_1} v_{z1} \quad (29)$$

设 a 是地球半长轴, b 是地球半短轴, 则地球椭球方程设为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (30)$$

利用差分后的方程(26)、(29)和(30)解算未知辐射源的位置, 进而实现高精度定位。

2.2 仿真试验

本仿真试验与位置差分仿真条件类似。选未知辐射源与已知辐射源纬度相距 1 000 km 以内进行伪距差分试验, 差分前后的定位精度结果如图 3 所示。

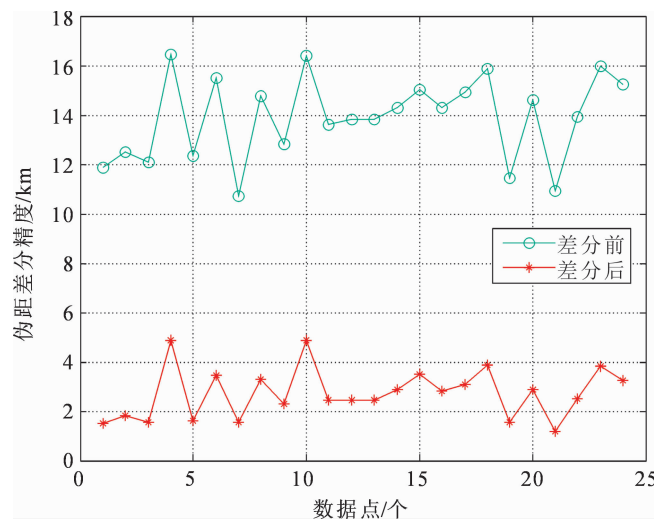


图 3 未知辐射源与已知辐射源相距 1 000 km 以内的伪距差分前后对比

通过对未知辐射源进行伪距差分, 定位精度也得到了提高, 因此可使用伪距差分方法来改善未知辐射源的定位精度, 这是目前提高双星无源定位系统定位精度的有效途径之一。不过在差分过程中, 选取相距较近的已知辐射源与未知辐射源进行伪距差分时的差分效果更好, 并且二者距离最好控制在 1 000 km 以内。

3 结语

笔者研究了基于双星时差频差无源定位系统的地基差分技术,给出了位置差分 and 伪距差分原理,并对其定位精度进行了分析。通过仿真试验,分析了两种方法的差分效果和定位精度,结果表明利用差分技术对双星无源定位进行误差修正后的定位精度由目前的 10~20 km 提高到优于 5 km。差分技术是一种有效修正双星无源定位误差和改善定位精度的方法,对双星无源定位系统的发展实施具有一定的理论与应用价值。

参考文献:

- [1] HO K C, CHAN Y T. Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(3): 770-783.
- [2] CAO Y L, PENG L, LI J Z, et al. A new iterative algorithm for geolocating a known altitude target using TDOA and FDOA measurements in the presence of satellite location uncertainty[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(5): 1510-1518.
- [3] WANG G, LI Y, ANSARI N. A semidefinite relaxation method for source localization using TDOA and FDOA measurements[J]. IEEE Transaction on Vehicle Technology, 2013, 62(2): 853-862.
- [4] 狄慧, 刘渝, 杨健. 基于径向加速度精估计的 PSO 单星无源定位[J]. 宇航学报, 2014, 35(9): 1036-1043.
- [5] 张勇, 盛卫东, 郭福成, 等. 低轨双星无源定位算法及定位精度分析[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(2): 188-192.
- [6] 郭福成, 樊昀. 双星时差频差联合定位方法及其误差分析[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1381-1386.
- [7] 徐海源, 吕守业, 韩涛. 三星多普勒频差无源定位方法及定位精度分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1832-1837.
- [8] LEE Y K, YANG S H, LEE C B, et al. Evaluation of performance enhancement on CRLB of CAF under multiple emitters[J]. Electronics Letters, 2016, 52(3): 235-237.
- [9] 张威, 沈俊, 张更新. 基于卫星星历的 TDOA/FDOA 研究[J]. 空间电子技术, 2011, 8(3): 25-29.
- [10] XUE Yan-rong, LI Yu-wei, CHEN Rui-qiang, et al. Research on the blind zone positioning in dual-satellite passive location system[J]. Sensors & Transducers Journal, 2019, 238(11): 31-35.
- [11] XUE Yan-rong, FENG Shao-jun, OCHIENG W Y, et al. The improvement of the positioning accuracy in search and rescue with two satellites[C]//第七届中国卫星导航学术年会, 长沙: 第七届中国卫星导航学术年会组委会, 2016.
- [12] XUE Yan-rong, DU Juan, LI Yu-wei, et al. Study of a new method about improving the positioning precision of dual-satellites passive location system[C]//ION_2017PNT, Hawaii: [s. n.], 2017: 211-216.
- [13] 薛艳荣, 李孝辉, 许龙霞, 等. 一种基于双星时差频差无源定位的伪距差分方法研究: 中国, ZL201310519847. 6[P]. 2016-01.
- [14] 李孝辉, 薛艳荣, 吴海涛, 等. 一种基于共视原理的单向授时方法: 中国, ZL201010246438. X[P]. 2012-11.