

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107584

基于卫星外辐射源的双站时差定位方法

窦修全^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081; 2. 河北省电磁频谱认知与管控重点实验室 石家庄 050081)

摘要: 针对基于卫星外辐射定位的单站二维测向时差、三站时差定位模型存在定位精度低、系统设备复杂的问题,设计了一种限定约束条件双站时差定位模型,利用目标平台先验信息,将目标高度信息引入地球位置方程,代替定位模型中时差方程,将三站时差定位方程降维处理,解决双站受测量条件制约无法建立有效的定位方程问题,利用牛顿迭代处理方法完成目标位置解算,得到限定条件下高精度目标位置。试验结果表明,时差、定位站间距和卫星轨道误差等参数对定位精度影响较小,各个参数相对定位精度均优于0.2%R,该定位方法具有较好的工程推广价值。

关键词: 外辐射源;无源定位;时差;牛顿迭代

中图分类号: TN9112 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Two-station TDOA localization algorithm based on satellite external illuminators

Dou Xiuquan^{1,2}

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China; 2. Hebei Key Laboratory of Electromagnetic Spectrum Cognition and Control, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at the problems of low positioning accuracy and complex system equipment of two-dimensional direction finding time difference of single station and three station time difference location model based on external satellite radiation positioning. We design a limit constraints time difference of two station location model, using a priori knowledge about the target height information is introduced into the earth position equation, instead of positioning time difference in the model, the three station time difference equation dimension, solve the two station is conditioned by measuring condition unable to establish an effective positioning equation problem, using Newton iterative method to solve the target position. The high precision target position is obtained under limited conditions. The experimental results show that the parameters such as time difference, distance between station and satellite orbit error have little influence on the positioning accuracy, and the relative positioning accuracy of each parameter is better 0.2%R. This positioning method has good application value in engineering.

Keywords: external illuminators; passive localization; time difference; Newton's method

0 引言

随着电子对抗、低可截获通信和反辐射等技术的不断发展,给有源雷达探测预警系统带来较大挑战,尤其是隐身目标探测问题是当今阵地防御面临的重点问题,而基于外辐射源^[1-2]的定位体制是针对隐身目标一种有效的探测方法,具有良好的战略战术价值和应用前景。目前外辐射源雷达^[3-5]多采用地面广播、电视信号等作为外辐射源进行目标探测定位,其探测范围受限于波束覆盖范围、定位精度等因素影响,难以满足远距离作战和态势获取需求,而通信/导航卫星等天基辐射源具有全球覆盖、全天候存在、多辐射

源空间分布、信号带宽宽等优点,随着未来用户需求的不断提高和卫星制造技术的不断升级,其所需信号功率和带宽不断提高,使利用卫星作为外辐射源远距离探测隐身目标成为一种可能。

目前外辐射源定位常用的体制有单辐射源多侦测站时差^[6-8]、多外辐射源单站时差^[9-11]等,其文中对定位方法的可行性进行了分析,同时对定位方法能够达到的定位精度^[12-14]和定位区域分布进行了研究,但目前多数定位体制未考虑实际的应用场景和系统的可实现性,致使定位方法性能得不到发挥和应用。基于多站的外辐射源定位系统虽然具有技术可操作性,但实际中未考虑侦测站共视、系统间

收稿日期:2021-08-14

的协调工作、数据传输等问题,导致定位系统复杂,不宜灵活开展目标侦察定位。基于外辐射源探测体制多用于远距离高速运动目标探测,目标平台多按一定巡航高度飞行,即高度不会发生剧烈的变化,这就为三维位置求解问题转化为二维位置求解提供技术可能性。

本文针对实际的应用场景及工程应用需求,提出了一种适用于卫星外辐射源的双站时差定位模型,将侦察目标高度信息转换到地球表面方程^[15]中,替换三站时差定位方程中的时差方程,将三站时差定位模型转变为双站时差定位模型。采用牛顿迭代处理完成目标位置的解算,新定位模型对测量噪声不敏感,能够达到较高的定位精度,通过仿真试验验证了改进后定位模型性能。

1 定位模型分析

基于卫星外辐射源的双站时差定位场景如图 1 所示,其中 Sat 为卫星外辐射源, Tar 为需要侦察定位的空中目标, Rec1 为侦察系统 1, Rec2 为侦察系统 2。该定位模型采用具有空间具有一定间隔的双站组成,由于侦察目标为远距离且飞行高度在一定范围内空中平台,因此可利用平台高度先验信息,建立地球位置坐标方程,结合双站时差测量方程,实现目标位置的解算。双站时差定位模型引入地球位置坐标方程,将三站时差定位方程进行优化处理,实现三站定位模型向双站时差定位模型的转变,降低外辐射源定位系统的复杂性,为实际的工程实现提供技术参考。

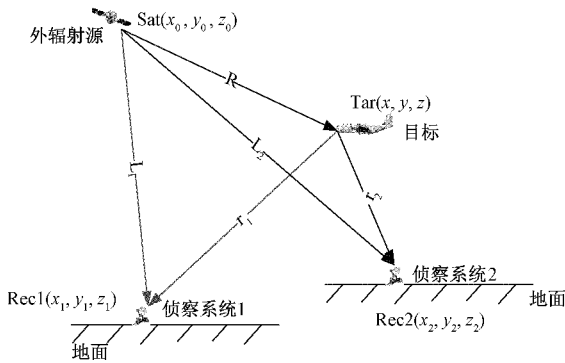


图 1 定位体制示意图

设目标在地心直角坐标系中的坐标位置为 (x, y, z) , 考虑目标具有一定的高度,因此其在地心直角坐标方程中的关系式,如式(1)所示,其中 h 为目标相对地面的高度信息, R_l 为地球半径, e 为地球曲率。

$$\frac{x^2}{(R_l + h)^2} + \frac{y^2}{(R_l + h)^2} + \frac{z^2}{[(1 - e^2)R_l + h]^2} = 1 \quad (1)$$

卫星信号经过目标反射到达接收机的路径与直达波信号路径间的时延信息中隐含了目标位置信息,因此时延信息间接反映了卫星、目标、地面接收机间相对位置关系,可

建立时延表达方程,如式(2)所示,该时延方程描述信号路径传输时延与目标位置、卫星位置、接收站位置关系。

侦察站 1 时差测量方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \\ L_1 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \\ \Delta T_1 = (r_1 + R - L_1)/c \end{cases} \quad (2)$$

侦察站 2 时差测量方程如式(3)所示。

$$\begin{cases} r_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \\ R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \\ L_2 = \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \\ \Delta T_2 = (r_2 + R - L_2)/c \end{cases} \quad (3)$$

利用隐含目标位置的 3 个方程,完成目标运动状态的描述,通过 3 个表达方程实现目标位置解算,对表达式(1)~(3)进行变形处理得到如下目标解算表达式方程组。

$$\begin{cases} f_1(x, y, z) = [\sqrt{(x - x_0)^2 - (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} + \sqrt{(x - x_1)^2 - (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - L_1]/c - \Delta T_1 \\ f_2(x, y, z) = [\sqrt{(x - x_0)^2 - (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} + \sqrt{(x - x_2)^2 - (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} - L_2]/c - \Delta T_2 \\ f_3(x, y, z) = \frac{x^2}{(R_l + h)^2} + \frac{y^2}{(R_l + h)^2} + \frac{z^2}{[(1 - e^2)R_l + h]^2} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中所涉及的 3 个定位解算方程,其中时差表达方程和目标位置表达方程均采用 WGS-84 坐标系,3 个独立不相关的定位方程保证了 3 个未知数方程的有效解算,目前非线性方程解算有多种解算方法,其中牛顿迭代解算方法具有收敛速度快、解算精度高等特点,本定位模型采用牛顿迭代处理思路,完成目标位置的解算。

1.1 牛顿迭代解算处理

从定位表达方程可知,飞机位置与观测量为非线性关系,因此方程组的求解一般采用迭代或非线性滤波方法,其中牛顿迭代处理算法是非线性方程解算的经典处理方法,具有较高的解算精度,其中式(4)中 3 个表达方程可分别用 $f_1(x, y, z)$ 、 $f_2(x, y, z)$ 、 $f_3(x, y, z)$ 表示,为实现定位方程组(4)解算,首先根据目标侦察区域,设定目标位置初值 $\mathbf{P}_k = [x_k \ y_k \ z_k]$,利用该初值迭代处理得到目标最优解,其中 k 为牛顿迭代当前次数,牛顿迭代法的过程如下。

首先根据设定的目标位置初值计算函数矩阵:

$$\mathbf{F}(\mathbf{P}_k) = \begin{bmatrix} f_1(x_k, y_k, z_k) \\ f_2(x_k, y_k, z_k) \\ f_3(x_k, y_k, z_k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

分别对 $f_1(x, y, z)$ 、 $f_2(x, y, z)$ 、 $f_3(x, y, z)$ 3 个定位方程求导,计算定位方程(4)雅克比矩阵。

$$J(\mathbf{P}_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x_k, y_k, z_k)}{\partial x} & \frac{\partial f_1(x_k, y_k, z_k)}{\partial y} & \frac{\partial f_1(x_k, y_k, z_k)}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2(x_k, y_k, z_k)}{\partial x} & \frac{\partial f_2(x_k, y_k, z_k)}{\partial y} & \frac{\partial f_2(x_k, y_k, z_k)}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3(x_k, y_k, z_k)}{\partial x} & \frac{\partial f_3(x_k, y_k, z_k)}{\partial y} & \frac{\partial f_3(x_k, y_k, z_k)}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用以上求得的雅可比矩阵,求解线性方程组,具体迭代处理过程如式(7)~(9)所示,实现目标位置优化解算。

$$J(\mathbf{P}_k) \Delta \mathbf{P} = -\mathbf{F}(\mathbf{P}_k) \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{P} = -J^{-1}(\mathbf{P}_k) \mathbf{F}(\mathbf{P}_k) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + \Delta \mathbf{P} \quad (9)$$

通过式(10)中的前后两次解算的位置结果数值变化,来判断迭代是否终止,其中 ϵ 为一正小数。

$$\text{norm}(\mathbf{P}_{k+1} - \mathbf{P}_k) < \epsilon \quad (10)$$

根据以上分析及定位结果推导,根据定位系统的实际的工作过程,设计本定位算法处理流程,其定位处理流程如图 2 所示。

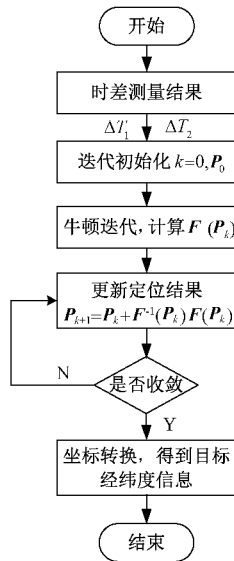


图 2 基于双站时差的定位算法处理流程

根据定位模型处理流程确定基于卫星外辐射源的双站时差定位方法的详细处理步骤,其处理步骤如下。

步骤 1:根据目标侦察区域确定目标初始位置, $\mathbf{P}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]$ 。

步骤 2:根据该初始位置,结合第 i 次迭代中时差测量得到的时差值 $\Delta T_1, \Delta T_2$, 根据式(4)构造对应的函数矩阵 $\mathbf{F}(\mathbf{P}_k)$ 。

步骤 3:并根据式(7)~(9)得到下一次迭代中目标位置的估计结果 \mathbf{P}_{k+1} 。

步骤 4:定义相邻两次目标位置的距离 $\delta_k = \text{norm}(\mathbf{P}_{k+1} - \mathbf{P}_k)$ 为迭代处理的代价函数,若 δ_k 小于某个设定的门限值,则停止迭代并输出定位结果;否则,令 $k = k + 1$, 并返回步骤 2,继续下一次的迭代处理,直至 δ_k 小于设定门限值。

步骤 5:解算得到当前测量条件的目标位置,并将 WGS-84 坐标系下的位置转换到地球表面坐标系,即得到目标经纬度信息。

1.2 导数关系推导

实现目标解算,需要对式(4)分别对 $f_1(x, y, z)$ 、 $f_2(x, y, z)$ 、 $f_3(x, y, z)$ 进行求导计算构造雅各比矩阵。

其中函数 $f_1(x, y, z)$ 对 x, y, z 分别进行求偏导运算,其偏导计算结果如式(11)~(13)所示。

$$\frac{\partial f_1(x, y, z)}{\partial x} = \frac{-(x-x_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} * c} + \frac{-(x-x_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} * c} \quad (11)$$

$$\frac{\partial f_1(x, y, z)}{\partial y} = \frac{-(y-y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} * c} + \frac{-(y-y_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} * c} \quad (12)$$

$$\frac{\partial f_1(x, y, z)}{\partial z} = \frac{-(z-y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} * c} + \frac{-(z-z_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} * c} \quad (13)$$

函数 $f_2(x, y, z)$ 对 x, y, z 分别进行求偏导运算,结果如式(14)~(16)所示。

$$\frac{\partial f_2(x, y, z)}{\partial x} = \frac{-(x-x_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} * c} + \frac{-(x-x_2)}{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} * c} \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_2(x, y, z)}{\partial y} = \frac{-(y-y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} * c} + \frac{-(y-y_2)}{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} * c} \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_2(x, y, z)}{\partial z} = \frac{-(z-y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} * c} + \frac{-(z-z_2)}{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} * c} \quad (16)$$

函数 $f_3(x, y, z)$ 对 x, y, z 分别进行求偏导运算,结果如式(17)~(19)所示。

$$\frac{\partial f_3(x, y, z)}{\partial x} = \frac{(1-e^2) * x}{\sqrt{(1-e^2)(x^2 + y^2) + z^2}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_3(x, y, z)}{\partial y} = \frac{(1-e^2) * y}{\sqrt{(1-e^2)(x^2 + y^2) + z^2}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial f_3(x, y, z)}{\partial z} = \frac{z}{\sqrt{(1-e^2)(x^2 + y^2) + z^2}} \quad (19)$$

2 定位体制误差分析

衡量定位精度通常采用几何精度因子(GDOP)表示,通过分析 GDOP 定位误差分布,确定该定位模型有效定位区域,通过分析测量参数误差与定位精度的关系,以指导实

际的工程应用。在该定位模型中,参数测量误差主要包含时差测量误差精度 $d\Delta T_1, d\Delta T_2$ 、卫星的位置误差 (dx_0, dy_0, dz_0) 、侦察站位置误差 (dx_1, dy_1, dz_1) 等,为进一步确定该定位模型有效性,需深入分析测量参数误差对定位误差的影响。

$$\begin{cases} \Delta T_1 = [\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} + \\ \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - L_1]/c \\ \Delta T_2 = [\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} + \\ \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} - L_2]/c \\ \frac{x^2}{(R_l+h)^2} + \frac{y^2}{(R_l+h)^2} + \frac{z^2}{[(1-c^2)R_l+h]^2} = 1 \end{cases} \quad (20)$$

对观测方程中 3 个方程进行变形、求微分得到定位误差方程:

$$\begin{cases} d(\Delta T_1) = \left(\frac{x-x_1}{R \cdot c} + \frac{x-x_0}{r_1 \cdot c}\right) dx + \\ \left(\frac{y-y_1}{R \cdot c} + \frac{y-y_0}{r_1 \cdot c}\right) dy + \left(\frac{z-z_1}{R \cdot c} + \frac{z-z_0}{r_1 \cdot c}\right) dz + k_{\Delta T_1} \\ d(\Delta T_2) = \left(\frac{x-x_2}{R \cdot c} + \frac{x-x_0}{r_2 \cdot c}\right) dx + \\ \left(\frac{y-y_2}{R \cdot c} + \frac{y-y_0}{r_2 \cdot c}\right) dy + \left(\frac{z-z_2}{R \cdot c} + \frac{z-z_0}{r_2 \cdot c}\right) dz + k_{\Delta T_2} \\ R_l d(R_l) = x dx + y dy + z/(1-c^2)^2 dz \end{cases} \quad (21)$$

其中, $k_{\Delta T_1} = \left(-\frac{x-x_1}{r_1 \cdot c} + \frac{x_1-x_0}{L_1 \cdot c}\right) dx_0 +$
 $\left(-\frac{y-y_1}{r_1 \cdot c} + \frac{y_1-y_0}{L_1 \cdot c}\right) dy_0 + \left(-\frac{z-z_1}{r_1 \cdot c} + \frac{z_1-z_0}{L_1 \cdot c}\right) dz_0 -$
 $\left(\frac{x-x_1}{R \cdot c} + \frac{x_1-x_0}{L_1 \cdot c}\right) dx_1 - \left(\frac{y-y_1}{R \cdot c} + \frac{y_1-y_0}{L_1 \cdot c}\right) dy_1 -$
 $\left(\frac{z-z_1}{R \cdot c} + \frac{z_1-z_0}{L_1 \cdot c}\right) dz_1, k_{\Delta T_2} = \left(-\frac{x-x_2}{r_2 \cdot c} + \frac{x_2-x_0}{L_2 \cdot c}\right) dx_0 +$
 $\left(-\frac{y-y_2}{r_2 \cdot c} + \frac{y_2-y_0}{L_2 \cdot c}\right) dy_0 + \left(-\frac{z-z_2}{r_2 \cdot c} + \frac{z_2-z_0}{L_2 \cdot c}\right) dz_0 -$
 $\left(\frac{x-x_2}{R \cdot c} + \frac{x_2-x_0}{L_2 \cdot c}\right) dx_2 - \left(\frac{y-y_2}{R \cdot c} + \frac{y_2-y_0}{L_2 \cdot c}\right) dy_2 -$
 $\left(\frac{z-z_2}{R \cdot c} + \frac{z_2-z_0}{L_2 \cdot c}\right) dz_2.$

将式(21)表示成矩阵形式:

$$dV = C dX + dX_s \quad (22)$$

其中, $dV = [d(\Delta T_1) \ d(\Delta T_2) \ R_l d(R_l)]^T, dX = [dx \ dy \ dz]^T, dX_s = [k_{\Delta T_1} \ k_{\Delta T_2} \ 0]^T,$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{R \cdot c} + \frac{x-x_0}{r_1 \cdot c} & \frac{y-y_1}{R \cdot c} + \frac{y-y_0}{r_1 \cdot c} & \frac{z-z_1}{R \cdot c} + \frac{z-z_0}{r_1 \cdot c} \\ \frac{x-x_2}{R \cdot c} + \frac{x-x_0}{r_2 \cdot c} & \frac{y-y_2}{R \cdot c} + \frac{y-y_0}{r_2 \cdot c} & \frac{z-z_2}{R \cdot c} + \frac{z-z_0}{r_2 \cdot c} \\ x & y & z/(1-c^2)^2 \end{bmatrix}.$$

由式(21)整理之后得到:

$$dX = C^{-1}(dV - dX_s) \quad (23)$$

相应的误差协方差矩阵为:

$$P_{dX} = C^{-1} \{E[dV dV^T] + E[dX_s dX_s^T]\} C^T \quad (24)$$

其中, $E[dV dV^T] = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta T_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Delta T_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & R_l^2 \sigma_{R_l}^2 \end{bmatrix}$, 同时可求

得 $E[dX_s dX_s^T] = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_1}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z_1}^2 \end{bmatrix}$, $\sigma_{\Delta T_1}^2, \sigma_{\Delta T_2}^2$ 为卫星直达

信号与目标散射信号距离之差的误差标准差, $R_l d(R_l)$ 为目标误差标准差, σ_s 为侦察站站址误差的标准差。

由此,可以求得误差协方差矩阵 P_{dX} 以及观测量 $(\Delta T_1, \Delta T_2, R_l)$ 对应的 GDOP 值,如式(25)所示。

$$GDOP = [\text{tr}(P_{dX})]^{1/2} = \sqrt{P_{dX}(1,1) + P_{dX}(2,2) + P_{dX}(3,3)} \quad (25)$$

3 定位模型试验仿真分析

在完成定位模型设计以及定位误差理论分析基础上,通过设定不同的测量误差条件,进行蒙特卡洛仿真试验。由于侦察站为固定站,其位置信息可通过北斗或 GPS 系统进行精确测量,定位精度优于 5 m,侦察站的位置误差可忽略不计。因此本定位模型重点分析时差测量精度、定位站间距、卫星轨道误差等对定位精度的影响,并通过蒙特卡洛仿真试验得到该定位模型的 GDOP 误差分布曲线,根据误差分布曲线确认定位的有效区域,并根据定位站 GDOP 误差分布指导实际的工程应用。

3.1 时差误差对定位精度影响

时差参数是定位方程中重要的观测量,由于时差信息中隐含目标与定位站、辐射源三者时间的距离信息,该时差测量精度直接影响目标位置解算结果,因此在分析定位模型几何定位精度时,需重点分析时差测量精度对定位结果的影响。按实际的工程测量精度 100、200 ns 两种条件,开展蒙特卡洛仿真试验,其仿真试验结果如图 3 所示,从仿真试验结果可以看出,在 100、200 ns 两种时差测量精度条件下,该定位模型的绝对定位精度在 20~50 m 范围,这可说明时差测量误差对定位精度影响较小,这是由于地面站与卫星间形成了超长定位基线,为高精度定位的提供技术条件。

3.2 侦察站间距对定位精度影响

侦察站间距为定位系统布设一个重要条件,定位站间距直接影响目标定位精度,该指标可用于指导定位系统布设选址,从实际工程应用出发考虑,定位站间距按 30、60 km 进行考虑。其蒙特卡洛仿真试验结果如图 4 所示,从仿真试验结果可以看出,30、60 km 两种间距条件下,定位误差均在 40~100 m 间,可以证明侦察站的间距对定位精度影响相对较小,为方便站间通信协同可选择侦察站间距为 30 km 进行布设。

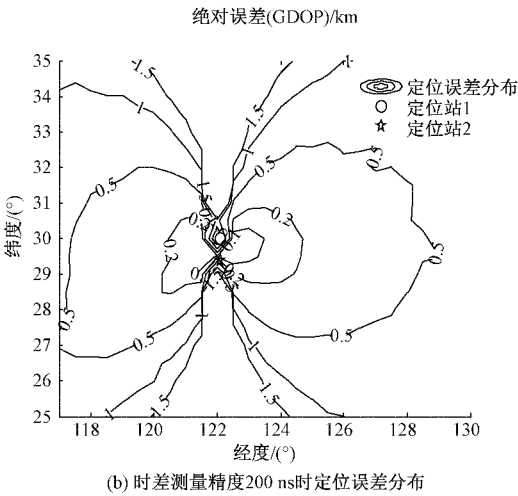
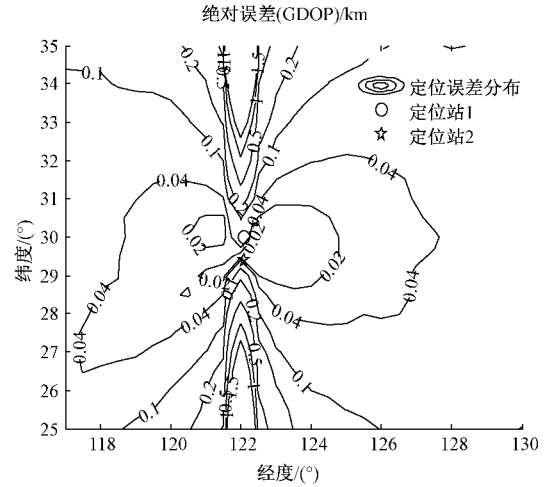
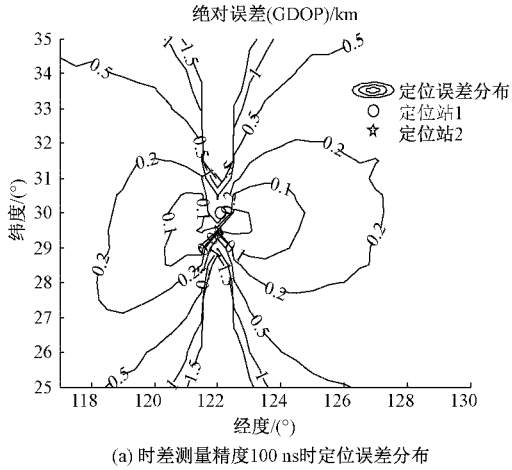


图 4 不同定位站间距对定位精度影响试验

图 5 所示,从仿真试验结果可以看出,1、10 km 两种轨道误差条件下,定位误差均不超过 100 m,可以说明卫星位置误差对定位精度影响较小。

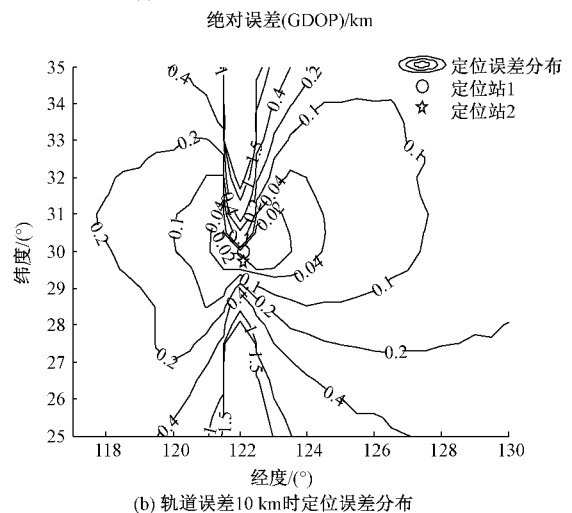
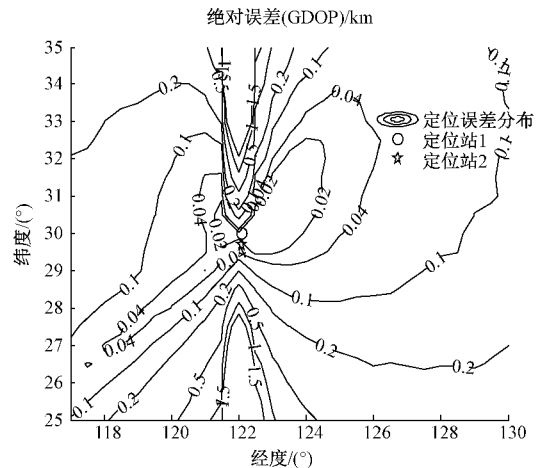
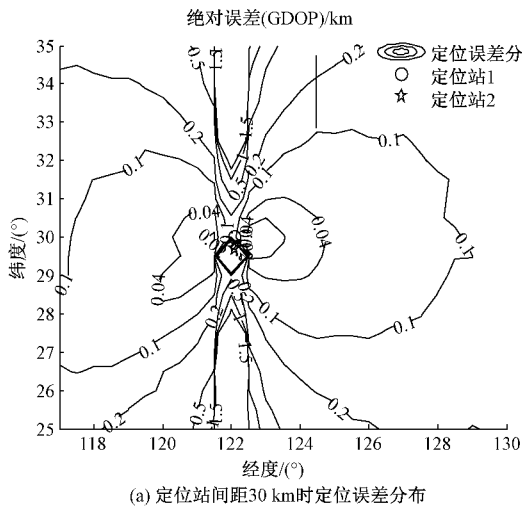


图 5 不同轨道误差对定位精度影响试验

3.3 卫星轨道误差对定位精度影响

卫星位置是定位中一个辅助参数,其轨道位置精度在一定程度上影响定位结果。由于卫星的轨道信息可通过星历计算得到,但该位置信息与卫星实际的位置信息存在一定的误差,该误差会影响目标定位精度,针对 1、10 km 两种轨道误差条件,开展蒙特卡洛仿真试验,其仿真试验结果如



3.4 系统定位误差仿真分析

通过设定不同精度的时差、侦察定位站间距、卫星轨道等定位参数,开展了蒙特卡洛仿真试验,其仿真试验定位参数精度参考当前工程中技术能力和水平,结合蒙特卡洛仿真试验结果,对定位精度进行统计,其统计结果如表 1 所示,从仿真试验结果可确认本定位模型有效性,且具有较高定位精度。通过对定位模型仿真分析可知,时差、定位站间距和卫星轨道误差等定位参数对定位精度影响较小,各个参数相对定位精度均优于 0.2%R,这是由于卫星与地面侦察站定位基线为 36 000 km,具有超长的定位基线,致使具有较高的定位精度。

表 1 系统定位精度统计

误差条件	测量误差	定位误差/ m	相对定位误差/ %R
时差精度	100 ns	40~200	<0.1
	200 ns	200~500	<0.2
定位站间距	30 km	40~100	<0.1
	60 km	20~40	<0.1
卫星轨道误差	1 km	40~100	<0.1
	10 km	40~150	<0.1

基于卫星外辐射的双站时差定位模型具有较高的定位精度,为实现远距离的目标侦测定位,侦察站的布设可按通常的工程应用进行选择,要求各侦察站位于卫星波束覆盖范围内,该定位模型能够实现 600 km 范围内 0.2%R 的定位精度,该定位精度在无源定位体制中为较高技术指标,因此基于限定约束条件的双站时差定位方法能够实现目标高精度定位与跟踪。

4 结 论

本文研究基于卫星外辐射源的双站时差定位方法,该方法针对单站二维测向时差定位模型适应性差、定位精度低以及三站定位系统复杂的问题,提出了一种适合工程应用定位模型,针对目标飞行高度先验信息,建立目标高度的地球位置方程,与双站时差定位方程组成目标定位解算方程,保证目标位置的有效解算。分别对时差、定位站距离以及卫星轨道不同测量条件,开展了蒙特卡洛仿真试验,验证了该种定位模型的有效性,该种定位模型的有效性和实用性,具有较强的工程推广价值。为实现散射目标信号检测需要对采集数据进行长时间累计处理,无法实现远距离目标实时定位跟踪,因此下一步需要针对大空域、微弱信号快速检测开展相关技术研究,提升定位系统的实时检测能力。

参考文献

- [1] 许德刚. 基于调频广播的外辐射源雷达抗干扰技术[J]. 无线电工程, 2015, 45(4): 36-39, 76.
- [2] 刘茂君, 郑光勇, 艾小锋. 基于数字电视广播信号的无源雷达实验研究[J]. 无线电工程, 2017, 47(2): 65-68, 73.
- [3] 李航, 杨峰, 金威. 外辐射源雷达制导系统性能分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(13): 19-22.
- [4] PALMER J, PALUMBO S, SUMMERS A, et al. An overview of an illuminator of opportunity passive radar research project and its signal processing research directions[J]. Digital Signal Processing, 2011, 21(5): 593-599.
- [5] 彭章友, 陈文涛, 李林霄. 基于外辐射源特征信息的 Logistic 多星累积算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 172-176.
- [6] 于钦添, 彭华峰, 孙正波. 多元外辐射源单站时差定位技术[J]. 电讯技术, 2015, 55(1): 80-85.
- [7] 赵勇胜, 赵拥军, 赵闯. 基于角度和时差的单站多外辐射源融合定位方法[J]. 信息工程大学学报, 2016, 17(2): 675-680.
- [8] 董勇, 刘帅, 张璐, 等. 基于双时刻联合的多辐射源时差定位解模糊方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(2): 223-226.
- [9] 梁加洋, 赵拥军, 赵闯. 利用约束加权最小二乘的单站外辐射源时差定位算法[J]. 信号处理, 2017, 33(6): 880-886.
- [10] 赵勇胜, 赵拥军, 赵闯. 利用外辐射源的单站 TDOA-FDOA 定位方法[J]. 信息工程大学学报, 2016, 17(6): 675-680.
- [11] 窦雪倩, 李华, 梁龙. 基于外辐射源的高精度目标定位方法[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(6): 17-21.
- [12] 关欣, 吕政君, 衣晓. 单站外辐射源定位误差分析与仿真优化[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(2): 201-220.
- [13] 黄知涛, 周一宇, 姜文利. 基于外辐射源信号的时差定位系统定位精度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2257-2262.
- [14] 李金洲, 郭福成. 传感器位置误差条件下仅用到达频率差的无源定位性能分析[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1497-1505.
- [15] 李红伟, 李淳. 基于时差的多辐射源数据关联与无源定位算法[J]. 航天电子对抗, 2014(4): 36-39.

作者简介

窦修全, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为阵列信号处理、无源定位与跟踪。

E-mail: xiaodou6664@sina.com