

面向对流层散射传输的星地联合检测定位技术

郝本建¹,周玫汝¹,严少虎²,李明惺²,段玉锦¹

(1. 西安电子科技大学通信工程学院,陕西西安 710071; 2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所,四川成都 610036)

摘要: 针对地面超远距离目标进行到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)被动定位时,将天基监测卫星与地面监测站点相联合,可有效规避天基多星联合体制成本高、调度灵活性受限等问题,但受地面目标与地面监测站之间对流层散射传播非直线路径关系影响,星地联合定位精度常难以满足实际应用需求. 针对此问题,本文提出一种面对对流层散射传播超视距的超远距离目标星地联合定位技术,通过地面目标与地面监测站之间对流层散射传播路径等效地球半径数学模型构建,以描述二者之间非直线路径光程长度关系,进而联合目标与天基监测卫星之间直线传播路径数学模型,构建新的星地联合TDOA被动定位方程组,最后,通过牛顿迭代法对该非线性方程组进行解析获得定位结果. 本文给出了星地联合的对流层散射目标定位克拉美罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)推导,并且验证了本文针对远距离目标提出的定位方法的估计性能. 计算机仿真验证表明,所提技术可有效消除对流层散射传播非直线关系对定位精度恶化影响,实现了星地联合超远距离目标TDOA被动定位精度有效提升.

关键词: 星地联合;超远距离目标定位;对流层散射;超视距定位;到达时间差;非直线路径

基金项目: 电磁空间作战与应用重点实验室基金;国家自然科学基金(No.62101403, No.62101441)

中图分类号: TN927+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)05-1273-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211104

Satellite-Ground Joint Detection Positioning Technique for Tropospheric Scattering Transmission

HAO Ben-jian¹, ZHOU Mei-ru¹, YAN Shao-hu², LI Ming-xing², DUAN Yu-jin¹

(1. School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract: In view of the high cost of the existing space-based reconnaissance and positioning system and the poor positioning accuracy of the ground-based monitoring system for long-distance targets, this paper proposes a satellite-ground joint positioning technology applied to long-distance ground targets with non-line-of-sight path of tropospheric scattering propagation. The time difference of arrival (TDOA) information between the reconnaissance system and the target can obtain the three-dimensional positioning of the target. According to the propagation characteristics of tropospheric scattering, a geometric model of tropospheric scattering transmission path is established under the equivalent earth radius model when the scattering points are located at different locations, and the time difference positioning equations are constructed. Analyzing the non-linear equations, the positioning result is obtained by the Newton iteration method. Finally, the electronic reconnaissance satellite and ground-based monitoring station are used as an example. The derivation of the Cramer-Rao lower bound (CRLB) for the satellite-ground joint tropospheric scattering target location is given, and the estimation performance of the positioning method proposed in this paper for long-range targets is verified. The results show that the technique can break through the limitation of direct transmission of electromagnetic waves and realize the accurate positioning of long-distant non-direct-view target based on the satellite-earth joint positioning platform.

Key words: satellite-ground joint; ultra-long-distance target positioning; tropospheric scattering; non-line-of-sight positioning; time difference of arrival (TDOA); non-linear path

Foundation Item(s): Key Lab of Electromagnetic Application Fundation; National Natural Science Foundation of China (No.62101403, No.62101441)

1 引言

天基被动定位系统具有覆盖范围广、高低轨联合基线大、目标信号传播直视关系明确等优势,但也存在多星联合成本高、调度灵活性受限等问题.随着电子侦察定位技术不断发展,将天基侦察系统与地面监测系统相结合,可将二者监测数据相融合以挖掘更多有用定位信息,进而有效解决天基被动定位系统上述问题,因此,星地一体化成为未来电子定位技术发展必然趋势.

但是,针对地面超远距离目标进行到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)被动定位时,地球表面复杂地理环境将会对目标辐射信号产生不同程度遮挡;更为严重的是,当地面目标与地面监测站之间距离过远时,地球曲率将造成愈发明显的电磁波传输遮挡效应^[1,2],从而引起非视距(Non-Line Of Sight, NLOS)接收现象^[3].针对此现象,文献[4]提出了一种位置残差检测算法,通过将含有NLOS的数据丢弃,仅利用剩余视距(Line Of Sight, LOS)数据来估计目标位置,但此方法使定位成功率降低;因此,Wang等人提出了约束定位算法^[5,6]、基于半正定规划的NLOS抑制定位算法^[7],通过利用与NLOS测量相关的一些约束条件,来减少NLOS误差对定位精度影响.然而,上述算法中都是对NLOS下产生误差的抑制;对于超远距离目标而言,现有到达时间差定位体制均以目标与定位节点之间满足直视传播为严格约束条件,但在实际环境中该条件已完全不满足,使得现有时差定位方法恶化,甚至完全失效.

针对此问题,结合对流层散射通信技术传输容量大、跨越地球曲率遮挡、不易被侦收干扰、传播介质受核爆影响小等突出优点,利用这一特殊气候现象描述电磁波远距离传播轨迹.文献[1,2,8]介绍了对流层不均匀大气结构,对电磁波产生散射、折射、反射等效应进行了分析,明确了电磁波超远距离对流层散射传播物理机理.文献[9]列举了现有描述电磁波在对流层散射信道传播轨迹的方法,即射线描述法,其需要通过数学积分的方法计算路径长度而无法构建定位方程组.根据TDOA定位原理,地面监测站接收目标辐射信号的路径长度直接影响定位性能,且现有文献都未对电磁波在对流层中传播轨迹进行建模.因此,准确计算出电磁波的对流层散射路径是后续进行时差定位的前提和基础.

本文从对流层散射传播路径物理机理出发,利用等效地球半径法推导出一种地面目标与地面监测站之间对流层散射传播路径的数学模型;然后将天基监测数据与地面监测数据相融合,结合本文推导构建的对流层散射传播路径新模型和WGS84地球椭球坐标系方

程,构建全新的星地联合TDOA被动定位方程组;最后,基于牛顿迭代算法求解该非线性方程组获得目标位置.

2 面向TDOA定位的对流层散射传播几何路径建模

如图1所示,地面监测站A对远距离目标P进行定位时,目标信号受地球曲率影响被地球遮挡,无法沿直线传播路径关系到达监测站点,但可沿对流层散射传播这一非直线几何路径到达.当目标信号沿对流层散射路径到达监测站时,若错误的采用目标与监测站之间直线路径关系(图1中 d_T+d_R)建立二者之间路径长度数学模型,势必给后续定位解析引入不可忽略的误差,甚至造成定位完全失效.因此,基于星地联合体制针对超远距离目标进行被动定位时,迫切需要精确构建目标经由对流层散射传播到达地面监测站的非直线几何路径(图1中 L_T+L_R)的数学模型,以支撑可满足解析要求的准确定位方程组构建.

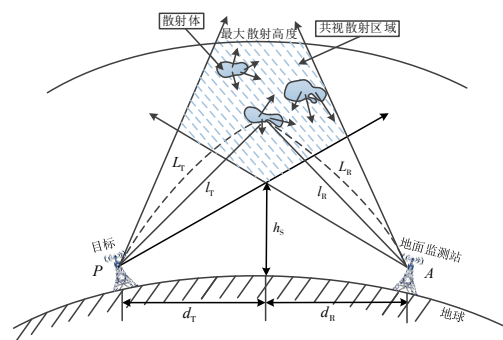


图1 对流层散射传播路径特性示意图

2.1 对流层中散射点高度推导

电磁波经视距传播时可忽略地球曲率的影响;但当传播距离超过40 km左右时,因山峰丘陵和城市高楼的影响,导致收发两端无法进行超视距传播.而对流层散射技术最突出的特点就是突破了直视信号传播的局限,使得电磁波的远距离传播得以实现.在图1中,由于不同高度对流层大气密度不同,目标P的辐射信号经过对流层中大小不均、密度不同的散射体时,会对该信号产生折射、散射、再折射等效应,使其中一部分信号重新弯折回地面,形成弯管效应,最终到达地面监测站A被接收^[10].因此,散射前后两段真实折射曲线的实际光程路径长度 L_T+L_R ,要大于目标与散射体之间、散射体与监测站之间的直线路径长度 l_T+l_R .若将光程路径类比为无折射效应的直线路径关系,则忽略折射效应的散射点高度要高于真实散射点高度.在对流层散射技术中,散射点高度直接影响电磁波在对流层中传播路径的计算.设收发

两站为 P, A , 则两站间实现对流层散射的路径结构如图 2 所示^[11].

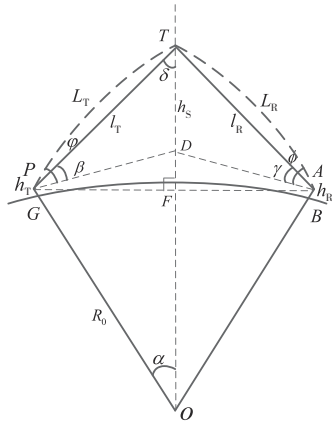


图 2 电磁波在对流层散射传播路径示意图

当电磁波通过对流层散射体 T 在 P 向 A 的传播过程中, 可分成 P 到 T 再到 A 两个阶段. 当散射点位于目标与地面监测站水平中点的正上方时, L_T 为发射端到散射点的光程距离, L_R 为接收端到散射点的光程距离; l_T 为发射端到散射点之间几何距离, l_R 为散射点到接收端的几何距离; O 为球心原点, F 为目标到地面监测站水平距离与散射点投影连线的交点; 发射端处的视在仰角为 β , 真实仰角为 φ ; 接收端处的视在接收角为 γ , 真实接收角为 ϕ , δ 为发射端到散射点结合路径与散射体与球心之间的夹角; h_T, h_R 为收发两端天线高度, h_s 为散射点距地球表面的高度. 在对流层散射技术中需要计算出发生对流层散射的高度 h_s , 从 P 中作垂直于 OT 的点 F .

在 $\triangle OPT$ 中,

$$\alpha + \beta + \delta + \frac{\pi}{2} = \pi \quad (1)$$

即

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta \quad (2)$$

在 $\triangle OPF$ 中,

$$\begin{aligned} PF &= OP \cdot \sin \alpha = (R_0 + h_T) \cdot \sin \alpha \\ OF &= OP \cdot \cos \alpha = (R_0 + h_T) \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

在 $\triangle FPT$ 中,

$$\begin{aligned} FT &= \frac{PF}{\tan \delta} = (R_0 + h_T) \cdot \frac{\sin \alpha}{\tan \delta} \\ OT &= OF + FT \\ &= (R_0 + h_T) \cdot \cos \alpha + (R_0 + h_T) \cdot \frac{\sin \alpha}{\tan \delta} \end{aligned} \quad (4)$$

因此, 推导出对流层散射技术中散射点几何高度为

$$\begin{aligned} h_s &= ET = OT - OE \\ &= (R_0 + h_T) \cdot \cos \alpha + (R_0 + h_T) \cdot \frac{\sin \alpha}{\tan \delta} - R_0 \\ &= (R_0 + h_T) \cdot \cos \alpha \\ &\quad + (R_0 + h_T) \cdot \frac{\sin \alpha}{\tan(\frac{\pi}{2} - \alpha - \beta)} - R_0 \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, α 为发射端到散射点直线距离对应的球心角:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{PF}{R_0 + h_T}\right) \quad (6)$$

2.2 面向 TDOA 定位的对流层散射路径长度推算

利用等效地球半径法可大大简化电磁波在对流层中复杂的传播路径^[12], 通过等效地球模型与实际地球模型的点位投影解算, 可使得在地固坐标系中的目标位置得到映射^[13]. 根据上述分析, 本文考虑采用等效地球半径方法对目标与散射体之间、散射体与监测站之间的传播距离关系 $L_T + L_R$ 数学模型进行修正, 并对等效半径系数 k 和球心角 α 这两个关键参数进行进一步分析.

根据文献[9]中介绍的对流层有关特性, 假设出一个等效地球场景, 其等效地球半径为

$$R_e = kR_0 \quad (7)$$

式(7)中, k 为等效地球半径系数, R_0 为实际地球半径.

根据 Snell 定理可得出等效地球半径系数表达式:

$$k = \left(1 + \frac{(R_0 + h_T) \frac{dn}{dh}}{n}\right)^{-1} \quad (8)$$

其中, h_T 为发射端天线高度, n 为散射点高度 h_s 对应的折射指数, $\frac{dn}{dh}$ 为折射指数梯度, 可反应折射指数随高度的变化关系.

文献[14]中推出真实地球模型与等效地球半径模型中各参数的映射关系, 在等效地球半径模型和实际地球模型中当发射天线仰角 φ 相同、散射点距地表高度 h_s 不变、地球大气环境不变, 球心角对应关系为

$$\alpha_e = \frac{1}{k} \alpha \quad (9)$$

式中 α_e 表示等效地球半径下球心角, α 为真实地球模型下球心角.

在图 3 中, 目标设立于地球表面 P 处, 发射天线高度为 h_T ; 地球球心位置为 O , 散射点为 T ; 散射距离对应球心角为 α ; 目标天线仰角为 φ . 将实际地球模型上参数投影到等效地球半径模型中, 此时 P' 表示等效地球中目标的位置, 散射点变为 T' , 对应球心角变为 α_e . 为求得对流层散射中电磁波的传播路径应先求得忽略折射效应时散射点的几何距离 l_T ; 再利用分段折射指数模型^[15,16]通过散射点高度 h_s 判断此时散射点的折射率 n , 求出等效地球半径系数 k ; 最终将实际地球半径利用等

效地球半径代替,计算得到等效地球半径模型下的直线距离 $P'T'$. 此时,便求出了目标到散射点的光程路径.

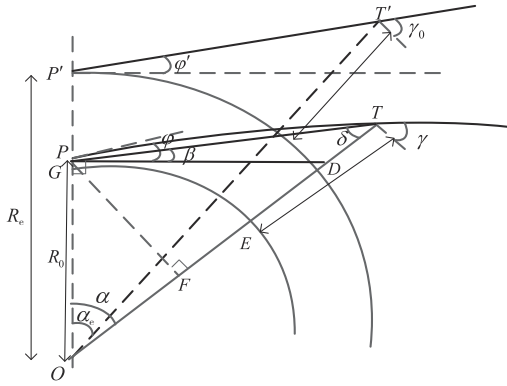


图3 等效地球半径模型和实际地球模型参数映射示意图

在 ΔPOT 中,根据正弦定理可得:

$$\frac{R_0 + h_T}{R_0 + h_S} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} + \beta)}{\sin(\pi - (\frac{\pi}{2} + \beta) - \alpha)} = \frac{\cos \beta}{\cos(\beta + \alpha)} \quad (10)$$

则

$$\frac{(R_0 + h_T) \cos \beta}{R_0 + h_S} = \cos(\beta + \alpha) = \cos \beta \cos \alpha - \sin \beta \sin \alpha \quad (11)$$

由余弦定理得:

$$L = \sqrt{r_S^2 + r_T^2 - 2r_S r_T \cos \alpha} \quad (12)$$

式(12)中, $r_S = R_0 + h_S$ 表示散射点到球心的距离; $r_T = R_0 + h_T$ 表示发射端到球心的距离.

在等效地球半径模型下,利用式(8)得到等效地球半径系数 k ,其中折射指数 n 需要根据分段模型先判断散射高度的范围,再根据式(8)和式(12)结合得到,此时可将几何路径 L_e 变为

$$L_e = \sqrt{(kr_S)^2 + (kr_T)^2 - 2k^2 r_S r_T \cos(\frac{1}{k} \alpha)} \quad (13)$$

文献[7]将式(8)中 n 折射指数近似为 1,这时等效地球半径系数 k 等于定值 $\frac{4}{3}$,其不会随着目标与地面站水平距离的增加而增加,这不符合对流层散射实际传输过程. 图4为等效地球半径 R_e 随折射指数 n 的变化关系. 当目标与地面监测站的距离为 50~750 km 时,散射点高度不断增加,折射指数会随着折射率的增大而减小,但整体等效地球半径是随着水平距离的增大而呈现增长趋势. 因此,使用式(8)得到随散射点高度变化计算得到等效地球半径系数,更加接近实际传输环境. 故在实际环境中对远距离目标进行定位时,应先用探测器了解目标所在地的气象参数,便于分析散射点

的具体高度,从而计算出对应的等效地球半径系数. 同时应合理设置目标辐射天线仰角,否则随着水平距离的增加会导致散射点高度大于对流层厚度,使电磁波穿透对流层从而不能发生散射效应.

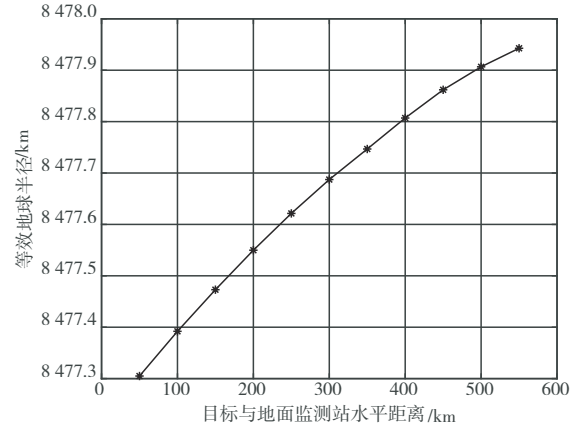


图4 水平距离与等效地球半径关系仿真图

3 星地联合定位模型及解析算法

3.1 星地联合定位模型

本文所采用星地联合定位模型由两颗高轨卫星和一个地面监测站组成. 根据TDOA定位原理^[17-19],在三维空间中,目标信号到达地面监测站和高轨卫星时间差,可确定一个以二者为焦点的回转双曲面,两个双曲面在与WGS84地球椭球坐标系结合即可确定目标位置^[20]. 如图5所示,在地固坐标系下地面监测站矢量坐标记为 $\mathbf{v}=(x_1, y_1, z_1)^T$,高轨卫星坐标分别记为 $\mathbf{s}_i=(x_i, y_i, z_i)^T, i=2,3$,目标坐标记为 $\mathbf{u}=(x, y, z)^T$.

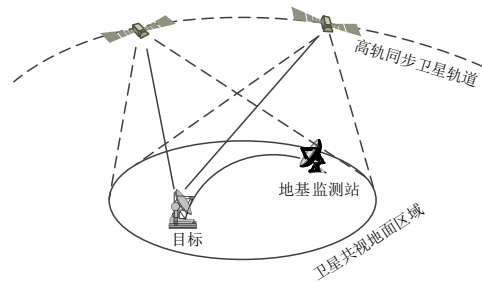


图5 两星一地定位系统原理图

目标到地面监测站和两颗高轨卫星的直线距离为

$$r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}, i=1,2,3 \quad (14)$$

受地球曲率影响,目标信号从目标到地面监测站传播方式变为对流层非直线传输,这就需要引入满足对流层散射传播特性的超视距时差定位方法. 结合式(13)得到目标 \mathbf{u} 到地面监测站 \mathbf{v} 的非直视路径为

$$L_1 = 2 \sqrt{(kr_s)^2 + (kr_T)^2 - 2k^2 r_s r_T \cos(\frac{1}{k} \alpha)} \quad (15)$$

其中, α 可通过目标和地面监测站的坐标将式(6)描述为

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}}{2(R_0 + h_T)} \right) \quad (16)$$

3.2 星地联合定位解析算法

根据 TDOA 定位算法原理^[21], 联立式(14)、式(15)和 WGS84 地球椭球坐标系数学模型组成三元非线性方程组:

$$\begin{cases} r_2 - L_1 = c \cdot \Delta t_1 \\ r_3 - L_1 = c \cdot \Delta t_2 \\ x^2 + y^2 + \frac{z^2}{1 - e^2} = R_0^2 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中, c 为光速, e 为地球第一偏心率, R_0 为实际地球半径.

将上述非线性方程使用牛顿迭代算法进行求解, 将式(17)改写为

$$\begin{cases} f_1 = r_2 - 2 \sqrt{(kr_s)^2 + (kr_T)^2 - 2k^2 r_s r_T \cos(\frac{1}{k} \alpha)} - c \cdot \Delta t_1 \\ f_2 = r_3 - 2 \sqrt{(kr_s)^2 + (kr_T)^2 - 2k^2 r_s r_T \cos(\frac{1}{k} \alpha)} - c \cdot \Delta t_2 \\ f_3 = x^2 + y^2 + \frac{z^2}{1 - e^2} - R_0^2 \end{cases} \quad (18)$$

对上述方程组求导得:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\mathbf{u}) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} s_{21} - C \cdot s_{11} & s_{22} - C \cdot s_{12} & s_{23} - C \cdot s_{13} \\ s_{31} - C \cdot s_{11} & s_{32} - C \cdot s_{12} & s_{33} - C \cdot s_{13} \\ \frac{2x}{R_0} & \frac{2y}{R_0} & \frac{2z}{(1 - e^2)R_0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

其中,

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{r_1} & \frac{y-y_1}{r_1} & \frac{z-z_1}{r_1} \\ \frac{x-x_2}{r_2} & \frac{y-y_2}{r_2} & \frac{z-z_2}{r_2} \\ \frac{x-x_3}{r_3} & \frac{y-y_3}{r_3} & \frac{z-z_3}{r_3} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \delta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \varphi \\ C = k^{-1} \cdot q^{-\frac{1}{2}} \cdot p \cdot n \\ p = \sqrt{1 - \left(\frac{r_1}{2(R_0 + h_T)} \right)^2} \\ t = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \delta} \\ n = t \cdot k^{-1} \cdot \sin(k^{-1} \alpha) \\ q = \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \delta} \right)^2 \\ \quad + 1 - 2 \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \delta} \right) \cos \left(\frac{1}{k} \alpha \right) \end{cases} \quad (21)$$

最终将雅可比矩阵 $\mathbf{F}(\mathbf{u})$ 代入牛顿迭代公式中逐次迭代, 直至 $\|\mathbf{u}^{(k)} - \mathbf{u}^{(k+1)}\| < \varepsilon$ 迭代结束. 求解出地固直角坐标系中目标的位置, 再转换为大地坐标系下的经纬高.

3.3 基于星地联合的对流层散射目标定位克拉美罗下界推导

验证本文针对远距离目标提出的定位方法的估计性能, 本小节将推导基于星地联合时差定位算法的克拉美罗下界. 在实际定位场景中, TDOA 测量值受到噪声干扰, 因此定位结果存在误差^[22]. 由于星地联合时差定位算法增加了地球椭球面约束条件, 因此不能通过简单的 Fisher 矩阵的逆求得, 故本文从克拉美罗界 (Cramer-Rao Lower Bound, CRLB) 原理出发进行推导, 为了进行定位精度分析, 设随机观测误差主要有时差测量误差 $d\Delta t_1, d\Delta t_2$, 首先将式(15)化简为

$$\begin{aligned} L_1 &= 2k(R_0 + h_T) \\ &\times \sqrt{\left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \delta} \right)^2 + 1 - 2 \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \delta} \right) \cos \left(\frac{1}{k} \alpha \right)} \end{aligned} \quad (22)$$

在地固坐标系内, 对式(17)中前两式在目标点 \mathbf{u} 处微分, 可得:

$$\begin{aligned} d(c \cdot \Delta t_m) &= \frac{x-x_i}{r_i} dx + \frac{y-y_i}{r_i} dy + \frac{z-z_i}{r_i} dz \\ &\quad - [C \cdot s_{11} dx + C \cdot s_{12} dy + C \cdot s_{13} dz], \end{aligned} \quad (23)$$

$i = 2, 3; \quad m = 1, 2$

对椭球面方程进行目标点 \mathbf{u} 处微分, 可得:

$$\frac{2x}{R_0} dx + \frac{2y}{R_0} dy + \frac{2z}{(1 - e^2)R_0} dz = 0 \quad (24)$$

将式(23)与式(24)组合为矩阵形式可得:

$$\begin{bmatrix} s_{21}-C \cdot s_{11} & s_{22}-C \cdot s_{12} & s_{23}-C \cdot s_{13} \\ s_{31}-C \cdot s_{11} & s_{32}-C \cdot s_{12} & s_{33}-C \cdot s_{13} \\ \frac{2x}{R_0} & \frac{2y}{R_0} & \frac{2z}{(1-e^2)R_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$= \begin{bmatrix} c \cdot d(\Delta t_1) \\ c \cdot d(\Delta t_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

记为

$$F(\mathbf{u})d\mathbf{u} = c \cdot d\Delta t \quad (26)$$

其中, $\Delta t = [\Delta t_1, \Delta t_2, 0]^T$.

则时差测量误差引起的定位误差,即在地固坐标系中定位误差协方差矩阵可表示为

$$P_{du} = F(\mathbf{u})^{-1} (c^2 E[d\Delta t d\Delta t^T]) (F(\mathbf{u})^{-1})^T \quad (27)$$

得到的是地固坐标系中定位 3 维协方差矩阵,则 $\text{trace}(\sqrt{P_{du}})$ 即为对流层散射传播下的目标定位定位精度的 CRLB,该下界将作为后续仿真验证时的性能对比界限.

4 仿真验证及分析

4.1 仿真条件

本节通过计算机仿真实验验证上述算法有效性和定位性能,主要从两个方面对所构建的定位算法进行仿真分析:一是选定 TDOA 误差,对地面监测站到不同水平距离的目标定位性能进行仿真;二是选定目标距离,对不同 TDOA 误差下的远距离目标定位性能进行仿真. 仿真条件为:选取两颗高轨卫星 s_1, s_2 , 1 个地面监测站 \mathbf{v} , 15 个与地面监测站直线距离为 50~750 km 的被定位目标 $(\mathbf{u}_i, i = 1, 2, \dots, 15)$, 其位置坐标如表 1 与图 6 所示. 性能分析的算法定位精度通过 $\text{RMSE}(\mathbf{u}_i) = (m^{-1} \sum_{l=1}^m \|\mathbf{u}(l)_i - \mathbf{u}_i\|^2)^{1/2}$ 来计算,其中 $\mathbf{u}(l)_i$ 为目标 \mathbf{u}_i 的第 l 次蒙特卡洛仿真得到的位置估计值, $m = 10^4$ 为仿真运行次数.

表 1 卫星及地面站坐标 单位: km

	x 坐标	y 坐标	z 坐标
卫星 s_1	4 773.355 99	41 895.207 8	0
卫星 s_2	-38 215.608 5	17 820.230 9	0
地面监测站 \mathbf{v}	-2 597.030 84	5 172.118 53	2 671.544 76

4.2 三种信号传输路径的确定

本文仿真中对三种不同对流层散射 TDOA 被动定位方法进行对比分析,分别说明如下:

(1) 方法 1: 对流层散射等效地球半径模型方法 (本文所提方法)

针对本文所提出的对流层散射等效地球半径模型

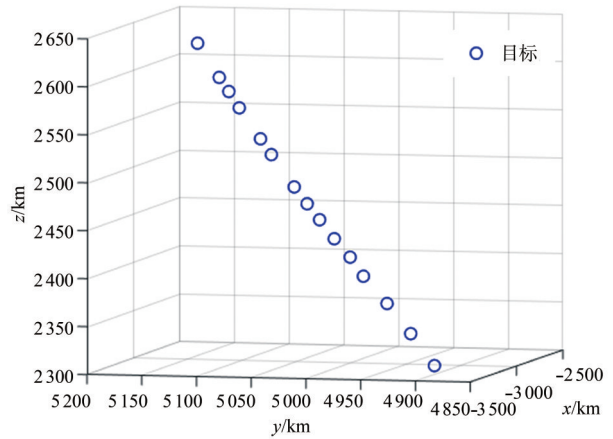


图 6 目标在地固坐标系下的位置示意图

方法,假设散射点位于目标与地面监测站距离之间中点正上方,并通过目标天线仰角和水平距离确定出散射点高度,在几何路径的基础上通过推导出等效地球半径方法下的信号传输路径. 此时,电磁波的对流层散射传输距离 L_1 为:

$$L_1 = 2 \sqrt{(kr_s)^2 + (kr_T)^2 - 2kr_s r_T \cos(\frac{1}{k} \alpha)} \quad (28)$$

(2) 方法 2: 忽略折射因素的传输模型方法

为了对比本文所提方法的有效性,在此对忽略折射因素的传输模型方法进行仿真. 电磁波远距离传输时,呈现出“折射—散射—折射”特性使传输轨迹为曲线,若忽略因折射引起的轨迹弯曲效应,直接将发送端到散射点、散射点到接收端两段轨迹视为直线,便得到忽略折射因素的传输模型,其表示为:

$$L_1 = 2 \sqrt{r_s^2 + r_T^2 - 2r_s r_T \cos \alpha} \quad (29)$$

(3) 方法 3: 直线传输模型方法

直线传输模型是最简单的信道传输模型,只需要将目标与地面监测站之间的信号传播轨迹视为直线. 此模型下,目标与地面监测站之间的信号传播距离就是二者间直线连线的长度,即

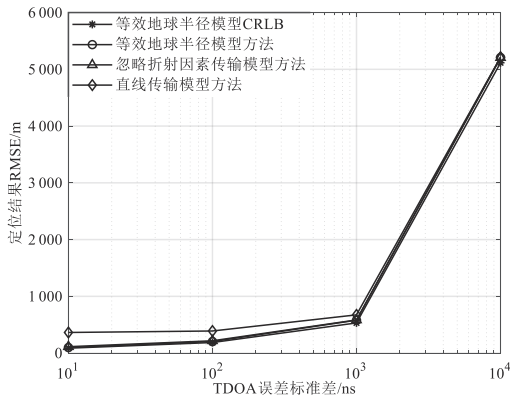
$$L_1 = 2 \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (30)$$

4.3 仿真分析

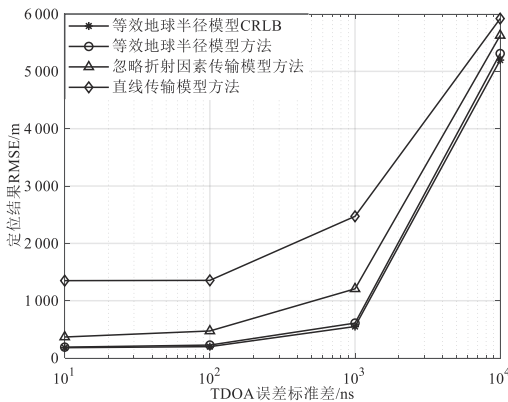
4.3.1 TDOA 误差对定位性能的影响对比

为了分析不同 TDOA 误差对定位性能的影响,通过上述三种不同传输模型方法对目标 \mathbf{u}_6 和目标 \mathbf{u}_{10} 在不同 TDOA 误差标准差进行定位得到均方根误差曲线与上节推导出的 CRLB 进行对比,仿真结果如图 7 所示.

图 7 通过改变 TDOA 误差标准差对不同目标的定位算法性能进行仿真. 如图 7(a) 所示,对于目标 \mathbf{u}_6 (相对地面监测站水平距离为 300 km), TDOA 误差标准差处于 $10 \sim 10^3$ ns 范围时,方法 1 具有最优性能,方法 2 与



(a) 目标 6 不同信噪比下的定位误差对比图



(b) 目标 10 不同信噪比下的定位误差对比图

图 7 两种目标不同信噪比下的定位误差对比图

方法 1 的定位效果接近. 当 TD OA 标准差小于 10^3 时, 定位误差都在 500 m 以下, 这是由于目标与地面监测站距离较近时其各定位模型中信号传播路径整体差异不大, 等效地球半径模型中由于散射点高度较低, 折射指数对等效地球半径的影响较小; 但方法 3 与其它两种方法相比具有较大定位误差, 其定位误差在 670 m 左右. 当 TD OA 标准差达到 10^4 , 三种定位模型的定位误差急速上升, 其标准误差相较于各模型下路径的差异对定位性能有很大影响, 此时三种定位方法的定位误差都接近 5.4 km, 已经导致定位失效.

针对目标 u_{10} (相对地面监测站水平距离为 500 km), 相较于目标 u_6 更能体现出三种方法的定位优缺点. 等效地球半径方法针对远距离目标其定位误差

较小, 当 TD OA 标准差小于 10^3 时, 定位误差在 500 m 以下, 充分证明了本文所提方法的有效性. 但方法 2 和方法 3 此时定位效果较差, 直线传输模型基本上定位失效, 而忽略折射因素传输模型在 TD OA 标准差为 10^3 时, 定位误差在 1.4 km 以上.

4.3.2 目标距离对定位性能的影响分析

为对比分析目标距离对上述三种不同传输模型方法的定位性能影响, 本文在此对图 6 所示与地面监测站不同水平距离的目标 u_i 进行定位仿真, 得到定位误差结果如图 8 所示.

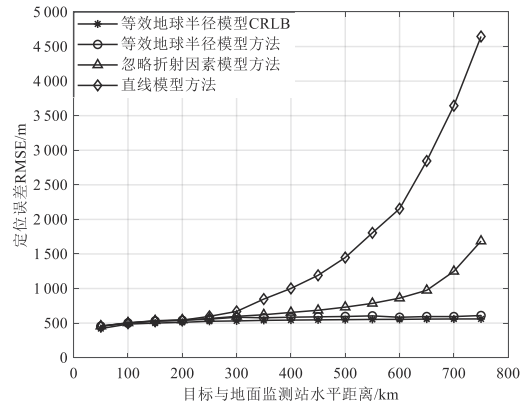


图 8 等效地球半径方法在不同距离时定位性能仿真图

由图 8 可知, 当定位目标与地面监测站之间距离为 300 km 以内时, 三种方法定位均方根误差均在 550 m 左右, 这是因为目标与地面监测站之间直线距离较小使得信号传输模型路径差影响微弱; 随着目标与地面监测站之间距离逐渐增大, 方法 2 与方法 3 定位性能逐渐恶化, 目标距离为 500 km 时, 方法 2 平均定位误差达到 730 m, 方法 3 平均定位误差甚至达到 1.5 km, 从而导致定位失效; 本文所提方法, 在被定位目标与地面监测站距离在 50 km 到 750 km 之间, 平均定位误差呈现稳定状态, 其定位误差在 550 m 左右, 且可以较好的逼近克拉美罗下界 CRLB. 而其它两种方法随着距离的增加, 导致计算路径与实际信号路径不符, 使得定位误差增加. 表 2 为方法 1 中被定位目标与地面监测站距离对应平均定位误差值, 当水平距离逐步增大时, 等效地球半径方法的定位误差均在 600 m 以下, 充分证明所提方法不受被定位目标与地面监测站距离的影响, 表明所提方法的可靠性.

表 2 方法 1 中被定位目标与地面监测站距离对应定位均方根误差

目标到地面监测站距离	100 km	200 km	300 km	400 km	500 km	600 km	700 km
CRLB	485.43 m	511.12 m	531.57 m	543.51 m	549.69 m	554.06 m	560.30 m
平均定位误差	502.15 m	540.06 m	584.07 m	585.23 m	595.66 m	596.39 m	600.43 m

5 结论

与现有天基侦察定位技术相比,本文将天基侦察定位系统与地面侦察定位系统相结合,实现了高轨卫星与地面监测站的联合精确定位.同时,考虑对流层散射传播效应,通过构建出信号的对流层散射传播路径模型,突破了地面侦察定位系统针对被定位目标信号直视传播的严格限制,采用三维空间模型实现地面目标超视距时差定位算法.经仿真验证表明,本文提出的对流层等效地球半径传播模型最为接近实际传输轨迹,实现了基于星地联合定位平台的远距离目标非直视条件的精确定位.在此基础上,之后的研究可以考虑实际环境下对流层散射传输模型更为复杂的情况,使TDOA定位信息更准确.

参考文献

- [1] 张明高. 对流层散射传播[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
ZHANG Ming-gao. Tropospheric Scattering Propagation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [2] MONSEN P. Tropospheric Scatter Communication[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [3] 毛科技, 邬锦彬, 金洪波, 苗春雨, 夏明, 陈庆章. 面向非视距环境的室内定位算法[J]. 电子学报, 2016, 44(5): 1174-1179.
MAO Ke-ji, WU Jin-bin, JIN Hong-bo, MIAO Chun-yu, XIA Ming, CHEN Qing-zhang. Indoor localization algorithm for NLOS environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(5): 1174-1179. (in Chinese)
- [4] CHAN Y T, TSUI W Y, SO H C, et al. Time-of-arrival based localization under NLOS conditions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1): 17-24.
- [5] XIN W, WANG Z, O'DEA B. A TOA-based location algorithm reducing the errors due to non-line-of-sight(NLOS) propagation[J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 52(1): 112-116.
- [6] CHEN C L, FENG K T. An efficient geometry-constrained location estimation algorithm for NLOS environments[C]// Wireless Networks, Communications and Mobile Computing. Maui: 2005 International Conference, 2005: 244-249.
- [7] CHEN H, LUI K, WANG Z, et al. Non-line-of-sight node localization based on semi-definite programming in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 11(1): 108-116.
- [8] 武广友. 基于散射传播的超短波超视距通信技术研究[J]. 通信技术, 2021, 54(9): 2080-2086.
WU Guang-you. Research on VHF NLOS communication technology based on scattering propagation[J]. Communication Technology, 2021, 54(9): 2080-2086. (in Chinese)
- [9] 杨豪强, 朱命怡, 张瑜. 等效地球半径的等效性与局限性研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 66-69.
YANG Hao-qiang, ZHU Ming-yi, ZHANG Yu. Equivalency and limitations of equivalent earth's radius[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science), 2008, 36(6): 66-69. (in Chinese)
- [10] SUNDE E D. Digital troposcatter transmission and modulation theory[J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 43(1): 143-214.
- [11] RUDAKOV V I, KOVBASIUK O V, KOSTYNA O N, et al. Adaptive simulation algorithm for tropospheric scatterers link with two troposcatter communication stations of different modifications[C]//2020 IEEE Ukrainian Microwave Week(UkrMW). Piscataway: IEEE, 2020: 1-5.
- [12] 刘希嘉, 杨凯, 马云霞, 陈帆, 马妍瑞. 无线通信信道仿真及预测[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 39(6): 758-768.
LIU Xi-jia, YANG Kai, MA Yun-xia, CHEN Fan, MA Yan-rui. Simulation and prediction of wireless communication channel[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2021, 39(6): 758-768. (in Chinese)
- [13] 杨天池, 程娟, 邵奇峰, 孙磊. 单站定位中的散射体位置及散射距离的估计方法—合成运动的扩展卡尔曼估计[J]. 电子学报, 2014, 42(4): 730-735.
YANG Tian-chi, CHENG Juan, SHAO Qi-feng, SUN Lei. The estimation of the scatterer position and scattering distance in the single station location: the EKF estimation based on synthetic motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4): 730-735. (in Chinese)
- [14] 裴旭, 马东立. 等效地球半径法应用中的问题[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(4): 455-458.
PEI Xu, MA Dong-li. Problems in earth's equivalent radius method application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(4): 455-458. (in Chinese)
- [15] 吴文溢, 钟方平, 王万鹏, 等. 改进射线描述的低仰角散射斜延迟实时估计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(10): 2366-2372.
WU Wen-yi, ZHONG Fang-ping, WANG Wan-peng, et al. Real-time estimation of tropospheric scattering slant delay of low-elevation obtained by improved ray tracing [J]. Journal of Electronics & Information Technology,

2019, 41(10): 2366-2372. (in Chinese)

- [16] 赵强, 张蕊, 林乐科, 等. 对流层散射传输损耗与大气折射率结构常数相关性研究[J]. 电子学报, 2020, 48(3): 518-523.

ZHAO Qiang, ZHANG Rui, LIN Le-ke, et al. Research on the correlation of troposcatter transmission loss and structure constant of the refractive index[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 518-523. (in Chinese)

- [17] 袁登科, 冯全源. 一种非视距传播下的TDOA定位算法[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(6): 890-893.

YUAN Deng-ke, FENG Quan-yuan. A location algorithm with NLOS propagation[J]. Journal of University Science and Technology of China, 2006, 35(6): 890-893. (in Chinese)

- [18] CUI X, YU K, ZHAO B. A measurement-division model for TDOA-based source bearing estimation with unknown propagation speed[J]. IEEE Access, 2019, 7: 162476-162487.

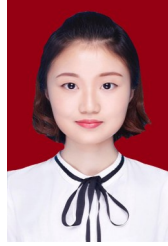
- [19] XI L, GUO F, LE Y, et al. Improved solution for geolocating a known altitude source using TDOA and FDOA under random sensor location errors[J]. Electronics Letters, 2018, 54(9): 597-599.

- [20] WANG G, Li Y, ANSARI N. A semidefinite relaxation method for source localization using TDOA and FDOA measurements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 62(2): 853-862.

- [21] GUO F, FAN Y, ZHOU Y, et al. Space Electronic Reconnaissance: Localization Theories and Methods[M]. Singapore: John Wiley & Sons, Ltd, 2014: 79-131.

- [22] 王翔, 周晨, 李江, 张冬亮. 基于椭球模型的超视距时差定位精度分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(6): 71-76.

WANG Xiang, ZHOU Chen, LI Jiang, ZHANG Dong-liang. Positioning accuracy analysis of the over-the-horizon TDOA based on ellipsoid model[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(6): 71-76. (in Chinese)



周玫汝 女, 1996年12月出生于河南省濮阳市. 2022年毕业于西安电子科技大学通信工程学院. 从事于对流层散射定位技术方面的研究工作.

E-mail: zhoumeiru789@163.com



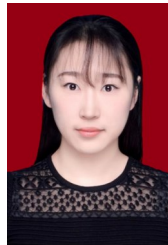
严少虎 男, 1976年2月出生于四川省绵阳市. 1998年7月毕业于西安电子科技大学通信工程学院. 现为中国电子科技集团公司第二十九研究所研究员级高级工程师, 从事系统总体与集成技术方面的研究工作.

E-mail: youngtiger@263.net



李明惺 男, 1985年4月出生于江西省九江市. 2010年年硕士毕业于重庆大学仪器科学与技术专业. 现为中国电科29所高级工程师, 从事频谱管理与电子对抗方面的研究工作.

E-mail: limingxing@cetc.com.cn



段玉锦 女, 1995年4月出生于陕西省西安市. 2020年毕业于西安电子科技大学通信工程学院. 现工作于上海浦东发展银行总行信息科技部应用开发服务中心西安分中心.

E-mail: 18909277848@163.com

作者简介



郝本建 男, 1982年5月出生于山东省泰安市. 现为西安电子科技大学通信工程学院教授、博士生导师, 西安市高层次人才, 从事电磁频谱监测管控方面的研究工作. 获国家技术发明奖二等奖1项、教育部科技进步一等奖1项. 中国电子学会会员编号: E190014391S.

E-mail: bjhao@xidian.edu.cn