

电离层延迟对外辐射源无源雷达定位影响

彭章友 王春娜

(上海大学特种光纤与光接入网省部共建教育部重点实验室 上海 200072)

摘要: 主要研究电离层延迟对外辐射源无源雷达定位的影响。首先建立了电离层延迟对该系统定位影响的定量分析模型,并利用国际 GPS 服务中心(international GPS service, IGS)解算的电离层电子含量(total electron contain, TEC)连续 15 d 的观测数据,研究了上海地区电离层延迟对近地轨道卫星和同步轨道卫星为辐射源的无源雷达定位结果的影响。仿真结果表明电离层延迟引起的定位呈现规律性向东偏移,电离层延迟对同步轨道卫星产生的定位误差可达数米,而对近地轨道卫星产生的定位误差可达几十米。

关键词: 电离层延迟; 外辐射源无源雷达; 定位

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Effect of the ionospheric delay on passive radar using opportunity transmitters

Peng Zhangyou Wang Chunna

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In this paper the effect of the ionospheric delay on passive radar using opportunity transmitters is addressed. We establish analysis models and methods on the effects of the ionosphere on passive radar using opportunity transmitters. Ionospheric data TEC(total electron contain)for 15 days published by IGS(international GPS service) are used to study the influence of ionospheric delay. Both low Earth-orbiting spacecraft and geostationary are considered. Simulation results show that the positioning error caused by ionospheric delay presents the eastward migration, the positioning error of geostationary can up to several meters, and the positioning error of low Earth-orbiting spacecraft can up to several meters.

Keywords: ionospheric delay; passive radar; position

1 引言

电离层是地球上空由大量电子组成的等离子体层区,它会使穿过其中的信号产生时延,色散、吸收和法拉第旋转等,是空间传输过程中的主要误差,因而成为影响卫星导航定位精度的重要因素^[1]。为了精确电离层延迟信息,修正导航定位误差,国内外学者进行了卓有成效的研究,像高精度局部电离层模型的建立以及采用双频技术来削弱电离层延迟的影响^[2-8]等。

然而电离层延迟对外辐射源无源雷达系统定位带来的影响却鲜少有人研究。外辐射源无源雷达是指借助空中卫星信号进行目标探测和跟踪的雷达,它利用多颗卫星辐射源的反射信号相对于其各自直射信号的延时来对目标进行定位。而直达波信号与反射波信号均经过电离层,都会产生电离层延时。若电离层对直达波信号和反射波信号产生的延时相同,那并不会对定位产生影响;若电离层对直达波

信号和对反射波信号产生的延时相差很大,则必定对飞机的定位产生影响。由此可见,虽然电离层延迟对外辐射源无源雷达定位的影响要小于对 GPS 导航定位产生的影响,但依然有必要对其影响进行研究。

本文通过分析电离层特性及其对外辐射源无源雷达定位系统的影响。建立了定量分析模型。基于此模型,利用国际 GPS 服务中心 IGS 解算的 2016 年 3 月 1 日至 15 日连续 15 d 的 TEC 观测数据,研究了上海地区电离层延迟对外辐射源无源雷达定位结果的影响规律。

2 电离层延迟对外辐射源无源雷达定位影响

2.1 外辐射源无源雷达系统

如图 1 所示,外辐射源无源雷达系统的信号接收部分主要由接收直达信号的参考通道和接收反射信号的主通道组成^[9]。参考通道中参考天线对准卫星,使参考天线只接收来自于发射站的直达波信号,主通道中的主天线为一组

天线阵列,同时接收直达波信号和来自于被测目标的反射信号。利用参考天线上接收到的直达波信号对主天线阵列接收信号中的直达波信号进行抵消,然后对完成直达波抵消后的信号进一步的分析 and 检测,来提取微弱回波信号或者微弱回波信号中的相关参数,从而判断目标是否存在以及目标的运动状态。

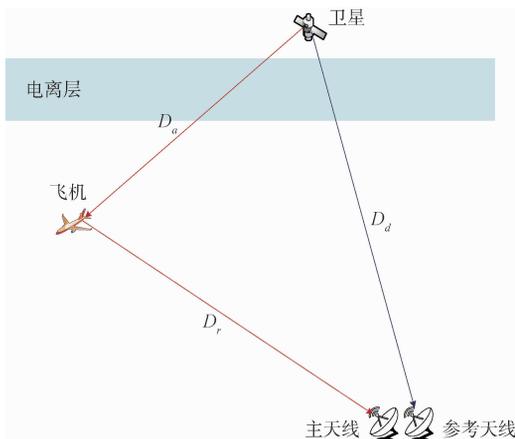


图 1 外辐射源无源雷达系统

该系统在定位飞机时,若不考虑电离层影响,飞机到卫星的距离与飞机到主天线的距离和可以表示为 $D_a + D_r = D_d + c \times \tau$, 其中 τ 是反射波信号与直达波信号的延时。图 1 可以看出直达波信号与反射波信号均经过电离层,受到电离层的影响。若设直达波信号受电离层影响产生的电离层延迟 I_d , 反射波信号受电离层影响产生的电离层延迟 I_r , 则此时上式应改写为 $D_a + D_r + I_r = D_d + I_d + c \times \tau$ 。比较以上两式,可以看出,当 I_r 与 I_d 相差不大时,电离层延时并不会对飞机的定位产生影响;而当 I_r 与 I_d 相差较大时,电离层延时必将对飞机的定位产生影响。

2.2 电离层的单层模型及单层刺穿点

信号通过电离层产生的延时与信号的频率和电离层电子含量(TEC)有关^[10-11],可以表示为:

$$D_m = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (1)$$

所以只要有 TEC 值,即可计算电离层时延误差。

电离层的单层模型是认为自由电子密集分布在距地面 H 处的无限薄层上^[12],如图 2 所示,根据接收机的经纬度坐标为 (λ_1, φ_1) 和飞机的经纬度坐标为 (λ_2, φ_2) 。地心夹角为:

$$\alpha_i = \frac{\pi}{2} - Z_i - \arcsin\left(\frac{R \cos Z_i}{R + H}\right), i = 1, 2 \quad (2)$$

$$Z'_i = \arcsin\left(\frac{R + H}{R} \sin(\pi - Z_i)\right), TEC = \frac{VTEC}{\cos Z'_i}$$

式中:VTEC 表示某点天顶方向的电子总量。

则电离层单层刺穿点的经纬度坐标 $(\lambda_{li}, \varphi_{li})$ 为:

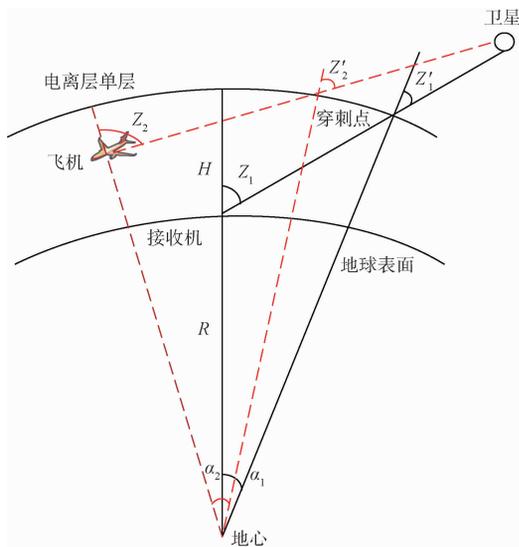


图 2 电离层单层模型

$$\varphi_{li} = \arcsin(\sin(\varphi_i) \sin(\alpha_i) + \cos(\varphi_i) \sin(\alpha_i) \cos(A_i)) \quad (3)$$

$$\lambda_{li} = \lambda_i + \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha_i) \sin(A_i)}{\cos(\varphi_{li})}\right) \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式中: A_1, A_2 分别表示卫星相对于测站方位角和飞机相对于测站的方位角, Z_1, Z_2 分别表示卫星相对于测站的仰角和飞机相对于测站的仰角。

2.3 电离层延迟对外辐射源无源雷达定位影响分析模型

在 GPS 导航定位中,电离层一阶项延迟对其定位的影响可达几十米,二阶项延迟对定位的影响只有十几毫米^[13]。相比于对 GPS 导航定位的影响,电离层对无源雷达定位的影响相对较小,所以这里只考虑电离层一阶项延迟的影响,同时忽略卫星星历、卫星钟差、对流层延迟、观测噪声以及相位模糊度等的影响。

电离层延迟对外辐射源无源雷达定位影响分析模型如图 3 所示,其中 S_i 表示可观测到的卫星 ($i = 1, 2, \dots, n$), n 表示同一历元所观察到的卫星个数, R 表示测站位置, A 表示不考虑电离层影响时得到的飞机位置估计, A' 表示消除电离层影响后得到的飞机位置估计。

设在以 R 为原点的测站坐标系下卫星坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) , 飞机 A 坐标为 (x, y, z) , A' 坐标为 $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$, 所以电离层延迟引起的飞机位置变化为 $\overline{AA'}$, 其中 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别表示飞机位置变化的北分量、东分量和垂直分量。令 θ_i 和 α_i 分别对应飞机相对于卫星的仰角和方位角, β 和 γ 分别对应于测站相对于飞机的仰角和方位角,由于 $\overline{AA'}$ 相对于卫星的高度及飞机到测站的距离很小,故忽略其对仰角和方位角的影响。卫星信号反射路径的距离与直射信号路径距离差 Δd_i 和 $\Delta d'_i$ 可分别表示为:

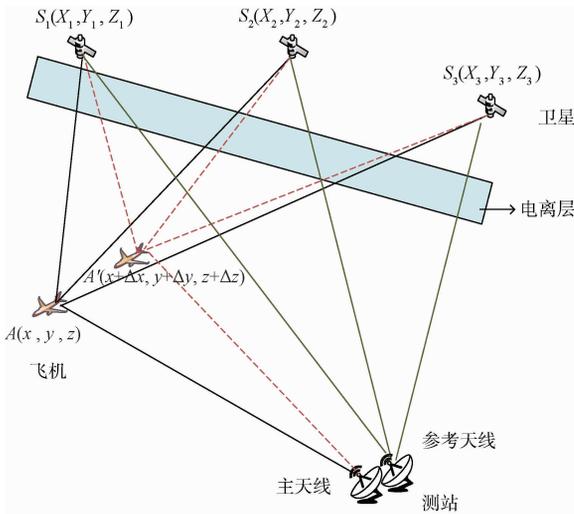


图3 电离层延迟对外辐射源无源雷达定位影响模型

$$\Delta d_i = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} + \epsilon_i = (x - X_i) \sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) + (y - Y_i) \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) + (z - Z_i) \cos(\theta_i) + x \sin(\beta) \cos(\gamma) + y \sin(\beta) \sin(\gamma) + z \cos(\beta) - \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} + \epsilon_i \quad (5)$$

$$\Delta d'_i = \sqrt{(x + \Delta x - X_i)^2 + (y + \Delta y - Y_i)^2 + (z + \Delta z - Z_i)^2} + \sqrt{(x + \Delta x)^2 + (y + \Delta y)^2 + (z + \Delta z)^2} - \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} + \epsilon'_i = (x + \Delta x - X_i) \sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) + (y + \Delta y - Y_i) \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) + (z + \Delta z - Z_i) \cos(\theta_i) + (x + \Delta x) \sin(\beta) \cos(\gamma) + (y + \Delta y) \sin(\beta) \sin(\gamma) + (z + \Delta z) \cos(\beta) - \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} + \epsilon'_i \quad (6)$$

$$\Delta d'_i - \Delta d_i = \Delta x (\sin\theta_i \cos\alpha_i + \sin\beta \cos\gamma) + \Delta y (\sin\theta_i \sin\alpha_i + \sin\beta \sin\gamma) + \Delta z (\cos\beta + \cos\theta_i) + \delta\epsilon_i \quad (7)$$

其中, ϵ_i 和 ϵ'_i 是线性误差, 视为非常小的随机量, 其中 $\delta\epsilon_i = \epsilon_i - \epsilon'_i$ 。而距离差的变化是由于电离层的存在引起的, 故 $\Delta d'_i - \Delta d_i = I_i \approx \tilde{I}_i$, I_i 表示电离层延时引起的误差, \tilde{I}_i 表示理论值的估值, 由于直达路径与反射路径均经过电离层, 故

$$\tilde{I}_i = \frac{40.3}{f_i^2} \Delta TEC = \frac{40.3}{f_i^2} \left(\frac{VTEC_d}{\cos Z_d} - \frac{VTEC_r}{\cos Z_r} \right) \quad (8)$$

把式(8)写成矩阵形式为:

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \delta\epsilon \quad (9)$$

其中 $\mathbf{L} = (\tilde{I}_1, \tilde{I}_2, \dots, \tilde{I}_n)^T$, $\mathbf{X} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$, $\delta\epsilon = (\delta\epsilon_1, \delta\epsilon_2, \dots, \delta\epsilon_n)$,

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} \sin(\theta_1) \cos(\alpha_1) + \sin(\beta) \cos(\gamma) & \sin(\theta_1) \sin(\alpha_1) + \sin(\beta) \sin(\gamma) & \cos(\beta) + \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_2) \cos(\alpha_2) + \sin(\beta) \cos(\gamma) & \sin(\theta_2) \sin(\alpha_2) + \sin(\beta) \sin(\gamma) & \cos(\beta) + \cos(\theta_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ \sin(\theta_n) \cos(\alpha_n) + \sin(\beta) \cos(\gamma) & \sin(\theta_n) \sin(\alpha_n) + \sin(\beta) \sin(\gamma) & \cos(\beta) + \cos(\theta_n) \end{Bmatrix}^T$$

则根据最小二乘原理, 可得到参数 \mathbf{X} 的估计式 $\tilde{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}$, 则可以得出电离层延迟影响改正后引起点位置估值变化 $\overline{\mathbf{AA}^T}$ 的北分量 Δx , 东分量 Δy 和垂直分量 Δz 。

3 仿真分析

3.1 仿真内容与方法

首先利用国际 GPS 服务中心 (international GPS service, IGS) 解算的电离层 TEC 分布图, 得到 2016 年 3 月 1 日至 15 日连续 15 d 的观测数据; 然后通过电离层单层模型中测站与飞机的位置坐标, 分别计算测站与卫星的刺穿点和飞机与卫星的刺穿点的经纬坐标; 再根据刺穿点的经纬坐标及解算的 TEC 分布图, 用网格空间内插原理, 得到两个刺穿点的 VTEC (垂直方向 TEC); 最后根据相应的映射函数, 就能获得信号在直射和反射路径上的 STEC (倾斜 TEC) 值, 从而求得两条路径的 TEC 差值^[14], 得出定位误差。

3.2 仿真结果与分析

按照如上所述的仿真方法, 分别对以下两种情况进行

仿真实验。情况一, 卫星离地面无限远, 此时可认为卫星到测站的信号与卫星到飞机的信号近似平行, 即直射信号和反射信号所经过的电离层倾角相同, 例如地球同步轨道卫星^[15], 如图 4 所示。情况二, 卫星离地面较近, 此时卫星到测站的信号和卫星到飞机的信号不能近似平行, 即直射信号和反射信号所经过的电离层倾角差别较大, 例如近地轨道卫星^[16], 如图 5 所示。

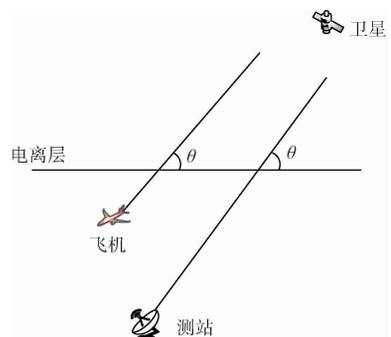


图4 地球同步轨道卫星

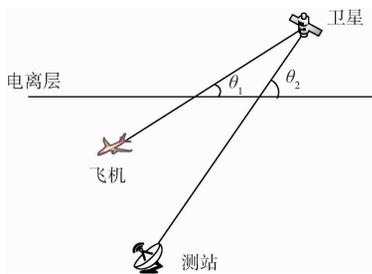


图5 近地轨道卫星

3.2.1 同步轨道卫星仿真结果分析

图6所示为对同步轨道卫星,电离层延迟改进后引起的飞机坐标点位估值偏移在北(x),东(y),垂直(z)三个方向上的时序分布。横轴表示从2016年3月1日到15日连续15 d的时间分布,纵轴表示点位估值变化矢量在测站坐标系下各方向上分量的变化。其中 x 线表示的是电离层延迟引起的点位估值在水平面南北方向分量的时序变化,数值有正有负,但总体为正,即表示产生一定向北偏移,且不超过1 m; y 线表示的是电离层延迟引起的点位估值在水平面东西方向分量的时序变化,数值有正有负,正值居多且正值偏大,即表示在不同时刻会产生向东或向西的偏移,产生向东偏移时,偏移量较大,最多可达4 m;产生向西偏移时,偏移量较小,最多可达2 m; z 线表示的是电离层延迟引起的点位估值在垂直方向分量的时序变化,数值为正,表示点位估值在垂直方向上向上偏移,量级为厘米级。

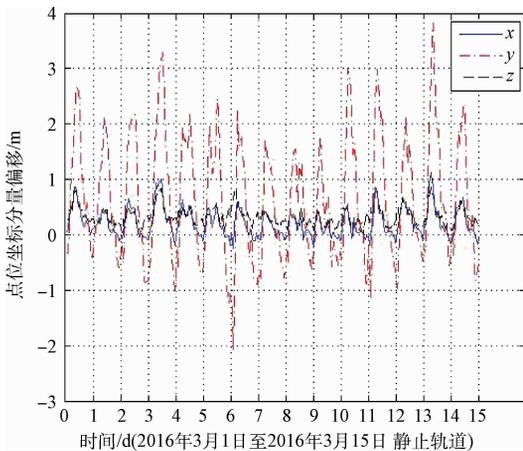


图6 电离层对同步轨道卫星为辐射源的无源雷达定位影响

3.2.2 近地轨道卫星仿真结果分析

图7所示为对于近地轨道卫星,电离层延迟改进后引起的飞机坐标点位估值偏移在南北(x),东西(y),垂直(z)三个方向上的时序分布。从图中可以看出, x 线表示的电离层延迟引起的点位估值在水平面南北方向的时序变化的数值为正,即表示产生一定向北偏移,偏移量在10 m内; z 线表示的电离层延迟引起的点位估值在垂直方向的

时序变化的数值为正,量级为厘米级,表明在垂直方向上偏移量十分微小; y 线表示的电离层延迟引起的点位估值在水平面东西方向的时序变化数值较大,有正有负,但总体为正,即表示主要产生向东偏移,且偏移量最多可达90 m以上。

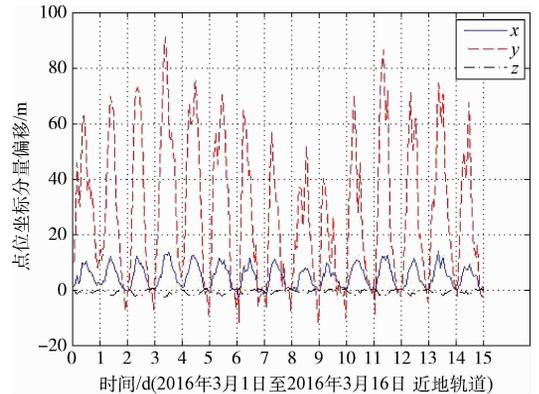


图7 电离层对近地轨道卫星为辐射源的无源雷达定位影响

4 结 论

本文建立了电离层延迟对外辐射源无源雷达定位影响的分析模型与方法。并基于IGS解算的TEC分布图中连续15 d的观测数据,对比分析了外辐射源为同步轨道卫星和近地轨道卫星两种情况下,电离层延迟对无源雷达定位的影响。研究表明,电离层延迟对外辐射源无源雷达定位的点位估值日均变化的影响,反应在水平面上有明显的向东偏移,在南北方向和垂直方向上影响较小。电离层延迟对以同步轨道卫星为辐射源的定位系统影响在十米以内,而对以近地轨道卫星为辐射源的定位系统的影响可达10 m,产生较大的定位误差。故在定位精度要求不高的情况下,以同步轨道卫星为辐射源的无源雷达系统可忽略电离层延迟定位的影响,但以近地轨道卫星为辐射源的无源雷达系统受电离层延迟影响较大,不可忽略。

参考文献

- [1] 于磊,王淑荣,林冠宇,等.用于电离层探测的远紫外成像光谱仪研究[J].仪器仪表学报,2011,32(5):1151-1157.
- [2] ZHAO Y, FU X. Triple-frequency methods for correcting second-order ionospheric delay error in COMPASS system[C]. International Conference on Multimedia Technology, IEEE, 2010:1-4.
- [3] DATTA-BARUA S, WALTER T, BLANCH J, et al. Bounding higher-order ionosphere errors for the dual-frequency GPS user[J]. Radio Science, 2008, 43(5):1429-1443.

(下转第145页)