

改进射线描述的低仰角散射斜延迟实时估计

吴文溢^{*①} 钟方平^① 王万鹏^① 陈西宏^② 朱丹^①

^①(西北核技术研究所 西安 710024)

^②(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

摘要: 针对任意测站的对流层散射斜延迟估算时存在探空气象数据不易实时获取的不足, 该文提出一种利用地面气象参数内插改进射线描述计算公式的对流层散射斜延迟估计算法。该算法利用中纬度大气气象参数公式推导了折射指数随地心距变化的关系式, 并采用气象参数内插方法获取温度变化率和水汽压变化率, 克服了射线描述法对探空数据的依赖。根据亚洲地区6个国际GPS服务(IGS)测站2012年的实测气象数据, 验证了该文算法解算天顶延迟年平均偏差的绝对值在1 cm以内; 选取基线距离适宜的3个测站分成3组散射通信比对站, 利用射线描述法计算了其在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 入射角下全年的斜延迟, 结果表明, 3组比对站进行单向传输的最大斜延迟为17.03~33.10 m; 进行双向时间比对相互抵消95%时, 时间延迟为2.88~5.52 ns。

关键词: 对流层散射; 斜延迟; 射线描述法; 折射指数

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)10-2366-07

DOI: 10.11999/JEIT190014

Real-time Estimation of Tropospheric Scattering Slant Delay of Low-elevation Obtained by Improved Ray Tracing

WU Wenyi^① ZHONG Fangping^① WANG Wanpeng^①

CHEN Xihong^② ZHU Dan^①

^①(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

^②(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Considering the disadvantage of oblique delay estimation of tropospheric scattering at arbitrary stations, which is difficult to obtain real-time sounding meteorological data, an oblique delay estimation algorithm of tropospheric scattering based on improved ray tracing method with ground meteorological parameters is proposed. In order to get rid of the method's dependence on radiosonde data, the algorithm infers the relationship between refractive index and altitude through the formula of meteorological parameters in the model of medium latitude atmosphere. The interpolation of meteorological parameters in the model of UNB3m is used to gain the coefficient of temperature and water vapor pressure. Meteorological data for 2012 from 6 International GNSS Service (IGS) stations in Asia are selected to test the applicability of new method, the results suggest that precision is less than 1 cm. Then, the tropospheric slant delays of three parts observation stations under different angles of incidence ($0^\circ \sim 5^\circ$) are calculated by the modified algorithm. The results suggest that the maximum delay is 17.03~33.10 m in a single way time transfer. In two way time transfer, when the delay can counteract 95%, time delay is 2.88~5.52 ns.

Key words: Tropospheric scatter; Slant propagation delay; Ray tracing; Refractive index

1 引言

高精度时间同步是多基地组网雷达系统有效作

业的首要前提^[1-4]。在真实战场环境下多基地雷达面临着地形偏远复杂、电磁干扰频繁等威胁, 传统的短波、微波授时, 搬运钟方法已经难以满足其时间同步的精度要求。双向时间比对具有时间同步精度高、路径延迟可以抵消等优点广泛应用于高精度时间同步技术^[5,6]。文献^[7]结合现有散射通信装备, 首次提出将双向时间比对技术应用于对流层散射通信来实现高精度时间同步, 并指出对流层散

收稿日期: 2019-01-07; 改回日期: 2019-04-23; 网络出版: 2019-04-29

*通信作者: 吴文溢 18092161443@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(611701525)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (611701525)

射斜延迟是对流层散射双向时间比对(Two Way Troposphere Time Transfer, TWT³)方法时间延迟误差的主要来源,理论估计总时延大概为1.2 ns。在此基础上,文献[8]利用Neill映射函数(Neill Mapping Function, NMF)、维也纳映射函数1(Vienna Mapping Function1, VMF1)和全球映射函数(Global Mapping Function, GMF)3种映射函数计算了多组气象测站的对流层天顶延迟,结果表明当误差角度偏移0.01°时,最大散射斜延迟为0.02 ns。但该文献假设电磁波穿透对流层,通信仰角已经接近30°,这在实际散射通信中将产生较大的传输损耗而难以实现。射线描述法^[9-11]是大气折射修正的常用方法,从射线方程出发,严格推导得到各个物理量的折射率计算公式,修正精度较高,能有效克服采用映射函数法计算低仰角大气延迟精度较差的不足。文献[12]推导了射线描述法的微分形式,在此基础上提出了适用于任意大气环境的折射率的修正模型,利用地面测控站数据的验证结果表明该模型距离误差修正后的残差在10 m左右。文献[13]提出了基于射线描述的对流层斜延迟估计方法,利用Hopfield模型计算折射率,通过射线方程获取对流层散射斜延迟模型精度小于25 mm。文献[14]通过Hopfield+GPT2w模型获取气象测站的气象数据,利用对流层散射传播射线追踪获取对流层延迟误差,通过实测数据的计算结果表明对流层散射时间延迟为3.5~11.8 ns。文献[13,14]采用的Hopfield或Hopfield+GPT2w模型获取气象参数能克服探空数据的依赖,但气象数据受地区、气候环境等影响较大,采用经验模型无法准确地获取实时的地面测站气象数据,模型的地区适用性也存在精度分布不均的现象。对流层散射斜延迟是对流层散射双向时间比对系统的重要误差来源,与通信站的地理位置、地面气候、大气气象参数变化以及电磁波信号入射角等因素密切相关,对其进行研究,对TWT³系统的时间精度和校准具有重要的意义。

针对上述对流层散射斜延迟模型算法的不足,本文提出了一种低仰角下的对流层散射斜延迟估计算法。本文算法利用改进后的射线描述法来解算对流层散射斜延迟,利用测站的实测地面气象数据获取大气折射率剖面,提高了算法的准确性和适用范围。通过对实测气象数据进行处理,结果表明,本文算法能很好地对TWT³系统斜延迟进行估计。

2 射线描述法

射线描述法是基于球面分层大气中的Snell定律,从几何光学原理出发推导的电磁波折射误差的计算公式,不仅适用于各种仰角,且修正精度高,

在实际中得到广泛的应用。球面分层大气中电磁波传播轨迹示意图如图1。

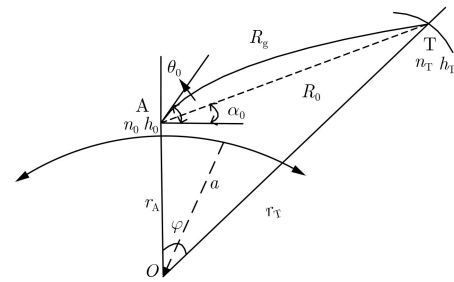


图1 射线描述法示意图

如图1所示, θ_0 表示目标视在仰角, α_0 表示目标真实仰角; h_0 表示测站A的海拔高度, n_0 表示测站A的地面折射指数; a 表示地球半径, r 表示射线上某点与地心间距离, r_A 和 r_T 分别表示测站A和目标T与地心的距离, φ 表示地心张角; R_g 表示测站到目标的空间轨迹线(又称几何距离), R_0 表示测站到目标的真实距离。大气折射引起的距离误差见式(1)^[10]

$$\left. \begin{aligned} \Delta R &= \int_{r_A}^{r_T} \frac{rn^2(r)}{\sqrt{r^2n^2(r) - A_0^2}} dr \\ &\quad - \sqrt{r_A^2 + r_T^2 - 2r_A r_T \cos \varphi} \\ \varphi &= A_0 \int_{r_A}^{r_T} \frac{dr}{r\sqrt{r^2n^2(r) - A_0^2}} \\ A_0 &= rn(r) \cos(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, ΔR 表示电磁波在对流层中传播时由大气折射引起的斜延迟; $n(r)$ 表示据地心 r 处的大气折射指数,一般利用探空技术获得探空剖面气象参数进行插值后获得,也可通过中纬度大气经验模型获取。本文利用测站实测地面气象参数和折射指数公式获取不同高程的气象参数。

3 低仰角对流层散射斜延迟估计算法

对流层散射通信是利用电磁波在对流层内的前向散射原理进行通信的一种通信方式,而对流层内的大气变化也同时对通过其中的电磁波信号产生延迟和折射等效应^[15]。以往为解算对流层斜延迟常引入映射函数,利用天顶延迟与映射函数相乘来求解,但由于映射函数自身参数的局限性,这种方法在解算低仰角的对流层斜延迟精度不高。

3.1 折射指数随地心距变化关系式

通过对第2节中射线描述法的分析,不难发现,如果有测站点比较准确的大气折射指数剖面,则能确保对流层散射斜延迟的估计精度。大气折射率可由各层的气象参数计算得到,具体公式如式(2)^[16]

$$\left. \begin{aligned} N &= k_1 \frac{P-e}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \\ N_w &= k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \\ N_d &= k_1 \frac{P-e}{T} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, N 为总折射率, N_w 为湿折射率, N_d 为干折射率; P 为大气压(mbar), e 为水汽压(mbar), T 为温度(K); $k_1=77.604$ K/Pa, $k_2=64.79$ K/Pa, $k_3=377600$ K²/Pa。

为克服描述法对探空数据的依赖, 利用中纬度参考大气模式的气象参数计算公式, 并结合测站点的地面气象参数来估计对流层各层大气的气象参数, 具体公式如式(3)。

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 - \beta(h - h_0) \\ P &= P_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g}{R_d \beta}} \\ e &= e_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g(1+\lambda)}{R_d \beta}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, T_0 , P_0 , e_0 分别表示测站点的温度(K)、大气压(mbar)、水汽压(mbar); h 表示海拔高度(m), h_0 表示测站点海拔高度(m); $R_d=287.054$ J/(kg·K), $g=9.80665$ m/s²; β , λ 分别表示温度变化率和水汽压变化率, 将式(3)计算得到的气象参数代入式(2)折射率公式中可得干湿折射率随高程变化的关系式如式(4)。

$$\left. \begin{aligned} N_d(h) &= k_1 \frac{P_0}{T_0} \left[1 - \frac{\beta(h - h_0)}{T_0} \right]^{\frac{g}{R_d \beta} - 1} \\ &\quad - k_1 \frac{e_0}{T_0} \left[1 - \frac{\beta(h - h_0)}{T_0} \right]^{\frac{g(\lambda+1)}{R_d \beta} - 1} \\ N_w(h) &= k_2 \frac{e_0}{T_0} \left[1 - \frac{\beta(h - h_0)}{T_0} \right]^{\frac{g(\lambda+1)}{R_d \beta} - 1} \\ &\quad + k_3 \frac{e_0}{T_0^2} \left[1 - \frac{\beta(h - h_0)}{T_0} \right]^{\frac{g(\lambda+1)}{R_d \beta} - 2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)给出了干湿折射率随高程变化的关系式, 而在射线描述法中, 折射指数是随地心距变化的, 因此需要给出折射指数随地心距变化的关系式。地心距与海拔高程的关系见式(5)。

$$r = h + a \quad (5)$$

其中, r 表示射线上某点与地心间距离, a 表示地球半径, h 表示射线上某点的海拔高度(m)。将式(5)代入式(4)中, 可得射线上任意一点折射指数见式(6)。

$$n(r) = [N_d(r) + N_w(r)] \times 10^{-6} + 1 \quad (6)$$

3.2 温度和水汽压变化率的计算

在上述给出的折射指数随地心距变化关系式中, 温度变化率 β K/m和水汽压变化率 λ mbar/m与测站点所在的地理位置和年积日有关, 若使用标准大气的参数, 其解算结果会存在较大的误差。在常见的中纬度大气模型中, 如UNB3m模型^[17]、GPT2模型^[18]等, 温度和水汽压变化率的解算以测站点的大地纬度和年积日为依据, 按照中纬度大气对流层的气象参数格网值(如表1)进行内插获得。内插公式见式(7)。

$$\xi(F, t) = \begin{cases} \xi_{\text{avg}}(F_i) + [\xi_{\text{avg}}(F_{i+1}) - \xi_{\text{avg}}(F_i)]m \\ - \{ \xi_{\text{amp}}(F_i) + [\xi_{\text{amp}}(F_{i+1}) - \xi_{\text{amp}}(F_i)]m \} \\ \cdot \cos[2\pi(t - 28)/365.25], \\ 15^\circ < |F| < 75^\circ \\ \xi_{\text{avg}}(F_i) - \xi_{\text{amp}}(F_i) \\ \cdot \cos[2\pi(t - 28)/365.25], \\ |F| \leq 15^\circ \text{ 或 } |F| \geq 75^\circ \end{cases} \quad (7)$$

其中, $m = (F - F_i) / (F_{i+1} - F_i)$, F 为测站处的大地纬度; F_i , F_{i+1} 为与 F 相差最近的格网大地纬度; t 为年积日; ξ 为参数 β , λ 的内插值。

表1 气象参数格网值

$F(^{\circ})$	avg		amp	
	β	λ	β	λ
15	0.00630	2.77	0.000	0.000
30	0.00605	3.51	0.00025	0.33
45	0.00558	2.57	0.00032	0.46
60	0.00539	1.81	0.00081	0.74
75	0.00453	1.55	0.00062	0.30

3.3 算法步骤

综合上述分析, 本文低仰角对流层散射斜延迟估计算法归纳如下:

步骤1 获取两测站点的地理位置 F 、年积日 t 、海拔高度 h_0 以及地面气象数据(T_0 , P_0 , e_0)等参数, 并初始化算法中涉及的其他各类参数(a , θ_0 , k_1 , k_2 , k_3 , g , R_d);

步骤2 根据测站点的大地纬度 F 、年积日 t 等信息, 利用式(7)的获取两测站点的温度变化率 β 和水汽压变化率 λ ;

步骤3 根据两站气象数据和所处纬度对图2中的两站基线 L 上每一点的气象数据(如 $S_1(P_0, T_0, e_0)$, $S_2(P_0, T_0, e_0)$, $S_3(P_0, T_0, e_0)$...)进行线性插值, 再代入式(4)~式(6)中获取两站点基线任意位置的折射指数随地心距变化的关系式, 最后获取图2

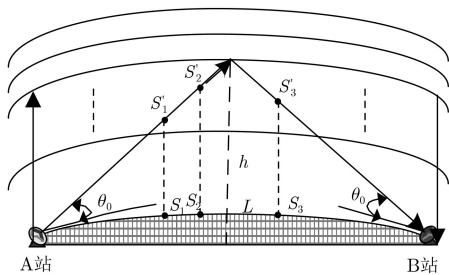


图 2 对流层散射通信原理简化图

中对应传播路线上的点的折射指数(如 $n_{S'_1}$, $n_{S'_2}$, $n_{S'_3}$, ...);

步骤 4 按图2所示的传播路线, 将所得的折射指数表达式代入式(1)射线描述法中, 估计出对流层散射斜延迟。

4 算例与结果分析

4.1 天顶延迟精度验证

选取亚洲地区6个代表性IGS测站的实测天顶延迟数据进行模型的精度验证。测站信息见表2。

表 2 测站信息

站名	北纬(°)	东经(°)	海拔(m)
TSKB	36.11	140.09	67.30
KSMV	35.96	140.66	57.93
KGNI	35.71	139.49	123.50
BJFS	39.36	115.53	54.70
WUHN	30.31	114.21	27.00
TWTF	24.95	121.16	203.10

根据3.3节算法步骤, 初始化仰角 θ_0 为 90° , 即可获取对流层天顶延迟。利用IGS官网提供的2012年实测气象数据(间隔为6 h), 采用UNB3m模型、EGNOS模型及本文算法求解3个测站的天顶延迟, 并将结果与实测天顶延迟数据进行对比, 将对比结果的平均偏差值和均方根误差值(RMS)作为精

度评定标准来分析本文算法的准确性和稳定性, 得到的结果如表3所示。

表 3 各模型统计结果(cm)

测站	UNB3m模型		EGNOS模型		本文算法	
	平均偏差	RMS	平均偏差	RMS	平均偏差	RMS
TSKB	-0.69	8.57	0.63	8.64	-0.70	7.57
KSMV	-0.60	8.44	0.77	8.53	-0.77	7.93
KGNI	-0.67	7.80	0.79	7.89	-0.69	7.41
BJFS	-0.53	7.65	0.72	8.23	-0.56	7.32
WUHN	-0.59	7.53	0.66	8.44	-0.66	7.44
TWTF	-0.80	8.62	0.78	8.65	-0.79	7.85

从表3中可以看出, 本文算法解算6个测站天顶延迟年平均偏差的绝对值均在1 cm以内, 满足精度要求, 且就6个测站的结果而言, 本文算法的偏差值和均方根误差值RMS与UNB3m模型和ENGOS模型相当。

图3给出了TSKB, KSMV和KGNI 3个测站不同模型下的全年天顶延迟平均偏差值分布直方图, 可以看出本文算法的平均偏差值分布更集中于零点附近, 表明本文算法解算天顶延迟的准确性要优于另外两种模型。

4.2 斜延迟分析

根据国际GNSS服务(IGS)官方网站提供的测站信息和实测气象数据, 并考虑到我国IGS测站分布较为分散以及对流层散射通信的有效通信距离, 选取日本地区的TSKB, KSMV, KGNI 3个测站进行TWT³系统的对流层散射斜延迟分析, 分别记为A, B, C站。将3个测站两两之间进行对流层双向时间比对, 利用本文算法对3组比对的斜延迟进行估计和分析, 电磁信号入射角不大于 5° , 共得到3组比对站参数如表4。

根据IGS公布的2012年气象数据, 利用本文算

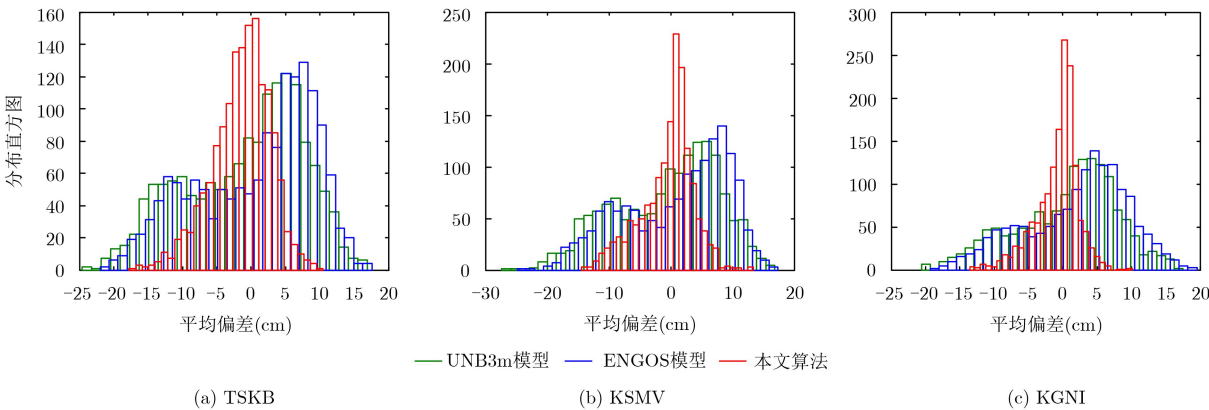


图 3 测站平均偏差分布直方图

法计算在入射角为 $0\sim 5^\circ$ 范围内3组比对站1年的对流层散射斜延迟, 取入射角变化率 $\Delta E = 0.01^\circ$, 其结果如图4所示。

如图4所示, 图4(a), 图4(b), 图4(c)分别表示比对站A&B($L=53.96\text{ km}$), A&C($L=70.06\text{ km}$), B&C($L=109.19\text{ km}$)在1年内入射角范围为 $0^\circ\sim 5^\circ$ 的对流层散射斜延迟变化图。图5给出了3组比对站最大延迟值对应时刻, 不同入射角的斜延迟变化

情况, 其中A&B中在第230天的12:00~18:00, 入射角为 0° 对应最大延迟17.03 m; A&C中在第236天的12:00~18:00, 入射角为 0° 对应最大延迟24.37 m; B&C中在第236天的12:00~18:00, 入射角为 0° 对应最大延迟33.1 m。图6给出了3组比对站在 0° 入射角下一年对流层散射斜延迟变化图。

综合分析上述计算结果, 可以得出:

(1) 结合图4和图5可知, 3组比对站在 $0^\circ\sim 5^\circ$ 入射角下全年的最大对流层散射斜延迟分别为17.03 m、24.37 m和33.1 m, 表明随着通信传输距离的增加, 对流层散射斜延迟呈增加趋势; 随着入射角的增加, 对流层散射斜延迟呈下降趋势, 且最大斜延迟均出现在 0° 入射角;

表 4 比对站情况表

比对站	A&B	A&C	B&C
L(km)	53.96	70.06	109.19
$\theta_0(^{\circ})$	[0, 5)	[0, 5)	[0, 5)

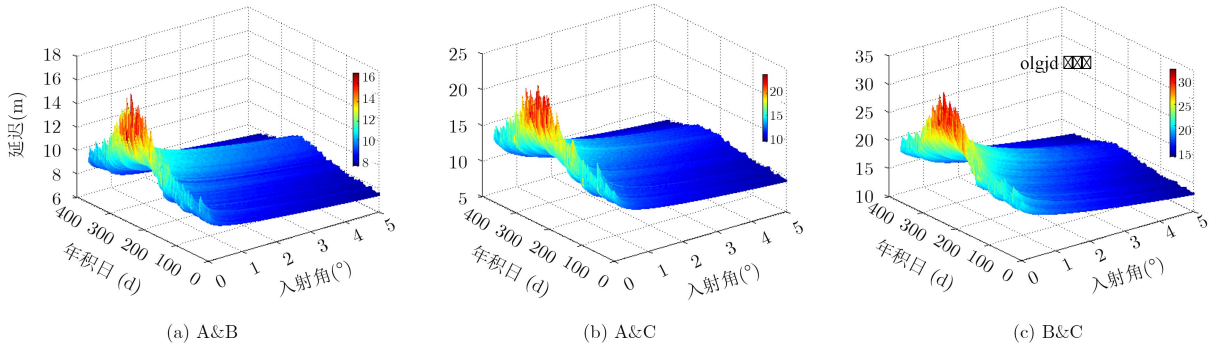


图 4 对流层散射斜延迟

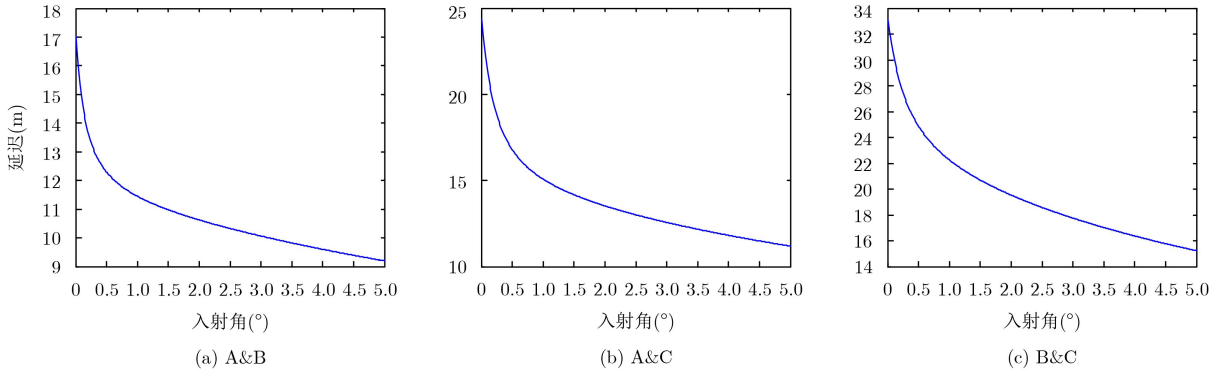


图 5 最大延迟时刻对流层散射斜延迟随入射角变化图

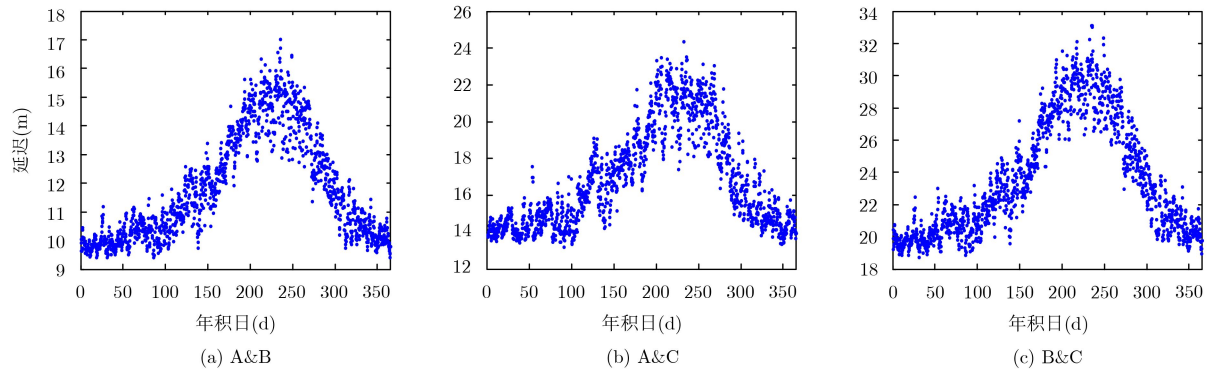


图 6 0° 入射角下一年对流层散射斜延迟变化图

(2) 由图6可以看出, 3组比对站全年对流层散射斜延迟近似呈年周期余弦函数分布, 且大致呈夏季最大, 冬季最小的分布, 这与夏季对流层内大气活动剧烈, 冬季对流层大气较平缓等因素有关;

(3) 3组比对站进行电磁波单向传输通信时, 全年斜延迟最大值分别为17.03 m ($L=53.96$ km), 24.37 m ($L=70.06$ km)和33.1 m ($L=109.19$ km); 进行双向时间比对时, 考虑对流层散射信道时变随参特性及上下通道不完全对称的影响, 在散射时延相互抵消90%的情况下, 对应时间延迟为5.77~11.03 ns; 在相互抵消95%的情况下, 对应时间延迟为2.88~5.25 ns, 符合双向时间比对系统的精度要求。

5 结束语

本文设计了一种利用射线描述法来解算低仰角下对流层散射斜延迟的算法, 本文算法结合中纬度大气模型中气象参数计算公式及气象参数的内插方法, 推导了折射指数随地心距变化的关系式, 并利用该关系式对射线描述法进行改进, 使其克服对探空数据的依赖。本文斜延迟模型具有以下特点:

(1) 最大斜延迟均出现在 0° 附近, 且随着仰角增大, 斜延迟呈现递减趋势; (2) 比对站的斜延迟存在明显的季节性, 呈现夏季偏高, 冬季偏低的分布; (3) 3组比对站最大单向传输斜延迟为17.03~33.10 m; 在进行双向时间比对相互抵消95%的情况下, 时间延迟为2.88~5.25 ns。

综上所述, 本文方法能实时快速的估计TWT³对流层斜延迟。本文方法计算简便, 对多基地雷达等分布式武器系统的时间同步和卫星导航定位系统中对流层延迟修正具有一定的工程实用价值。由于缺乏气象探空数据, 本文中斜延迟模型的精度验证局限于在天顶方向与地面实测天顶延迟值的比较, 与真实对流层散射延迟值的比较有待于在下一步工作中进行深入验证。

参考文献

- [1] PAN Minghai, HAN Qinghua, GONG Shufeng, *et al.* Impacts of space-time-frequency synchronization errors on wideband target echo characteristics of bistatic/multistatic radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016, 27(3): 562–573. doi: [10.1109/JSEE.2016.00060](#).
- [2] 万显荣, 孙绪望, 易建新, 等. 分布式数字广播电视外辐射源雷达系统同步设计与测试[J]. *雷达学报*, 2017, 6(1): 65–72. doi: [10.12000/JR16134](#).
WAN Xianrong, SUN Xuwang, YI Jianxin, *et al.* Synchronous design and test of distributed passive radar systems based on digital broadcasting and television[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 65–72. doi: [10.12000/JR16134](#).
- [3] WANG Zhengbo, ZHAO Lu, WANG Shiguang, *et al.* COMPASS time synchronization and dissemination-Toward centimetre positioning accuracy[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2014, 57(9): 1788–1804. doi: [10.1007/s11433-014-5508-z](#).
- [4] CHEN Xihong, LIU Qiang, HU Denghua, *et al.* Delay analysis of two way time transfer based on troposphere gradients[C]. The 10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, China, 2014: 543–547.
- [5] HUANG Yijun, FUJIEDA M, TAKIGUCHI H, *et al.* Stability improvement of an operational two-way satellite time and frequency transfer system[J]. *Metrologia*, 2016, 53(2): 881–890. doi: [10.1088/0026-1394/53/2/881](#).
- [6] SLIWICZYNSKI L, KREHLIK P, KOŁODZIEJ J, *et al.* Fiber-optic time transfer for UTC-traceable synchronization for telecom networks[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2017, 1(1): 66–73. doi: [10.1109/MCOMSTD.2017.1600766ST](#).
- [7] 刘强, 陈西宏, 薛伦生, 等. 基于映射函数的对流层双向时间比对斜延迟分析[J]. *电子科技大学学报*, 2015, 44(5): 689–694. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2015.05.009](#).
LIU Qiang, CHEN Xihong, XUE Lunsheng, *et al.* Slant propagation delay analysis in two way troposphere transfer based on mapping function[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2015, 44(5): 689–694. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2015.05.009](#).
- [8] 王红光, 吴振森, 朱庆林. 大气折射对雷达低仰角跟踪误差的影响分析[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(8): 1893–1896. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.01186](#).
WANG Hongguang, WU Zhensen, and ZHU Qinglin. Influence analysis of atmospheric refraction on low-angle radar tracking errors[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1893–1896. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.01186](#).
- [9] 乔江, 杜晓燕, 卫佩佩. 一种对流层折射误差的实时简化修正方法[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(10): 103205. doi: [10.11884/HPLPB201830.180146](#).
QIAO Jiang, DU Xiaoyan, and WEI Peipei. Real-time simplified correction method for tropospheric refraction error[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(10): 103205. doi: [10.11884/HPLPB201830.180146](#).
- [10] 吴文溢, 陈西宏, 刘少伟. 低仰角对流层散射斜延迟实时估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(6): 1326–1332. doi: [10.11999/JEIT160776](#).
WU Wenyi, CHEN Xihong, and LIU Shaowei. Real-time estimation method for tropospheric scatter slant delay at

- low elevation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1326–1332. doi: [10.11999/JEIT160776](https://doi.org/10.11999/JEIT160776).
- [11] 卫佩佩, 杜晓燕, 江长荫. 基于射线描述法微分形式的大气折射误差修正方法研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(8): 1838–1846. doi: [10.11999/JEIT171131](https://doi.org/10.11999/JEIT171131).
- WEI Peipei, DU Xiaoyan, and JIANG Changyin. Atmosphere refractive error correction method based on ray tracing differential form[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1838–1846. doi: [10.11999/JEIT171131](https://doi.org/10.11999/JEIT171131).
- [12] 陈西宏, 刘赞, 刘继业, 等. 低仰角下对流层散射斜延迟估计方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 408–412. doi: [10.11999/JEIT150628](https://doi.org/10.11999/JEIT150628).
- CHEN Xihong, LIU Zan, LIU Jiye, et al. Estimating tropospheric slant scatter delay at low elevation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 408–412. doi: [10.11999/JEIT150628](https://doi.org/10.11999/JEIT150628).
- [13] 刘继业, 陈西宏, 刘赞. 对流层散射双向时间比中对流层斜延迟实时估计[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(3): 587–593. doi: [10.11999/JEIT170581](https://doi.org/10.11999/JEIT170581).
- LIU Jiye, CHEN Xihong, and LIU Zan. Real-time estimation of tropospheric slant delay in two-way troposphere time transfer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(3): 587–593. doi: [10.11999/JEIT170581](https://doi.org/10.11999/JEIT170581).
- [14] 卫佩佩, 杜晓燕, 江长荫. 对流层散射超视距信道传输损耗快慢衰落特性研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(7): 1745–1751. doi: [10.11999/JEIT170952](https://doi.org/10.11999/JEIT170952).
- WEI Peipei, DU Xiaoyan, and JIANG Changyin. Study on tropospheric scatter beyond-line-of-sight channel transmission loss for short-term and long-term fading[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(7): 1745–1751. doi: [10.11999/JEIT170952](https://doi.org/10.11999/JEIT170952).
- [15] ERIKSSON D, MACMILLAN D S, and GIPSON J M. Tropospheric delay ray tracing applied in VLBI analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(12): 9156–9170. doi: [10.1002/2014JB011552](https://doi.org/10.1002/2014JB011552).
- [16] LEANDRO R F, LANGLEY R B, and SANTOS M C. UNB3m_pack: A neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(1): 65–70. doi: [10.1007/s10291-007-0077-5](https://doi.org/10.1007/s10291-007-0077-5).
- [17] 孔建, 姚宜斌, 单路路, 等. GPT2w模型在南极地区精度分析[J]. 测绘学报, 2018, 47(10): 1316–1325. doi: [10.11947/j.AGCS.2018.20170487](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2018.20170487).
- KONG Jian, YAO Yibin, SHAN Lulu, et al. The accuracy analysis of GPT2w at the Antarctic area[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(10): 1316–1325. doi: [10.11947/j.AGCS.2018.20170487](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2018.20170487).
- [18] 姚宜斌, 徐星宇, 胡羽丰. GGOS对流层延迟产品精度分析及在PPP中的应用[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 278–287. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20160383](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20160383).
- YAO Yibin, XU Xingyu, and HU Yufeng. Precision analysis of GGOS tropospheric delay Product and its application in PPP[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 278–287. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20160383](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20160383).
- 吴文溢: 男, 1993年生, 工程师, 硕士, 研究方向为高精度时间同步技术研究.
- 钟方平: 男, 1966年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为工程力学.
- 王万鹏: 男, 1975年生, 高级工程师, 研究方向为爆炸力学.
- 陈西宏: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为大容量散射通信技术.
- 朱 丹: 女, 1982年生, 工程师, 研究方向为工程防护.