

## 低仰角对流层散射斜延迟实时估计方法

吴文溢<sup>\*①②</sup> 陈西宏<sup>①</sup> 刘少伟<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

<sup>②</sup>(西北核技术研究所 西安 710024)

**摘要:** 针对缺乏气象数据情况下低仰角对流层散射斜延迟的实时估计问题, 该文提出一种基于射线描述的对流层斜延迟估计方法。该算法利用 UNB3m 模型获取大气气象参数, 建立了对流层大气折射率剖面模型, 克服了气象数据对射线描述法中折射率计算的限制。选取亚洲地区 8 个国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)测站 2012 年的实测气象数据, 计算对流层大气折射率剖面, 验证了对流层延迟模型的精度小于 25 mm; 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, 计算结果表明: 3 组比对站最大单向传输斜延迟为 22.38 ~ 48.37 m; 在进行双向时间比对相互抵消 95% 的情况下, 时间延迟为 3.73 ~ 8.07 ns。

**关键词:** 对流层散射; 大气折射; 斜延迟; 射线描述

**中图分类号:** P228

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2017)06-1326-07

**DOI:** 10.11999/JEIT160776

## Real-time Estimation Method for Tropospheric Scatter Slant Delay at Low Elevation

WU Wenyi<sup>①②</sup> CHEN Xihong<sup>①</sup> LIU Shaowei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

<sup>②</sup>(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Based on ray tracing, a real-time method of tropospheric scatter slant delay estimation is proposed to estimate the low-elevation tropospheric delay in the absence of meteorological data. The model uses the UNB3m model to obtain atmospheric meteorological parameters, establishes the tropospheric atmospheric refractive index profile model, and overcomes the limitation of meteorological data on the refractive index calculation in the ray tracing method. The atmospheric refractive index profile of the troposphere is calculated by using the meteorological data of the International GNSS Service (IGS) stations in Asia in 2012, and the accuracy of the tropospheric delay model is verified to be less than 25 mm. The three stations with the baseline distance are selected and divided into three sets of scatter correspondence comparison stations. The oblique delay at  $0^\circ \sim 5^\circ$  incident angle is calculated by ray tracing method. The results show that the maximum one-way propagation delay is 22.38 ~ 48.37 m for the three groups, and 3.73 ~ 8.07 ns for the two-way time offset 95%.

**Key words:** Tropospheric scatter; Atmospheric refraction; Slant delay; Ray-tracing

### 1 引言

对流层散射传播广泛应用于军事通信领域<sup>[1]</sup>。对流层散射通信是利用对流层大气作为传输媒介来实现超视距通信, 具有传输容量大、越障能力强、抗干扰性好和机动性较高等优点<sup>[2-3]</sup>。文献[4,5]将双向时间比对技术应用于对流层散射通信, 提出对流层散射双向时间比对(Two Way Troposphere Time

Transfer, TWT<sup>3</sup>)的高精度时间同步方案, 但文献中仅讨论了天顶方向上的对流层延迟情况, 对于对流层斜延迟却并未进行计算分析。通常而言, 散射通信是基于平地超视距通信, 在实际工程中, 散射天线的仰角不会超过  $5^\circ$ , 不然则认为传输损耗过大而不能实现通信<sup>[6]</sup>。散射电波波束以低仰角沿地球切线方向时, 在对流层传播将产生较大的折射效应和路径弯曲, 其所带来的延迟误差将严重影响测量设备的精度, 因此, 研究低仰角对流层散射延迟模型对 TWT<sup>3</sup> 精度和校准具有重要意义。

长期以来, 人们对对流层延迟模型进行了大量的研究, 传统的对流层天顶延迟模型如 Hopfield,

收稿日期: 2016-07-22; 改回日期: 2017-04-05; 网络出版: 2017-05-02

\*通信作者: 吴文溢 1440524558@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571459)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61571459)

Saastamoinen 等模型，其改正精度可达厘米或分米级，而 EGNOS, UNB 系列模型的改正精度则更高。文献[7,8]通过 Saastamoinen 模型估计天顶延迟值，再利用 Neil 映射函数(Neil Mapping Function, NMF)、维也纳映射函数 1(Vienna Mapping Function 1, VMF1)和全球映射函数(Global Mapping Function, GMF) 3 种映射函数模型进行斜方向投影，计算结果表明该方法能较好估计对流层散射体高度为 15 km 处时 TWT<sup>3</sup> 系统的斜延迟，但此时的散射角已属高仰角，难以实现有效通信，且 3 种映射函数模型由于自身参数的精度限制<sup>[9]</sup>，在计算低仰角对流层斜延迟误差时，将会产生较大估计误差。文献[10]提出一种利用 Hopfield 模型改进射线描述的对流层散射斜延迟模型，计算结果表明该模型能较好地估计低仰角下 TWT<sup>3</sup> 系统的斜延迟，但 Hopfield 模型需要测站位置的实测气象数据，而一般测站并不具备气象观测的条件，因此该方法具有较大的局限性。

对流层斜延迟是 TWT<sup>3</sup> 系统的重要误差源之一，在执行机动时间同步任务时，针对一些缺乏气象观测资料的地区，为实现收发站的高精度时间同步，需要能在缺乏气象数据的情况下实时快速地估计出对流层斜延迟。为此，本文利用 UNB3m 模型<sup>[11,12]</sup>获取大气气象参数，结合折射率公式建立对流层大气折射率剖面模型，克服气象数据对射线描述中折射率计算的限制，建立基于射线描述的对流层斜延迟模型。通过对 2012 年 IGS 站的数据进行计算，结果表明，该模型能够很好地估计对流层散射斜延迟。

## 2 对流层大气折射率剖面模型

大气折射是引起电磁波信号传播延迟和路径弯曲的主要原因<sup>[13-15]</sup>。大气折射率决定着大气折射程度，且随气象参数的变化而变化。探空观测是获取气象参数的常用方法之一，但存在观测间隔较长、观测成本高、测站分布稀疏等缺点，具有较大的局

限性<sup>[16,17]</sup>。为了能摆脱实测气象参数的限制，结合 UNB3m 模型气象参数公式和大气折射率公式，建立对流层大气折射率剖面模型。

### 2.1 UNB3m 模型气象参数计算

UNB3m 模型改正精度高，其气象参数的计算是基于测站的地理位置和年积日，按照 UNB3m 对流层的气象参数格网值(如表 1)进行内插获取，内插公式为<sup>[11,12]</sup>

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

式中， $\xi$  为气象参数大气压  $P_0$  (Pa)、温度  $T_0$  (K)、大气相对湿度 RH (%)、温度变化率  $\beta$  (K/m)、水汽压变化系数  $\lambda$  (Pa/m)的内插值，这些气象参数均为海平面处值，其中下标 avg 表示季节平均值，amp 表示相对变化值。 $m = (\Phi - \Phi_i) / (\Phi_{i+1} - \Phi_i)$ ， $\Phi$  为测站的大地纬度； $\Phi_i, \Phi_{i+1}$  为与  $\Phi$  相差最近的格网大地纬度(见表 1)； $t$  为年积日(d)。

此外，在 UNB3m 模型中，水汽压  $e_0$  (Pa)需通过 RH 变换获取，计算公式如式(2)：

$$e_0 = \frac{\text{RH}}{100} \cdot e_s \cdot f_w \quad (2)$$

其中， $e_s$  和  $f_w$  的表达式为

$$e_s = 0.01 \exp(1.2378847 \times 10^{-5} T_0^2 - 1.9121316 \times 10^{-2} T_0 + 33.93711047 - 6.3431645 \times 10^{-3} T_0^{-1}) \quad (3)$$

$$f_w = 1.00062 + 3.14 \times 10^{-4} P_0 + 5.6 \times 10^{-7} (T_0 - 273.15)^2 \quad (4)$$

### 2.2 对流层大气折射率

对流层大气折射率与大气压、温度、水汽压、海拔高度等参数有关，具体计算可为<sup>[15]</sup>

表 1 UNB3m 气象参数格网值

$\Phi(^{\circ})$	季节平均值					相对变化值				
	$P_0$	$T_0$	RH	$\beta$	$\lambda$	$P_0$	$T_0$	RH	$\beta$	$\lambda$
15	101325	299.65	75.00	0.00630	277	0	0	0	0	0
30	101725	294.15	80.00	0.00605	351	-375	7.00	0	0.00025	33
45	101575	283.15	76.00	0.00558	257	-225	11.00	-1.00	0.00032	46
60	101175	272.15	77.50	0.00539	181	-175	15.00	-2.50	0.00081	74
75	101300	263.65	82.50	0.00453	155	-50	14.50	2.50	0.00062	30

$$N = N_h + N_w = k_1 \frac{P - e}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (5)$$

$$N_w = k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (6)$$

式中,  $N$  为总折射率,  $N_h$  为静力项折射率,  $N_w$  为湿折射率;  $k_1 = 7760.4, k_2 = 6479, k_3 = 37760000$ 。

在对流层范围内, 温度等气象参数随海拔高度的变化关系为<sup>[18]</sup>

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 - \beta h \\ P &= P_0 (T/T_0)^{\frac{g_m}{R_d \beta}} \\ e &= e_0 (T/T_0)^{\frac{g_m(\lambda+1)}{R_d \beta}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中,  $P_0, T_0, e_0$  分别表示海平面处大气压(Pa)、温度(K)、水汽压(Pa);  $h$  表示海拔高度(m);  $R_d = 287.054, g_m$  表示重力加速度( $m/s^2$ ), 不同地区和海拔高度的重力加速度可以表示为<sup>[9]</sup>

$$g_m = 9.784(1 - 0.00266 \cos(2\Phi) - 0.00028h_0) \quad (8)$$

式中,  $\Phi$  表示测站的纬度,  $h_0$  表示海拔高度。

将式(7)、式(8)代入式(5)中, 可得对流层大气折射率随高度变化关系式:

$$\left. \begin{aligned} N_h(h) &= k_1 \frac{P_0}{T_0} \left[ 1 - \frac{\beta h}{T_0} \right]^{\frac{g_m}{R_d \beta} - 1} \\ &\quad - k_1 \frac{e_0}{T_0} \left[ 1 - \frac{\beta h}{T_0} \right]^{\frac{g_m(\lambda+1)}{R_d \beta} - 1} \\ N_w(h) &= k_2 \frac{e_0}{T_0} \left[ 1 - \frac{\beta h}{T_0} \right]^{\frac{g_m(\lambda+1)}{R_d \beta} - 1} \\ &\quad + k_3 \frac{e_0}{T_0^2} \left[ 1 - \frac{\beta h}{T_0} \right]^{\frac{g_m(\lambda+1)}{R_d \beta} - 2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

基于测站的地理纬度和年积日, 依据式(1)–式(4), 可计算出海平面处的气象参数  $P_0, T_0, e_0$ , 再将其代入式(9)中, 便可获得测站处的对流层大气折射率剖面。

### 3 基于射线描述的对流层斜延迟模型

#### 3.1 射线描述法

射线描述法是修正电波大气折射误差的常用方法之一, 不仅适用于各种仰角, 且修正精度高, 在实际工程中得到广泛应用<sup>[19–21]</sup>。电磁波在对流层大气中的传播轨迹如图 1 所示。

图 1 中,  $\theta_0$  和  $\alpha_0$  分别表示目标视在仰角和真实仰角,  $h_0$  和  $h_T$  分别表示测站和目标的的海拔高度,  $n_0$  和  $n_T$  分别表示测站和目标的折射指数;  $r_0$  为地球半径,  $r$  表示射线上某点与地心间距离,  $\varphi$  表示地心张角;  $R_g$  和  $R_0$  分别表示测站到目标的几何距

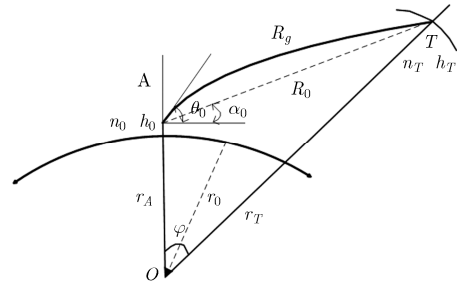


图 1 射线描述法示意图

离和真实距离。对流层大气折射引起的距离误差可表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta R &= R_g - R_0 = \int_{r_A}^{r_T} \frac{rn^2(r)}{\sqrt{r^2n^2(r) - A_0^2}} dr \\ &\quad - \sqrt{r_A^2 + r_T^2 - 2r_A r_T \cos \varphi} \\ \varphi &= A_0 \int_{r_A}^{r_T} \frac{dr}{r \sqrt{r^2n^2(r) - A_0^2}} \\ A_0 &= rn(r) \cos(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中,  $A_0$  为常数;  $\Delta R$  表示对流层散射斜延迟;  $n(r)$  表示距离地心  $r$  处的大气折射率。

#### 3.2 对流层斜延迟估计方法

正如前文所述, TWT<sup>3</sup> 系统的机动性要求较高, 在任意机动建站时, 并不具备实时获取气象数据的条件, 利用上节中对流层大气折射率模型, 基于测站的地理位置和年积日信息, 无论在何时何地建站都能在缺乏气象数据的情况下, 获取对流层大气折射率剖面, 进而利用射线描述法对系统中对流层散射斜延迟进行精确估计。对流层散射通信示意图如图 2 所示, 两站间的基线距离为  $L$ 。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  $\Phi$ 、年积日  $t$ 、海拔高度  $h_0$  等初始参数, 利用式(1)–式(4)获取两测站海平面处对流层气象参数  $P_0, T_0, e_0$ ;

步骤 2 根据两站气象参数  $P_0, T_0, e_0$ , 对两站基线  $L$  上任一点进行线性插值, 获取其初始气象参数, 见图 2 中  $S_1(P_0, T_0, e_0)$ ;

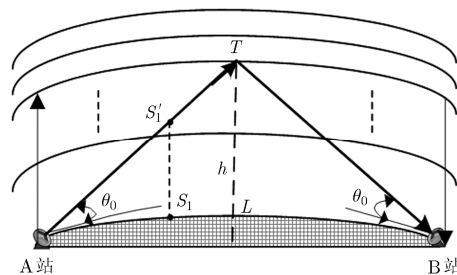


图 2 对流层散射通信示意图

步骤 3 对算法中涉及各类参数 ( $\theta_0, r_0, k_1, k_2, k_3, g_m, R_d$ ) 进行初始化, 然后利用式(9), 获取两站基线间任一点的对流层大气折射率剖面, 见图 2 中  $S'_1(N_h(h), N_w(h))$ ;

步骤 4 利用对流层折射率剖面, 计算相应的折射指数剖面, 计算公式为

$$n(h) = (N_h(h) + N_w(h)) + 1 \quad (11)$$

式中,  $n(h)$  为海拔高度以上的折射指数剖面, 令  $r = h + r_0$ , 则得到射线描述法中的折射指数  $n(r)$ ;

步骤 5 根据图 2 中的几何关系可获取散射点  $T$  的高度  $h_T$ , 再按图 2 所示的传播路线, 将折射指数  $n(r)$  代入射线描述法式(10)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 8 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	ID	北纬(°)	东经(°)	海拔(m)
WUHN	A	30.31	114.21	27.00
BJFS	B	39.36	115.53	54.70
KSMV	C	35.96	140.66	57.93
TSKB	D	36.11	140.09	67.30
KGNI	E	35.71	139.49	123.50
TWTF	F	24.95	121.16	203.10
URUM	G	43.28	87.10	918.70
USUD	H	36.13	138.36	1508.60

将 2.2 节算法中的初始仰角  $\theta_0$  设为  $90^\circ$ , 所求的延迟值即为天顶延迟值。通过将该算法计算出的 8 个测站延迟值与实测天顶延迟数据进行对比, 得到测站的年平均误差(Mean Error, ME)和 RMS, 并与 Hopfield 模型的结果进行比较, 所得结果如图 3 所

示。为了方便比较, 测站名称用 ID 表示, 部分测站误差结果取了绝对值。

从图 3 中可以看出, 由于测站的地理位置、气候条件、季节周期等因素的影响, 不同测站的延迟误差的精度差别较大, 就两种模型结果而言, 地理海拔高的测站误差较大, 海拔低的测站误差则偏小, WUHN 站和 BJFS 站的精度较高, 误差在 20 mm 以内, TWTF 站、URUM 站和 USUD 站的误差较差, 误差超过了 60 mm; 采用本文算法的估计精度要明显比 Hopfield 模型高, 8 个测站的天顶延迟年平均误差均在 25 mm 以内, 满足精度要求。

### 4.2 对流层斜延迟分析

对流层散射的单跳距离一般为 100~300 km 左右, 考虑到实际中 TWT<sup>3</sup> 系统传输时间信号的有效距离, 选取基线距离适宜的 TSKB 站(D)、KGNI 站(E)和 USUD 站(H)3 个测站, 两两分成一组散射时间比对站, 利用 2.2 节中算法计算比对站在  $0^\circ \sim 5^\circ$  入射角下 2012 年全年的斜延迟变化, 并对结果进行分析。3 组比对站的信息见表 3 所示。

图 4 表示 3 组比对站全年的斜延迟变化情况, 初始化时间步长取 6 h, 仰角步长取为  $0.01^\circ$ , 可以看出散射延迟序列在  $0^\circ$  附近延迟值较大, 之后出现明显的递减趋势。计算 3 组比对站最大延迟值: D&E 比对站中在第 170 天 12 时~18 时, 入射角为  $0.19^\circ$ , 出现最大延迟值为 22.38 m; E&H 站在第 169 天 12 时~18 时, 入射角为  $0.12^\circ$ , 出现最大延迟值为 33.02 m; D&H 站在第 173 天 12 时~18 时, 入射角为  $0.12^\circ$ , 出现最大延迟值为 48.37 m。

不同基线距离的比对站散射延迟值存在较大的

表 3 散射比对站信息

比对站 ID	D&E	E&H	D&H
基线距离(km)	70.06	111.90	155.58
$\theta_0$ (°)	(0,5]	(0,5]	(0,5]

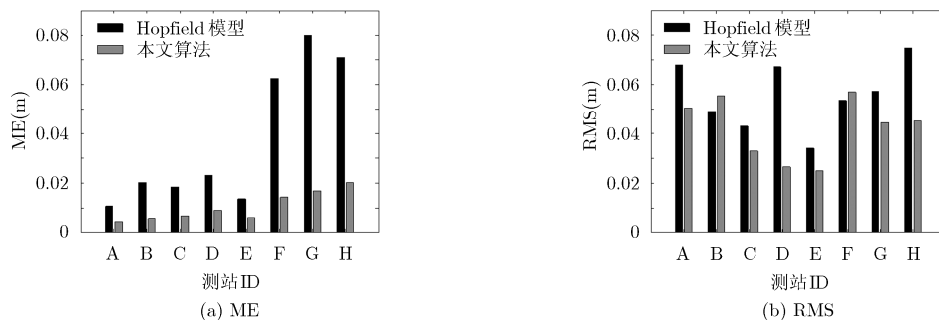


图 3 测站年平均误差及 RMS

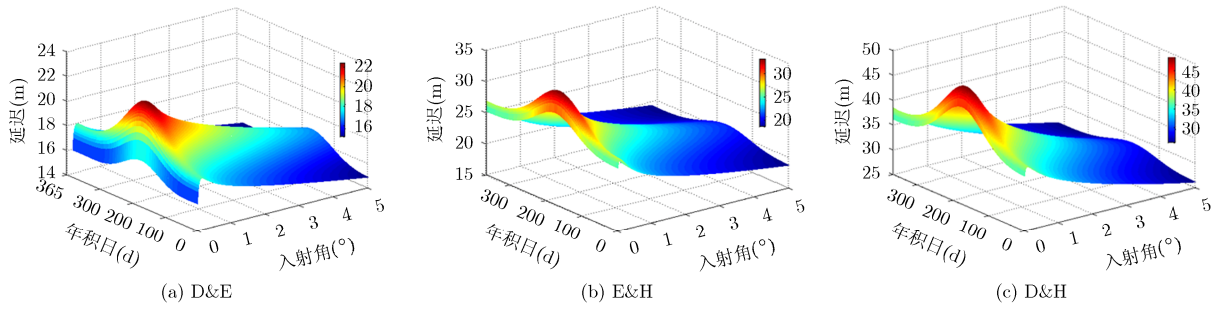


图 4 对流层散射斜延迟

差别，对应的时间延迟也将有所差异。下面对 3 组比对站年平均延迟的变角分布、最大延迟时刻变角分布以及最大延迟入射角全年延迟分布情况展开分析。

如图 5 所示，图 5(a)，图 5(b)，图 5(c) 分别表示年平均变角分布、最大延迟时刻变角分布和最大延迟入射角年延迟分布。分析并比较结果，可以得出以下结论：

(1) 比对站的基线距离是影响两站间对流层延迟的重要因素，基线距离越长，散射延迟越大。从图 5 中 3 组分布图中，可以清晰地看出：D&E 站的延迟值小于 E&H 站，且 D&H 站的延迟值大于 E&H 站。3 组比对站的年平均最大延迟值分别为 19.79 m ( $L=70.06$  km)，28.93 m ( $L=111.90$  km) 和 41.80 m ( $L=155.58$  km)，而全年最大斜延迟为 22.38 m ( $L=70.06$  km)，33.02 m ( $L=111.90$  km) 和 48.37 m ( $L=155.58$  km)，这说明随着比对站基线距离的增大，最大斜延迟呈现递增的趋势。

(2) 散射波束的仰角大小同样影响着比对站间的对流层延迟。从图 5(a)，图 5(b) 中可以看出，3 组比对站的斜延迟分布在大体上随着仰角的增大而降低，且最大斜延迟均出现在  $0^\circ$  附近。在图 5(a) 中，3 组比对站年均最大延迟分别出现在  $0.17^\circ$  (D&E 站)， $0.11^\circ$  (E&H 站) 和  $0.10^\circ$  (D&H 站)；在图 5(b) 中，最大斜延迟对应入射角分别为  $0.19^\circ$

(D&E 站)， $0.12^\circ$  (E&H 站) 和  $0.12^\circ$  (D&H 站)。

(3) 对流层散射斜延迟呈现明显的季节性变化，总体上按夏季偏高、春冬季较低分布。从图 5(c) 中可以看出，3 组比对站最大斜延迟均出现在夏季，而春冬季的斜延迟则偏低，这与夏季温度偏高、大气活动剧烈等因素相关。

(4) 对流层散射信道是时变随参多径信道，在时间信号的双向传输过程中，路径延迟并不能完全抵消，因此，考虑相互抵消 95% 的情况下，散射双向比对最大斜延迟为 1.12 m ( $L=70.06$  km)，1.65 m ( $L=111.90$  km) 和 2.42 m ( $L=155.58$  km)，对应最大时间延迟为 3.73~8.07 ns，符合 TWT<sup>3</sup> 系统的精度要求。

### 5 结论

针对在缺乏气象数据情况下的 TWT<sup>3</sup> 斜延迟实时估计问题，本文设计了一种基于射线描述的低仰角对流层散射斜延迟估计方法。为克服射线描述法中折射率计算受限气象数据的不足，本文结合 UNB3m 模型气象参数公式，建立了对流层大气折射率剖面模型，再结合 8 个 IGS 测站的气象数据，验证了天顶延迟的精度小于 25 mm；然后计算了 3 组基线距离不同的比对站在  $0^\circ \sim 5^\circ$  入射角下全年的斜延迟，证明该斜延迟模型具有以下特点：

(1) 基线距离是影响比对站对流层延迟的重要

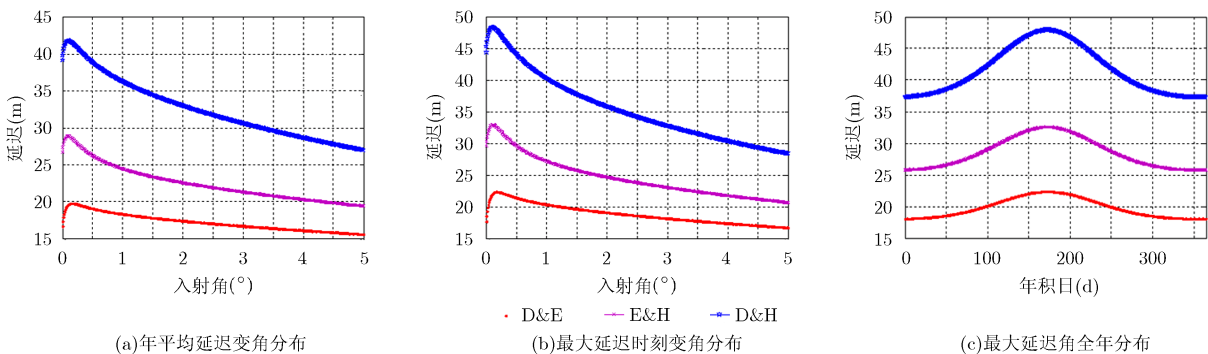


图 5 对流层散射斜延迟

因素, 基线距离越长, 对流层斜延迟越大; (2)最大斜延迟均出现在 $0^\circ$ 附近, 且随着仰角增大, 斜延迟呈现递减趋势; (3)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; (4)3组比对站最大单向传输斜延迟为22.38~48.37 m; 在进行双向时间比对相互抵消95%的情况下, 时间延迟为3.73~8.07 ns。

综上所述, 该方法能实时快速估计在缺乏气象观测资料情景下任意时间地点的TWT<sup>3</sup>斜延迟。该方法计算简便, 对雷达目标跟踪测量、实时定位导航以及低空目标飞行器对流层折射实时修正等方面同样适用, 具有一定的工程实用价值。

### 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: 157-176.
- [2] 康士峰, 张玉生, 王红光. 对流层大气波导[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 154-163.
- [3] 徐松毅, 陈常嘉, 李文铎. 高仰角对流层散射电波传播损耗的一种预计方法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(3): 528-531. doi: 10.13443/j.cjors.2011.03.002.  
XU Songyi, CHEN Changjia, and LI Wenduo. A prediction method of the troposcatter transmission loss with high elevation[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(3): 528-531. doi: 10.13443/j.cjors.2011.03.002.
- [4] 刘强, 孙际哲, 陈西宏, 等. 对流层双向时间比对及其时延误差分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(4): 341-347. doi: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0051.  
LIU Qiang, SUN Jizhe, CHEN Xihong, et al. Analysis of two way troposphere time transfer and its delay errors[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(4): 341-347. doi: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0051.
- [5] 陈西宏, 刘赞, 刘强, 等. 对流层散射双向时间比对中对流层斜延迟估计[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(2): 171-176. doi: 10.11887/j.cn.201602028.  
CHEN Xihong, LIU Zan, LIU Qiang, et al. Tropospheric slant delay estimation in two- way troposphere time transfer[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(2): 171-176. doi: 10.11887/j.cn.201602028.
- [6] 张利军, 张蕊, 赵振维. 对流层散射传播中的偏移损耗分析[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1502-1506. doi: 10.11999/JEIT141233.  
ZHANG Lijun, ZHANG Rui, and ZHAO Zhenwei. Analysis of rotational loss in troposcatter propagation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(6): 1502-1506. doi: 10.11999/JEIT141233.
- [7] CHEN Xihong, LIU Qiang, Hu Denghu, 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 (WiCOM 2014), Beijing, China, 2014: 543-547.
- [8] 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.
- [9] 郭际明, 章迪, 史俊波, 等. 利用射线追踪法分析三种典型对流层映射函数在中国区域的精度[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(2): 182-187. doi: 10.13203/j.whugis.20130096.  
GUO Jiming, ZHANG Di, SHI Junbo, et al. Using ray-tracing to analyse the precision of three classical tropospheric mapping functions in china[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2): 182-187. doi: 10.13203/j.whugis.20130096.
- [10] 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.  
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.
- [11] LEANDRO R, LANGLY R B, and SANTO M. 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.
- [12] SAKIDIN H. Nonhydrostatics UNBab mapping function simplification for tropospheric delay[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 53(12): 710-714. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.093.
- [13] 赵静咏, 宋淑丽, 陈钦明, 等. 基于垂直剖面函数式的全球对流层天顶延迟模型的建立[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3140-3153. doi: 10.6038/cjg20141005.  
ZHAO Jingyang, SONG Shuli, CHEN Qinming, et al. Establishment of a new global model for zenith troposphere delay based on functional expression for its vertical profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3140-3153. doi: 10.6038/cjg20141005.
- [14] DAVID E, MACMILLAN D S, and JOHN M G. Tropospheric delay ray tracing applied in VLBI analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(12): 9156-9170. doi: 10.1002/2014JB011552.
- [15] JOHANNES B, GREGOR M, MICHAEL S, et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 433-441. doi: 10.1007/s10291-014-0403-7.
- [16] 姚宜斌, 曹娜, 许超铃, 等. GPT2模型的精度检验与分析[J].

- 测绘学报, 2015, 44(7): 726-733. doi: 10.11947/j.AGCS.2015.20140356.
- YAO Yibin, CAO Na, XU Chaoqian, *et al.* Accuracy assessment and analysis for GPT2[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(7): 726-733. doi: 10.11947/j.AGCS.2015.20140356.
- [17] 姚宜斌, 张豹, 严凤, 等. 两种精化的对流层延迟改正模型[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1492-1501. doi: 10.6038/cjg20150503.
- YAO Yibin, ZHANG Bao, YAN Feng, *et al.* Two new sophisticated models for tropospheric delay corrections[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1492-1501. doi: 10.6038/cjg20150503.
- [18] Qu W J, Zhu W Y, Song S L, *et al.* Evaluation of the precision of three tropospheric delay correction models[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2008, 32(4): 429-438. doi: 10.1016/j.chinastron.2008.10.010.
- [19] 孙方, 王红光, 康士峰, 等. 大气波导环境下的射线跟踪算法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 179-183. doi: 10.13443/j.cjors.2008.01.019.
- SUN Fang, WANG Hongguang, KANG Shifeng, *et al.* A ray tracing algorithm for duct environment[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(1): 179-183. doi: 10.13443/j.cjors.2008.01.019.
- [20] REZA G F, PETER D, and RICHAID B. A web-based package for ray tracing the natural atmosphere radiometric path delay[J]. *Computer and Geosciences*, 2008, 35(6): 1113-1124. doi: 10.1016/j.cageo.2008.02.027.
- [21] LANDON U, FELIPE G N, and MARCELO C S. Ray-traced slant factors for mitigating the tropospheric delay at the observation level[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(2): 149-160. doi: 10.1007/s00190-011-0503-x.
- 吴文溢: 男, 1993年生, 助理工程师, 从事高精度时间同步技术研究.
- 陈西宏: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信息与控制技术的研究.