

文章编号: 1001-2486(2010)03-0027-06

空间预警视线系统误差对弹道导弹预警精度估计分析与研究*

强胜¹, 申镇¹, 程洪玮², 易东云¹

(1. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 在空间预警系统中, 为了降低系统预警精度受视线测量系统误差的影响, 必须对仪器进行定标, 因此需要深入对视线误差进行讨论。本文在对视线误差深入研究的基础上, 从理论上讨论了视线误差对发射点、射向、落点估计结果的影响, 得出系统误差变化率是影响预警结果的重要因素之一, 并针对常值系统误差、线性系统误差以及周期系统误差进行了相应的预警仿真计算, 从而为几何定标方案的确定提供支持。

关键词: 视线; 系统误差; 预警**中图分类号:** TJ86 **文献标识码:** A

Precision Analysis of Early Warning System Influenced by Space-based LOS Measurement Error

QIANG Sheng¹, SHEN Zhen¹, CHENG Hong-wei², YI Dong-yun¹

(1. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to reduce influence on early warning results caused by the system error in the early warning system, the calibration to the instrument must be carried on. So it is necessary to discuss the line of sight measuring error farther. This article theoretically discussed the sight error influence on early warning results, including trajectory launch point, trajectory course, and trajectory falling point, and found that the most important influence factor was frequency change. Based on the constant error, linearity error and periodicity error, the corresponding simulation was given to provide the support for the geometry calibration plan.

Key words: line of sight (LOS); system error; early warning

空间预警系统是完整弹道导弹防御体系中不可缺少的一环^[1-3], 而视线测量误差的分析和研究作为精度分析的关键一环, 将直接影响系统的预警精度。为了降低视线测量误差对系统预警精度的影响, 必须对仪器进行定标, 因此深入研究 LOS (Line of Sight, 视线) 系统误差如何影响预警结果是十分有意义的。

目前, 国内外关于视线测量误差分析方面的文献很少, 而且在弹道导弹预警仿真计算时^[4-5], 通常考虑随机误差, 而对于系统误差则考虑常值误差, 显然这是远远不够的。因此, 本文在对视线误差进行深入研究的基础上, 从理论上分析了视线误差对预警结果的影响, 并给出了相应的计算仿真, 为几何定标方案的确定提供支持。

1 LOS 误差的构建

预警卫星包含航天器和探测器 (有效载荷), 尾部有太阳能帆板可提供电力。因此, 影响视线测量精度因素主要来自于卫星位置和卫星姿态误差以及探测器自身的误差。

若从卫星观测平台出发, 则要针对不同的传感器建立不同的误差参数和误差模型来计算测角误差, 其计算分析结果不具有共性, 而且过程复杂^[6-7], 但是, 无论采用何种传感器模型, 这些误差归根结底可以看成是 LOS 上的误差, 因此, 本文从 LOS 误差出发直接产生测角误差, 从理论上考察 LOS 系统误差对

* 收稿日期: 2009-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60974124); 航天支撑技术基金项目 (GFKD-HT-2006-2)

作者简介: 强胜 (1982-), 男, 博士生。

预警结果估计的影响,并针对 LOS 常值系统误差、线性漂移误差和周期漂移误差 3 种典型的误差模型进行了仿真计算,这对于整个预警系统的定标工作是十分有意义的。

1.1 LOS 坐标系

为了更好地刻画 LOS 误差,下面建立相应的 LOS 坐标系^[8]。

原点在目标真实位置, Z 轴沿 LOS 矢量指向卫星的质心, X 轴, Y 轴取向如下: 在测量坐标系下, 设 LOS 单位矢量为 $e_3 = (e_{31}, e_{32}, e_{33})^T$, 可采用以下的方式来确定 e_1, e_2 。取 e_3 与 y_c 方向 $(0, 1, 0)$ 作向量叉乘, 即

$$e_1 = \left(e_{31}, e_{32}, e_{33} \right)^T \leftarrow \left(0, 1, 0 \right)^T = \left(-e_{33}, 0, e_{31} \right)^T \quad (1)$$

进行归一化有

$$e_1 = \left[-e_{33} / \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} \quad 0 \quad e_{31} / \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} \right]^T \quad (2)$$

若 $e_3 \neq (0, 1, 0)^T$, 利用式(1)就可以唯一构造出 e_1 ; 由右手法则确定 e_2 为

$$e_2 = e_3 \leftarrow e_1 = \left(e_{31} e_{32} / \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} - \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} \quad e_{32} e_{33} / \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} \right)^T \quad (3)$$

若 $e_3 = (0, 1, 0)^T$, 则取 $e_1 = (0, 0, 1)^T, e_2 = (1, 0, 0)^T$ 。

1.2 LOS 坐标系转换

设 LOS 坐标系原点在测量坐标系下的坐标为: (x_0, y_0, z_0) , 则 LOS 坐标系到测量坐标系的转换关系为

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}^T + A^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} -e_{33} / \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} & 0 & e_{31} / \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} \\ e_{31} e_{32} / \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} & -\sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} & e_{32} e_{33} / \sqrt{e_{31}^2 + e_{33}^2} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \circ$$

由于 LOS 是一个二维指向, 则可以认为 $\Delta z = 0$, 因此 LOS 误差是由 $\Delta x, \Delta y$ 来刻画, 其中 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 表示 LOS 坐标系下的坐标误差。

下面考察测量坐标系与地心坐标系之间的关系, 设目标点在地心坐标系与测量坐标系下的位置参数分别为 $X_d = (x_d, y_d, z_d)^T, X_c = (x_c, y_c, z_c)^T$; 速度参数分别为 $X_{\dot{d}} = (x_{\dot{d}}, y_{\dot{d}}, z_{\dot{d}})^T, X_{\dot{c}} = (x_{\dot{c}}, y_{\dot{c}}, z_{\dot{c}})^T$ 。测量坐标系原点在地球直角坐标系的坐标为 $X_{d0} = (x_{d0}, y_{d0}, z_{d0})^T$, 天文经度、纬度为 λ_0, φ_0 , 则地心直角坐标系与测量坐标系的转换关系为^[9-10]

$$\begin{cases} X_d = X_{d0} + R_z\left(\frac{\pi}{2} - \lambda_0\right) R_x(-\varphi_0) R_y\left(\frac{\pi}{2}\right) X_c \\ X_{\dot{d}} = R_z\left(\frac{\pi}{2} - \lambda_0\right) R_x(-\varphi_0) R_y\left(\frac{\pi}{2}\right) X_{\dot{c}} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $R_x(\gamma), R_y(\gamma), R_z(\gamma)$ 分别为绕 x 轴、 y 轴、 z 轴正向旋转 γ (弧度) 角的旋转矩阵, 即

$$R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}, \quad R_y(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix}, \quad R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

注意到, 当测到的测量坐标系位置有误差, 即 $X_{d0}, \lambda_0, \varphi_0$ 有误差时, 则目标点的位置从测量坐标系转换到地心直角坐标系时会有误差, 这就是卫星位置不准对弹道估计的影响。

2 LOS 系统误差对预警结果的影响

对于空间导弹预警系统来说, 预警结果主要包括发射点、射向、落点的预警, 由于射向主要是由发射点和落点所决定的, 因此下面就针对发射点和落点预警结果进行分析。

2.1 LOS 系统误差对落点预警的影响

首先对落点预警结果进行分析, 需要找出影响落点估计精度的主要因素。

导弹的总射程可以写成: $L = L_P + L_K$, 其中, L_P 是被动段的射程、 L_K 是主动段的射程。 L_P 占弹道 90% 以上, 它的估计精度直接关系到全弹道的精度。

导弹被动段是做抛体运动, 飞行轨迹极坐标方程式为^[11]

$$r = V_k^2 \cos^2 \vartheta_k / (\Pi_0 - \Pi_0 \sqrt{(1 - V_k^2 / \Pi_0)^2 \cos^2 \vartheta_k + \sin^2 \vartheta_k \cos(\vartheta_k - \vartheta_{B})}) \quad (6)$$

式中, ϑ_B 为确定焦点轴位置的角度, (V_k, ϑ_k, h_k) 分别为导弹关机点处的速度大小、速度方向与当地水平面的夹角以及所处的高程, $\Pi_0 = 3.98 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ 。

因此, 弹道被动段的运动轨迹是由 (V_k, ϑ_k, h_k) 唯一决定的。由 (6) 式可以计算出导弹被动段射程 L_P , 即 (7) 式。

$$L_P = 2R \arctan((b + \sqrt{b^2 + ac})/a) \quad (7)$$

其中 $a = 2R(1 + \tan^2 \vartheta_k) - (2R + h_k)v_k$, $b = v_k R \tan \vartheta_k$, $c = v_k h_k$, $v_k = V_k(R + h_k)/\Pi_0$ 。

分别对 (7) 式中 V_k, h_k, ϑ_k 求偏导数可得

$$\begin{cases} \frac{\partial L_P}{\partial V_k} = \frac{4R^2 \sin^2(\beta_T/2)}{(R \tan \vartheta_k + h_k \cot(\beta_T/2)) v_k \cos^2 \vartheta_k V_k} \\ \frac{\partial L_P}{\partial h_k} = \frac{R(R + h_k) v_k \cos^2 \vartheta_k + 2R \sin^2(\beta_T/2)}{(R \tan \vartheta_k + h_k \cot(\beta_T/2))(R + h_k) v_k \cos^2 \vartheta_k} \\ \frac{\partial L_P}{\partial \vartheta_k} = \frac{R^2 \sin \beta_T (v_k - 2 \tan \vartheta_k \tan(\beta_T/2))}{(R \tan \vartheta_k + h_k \cot(\beta_T/2)) v_k \cos^2 \vartheta_k} \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\tan(\beta_T/2) = (b + \sqrt{b^2 + ac})/a$ 。

根据文献 [11] 中大量关机点参数统计数据可知, 关机点的速度大小估计误差对导弹被动段射程误差影响至少可达 1: 1200, 即 1m/s 的关机点速度误差一般能造成至少 1200m 的落点误差; 关机点的速度方向估计误差对导弹被动段射程误差影响至少可达 1: 800; 而关机点的高程估计误差对导弹被动段射程误差影响最多只有 1: 5。因此, 射程的精度主要取决关机点的速度估计误差。

下面讨论 LOS 误差对关机点速度估计的影响。

对 (4) 式求导可得

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^T + A^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}^T + \frac{d}{dt} (A^{-1}) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

由于 A 是标准正交矩阵, 则有 $A^{-1} = A^T$ 。考虑到卫星与目标的距离远大于目标在单位时间内飞行的距离, 并通过计算可知 $\frac{d}{dt} (A^{-1}) = \frac{d}{dt} (A^T) \approx 0$, 于是 (9) 式可以简化为 (10) 式。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}^T \approx \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}^T + A^T \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

由 (5) 和 (10) 式可知, 目标速度的估计误差主要是由卫星平台的定轨误差以及 LOS 误差的变化率决定的。由于观测卫星是合作目标, 定轨误差 $\Delta \lambda_0, \Delta \varphi_0$ 一般会很小, 故 $R_x(-\varphi_0 - \Delta \varphi_0) \approx R_x(-\varphi_0)$, $R_z(\vartheta_0 - \Delta \vartheta_0) \approx R_z(\vartheta_0)$ 。因此, 目标速度的估计误差主要是由 LOS 误差的变化率决定的。

(1) 若 LOS 误差是常值时, 即有 $\Delta x \geq 0, \Delta y \geq 0$, 则由 (5) 和 (10) 式可知 LOS 常值系统误差对导弹关机点的速度估计没有影响, 因此对落点预警影响不大。

(2) 若 LOS 误差是线性漂移误差时, 即模型为 $\Delta x = k_x t + \Delta x_0, \Delta y = k_y t + \Delta y_0$, 则由 (5) 和 (10) 式可知 LOS 线性系统误差对导弹关机点的速度估计受到线性漂移误差的斜率 k_x, k_y 影响。

(3) 若 LOS 误差是周期漂移误差时, 即模型为 $\Delta x = c_x \sin(a_x t + b_x), \Delta y = c_y \sin(a_y t + b_y)$, 则由 (5) 和 (10) 式可知 LOS 系统误差对导弹关机点速度的估计受到周期漂移误差导数在关机点时刻大小的影响, 由 $a_x c_x \cos(a_x t + b_x), a_y c_y \cos(a_y t + b_y)$ 在 $t = t_{\max}$ 的数值所决定。

2.2 LOS 系统误差对发射点预警的影响

采用最小二乘拟合弹道曲线, 再外推曲线于大地相交, 把交点确定为发射原点的估计值。

在使用二阶多项式来拟合时,为保证足够高的拟合精度,并不利用全部的数据,而是采用“节点”优选的方法,即将 $M+1$ 个弹道数据依次分成 S 份,每份的数据个数为 $n_i (i=1, 2, \dots, S)$, $\sum_{i=1}^S n_i = M+1$ 。

对第 i 份数据, x 轴、 y 轴、 z 轴方向的数据分别用二阶多项式 $a_{xi} + b_{xi}t + c_{xi}t^2$, $a_{yi} + b_{yi}t + c_{yi}t^2$, $a_{zi} + b_{zi}t + c_{zi}t^2$ 来拟合。其各自的均方差为: $V(a_{xi}, b_{xi}, c_{xi}) = \sum_{k=1}^{n_i} (x_d(t_k) - (a_{xi} + b_{xi}t_k + c_{xi}t_k^2))^2 / n_i$, $V(a_{yi}, b_{yi}, c_{yi}) = \sum_{k=1}^{n_i} (y_d(t_k) - (a_{yi} + b_{yi}t_k + c_{yi}t_k^2))^2 / n_i$, $V(a_{zi}, b_{zi}, c_{zi}) = \sum_{k=1}^{n_i} (z_d(t_k) - (a_{zi} + b_{zi}t_k + c_{zi}t_k^2))^2 / n_i$ 。

那么总的均方差为: $V = \sum_{i=1}^S [V(a_{xi}, b_{xi}, c_{xi}) + V(a_{yi}, b_{yi}, c_{yi}) + V(a_{zi}, b_{zi}, c_{zi})]$ 。选取满足 $\min V$ 的节点

和二阶多项式,把 $a_{x1} + b_{x1}t + c_{x1}t^2$, $a_{y1} + b_{y1}t + c_{y1}t^2$, $a_{z1} + b_{z1}t + c_{z1}t^2$ 作为首次观测后 n_1 个数据的最小二乘多项式曲线函数,相应的拟合系数可由(11)式计算得到。

$$\begin{pmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ b_{x1} & b_{y1} & b_{z1} \\ c_{x1} & c_{y1} & c_{z1} \end{pmatrix} = \left(Q^T Q \right)^{-1} Q^T \begin{pmatrix} x_d(t_1) + \Delta x_d(t_1) & y_d(t_1) + \Delta y_d(t_1) & z_d(t_1) + \Delta z_d(t_1) \\ x_d(t_2) + \Delta x_d(t_2) & y_d(t_2) + \Delta y_d(t_2) & z_d(t_2) + \Delta z_d(t_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ x_d(t_{n_1}) + \Delta x_d(t_{n_1}) & y_d(t_{n_1}) + \Delta y_d(t_{n_1}) & z_d(t_{n_1}) + \Delta z_d(t_{n_1}) \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中 $Q = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_{n_1} & t_{n_1}^2 \end{pmatrix}$, $\{x_d(t_i), y_d(t_i), z_d(t_i)\}_{i=1, \dots, n_1}$ 和 $\{\Delta x_d(t_i), \Delta y_d(t_i), \Delta z_d(t_i)\}_{i=1, \dots, n_1}$ 分别表示 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上第 i 个数据值和相应的误差。

将它与地球椭球方程 $x^2/a^2 + y^2/a^2 + z^2/(a^2(1-e^2)) = 1$ 联合求解,得到交点 (x_0, y_0, z_0) 和交点处的时间参数 t_{js} ,将交点换算为大地坐标,就是我们发射原点参数的大地坐标的近似估计。

由(4)、(5)和(11)式可知,在不考虑外推计算发射点带来的模型误差时,拟合系数 (a_{x1}, a_{y1}, a_{z1}) 、 (b_{x1}, b_{y1}, b_{z1}) 、 (c_{x1}, c_{y1}, c_{z1}) 的误差由 LOS 误差 $(\Delta x, \Delta y)$ 决定,因此可以认为发射点估计精度主要是由这些点上的 LOS 误差所决定。

3 仿真算例分析

3.1 仿真场景

为了验证 LOS 视线误差对预警结果的影响,我们对某仿真的弹道导弹(采用导弹设计原理生成弹道^[11])进行仿真计算,采用蒙特卡洛方法统计 200 次。

采用两颗地球同步预警卫星对目标进行观测,其中假设 LOS 视线随机误差为 $3\mu\text{rad}$,对导弹预警过程采用蒙特卡洛方法,统计 50 次,由于预警结果存在系统偏差,因此采用均方根差表述预警精度。

以下分别讨论 LOS 系统误差为常值系统误差、线性漂移误差和周期漂移误差三种情况对预警结果的影响,其中线性漂移误差模型为 $(\Delta x, \Delta y)^T = (k_x(t-T_0), k_y(t-T_0))^T$,周期漂移误差为 $(\Delta x, \Delta y)^T = (c_x \sin(a_x(t-T_0)), c_y \sin(a_y(t-T_0)))^T$, t 为导弹目标飞行的时间, T_0 为观测系统上次的定标时间,不失一般性,可以假设导弹目标被卫星首次捕获时间为系统的定标时间。

3.2 系统误差对预警结果的影响分析

考虑到 LOS 视线是一个二维指向数据,因此这里分别从东西向和南北向设置 LOS 系统误差,其中东西向偏差表示 LOS 坐标系 X 轴方向的角度偏差,南北向偏差表示 LOS 坐标系 Y 轴方向的角度偏差,如表 1 所示。

表 1 LOS 系统误差设置表
Tab. 1 Set table of system error

系统误差	常值		线性		周期			
数值	东西向偏差	南北向偏差	东西向斜率	南北向斜率	东西向周期	东西向振幅	南北向周期	南北向振幅
设置	5(μrad)	5(μrad)	2($\mu\text{rad}/\text{s}$)	2($\mu\text{rad}/\text{s}$)	8(s)	5(μrad)	8(s)	5(μrad)

为了更好地表现观测角度对预警结果的影响, 对在该地点进行的导弹发射进行 360° 的射向循环, 即考察定标对不同射向弹道的预警精度提高情况。

通过定标后, 对于不同射向的预警结果的精度得到了较大幅度的提高, 如图 1(极坐标)所示, 其中发射点估计精度提高了约 40% ~ 60%, 射向估计精度提高了约 60% ~ 70%, 落点估计精度提高了约 40% ~ 60%。此外, 对于观测角度较差的情况, LOS 系统误差对预警结果的影响较大, 而定标可以减小这种影响。

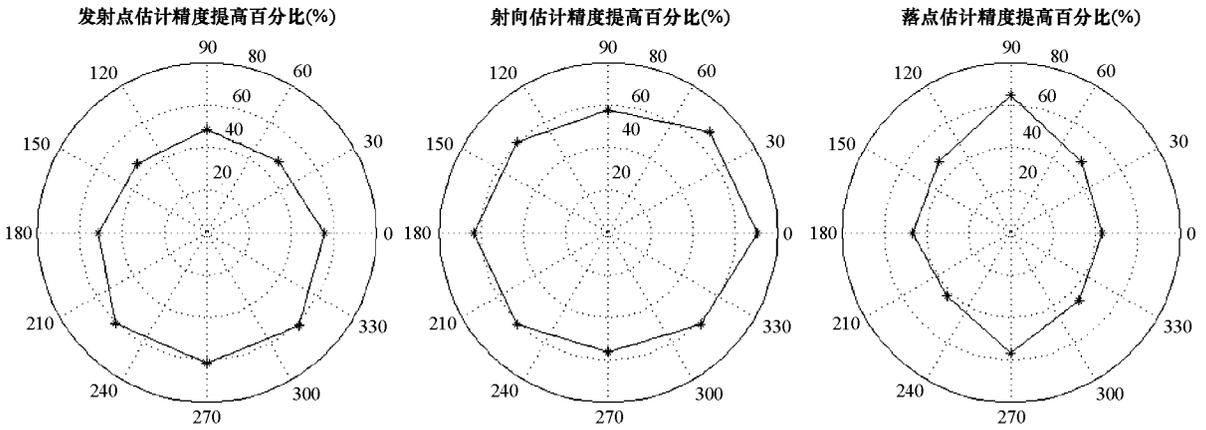


图 1 不同射向对定标后的预警估计精度提高百分比
Fig. 1 The early warning result of different launch direction trajectory

3.3 系统误差敏感度分析结果

对于 LOS 系统误差为常值系统误差的情况, 计算结果见图 2。其中系统误差分别从 $-8\mu\text{rad}$ 增加到 $8\mu\text{rad}$, 其余设置和 3.1 节中相同。对于 LOS 系统误差为线性漂移误差的情况, 计算结果见图 3。其中系统误差的斜率分别从 $-3\mu\text{rad}/\text{s}$ 增加到 $3\mu\text{rad}/\text{s}$, 其余设置和 3.1 节中相同。

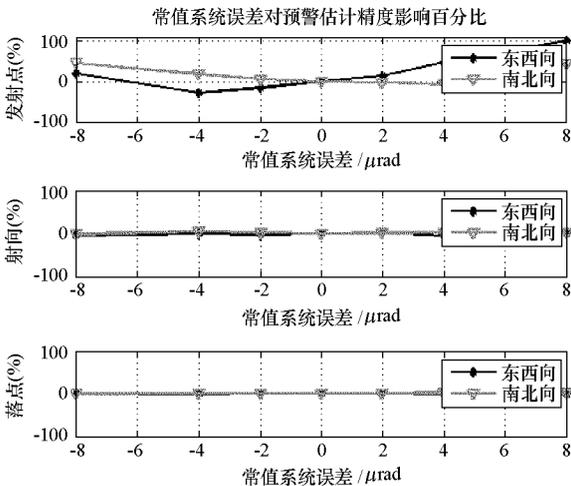


图 2 常值系统误差对预警估计精度影响百分比
Fig. 2 The early warning result of constant system error

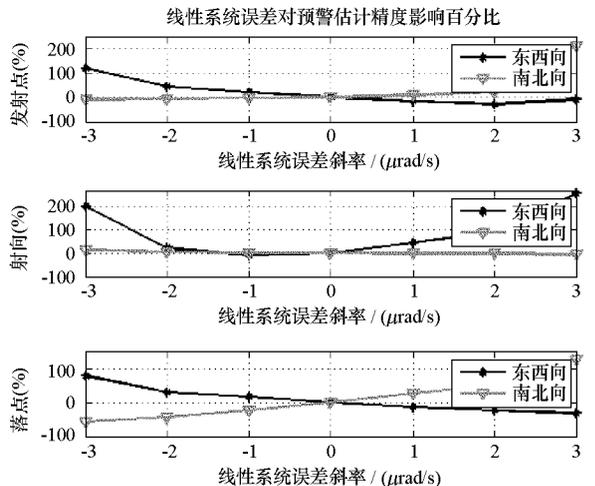


图 3 线性系统误差对预警估计精度影响百分比
Fig. 3 The early warning result of linearity system error

从图2可以看出, LOS常值系统误差对射向预警、落点预警影响不大,而对于发射点预警, LOS系统误差越大,对发射点估计影响越大。因此常值误差的定标工作主要是基于对发射点误差考虑的基础上进行的。从图3可以看出, LOS线性漂移误差对预警结果的影响主要受斜率大小的影响。斜率越小,线性漂移误差越趋向于常值系统误差(相对导弹飞行时间而言),斜率越大,对预警结果影响越大。因此,对于LOS系统误差为线性时的定标工作,主要是降低斜率的影响。

对于LOS系统误差为周期漂移误差的情况,计算结果见表2。其中系统误差的周期分别从4s增加到64s,其余设置和3.1节中相同。

LOS周期漂移误差对预警结果的影响情况是十分复杂的,从表2可以看出,在该仿真算例的观测角度中,南北向LOS系统误差对预警结果影响更为敏感,而导弹在被卫星捕获后主动段飞行了约64s,对于周期为64s的LOS周期系统误差来说,此时在关机点附近LOS视线误差变化剧烈,从而导致落点预警精度变差,而对于小周期的系统误差,由于采样率较低,其变化率不足以表现出来。事实上,如果将采样率进一步提高,落点预警精度受LOS系统误差将更为敏感,此时对于周期为64s的LOS误差,落点预警估计误差将增加约6倍之多。

通过3.3节对系统误差敏感度仿真分析可以看出,这些仿真结果与理论分析是相一致的。同时也注意到由于预警算法中存在着一一定的系统偏差,因此当存在某些特定方向的LOS系统误差时,可能会修正这种偏差,从而使预警精度有所提高。

通过3.3节对系统误差敏感度仿真分析可以看出,这些仿真结果与理论分析是相一致的。同时也注意到由于预警算法中存在着一一定的系统偏差,因此当存在某些特定方向的LOS系统误差时,可能会修正这种偏差,从而使预警精度有所提高。

4 结束语

在空间预警系统中,深入地分析和研究视线测量误差尤其是系统误差如何影响预警精度是十分重要的。本文就是在对视线误差进行深入研究的基础上,从理论上讨论了视线误差对预警结果的影响,并给出了相应的仿真算例,得出落点误差主要受到视线误差在关机点附近变化率的影响,而发射点误差主要受到早期视线误差的影响,从而为几何定标方案的确定提供支持。

参考文献:

- [1] Benavoj A, Chisci L, Farina A. Tracking of a Ballistic Missile with A-priori Information [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1000-1016.
- [2] Jayant S. Space Surveillance with The Space-based Visible Sensor[R]. MIT Lincoln Laboratory, 2000: 1-5.
- [3] Jayant S, Grant H S, et al. Toward Operational Space-based Space Surveillance [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13(2): 309-313.
- [4] Beaulieu M. Launch Detection Satellite System Engineering Error Analysis [D]. Naval Postgraduate School, California, 1996.
- [5] Danis N J. Space-based Tactical Ballistic Missile Launch Parameter Estimation [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Apr. 1993, 29(2): 413-424.
- [6] 张萍,童丽,吴翊,等.空间预警系统的视线测量误差建模[J].中国空间科学技术,2003,6:14-20.
- [7] 张萍,易东云,吴翊,等.红外扫描相机的视线测量误差分析与建模[J].红外技术,2003,25(6):14-17.
- [8] Rudd J G, et al. Surveillance and Tracking of Ballistic Missile Launches [J]. IBM Journal of Research and Development, 1994, 38(2): 195-216.
- [9] 王正明.弹道跟踪数据的校准与评估[M].长沙:国防科技大学出版社,1999:3.
- [10] 章仁为.静止卫星的轨道和姿态控制[M].北京:科学出版社,1987.
- [11] 科普托夫.弹道式导弹设计和试验[M].北京:国防工业出版社,1970.
- [12] 张金槐.远程火箭精度分析与评估[M].长沙:国防科技大学出版社,1995.
- [13] 李英良,易东云,吴翊.单星观测条件下弹道主动段估计的一种新方法[J].弹道学报,2003,15(3):42-48.
- [14] 袁伟,金学军.双星定位的三参数方法及其精度分析[J].中国空间科学技术,2003,23(5):22-27.

表2 周期LOS系统误差对预警估计精度影响百分比

Tab.2 The early warning result of periods system error

周期(s)		4	8	16	32	64
发射点(%)	东西向	0.2	5.7	9.8	16.3	14.9
	南北向	-0.6	25.3	43.5	130.4	214.8
预警结果	射向(%)	-2.0	-3.6	-5.4	-13.1	1.1
	南北向	1.1	88.8	52.3	240.6	477.8
落点(%)	东西向	-0.5	-25.2	-20.4	-34.2	23.8
	南北向	-0.9	18.1	31.8	113.5	215.8