

文章编号: 1001- 2486(2009) 06- 0110- 05

基于星载干涉仪测向的辐射源定位综合算法*

刘海军, 叶浩欢, 柳 征, 周一宇

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对卫星多次观测定位点的估计问题, 提出一种不依赖于先验知识的定位点综合算法。该算法首先分析了星载干涉仪测向体制的定位精度, 并基于此提出利用定位误差协方差矩阵对定位点进行加权综合的方法。仿真实验表明本文方法可以提高定位精度。

关键词: 无源定位; 综合; 加权法; 相位干涉仪; 辐射源

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

Integration Algorithm of Emitter Location Based on Satellite-borne Interferometer

LIU Hai-jun, YE Hao-huan, LIU Zheng, ZHOU Yi-yu

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To deal with the location estimation problem in many observations by the satellite-borne interferometer, this paper presents a new location integration algorithm, which is independent of any prior knowledge. First, it analyzes the location precision of the satellite-borne interferometer. On the basis of this, it presents an integration algorithm of emitter loci by using the location errors covariance matrix as weights. Simulation results show that the location precision can be improved by using the new method.

Key words: passive location; integration; weighted method; phase interferometer; emitter

星载干涉仪测向体制的定位系统, 具有成本低、周期短、技术相对简单和工程上易于实现的优点, 并且作用距离远、不易被发现, 无论是在军用还是民用方面都具有重要的研究和应用价值^[1-2], 因此受到国内外很多学者的广泛关注。

文献[1-2]详细讨论了测向定位的基本原理, 方法和定位误差分析。文献[3]分析了星载相位干涉仪测向定位中各种因素对定位精度的影响。文献[4]针对单站无源定位系统及时定位的需求, 提出了一种基于长短基线干涉仪的无源定位系统设计方案。文献[5]通过计算估计误差的偏差和协方差来分析极大似然 ML(maximum likelihood)估计和 Stamfield 估计器的性能。文献[6]在二维平面内讨论了 GDOP(Geometrical Dilution of Precision)分布情况。文献[7]研究了相位干涉仪测向体制下星载无源定位系统测向误差对定位精度的影响。虽然很多文献在定位算法的改进及定位的精度分析中取得了许多研究成果, 但对卫星多次观测定位点的融合研究却少有涉及。实际应用中, 卫星对同一地面目标(本文主要指静止目标)进行侦察时有一段持续时间, 期间可能会产生几百个定位结果, 这种情况下, 为了提高最终的位置估计精度, 除了提高单次定位的精度之外, 还需要对全部的定位结果进行融合处理。文献[8]考虑了角度测量的不确定性对定位结果的影响, 比较了最小二乘法与 Kalman 滤波方法的性能。但是在采用加权最小二乘法时, 由于卫星侦察过程中定位误差是时变的, 权矩阵的构造是一个难点。若采用 Kalman 滤波方法则面临初始值选取、时变误差、不连续观测等一系列问题。工程上普遍采用对侦察定位点求平均值的方法, 但这种方法忽略了卫星飞行过程中雷达所处位置定位误差分布不断变化的特点。针对上述问题, 本文重点研究星载干涉仪测向体制的辐射源定位综合算法。

* 收稿日期: 2009- 05- 19

作者简介: 刘海军(1982—), 男, 博士生。

1 问题描述

1.1 单点定位模型

假设卫星和辐射源的大地直角坐标^[9]分别为 $S(x_s, y_s, z_s)$ 和 $T(x_t, y_t, z_t)$, 在大地直角坐标系下, 卫星辐射源矢量 ST 的参数方程可表示为

$$\begin{cases} x_t = x_s + l \cdot r \\ y_t = y_s + m \cdot r \\ z_t = z_s + n \cdot r \end{cases} \quad (1)$$

其中, r 为卫星到辐射源的距离, l, m, n 分别为 L 的三个方向余弦, L 为卫星辐射源矢量在与大地直角坐标系^[9]平行并以卫星为原点的坐标系中的单位方向余弦矢量。假设地面目标高程为零, 则目标所在椭球面方程为

$$\frac{x_t^2}{a^2} + \frac{y_t^2}{a^2} + \frac{z_t^2}{a^2(1-e^2)} = 1 \quad (2)$$

a 为地球半长轴, e 为地球第一偏心率。对式(1)、(2)联立可得辐射源的位置 $T(x_t, y_t, z_t)$ 。

1.2 平均权值综合方法的局限性

假设卫星在飞行过程中对某一辐射源目标进行 n 次量测, 得到 n 个定位点 $Loc_i(x_{ti}, y_{ti})$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 为了得到最终的定位点估计, 需要对这 n 个定位点进行综合, 工程中一般采用基于平均权值的综合方法, 即

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_t \\ \hat{y}_t \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \left(\begin{bmatrix} x_{t1} \\ y_{t1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{t2} \\ y_{t2} \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} x_{tn} \\ y_{tn} \end{bmatrix} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} x_{ti} \\ y_{ti} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, (\hat{x}_t, \hat{y}_t) 为真实定位点的估计值。式(3)中的加权综合方法简单易行, 但忽略了卫星侦察过程中辐射源所处位置定位误差分布不断变化的特点(这种变化主要是由辐射源与卫星星下点之间的距离远近造成的), 在加权过程中采用统计平均的方式, 容易使综合后的定位精度变差。

2 定位点综合算法

2.1 定位精度分析

假设在大地直角坐标系($Oe-xyz$)下, 卫星 S 的位置矢量为 $X_s = [x_s \ y_s \ z_s]^T$, 辐射源 T 的位置矢量为 $X_t = [x_t \ y_t \ z_t]^T$, 则卫星辐射源矢量可表示为 $ST_e = [x_t - x_s \ y_t - y_s \ z_t - z_s]^T$, 在星体坐标系($Ob-xyz$)^[2,9]下, 卫星辐射源矢量表示为 $ST_b = [x_b \ y_b \ z_b]^T$ 。在卫星视场范围内, 若忽略地球曲率的影响, 定位误差平面可以用卫星星下点 $X_o = [x_o \ y_o \ z_o]^T$ 处的切平面来近似^[7], 则

$$ST_b = Q \cdot X'_t + S \quad (4)$$

式中, $X'_t = [x_t \ y_t]^T$ 表示大地直角坐标系下辐射源在二维平面内的坐标, S 为与 X_s 有关的矩阵, 并且

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 - x_o \cdot q_3 \cdot E/z_o & q_2 - y_o \cdot q_3 \cdot E/z_o \\ q_4 - x_o \cdot q_6 \cdot E/z_o & q_5 - y_o \cdot q_6 \cdot E/z_o \\ q_7 - x_o \cdot q_9 \cdot E/z_o & q_8 - y_o \cdot q_9 \cdot E/z_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $E = 1 - e^2$, q_i ($i = 1, \dots, 9$) 为坐标旋转矩阵 $A \cdot C$ 中的元素^[7], 令 $c = \cos \beta_x$, $d = \cos \beta_y$, $U = [c \ d]^T$, 且 $U = f(ST_b)$, 计算 Jacobi 矩阵, 得到

$$J = \frac{\partial U}{\partial X'_t} = \frac{\partial f(ST_b)}{\partial ST_b} \cdot \frac{\partial ST_b}{\partial X'_t} \quad (6)$$

则 U 的误差项为

$$dU = d[\cos \beta_x \ \cos \beta_y]^T = \frac{1}{2\pi n} [d\Phi_x \ d\Phi_y]^T \quad (7)$$

假设相位差 Φ_x 和 Φ_y 独立测量, 误差分别为 δ_{Φ_x} 和 δ_{Φ_y} , 误差之间相互独立且是零均值的, 方差分别为 $\sigma_{\Phi_x}^2$ 和 $\sigma_{\Phi_y}^2$, 则 U 的误差协方差矩阵 P_U 及 X'_t 的误差协方差矩阵 $P_{X'_t}$ 分别为

$$P_U = E[dU \cdot dU^T] = \frac{1}{(2\pi n)^2} \text{diag} \left[\sigma_{\Phi_x}^2, \sigma_{\Phi_y}^2 \right] \quad (8)$$

$$P_{X'_t} = E[dX'_t \cdot dX'^T_t] = J^{-1} \cdot P_U \cdot (J^{-1})^T \quad (9)$$

若 $\sigma_{\Phi_x}^2 = \sigma_{\Phi_y}^2 = \sigma^2$, 则

$$P_{X'_t} = E[dX'_t \cdot dX'^T_t] = J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (J^{-1})^T \cdot \frac{\sigma^2}{4\pi^2 n^2} \quad (10)$$

由于 J 只与卫星位置以及目标位置有关, 所以, $P_{X'_t}$ 表示成了相位差测量误差 σ^2 的线性乘积的形式。

2.2 基于误差协方差矩阵的权值确定方法

若要对不同时刻的多个定位点进行综合处理, 就需要按定位误差的大小进行加权。由于卫星对同一目标的侦察过顶时间较短, 可以认为在侦察时段内不同时刻的测量噪声相同, 根据式(10)可知, 不同定位点所对应的定位误差协方差之比与测量噪声大小无关。因此, 对各定位点进行加权综合处理时, 权值应该是与具体的测量噪声无关、而只与卫星和辐射源的位置有关的量。

设目标真实位置坐标为 $Z_t = [x_t, y_t]^T$, 不同时刻独立观测的定位点坐标为 $Z_{ti} = [x_{ti}, y_{ti}]^T$ ($i = 1, \dots, n$), 且 Z_{ti} 服从均值为 Z_t 、协方差为 P_i 的二元高斯分布。综合公式为

$$\hat{Z}_t = \sum_{i=1}^n A_i Z_{ti} \quad (11)$$

A_i 为 2×2 矩阵。令 $A = [A_1, A_2, \dots, A_n]^T$, $Z = [Z_{t1}^T, Z_{t2}^T, \dots, Z_{tn}^T]^T$, 则式(11)可以表示为: $\hat{Z}_t = A^T Z$ 。其误差协方差矩阵为:

$$C_{\hat{Z}_t} = E \left\{ [A^T Z - A^T E(Z)]^2 \right\} = A^T P A \quad (12)$$

式中, $P = \text{diag}(P_1, P_2, \dots, P_n)_{2n \times 2n}$ 。为了使 $\text{tr}(C_{\hat{Z}_t}) \rightarrow \min$, 令 $A_i = [B_i \ C_i]^T$, B_i, C_i 是 1×2 的矢量, 则

$$\text{tr}(C_{\hat{Z}_t}) = C_{\hat{Z}_t}(1, 1) + C_{\hat{Z}_t}(2, 2) = B P B^T + C P C^T \quad (13)$$

其中, $B = [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_n]$, $C = [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_n]$ 。由于 $E(Z_{ti}) = I_{2 \times 2} Z_t$, 则

$$\sum_{i=1}^n A_i I_{2 \times 2} = I_{2 \times 2} \quad (14)$$

令 $S = [S_1, S_2]$, 其中:

$$S_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0]^T, \quad S_2 = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ \dots \ 0 \ 1]^T \quad (15)$$

则

$$A^T S = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} [S_1 \ S_2] = I_{2 \times 2} \Rightarrow \begin{cases} B S_1 = 1, & B S_2 = 0 \\ C S_1 = 0, & C S_2 = 1 \end{cases} \quad (16)$$

令 $D^T = B$, 并通过构造 Lagrange 函数, 可求得

$$D = a P^{-1} S_1 + b P^{-1} S_2 \quad (17)$$

其中,

$$\begin{cases} a = - \frac{\sum_{i=1}^n \varrho_i(2, 2)}{\left[\sum_{i=1}^n \varrho_i(2, 1) \right] \left[\sum_{i=1}^n \varrho_i(1, 2) \right] - \left[\sum_{i=1}^n \varrho_i(1, 1) \right] \left[\sum_{i=1}^n \varrho_i(2, 2) \right]} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n \varrho_i(1, 2)}{\left[\sum_{i=1}^n \varrho_i(2, 1) \right] \left[\sum_{i=1}^n \varrho_i(1, 2) \right] - \left[\sum_{i=1}^n \varrho_i(1, 1) \right] \left[\sum_{i=1}^n \varrho_i(2, 2) \right]} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $Q_i = P_i^{-1}$, $Q_i(j, k)$ 表示矩阵 Q_i 第 j 行、第 k 列的元素。

因此可得,

$$B_i = [aQ_i(1, 1) + bQ_i(1, 2) \quad aQ_i(2, 1) + bQ_i(2, 2)] \quad (19)$$

同理可得,

$$C_i = [cQ_i(1, 2) + dQ_i(1, 1) \quad cQ_i(2, 2) + dQ_i(2, 1)] \quad (20)$$

通过上述分析可知, 定位点权值的计算需要考虑定位点处的误差协方差矩阵, 而根据式(10), 误差协方差矩阵与卫星及辐射源的位置有关。卫星位置可通过测控数据得到, 辐射源位置则是待估计量。如果权矩阵计算不准确, 就会影响最终的综合效果。考虑到辐射源位置的定位误差变化与卫星和辐射源的距离相比很小, 甚至可以忽略, 因此, 可以通过以下方式来计算误差协方差矩阵。

Step 1: 初始化。辐射源位置初始化为全部定位点的均值 $X_j(x_j, y_j, z_j)$, $j = 0$, 表示迭代次数, 距离变量 $r_j = 0$, 距离门限 ε 设置为较小的值;

Step 2: 将辐射源位置 X_j 和不同定位时刻的卫星位置 $X_s(x_{si}, y_{si}, z_{si})$ 带入式(10) 来计算各定位点的误差方差矩阵 $P_i^j (i = 1, 2, \dots, n)$, 下标 i 表示定位点, 上标 j 表示迭代次数, 利用式(19)、(20) 计算每个定位点所对应的权矩阵 A_i^j ;

Step 3: 利用式(11) 来计算综合定位结果 $X_{j+1}(x_{j+1}, y_{j+1}, z_{j+1})$;

Step 4: 计算综合定位结果 X_{j+1} 与辐射源初始位置 X_j 的距离, $r_j = \text{norm}(X_{j+1} - X_j)$, norm 表示取范数。如果 $r_j < \varepsilon$, 则迭代停止, $P_i^j (i = 1, 2, \dots, n)$ 即为求得的误差协方差矩阵, A_i^j 为对应每个定位点的权矩阵; 反之, 令 $X_j = X_{j+1}$, 执行 Step 2。

将通过上述迭代过程得到的权矩阵 A_i^j 代入式(11), 便得到目标估计 \hat{x}_i, \hat{y}_i , 将它们代入地球椭球方程(2) 便可求得 \hat{z}_i 。从整个综合算法的实现过程可以看出, 基于误差协方差矩阵的加权综合方法仅仅依靠观测数据, 而不依赖于任何的先验知识。

3 仿真结果

为了验证本文提出的算法, 设置了 2 个仿真实验。第一个实验通过 Monte Carlo 仿真将本文方法的综合定位精度与理论估计精度进行了比较; 第二个实验将本文提出的基于误差协方差矩阵的加权综合方法与其他综合定位方法进行了比较。需要说明的是仿真场景中卫星飞行高度 600km, 飞行速度约为 7.56km/s, 运行参数由 STK 自动生成。

3.1 实验 1 的综合定位效果

假设卫星以 600km 左右的轨道高度沿特定的轨道飞行 100s, 辐射源位于第 50s 时星下点处。设相位测量误差 δ_x 和 δ_y 均为 10° , 基线波长比 n 分别取 2, 4, 6, 8 四个值。在卫星飞行的 100s 时间内, 每 1s 对辐射源定位一次。依次取前 $ks (k = 1, 2, \dots, 100)$ 的定位点作综合处理。通过 50 次 Monte Carlo 仿真, 计算综合后的位置估计误差 GDOP, 并将其转化成圆概率误差 CEP^[7] 分布。综合定位效果如图 1 所示。

图 1(a)、(b)、(c)、(d) 分别表示基线波长比取 2, 4, 6, 8 时的综合定位效果, 可以看出综合定位误差与理论估计误差非常接近, 从而验证了本文方法的有效性。通过比较图 1(a)、(b)、(c)、(d) 可以发现, 在相位测量误差一定的情况下, 定位精度随着基线波长比的增加而增加。

3.2 实验 2 的综合定位效果

假设卫星以 600km 左右的轨道高度沿特定的轨道飞行, 分别在垂直卫星轨道方向 30km、60km、120km、240km、360km、480km 处设置辐射源目标 1 部, 即 $E_i (i = 1, 2, \dots, 6)$, 通过 50 次 Monte Carlo 仿真, 计算综合后的位置估计误差, 并将本文方法与基于平均权值方法、基于定位误差权值的方法(利用定位误差对定位点进行加权) 进行比较。定位精度如表 1 所示。

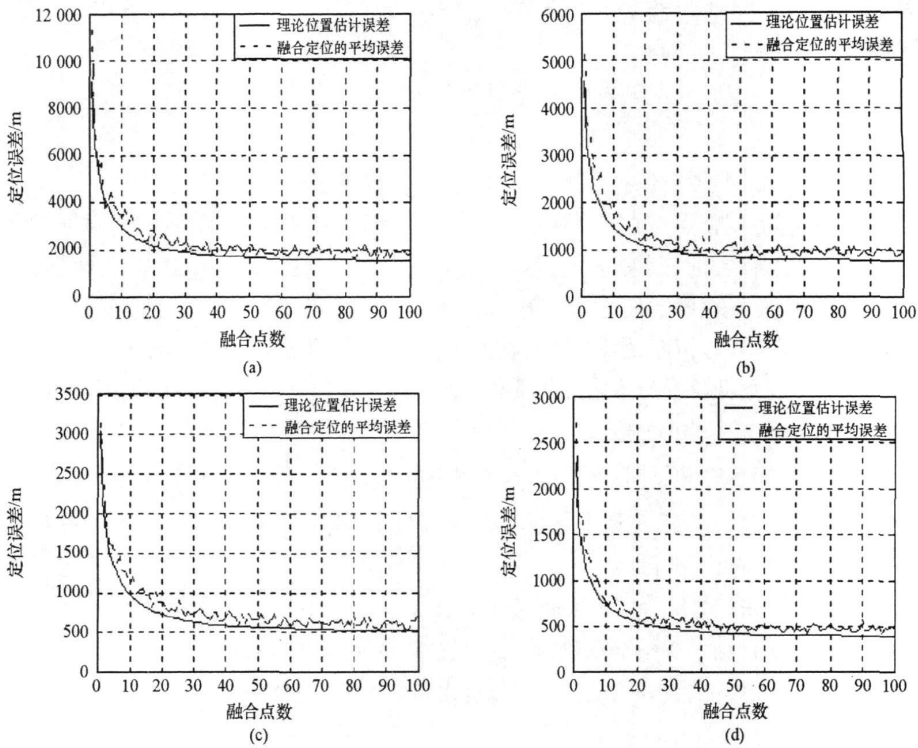


图1 实验1的综合定位精度

Fig. 1 Position precision of experiment 1

表1 定位精度对比

Tab. 1 Comparison of position precision between different methods

雷达	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
基于平均权值(m)	927.52	908.07	1025.7	1223.6	1094.4	1192.7
基于定位误差权值(m)	607.89	530.67	618.91	665.39	760.11	1042.5
基于误差协方差权值(m)	555.26	471.49	521.55	501.95	557.43	708.72

从表1可以看出,基于误差协方差的加权综合方法性能最好,比基于平均权值的方法定位精度提高了0.5km左右,比基于定位误差权值的方法定位精度提高了0.15km左右。几种方法的定位精度对比图如图2所示,从图中可以直观地看出,基于误差协方差的加权综合方法具有比其他两种方法更好的性能。

需要说明的是,当干涉仪相位存在模糊时,会使得权矩阵计算出现很大偏差,从而影响最终的综合效果,可以通过采用长短基线结合的方法来解决相位模糊。

4 结论

卫星对同一地面目标进行侦察时会产生多个定位结果,为了提高最终的位置估计精度,需要对全部的定位结果进行综合处理。因此本文重点研究了单星相位干涉仪测向体制下多次观测定位点的综合问题,提出了一种基于定位误差协方差矩阵的加权综合方法。并通过仿真实验将本文方法与基于平均权值的方法、基于定位误差权值的方法进行了比较,结果表明,该方法可以提高定位精度。

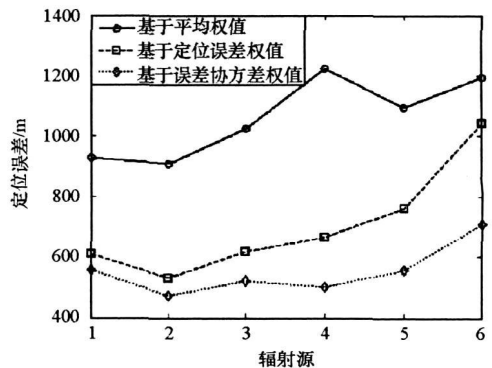


图2 定位误差变化曲线

Fig. 2 Distribution curve of location error

馈显示, 故事单元中的“场景词汇”能够比较好地贴近用户感官和实际需求。

本文研究的“场景词汇”作为一种比较宏观的视觉特征, 在进一步的研究中可以结合视频标注、图像标注等技术进一步完善, 通过与各种语义层次信息的融合, 能够更好地满足各种应用需求。

参 考 文 献:

- [1] Ide I, Mo H, Katayama N, et al. Threading News Video Topics[C]//ACM Workshop on Multimedia Information Retrieval (MIR2003) USA, 2003: 239–246.
- [2] Ide I, Mo H, Katayama N, et al. Exploiting Topic Thread Structures in a News Video Archive for the Semi-automatic Generation of Video Summaries [C]//2006 IEEE Intl. Conf. on Multimedia and Expo (ICME2006), Canada, 2006: 1473–1476.
- [3] Allan J, Wade C, Bolivar A. Retrieval and Novelty Detection at the Sentence Level[C]//Proceedings of the 26th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 2003) Canada, 2003: 314–321.
- [4] Wu X, Ngo C W, Li Q. Threading and Autodocumenting News Videos: A Promising Solution to Rapidly Browse News Topics[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(2): 59–68.
- [5] Peng Y X, Ngo C W, Dong Q J, et al. An Approach for Video Retrieval by Video Clip[J]. Journal of Software, 2003, 14(8): 1409–1417.
- [6] Lin T, Zhang H J, Feng J F, et al. Shot Content Analysis for Video Retrieval Applications[J]. Journal of Software, 2002, 13(8): 1577–1585.
- [7] Zhang D Q, Chang S F. Detecting Image Near-duplicate by Stochastic Attributed Relational Graph Matching with Learning[C]//Proceedings of ACM Multimedia, 2004: 877–884.
- [8] Chang S F, Hsu W, Kennedy L, et al. Columbia University Trecvid-2005 Video Search and High-level Feature Extraction[C]//Proceedings of Trecvid Workshop, 2005.
- [9] Chua T S, Neo S Y, Zheng Y T, et al. Trecvid-2006 by NUS I2R[C]//Proceedings of Trecvid Workshop, 2006.
- [10] Hsu W, Chang S F. Topic Tracking across Broadcast News Videos with Visual Duplicates and Semantic Concepts[C]//Proceedings of International Conference on Image Processing, 2006, USA.
- [11] Zhai Y, Shah M. Tracking News Stories across Different Sources[C]//Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Multimedia (ACM MM 2005) Singapore, 2005: 2–10.
- [12] 文军, 吴玲达, 曾璞, 等. 多源新闻视频中相似关键帧分析研究[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(4): 770–774.
- [13] Cheung S C, Zakhor A. Efficient Video Similarity Measurement with Video Signature[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(1): 59–74.
- [14] Jain A K, Vailaya A, Xiong W. Query by Video Clip[J]. ACM Multimedia Systems, 1999, 7(5): 369–384.
- [15] Odobez J M, Perez D G, Guillemot M. Video Shot Clustering Using Spectral Methods[C]//Third International Workshop on Content-based Multimedia Indexing (CBMI 2003) France, 2003: 94–102.
- [16] Grauman K, Darrell T. Efficient Image Matching with Distributions of Local Invariant Features[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2005 (CVPR 2005), USA, 2005: 627–634.

(上接第 114 页)

参 考 文 献:

- [1] Torrieri D J. Statistical Theory of Passive Location Systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 20(2): 183–198.
- [2] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [3] Zhou Y Y. Analysis of Location Accuracy for an Emitter Using Satellite-mounted Interferometer[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1998(1): 29–36.
- [4] 魏星, 万建伟, 皇甫堪. 基于长短基线干涉仪的无源定位系统研究[J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 22–35.
- [5] Gavish M, Weiss A J. Performance Analysis of Bearing-only Target Location Algorithms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(3): 817–828.
- [6] Levanon N. Lowest GDOP in 2-D Scenarios[J]. IEE Proc. Radar Signal Navig., 2000, 147(3): 149–155.
- [7] 龚文斌, 谢恺, 冯道旺, 等. 星载无源定位系统测向定位方法及精度分析[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2004, 19(2): 64–71.
- [8] Spingam K. Passive Position Location Estimation Using the Extended Kalman Filter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(4): 558–567.
- [9] 郝晓宁, 王威, 高玉东. 近地航天器轨道基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.