

红外辐射源伪距测量定位方法

万 群¹⁾ 彭应宁¹⁾ 杨万麟²⁾

(¹⁾清华大学电子工程系,北京,100084;

²⁾电子科技大学电子工程学院,四川,成都,610054)

摘要 引入伪距测量的概念,将非线性红外被动测距定位问题转化为线性问题,并给出了最佳线性定位估计的闭式解.仿真实验表明该方法定位精度接近最佳估计性能,适用于多个红外波段的大气衰减系数未知或难以准确获得的场合.

关键词 红外,伪距测量,被动定位,闭式解.

INFRARED EMITTER LOCATION METHOD USING PSEUDO-RANGE MEASUREMENTS

WAN Qun¹⁾ PENG Ying-Ning¹⁾ YANG Wan-Lin²⁾

(¹⁾Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²⁾College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The concept of pseudo-range measurement is introduced to transform the nonlinear problem of infrared passive location to a linear problem. A closed-form solution to the optimal linear position estimate is presented. Simulated results shown that the accuracy of the proposed method is colse to the performance of the best estimate. It is applicable to the cases when the extinction coefficients of multiple different wavelengths are undnown or can not be obtained for enough accuracy.

Key words infrared, pseudo-range measurements, passive location, closed-form solution.

引言

随着侦察系统隐蔽性要求的提高,无源定位技术已成为一种重要的研究方向.被动测距技术是红外被动定位的关键技术之一^[1,2].目前,被动探测目标的红外辐射一般只能提供目标角度信息,而无法直接提供距离参数,因此不能真正实现被动定位.红外辐射在不同波段的大气衰减不同^[3,4],当衰减系数已知时,可以利用这一规律对空中红外辐射源进行测距^[5].但是,大气红外衰减系数在很大程度上取决于天气状况,对其的准确获取仍存在许多问题.为此,本文在红外辐射的大气衰减系数未知的条件下,提出一种新的基于伪距测量的定位方法,并给出了定位估计的线性闭式解.

1 红外辐射源伪距测量

暂不考虑噪声或干扰能量,探测系统在距离目标 R_i 处检测到空中目标的红外辐射通量可以表示

为^[4,5]

$$S(i, t) = \frac{A_d I_0}{R_i^2} e^{-u_i R_i} \quad (1)$$

其中 A_d 为光学探测系统的孔径面积, I_0 为目标辐射强度, R_i 为第 t 个观测点到辐射源的距离, u_i 为第 i 个工作波段的大气衰减系数.下面假设红外探测系统工作于 2 个波段 ($i=1, 2$), 观测点有 M 个 ($t=1, 2, \dots, M$).

红外测距总是就是利用 $S(i, t)$ 估计红外辐射源到各个观测点的距离.由式(1)可得

$$\frac{\partial R_i}{\partial u_i} = \frac{R_i^2}{2 + R_i u_i}$$

可见,辐射源与观测点的距离越远,测距精度受大气衰减系数误差的影响越大.例如, $u_i = 0.1 \text{ km}^{-1}$, $R_i = 20 \text{ km}$ 时, 5% 的大气衰减系数误差可以造成 5000m 的测距误差.

在大气衰减系数未知时,我们引入伪距概念以改善红外被动定位精度.令 $\eta = (u_2 - u_1)^{-1}$, $\alpha_i = \ln S$

$(1, t)$, $\beta_t = \ln S(2, t)$, 由式(1)可得

$$R_t = \eta(\alpha_t - \beta_t). \quad (2)$$

由于 η 与大气衰减系数有关, 不能由式(2)直接计算距离. 定义伪距测量:

$$P_t = R_t / \eta = \alpha_t - \beta_t, \quad t = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

P_t 可以由 $S(i, t)$ 的测量结果得到.

在 GPS 测距定位问题中, 定位卫星网与接收机之间的时间同步误差对定位精度影响很大. 为此, 假设时间同步误差为一个未知参数, 并引入伪距的概念, 发展基于伪距测量的高精度定位算法. 红外辐射源的伪距与实际距离相差一个与大气衰减系数有关的乘性系数, 而 GPS 的伪距与实际距离相差一个与时间同步误差有关的加性系数, 这种差异使基于伪距测量式(3)的红外被动定位方法与 GPS 伪距定位方法^[6]不完全相同.

2 红外被动定位的最佳线性无偏估计

假设外辐射源位于 (x, y, z) , 观测点位于 (x_i, y_i, z_i) , $t = 1, 2, \dots, M$. 式(1)中的未知矢量为 $\theta = (x, y, z, u_1, u_2, I_0)^T$. 由红外辐射通量估计目标位置的问题可以表示为如下最小二乘估计问题:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{t=1}^M \sum_{i=1}^2 \left| S(i, t) - \frac{A_d I_0}{R_t^2} e^{-u_t R_t} \right|^2. \quad (4)$$

其中

$$R_t^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2. \quad (5)$$

直接求解式(4)涉及大量计算和收敛问题.

利用伪距测量 P_t , 式(4)又可以表示为

$$\hat{\rho} = \arg \min_{\rho} \sum_{t=1}^M |P_t - P_t(\rho)|^2. \quad (6)$$

其中未知矢量 $\rho = (x, y, z, \eta)^T$, $P_t(\rho) = R_t / \eta$.

假设实际参数 ρ 近似为 $\rho' = (x', y', z', \eta')^T$, 将

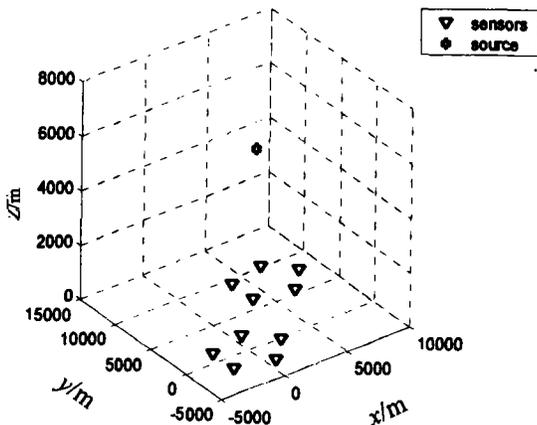


图1 目标和观测点位置
Fig.1 position of target and sensors

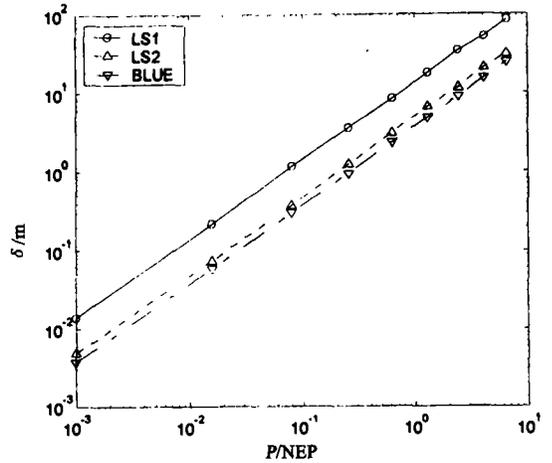


图2 定位估计的均方根误差对噪声功率
Fig.2 Root mean square error of location estimate versus noise power

ρ' 代入式(3)得到 $P_t(\rho')$. 由 $P_t(\rho')$ 在 ρ 处的 Taylor 级数展开并忽略 2 阶和 2 阶以上的项, 得

$$P_t(\rho) = P_t(\rho') + \frac{\partial P_t(\rho')}{\partial \rho'} \varepsilon. \quad (7)$$

其中 $\varepsilon = \rho' - \rho$,

$$\frac{\partial P_t(\rho')}{\partial \rho'} = \frac{1}{\eta R_t} \left[x' - x_i \quad y' - y_i \quad z' - z_i \quad \frac{-R_t^2}{\eta'} \right] \quad t = 1, 2, \dots, M.$$

将式(7)代入式(6), 得

$$\hat{\rho} = \rho' - \hat{\varepsilon}. \quad (8)$$

其中

$$\hat{\varepsilon} = \arg \min_{\varepsilon} \sum_{t=1}^M \left| P_t - P_t(\rho') - \frac{\partial P_t(\rho')}{\partial \rho'} \varepsilon \right|^2.$$

这个线性函数极小化问题的最小二乘估计为

$$\hat{\varepsilon} = H^+ (P_t - P_t(\rho')). \quad (9)$$

其中 $H = \left[\frac{\partial P_1(\rho')}{\partial \rho'} \quad \frac{\partial P_2(\rho')}{\partial \rho'} \quad \dots \quad \frac{\partial P_m(\rho')}{\partial \rho'} \right]^T$, H^+ 为矩阵 H 的广义逆, $[\]^T$ 表示矩阵转置.

可以证明, 伪距测量误差为正态分布时, 式(8)为 ρ 的最佳线性无偏估计 (BLUE)^[7]. 假设伪距测量误差的协方差矩阵为 Q_p , 由式(8)和式(9)可得 BLUE 的协方差矩阵为

$$Q_b = H^+ Q_p (H^+)^T.$$

在仿真实验中, 我们用参数 ρ 的真实值计算矩阵 H , 再代入上式得到 Q_b , 作为参数估计的下界.

3 基于伪距测量的红外被动定位方法

上述最佳线性无偏估计对初始参数估计的精度要求较高, 并且需要迭代运算. 下面推导伪距定位的

闭式解. 将式(5)代入式(3), 写成矢量形式, 得

$$Ah = b. \quad (10)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & -1 & P_1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & -1 & P_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_M & 2y_M & 2z_M & -1 & P_M \end{bmatrix},$$

$$h = [x \quad y \quad z \quad x^2 + y^2 + z^2 \quad \eta^2]^T,$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ \vdots \\ x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 \end{bmatrix}.$$

线性方程组(10)的最小二乘解为

$$\hat{h} = A^+ b. \quad (11)$$

其中 A^+ 为矩阵 A 的广义逆.

实际上, 未知矢量 h 中的前 4 个元素 h_1, h_2, h_3 和 h_4 之间存在如下的约束关系:

$$Bg = c. \quad (12)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$g = [x^2 \quad y^2 \quad z^2]^T,$$

$$c = [h_1^2 \quad h_2^2 \quad h_3^2 \quad h_4^2]^T.$$

由式(11)得 $c = [\hat{h}_1^2 \quad \hat{h}_2^2 \quad \hat{h}_3^2 \quad \hat{h}_4^2]$, 其中 $\hat{h}_1, \hat{h}_2, \hat{h}_3$ 和 \hat{h}_4 为矢量 \hat{h} 的前 4 个元素. 代入式(12), 得到矢量 g 的最小二乘估计为 $\hat{g} = B^+ c$. 由此得到辐射源坐标估计为

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = \pm \begin{bmatrix} \sqrt{\hat{g}_1} \\ \sqrt{\hat{g}_2} \\ \sqrt{\hat{g}_3} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中 \hat{g}_1, \hat{g}_2 和 \hat{g}_3 为矢量 \hat{g} 的元素, 正负号可以由式(11)的估计结果确定.

4 仿真实验与比较

假设红外辐射源和 $M = 10$ 个观测点位置如图 1 所示, 观测孔径都为 $A_d = 20\text{cm}^2$, 目标的红外辐射能

量为 $I_0 = 200\text{W}$, 2 个工作波段的大气衰减系数的 $u_1 = 0.33/\text{km}$, $u_2 = 0.48/\text{km}$.

假设红外辐射通量测量误差满足零均值的高斯分布, 其能量单位定义为 NEP (噪声等效功率), $1\text{NEP} = 1.3\text{e-}13\text{W}$. 图 2 给出了红外辐射通量测量误差能量 P 为 $1.0\text{e-}3 \sim 1.0\text{e-}1\text{NEP}$ 时, 由 BLUE、式(11) (LS1) 和式(13) (LS2) 得到的目标定位估计的均方根误差 δ . 可见, LS2 优于 LS1, 并且 LS2 接近 BLUE 的定位估计精度.

5 结论

本文在大气衰减系数未知的条件下, 将一种新的伪距测量概念引入红外辐射源被动定位问题, 给出了定位估计的线性闭式解. 仿真实验表明该方法具有接近最佳线性估计的精度. 实际应用中可能存在以下问题: 首先, 要求在相同的工作波段红外辐射源到各观测点的大气衰减系数相同, 限制了观测点的空间分布范围; 其次, 定位性能与观测点的空间分布情况有关, 存在最佳布阵问题; 另外, 当存在 2 个或 2 个以上的空间位置不同的红外辐射源时, 不能直接使用该方法. 这些问题的解决还有待进一步研究.

REFERENCES

- [1] QIAN Zheng-Tie. Passive ranging method for IRST systems. *J. Infrared Millim. Waves* (钱铮铁. 一种用于红外警戒系统的被动测距方法. *红外与毫米波学报*), 2001, 20(4): 311—314
- [2] XIE Bang-Rong. The research on airborne infrared passive positioning method. *Infrared Technology* (谢邦荣. 机载红外被动定位方法研究. *红外技术*), 2001, 23(5): 1—3
- [3] XU Nan-Rong, BIAN Nan-Hua. *Infrared Control and Guide*. Beijing: National Defence Industry Press (徐南荣, 卞南华. *红外辐射与制导*. 北京: 国防工业出版社), 1997
- [4] LIU Jing-Sheng. *Infrared Physics*. Beijing: Enginery Industry Press (刘景生. *红外物理*. 北京: 兵器工业出版社), 1992
- [5] LU Yuan, SHI Jia-Ming, LIN Yong-Shun, et al. Research on infrared passive location. *Infrared and Laser Engineering* (路远, 时家明, 凌永顺等. *红外被动定位. 红外与激光工程*), 2001, 30(6): 405—409
- [6] CHAN Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1994, 42(8): 1905—1915
- [7] Torrieri D J. Statistical theory of passive location system. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Sys.*, 1984, 20(3): 183—198