

1-15-2021

Modeling and Simulation of Detection Probability for Whole Airspace Oriented Optical Target

Hongie Dang

Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology. Beijing 100094. China;

Haozhang Yu

Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology. Beijing 100094. China;

Luofeng Deng

Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology. Beijing 100094. China;

Guanlei Jiang

Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology. Beijing 100094. China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Detection Probability for Whole Airspace Oriented Optical Target

Abstract

Abstract: To ensure the target within view field is the precondition of the tracking measuring equipment working normally, which is described by probability in engineering. *A precise method of optical equipment detection probability was addressed aiming at the maneuverable targets, an exact description method of the whole airspace detection according to optical sensor was put forward, and a detection probability model for optical target was set up.* A calculation method suited the model was confirmed, which was given by simulation analysis of the algorithm's calculation performance, the influence of model various parameters on algorithm was analyzed, and a comparison was given between traditional and new description method of whole airspace detection. The simulation result illustrates that the detection probability model has higher precision, and the confirmed algorithm is one possible realization for the Engineering Application of this model.

Keywords

optical equipment, sensor, detection probability, detection range, field angle, precision

Recommended Citation

Dang Hongie, Yu Haozhang, Deng Luofeng, Jiang Guanlei. Modeling and Simulation of Detection Probability for Whole Airspace Oriented Optical Target[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1214-1220.

面向全探测空域的光学目标探测概率建模与仿真

党宏杰, 余浩章, 邓洛凤, 蒋冠雷

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 保证目标在视场内是跟踪测量设备工作的前提条件, 工程中通常采用概率对其进行描述。针对动目标光学设备探测概率精确求解的问题, 提出了一种光学传感器全探测空域的精确定义方法, 并建立了探测概率模型。分析了模型中各参数影响, 并通过对选用算法性能进行仿真分析, 确定了模型的实现方法, 最终完成了探测区域描述方式的比对分析。仿真结果表明, 提出的探测概率模型具有较高的精度, 且确定算法为模型的工程应用提供了有效的实现手段。

关键词: 光学设备; 传感器; 探测概率; 探测距离; 视场角; 精度

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1214-07

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.06.009

Modeling and Simulation of Detection Probability for Whole Airspace Oriented Optical Target

Dang Hongjie, Yu Haozhang, Deng Luofeng, Jiang Guanlei

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To ensure the target within view field is the precondition of the tracking measuring equipment working normally, which is described by probability in engineering. A precise method of optical equipment detection probability was addressed aiming at the maneuverable targets, an exact description method of the whole airspace detection according to optical sensor was put forward, and a detection probability model for optical target was set up. A calculation method suited the model was confirmed, which was given by simulation analysis of the algorithm's calculation performance, the influence of model various parameters on algorithm was analyzed, and a comparison was given between traditional and new description method of whole airspace detection. The simulation result illustrates that the detection probability model has higher precision, and the confirmed algorithm is one possible realization for the Engineering Application of this model.

Keywords: optical equipment; sensor; detection probability; detection range; field angle; precision

引言

在飞行器测控中, 测控设备对目标进行快速捕获和稳定跟踪的前提是有效探测到目标。在针对机动目标的测控系统中, 计算设备的探测概率是设备

捕获与稳定跟踪目标的基础, 只有当目标被探测到后, 结合传感器和相关伺服平台的电气性能, 才能真正得到目标的捕获概率, 进而测算出设备的稳定跟踪性能。

目前关于捕获概率的研究主要侧重于捕获概率的深度应用, 如基于目标捕获的移动传感器平台对动目标的稳定跟踪、将捕获概率作为一个性能参数联合其它一些条件完成捕获系统性能分析或高品质影像融合等^[1-4]。这些研究大多侧重于雷达测



收稿日期: 2014-06-05 收回日期: 2014-10-30;
作者简介: 党宏杰(1983-), 女, 山东枣庄, 硕士, 助理研究员, 研究方向为系统仿真与应用; 余浩章(1977-), 男, 湖北公安, 硕士, 副研究员, 研究方向为系统仿真与应用; 邓洛凤(1978-), 女, 湖南永兴, 硕士, 工程师, 研究方向为系统仿真与应用。

<http://www.china-simulation.com>

• 1214 •

量系统, 对光学传感器的研究则侧重于捕获概率的计算方法及影响因素等^[5-8]。且目前针对光学目标的研究均未对探测概率和捕获概率做出明确的界定, 也未在计算中考虑设备的电气性能, 而是直接将探测概率作为捕获概率进行分析。此外上述研究主要侧重于模型与算法实现, 缺少光学设备全探测空域的描述, 文献[9]虽对探测空域进行了描述, 但其描述过程及实现算法均进行了简化, 使模型和算法不具有通用性。本文在上述研究成果的基础上, 针对全视场内光学目标探测概率的计算问题, 建立了探测概率模型, 并完成了模型的算法实现与仿真分析, 旨在为光学目标的快速捕获与后续捕获概率的计算提供一种有效的工程实现手段。

1 探测概率建模

1.1 探测区域的精确计算

光学传感器能否在有效作用范围内探测到目标取决于目标的散布特性, 通常探测设备的光轴始终由设备的分布中心指向目标分布中心, 但由于预报误差, 使得目标以光轴为中心呈随机散布, 因此误差角也呈随机散布, 这种散布可假设呈正态分布。将探测设备分布中心到目标分布中心的距离记为 d , 则定义目标的探测概率为 d 小于设备最大探测距离 D , 且误差角 θ 小于设备视场角半角 α 的概率。

为便于分析计算, 定义视场坐标系 $o-xyz$, 如图 1 中的坐标系示意。其原点 o 位于探测设备几何中心, oz 轴由探测设备分布中心指向目标分布中心(目标散布中心记为 s), ox 轴在由地心、设备中心和目标分布中心构成的平面内垂直于 oz 轴, oy 轴符合右手准则。

根据探测概率的定义可知, 在视场坐标系下设备的可探测区域必须同时满足以下条件:

- (1) 目标分布中心必须位于探测设备的正向, 即 $z > 0$;
- (2) 任何方向的探测距离不大于设备最大探测距离 D , 即 $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq D$;

(3) 误差角 $\theta \leq$ 设备视场角半角 α , 即 $\theta \leq \alpha$ 。

综上所述, 探测区域可用如下公式表达:

$$\Omega = \begin{cases} z > 0 \\ \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq D \\ \theta \leq \alpha \end{cases} \quad (1)$$

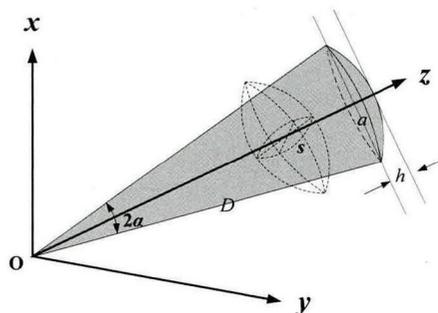


图 1 探测区域示意图

根据三角函数性质可知: $\theta \leq \alpha$, 则 $\tan \theta \leq \tan \alpha$ 同样成立。已知 $\tan^2 \theta = (x^2 + y^2) / z^2$, 则公式(1)可改写为:

$$\Omega = \begin{cases} z > 0 \\ x^2 + y^2 + z^2 \leq D^2 \\ x^2 + y^2 \leq z^2 \tan^2 \alpha \end{cases} \quad (2)$$

分析公式(2)的几何意义可知, 全空域的可探测区域 Ω 是一个位于 z 轴正向且以 z 轴对称的球扇形区域, 如图 1 阴影部分所示。其中, 球扇形的球半径为 D 、锥角为视场角 (2α) 、拱高 h 为 $(D - D \cos \alpha)$ 、弓形底圆半径 a 为 $D \sin \alpha$ 。

为了便于计算, 记球扇形中的圆锥体积为 Ω_1 , 球冠体积为 Ω_2 , 根据图 1 中各变量的几何关系不难得到 Ω_1 、 Ω_2 的表达式分别为:

$$\Omega_1 = \begin{cases} 0 < z < D \cos \alpha \\ -z \tan \alpha < y < z \tan \alpha \\ -\sqrt{(z \tan \alpha)^2 - y^2} < x < \sqrt{(z \tan \alpha)^2 - y^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Omega_2 = \begin{cases} D \cos \alpha < z < D \\ -\sqrt{D^2 - z^2} < y < \sqrt{D^2 - z^2} \\ -\sqrt{D^2 - z^2 - y^2} < x < \sqrt{D^2 - z^2 - y^2} \end{cases}$$

则全空域可探测区域的精确表达式可描述为 $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$ 。

1.2 探测概率表达式解析

根据 1.1 节的描述可知：目标以光轴为中心呈随机散布，且假设这种散布呈正态分布。考虑最简单的情况，当目标误差椭球的主轴方向与视场坐标系 z 轴方向一致时，根据正态分布的定义可知，其概率密度的函数表达式为：

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-d)^2}{\sigma_z^2}\right)\right]$$

在现实中目标误差椭球的主轴方向通常与视场坐标系 z 轴方向不一致，即 xyz 三个方向的误差存在相关性，则概率密度函数中的误差需用误差协方差矩阵进行描述。定义 P_S 为误差协方差矩阵，

$$P_S = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \rho_{xz}\sigma_x\sigma_z \\ \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 & \rho_{yz}\sigma_y\sigma_z \\ \rho_{xz}\sigma_x\sigma_z & \rho_{yz}\sigma_y\sigma_z & \sigma_z^2 \end{bmatrix}, \rho \text{ 为相关系数。}$$

则概率密度的函数表达式为：

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 |P_S|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x, y, z-d)^T P_S^{-1}(x, y, z-d)\right]$$

则探测概率在视场坐标系下的表达式可写为：

$$P = \iiint_{\Omega} \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 |P_S|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x, y, z-d)^T P_S^{-1}(x, y, z-d)\right] \quad (4)$$

其中，积分区域 Ω 为设备可探测区域， d 为设备分布中心到目标分布中心的距离。

由于 $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$ ，公式(4)可改写为

$$P = \iiint_{\Omega_1} f(x, y, z) + \iiint_{\Omega_2} f(x, y, z) \quad (5)$$

由公式(5)可知，光学设备探测概率的计算实质是已知目标在视场坐标系下散布误差(如图 1 中的椭球示意)的概率密度分布，求解其落入探测设备可探测区域内的概率。由此可知，探测概率表达式求解过程的实质是求解一个以在视场区域 Ω 为

被积区域，以概率密度函数 $f(x, y, z)$ 为被积函数的三重积分。

1.3 探测概率算法实现

由公式(5)可知，探测概率的计算公式是一个积分限上存在变量的三重积分，因此探测概率的计算过程就是一个计算三重数值积分的过程。在数值积分中最常用的是蒙特卡洛算法，其程序结构较为简单，但蒙特卡洛法是对真值数学期望的一种近似，数学期望可能大于真值，这将导致概率计算中可能出现结果大于 1 的现象。为了解决这一情况需研究一种精度更高的算法，即高斯算法。

1.3.1 均匀随机数蒙特卡洛法

蒙特卡洛法的基本思想为：任何一个积分都可看作某个随机变量的数学期望。其基本过程是构造一个概率过程(分布密度函数)，使其某些参量正好是所要求的问题的解，然后用算术平均值近似被积函数 $f(P)$ 的数学期望^[10]。采用均匀随机数法得到随机变量是蒙特卡洛法计算多重积分常用的方法之一。针对在视场概率的积分公式，其被积函数为 $f(x, y, z)$ 时，可写出分布密度函数，其满足

$$\iiint g(x, y, z) dx dy dz = 1 \quad (6)$$

其中积分区域为 Ω 。再取包含积分区域 Ω 的长方体 V ， V 的大小由积分上下限决定，即 $V=(b-a)(d-c)(f-e)$ ($a \leq x \leq b$, $c \leq y \leq d$, $e \leq z \leq f$)。均匀随机数法中的 $g(x, y, z)$ 为一常数，由公式(6)可以得到 $g(x, y, z) = 1/(b-a)(d-c)(f-e)$ 。则当 N 充分大时，有

$$\iiint f(x, y, z) dx dy dz = \frac{(b-a)(d-c)(f-e)}{N} \sum_{i=0}^N f(x_i, y_i, z_i) \quad (7)$$

则公式(4)的均匀随机数蒙特卡洛法表达式如下：

$$P = \frac{1}{N} \left[\sum_1^3 f(x_1, x_2, x_3) \right] \prod_{i=1}^3 (b_i - a_i) \quad (8)$$

其中， $f(x_1, x_2, x_3) = f(x, y, z)$ ， N 为采用的随机点个数， b_i 和 a_i 分别为积分变量的积分上下限。

当积分限上有变量时, 积分限的乘积(表示被积函数体积)不再固定, 而是随着每个 (x_1, x_2, x_3) 值的变化而变化, 因此进行计算时每生成一个随机点都要求一次概率密度和一次体积, 最后再加和求平均。此时公式(8)将改写为如下形式。

$$P = \frac{1}{N} \sum_1^3 f(x_1, x_2, x_3) \prod_{i=1}^3 (b_i - a_i)$$

在一定置信度下蒙特卡洛算法的积分误差与分布密度函数 $g(x, y, z)$ 和随机点数 N 的选取有关, 本文中当积分区域 V 固定后, $g(x, y, z)$ 也随之固定, 因此算法误差与 \sqrt{N} 成反比。为了分析对比, 下文的仿真计算中随机点数 N 设定为 10^6 。

1.3.2 高斯-勒让德积分法

高斯法一般利用正交多项式的有关关系式来确定节点位置与系数^[11], 当节点选定后, 将节点处的被积函数值赋予相应的权重(系数), 最后相加求和, 得到积分结果。本文采用高斯-勒让德法进行仿真计算, 此处节点选取的依据是勒让德多项式的根。用公式表达为: 求积公式 $\int_a^b f(x)dx$ 的数值解可由 $\sum_{k=0}^n A_k f(x_k)$ 近似, 其中, $A_k (k=0, 1, \dots, n)$ 为不依赖于 $f(x)$ 的求积系数, x_k 为求积节点。为具有一般性, 研究带权积分 $I = \int_a^b f(x)\rho(x)dx$, 此处的 $\rho(x)$ 为权函数, 求积公式为

$$\int_a^b f(x)\rho(x)dx \approx \sum_{k=0}^n A_k f(x_k) \tag{9}$$

若权系数 $\rho(x) = 1$, 区间为 $[-1, 1]$, 则得公式

$$\int_{-1}^1 f(x)dx \approx \sum_{k=0}^n A_k f(x_k) \tag{10}$$

公式(10)即为高斯-勒让德求积公式。

在实际计算中, 当积分区间是一般的 $[a, b]$ 时, 需要对积分区间作如下的变换: $x = (b-a)t/2 + (b+a)/2$, 使积分区间变换为 $[-1, 1]$ 。

高斯-勒让德法的积分误差与节点阶数 n 有关, n 越大算法的精度越高。

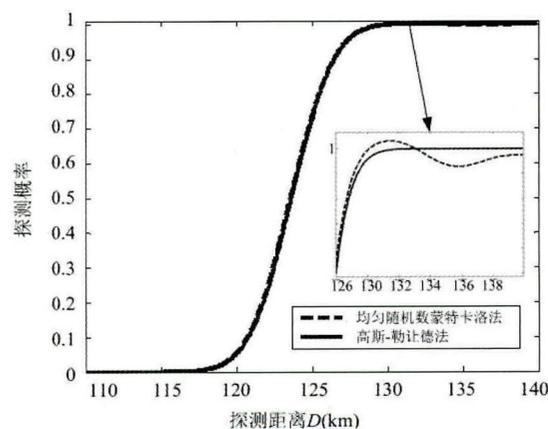
在程序使用时由于不同阶的节点和系数数值均不相同, 若通过改变节点数来提高精度, 则每次

都需要在积分函数里进行改动, 使用非常不方便。因此本文在程序设计时是将节点数(knots)固定, 通过将积分区间分段处理来模拟节点数的改变。分段数 M 为一个变量, 算法实现时首先将积分区间等分为 M 段, 再在每段中使用固定节点数的高斯积分法, 由此整个积分区间中采用的节点数可简单理解为 $M \times \text{knots}$ 个, 可以证明这种改动并不会对计算精度造成影响。

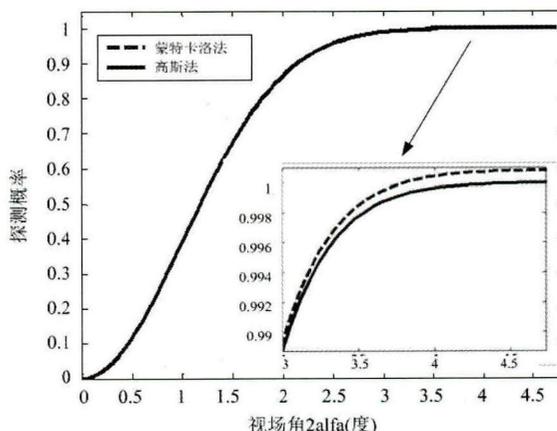
2 仿真与分析

2.1 模型参数影响分析

模型参数包括最大探测距离 D 、视场角 (2α) 、设备分布中心到目标分布中心的距离 d 和各向误差 $(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2)$ 。当蒙特卡洛法 $N=10^6$, 高斯法 $M=20$, knots=8 时, 探测概率的计算结果如图 2-4 示意。



(a) $d=120 \text{ km}, \alpha=2^\circ, \sigma_x^2=\sigma_y^2=1 \text{ km}, \sigma_z^2=5 \text{ km}$



(b) $d=120 \text{ km}, D=140 \text{ km}, \sigma_x^2=\sigma_y^2=1 \text{ km}, \sigma_z^2=5 \text{ km}$

图 2 探测概率随最大探测距离/设备视场角的变化曲线

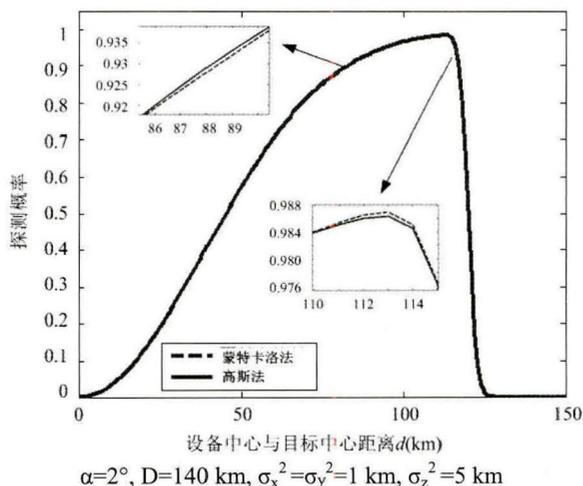


图 3 探测概率随 d 的变化曲线

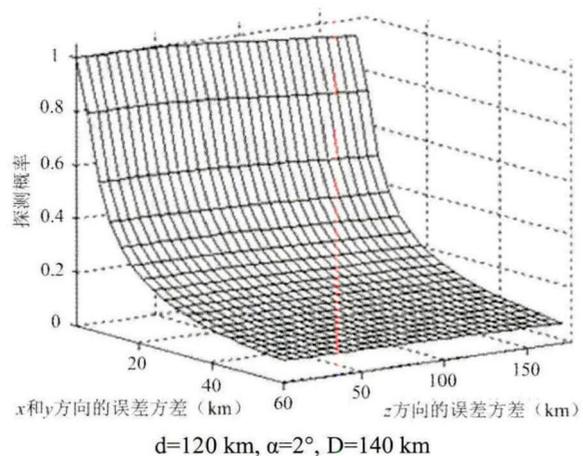


图 4 探测概率随 xy 和 z 方向误差方差变化曲线(高斯法)

(1) 最大探测距离 D 、视场角(2α)

由图 2 可知: 其它条件不变时, 探测概率随设备最大探测距离/设备视场角的增大而增大, 直至稳定于某一数值。

(2) 设备分布中心到目标分布中心的距离 d

由图 3 可知: 其它条件不变时, 当 $d < D$ 时, 目标探测概率随 d 的增加而增大; 当 $d \geq D$ 时, 说明设备受最大探测距离限制未能探测到目标, 探测概率急剧下降至 0。

(3) 各向误差

由图 4 可知: 其它条件不变时, 目标探测概率会随着精度误差的增大而减小。其中 x 和 y 方向精度误差对概率影响较大, 当 σ_x^2 增大到 10 km 时, 目标只有 0.4 的概率在视场内, 而 z 轴(即由设备分

布中心指向目标分布中心)方向当 σ_z^2 增大到 100 km 时, 目标仍有 0.9 以上的概率在视场, 说明 σ_z^2 对探测概率的影响远小于 σ_x^2 和 σ_y^2 。

2.2 算法性能分析

(1) 计算精度

由图 2、图 3 可知: 蒙特卡洛法与高斯法在概率小于 1 时结果精度基本一致, 当结果接近 1 时前者可能出现结果大于 1 的现象(与 1.3 节的分析结论一致), 而后者则有较好收敛性, 不会出现结果大于 1 的现象。说明高斯法在结果接近 1 时的计算精度高于蒙特卡洛法。

(2) 矩阵适应度

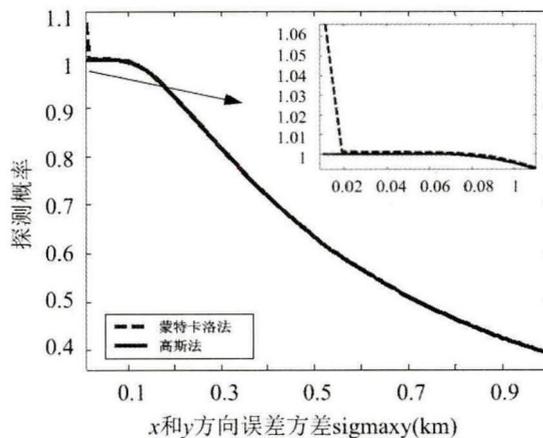


图 5 探测概率随 x 和 y 方向误差方差的变化曲线

由图 5 可知, 其它条件不变时, $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ 差距越大, 对蒙特卡洛法计算结果的精度影响越大(如图示意, 最开始的计算结果存在较大的震荡), 对高斯法计算结果的精度影响不大。分析原因为 $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ 差距越大, 误差的协方差矩阵条件数越大, 进而导致蒙特卡洛法在进行矩阵运算时的截断误差越大。说明高斯法对被积函数的适应性高于蒙特卡洛法。

(3) 结构复杂度

均匀随机数蒙特卡洛法原理简单, 程序结构易于设计, 在仿真过程中发现, 进行多重数值积分时, 积

分的重数越高, 越能体现出该算法程序结构的优越性。

高斯-勒让德法程序结构较为复杂, 当节点数固定后算法的精度取决于每层积分区间所划分的子区间个数 M , M 越大计算结果精度越高, 但同时计算时间也越长。

综上所述, 高斯-勒让德法由于计算精度高、收敛性好, 且对误差协方差矩阵运算有较好的适应性, 因而更加适合探测概率的仿真计算, 但在算法实现过程中必须考虑程序结构的设计与优化。

2.3 探测区域描述方式分析

关于光学设备探测区域的描述, 传统的方式是将其简化为一个以设备中心和目标分布中心连线为对称轴的空间圆锥体, 在对称轴线上, 设备的最大探测距离近似为圆锥体的高。根据几何关系不难理解, 这种近似的误差将随着视场角的增大而迅速增加, 对计算结果精度的影响也将随之大。

对本文提出的探测区域描述方式与传统描述方式进行仿真比对, 仿真条件为 $D=140$ km, $d=120$ km, $\sigma_x^2=\sigma_y^2=1$ km, $\sigma_z^2=10$ km, 则当视场角 2α 从 0 变化到 60° 时, 基于 2 种描述方式的计算结果如图 6 所示。

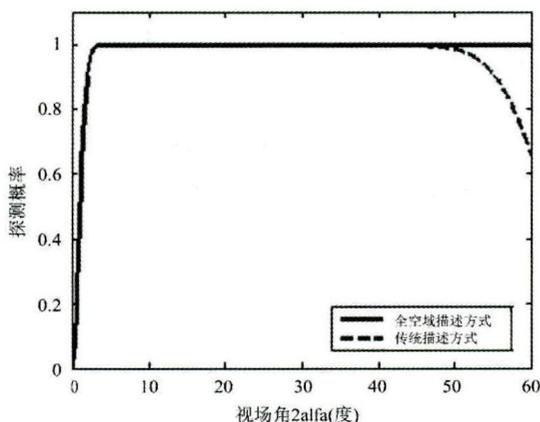


图 6 基于 2 种描述方式的探测概率计算结果比对

由上图可以看出, 当视场角 $>46^\circ$ 基于传统描述方式计算的探测概率迅速下降, 说明目标可能已不在视场内。但通过模型中各参数的几何关系不难

算出, 此时目标应仍在视场内, 这与本文提出的描述方式的计算结果吻合。

综上所述, 探测区域的传统描述方式在视场角较小时与本文提出的全空域描述方式计算精准度差别不大, 但随着视场角的增大, 其计算精准度将迅速下降, 甚至出现误判的情况。目前常用的光学设备视场角大都为度或分量级, 传统描述方式的计算误差在 10^{-5} 量级, 因此可以忽略。但随着未来大视场光学设备的广泛应用, 对探测区域描述精准度的要求也将随着提高, 相比较传统描述方式, 全空域探测区域描述方式精准度更高, 也更加具有普遍适用性。

3 结论

本文首先基于视场坐标系提出了一种光学传感器在全空域的探测区域精确计算方法, 并以此为基础进行了探测概率建模, 包括探测概率数学表达式解析, 最终将概率计算转化为一个三维积分求解的问题; 随后通过对模型中各参数对模型计算及算法精度的影响, 以及算法运行性能进行分析, 完成了 2 种算法的比对; 最后对本文提出的探测区域描述方式与传统描述方式的精准度进行了仿真比对。仿真分析得出如下结论:

(1) 高斯-勒让德法由于计算精度高、收敛性好, 且对误差协方差矩阵运算有较好的适应性, 因而更加适合探测概率的仿真计算, 但在算法实现过程中需注意程序结构的设计与优化;

(2) 探测概率模型中, 探测概率随设备最大探测距离/设备视场角的增大而增大; 随设备分布中心到目标分布中心的距离 d 的增大先增大, 当 $d \geq D$ 时急剧下降至 0; 随精度误差的增大而减小, 其中 x 和 y 方向精度误差对结果影响较大;

(3) 随着视场角的增大, 探测区域的传统描述方式计算精准度迅速下降, 甚至出现误判的情况。而本文提出的全空域探测区域描述方式精准度更高。

参考文献:

[1] Frankot R T. Performance of Cued Target Acquisition

- Systems: Impact of Automatic Target Recognition [C]// 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 2008: 1619-1623.
- [2] Frankot R T. Performance of Target Acquisition Systems with Ordered Commitment [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), 2012, 48(3): 2154-2166.
- [3] Ramirez J P. Moving Target Acquisition Through State Uncertainty Minimization [C]// American Control Conference (ACC). Portland, OR, USA: IEEE, 2014: 3425-3430.
- [4] Yang Cui. Target Acquisition Performance Model Based Quality Metric for Multisensor Image Fusion [C]// International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Nanning, China. USA: IEEE, 2010: 11-14.
- [5] 温求道, 崔莹莹, 夏群利. 基于导引头地面捕获域的激光制炸弹设表修正技术 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2053-2057.
- [6] 林德福, 牟宇, 常超. 激光半主动末制导炮弹捕获概率研究 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 698-701.
- [7] T Jono, M Toyoda, K Nakagawa, *et al.* Acquisition Tracking and Pointing System of OICETS for Free Space Laser Communications [C]// SPIE Acquisition, Tracking and Pointing XIII. Orlando, FL, USA: SPIE, 1999, 3692: 41-50.
- [8] 邓蕾, 刘藻珍, 刘永善. 激光半主动寻的导引头目标捕获概率仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 34-36.
- [9] 谷志军. 拦截机动目标末制导技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [10] 刘长虹, 关永亮, 寿卓佳. 蒙特卡洛法在数值积分上的应用 [J]. 上海工程技术大学学报, 2010, 24(1): 43-46.
- [11] 刘小会. 正态分布积分高精度数值计算的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

(上接第 1213 页)

容之一。根据机场消防车消防泵系统的组成结构和工作特点, 构建了消防泵系统的仿真模型。根据消防车工作参数推导了模型的各项参数。通过拟合曲线的数据对比, 证明该仿真模型具有较高的仿真精度。同时该模型还具有形式简单、计算速度快的特点, 能够满足实时仿真的要求。

参考文献:

- [1] 贾立山, 王立文. 粒子系统在飞机火灾消防视景仿真中的应用 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 314-318.
- [2] 陈万青, 王尽孝. 基于泵内特性的离心式给水泵建模仿真及可视化研究 [J]. 黑河学院学报, 2011, 2(1): 124-128.
- [3] 胥建群, 高润田, 周克毅. 一种新型的给水泵通用数学模型 [J]. 汽轮机技术, 1999, 41(6): 334-338.
- [4] 李晓黎. 火电厂水泵系统运行优化的模型与方法 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [5] Su Hua, Shi Xungen. Application of hourly simulation in designing vertical U-pipe underground heat exchanger of ground source heat pump system [C]// Proceeding of 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, Henan, China. USA: IEEE Computer Society, 2010: 1-5.
- [6] 江文贱, 黄建荣, 韩丹丹. 水泵性能测试仿真实验台研究 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2012, 25(1): 73-75.