

李雅普诺夫稳定性理论 在目标识别效果评估中的应用

李彦鹏, 黎湘, 王宏强, 庄钊文, 梁旬农

(国防科技大学电子科学与工程学院空间电子技术研究所, 长沙 410073)

[摘要] 针对目标识别效果的稳定性评估, 建立了目标识别系统的动态模型, 随后基于李雅普诺夫稳定性理论, 给出了目标识别系统识别效果的动态稳定性分析并完成初步仿真。

[关键词] 目标识别; 效果评估; 稳定性

[中图分类号] TN911.2; TP391 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0039-04

1 前言

目标识别具有重大的理论意义和应用价值, 长期以来, 对目标识别效果评估的研究相当有限: a. 没有形成一种完整的、通用的评估理论; b. 成熟的、可直接应用于实际工作的评估方法非常少; c. 评估中没有将识别过程所处的条件有机地考虑进去。因此, 效果评估成为目标识别中最迫切需要解决的重要问题^[1~6]。选择这一方向作为研究内容, 主要针对识别效果的稳定性进行研究。

从整体上来说, 目标识别系统融入了待识别目标、环境、识别处理系统, 因此, 它是一个复杂的大系统, 在这中间的随机性因素很多, 不确定性的因素也很多, 研究识别效果在这样复杂情况下的稳定性具有重要的理论和实践意义。

将李雅普诺夫稳定性理论运用于所研究内容, 首先形成目标识别系统的动态模型, 随后基于李雅普诺夫稳定性理论, 分析了目标识别系统的稳定性条件, 并给出了识别效果的动态变化示意图。

2 目标识别系统的动态模型

为便于分析, 记 x_1, \dots, x_n 为 n 个待识别目标, 令 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$, $f(x_1), \dots, f(x_n)$ 分别

为识别系统从 n 个待识别目标最终获得的关于目标 x_1, \dots, x_n 的信息。

以矩阵 $\mathbf{M}_1 = (m_{ij}^{(1)})_{n \times n}$ 表示识别系统对目标信息的处理, 以 z_1, \dots, z_n 表示识别系统最终判定为目标 x_1, \dots, x_n 的程度, 令 $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_n)^T$, 显然

$$\mathbf{z} = \mathbf{M}_1 f(\mathbf{x}) \quad (1)$$

其中 $f(\mathbf{x}) = (f(x_1), \dots, f(x_n))^T$ 。

以 $y_1(x_1), \dots, y_n(x_n)$ 表示识别系统在待识别目标分别为 x_1, \dots, x_n 时表现出来的识别效果, 为了简便, 后面不再注明自变量。令 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)^T$ 。为了获得关于系统识别效果的认识, 需要对系统的判决矢量 \mathbf{z} 进行分析, 以矩阵 $\mathbf{M}_2 = (m_{ij}^{(2)})_{n \times n}$ 表示这些分析和处理, 则 $\mathbf{y} = \mathbf{M}_2 \mathbf{z}$, 因而

$$\mathbf{y} = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 (f(x_i))_{n \times 1}, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

令 $\mathbf{A} = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1$ 。显然, \mathbf{y} 中各维取值随 $f(\mathbf{x})$ 变化。对式 (2) 两边在时间上取微分

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial t} = \mathbf{A} \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial t} = \mathbf{A} g(\mathbf{x}) \quad (3)$$

其中, $g(\mathbf{x}) = (g(x_1), \dots, g(x_n))^T = (\partial f(x_1)/\partial t, \dots, \partial f(x_n)/\partial t)^T$ 是 $f(\mathbf{x})$ 随时间变化的规律, 它取决于多方面的因素, 在不同环境下有不同表现

[收稿日期] 2004-08-03; 修回日期 2004-09-05

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (69901005); 国防预研资助项目 (41303040203); 国家杰出青年资助项目 (60025102)

[作者简介] 李彦鹏 (1952-), 男, 河北衡水市人, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院讲师

形式。以 $g(x_i) > 0, i = 1, \dots, n$ 表示信息量的增加。

对矩阵 A 应用线性变换可以得到对角矩阵, 记

$$A = A_1 \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) A_2 \quad (4)$$

显然,

$$\frac{\partial(A_1^{-1}y)}{\partial t} = A \frac{\partial(A_2 f(x))}{\partial t} = A(A_2 g(x)), \quad (5)$$

为了计算简便, 忽略矩阵 A_1^{-1}, A_2 , 这样对最后结果的影响仅仅是一个线性变换, 所以

$$A_2 \partial y / \partial t = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) g(x) \quad (6)$$

称式(6)是目标识别系统的动态方程。

3 目标识别系统的动态方程符合动力系统特征的验证

式(6)代表了目标识别系统的动态模型, 它符合动力系统的特征^[7-9]。

1) 恒等公理 当 $g(x) = 0$, 即识别系统获得的关于目标的信息不变, 显然, 识别系统识别效果不变。

2) 群公理 没有其他条件的变化, 识别系统在 t_1 时刻表现出来的识别效果与在 $t_1 + t_2$ 时刻表现出来的识别效果一致。

3) 连续公理 识别系统获得的关于目标的信息连续变化时, 识别系统表现出来的识别效果也连续变化。

4 目标识别系统动态平衡的约束条件

记 $y \in R_+^n$ 表示 $\{y \in R_n, y_i \geq 0, i = 1, \dots, n\}$, $y \in \bar{R}_+^n$ 表示 $\{y \in R_n, y_i > 0, i \in K\}$, K 是 $(1, \dots, n)$ 的非空子集。 $y \in \bar{R}_+^n$ 含义是识别系统的识别效果处于一定的水平之上, 这里采用 0 做分界, 0 的含义不是获得的信息为 0, 只是一个标记。下面分析式(6)代表的系统平衡位置的约束条件。

1) $\exists \tau > 0$, 对所有 x_i 恒有

$$f(\tau x_i) = f(x_i), i = 1, \dots, n \quad (7)$$

其物理含义: 目标所含的信息量超过一定值以后, 它自身信息量的增加并不导致识别系统获得的信息量增加, 也就是说, 识别系统对目标特征信息的利用局限在一定范围(如, 时域、频域等)内进行, 识别系统所获得的目标特征信息不是无限增长的。

2) $\forall y \in R_+^n$, 有 $i = \partial f(x_i) / \partial x_j \geq 0, i \neq$

j 。其物理含义: 从目标 x_i 所获得的信息不会随着另一目标 x_j 即得的信息量增加而减少, 也就是说, 对一个目标获得的信息越多, 将它与其他目标区分相对来说更加容易。

3) $\forall y \in R_+^n$, 存在实数 ϵ , 恒有 $f(x_i) \geq \epsilon, i = 1, \dots, n$ 。其物理含义: 当系统能够达到一定的识别效果水平时, 从任意一个目标所获得的信息都超过了一定的底限。

4) $\forall y \in \bar{R}_+^n$, 当 $x_i (i = 1, \dots, n)$ 均确定时存在 x^*, y^* 满足

$$\partial y^* / \partial t = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) g(x^*), i = 1, \dots, n \quad (8)$$

也就是在 $(g(x^*), y^*)$ 建立平衡。

命题 1 在满足条件 1 至条件 4 时,

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i f(x_i) \quad (9)$$

是式(6)代表的识别系统的一个首项积分,

证明 根据题设

$$\frac{\partial F(x)}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{\partial f(x_i)}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \lambda_i g(x_i) \quad (10)$$

同时, 结合条件 1 至条件 6 对目标识别系统动态平衡特性进行分析。设 $(f(x^*), y^*)$ 是式(6)代表的识别系统的一个平衡位置, 当前位置是 $(f(x(t)), y(t))$, 从命题 1 出发, 得到函数

$$\left. \frac{\partial F(x)}{\partial t} \right|_{\text{式}(10)} =$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i (f(x_i(t)) - f(x_i^*)) \frac{\partial f(x_i(t))}{\partial t} \quad (11)$$

记 $\sigma(x) = \partial(F(x)) / \partial t |_{\text{式}(10)}$, 分情况来讨论目标识别系统动态平衡特性。

1) $(f(x(t)), y(t))$ 位于 $(f(x^*), y^*)$ 右侧, 此时 $f(x_i(t)) - f(x_i^*) > 0, i = 1, \dots, n$ 。

a. 识别系统获得的信息量仍在增加, 显然, 此时 $\frac{\partial f(x_i(t))}{\partial t} > 0, \sigma(x) > 0$, 系统处于不稳定, 尝试利用新增加信息建立新的平衡位置, 但是由于识别系统获得的信息量不可能无限增长, 最终会处于新的平衡状态。

b. 识别系统获得的信息量在减少, 此时 $\partial f(x_i(t)) / \partial t < 0, \sigma(x) < 0$, 系统处于稳定状态, 平衡位置趋于 $(f(x^*), y^*)$ 。

2) $(f(x(t)), y(t))$ 位于 $(f(x^*), y^*)$ 左侧, 此时 $f(x_i(t)) - f(x_i^*) < 0, i = 1, \dots, n$ 。

a. 识别系统获得的信息量在增加, 此时

$\partial f(x_i(t))/\partial t > 0, \sigma(x) < 0$, 系统处于稳定状态, 平衡位置趋于 $(f(x^*), y^*)$ 。

b. 识别系统获得的信息量仍在减少, 此时 $\partial f(x_i(t))/\partial t < 0, \sigma(x) > 0$, 系统处于不稳定, 系统尝试在信息减少情况下建立新的平衡位置, 但是由于识别系统获得的信息量必须超过某一特定的值, 低于该值时进入不稳定状态。

综上所述, 命题 1 成立。

5 目标识别系统动态平衡特性仿真

5.1 选择被评估的识别方法及测试条件

被评估的识别方法是 Prony 方法^[10]。

仿真中在文献 [11, 12] 给出的数据基础上产生拟合数据。目标是 F-18, Boeing 707 的缩比模型和细圆柱体, 分别记这三种目标为: 目标 f , 目标 B 和目标 Z 。它们处于正态分布的白噪声环境, 噪声均值是 4.06×10^{-2} , 方差是 8.33×10^{-3} 。

识别效果包含的内容很多, 仿真时仅考察正确识别率指标, 且考察的是识别算法对几个目标的总平均识别率。

仿真中假设目标处于运动状态, 且运动特征没有完全被补偿。没有被补偿的运动速度范围 $5 \sim 20$ m/s。

文献 [11, 12] 给出的数据有 7 个真实的极点, 记为 S_1, \dots, S_7 ; $f(x)$ 计算式:

$$f(x) = \sum_{i=1}^7 \sqrt{\frac{|S_i|}{(\tilde{S}_i - S_i)^2}} \quad (12)$$

\tilde{S}_i 代表目标运动时的极点。

仿真中识别效果的总体变化趋势见图 1。

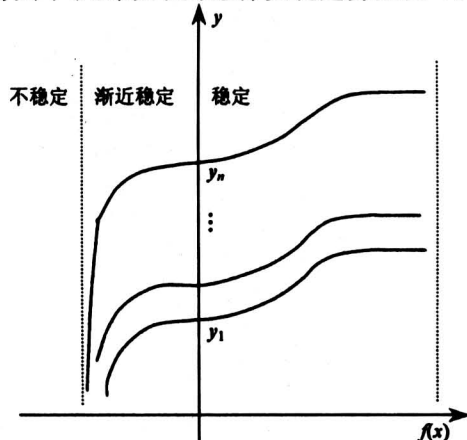


图 1 识别效果随获得信息量的变化趋势

Fig.1 The variation trend of recognition performance to information acquired

5.2 仿真结果分析

$\forall y \in \bar{R}_+,$ 存在实数 $\epsilon',$ 恒有 $f(x_i) \leq \epsilon', i = 1, \dots, n$ 。它的物理含义: 如果系统没有达到一定的识别效果, 则从任意一个目标所获得的信息肯定没有超过一定的底限 0。

$P(i) = \{y \in \bar{R}_+, g(x_i = C)\}, i = 1, \dots, n, C$ 为常数。若 $P(i)$ 非空, 则在 $P(i)$ 上 $y = D, D$ 为常数。它的物理含义是: 从所有目标所获得的信息都保持固定的水平, 则识别系统的识别效果恒定。

6 小结

1) 主要完成的几项工作: a. 建立识别系统的动态模型; b. 分析识别系统动态模型平衡位置需要满足的约束条件; c. 对目标识别系统识别效果动态稳定性的分析。

2) 利用李雅普诺夫稳定性理论进行目标识别系统识别效果稳定性分析的优势: a. 理论依据充分, 结论清晰明了; b. 在一旦找出识别系统获得的目标特征信息变化规律及某些情况下的识别效果后, 就可以进行全局的分析; c. 评估方法具有通用性, 可以适用于任何一种识别系统的评估。

3) 目标识别效果评估是一项难度较大的系统工程, 此方法虽然可以通用于对所有识别系统的评估, 与整个研究相比, 当属引玉之作。

致谢 这项研究受到武汉华中理工大学廖晓昕教授的热情指导, 谨致谢意。

参考文献

- [1] Hatem N Nasr. Automatic object recognition [A]. In: 1990 SPIE Automatic Object Recognition Conference, SPIE Proceedings Vol IS7 [C]. Cocoa Beach, Florida, 1990. 2~3
- [2] 郁文贤. 智能化识别方法及其在舰船雷达目标识别系统中的应用[D]. 长沙: 国防科技大学 ATR 国家重点实验室, 1992
- [3] Arnold C W. Improve ATR performance evaluation via mode seeking [A]. In: Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition IV Conference, WA SPIE Proceedings, Vol 2484 [C], Orlando, FL, Bellingham, 1995. 574~582
- [4] Dudgeon D E. ATR Performance Modeling and Estimation [R]. Available From NTIS No ADA357723/XAB, 1998
- [5] Mossing J C, Ross T D, Bradley J. Evaluation of SAR ATR Algorithm Performance Sensitivity to MSTAR

- extended Operating Conditions [R]. Available From NTIS No ADA357055/XAB, 1998
- [6] Bassham Christopher Brian. Automatic target recognition classification system evaluation methodology [D]. US: Air Force Institute of Technology, 2002
- [7] 廖晓昕. 稳定性的理论、方法和应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999. 20~136
- [8] 廖晓昕. 稳定性的数学理论及其应用[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 1988. 487~506
- [9] 廖晓昕. 动力系统的稳定性理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 296~358
- [10] 王保义, 时振栋. 电磁场在目标识别中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995. 72~77
- [11] Rothwell E J, Nyquist D P, Chen Kun mu, Drachman B. Radar target discrimination using the extinction-pulse technique [J]. IEEE Trans A P, 1985, 33(9): 929~936
- [12] Rothwell E J, Chen Kunmu, Nyquist D P, Sun Weimin. Frequency domain e-pulse synthesis and target discrimination [J]. IEEE Trans A P, 1987, 35(4): 426~434

Performance Evaluation in Automatic Target Recognition Based on Lyapunov Stability Theory

Li Yanpeng, Li Xiang, Wang Hongqiang, Zhuang Zhaowen, Liang Diannong
(*Institute of Space Electronics in Electronic Science and Engineering School of National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

[Abstract] Aiming at performance evaluation of automatic target recognition (ATR), the dynamic model is built. Then, with the application of Lyapunov stability theory, the stability of performance in ATR system is analyzed. At the same time, a simple simulation for the theory is given.

[Key words] automatic target recognition; performance evaluation; stability