

УДК 621.396.96

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕДУР РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА БАЙЕСОВСКОМ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КРИТЕРИЯХ

*А.С. ХРАМЕНКОВ, канд. техн. наук, доц. С.Н. ЯРМОЛИК
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)*

Рассмотрены алгоритмы радиолокационного распознавания класса наблюдаемых объектов, построенные в соответствии с байесовским решающим правилом и на основе последовательной решающей процедуры. Для анализируемых алгоритмов методом математического моделирования получены характеристики распознавания, отражающие качество функционирования рассматриваемых классификаторов. Показано, что последовательный алгоритм классификации характеризуется более высоким качеством принимаемых решений. При этом улучшение качества распознавания влечет за собой неизбежное увеличение времени на принятие решения о классе наблюдаемого объекта. Отмечено, что с целью недопущения затягивания процедуры распознавания целесообразно использовать усечение последовательного правила классификации.

Введение. Задача радиолокационного распознавания (РЛР) заключается в установлении факта принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу [1]. В основу классификации объектов положено сопоставление доступных радиолокационному наблюдению признаков и априорно известных (эталонных) данных, характеризующих наблюдаемые объекты. Методы сопоставления признаков определяют алгоритмы классификации объектов [2].

Процесс распознавания радиолокационных объектов неизбежно затрудняется наличием сложной помеховой обстановки. В связи с этим задача классификации объектов, как правило, решается статистическими методами. В большинстве практических случаев для решения задач радиолокационного распознавания используют процедуру с фиксированным объемом выборки [2].

Примером данного подхода является критерий Байеса, минимизирующий величину среднего риска. Известное байесовское решающее правило [1] предполагает формирование M (по числу распознаваемых классов) отношений правдоподобия. Решение о классе наблюдаемого объекта принимается в пользу класса, характеризующегося максимальным значением отношения правдоподобия или его монотонной функции.

Решение о наблюдении объекта k -го класса принимается при выполнении условия:

$$\text{если } Z_k > Z_l, \text{ для всех } l = \overline{1, M}, l \neq k, \quad (1)$$

где $Z_k = \ln \frac{p_{k0}(\xi)}{p_0(\xi)}$ – логарифм отношения правдоподобия, сформированный при условии наблюдения

цели k -го класса; $Z_l = \ln \frac{p_{l0}(\xi)}{p_0(\xi)}$ – логарифм отношения правдоподобия, сформированный при условии

наблюдения цели l -го класса; $p_{k0}(\xi)$ ($p_{l0}(\xi)$) – многомерная плотность вероятности (МПВ) дискретных отсчетов смеси сигнала, отраженного от объекта k (l -го класса и фона; $p_0(\xi)$ – МПВ дискретных отсчетов радиолокационного фона.

Наблюдаемый N -элементный вектор принятого сигнала ξ представляет собой аддитивную смесь сигнальной составляющей радиолокационного портрета (РЛП) цели k -го класса $\xi_k = \{\xi_1^k, \xi_2^k, \dots, \xi_N^k\}$ и фона $\xi_0 = \{\xi_1^\phi, \xi_2^\phi, \dots, \xi_N^\phi\}$ [1].

В ряде случаев распознавание наблюдаемых объектов может производиться на основе последовательных процедур принятия решений [3, 4]. В [5] рассматривается метод проверки гипотез, в котором решение принимается на основе последовательных опытов. Применительно к задаче радиолокационного распознавания рассматриваемая процедура классификации предполагает последовательное во времени обращение к наблюдаемой цели. Решение о классе наблюдаемого объекта принимается в результате последовательного исключения наименее вероятных гипотез о классе объекта. Вес каждой из анализируемых гипотез определяется совокупностью отношений правдоподобия, рассчитываемых по каждому из распознаваемых классов с учетом предыдущих наблюдений. Исключение анализируемых гипотез производится на основании сравнения сформированной решающей статистики в каждом канале со своим пороговым уровнем. При этом величина останавливающих границ (порогов) выбирается исходя из требуемых значений вероятностей распознавания.

Определенный интерес представляет сравнение эффективности функционирования алгоритмов классификации радиолокационных объектов, характеризующихся фиксированной длительностью (одиночным контактом с целью) и последовательными обращениями к наблюдаемому объекту.

Качество принимаемых решений о классе наблюдаемых объектов принято характеризовать совокупностью M условных вероятностей правильного распознавания

$$D_k = P(A_k^*/A_k), \quad k = \overline{1, M} \quad (2)$$

и $M(M - 1)$ условных вероятностей ошибочного (ложного) распознавания

$$F_{k/l} = P(A_k^*/A_l); \quad l, k = \overline{1, M}, \quad l \neq k. \quad (3)$$

При этом удобной характеристикой эффективности ложных решений является средняя вероятность ложного распознавания объекта k -го класса

$$F_k = \frac{1}{M-1} \sum_{l=1, l \neq k}^M F_{k/l}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что важным свойством последовательных процедур проверки гипотез является средняя длительность процедуры принятия решения [3].

В интересах сопоставительного анализа процедур радиолокационного распознавания наблюдаемых объектов, основанных на байесовском и последовательном критериях, целесообразно использовать оценку характеристик распознавания применительно к каждому из анализируемых алгоритмов с учетом особенностей их реализации.

Последовательное устройство радиолокационного распознавания. В основе последовательной процедуры классификации объектов лежит последовательный критерий отношения вероятностей, предложенный А. Вальдом [3]. В [5] была развита идея использования последовательного критерия отношения вероятностей применительно к многоальтернативной ситуации. Результатом обобщения и перехода к задаче многоальтернативного распознавания явился обобщенный последовательный критерий отношения вероятностей.

В общем случае последовательная процедура распознавания наблюдаемых радиолокационных объектов предполагает формирование на каждом шаге анализа значения обобщенного отношения правдоподобия

$$W_k^n = \frac{p_k^n(\xi)}{\sqrt[M]{\prod_{l=1}^M p_l^n(\xi)}}, \quad k = \overline{1, M}, \quad (5)$$

где $p_k^n(\xi)$ ($p_l^n(\xi)$) – многомерная плотность вероятности дискретных отсчетов смеси сигнала, отраженного от объекта k (l -го класса и фона, наблюдаемых на n -м шаге; $k = \overline{1, M}$ – номер канала обработки (соответствует номеру распознаваемого класса).

Процедура определения класса наблюдаемого объекта заключается в последовательном исключении из анализа эталонных образов, наименее подобных входному радиолокационному портрету. С этой целью сформированная величина W_k^n сравнивается со значением останавливающей границы для k -го класса образов W_k^{n*} .

Решение об исключении из дальнейшего анализа эталонного образа k -го класса как наименее вероятного принимается при выполнении условия:

$$\text{если } W_k^n < W_k^{n*}, \quad k = \overline{1, M}. \quad (6)$$

Останавливающие границы для каждого из анализируемых классов (W_k^{n*}) выбираются исходя из требуемых значений показателей качества радиолокационного распознавания (2), (3).

В качестве останавливающих границ в [5] предложена следующая функциональная зависимость от вероятностей распознавания:

$$W_k^{n*} = \frac{1 - D_k}{\sqrt[M]{\prod_{l=1}^M (1 - F_{k/l})}}, \quad k = \overline{1, M}, \quad (7)$$

где $D_k = F_{k/k}$ – условная вероятность правильного распознавания объекта k -го класса; $F_{k/l}$ – условная вероятность ложного распознавания цели k -го класса при наблюдении объекта $l \neq k$ -го класса.

При выполнении условия (6) общее число анализируемых классов уменьшается (становится равным $M - 1$). При этом соответственно изменяются останавливающие границы (7), после чего процедура анализа последовательно повторяется. Процесс наблюдения продолжается до тех пор, пока не останется один (наиболее вероятный) класс, к которому и относят распознаваемый объект. Графическая интерпретация этапов последовательной процедуры распознавания объектов трех классов ($M = 3$) представлена на рисунке 1.

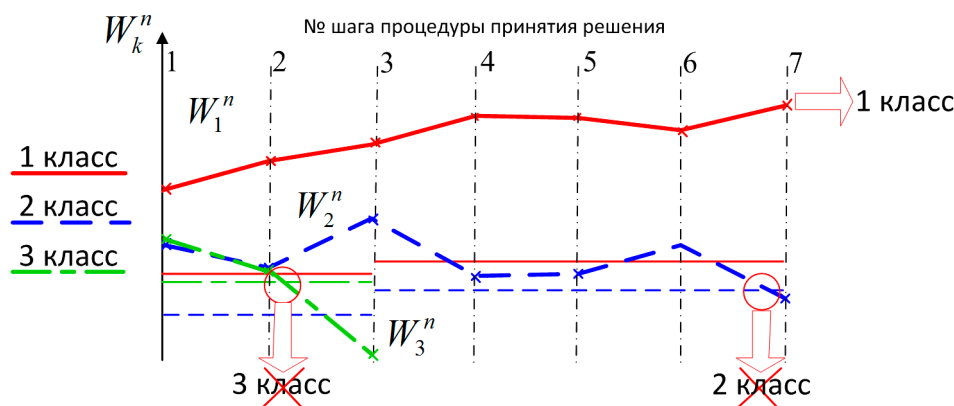


Рис. 1. Графическая интерпретация последовательной процедуры распознавания

Очевидно, что после шага $n = 2$ из дальнейшего анализа исключается один из классов объектов (объект 3 класса). При этом останавливающие границы для оставшихся классов соответственно изменяются. Решение о наблюдении объекта 1 класса принимается на шаге $n = 7$.

При наблюдении радиолокационных объектов в большинстве случаев реализации принятого сигнала характеризуются гауссовскими плотностями вероятности отсчетов [1]. В этом случае удобно осуществить переход к анализу логарифмов обобщенного отношения правдоподобия (5), которые могут быть представлены в следующем виде:

$$U_k^n = \ln W_k^n = \frac{M-1}{M} Z_k^n - \frac{1}{M} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M Z_l^n, \quad k = \overline{1, M}, \quad (8)$$

где U_k^n – решающая статистика, сформированная в k -м канале обработки на n -м шаге наблюдения;

$W_k^n = \frac{p_k^n(\xi)}{p_0^n(\xi)} \sqrt[M]{\prod_{l=1}^M \frac{p_l^n(\xi)}{p_0^n(\xi)}}$ – обобщенное отношение правдоподобия, сформированное с учетом логарифмов ОП в

k -м канале обработки на n -м шаге; $Z_k^n = \ln \frac{p_k^n(\xi)}{p_0^n(\xi)}$ – логарифм отношения правдоподобия, сформированный при условии наблюдения цели k -го класса на n -м шаге наблюдения.

Переход к анализу логарифмов обобщенного отношения правдоподобия (8) требует соответствующей корректировки останавливающих границ (7).

Полученные значения решающей статистики (U_k^n) сравниваются с порогами U_k^{n*} , которые определяются выражением:

$$U_k^{n*} = \frac{M-1}{M} \ln(1 - D_k) - \frac{1}{M} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \ln(1 - F_{k/l}), \quad k = \overline{1, M}. \quad (9)$$

Необходимо отметить, что алгоритмы радиолокационного распознавания объектов, характеризующихся фиксированной длительностью (1) и последовательными обращениями к наблюдаемому объекту (8), содержат общую процедуру вычисления логарифма отношения правдоподобия.

Для сопоставительного анализа качества функционирования рассматриваемых алгоритмов радиолокационного распознавания целесообразно использовать схему, приведенную на рисунке 2.

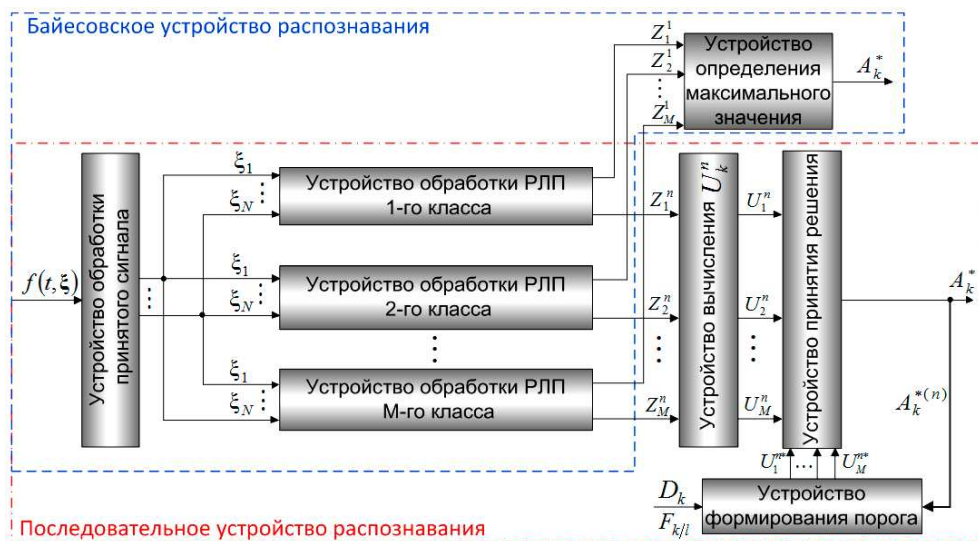


Рис. 2. Схема сравнения байесовского и последовательного устройств распознавания

На выходе устройства обработки принятого сигнала формируется N -элементный радиолокационный портрет, который поступает на входы устройств обработки РЛП. Многоканальное устройство обработки РЛП формирует на выходе значения логарифма отношения правдоподобия для каждого из M распознаваемых классов. Байесовский алгоритм распознавания (1) принимает решение о классе наблюдаемого объекта в пользу класса, характеризующегося максимальным значением логарифма отношения правдоподобия ($Z_k^{n=1}$). Последовательное устройство распознавания на основе сформированных логарифмов отношений правдоподобия рассчитывает текущее значение логарифма обобщенного отношения правдоподобия (U_k^n). Устройство формирования порога на основе значений условных вероятностей распознавания формирует останавливающие границы (U_k^{n*}), позволяющие исключить наименее вероятные гипотезы. Решение о классе наблюдаемого объекта принимается в пользу последнего оставшегося класса.

Результаты математического моделирования и обсуждения. Для сопоставительного анализа процедур радиолокационного распознавания наблюдаемых объектов, основанных на байесовском и последовательном критериях, использован метод математического моделирования. При этом моделировался процесс принятия решений о классе аэродинамических объектов (см. рис. 2), отличающихся шириной временной корреляционной функции. При математическом моделировании использовались многоэлементные флуктуационные радиолокационные портреты целей трех классов [1].

Для моделирования задавались следующие исходные данные: $N = 20$ – число элементов радиолокационного портрета; $\tau_1 = 100$ мс – время корреляции флуктуаций отраженного сигнала для цели 1-го класса; $\tau_2 = 70$ мс – время корреляции флуктуаций отраженного сигнала для цели 2-го класса; $\tau_3 = 50$ мс – время корреляции флуктуаций отраженного сигнала для цели 3-го класса.

Эффективность распознавания характеризовалась значениями условных вероятностей принятия решений о классе наблюдаемого объекта (2), (3), (4). Следует отметить, что в последовательном классификаторе для текущего отношения сигнал/шум (ρ) использовались останавливающие границы (9), рассчитываемые на основе соответствующих вероятностных характеристик ($F_{k/l}$ и D_k) устройства распознавания по критерию Байеса.

Показатели качества функционирования анализируемых классификаторов, полученные методом математического моделирования для заданных условий наблюдения, приведены на рисунке 3.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении вероятностей правильного распознавания при использовании последовательного алгоритма классификации. Полученный выигрыш обусловлен увеличением количества информации, извлекаемого системой в результате дополнительных контактов с наблюдаемым объектом. При этом для обеспечения возможности реализации алгоритма последовательного распознавания требуется соответствующее время наблюдения.

На рисунке 3, б представлены зависимости средней длительности процедуры правильного \bar{n}_k и ложного \bar{n}_{ok} распознавания ($k = \overline{1,3}$) от отношения сигнал/шум (ρ) для последовательного устройства распознавания.

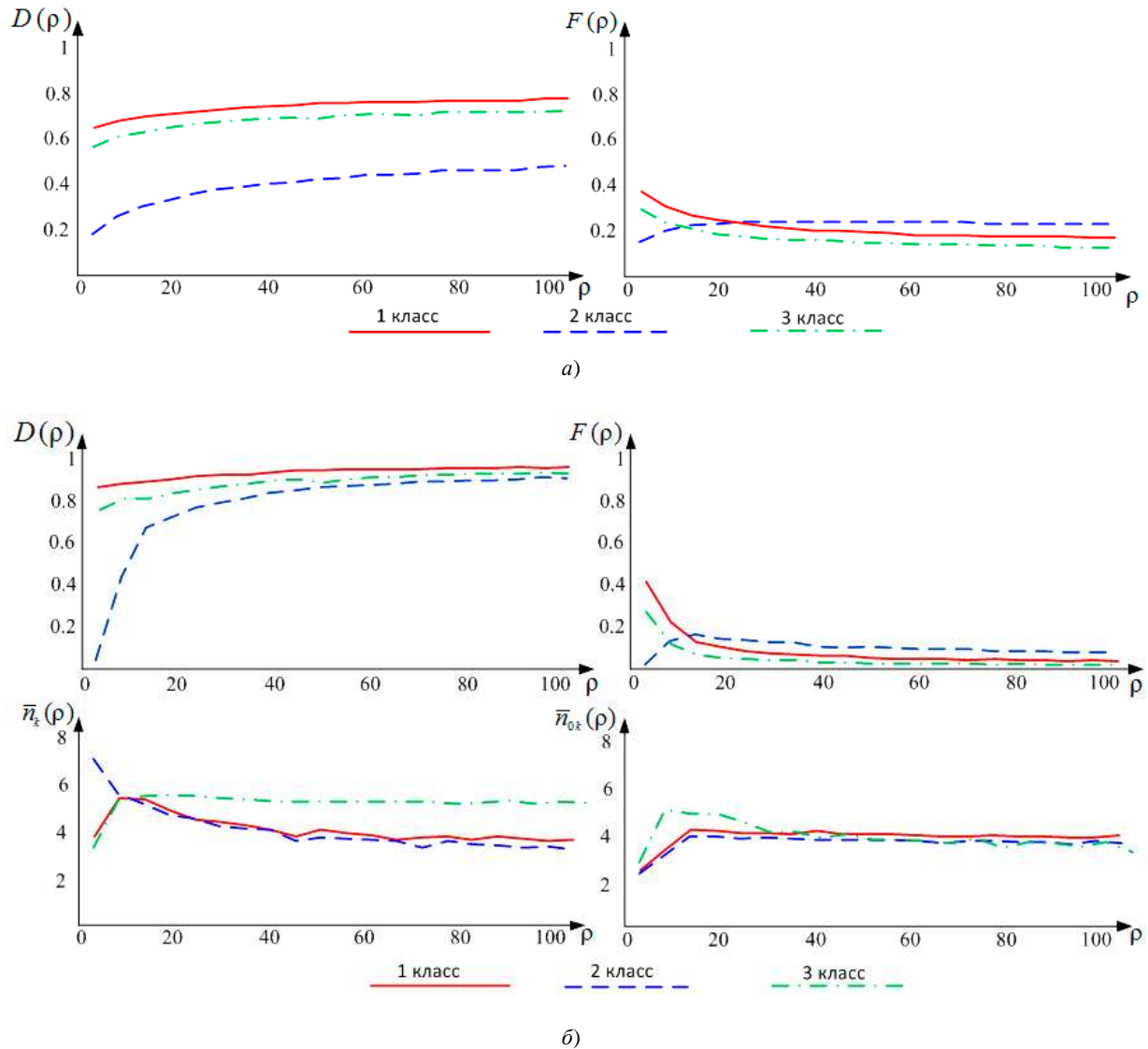


Рис. 3. Показатели качества радиолокационного распознавания:
 а – байесовская решающая процедура;
 б – последовательная процедура принятия решения

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в практически важных случаях длительность процедуры распознавания слабо зависит от отношения сигнал/шум. Минимальная длительность процедуры классификации определяется числом распознаваемых классов ($M - 1$ шагов). Кроме того, существуют значения отношения сигнал/шум, при достижении которых средняя длительность процедуры практически не изменяется. Однако бывают случаи, когда длительность процедуры определения класса наблюдаемого объекта может существенно превышать среднюю длительность или располагаемое время наблюдения объекта (рис. 4). В таких случаях существует возможность усечения последовательной процедуры распознавания [4]. Процесс классификации длится до заданного шага, если решение не принято, то наблюдаемую цель относят к классу, характеризующемуся максимальным значением логарифма обобщенного отношения правдоподобия (8). Такого вида усечение является попыткой объединить в себе положительные качества последовательного критерия и критерия Байеса.

Заключение. Сопоставительный анализ процедур радиолокационного распознавания, основанных на байесовском и последовательном критериях, показал, что последовательный алгоритм классификации характеризуется более высоким качеством принимаемых решений. Вместе с тем улучшение качества распознавания имеет своим следствием неизбежное увеличение времени на принятие решения о классе наблюдаемого объекта. Отмечено, что с целью недопущения затягивания процедуры распознавания целесообразно использовать усечение последовательного правила классификации.

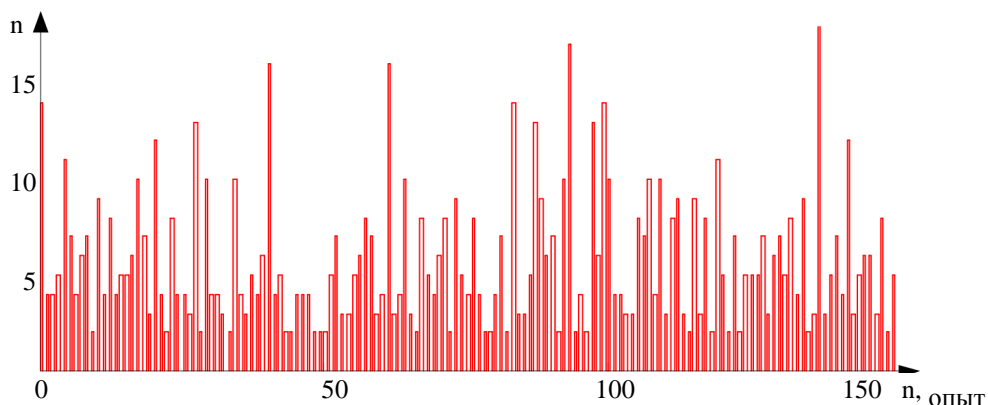


Рис. 4. Длительность процедуры принятия решения при последовательном распознавании

ЛИТЕРАТУРА

1. Охрименко, А.Е. Основы извлечения, обработки и передачи информации / А.Е. Охрименко. – Минск: БГУИР, 1994. – Ч. 3: Распознавание – различение сигналов. – 64 с.
2. Фукунага, К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / К. Фукунага. – М.: Наука, 1979. – 367 с.
3. Вальд, А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М.: Физматгиз, 1960. – 328 с.
4. Фу, К. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу. – М.: Наука, 1971. – 256 с.
5. Reed, F.C. A sequential multidecision procedure / F.C. Reed // Proc. Symp. On Decision Theory and Appl. Electron Equipment Develop. – 1960.

Поступила 09.01.2014

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF RADAR RECOGNITION PROCEDURES BASED ON BAYESIAN AND SEQUENTIAL ALGORITHMS

A. KHRAMENKOV, S. YARMOLIK

The article describes radar recognition algorithms of class observe objectives based on Bayesian and sequential procedures. Recognition characteristics were got for these algorithms by mathematical modeling. Recognition characteristics demonstrated operation quality of these algorithms. The sequential algorithm has higher recognition quality than Bayesian were achieved in the article. Increase of decision-making time to present a pay for improvement recognition quality. Truncation of sequential algorithm used for prevention delay of recognition procedure.