

## СПОСОБ АДАПТИВНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ Артиллерийских систем с использованием метода Левенберга–Марквардта

*Леонович А.С.<sup>1</sup>, Свинарский М.В.<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>адъюнкт и <sup>2</sup>ст. преподаватель кафедры автоматизи, радиолокации  
и приемо-передающих устройств УО «ВА РБ», г. Минск, Республика Беларусь  
Научный руководитель – Ярмолик С.Н., канд. тех. наук, доцент*

Ключевые слова. Радиолокационное распознавание, метод Левенберга–Марквардта.  
Keywords. Radar recognition, Levenberg – Marquardt method.

В современных вооруженных конфликтах широко применяется массированный артиллерийский огонь. Успех боевых действий войск артиллерии во многом зависит от эффективности действий подразделений артиллерийской разведки. Основным источником информации об огневых средствах противника являются радиолокационные станции контрбатареинной борьбы (РЛС КББ) [1]. К основным задачам артиллерийской разведки можно отнести: своевременное обнаружение (вскрытие) целей (объектов), тактических группировок противника, опорных пунктов, пунктов управления, радиоэлектронных средств, точное определение их местоположения (координат), а также распознавание класса стреляющей артиллерийской системы [1]. Информация о классе стреляющей артиллерийской системы, используемая на всех уровнях управления, позволяет повысить эффективность современного боя путем оперативного вскрытия тактики ведения боя противника, выделения наиболее опасных целей, их первоочередного уничтожения оптимальным количеством и типом расходуемых боевых средств. В связи с этим задача радиолокационного распознавания (РЛР) класса стреляющей артиллерийской системы противника принимает особую актуальность.

Задача РЛР заключается в установлении факта принадлежности наблюдаемого радиолокатором объекта к определенному классу (типу) путем сопоставления наблюдаемых классификационных признаков артиллерийских снарядов с их эталонными значениями. По результатам сопоставления классификационных признаков анализируемых снарядов принимается решение о классе (типе) стреляющей системы [2].

Для решения задачи РЛР артиллерийских систем, в качестве классификационных признаков широко используют сигнальную и траекторную информацию наблюдаемых снарядов. Сигнальная информация о классе артиллерийской системы не всегда является достаточно информативной (ввиду малых геометрических размеров снарядов и незначительного уровня спектральных компонент отраженных сигналов). В связи с этим в интересах решения задачи РЛР целесообразно использовать траекторную информацию. Под траекторной информацией наблюдаемого артиллерийского снаряда понимают траекторию его полета, а также минимально и максимально возможные значения дальности полета, высоты, бокового отклонения и скорости. Проведенный анализ показал, что наиболее доступным источником радиолокационной информации о классе применяемых противником артиллерийских систем являются траектории полета их снарядов.

Таким образом, цель исследования представленной работы заключается в анализе способа РЛР стреляющих артиллерийских систем, с использованием оптимизационного метода Левенберга – Марквардта (МЛМ).

**Материал и методы.** В основе решения задачи РЛР класса стреляющей артиллерийской системы лежит сопоставление наблюдаемого радиолокатором участка траектории полета снаряда противника с участками, полученными при помощи верифицированных математических моделей систем распознаваемых классов [1, 2, 3]. Важно отметить, что анализируемые траектории снарядов распознаваемых классов характеризуются набором параметров, соответствующим начальным условиям стрельбы: начальная скорость полета снаряда  $V_0$ , начальный угол наклона траектории полета

снаряда  $\theta_0$ , начальный угол курса вектора скорости снаряда  $\varphi_0$ , точка старта анализируемого снаряда  $X_0, Z_0$ , масса снаряда  $m$ , его калибр  $d$ . В связи с этим, в интересах РЛР важно обеспечить правильный выбор начальных параметров эталонных (разработанных) траекторий, т.е. произвести адаптацию эталонных траекторий к текущим условиям наблюдения распознаваемого снаряда.

Решение задачи выбора начальных параметров эталонных траекторий к неизвестным начальным условиям стрельбы целесообразно свести к оптимизационной задаче, обеспечив итерационный поиск оптимальных начальных параметров анализируемой траектории.

Проведенный анализ литературы показал, что в интересах оптимизации (адаптации) набора начальных параметров эталонной траектории полета анализируемого снаряда, к участку траектории, наблюдаемому радиолокатором, весьма эффективным является МЛМ [4]. Данный подход сочетает в себе методы градиентного спуска и Ньютона-Гаусса [4]. Как известно, положительные свойства метода градиентного спуска заключаются в гарантированной сходимости к экстремуму функции с любых начальных приближений при условии, что анализируемая функция имеет один глобальный экстремум. При этом метод характеризуется большим количеством итераций. В свою очередь метод Ньютона-Гаусса, основываясь на квадратичности функции, обладает хорошими показателями сходимости, однако его скорость сходимости существенно зависит от задания начальных приближений исследуемой функции (рисунок 1).

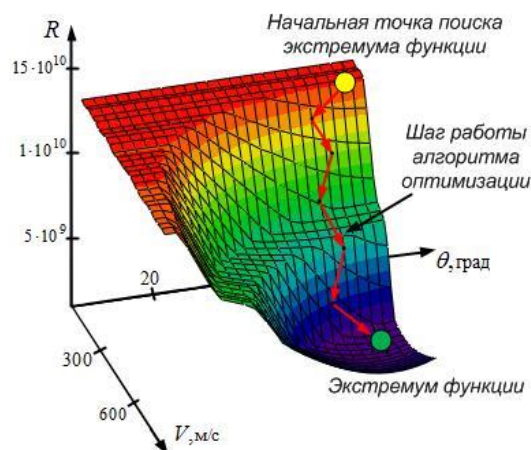


Рисунок 1 – Пример работы алгоритма оптимизации

С учетом вышеизложенного, оптимизационный МЛМ целесообразно использовать для адаптации параметров верифицированных математических моделей траекторий снарядов к начальным условиям стрельбы наблюдаемого объекта. Оценка степени близости наблюдаемого участка траектории сопровождаемого объекта и эталонных участков траекторий, полученных при помощи верифицированных математических моделей, позволяет определять класс (тип) стреляющей артиллерийской системы. Решение выносится в пользу класса (типа) объекта, который характеризуется минимальной суммой квадратов невязок  $R$ .

**Результаты и их обсуждение.** Для оценки качества работоспособности рассмотренного в докладе способа РЛР класса стреляющей артиллерийской системы проводилось математическое моделирование. В ходе моделирования анализировалось три класса стреляющих систем ( $M = 3$ ): 1 класс – миномет (2Б14 «Поднос»), 2 класс – гаубица (Д-20), 3 класс – реактивная система залпового огня («Град»).

Исходные данные, используемые при моделировании траекторий полета объектов распознаваемых классов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные начальных параметров траекторий полета распознаваемых снарядов

Исходные данные	$V_0$ , м/с	$\theta_0$ , град	$\varphi_0$ , град	$X_0$ , м	$Z_0$ , м	$m$ , кг	$d$ , м
Минометная мина	211	45	95	3693	852	3,1	0,082
Гаубичный снаряд	508	45	107	8514	-3099	40	0,152
Реактивный снаряд	50	45	120	9400	-3421	66	0,122

Результаты математического моделирования в виде графиков условных вероятностей правильного  $D_i$  (где  $i=0..M-1$ ) и ложного РЛР  $F_i$  класса артиллерийской системы, зависящие от отношения сигнал-шум  $\rho$ , представлены на рисунке 2.

Анализ характеристик РЛР показывает, что при малых отношениях сигнал-шум  $\rho=0,5$  вероятность правильного распознавания  $D_i$  минометной мины не менее 0,65, при этом вероятность правильного распознавания гаубичного и реактивного снаряда не ниже 0,9. При больших отношениях сигнал-шум вероятность правильного распознавания минометной мины, гаубичного и реактивного снаряда стремятся к 1. Данный факт обусловлен тем, что при увеличении отношения сигнал-шум среднеквадратическое отклонение измеряемых РЛС КББ параметров уменьшается, обеспечивая повышение точности оценивания параметров.

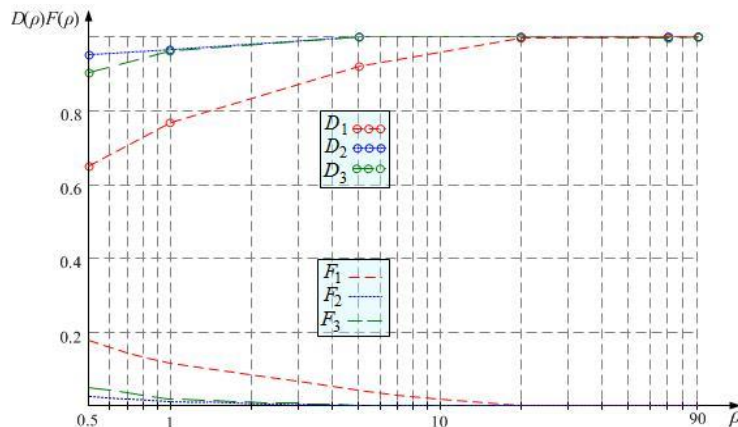


Рисунок 2 – Характеристики распознавания классов артиллерийских систем

**Заключение.** Представленный способ РЛР класса артиллерийских стреляющих систем с использованием МЛМ позволяет производить классификацию наблюдаемых артиллерийских снарядов с высокой вероятностью правильного распознавания при приемлемых отношениях сигнал-шум.

1. Ярмолик, С.Н. Математическая модель динамики минометной мины и ее верификация по таблицам стрельбы / С.Н. Ярмолик [и др.] // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2022. – № 1. – С. 87–96.
2. Ярмолик, С.Н. Модифицированная модель кинематики артиллерийского снаряда и ее верификация по таблицам стрельбы / С.Н. Ярмолик [и др.] // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2021. – № 2. – С. 94–103.
3. Khalil, M. Trajectory Prediction for a Typical Fin Stabilized Artillery Rocket / M. Khalil, H. Abdalla, O. Kamal // Aerospace sciences and aviation technology, ASAT-13, May 26 – 28. – 2009. – 14 p.
4. Андреев, В.В. Программное приложение для решения задач оптимальной параметрической идентификации динамических моделей: применение для прогнозирования динамики социально-экономической системы США / В.В. Андреев, М.И. Семенов // Прикладная информатика. – 2010. – № 2. – С. 46–57.