

УДК [623.4+621.396.96]:355.40

## **СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕК СТАРТА (ПАДЕНИЯ) СНАРЯДОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАДИОЛОКАЦИОННОЙ Артиллерийской РАЗВЕДКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИМИЗАЦИОННОГО МЕТОДА**

ЛЕОНОВИЧ А. С., ЯРМОЛИК С. Н., СВИНАРСКИЙ М. В.

*Военная академия Республики Беларусь  
(г. Минск, Беларусь)*

**Аннотация.** Представлен способ решения задачи определения точек старта (падения) применяемых противником боеприпасов с помощью оптимизационного метода. В качестве оптимизационного метода использовался алгоритм Левенберга-Марквардта. Эффективность предложенного способа решения задачи определения точки старта (падения) артиллерийского снаряда оценивалась методом математического моделирования.

**Abstract.** A method for solving the problem of determining the start (fall) points of ammunition used by the enemy using the optimization method is presented. The Levenberg-Marquardt algorithm was used as an optional method. The effectiveness of the proposed method for solving the determination of the point of launch (fall) of an artillery shell was evaluated by the method of mathematical modeling.

### **Введение**

Для эффективного поражения огневых средств противника, необходимо располагать оперативной информацией о его местоположении, группировках его живой силы, огневых средств, позициях артиллерийских и минометных батарей, характере и положении оборонительных сооружений и заграждений. Весьма важной информацией, востребованной в ходе артиллерийского боя, является определение точек старта (падения) артиллерийских снарядов и минометных мин. Получение данного вида информации достигается в ходе ведения разведки: оптической, звуковой, воздушной и радиолокационной. В интересах получения наиболее достоверной информации о воздушно-помеховой обстановке необходимо комплексное использование всех видов разведки [1, с. 104–123].

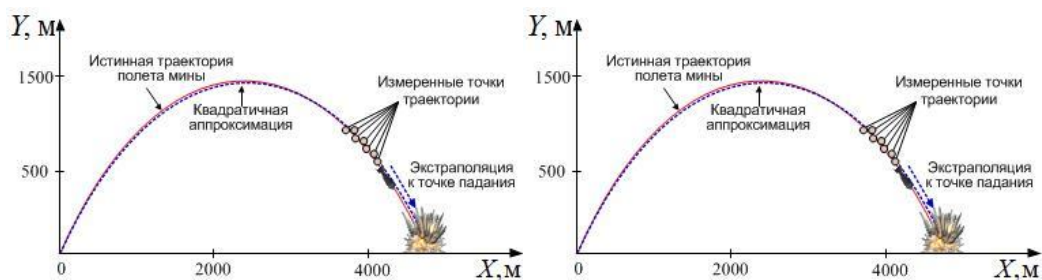
В докладе рассмотрен способ решения задачи определения точек старта (падения) снарядов, применительно к радиолокационной артиллерийской разведке с использованием оптимизационного метода.

### **Основная часть**

Применительно к радиолокационной разведке основным источником информации о положении огневых средств противника на местности выступают радиолокационные станции контрбатарейной борьбы (РЛС КББ). Использование таких станций позволяет определять координаты позиций реактивных систем залпового огня (РСЗО), артиллерийских и минометных установок, пусковых установок тактических ракет и др. (определение точек старта), осуществлять распознавание класса применяемой артиллерийской стреляющей системы, обслуживать стрельбу собственных огневых средств поражения (определение точек падения) [2].

Принцип работы РЛС КББ основывается на засечке координат полета артиллерийских снарядов на различных участках полета (в зависимости от выполняемой задачи) с целью расчета его траектории. На основе пролонгации и экстраполяции измеренных координат траектории полета снаряда определяется местоположение огневых средств противника [2]. В основе модели экстраполяции и пролонгации измеренных значений координат траектории полета сопровождаемого снаряда заложена квадратичная аппроксимация (парабола), характерная для полета типовых минометных мин. Траектории артиллерийских и реактивных снарядов квадратичной аппроксимации не соответствуют, поэтому требуют более детального вида модели

траектории, а, следовательно, и более сложный способ определения точек старта (падения) артиллерийского снаряда (рисунок 1).



**Рис. 1.** Пример решения задачи экстраполяции квадратичной аппроксимацией, с целью определения точки падения мины и артиллерийского снаряда

В связи с этим, для определения точек старта (падения) артиллерийских снарядов предлагается использовать верифицированные математические модели траектории полета снарядов [3,4]. Результатом расчета математических моделей траекторий полета являются прямоугольные координаты, описывающие траекторию полета анализируемых снарядов. Следует отметить, что разработанные математические модели учитывают задаваемые начальные условия стрельбы.

Сложность решения задачи определения точек старта (падения) снарядов предложенным способом обусловлена заранее неизвестными начальными условиями стрельбы. Под начальными условиями стрельбы принято понимать вектор неизвестных параметров, который характеризует траекторию полета анализируемого снаряда (1):

$$\mathbf{x} = \|V_0, \theta_0, \varphi_0, X_0, Z_0, m, d\|^T, \quad (1)$$

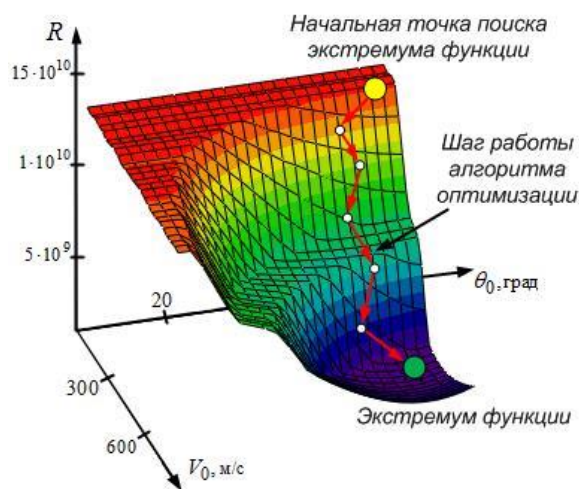
где  $V_0$  – начальная скорость полета анализируемого снаряда;  $\theta_0$  – начальный угол наклона траектории полета снаряда;  $\varphi_0$  – начальный угол курса вектора скорости мины;  $X_0, Z_0$  – точка старта анализируемого снаряда;  $m$  – масса снаряда;  $d$  – калибр снаряда.

Поиск истинного вектора начальных параметров измеренного участка траектории полета артиллерийского снаряда осуществляется до тех пор, пока сумма квадратов отклонений между наблюдаемым участком и участком, полученным при помощи расчета математической модели не будет минимальным ( $R \rightarrow \min$ ) (рисунок 2).



**Рис. 2.** Иллюстрация решения задачи адаптации к начальным условиям наблюдения

Проведенный анализ литературы показал, что в интересах адаптации вектора начальных параметров  $x$  эталонной траектории полета анализируемого снаряда, к участку траектории, наблюдаемому радиолокатором, весьма эффективным является метод Левенберга-Марквардта (МЛМ). Данный подход сочетает в себе методы градиентного спуска и Ньютона-Гаусса. 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 [3]. В качестве примера на рисунке 3 приведен итерационный поиск точки минимума функции величины рассогласования ( $R$ ), применительно для двух начальных параметров: скорости ( $V_0$ ) и угла наклона траектории полета снаряда ( $\theta_0$ ).



**Рис. 3.** Пример работы алгоритма оптимизации

С учетом вышеизложенного, оптимизационный МЛМ целесообразно использовать для поиска начальных параметров верифицированных математических моделей траекторий полета снарядов к начальным условиям стрельбы наблюдаемого объекта. Результат нахождения измеренного вектора начальных параметров  $\hat{x} = \|V_0, \theta_0, \varphi_0, X_0, Z_0\|^T$  позволяет определить точку старта (падения) наблюдаемого снаряда, путем расчета математической модели траектории полета снаряда.

Оценка эффективности предложенного способа определения точек старта (падения) проводилась методом математического моделирования. В качестве исходных данных использовались тактико-технические характеристики снаряда для гаубицы – Д-20. Необходимо отметить, что для определения точки падения наблюдаемого снаряда необходимо анализировать нисходящую ветвь траектории полета, для определения точки старта – восходящую ветвь траектории полета артиллерийского снаряда.

В ходе математического моделирования оценивалась точка падения анализируемого снаряда. Исходные данные для моделирования траектории полета артиллерийского снаряда, представлены в таблице 1.

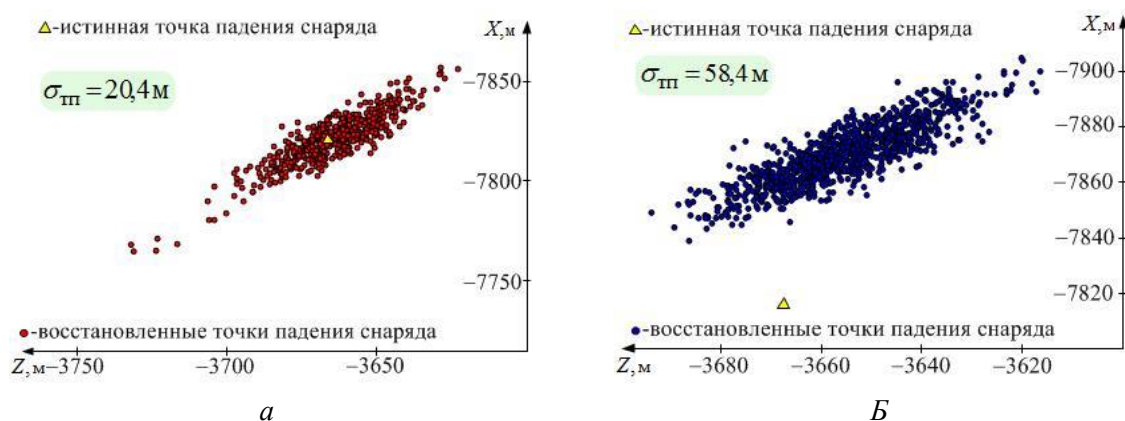
**Таблица 1.** Исходные данные начальных параметров траекторий полета артиллерийского снаряда

Исходные данные	$V_0$ , м/с	$\theta_0$ , град	$\varphi_0$ , град	$X_0$ , м	$Z_0$ , м	$m$ , кг	$d$ , м
Нисходящий участок	508	45	25	-3434	-9435	40	0,152

В качестве показателей, характеризующих эффективность предложенного способа определения координат огневых средств противника, использовалось среднее квадратическое отклонение (СКО) координат точек старта (падения) применяемого снаряда. Методом статистических испытаний рассчитана среднее квадратическая ошибка определения точки падения анализируемого снаряда.

В ходе математического моделирования использовались следующие тактико-технические характеристики применяемой РЛС КББ:  $\Delta\beta = 2$  град – ширина ДНА по азимуту;  $\Delta\varepsilon = 2$  град – ширина ДНА по углу места;  $\Delta r = 75$  м – разрешающая способность по дальности;  $\Delta t = 0,1$  с – период обзора РЛС;  $T_n = 6$  с – время радиолокационного наблюдения снаряда;  $\rho = 20$  дБ – отношение сигнал-шум. При этом количество наблюдаемых точек траектории составляло  $N_T = 60$ . Для оценивания СКО ошибки определения точки падения снаряда проводилось  $N = 10^5$  опытов.

Результаты математического моделирования в виде оценок точек падения снаряда в горизонтальной плоскости (где  $X$  – направление на север,  $Z$  – на восток) представлены на рисунке 4.



**Рис. 4.** Результат определения точки старта и падения артиллерийского снаряда:  
а – с использованием оптимизационного метода; б – с использованием параболической аппроксимации.

Таким образом, результаты математического моделирования подтверждают эффективность предложенного способа решения задачи определения точек старта (падения) наблюдаемых снарядов. Необходимо отметить, что для решения задачи определения точки старта (падения) снаряда предложенным способом, необходимо знать анализируемый класс наблюдаемого снаряда.

### Заключение

Представленный подход к решению задачи определения точек старта и падения наблюдаемого снаряда является весьма эффективным, ввиду того, что верифицированная математическая модель траектории полета снаряда учитывает все особенности внешней баллистики, делая траекторию полета весьма приближенной к реальной.

Нахождение вектора неизвестных параметров методом Левенберга-Марквардта для математических моделей траекторий полета анализируемых классов обеспечивает решение задачи определения точек старта огневых средств противника по выстрелу и залпу, а также может использоваться в интересах контроля и корректировки стрельбы собственных огневых средств поражения.

**Список использованных источников**

1. Стрельба и управление огнем артиллерийских подразделений / В. И. Волобуев [и др.]; под. общ. ред. В. И. Волобуева. – М.: Воениздат, 1987 – 440 с.
2. Ярмолик, С. Н. Радиолокационное распознавание класса артиллерийских стреляющих систем с использованием метода Левенберга-Марквардта / С. Н. Ярмолик [и др.]. // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2022. – № 3. – С. 62–71.
3. 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.
4. 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.