ОЦЕНКА ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОПАДАНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНУЮ ЦЕЛЬ

В.К. Снежко, *канд. техн. наук, доцент*
С.А. Якушенко, *канд. техн. наук, доцент*
В.Е. Егрушев, *канд. техн. наук*
С.С. Веркин, *канд. техн. наук*
В.В. Антонов, *преподаватель*
Е.В. Чеканова, *преподаватель*
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-7-1-217-223

Аннотация. *В статье рассматривается подход к обоснованию показателей точности определения координат для прямоугольных объектов поражения высокоточным оружием в условиях городской застройки и присутствия мирного населения. Результаты исследования могут использоваться для предъявления требований к навигационной аппаратуре для наведения на объект поражения.*

Ключевые слова: *навигационная аппаратура, точность определения координат, высокоточное оружие, вероятность поражение цели.*

Для современных операций специального назначения характерно требование знать точное местоположение объекта (цели) поражения. Одновременно требуется не поражать жилые кварталы, социальные объекты. Это ведёт к противоречивым требованиям, с одной стороны надо поразить цель, с другой стороны нельзя поражать соседние объекты. Одной из возможностей разрешения противоречия может быть применение зарядов малой мощности. Применение таких зарядов требует высокоточного попадания в цель. Точность попадания достигается точным определением местоположения цели. Определение местоположения обеспечивается навигационной аппаратурой. Отсюда вытекает важнейшее требование к этой аппаратуре – точность [1, 2]. Данная работа направлена на количественные оценки требований к точности определения местоположения прямоугольных целей.

Результаты работы могут найти применение в силовых структурах при определении требований к точности навигационной аппаратуры потребителя.

Модель попадания заряда в цель

В основу разработки моделей для определения вероятности поражения объекта высокоточным оружием $W(n)$ в данной работе положена обобщенная модель [3]:

$$W(n) = \sum_{m=0}^{n} P_{n,m} G(m). \qquad (1)$$

Эта модель позволяет отдельно рассматривать параметры, характеризующие точность применения оружия, и параметры, характеризующие мощность боеприпасов, живучесть цели и их взаимосвязь.

Точность применения оружия в данной модели характеризуется распределением числа попаданий в цель $P_{n,m}$, а мощность боеприпасов и живучесть цели – условной вероятностью поражения цели $G(m)$.

Распределение числа попаданий в цель $P_{n,m}$ зависит от числа выстрелов, распределения точек падения снарядов, поражаемого пространства цели и характера зависимости между выстрелами.

Если обозначить координаты точек падения снарядов X, Y, а поражаемое пространство цели S, то в самом общем случае вероятность попадания боеприпаса в цель может быть определена как вероятность того, что точка (X, Y) принадлежит области S:

$$p = P(X, Y \in S), \qquad (2)$$

Так как на точность стрельбы оказывает влияние большое число различных случайных факторов, то согласно основной предельной теореме теории вероятностей (теорема Ляпунова) с достаточной для оперативно-тактических расчётов точностью можно считать, что распределение точек падения снарядов подчиняется нормальному закону распределения вероятностей с плотностью [3, 4]

$$f(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}}e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left[\frac{\left(x-\bar{x}\right)^2}{\sigma_x{}^2}-\frac{2r\left(x-\bar{x}\right)\left(y-\bar{y}\right)}{\sigma_x\sigma_y}+\frac{\left(y-\bar{y}\right)^2}{\sigma_y}\right]}, \qquad (3)$$

где σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения координат точек падения от центра рассеивания $\left(\bar{x},\bar{y}\right)$; r – коэффициент корреляции.

С учётом формул (2) и (3) вероятность попадания в цель может быть вычислена по формуле

$$p=\iint_S f\left(x,y\right)dxdy\,.$$

В частности, вероятность попадания в цель, поражаемое пространство которой представлено в виде прямоугольника со сторонами, параллельными главным осям рассеивания (рисунок 1), может быть вычислена по формулам

$$p=\iint_S f\left(x,y\right)dxdy=\frac{1}{4}\left[\Phi\left(\frac{b-\bar{x}}{\sigma_x}\right)-\Phi\left(\frac{a-\bar{x}}{\sigma_x}\right)\right]\left[\Phi\left(\frac{d-\bar{y}}{\sigma_y}\right)-\Phi\left(\frac{c-\bar{y}}{\sigma_y}\right)\right], \qquad (4)$$

или по формуле

$$p=\int_a^b\int_c^d f\left(x,y\right)dxdy=\frac{1}{4}\left[\Phi\left(\frac{b-\bar{x}}{\sigma_x}\right)-\Phi\left(\frac{a-\bar{x}}{\sigma_x}\right)\right]\left[\Phi\left(\frac{d-\bar{y}}{\sigma_y}\right)-\Phi\left(\frac{c-\bar{y}}{\sigma_y}\right)\right], \qquad (5)$$

где Φ(z) – функция Лапласа,

$$\Phi(z)=\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}}dt\,. \qquad (6)$$

Эти вероятности будем рассчитывать по стандартным процедурам Маткад.

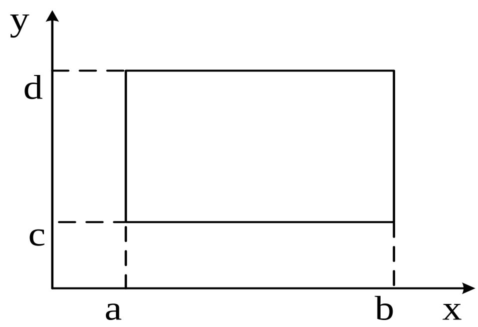

Рис. 1. Прямоугольный объект поражения

Расчёты можно вести не через средние, а через срединные отклонения. Тогда формула (3) примет вид

$$f(x,y)=\frac{\rho^2}{\pi E_x E_y\sqrt{1-r^2}}e^{-\frac{\rho^2}{\left(1-r^2\right)}*\left[\frac{\left(x-\bar{x}\right)^2}{E_x{}^2}-\frac{2r\left(x-\bar{x}\right)*\left(y-\bar{y}\right)}{E_xE_y}+\frac{\left(y-\bar{y}\right)^2}{E_y^2}\right]},$$

где E_x, E_y – срединные отклонения координат; $\rho=0,4769$ является решением уравнения

$$4\int_0^{\rho}e^{-x^2}dx=\sqrt{\pi}$$

и формула (5) примет вид

$$p=\frac{1}{4}\left[\mathring{\Phi}\left(\frac{b-\bar{x}}{E_x}\right)-\mathring{\Phi}\left(\frac{a-\bar{x}}{E_x}\right)\right]\left[\mathring{\Phi}\left(\frac{d-\bar{y}}{E_y}\right)-\mathring{\Phi}\left(\frac{c-\bar{y}}{E_y}\right)\right].$$

где $\mathring{\Phi}$ - приведенная функция Лапласа,

$$\mathring{\Phi}=\frac{2\rho}{\sqrt{\pi}}\int_0^{z}e^{-\rho^2t^2}dt\,.$$

Функция Лапласа связана с приведенной функцией Лапласа соотношением

$$\mathring{\Phi}(z)=\Phi(\rho\sqrt{2}z)=\Phi(0,674z)\,.$$

Рассмотрим прямоугольник со сторонами a, b и срединной ошибкой σ. Тогда вероятность попадания в этот прямоугольник вычисляется по следующему алгоритму:

1. Вычисляем вспомогательные величины $r1 = a\rho\sqrt{2}$, и $r2 = b\rho\sqrt{2}$.

2. Вычисляем вероятность попадания в линии a, b по формулам

$$y(r1) := (2prom(r1,0,\sigma)) - 1, \quad y(r2) := (2prom(r2,0,\sigma)) - 1.$$

3. Находим результирующую вероятность попадания в прямоугольник по формуле

$$y = y(r1)\,y(r2).$$

Например: a = 160 m, b = 385 m, σ = 160 m, y = 0,448.

По данному алгоритму были проведены расчёты. Результаты исследований приведены на рисунке 2 - 5.

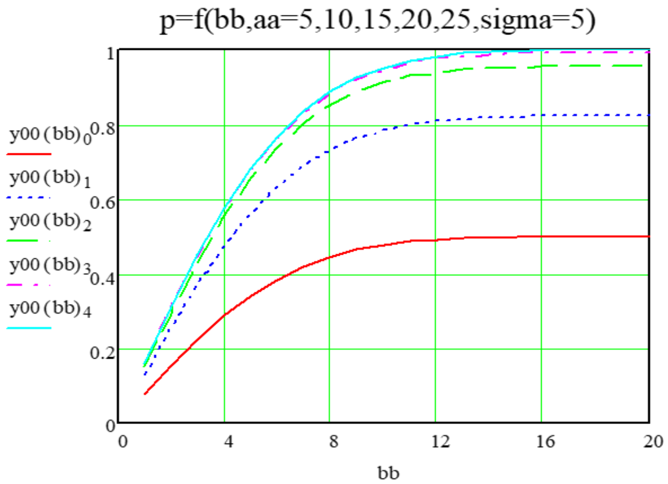

Рис. 2. Вероятность попадания в прямоугольник в зависимости от длины его сторон, сигма = 5 м

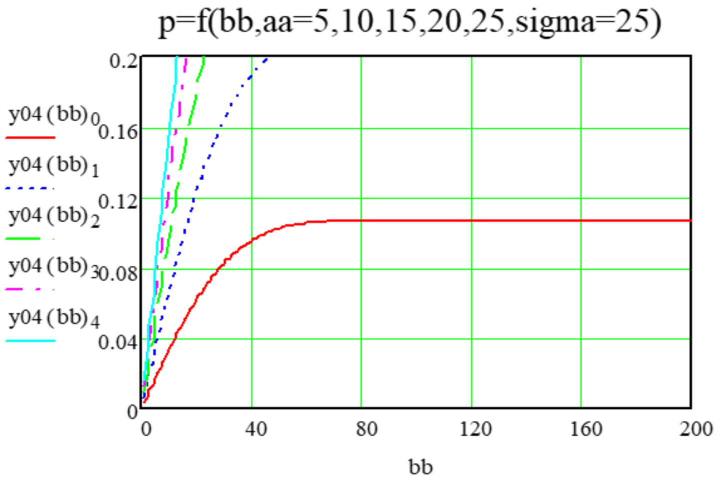

Рис. 3. Вероятность попадания в прямоугольник в зависимости от длины его сторон, сигма = 25 м

На рисунках 2 и 3 приведены результаты расчётов вероятности попадания в прямоугольник в зависимости от длины его сторон. На рисунке 2 для сигмы 5 м, на рисунке 3 для сигмы 25 м. Из рисунков следует, что для попадания с вероятностью 0,95, длина обеих сторон должна быть более 3 сигм. Если одна сторона соизмерима с сигмой, то вероятность попадания не превышает 0,5 при любой длине второй стороны. Из этого следует важный для практики вывод о том, что средство стрельбы должно быть укомплектовано навигатором для наведения на объект поражения с сигмой (погрешностью) не более 1/3 меньшей стороны.

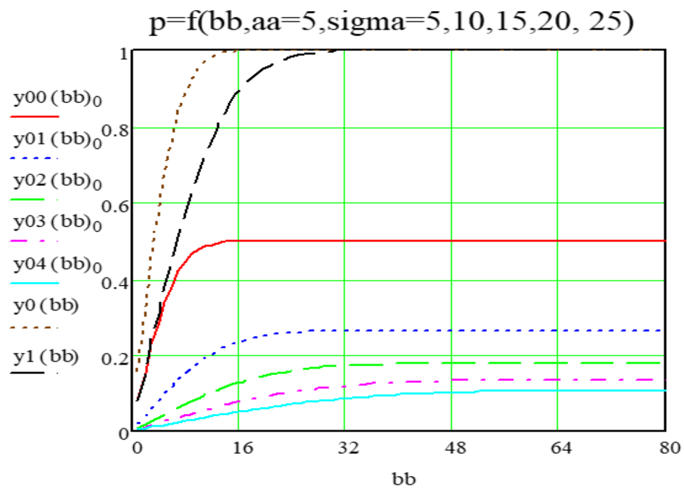

Рис. 4. Вероятность попадания в прямоугольник в зависимости от длины одной стороны, вторая равна 5 м, при разных сигма

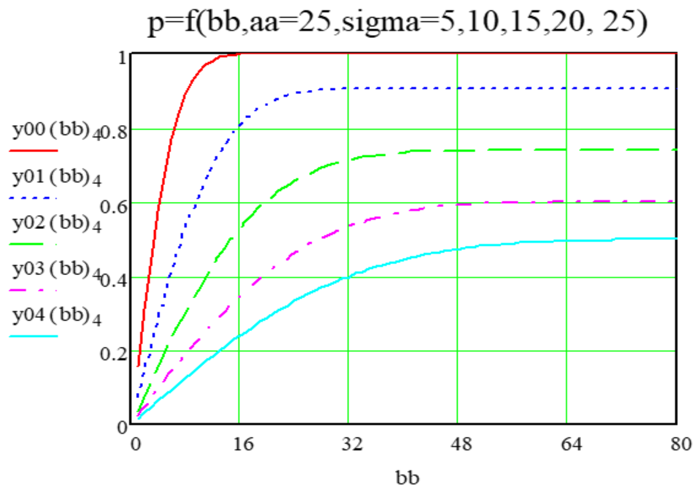

Рис. 5. Вероятность попадания в прямоугольник в зависимости от длины одной стороны, вторая равна 25 м, при разных сигма

Из рисунков 4 и 5 следует, попадание зависит только от соотношения величины сигма и длины меньшей стороны. На рисунке 4 приведены также вероятности попадания в сторону bb в зависимости от сигмы 5 и 10 м: y0(bb) и y1(bb) соответственно. На рисунке 6 приведены зависимости отношения длины стороны dd(bb) к сигме

$$dd(bb) := \frac{bb}{\sigma}.$$

Анализ результатов исследования позволяет предположить, что вероятность попадания определяется не отношением площади к среднеквадратической погрешности сигма, а от отношения длины меньшей стороны к сигме. Например, при длине одной стороны 1000 м, а второй 3 м, площадь равна 3000 кв. метров. Тогда для поражения цели с вероятностью не менее 0,95 точность попадания не более 1 м. Тогда как при длине сторон 30 и 100 м имеем туже площадь, а точность попадания может составлять только 10 м, а при длине сторон 60 и 50 м, достаточной будет точность попадания 17 м.

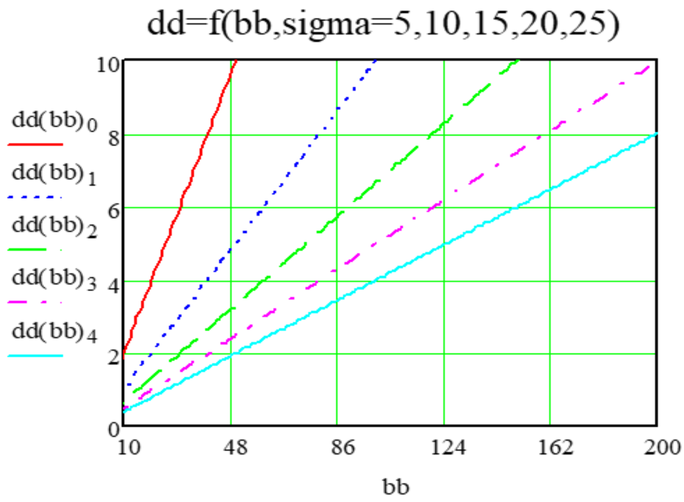

Рис. 6. Зависимость отношения длины стороны к сигме (dd(bb)) в зависимости от сигмы и от длины стороны bb

Заключение

Таким образом, для круговых целей вероятность попадания жестко связана и с радиусом цели и площадью в отличии от прямоугольной цели. Это принципиальное отличие требований к точности при попадании в круговую и прямоугольную цель.

Главный вывод из проведенных исследований, заключается в том, что вероятность попадания в прямоугольные цели ужесточает требования к точности попадания.

В дальнейших исследованиях следует оценить вероятность попадания при использовании нескольких зарядов.

Библиографический список

1. Якушенко С.А., Снежко В.К. Средства и комплексы навигационного обеспечения систем управления специального назначения: Учебник для вузов связи. – СПб.: ВАС, 2018. – 508 с.

2. Снежко В.К., Якушенко С.А., Мальцев А.Д. Наземное навигационное обеспечение в задачах. Учеб. пособие. – СПб.: ВАС, 2010. – 240 с.

3. Справочник по вероятностным расчётам. – М., Воениздат, 1970. – 536 с.

4. Якушенко С.А., Сазонов М.А. Информационно-расчетные задачи навигационно-связных комплексов специального назначения // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 1. – С. 37-40.

ASSESSMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE ACCURACY OF NAVIGATION ENSURING THAT A RECTANGULAR TARGET IS HIT

V.C. Snezhko, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*
S.A. Yakushenko, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*
V.E. Egrushev, *Candidate of Technical Sciences*
S.S. Verkin, *Candidate of Technical Sciences*
V.V. Antonov, *Lecturer*
E.V. Chekanova, *Lecturer*
Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny
(Russia, St. Petersburg)

Abstract. *The article considers an approach to substantiating the accuracy indicators of determining coordinates for rectangular objects of destruction by high-precision weapons in urban areas and the presence of civilians. The results of the study can be used to make requirements for navigation equipment for targeting the target.*
Keywords: *navigation equipment, accuracy of determining coordinates, high-precision weapons, the probability of hitting the target.*