

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ БОЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ И ОПОВЕЩЕНИЯ

Главатских Н.А.¹, Макеев Е.В.², Меженев А.В.³

¹Военная академия связи имени маршала Советского Союза Буденного С.М., г. Санкт-Петербург, Россия, glavnik423@mail.ru;

²Военная академия связи имени маршала Советского Союза Буденного С.М., г. Санкт-Петербург, Россия, john8883@ya.ru

³Военная академия связи имени маршала Советского Союза Буденного С.М., г. Санкт-Петербург, Россия, a-mezhenov@yandex.com

Abstract. The article looks at how the effectiveness of hitting airborne attack means depends on the delay times of combat control and alert signals, in particular a mathematical model that links the probability of hitting a target with time delays in the control loop.

Время задержки сигналов боевого управления и оповещения является одним из ключевых параметров, определяющих эффективность поражения средств воздушного нападения (СВН). В современных конфликтах, где цели движутся с высокими скоростями и активно маневрируют, сокращение цикла управления «обнаружение – решение – поражение» становится критически важным. Рассмотрим математическую модель, связывающую вероятность поражения цели с временными задержками в контуре управления.

1. Структура временных задержек

Полное время от момента обнаружения цели до момента подрыва боевой части ракеты складывается из следующих составляющих:

$$T_{\Sigma} = t_{\text{обн}} + t_{\text{упр}} + t_{\text{пуск}} + t_{\text{пол}} \quad (1)$$

где: $t_{\text{обн}}$ — время обнаружения и захвата цели (зависит от характеристик РЛС, ЭПР цели, помех); $t_{\text{упр}}$ — время задержки сигналов боевого управления: передача данных, обработка, принятие решения, выдача целеуказания (это ключевой параметр, который мы будем варьировать); $t_{\text{пуск}}$ — время подготовки и пуска ракеты (техническое, обычно фиксированное); $t_{\text{пол}}$ — полётное время ракеты до точки встречи (зависит от дальности и скорости ракеты).

Задержка $t_{\text{упр}}$ может быть вызвана:

- временем передачи радиолокационной информации по каналам связи;
- временем обработки в вычислительных средствах;
- временем принятия решения оператором (человеческий фактор);
- задержками в системе оповещения и целераспределения.

2. Влияние задержки на зону поражения

Для кинематического перехвата необходимо, чтобы точка встречи ракеты и цели находилась в пределах зоны поражения комплекса. При увеличении $t_{\text{упр}}$ цель успевает пролететь дополнительное расстояние:

$$\Delta D = V_{\text{ц}} \cdot t_{\text{упр}} \quad (2)$$

где $V_{\text{ц}}$ — скорость цели. Это приводит к сокращению глубины зоны поражения (или к сдвигу ближней границы).

Пусть $D_{\text{дальн}}$ — максимальная дальность поражения, $D_{\text{ближн}}$ — минимальная (мёртвая воронка). Тогда располагаемое время для перехвата:

$$T_{\text{расп}} = \frac{D_{\text{дальн}} - D_{\text{ближн}}}{V_{\text{ц}}} \quad (3)$$

Условие возможности поражения:

$$T_{\Sigma} \leq T_{\text{расп}}$$

Подставляя выражение для T_{Σ} , получаем критическое значение задержки управления:

$$t_{\text{упр}}^{\text{кр}} = \frac{D_{\text{дальн}} - D_{\text{ближн}}}{V_{\text{ц}}} - t_{\text{обн}} - t_{\text{пуск}} - t_{\text{пол}} \quad (4)$$

Если $t_{\text{упр}} > t_{\text{упр}}^{\text{кр}}$, перехват в принципе невозможен. При меньших задержках вероятность поражения будет зависеть от точности наведения, которая также ухудшается с ростом задержки.

3. Вероятностная модель зависимости эффективности от задержки

Вероятность поражения одиночной цели одной ракетой можно записать как:

$$P_1 = P_{\text{обн}} \cdot P_{\text{сопр}} \cdot P_{\text{пуск}} \cdot P_{\text{нав}}(t_{\text{упр}}) \cdot P_{\text{пор}} \quad (5)$$

Здесь $P_{\text{нав}}(t_{\text{упр}})$ — вероятность попадания ракеты в зону поражения с учётом ошибок наведения, зависящих от задержки. Основной вклад вносит ошибка экстраполяции траектории цели.

Если система управления использует информацию о координатах цели с задержкой τ , то прогнозируемое положение цели в момент встречи вычисляется на основе устаревших данных. При прямолинейном равномерном движении цели ошибка прогноза координаты равна:

$$\Delta X = V_{\text{ц}} \cdot \tau \quad (6)$$

а дисперсия ошибки наведения возрастает:

$$\sigma^2(\tau) = +(k \cdot \tau)^2 \quad (7)$$

где σ_0^2 — базовая дисперсия (без задержки), k — коэффициент, зависящий от манёвренности цели и точности измерений.

Если ошибки распределены по нормальному закону, а зона поражения боевой части имеет радиус $R_{\text{пор}}$, то вероятность попадания (накрытия цели зоной поражения) равна:

$$P_{\text{нав}}(\tau) = 1 - \exp\left(-\frac{R_{\text{пор}}^2}{2\sigma^2(\tau)}\right) \quad (8)$$

Таким образом, с ростом τ вероятность быстро убывает.

4. Учёт влияния задержки на вероятность обнаружения и сопровождения

Задержка может также ухудшать $P_{\text{обн}}$ и $P_{\text{сопр}}$, если цель выходит из зоны видимости радиолокатора до момента захвата. Если за время $t_{\text{упр}}$ цель пересекает зону обнаружения, то $P_{\text{обн}}$ падает. Для импульсной РЛС вероятность обнаружения за время $t_{\text{набл}}$ обычно описывается экспоненциальной моделью, но в данном контексте удобнее ввести функцию:

$$P_{\text{обн}}(t_{\text{упр}}) = \begin{cases} P_{\text{обн}}^0, & \text{если } t_{\text{упр}} \leq t_{\text{доп}} \\ P_{\text{обн}}^0 \cdot \exp(-\lambda(t_{\text{упр}} - t_{\text{доп}})), & \text{если } t_{\text{упр}} > t_{\text{доп}} \end{cases} \quad (9)$$

где $t_{\text{доп}}$ — допустимое время задержки, после которого цель может покинуть зону.

5. Интегральная модель эффективности с учётом задержки в системе управления

Для оценки эффективности группового налёта можно использовать имитационную модель, в которой на каждом шаге проверяется условие $T_{\Sigma} \leq T_{\text{расп}}$, а вероятность поражения вычисляется через $P_1(\tau)$. В аналитическом виде можно записать среднюю долю поражаемых целей:

$$E = \frac{1}{N_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}}} P_1(\tau_i) \quad (10)$$

где τ_i — задержка управления для i -й цели, зависящая от загрузки системы, приоритетов и пропускной способности каналов связи.

Если предположить, что τ распределена по экспоненциальному закону с параметром λ_{τ} (средняя задержка $1/\lambda_{\tau}$), то средняя эффективность:

$$\bar{E} = \int_0^{\infty} P_1(\tau) \cdot \lambda_{\tau} e^{-\lambda_{\tau} \tau} d\tau \quad (11)$$

При этом $P_1(\tau)$ может быть представлена как:

$$P_1(\tau) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{V_{\text{ц}}^2 \tau^2}{2\sigma_0^2 + 2k^2 \tau^2}\right) \quad (12)$$

(приближённая форма, учитывающая уменьшение вероятности из-за смещения точки встречи).

6. Практические выводы

1. Ключевые задержки возникают на этапах:

- передача данных от РЛС на КП;
- обработка и принятие решения на КП;
- передача целеуказания на ЗРК;
- повторный поиск цели собственной РЛС ЗРК.

2. Существует пороговая задержка $t_{\text{упр}}^{\text{кр}}$, при превышении которой поражение невозможно. Для типовых ЗРК при скорости цели 300 м/с и глубине зоны 20 км она составляет порядка 20–30 секунд, однако с учётом манёвра и помех реальное критическое время значительно меньше (единицы секунд).

3. Вероятность поражения монотонно убывает с ростом задержки, причём наиболее резкое падение происходит в области, сравнимой с временем полёта ракеты. Численные оценки показывают, что увеличение задержки с 1 до 5 секунд может снизить вероятность поражения в 2–3 раза.

4. Автоматизация контура управления (переход от человека к автоматическим системам) позволяет сократить $t_{\text{упр}}$ с десятков секунд до долей секунды, что особенно важно при отражении атак гиперзвуковых целей.

5. Задержка оповещения влияет не только на одиночный перехват, но и на общую пропускную способность системы ПВО: при больших задержках уменьшается количество целей, которые могут быть обслужены за время налёта, что приводит к росту прорывов.

Таким образом, математическая модель показывает, что время задержки сигналов боевого управления и оповещения является критическим параметром, определяющим как кинематическую возможность перехвата, так и вероятностные характеристики поражения. Оптимизация этого параметра должна рассматриваться как один из главных резервов повышения эффективности противовоздушной обороны.

Литература

1. Неупокоев Ф. К. Стрельба зенитными ракетами / Ф.К.Неупокоев. — Москва: Воениздат, 1991. — 343 с.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология: учебное пособие / Е. С. Вентцель. — 5-е изд., стер. — Москва: КНОРУС, 2010. — 192 с.
3. Ткаченко В.И. Теория управления войсками : учебник/ В.И.Ткаченко. — Москва: Воениздат, 2010. — 456 с.
4. Osinga F.P.B. Science, Strategy and War: The Strategic Theory of John Boyd / F.P.B. Osinga. — London; New York: Routledge, 2007. — 352 p.
5. Сумин А.С. Моделирование влияния цикличности управления на эффективность огня группировки ПВО/ А.С.Сумин// Военная мысль. — 2018. — № 5. — С. 34–41.
6. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учебник для вузов/ Б.Я.Советов, С.А.Яковлев. — 7-е изд. — Москва: Юрайт, 2021. — 343 с.