

# Компьютерная модель процессов наблюдения и наведения приборов в условиях дымки

Ю. Л. Козирацкий, email: UrLeo@bk.ru  
Д. В. Прохоров, email: dvp2201@rambler.ru  
В. А. Баев, email: vova1052@mail.ru  
И. О. Головин, email: 89529526250@mail.ru

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

***Аннотация.** С использованием теории вероятностей, теории графов и методов преобразования Лапласа разработана компьютерная модель процессов наблюдения и наведения, позволяющая получать вероятностные показатели попадания зондирующих сигналов ручного лидара в цель в сложных условиях видимости с учетом временных характеристик процесса работы по цели и совокупности ошибок прицеливания.*

***Ключевые слова:** компьютерная модель, дымка, наблюдение, наведение, оценка эффективности.*

## Введение

В настоящее время при выполнении задач обеспечения безопасности активно используются различные технические системы зондирования электромагнитным излучением. Так для контроля скорости широко используются ручные лидары и радары. На качество их применения могут влиять сложные метеоусловия. Возникает задача оценки эффективности выполнения задач оператором с использованием ручного лидара в условиях дымки.

Поэтому целью работы являлась разработка компьютерной модели, позволяющей оценивать эффективность процесса выполнения задач оператором с использованием ручного лидара в сложных метеоусловиях.

## 1. Постановка задачи

Точность ориентирования лидара оператором может зависеть от характера цели, дальности до цели, условий видимости, уровня обученности оператора и других причин. В ходе наблюдения и наведения в виду сложных метеоусловий, например, наличие дымки, цель оператором может быть потеряна. В этих условиях наведение может вестись по памяти или опираясь на какую-либо другую (не

визуальную) информацию. Также в силу значительных колебаний коэффициента пропускания дымки [1-3] ориентирами оператору могут стать контрастные выбросы дымки, из-за чего точка прицеливания (ТП) оператора будет формироваться по случайному закону с ошибками, обусловленными множеством факторов. На рисунке 1 представлена геометрия задачи. Допустим, что работа ведется одним оператором по объекту (цели), полностью прикрытому дымкой. В качестве показателя эффективности выполнения задач оператором с использованием ручного лидара примем вероятность попадания зондирующих сигналов прибора в цель  $P_n$ .

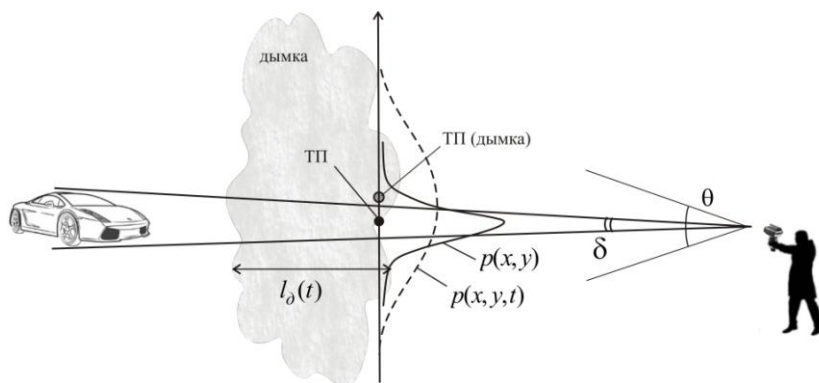
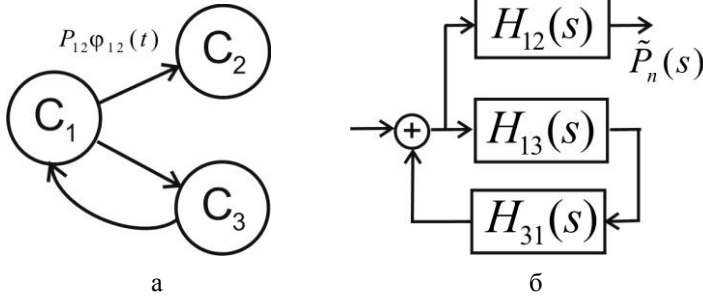


Рис. 1. К постановке задачи

## 2. Разработка аналитической модели

На рисунке 2а представлен граф состояний, описывающий динамику процесса наблюдения и наведения прибора. Здесь приняты следующие обозначения:  $c_1$  – исходное состояние;  $c_2$  и  $c_3$  – состояния, при которых зондирующий сигнал прибора попал и не попал в цель соответственно в результате работы оператора. Каждый из переходов  $i \rightarrow j$  будет характеризоваться вероятностью и плотностью вероятности перехода  $P_{ij}, \varphi_{ij}(t)$ . Представим динамику рассматриваемого процесса в форме передаточных функций [3] (рисунк 2б), где  $H_{ij}(s) = L_s [P_{ij}, \varphi_{ij}(t)]$  – передаточная функция, представляющая собой преобразование Лапласа от произведения переходной вероятности на плотность вероятности времени перехода  $i \rightarrow j$ .



а – граф состояний, б – в форме передаточных функций

Рис. 2. Динамическая модель процесса наблюдения и наведения

Пользуясь методами теории автоматических систем [4], произведем, используя схему на рисунке 2б, несложные математические преобразования и получим следующее выражение для определения передаточной функции процессов наблюдения и наведения

$$H_n(s) = \frac{H_{12}(s)}{1 - H_{13}(s)H_{31}(s)}. \quad (1)$$

Введем в рассмотрение цикличность процессов наблюдения и наведения, состоящую из  $n$  итераций. В результате применения к (1) z-преобразования получим [3]:

$$H_n(z, s) = \frac{H_{12}(s)}{1 - zH_{13}(s)H_{31}(s)}. \quad (2)$$

С учетом  $n$ -го числа циклов можно записать

$$H_n(n, s) = H_{12}(s)[H_{13}(s)H_{31}(s)]^n. \quad (3)$$

Вероятность события, состоящего в том, что к некоторому моменту времени  $t$  оператором прибора будет совершено ровно  $n$  попыток съема информации и произойдет попадание в цель, можно определить как

$$P_n(n, t) = L_s^{-1} \left\{ \frac{1}{s} H_{12}(s) [H_{13}(s)H_{31}(s)]^{n-1} \right\}. \quad (4)$$

Вероятность попадания зондирующего сигнала в цель в результате  $N$ -го числа попыток в зависимости от времени можно записать следующим образом

$$P_n(N, t) = \sum_{n=1}^N P_n(n, t). \quad (5)$$

В предположении того, что плотности вероятности распределения времени нахождения в одном состоянии при переходе в другое состояние определяются экспоненциальными распределениями, передаточные функции переходов определим, как

$$H_{12}(s) = P_{12} \frac{\lambda_{12}}{s + \lambda_{12}}; H_{13}(s) = (1 - P_{12}) \frac{\lambda_{13}}{s + \lambda_{13}}; H_{31}(s) = 1, \quad (6)$$

где  $\lambda_{13} = \lambda_{12}$  – интенсивности попыток, связанные со средним временем попыток обратной зависимостью  $\lambda = 1/\bar{\tau}$  [5],  $\bar{\tau}_{12} = \bar{\tau}_{подгот} + \bar{\tau}_{прин} + \bar{\tau}_н + \bar{\tau}_з$ ,  $\bar{\tau}_{подгот}$  – среднее время подготовки прибора к работе;  $\bar{\tau}_{прин}$  – среднее время принятия решения о наличии цели и направлении зондирования;  $\bar{\tau}_н$  – среднее время наведения;  $\bar{\tau}_з$  – среднее время зондирования.

При определении переходных вероятностей  $P_{12}$ ,  $P_{13} = 1 - P_{12}$  и средних времен необходимо учитывать допущение о том, что, когда визуальное обнаружение цели невозможно, определение направления зондирования осуществляется на основе либо априорной информации о цели, полученной до появления дымки, либо ориентированием оператора по шуму цели, другим ориентирам и по формируемому в поле зрения изображению дымки.

Вероятность  $P_{12}(t)$  можно определить следующим образом

$$P_{12}(t) = P_{подгот}(t) P_{прин|подгот}(t) P_{н|прин}(t), \quad (7)$$

где  $P_{подгот}(t)$  – вероятность подготовки прибора к работе в зависимости от времени;  $P_{прин|подгот}(t)$  – условная вероятность принятия решения о наличии цели (обнаружение) или направлении зондирования (когда цель не видна из-за дымки) в зависимости от времени;  $P_{н|прин}(t)$  – условная вероятность наведения и попадания в цель в зависимости от времени.

Определение условной вероятности  $P_{прин|подгот}(t)$  возможно с использованием формул Байеса и полной вероятности [6]

$$P_{прин|подгот}(t) = P_{обн}(t) P(H_1 | A, t) + P_{напр}(t) P(H_2 | A, t), \quad (8)$$

где  $P_{обн}(t)$  – вероятность обнаружения цели в зависимости от времени;  $P_{напр}(t)$  – вероятность принятия решения о направлении зондирования в условиях дымки в зависимости от времени;  $H_1$  – гипотеза о том, что

оператор определил направление зондирования цели в результате ее обнаружения;  $H_2$  – гипотеза о том, что оператор определил направление зондирования цели наугад (цель не обнаружена);  $A$  – событие, заключающееся в том, что за время принятия решения о направлении зондирования оператор определит направление зондирования цели;

$$P(H_1 | A, t) = \frac{P_{обн}(t) P(H_1)}{P_{обн}(t) P(H_1) + P_{напр}(t) P(H_2)};$$

$$P(H_2 | A, t) = \frac{P_{напр}(t) P(H_2)}{P_{обн}(t) P(H_1) + P_{напр}(t) P(H_2)} - \text{апостериорные вероятности}$$

гипотез;  $P(H_1)$  и  $P(H_2)$  – вероятности гипотез.

Предположим, что поиск и наведение осуществляются невооруженным глазом, а дымка появилась на линии визирования «оператор – цель» в момент подготовки оператора к съему информации прибором. В этом случае сектор поиска сужается и представляет собой область неопределенности, обусловленную наиболее вероятным нахождением цели по представлению оператора.

Вероятность обнаружения невооруженным глазом протяженного одиночного подвижного объекта можно получить с использованием следующего выражения [7]

$$P_{обн}(t) = 1 - \exp \left\{ -t^2 \frac{C [K T_o]^2 \delta^3 [L_\phi T_o]^{0,3}}{\theta^2} \right\}, \quad (9)$$

где  $C$  – коэффициент, характеризующий индивидуальные способности наблюдателя (среднее значение –  $C_{cp} = 4 \text{ град.}^2 \text{ угл.мин.}^{-3} (\text{кд/м}^2)^{-0,3} \text{с}^{-2}$ );

$K = (L_\phi - L_o) / L_\phi$  – яркостный контраст объекта;  $L_\phi$  и  $L_o$  – яркости фона и объекта [ $\text{кд/м}^2$ ];  $\delta$  – угловой размер объекта [угл. мин.];  $\theta$  – угловой размер поля поиска [град.];  $T_o$  – коэффициент пропускания дымки.

Среднее время принятия решения об обнаружении цели с вероятностью  $P_{обн}$  можно определить следующим образом

$$\bar{\tau}_{обн} = \int_0^\infty t \cdot \frac{d P_{обн}(t, T)}{d t} \frac{d t}{P_{обн}(t \rightarrow \infty)} . \quad (10)$$

Условную вероятность наведения и попадания в цель с учетом «фигурности» реального объекта поражения можно определить из выражения [2]

$$P_{n|npn}(t) = K_{\phi} \iint_{S_{on}} p(x, y, t) dx dy, \quad (11)$$

где  $K_{\phi} = S_{\phi} / S_{on}$  – коэффициент фигурности;  $S_{\phi}$  – площадь цели;  $S_{on} = x_{\phi} y_{\phi}$  – площадь описанного вокруг цели прямоугольника;  $x_{\phi}$  и  $y_{\phi}$  – размеры цели по горизонтали и вертикали соответственно;

$$p(x, y, t) = \frac{1}{2\pi\sigma_x(t)\sigma_y(t)} \exp\left\{-\frac{[x - m_x(t)]^2}{2\sigma_x^2(t)} - \frac{[y - m_y(t)]^2}{2\sigma_y^2(t)}\right\} \quad \text{– двумерная}$$

плотность вероятности распределения координат точек попадания  $x$  и  $y$ , как функция времени, где  $m_x(t)$ ,  $m_y(t)$  – математические ожидания координат точек попадания, как функции времени;  $\sigma_x(t)$ ,  $\sigma_y(t)$  – средние квадратические отклонения координат точек попадания в зависимости от времени;  $\sigma_x(t) = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_n^2 + \sigma_a^2 + \sigma_{my}(t)^2}$ ,  $\sigma_n$  – ошибка наведения;  $\sigma_n$  – ошибка, обусловленная опытом и памятью оператора;  $\sigma_a$  – ошибка, обусловленная ориентированием оператора по шуму цели и другим ориентирам;  $\sigma_{my}(t)$  – ошибка, обусловленная метеословиями, флуктуационными свойствами дымки; для  $\sigma_y(t)$  можно раскрыть аналогично.

### 3. Разработка компьютерной модели

Алгоритм оценки эффективности процессов наблюдения и наведения оператором ручного лидара в условиях дымки в виде блок-схемы представлен на рис. 3.

Для программной реализации алгоритма на компьютере была выбрана среда MATLAB (Simulink). Компьютерная модель в данной среде представлена на рис. 4.

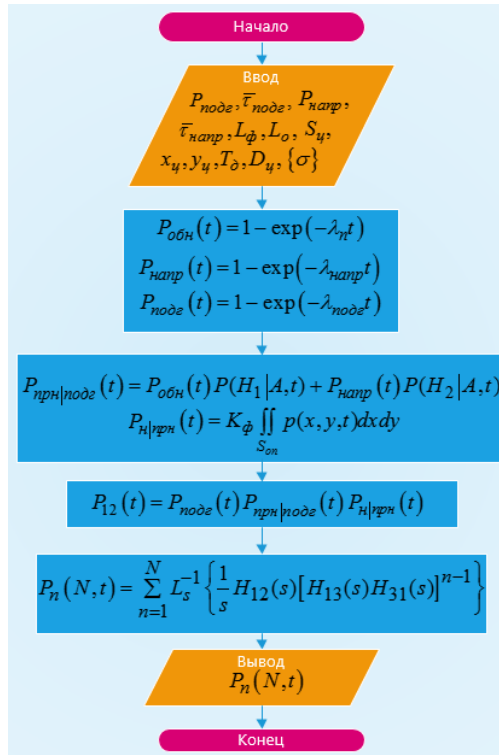


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оценки эффективности рассматриваемого процесса

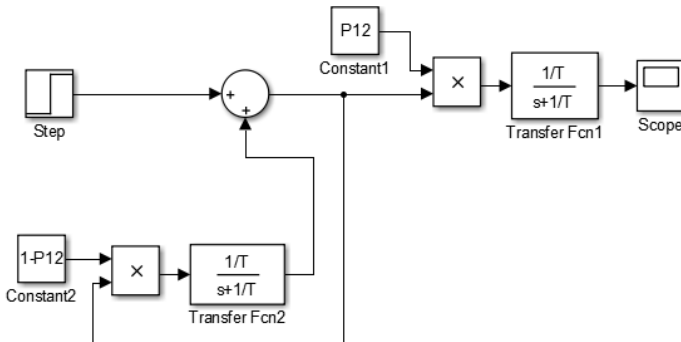


Рис. 4. Реализация алгоритма на компьютере в среде MATLAB (Simulink)

С целью проверки адекватности предлагаемой модели был проведен эксперимент на базе разработанной компьютерной модели для следующих исходных данных: начало системы координат совпадает с центром цели; размеры цели  $x_c = 3$  м;  $y_c = 2$  м;  $S_c = 5$  м<sup>2</sup>;  $\sigma_x = \sigma_y = 0,5$  м;  $D_c = 200$  м;  $\theta = 14^\circ$ ;  $L_\phi = 30$  кД/м<sup>2</sup>;  $L_o = 38$  кД/м<sup>2</sup>;  $P_{нодз} = 0,95$ ;  $\bar{\tau}_{нодз} = 3$  с;  $P_{напр} = 0,95$ ;  $\bar{\tau}_{напр} = 2$  с;  $T_o = 0,85$  (без дымки; в условиях дымки 0,004). Результаты расчетов представлены на рис. 5.

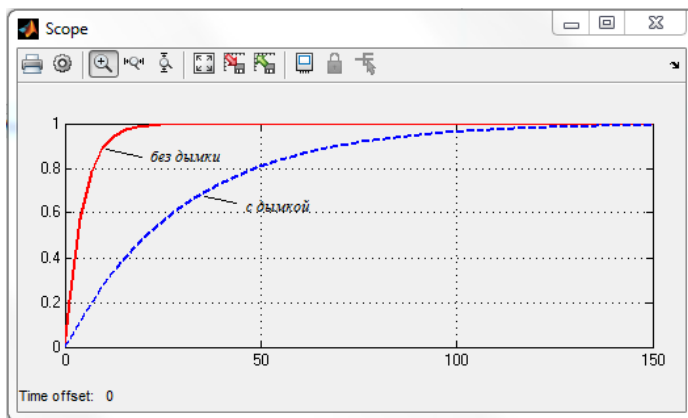


Рис. 5. Графики зависимостей вероятности попадания в цель от времени для случаев отсутствия и наличия дымки

Результаты анализа хода компьютерного эксперимента показывают адекватность разработанной модели изменяемым исходным данным. Компьютерное моделирование позволило повысить оперативность и точность расчетов, а также существенно снизить трудоемкость вычислений, особенно с увеличением числа циклов.

### Заключение

Таким образом, с использованием теории графов, теории вероятностей, методов преобразования Лапласа разработана компьютерная модель процессов наблюдения и наведения оператором ручного лидара в условиях дымки. Модель позволяет получать вероятностные показатели попадания зондирующих сигналов ручного лидара в цель в сложных условиях видимости с учетом временных характеристик процесса работы по цели и совокупности ошибок наведения, обусловленных рядом факторов, в том числе появлением



дымки. Применение математического аппарата производящих функций позволило определить вероятностные показатели процессов наблюдения и наведения с учетом цикличности, обусловленной количеством попыток зондирования цели. Использование при моделировании циклического процесса среды MATLAB (Simulink) существенно снизило трудоемкость вычислений.

### Список литературы

1. Поиск цели оптико-электронными средствами в условиях нестационарных маскирующих помех / А. Ю. Козирацкий [и др.] // Радиотехника. – 2005. – № 7. – С. 63-65.

2. Козирацкий, Ю. Л. Методика оценки эффективности применения аэрозольных образований для защиты объектов от прицельной стрельбы из гранатомета / Ю. Л. Козирацкий, Д. В. Прохоров // Журнал Сибирского федерального университета «Техника и технологии». – 2020. – № 13(7). – С. 894-905.

3. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения: монография / Ю. Л. Козирацкий [и др.]; под ред. Ю. Л. Козирацкого. – М.: Радиотехника, 2013. – 232 с.

4. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г. Ф. Зайцев. – Киев: Высш. шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.

5. Модели пространственного и частотного поиска: монография / Ю. Л. Козирацкий [и др.]; под ред. Ю. Л. Козирацкого. – М.: Радиотехника, 2013. – 344 с.

6. Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Р. Шторм. – М.: Мир, 1970. – 368 с.

7. Травникова, Н. П. Эффективность визуального поиска / Н. П. Травникова. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.