

УДК 623.451.027:621:396.93+

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КООРДИНАТОРА ЦЕЛИ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ АВИАЦИОННОЙ БОМБЫ

Б.В. Обносков, А.А. Очковский

Аннотация

В работе рассматривается задача выбора оптимальных параметров телевизионной системы наведения на этапе проектирования. В качестве метода оптимизации был выбран модифицированный неградиентный случайный поиск.

Ключевые слова

управляемая авиационная бомба; система наведения

Наведение управляемой авиационной бомбы (УАБ) на цель представляет собой процесс управления относительным движением бомбы и цели (ОДБЦ) путем целенаправленного изменения вектора собственного ускорения бомбы с намерением достичь определенного результата – минимизации вектора промаха. В результате ОДБЦ в каждый момент времени формируется определенное взаимное положение бомбы и цели, характеризуемое вектором дальности $\bar{D}(t)$. В общем случае процесс наведения УАБ на цель заключается в определении требуемой величины перегрузки бомбы и отработки этой перегрузки [1].

Структура процесса наведения УАБ представлена на рис. 1.

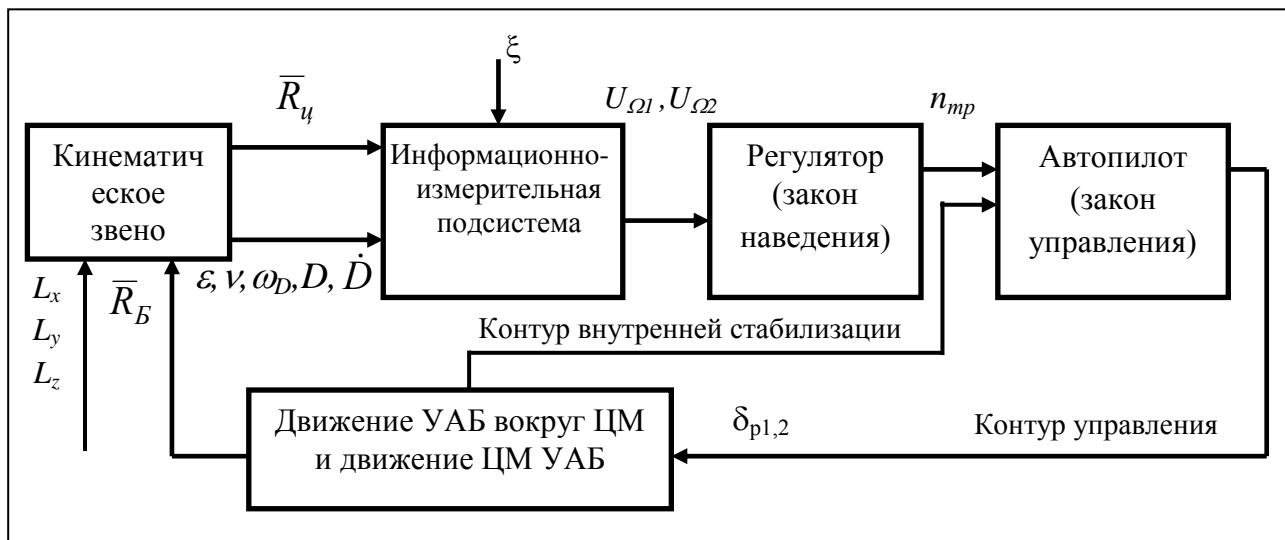


Рис. 1.

При наведении на цель УАБ, оснащенной телевизионной системой наведения (ТВСН) для успешного решения поставленной задачи необходимо выполнение ряда условий, а именно [2]:

1. Цель обнаружена и распознана летчиком с вероятностью $P_{обн}$ на дальности, позволяющей выполнять коррекцию УАБ.
2. Цель попадает в поле зрения объектива системы наведения с вероятностью $P_{пз}$.

Вероятность $P_{пз}$ на траектории автономного полета УАБ с ТВСН определяется выражением:

$$P_{пз} = f(\sigma_x, \sigma_z, D, \varphi_{ц}, \Delta, 2\alpha); \quad (1)$$

Где: σ_x и σ_z – среднеквадратическое отклонение по осям x и z при бомбометании неуправляемыми авиационными бомбами;

D – текущая дальность УАБ до цели;

$\varphi_{ц}$ - угол визирования цели с УАБ;

Δ - угловое рассогласование между линией визирования цели и направлением оси оптической системы ТВСН УАБ;

2α - угол поля зрения объектива ТВСН.

Вероятность обнаружения и распознавания цели является функцией множества факторов [3]:

$$P_{обн} = f(2\alpha, L_x, L_z, D, W, \Phi, \mu, z, \lambda, t_{п}); \quad (2)$$

Где: L_x, L_z – линейные размеры цели;

- W – показатель характеризующий метеорологические условия в районе цели;
- Φ – светотехнические характеристики цели;
- μ - пороговая чувствительность телевизионной системы;
- z - разрешающая способность телевизионной системы в строках;
- λ - динамическая характеристика оператора;
- t_{π} - время предъявления изображения цели оператору.

Как видим из выражений (1) и (2) вероятность обнаружения и попадания цели в поле зрения ТВСН зависит от характеристик самой цели в большой степени от параметров системы наведения. В связи с этим, представляет интерес проведение параметрической оптимизации ТВСН, как наиболее отработанной в технологическом плане и имеющей поддержку многих бортовых комплексов по обеспечению наведения.

Методы оптимизации, применяемые для синтеза структуры управления и выбора параметров, условно можно разделить на два класса: аналитические и алгоритмические.

Аналитические методы, как правило, дают возможность найти структуру оптимальной системы и закона управления. Однако они приводят к значительным математическим и вычислительным трудностям при определении закона управления. Для применения аналитических методов функционал качества должен иметь аналитический вид.

Алгоритмические методы представляют собой вычислительные процедуры параметрической оптимизации и применимы практически всегда. Они не требуют аналитичности функционала качества. Однако, для их применения необходимо задать структуру системы [4].

На практике в процессе проектирования возможно комплексное использование аналитических и алгоритмических методов оптимизации. При аналитическом синтезе могут быть использованы более простые модели. На заключительном этапе параметрического синтеза целесообразно использовать более полную математическую модель и критерии качества векторного типа.

Итак, рассмотрим задачу об оптимизации параметров телевизионной системы наведения УАБ при заданной структуре последней.

Основаниями для выбора такой структуры управления УАБ без формального синтеза являются:

1. Построение системы управления по принципу “измеритель - регулятор – автопилот” отвечает требованиям теоремы разделения, в линейном приближении для системы управления в целом [5] и проверено на некоторых задачах практикой [6].

2. Закон управления УАБ реализующий метод пропорционального наведения обеспечивает достаточно высокую точность.

За критерий “точного наведения” в данном случае будем понимать прямое попадание УАБ в цель с заданными геометрическими размерами L_x, y, z или же попадание в круг радиусом с центром в середине цели.

Анализ приведенной на рис. 1 структуры процесса наведения позволяет сделать вывод о том, что по принятому критерию точности наведения необходимо оптимизировать параметры измерительно-информационной подсистемы. Оптимизация параметров регулятора и автопилота по данному критерию не корректна, так как основным показателем качества работы этих систем является устойчивость.

Структуру измерителя в общем виде можно представить следующим образом (рис.2) [7]:

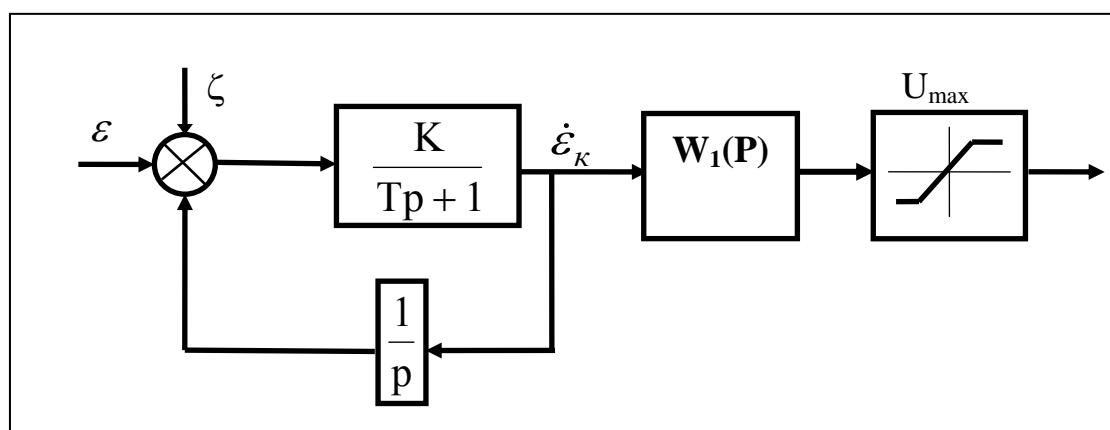


Рис.2.

Входным сигналом ТВСН является угол места цели ϵ , а выходным – угловая скорость линии визирования. Выходной сигнал наряду с полезной составляющей, содержит сигналы, порождаемые шумами и помехами. Интенсивность шума зависит от типа и характеристик ГСН, а также от условий наведения (типа цели, дальности до цели и др.). Для уменьшения шумовой составляющей выходной сигнал фильтруется корректирующим фильтром с передаточной функцией $W_1(P)$. На выходе фильтра устанавливается пропорциональное звено с насыщением. Величина насыщения выбирается из условия ограничения максимального значения сигнала U_m на выходе корректирующего фильтра.

Значения постоянной времени и коэффициента усиления корректирующего фильтра выбираются при рассмотрении задачи наведения в стохастической постановке и поэтому представляют интерес для оптимизации. Кроме того, величина U_m обусловленная ограничением допустимых перегрузок тоже является оптимизируемым параметром.

При проектировании ТВСН используют фиксированное значение 2α , которое обеспечивает попадание цели в поле зрения объектива с заданной вероятностью $P_{пз\text{ зад}}$, например $P_{пз\text{ зад}} = 0,9$ на определенной дальности до цели.

$$P_{пз} = P_{пз\text{ зад}}; \quad (3)$$

В этом случае, если размеры цели значительно превосходят ошибки бомбометания, уменьшается риск пропуска цели мимо угла поля зрения объектива.

В случае если УАБ с ТВСН применяется по малоразмерной цели, то угол поля зрения выбирается в соответствии с выражением:

$$P = \max P_{пз} P_{обн}; \quad (4)$$

Из (3) и (4) видно, что в любом случае угол поля зрения ТВСН в основном зависит от значения вероятности $P_{пз}$.

В процессе полета УАБ к цели по баллистической траектории, при фиксированном 2α с уменьшением дальности до цели происходит увеличение масштаба «картинки» цели, передаваемой из системы управления УАБ на видеоконтрольное устройство (ВКУ) самолета-носителя. При этом происходит увеличение вероятности $P_{обн}$ и соответственно значение вероятности $P_{пз}$ снижается.

Увеличивая угол поля зрения ТВСН 2α , с уменьшением дальности до цели и при прочих равных условиях мы получим увеличение вероятности $P_{пз}$ и уменьшение $P_{обн}$.

Чтобы обеспечить постоянный масштаб изображения цели и подстилающей поверхности а, следовательно, и постоянные значения вероятностей $P_{пз}$ и $P_{обн}$ при уменьшении дальности до цели, необходимо изменять угол поля зрения 2α в соответствии с изменением вектора дальности \vec{D} .

$$2\alpha = f(\vec{D}) \quad (5)$$

Дополнительные исследования позволили определить ряд параметров ТВСН наиболее полно характеризующих конструктивные особенности, электронный и оптический тракт прохождения сигнала в системе наведения.

Таким образом, вектор оптимизируемых параметров имеет следующий вид:

$$X = [2\alpha, Z_0, K_{tmin}, k_f, T_f, U_m]^T; \quad (6)$$

где: 2α – мгновенный угол поля зрения ТВСН;
 Z_0 -разрешающая способность объектива;
 K_{tmin} - пороговый контраст телевизионной системы;
 k_f – коэффициент усиления корректирующего фильтра;

T_f – постоянная времени корректирующего фильтра;

U_m – ограничение максимального сигнала на выходе корректирующего фильтра.

В качестве критерия точности наведения будем использовать требование:

$$E_{\text{кво}} \leq E_{\text{кво тр}}, \quad (7)$$

где: $E_{\text{кво}}$ – круговое вероятное отклонение УАБ от центра цели и его требуемое значение. Величина $E_{\text{кво тр}}$ определяется из условий конфигурации и прочностных характеристик цели.

Параметрическая оптимизация вектора (6) по критерию (7) может быть осуществлена методом модифицированного неградиентного случайного поиска (МНСП), заключающегося в организации выбора оптимальных значений вектора параметров (6) X_0 , удовлетворяющих критерию максимума вероятности свершения события θ , состоящего в выполнении условия (7) [8].

Используемый метод алгоритмически прост, легко стыкуется с имитационно-статистической моделью боевого применения УАБ и удовлетворяет следующим требованиям:

1. Метод оптимизации малочувствителен к нерегулярностям поведения целевой функции и наличию случайных ошибок при ее вычислении.

2. Метод оптимизации малочувствителен к росту размерности множества оптимизации и нерегулярностям поведения структуры множества оптимизации.

Первое требование обусловлено тем, что численные значения целевой функции вычисляемой в процессе моделирования определяются не только параметрами СН, но и целым рядом других факторов, имеющих случайный характер. А второе требование учитывает тот факт, что размерность вектора оптимизируемых параметров может изменяться в зависимости от типа СН устанавливаемой на УАБ.

Основу метода неградиентного случайного поиска (НСП) составляет адаптивная процедура, использующая байесовское преобразование априорных распределений вектора параметров $X \in R_m$ и множества решений $A = \{A_v, v=1, r\}$ оптимизируемой системы. В общем виде процедура НСП задается системой рекуррентных уравнений:

$$f_{N+1}(x/A_v) = B_N^{(1)} f_N(x/A_v); \quad (8)$$

$$P_{N+1}(A_v) = B_N^{(2)} P_N(A_v);$$

где $f_N(x|A_v)$ - априорная плотность распределения вектора параметров X на N -м шаге поиска при выбранном решении A_v ;

$P_N(A_v)$ - вероятность выбора решения $A_v \in A$;

$B_N^{(1)} = \frac{P_N(\theta|x;A_v)}{P_N(\theta|A_v)}$, $B_N^{(2)} = \frac{P_N(\theta|A_v)}{P_N(\theta)}$ - операторы байесовского преобразования $f_N(x|A_v)$

и $P_N(A_v)$ соответственно.

$P_N(\theta)$, $P_N(\theta|x;A_v)$, $P_N(\theta|A_v)$ - соответственно, априорная и апостериорные вероятности свершения события θ , характеризующего выполнение на N -м шаге некоторой совокупности целевых требований, предъявляемых к системе.

Указанные вероятности связаны между собой следующими соотношениями:

$$P_N(\theta) = \sum_{v=1}^r P_N(\theta|A_v)P_N(A_v), \quad p_N(\theta|A_v) = \int_{\Omega} P_N(\theta|x;A_v)f_N(x)dx; \quad (9)$$

где $\Omega = \bigcup_{v=1}^r \Omega_v \subseteq R^m$ - область возможных значений вектора параметров X для множества решений A .

Непосредственно из (8) и (9) следуют рекуррентные соотношения для моментных характеристик и вероятностей выбора решений, составляющие рабочие формулы алгоритмов НСП:

$$\begin{aligned} m_x(N+1;A_v) &= m_{x|\theta}(N; A_v); \\ r_x(N+1;A_v) &= r_{x|\theta}(N; A_v); \\ P_{N+1}(A_v) &= P_N(A_v|\theta), \end{aligned} \quad (10)$$

где $m_x(N+1; A_v) = M[X_{N+1} | A_v]$; $m_{x|\theta}(N; A_v) = M[X_N | \theta; A_v]$;

$$r_x(N+1; A_v) = M[\overset{0}{X}_{N+1} \overset{0}{X}_{N+1}^T | A_v]; \quad r_{x|\theta}(N; A_v) = M[\overset{0}{X} \overset{0}{X}_N^T | \theta; A_v].$$

Точная реализация байесовских операторов $B_N^{(1)}, B_N^{(2)}$ предполагает знание апостериорных вероятностей $P_N(\theta|x;A_v)$ во всей области возможных значений вектора параметров Ω , что в практических задачах является нереальным. Использование для этой цели метода статистических испытаний требует проведения большого числа вычислительных экспериментов, что, в конечном счете, значительно снижает эффективность

алгоритмов НСП. Решить эту задачу можно с помощью стохастической аппроксимации байесовских операторов $B_N^{(1)}, B_N^{(2)}$ следующими нелинейными преобразованиями[9]:

$$f_{N+1}(x | A_v) = \begin{cases} f_N(x | A_v), I_N(\theta | A_v) = 0 \\ \frac{1}{h_N^m} f_N\left(\frac{T_N^{-1}(x - a_N)}{h_N} | A_v\right), I_N(\theta | A_v) = 1, \end{cases} \quad (11)$$

где $I_N(\theta | A_v)$ - индикатор события θ на N – м шаге для выбранного решения A_v , a_N, h_N - параметры сдвига и сжатия $f_N(x | A_v)$; T_N - матрица вращения вектора X_N . Выбором параметров a_N, h_N, T_N достигается нужная “деформация” априорного распределения.

В качестве начального распределения $f_0(x | A_v)$ может быть выбрано любое распределение с конечным первым и вторым моментами. Однако для решения практических задач наиболее удобными являются распределения инвариантные относительно линейных преобразований сдвига, сжатия, вращения. К таким распределениям в частности относится нормальное распределение.

Из (11) нетрудно получить выражения для моментных характеристик:

$$m_x(N+1; A_v) = \begin{cases} m_x(N; A_v), I_N(\theta | A_v) = 0 \\ a_N + h_N m_x(N; A_v), I_N(\theta | A_v) = 1, \end{cases} \quad (12)$$

$$\Gamma_x(N+1; A_v) = \begin{cases} r_x(N; A_v), I_N(\theta | A_v) = 0 \\ h_N^2 T_N r_x(N; A_v) T_N^{-1}, I_N(\theta | A_v) = 1 \end{cases} \quad (13)$$

Байесовский оператор $B_N^{(2)}$ также заменяется процедурой стохастической аппроксимации для вероятностей выбора решений:

$$P_{N+1}(A_v) = P_N(A_v) + \gamma_N [I_N(A_v) - P_N(A_v)]. \quad (14)$$

где $I_N(A_v)$ - индикатор реализации решения A_v ;

$\gamma_N = \frac{\gamma_0}{1 + N\gamma_0}$ - программно изменяемый коэффициент усиления с начальным значением

$$\gamma_0 > 0.$$

Выбором γ_0 осуществляется регулирование скорости сходимости процедуры (14) к предельному распределению.

Ранее проведенные исследования эффективности МНСП показывают, что точность определения экстремума при ограниченном числе испытаний достаточно сильно зависит от вида параметра сжатия ($h_N = \frac{1}{n}, h_N = \frac{1}{\sqrt{n}}$ и др.). Наивысшая точность достигается при: $h_N = \frac{1}{\sqrt{n}}$.

Блок-схема алгоритма оптимизации и структурная схема параметрической оптимизации приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

Процесс поиска осуществляется следующим образом. В блок математической модели процесса наведения в данном сеансе поиска поступают значения оптимизируемых параметров из заданных до начала процесса областей их возможного изменения ($\Omega_a, \Omega_{z0}, \Omega_{ktmin}, \Omega_{Tf}, \Omega_{kf}, \Omega_{Um}$).

Так как математическая модель процесса наведения является имитационно-статистической, то для получения достоверных оценок математических ожиданий промаха по главным осям рассеивания в модели просчитывается 200 реализаций в одном сеансе поиска. Результат наведения в каждом сеансе поиска из математической модели процесса наведения поступает в блок проверки выполнения требований, предъявляемых к системе наведения ($E_{кво} \leq E_{кво тр}$).

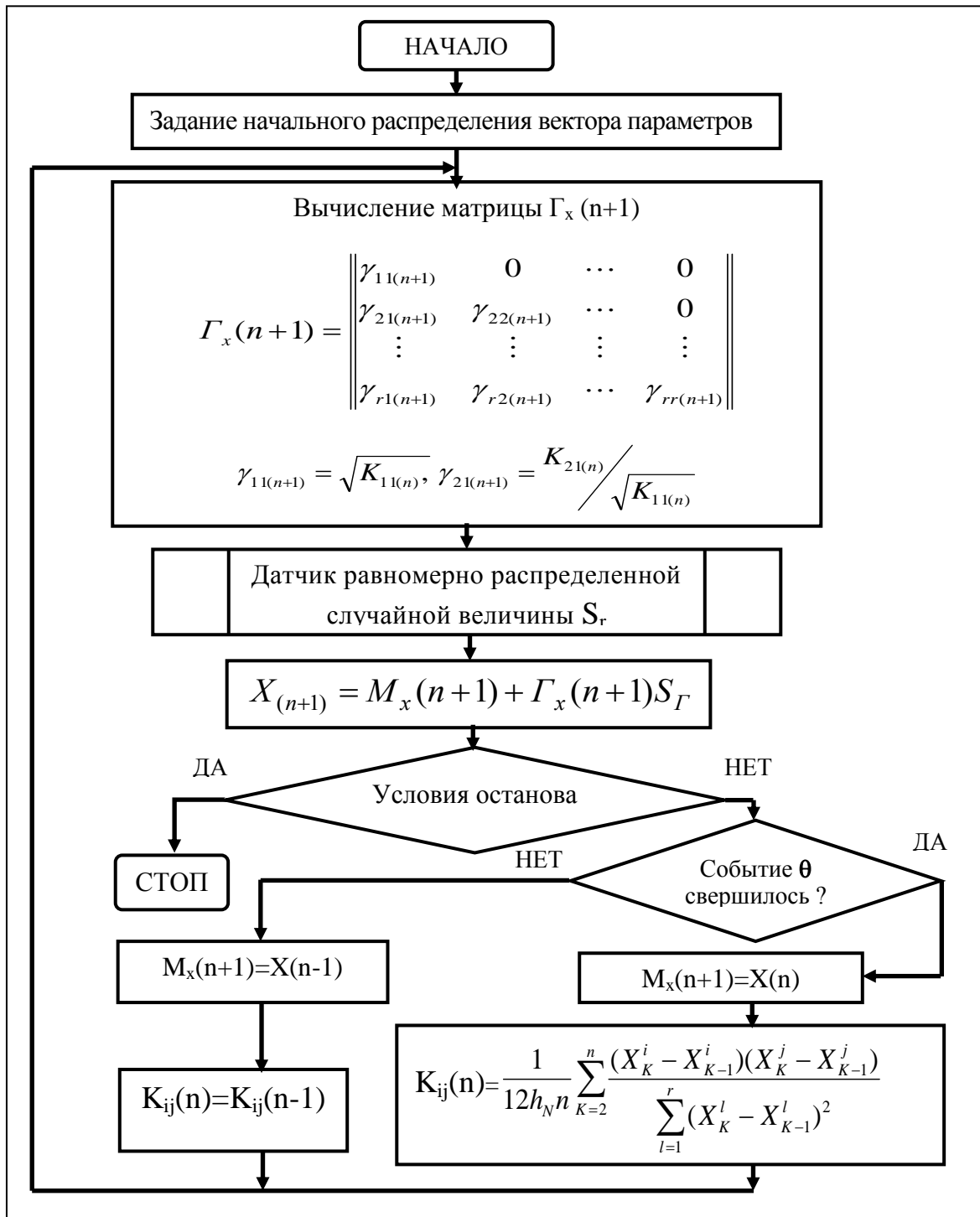


Рис. 3

В этом блоке устанавливается факт успешности или не успешности сеанса поиска, который передается в блок МНСП, где используется для формирования значений 2α , Z_0 , K_{\min} , K_f , T_f , U_m в следующем сеансе поиска.

Таким образом, в соответствии с вышеописанной процедурой, в зависимости от заданных параметров сдвига и сжатия априорной плотности распределения вектора параметров X , выбранной области изменения параметров и количества проведенных сеансов

на выходе блока реализации МНСП получим математические ожидания и среднеквадратические отклонения оптимальных параметров СН в каждой точке сброса на уровне горизонтальных «срезов» в заданном диапазоне высот.

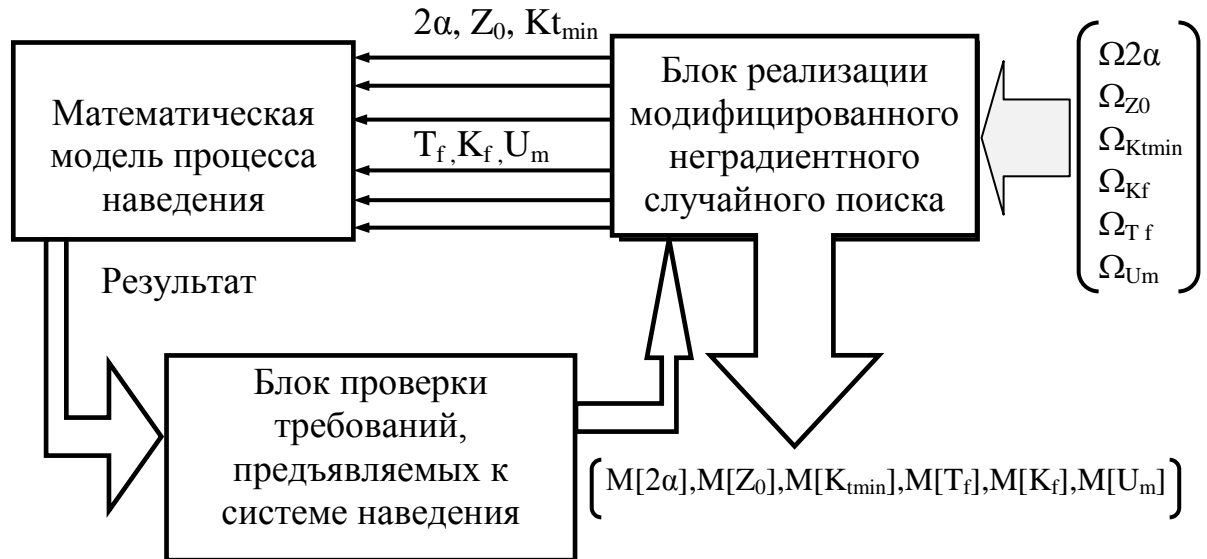


Рис.4.

Для решения поставленной задачи предварительно необходимо было приближенно определить область Ω_{0x} значений вектора \bar{X} , которая содержит вектор \bar{X}_0 , то есть $\bar{X}_0 \in \Omega_{0x}^0$. Определение области Ω_{0x} означает выбор вектора математических ожиданий $M_0 = M[\bar{X}]$ и корреляционной матрицы.

Выбор области Ω_{0x} производится исходя из имеющегося опыта использования такого рода систем. Вектор \bar{X} генерируется случайным образом в соответствии с законом $f_c(\bar{X}_c)$ перед каждой реализацией, имитирующей сброс УАБ и с этими параметрами моделируется процесс наведения УАБ на цель. С помощью имитационной модели рассчитывается величина $E_{кво}$. Результаты решения оптимизационной задачи в каждом сеансе проверяются на выполнение требования (7), при выполнении которого считается, что событие θ произошло.

В программе МНСП происходит отбор значений вектора, \bar{X} при которых произошло событие θ . По полученным в процессе поиска вероятностным характеристикам вектора \bar{X} , при значениях которого совершается событие θ , формируется вектор \bar{X}_0 .

Предварительный анализ позволил определить области изменения оптимизируемых параметров, из которых осуществлялась случайная выборка в каждом сеансе поиска.

На рис. 5 представлен график зависимости оптимизируемых параметров корректирующего фильтра координатора K_f и T_f от количества успешных сеансов поиска, характерный для одной точки зоны возможных сбросов (ЗВС).

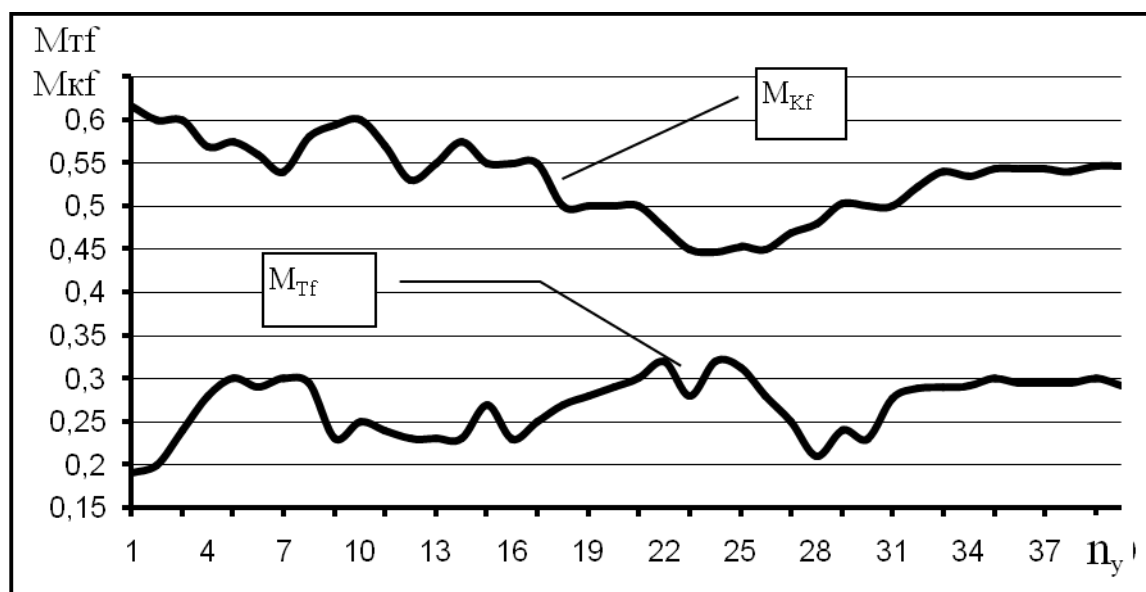


Рис. 5.

Процесс стабилизации математических ожиданий параметров вектора \bar{X} характеризуется тем что, после 34 реализаций математические ожидания выходят на установившийся режим.

Учитывая достаточно большой объем вычислений ($N_{ст.мод.} \times N_{мнсп.}$) $\times t_{ст.мод.} \times t_{мнсп.}$, расчет всей ЗВС осуществлялся в узловых точках условной координатной сетки в горизонтальных плоскостях с заданным шагом разбиения. Здесь: $N_{ст.мод.}$, $N_{мнсп.}$ - количество реализаций имитационно-статистической модели боевого применения УАБ и МНСП соответственно; $t_{ст.мод.}$, $t_{мнсп.}$ - время одной реализации имитационно-статистической модели и МНСП соответственно. Точки, в которых выполнялось требование (7) включались в множество всех точек составляющих ЗВС и точки не удовлетворяющие этому требованию из множества исключались. Расчет производился для половины ЗВС относительно оси симметрии стартовой системы координат X и затем ЗВС аппроксимировалась по граничным точкам, в которых выполнялось требование заданной точности наведения.

Таким образом, в работе была решена задача по оптимизации параметров телевизионной СН УАБ для различных высот и скоростей бомбометания ЛА и определены ЗВС, обеспечивающие повышение эффективности боевого применения УАБ.

Библиографический справочник.

1. Ефимов Е.В. Динамика наведения ракет. Учебное пособие Военного Авиационного Технического университета. 2000 г. с. 45-48.
2. Рейдель А.Л., Соколовский Г.А. Летно-тактические характеристики ракет класса «воздух-воздух» и их связь с эффективностью авиационного боевого комплекса. М.: МАИ, 1993.
3. Буравлев А.И., Монсик В.Б., Сибякин А.А. Вероятностные основы авиационного вооружения. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1995.
4. Казаков И.Е. Гладков Д.И. Методы оптимизации стохастических систем. М. Наука. 1987г.
5. Казаков И.Е. Аналитический синтез квазиоптимального аддитивного управления в нелинейной стохастической системе. М. Автоматика и телемеханика. 1984г. №19.
6. Казаков И.Е. Мишаков А.Ф. Авиационные управляемые ракеты. Часть 2. М. ВВИА. 1985г.
7. Проектирование систем наведения. Под редакцией Федосова Е.А. М. Машиностроение. 1975г.
8. Гладков Д.И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском. М. Энергоатомиздат. 1984г.
9. Опыт применения НСП при оптимизации систем авиационного вооружения/ Научно- методические материалы ВВИА/ Под редакцией Гладкова Д.И., М., ВВИА, 1991г.

Сведения об авторах

Обносов Борис Викторович, профессор, заведующий кафедрой Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-46-02, e-mail: kaf701mai@mail.ru

Очковский Александр Алексеевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета),

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-46-02, e-mail: ochkovsky@bk.ru