

УДК 629.7.05

КОМПЕНСИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

С.В. КОРЕВАНОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Логвиным А.И.

Рассмотрены проблемы компенсации погрешностей инерциальных навигационных систем с помощью адаптивных методов прогнозирования.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, прогнозирование, компонент интеллектуальной системы.

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) функционируют в сложных условиях окружающей среды, пассивных и активных помех и активного противодействия. Поэтому их системы управления (СУ) должны обеспечивать высокую точность движения и эффективное маневрирование БЛА. Навигационный комплекс БЛА обычно состоит из инерциальной навигационной системы (ИНС) и внешнего источника корректировки погрешностей ИНС [1], например, спутниковая навигационная система (СНС). В случаях, когда невозможно получать информацию от внешних источников, необходимо компенсировать погрешности за счет прогнозирующих моделей погрешностей.

В современных СУ БЛА применяются подходы синтеза терминального управления с учетом априорной статической информации, с учетом специфики многокритериальных задач, специфики управления объектами с перенастраиваемой в полёте целью [2].

Существенный прогресс в области построения терминальных регуляторов связан с результатами разработки адаптивных алгоритмов управления, которые отличаются высокой точностью и позволяют эффективно решать поставленные задачи. Адаптивный подход предполагает оперативное уточнение в полёте априорной информации, которая используется при формировании терминального управления. Алгоритмы управления реализуются в СУ БЛА, которые имеют разнообразные структуры. В современных СУ БЛА обычно используются самооптимизирующиеся регуляторы и регуляторы с эталонной моделью, в перспективных СУ БЛА применяются СУ с интеллектуальными компонентами [2]. Реализуемой интеллектуальной компонентой СУ является акцептор действия, в качестве базового элемента которого используется алгоритм построения прогнозирующих моделей. Построение прогнозирующих моделей осуществляется и для повышения точности измерительной информации в навигационном комплексе (НК) БЛА.

Полный потенциал перспективных БЛА будет реализован только тогда, когда бортовые системы управления будут способны обеспечить автоматизированную подготовку полётного задания и адаптацию к изменениям в условиях полёта, окружающей среды и т.д.

Способы оценки и прогнозирования погрешности измерительных систем

В зависимости от характера проявления действующих на БЛА возмущений угловая скорость ухода Ω гироскопов может быть разделена на скорость ухода Ω_n , не зависящую от ускорения, и скорость ухода Ω_p , пропорциональную разбалансировке и зависящую от ускорения. В свою очередь, Ω_p включает в себя скорости ухода Ω_{p1} и Ω_{p2} , пропорциональные осевой и

радиальной разбалансировкам соответственно. При этом величина скорости ухода Ω_p примерно в 5 раз больше скорости Ω_n [1].

Наиболее чувствительной к техническому состоянию giroприбора, определяющему его точностные характеристики, является составляющая Ω_{p1} . В связи с этим для разработки метода оценки и прогнозирования инструментальных погрешностей СУ перспективных БЛА использована возможность оценки и прогнозирования работоспособности giroприбора по характеру изменения скорости ухода Ω_{p1} .

Метод предусматривает:

- определение стабильной составляющей скорости ухода Ω_{p1} на основании информации, полученной в результате измерения её как в процессе предыдущих испытаний, так и по замерам в данном запуске giroприборов с целью ввода поправок на эту составляющую в алгоритмы управления;
- прогноз величины стабильной составляющей скорости ухода Ω_{p1} на последующий запуск giroприбора и оценку соответствия её заданному допуску;
- определение и прогноз точностных характеристик giroприбора на время полёта ЛА по времени нахождения переменной составляющей скорости ухода Ω_{p1} в пределах заданного допуска.

Последние два пункта позволяют принять решение о возможности постановки giroприбора на борт БЛА.

Разделение общей задачи оценки и прогноза основных инструментальных погрешностей интеллектуальной системы управления на задачу определения величины стабильной составляющей скорости ухода Ω_{p1} в запуске с целью ввода соответствующих поправок в алгоритмы управления и задачу оценки и прогноза точностных характеристик giroприбора на время полёта ЛА является условным и сделано только из методических соображений удобства решения общей задачи. В действительности обе указанные задачи находятся в тесной взаимосвязи и в целом раскрывают методологические вопросы индивидуальной оценки и прогноза точностных характеристик отдельного giroприбора, а также определения и компенсации его инструментальных погрешностей.

Представим математическую модель процесса скорости ухода giroприбора Ω_{p1} в следующем виде [3]

$$\Omega_{Mt} = l^j(\Omega_t^j) + \alpha_\Delta(\Omega_t^j) + l^s(\Omega_t^s), \quad (1)$$

где Ω_{Mt} – скорость ухода giroприбора Ω_{p1} , полученная на основании модели; $\Omega_t^j, \Delta\Omega_t^j$ – соответственно значения стабильной и переменной составляющих в данном запуске giroприбора; Ω_t^s – значение «скачка» стабильной составляющей скорости ухода giroприбора от запуска к запуску; l^j, α_Δ, l^s – параметры модели; j, s – индексы, соответствующие изменению скорости ухода в запуски и от запуска к запуску.

В связи с тем, что ввод поправок осуществляется на величину Ω_t^j , то для данной задачи примем $\Omega_{Mt} = l^j(\Omega_t^j)$, и эффективность ввода поправок на стабильную составляющую скорости определяется степенью приближения моделируемой скорости ухода к её реальному значению, то есть

$$|\Omega_t^j - \Omega_{Mt}| \leq \varepsilon_\Omega \text{ при } t_{изм} \leq t_{дон}, \quad (2)$$

где ε_Ω – точность оценки стабильной составляющей скорости ухода за время её измерения $t_{изм}$, не превышающего допустимое значение $t_{дон}$.

При правильно выбранной структуре модели (1) погрешность оценки Ω_{Mt} будет зависеть только от точности определения параметров модели, которая может характеризоваться стабильностью значений этих параметров во времени по мере накопления измерительной информации.

Для оценки стабильности параметров модели могут быть использованы следующие критерии [4]:

$$\begin{cases} K_1 = |M[l^j] - l_1^j| \leq \Delta; K_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_1^j - M[l^j])^2}{n-1}} \leq \eta_l; \\ K_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_1^j - l_{i-1}^j)^2}{n}} \leq \varepsilon_l, \end{cases} \quad (3)$$

где $M[l^j]$ – математическое ожидание; $\Delta, \eta_l, \varepsilon_l$ – заданные точности определения параметров модели, получаемые из условия обеспечения минимального влияния инструментальных погрешностей СУ на точность приведения БЛА в заданную область пространства; $i = 1, 2, \dots, n$ – последовательность оценок параметров модели.

Исследования показали, что критерий K_3 является более чувствительным к изменению параметров модели (1).

Для оценки и прогноза точностных характеристик гиросприбора по результатам прогноза величины «скачка» стабильной составляющей скорости ухода от запуска к запуску из общей модели (1) воспользуемся слагаемым $\Omega_{Mt} = l^s(\Omega_t^s)$, характеризующим процесс изменения «скачка».

При наличии математической модели «скачков» Ω_t^s от запуска к запуску появляется возможность осуществить прогноз её величины и сравнить с заданным допуском при условии обеспечения требуемой точности определения параметров модели l^s по критерию K_3 .

Для получения полной оценки прогнозируемых точностных характеристик гиросприборов на время полёта БЛА и принятия решения о возможности постановки их на борт необходимо, помимо прогноза, провести оценку соответствия величины переменной составляющей заданному допуску скорости ухода на время полёта БЛА.

Поведение переменной составляющей скорости ухода гиросприбора может быть описано с помощью второго члена общей модели процесса изменения скорости ухода (1). При этом время нахождения $\Delta\Omega_t^3$ в пределах заданного допуска наилучшим образом описывается с помощью смешанного распределения Вейбулла.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta_\Omega}{\alpha_\Omega} (e - \gamma_\Omega)^{\beta_\Omega - 1} \exp - \left(\frac{(t - \gamma_\Omega)^{\beta_\Omega}}{\alpha_\Omega} \right), t \geq \gamma_\Omega, \beta_\Omega > 0, \alpha_\Omega > 0; \\ 0 - \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (4)$$

где $\alpha_\Omega, \beta_\Omega$ – параметры масштаба и формы, характеризующие время нахождения $\Delta\Omega_t^j$ в пределах заданного допуска и степень износа гиросприбора соответственно; γ_Ω – параметр положения, соответствующий конечному значению времени, до которого выход $\Delta\Omega_t^j$ за допуск невозможен.

При допущении $\gamma = 0$ вероятность $P(t)$ и среднее время μ_t нахождения $\Delta\Omega_t^j$ в заданном допуске определяются соответственно как

$$P(t) = \exp \left(-\frac{t^{\beta_\Omega}}{\alpha_\Omega} \right); \mu_t = (\alpha_\Omega)^{\frac{1}{\beta_\Omega}} - \left(1 + \frac{1}{\beta_\Omega} \right). \quad (5)$$

С учетом того, что процесс изменения скорости ухода в запусках $\Omega_{Mt} = l^j(\Omega_t^j)$ может быть описан авторегрессионной моделью типа

$$\Omega_k^j = (1 + l_1^j)\Omega_{k-1} + l_1^j\Omega_{k-2}, \quad (6)$$

а процесс изменения «скачков» стабильной составляющей скорости ухода $\Omega_{Mt} = l^s(\Omega_t^s)$ – моделью типа

$$\Omega_k^s = \Omega_{k-1}l_1^s, \quad (7)$$

для определения параметров моделей могут быть использованы соотношения:

$$l_t^3 = \frac{\sum_{i=2}^k \omega_i \omega_{i-1}}{\sum_{i=2}^k \omega_{i-1}^2}; l_t^c = \frac{\sum_{i=2}^k \Omega_i \Omega_{i-1}}{\sum_{i=2}^k \Omega_{i-1}^2}, \quad (8)$$

где $\omega_k = \Omega_k - \Omega_{k-1}$ – разность первого порядка.

Для определения параметров Вейбулла в (4) воспользуемся методом максимального правдоподобия, тогда уравнения для оценки параметров $\alpha_\Omega, \beta_\Omega$ будут иметь вид:

$$\begin{cases} n\alpha_\Omega - \sum_{i=1}^n t_i^{\beta_\Omega} = 0; \\ \frac{n}{\beta_\Omega} + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{1}{\alpha_\Omega} \sum_{i=1}^n t_i^{\beta_\Omega} \ln t_i = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где n – количество информации о времени нахождения переменной составляющей в пределах заданного в формуляре на прибор допуска; t_i – время нахождения переменной составляющей в пределах допуска, полученного по результатам испытаний прибора ($i=1,2,\dots,n$).

Для решения системы уравнений (9) воспользуемся методом случайного поиска, который подразумевает нахождение минимальной невязки

$$\Delta E = |E_1| - |E_2|, \quad (10)$$

где E_1, E_2 – являются соответственно первым и вторым уравнением системы (8). В качестве начальных приближений могут быть использованы значения параметров h и N , полученные в результате предыдущих испытаний данного прибора или партии, и в дальнейших расчетах на каждом шаге поиска в качестве этих значений принимаются величины

$$\bar{h}^{(N)} = l\xi^{(N)}, \quad (11)$$

где $\bar{h} = (\alpha_\Omega, \beta_\Omega)^T$; N – число шагов поиска; l – масштаб, определяемый возможными пределами изменения h ; ξ – нормальное распределение случайной величины.

Поиск прекращается при условии $\Delta E < \varepsilon_2$, где ε_2 – заданная точность решения. Полученные значения позволяют определить показатели.

Таким образом, разработанный метод позволяет с помощью соотношений и оценить, и спрогнозировать работоспособность отдельного гиросприбора СУ по его точностным параметрам. При этом прибор допускается к эксплуатации, если выполняются условия:

$$\Omega_k^c \leq \Omega_{\text{доп}}^c; P(t) \geq P_{\text{зад}}; \mu_t \geq t_{\text{пол}}, \quad (12)$$

где $\Omega_{\text{доп}}^c$ – допустимое значение «скачка» стабильной составляющей скорости ухода Ω_{PI} ; $P_{\text{зад}}$ – заданное значение вероятности нахождения переменной составляющей скорости ухода в заданном диапазоне за время полёта БЛА $t_{\text{пол}}$.

Структура и параметры модели (1), а также средние значения $\alpha_\Omega^{\text{cp}}, \beta_\Omega^{\text{cp}}$, количество запусков прибора n на заводе и значения $P(t)$ и μ_t должны быть определены в условиях завода-изготовителя и записаны в формуляр на гиросприбор. После поступления прибора в эксплуатацию параметры модели не уточняются. В то же время в процессе испытаний гиросприбора на техническом комплексе уточняют параметры Вейбулла с помощью алгоритма:

$$\begin{aligned} \alpha_\Omega &= \alpha_\Omega^{\text{cp}} - \frac{1}{n+K} (\alpha_\Omega^{\text{cp}} - \alpha_T); \\ \beta_\Omega &= \beta_\Omega^{\text{cp}} - \frac{1}{n+K} (\beta_\Omega^{\text{cp}} - \beta_T), \end{aligned} \quad (13)$$

где K, α_T, β_T – количество запусков и параметры, определяемые по результатам испытаний гиросприбора.

После уточнения α_Ω и β_Ω рассчитываются показатели $P(t), \mu_t$, и в соответствии с (12) по результатам испытаний гиросприбора делается вывод о возможности установки его на борт БЛА. Оценку стабильной составляющей Ω_t^3 с целью ввода поправок на её величину и алгоритмы управления осуществляют на стартовом комплексе с помощью модели при значении параметра l_1^3 , определенном по результатам испытаний, что существенно сокращает временной интервал для оценки и прогнозирования величины стабильной составляющей скорости ухода гиросприбора.

В процессе полёта БЛА, помимо представленных априорных моделей, целесообразно применять динамические модели, построенные на борту БЛА. Априорные модели отличаются про-

стой реализацией, но обладают невысокой точностью. Модели, построенные с помощью алгоритмов самоорганизации генетическими алгоритмами, имеют высокую точность и позволяют учитывать субъективные особенности измерительных систем. Модифицированная методика позволяет провести анализ результатов прогнозов в полёте и выделить наилучшую конфигурацию НК, а также определить точность выполнения БЛА поставленных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лебедев Г.Н.** *Интеллектуальные системы управления и их обучение с помощью методов оптимизации: учеб. пособие.* М.: МАИ, 2002. 212 с.
2. **Назаров А.И.** *Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем.* М.: Наука и техника, 2004. 302 с.
3. **Hopfield J.** *Neural Networks and physical system with emergent collective computational abilities.* In Proc. National Academy of sciences, USA, 1982. Pp. 77-92.

MODELLING GROUP ACTION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Korevanov S.V.

The problems of modeling and planning group flights of unmanned aerial vehicles are considered. For each stage of the planning procedure of group activates neural network structure is designed.

Keywords: unmanned aerial vehicles, flight planning, neural system.

REFERENCES

1. **Lebedev G.N.** *Intellectualnye systemy upravleniya i ikh obuchenie s pomochyu metodov.* М.: МАИ. 2002. 212 p. (In Russian).
2. **Nazarov A.I.** *Nejrosetevye algoritmy prognozirovaniya i optimizatsii system.* М.: Nauka i Tekhnica. 2004. 302 p. (In Russian).
3. **Hopfield J.** *Neural Networks and physical system with emergent collective computational abilities.* In Proceeding National Academy of sciences. USA. 1982. Pp. 77-92.

Сведения об авторе

Кореванов Степан Владимирович, 1988 г.р., окончил МГТУ ГА (2010), аспирант МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – беспилотные летательные аппараты, нейросетевые системы, эксплуатация радионавигационных систем.