

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ

к.т.н. К.Ф. Фомичев, к.т.н. С.М. Андреев  
(представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин)

*В работе решается задача оценки угловой скорости линии визирования между двумя подвижными объектами с жестко закрепленным координатором и датчиком угловой скорости на одном из них.*

Обычно в качестве измерителя угловой скорости линии визирования (УСЛВ) используются следящие координаторы с электрическими и гидравлическими двигателями или гироскопические. Точность следящего координатора определяется его динамическими свойствами и характеристиками входного сигнала. Следящий координатор – элемент системы самонаведения, стационарная линейная система. Стационарный координатор не может быть оптимальным измерителем УСЛВ в процессе всего полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) к цели. Параметры координатора выбираются для определенного входного сигнала и фиксированной дальности. Этот недостаток устраняется с помощью нестационарных корректирующих цепей, которые целесообразно применять, когда имеется возможность заранее определить приближенно начало отсчета и полное время работы системы.

Таким образом, ограничения, накладываемые на следящие координаторы, учет динамики приводов, гироскопических систем обуславливают относительно невысокую точность вывода БПЛА в точку встречи.

Использование в технике самонаведения жестко закрепленных на корпусе БПЛА координаторов цели позволяет обеспечить высокую точность угломерных измерений, нечувствительность к перегрузкам. К тому же подобные координаторы имеют малые габариты и вес, обладают повышенной надежностью. Однако жестко закрепленные координаторы позволяют непосредственно (без дополнительного комплексирования системы) реализовать лишь метод прямого наведения, который в условиях движения цели с определенной скоростью не обеспечивает необходимой точности. Получить информацию об УСЛВ непосредственно (то есть дифференцированием угла пеленга) можно лишь при следующих условиях: высокая степень демпфирования угловых колебаний БПЛА вокруг его экваториальных осей; отсутствие шумов измерения угла пеленга.

Обработки сигнала от цели (например, электромагнитного излучения в одном из его диапазонов), можно разбить на следующие этапы:

1) прием электромагнитного излучения оптической системой (ОС) и фокусировка его в фокальной плоскости (ФП);

2) выделение максимума энергии изображения в ФП ОС с помощью линейки фоточувствительных элементов.

Наличие шума и экваториальных угловых скоростей приводит к значительным отклонениям УСЛВ от истинной.

Для решения данной задачи используем комплексирование системы, а именно «координатор + датчик угловой скорости (ДУС)». Рассмотрим имеющиеся здесь связи.

Выражение для угла пеленга можно записать  $\epsilon = \varphi + \vartheta$ , где  $\varphi$  - угол линии визирования в нормальной земной системе координат;  $\vartheta$  - угол тангажа БПЛА. Тогда УСЛВ равна  $\dot{\varphi} = \dot{\epsilon} - \dot{\vartheta}$ . При наличии шумов и высших возмущений оценку состояний объекта можно получить, используя стандартную процедуру фильтра Калмана - Бьюси (ФКБ).

Итак, необходимо оценить УСЛВ по измеряемым координатором углу пеленга цели и сравнительно точным значениям экваториальной угловой скорости, которые можно считать сигналом управления (1).

Динамическая модель параметров самонаведения имеет вид:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\varphi} + \dot{\vartheta}; \quad \ddot{\varphi} = 0; \quad z = \epsilon + \xi_z.$$

Принципиальная схема ФКБ представлена на рис. 1.

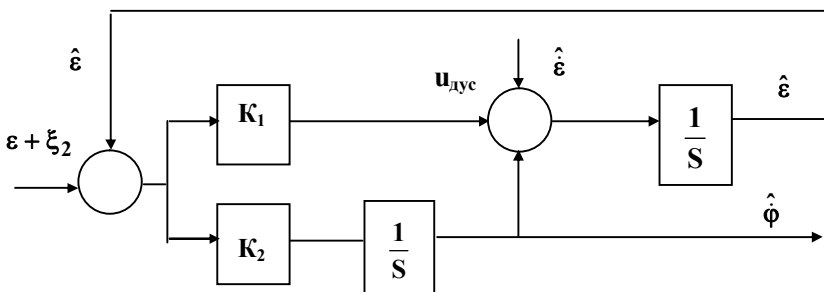


Рис. 1. Принципиальная схема фильтра Калмана - Бьюси

Достоинство этой схемы в том, что повышается надежность получения информации, т.к. допускаются кратковременные отключения измерителя, при которых оценка  $\hat{\varphi}$  запоминается, а оценка  $\hat{\epsilon}$  формируется в режиме прогноза по величине  $\hat{\varphi}$ .

Сигнал управления может быть описан следующим образом:

$$u_{\text{ДУС}} = \dot{\vartheta} + \xi_u. \quad (1)$$

В уравнении (1) к возмущениям  $\xi_u$  можно относить не только реальные физические возмущения, но и все возможные неточности задания моделей процесса и измерения управлений [1].

Оцениваемый дискретный во времени стохастический процесс описывается разностным уравнением вида [2]:

$$X[k+1] = Ax[k] + Bu[k] + \xi_u[k] \quad (2)$$

при наблюдении вида  $Z[k] = Hx[k] + \xi_z[k]$ ,

где  $x[k] = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \phi \end{bmatrix}$  – вектор состояния;  $u[k] = \dot{\theta}$  – сигнал управления;

$z[k] = \varepsilon + \xi_z$  – сигнал измерения;  $A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  – переходная матрица системы;

$B = \begin{bmatrix} \Delta t \\ 0 \end{bmatrix}$  – вектор управления;  $H = [1 \ 0]$  – матрица наблюдения;

$\Delta t$  – шаг прогноза;  $\xi_u[k]$ ,  $\xi_z[k]$  ( $k = 0, 1, \dots$ ) – независимые белые гаусовские последовательности, такие, что:

$$E[\xi_z[k] | \xi_z^T[k]] = R[k] \delta_{kl}; \quad E[\xi_u[k] | \xi_u^T[k]] = Q[k] \delta_{kl},$$

где  $\delta_{kl}$  – символ Кронекера.

Запишем уравнения рекуррентного ФКБ для стационарного линейного процесса, т.е. с учетом того, что матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $Q$ ,  $C$  постоянны:

- прогноз оценок  $\hat{x}[k+1/k] = A\hat{x}[k] + Bu[k]$ ;
- прогноз ковариаций  $P[k+1/k] = AP[k]A^T + CQC^T$ ;
- выражение для матричного коэффициента усиления

$$K[k+1] = P[k+1/k]H^T[HP[k+1/k]H^T + R]^{-1};$$

- коррекция оценок

$$\hat{x}[k+1] = \hat{x}[k+1/k] + K[k+1][Z[k+1] - H\hat{x}[k+1/k]];$$

- коррекция ковариаций  $P[k+1] = [I - K[k+1]H]P[k+1/k]$ ,

где  $P[k] = E[\Delta x[k]\Delta x^T[k]]$  – ковариационная матрица ошибок оценивания;

$\Delta x[k] = \hat{x}[k] - x[k]$ ;  $Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix}$  – матрица ошибок процесса;  $I$  –

единичная матрица.

Одним из основных этапов синтеза полученного алгоритма является выбор его параметров  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  и  $\Delta t$ .

Для задания начальных значений ковариаций ошибок оценивания угла пеленга –  $P_{11}$  и УСЛВ –  $P_{22}$  рассмотрим физическую сущность этих

ошибок. Погрешность при определении угла пеленга обусловлена, в частности, конечными размерами элемента фотолинейки. Осредненная оценка будет равна  $\Delta \varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{об}}{n}$ , где  $\varepsilon_{об}$  - заданное поле обзора координатора;  $n$  - количество элементов в линейке фотоэлементов.

При определении  $\mathbf{P}_{11}$  необходимо также учесть случайную составляющую ошибки, вызванную приведенными выше факторами.

Значение элемента ковариационной матрицы  $\mathbf{P}_{22}$  выбираем априори по максимальному значению УСЛВ, имеющему место при начальных условиях наведения. Это связано с тем, что отсутствует первичная информация об УСЛВ и при начальных условиях, когда  $\hat{\boldsymbol{\phi}}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ , максимальная ошибка оценивания будет определяться максимально возможным значением УСЛВ.

Интенсивность шумов измерения ( $\mathbf{R}_{11}$ ) угла пеленга рассчитывается на основе синтезируемых флуктуационных ошибок координатора.

Поскольку значение экваториальной угловой скорости, измеряемой ДУС, отличается от истинного, необходимо учесть это введением в ковариационное уравнение интенсивности шумов процесса  $\mathbf{Q}_{11}$  (шумы считаются широкополосными).

Достаточно важен выбор величины  $\mathbf{Q}_{22}$ , так называемого фиктивного шума. Реальный процесс изменения УСЛВ может быть весьма интенсивным. В ФКБ используется весьма упрощенная модель, описывающая динамику изменения УСЛВ, а именно  $\ddot{\boldsymbol{\phi}} = \mathbf{0}$ , что вызвано отсутствием необходимого обеспечения на борту БПЛА. В связи с этим возникает динамическое смещение оценки. Для компенсации такого динамического смещения, обусловленного неучтенной моделью динамики УСЛВ, и вводится параметр  $\mathbf{Q}_{22}$ . Шаг прогноза  $\Delta t$  обычно выбирается, исходя из требуемой точности алгоритма.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А.В. Пилотажно-навигационные комплексы (материалы лекций и семинаров). – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1989. – 75 с.
2. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. – М.: Наука, 1987. – 230 с.

Поступила 21.01.2002

**ФОМИЧЕВ Константин Федорович**, канд. техн. наук, доцент кафедры Харьковского института ВВС Украины. Область научных интересов - системы автоматизированного управления.

**АНДРЕЕВ Сергей Михайлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры Харьковского института ВВС Украины. Область научных интересов – беспилотные летательные аппараты.