

## **СИМУЛАЦИЯ НА ОТКАЗ НА НАВИГАЦИОННА СИСТЕМА ПО ВРЕМЕ НА ОБУЧЕНИЕ НА ЛЕТАТЕЛЕН СЪСТАВ**

**Ангел Димитров Танев**

ВТУ "Тодор Каблешков", София  
[ang\\_tanev@abv.bg](mailto:ang_tanev@abv.bg)

## **SIMULATION OF A NAVIGATION SYSTEM' S FAILURE DURING THE TRAINING OF THE FLYING STAFF**

**Angel Dimitrov Tanev**

VTU "T. Kableshkov", Sofia  
[ang\\_tanev@abv.bg](mailto:ang_tanev@abv.bg)

**Key words: navigation system, inaccuracy of filtering, failure**

**Abstract:** In process of aircraft' s maintainance it is very important to pay attention to the current failures both on the land and in the air. The failure is the moment when the object passes from working capacity into inability to work. In some cases failures could become a prerequisite for an air accident. In practice it is important to investigate these events giving a model of the current navigation system and a model of the failure in order to estimate the process of filtering in the moment of its beginning. The accuracy of the evaluate influences on flights safety.

### **1. Въведение**

Нормалното функциониране на една навигационна система (радионавигационна; инерциална навигационна система) може да бъде описано от математически апарат, наречен филтър на Калман. Този филтър е много силен в няколко аспекта: той поддържа оценяване на предишни, настоящи и дори бъдещи състояния на системата. По време на полет предположенията за идеално функциониране на такава система рядко се изпълняват.

По време на обучение на летателен състав инструкторът има възможност да имитира отказ на една от тези системи във въздуха за оценка на правилността на вземане на решение от обучаемия. При правилна последователност на действие от страна на обучаемия в кабината произтича снемане на въведения отказ.

Ще бъде симулиран отказ на дадена стъпка на работата на дискретния филтър на Калман, за да се онагледят практическото изпълнение на отказ в реална ситуация. Ще покажем рязкото нарастване на дисперсията на грешката от филтрация по време на това събитие. Целта на доклада е да онагледят

практическото въвеждане на Калмановата филтрация и оценяване на процесите по време на възникване на нарушения в канала за измерване.

## 2. Описание на функционирането на навигационна система

Разглеждаме линейна вероятностна динамична система (ДС) с дискретно време. Такава система в режим на нормално функциониране, т.е. при отсъствие на откази, се описва от линейни разликови уравнения на състоянието и наблюдението. Уравнението на състоянието характеризира динамиката на системата, уравнението на наблюдението определя механизма на образуване на данните, достъпни за измерването. В разглеждания случай тези уравнения в общ вид могат да се запишат чрез уравнение на състоянието [1]:

$$(2.1) \quad x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + B(k+1, k)u(k) + G(k+1, k)w(k)$$

Аналогично се записва уравнение на наблюдението :

$$(2.2) \quad y(k) = H(k)x(k) + D(k)u(k) + F(k)v(k),$$

където  $x(k)$  –  $n$  - мерен вектор на състоянието на системата;

$\Phi(k+1, k)$  - преходна матрица с размер  $n \times n$ ;

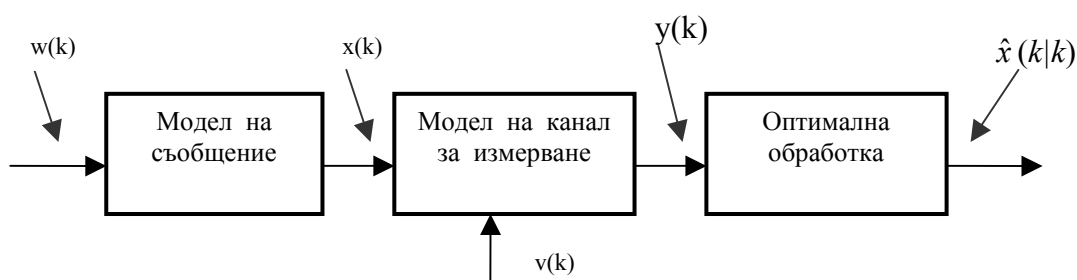
$u(k)$  -  $p$  - мерен вектор на управление ( вектор на входа );

$B(k+1, k)$  - преходна матрица на управлението с размер  $n \times p$ ;

$w(k)$  – случаен  $r$  - мерен вектор на гаусовите шумове от смущенията (шумове на системата) с нулево математическо очакване и корелационна матрица  $E[w(k)w^T(j)] = Q(k) \delta(kj)$ , където:

$E$  – оператор на статистическо усредняване,  $T$ - знак за транспониране, а  $\delta(kj)$ -делта-функция;  $G(k+1, k)$  - преходна матрица на шумове от смущенията с размер  $n \times r$  ;  $y(k)$  -  $s$ -мерен вектор на наблюдението;  $H(k)$  – матрица на наблюдението на системата с размер  $s \times n$  ;  $v(k)$  - случаен ( $m$ -мерен) вектор на гаусовите шумове от измерването с нулево математическо очакване и корелационна матрица  $E[v(k)v^T(j)] = R(k) \delta(kj)$ ;  $D(k)$  и  $F(k)$  - матрици на системата с размер  $s \times p$  и  $s \times m$  съответно. За пълното статистическо описание поведението на системата е необходимо да се зададе вероятностната плътност на разпределение на нейното начално състояние  $f[x(0)]$ . Така както всичките случайни променливи, влизащи в уравнение (2.1) и (2.2), са гаусови, то началното състояние напълно се описва от вектора на математическото очакване  $E[x(0)] = \overline{x(0)}$  и корелационна матрица  $E\{[x(0) - \overline{x(0)}][x(0) - \overline{x(0)}]^T\}$ .

Динамичната система, определена от уравнения (1.1) и (1.2), физически може да се интерпретира като модел на нормално функциониране на канал за измерване на навигационен параметър ( азимут, далечина ) - фиг.1.1, работещ без откази.



### Фиг.1. Структурна схема на канал за измерване

Задачата за филтрация се заключава в това, че по съвкупността от последователните измервания  $\{y(1), y(2), \dots, y(k)\} = Y_1^k$  да се намери оптималната оценка на вектора на състояние  $x(k)$  чрез алгоритъма за оптимална филтрация (филтър на Калман), удовлетворяващ критерия на минимума на средно-квадратичното значение на грешката. Означаваме тази оценка чрез  $\hat{x}(k|k)$ , а грешката при оценката с:

$$(2.3) \quad \tilde{x}(k|k) = x(k) - \hat{x}(k|k).$$

В теорията на оценяването [3] е показано, че оценката на вектора на състояние, удовлетворяваща този критерий, се явява условно средно значение, определено от:

$$(2.4) \quad \hat{x}(k|k) = E \{x(k) | Y_1^k\}$$

Следователно, за нейното намиране е необходимо да се изчисли апостериорната вероятностна плътност на разпределение  $f[x(k) | Y_1^k]$ . Тази плътност може да се получи непосредствено, използвайки формулата на Байес:

$$(2.5) \quad f[x(k) | Y_1^k] = f[x(k) | Y_1^{k-1}, y(k)] = \frac{f[x(k) | Y_1^{k-1}] f[y(k) | x(k), Y_1^{k-1}]}{f[y(k) | Y_1^{k-1}]}$$

Разглеждайки поотделно всяка от плътностите, влизащи в израза (2.5), може да се покаже, че в дадения случай те се явяват гаусови плътности с параметри, определени на основание уравнение на състояние (2.1) и наблюдение (2.2) [1].

Грешката от филтрация може да се определи от корелационната матрица, която има следния вид:

$$(2.6) \quad P(k|k) = P(k|k-1) - P(k|k-1)H^T(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1}H(k)P(k|k-1).$$

където  $P(k|k-1)$  – корелационна матрица на грешката от предсказване.

Тази корелационна матрица на грешката от филтрация съдържа дисперсиите на грешките на отделните навигационни параметри (азимут, далечина).

Един от важните източници на нарушения се явява канала за измерване. Нарушенията в този канал могат да произтекат по най-различни причини, основните от които се явяват: случайни пропадания на информационните сигнали; появяване на лъжливи (аномални) измервания  $y(k)$ , не съдържащи информация за оценявания вектор на състоянието  $x(k)$ ; изменение на свойствата на канала (матрица на наблюдение  $H(k)$ ); рязко нарастване на шума от измерването  $v(k)$  или случайно изменение на техните характеристики (например, за сметка на изменение на матрица  $F(k)$ ). Използването при тези условия на алгоритмите за оценяване, неотчитащи възможностите за появяване на нарушения в канала за измерване, довежда до съществено нарастване на грешката от филтрацията, а в задачите за съпровождане на целите - до срив в следенето.

### **3. Симулация на отказ и анализ на резултатите.**

Под отказ се разбират възможни скокообразни изменения на параметрите или структурата на системата, произтичащи в случайни моменти от време [2]. Поради това при описание на динамична система, в която е необходимо да се отчита възможността за поява на отказ, се въвежда случаен неизвестен вектор на параметрите  $\gamma(k)$ . Появата на отказ довежда до скокообразно изменение на този вектор. Уравненията на състояние и наблюдение на системата в този случай се оказват зависещи от изменящия се в случайни моменти от време вектор  $\gamma(k)$ .

Предполага се, че в канала за измерване на радионавигационната система са възможни случайни пропадания на сигнала. Тогава уравнението на наблюдение се записва по следния начин:

$$(3.1) \quad y(k) = \gamma(k)H(k)x(k) + v(k),$$

където  $\gamma(k)$  - скаларна случайна функция, приемаща две значения- нула (пропадане на информационен сигнал) и единица (нормално функциониране).

При симулацията на отказ на дадената стъпка на работа на дискретния филтър на Калман се въвежда стойност на  $\gamma(k) = 0$ . От практическа гледна точка при радиотехническите системи за близка навигация това може да се отъждестви със загуба на сигнал в приемника в зоната на интерференчните пропадания на сумарната диаграма на насоченост. В дадения случай за модела на канала за измерване приемаме стойности на дисперсиите:  $Q(k) = 0.0004$ ;  $R(k) = 0.0025$ ; начална стойност на дисперсията на грешката от оценяване  $P(0) = 0.008$  [1]. От фиг.2 ясно се вижда как дисперсията на грешката в процеса на филтрация започва да намалява като в момента на настъпване на отказ рязко нараства. На същата фигура са показани също така случайното съобщение  $x(k)$  и едно от измерените значения на  $y(k)$ .

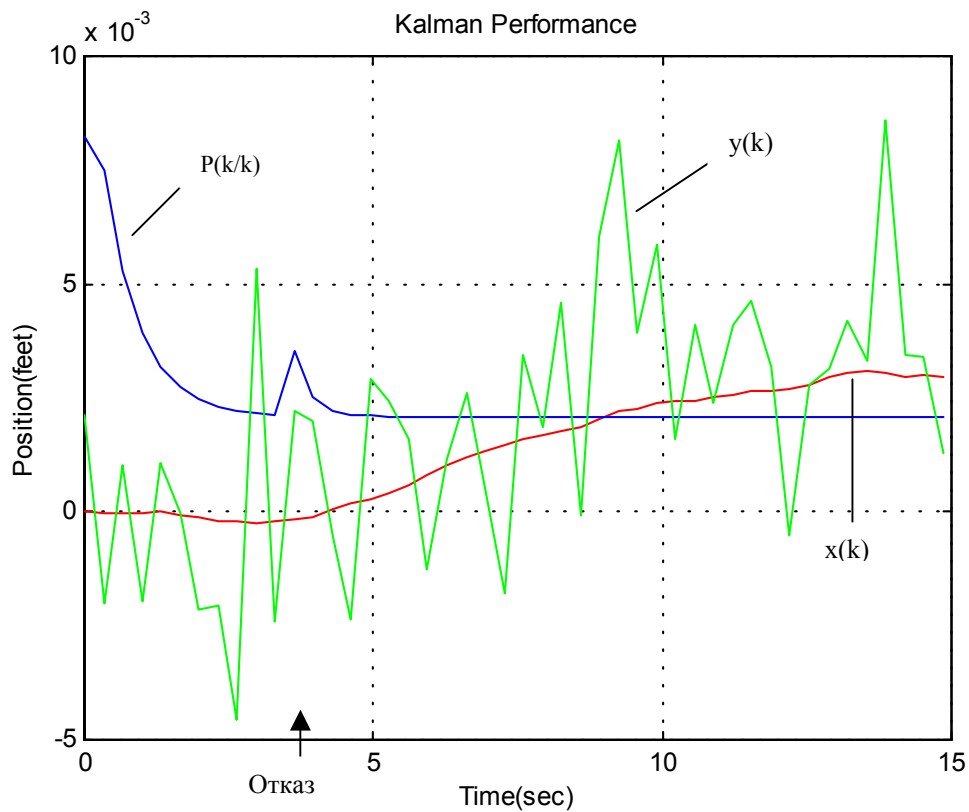
Анализът на процеса в канала за измерване извършваме благодарение на оптималния алгоритъм на Калманова филтрация. Този алгоритъм, който е заложен на цифрова изчислителна машина (ЦИМ), ни дава ясна представа за грешката от филтрация и като цяло за процеса на въвеждане на отказ в реална ситуация.

### **4. Изводи**

На практика предположенията за идеално функциониране на канала за измерване рядко се изпълняват. От фиг.2 ясно се вижда как алгоритъма на Калманова филтрация намалява дисперсията на грешката от филтрация след всяка стъпка до момента, в който възникне отказ. По време на обучение на летателен състав при включване на дублираща система в кабината от страна на обучаемия се сменя имитацията на отказ.

Погледнато от друга страна това поставя задачата за разработката на алгоритми за оценяване, устойчиви към нарушения в канала за измерване. Това се явява една от най-важните задачи при проектиране на отказоустойчиви динамични системи, имащи голямо практическо значение за системите в радиолокацията, навигацията, комуникациите, и управлението. На практика в комплексните системи за навигация се използват субоптимални алгоритми за нелинейна филтрация, устойчиви към откази в отделните канали. Те работят в реален мащаб на времето и имащи по-голяма точност на филтрация от стандартния филтър на Калман.

Анализът от симулацията на отказ на навигационна система може да бъде използван за повишаване на теоретичната подготовка на летателния състав.



Фиг.2. Дисперсия на грешката от филтрация

### Литература

1. Гришин Ю. П. "Динамические системы, устойчивые к отказам", Москва, 1985
2. Петров Н. И. "Эксплуатационна надеждност на рискови технически системи", Ямбол, 2002
3. Сейдж Е., Мелс Дж. "Теория на оценяването и нейното използване в системите за комуникация и управление", Превод от английски, 1976