

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Программа, методические указания,  
задания к контрольной и курсовой работам

Рассматривается задача оптимально-инвариантной оценки сигналов КИС на основе использования фильтрации Винера и Калмана. Приводятся алгоритмы оценки качества обработки сигналов.

Тема 3.4. Анализ и параметрический синтез линейных КИС. Рассматриваются этапы анализа и параметрического синтеза линейной КИС.

Приводится пример параметрического оптимального синтеза комплексного измерителя высоты полёта летательного аппарата на основе использования радиовысотомера и баровысотомера с обеспечением астатизма первого порядка.

Раздел 4. Нелинейные инерционные КИС.

Тема 4.1. Нелинейные оптимальные и оптимально-инвариантные инерционные КИС.

Исследуются алгоритмы оптимальной и оптимально-инвариантной комплексной классификации сигналов по критериям В.А. Котельникова, Неймана-Пирсона и максимального правдоподобия. Приводятся соотношения для оценок ошибок классификации.

Тема 4.2. Нелинейные оптимально-инвариантные КИС фильтрации сигналов с учётом надёжности измерителей.

Приводятся алгоритмы и оценка качества оптимально-инвариантной КИС фильтрации сигналов с учётом надёжности измерителей. Осуществляется сравнительный анализ инерционного и безынерционного алгоритмов оценки навигационных сигналов с учётом надёжности измерителей по критерию среднего квадрата ошибки оценки и по сложности реализации.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

Перед изучением тем дисциплины «Комплексирование информационно-измерительных устройств» следует повторить материал дисциплин «Марковские модели сигналов и систем», «Информационно-статистическая теория измерений» и, если необходимо, основные понятия теории вероятностей: вероятность случайной величины, плотность ее распределения, числовые характеристики (математическое ожидание, дисперсия), математическое ожидание и дисперсия линейной функции случайной величины, формулы Байеса (по любому учебному пособию для технических Вузов).

Материал тем 1.1, 1.2 изложен в [1–4]. Необходимо четко уяснить суть принципов построения комплексной измерительной системы и, что новые положительные свойства комплексной системы проявляются

Раздел 1. Определение, классификация, свойства и характеристики комплексных измерительных систем (КИС).

Тема 1.1. Определение, назначение, основные характеристики и методы комплексирования и свойства КИС.

Основными целями использования КИС являются повышение точности, надёжности, помехозащищённости, достоверности, робастности измерительных систем, преодоление априорной неопределённости и обеспечение новых свойств приборных комплексов, таких как инвариантность, астатизм, контролепригодности и других свойств.

Тема 1.2. Классификация информационно-измерительных систем летательных аппаратов.

Раздел 2. Безынерционные КИС.

Тема 2.1. Линейные безынерционные КИС.

Рассматриваются оптимальные и оптимально-инвариантные линейные КИС оценки навигационных параметров в условиях рассмотрения линейной модели измерения с аддитивными, в общем случае, коррелированными погрешностями измерения датчиков информации. Исследуются линейные алгоритмы обработки сигналов с учётом надёжности измерителей. Приводятся схемы реализации КИС.

Тема 2.2. Нелинейные безынерционные КИС.

Рассматриваются нелинейные безынерционные оптимальные и оптимально-инвариантные алгоритмы оценки сигналов без учёта и с учётом надёжности измерителей. Описываются принципы мажоритарной безынерционной оценки сигналов, приводятся алгоритмы и схемы мажоритарной обработки навигационных параметров.

Раздел 3. Линейные инерционные КИС.

Тема 3.1. Постановка задачи синтеза линейной инерционной КИС.

Рассматривается структура линейной инерционной КИС. Приводятся постановка задачи оптимизации и условие инвариантности инерционной КИС.

Тема 3.2. Двухканальные линейные КИС.

Исследуются алгоритмы двухканальных инерционных КИС и условия технической реализуемости инвариантности. Проводится сравнительный анализ двухканальных схем КИС с параллельной фильтрацией, с фильтром разностного сигнала, с корректирующим фильтром и схема четвертого типа. Определяются условия инвариантности и астатизма двухканальных КИС.

Тема 3.3. Структурный оптимально-инвариантный синтез линейных КИС.

наиболее выражено при определённом соотношении характеристик погрешностей измерителей. Классификация КИС предполагает рассмотрение всего многообразия требований, предъявляемых к КИС, особенностей структурной организации их, способов технической реализации и условий эксплуатации.

Начинать изучение темы 2.1 следует с повторения общих вопросов об оценках и их свойствах [5], для чего необходимо обратиться к теоремам об оценках и следствиям из этих теорем. Рассматривая оптимальные оценки, следует помнить, что для них необходима априорная информация (т.е. уже имеющаяся на момент времени, предшествующий проведению измерения), объем которой зависит от типа оценки.

При определении алгоритма линейной оптимальной инвариантной оценки теорема проецирования непосредственно не применима, так как имеются ограничения на выбор коэффициентов линейного преобразования.

При рассмотрении линейных алгоритмов обработки сигналов с учётом надёжности измерителей необходимо обратить внимание на то, что характеристики погрешностей измерителей изменяются в соответствии с их состоянием, а вероятности состояний, крайними из которых являются исправная работа и отказ, зависят от того, используется аппаратура встроенного контроля состояния измерителей или нет.

При изучении темы 2.2 основной учебной литературой является [1, 2, 6]. В соответствии с теоремой об оптимальной оценке произвольного вида для её определения необходимо знать совместную многомерную плотность распределения измеряемого параметра и погрешностей измерения.

Получаемая оптимальная по среднеквадратическому критерию оценка в общем случае является нелинейной и достаточно сложной для реализации. Для её получения необходима априорная информация об измеряемом параметре.

В отличие от оптимального алгоритма оценки для построения оптимально-инвариантного алгоритма априорная информация об измеряемом параметре не нужна, а достаточно задания только плотностей распределения погрешностей измерения.

Для некоторых плотностей распределения погрешностей, несмотря на сложный вид общего выражения, оценка получается достаточно простой, например, в случае равномерных законов распределения с одинаковыми параметрами.

В ряде случаев целесообразно упростить алгоритм оценки, отступив от условия оптимальности. Потеря в точности компенсируется меньшей чувствительностью к изменению параметров измерителей и относительной простотой реализации. В частности, такой подход

используется при синтезе алгоритма мажоритарной оценки. Изучая данную оценку и её свойства, следует не оставлять без рассмотрения вопрос о её эффективности в сравнении с оценками другого вида в условиях, когда характеристики погрешностей измерителей отличаются от расчётных, в том числе по причине отказа из-за конечной их надёжности.

Прежде чем переходить к изучению материала раздела 3 рекомендуется вспомнить возможные описания (математические модели) динамических звеньев, понятие динамической точности, повторив по [5] описание динамических систем, работающих при случайных воздействиях.

Материал темы 3.1 следует изучать по [1, 2, 4]. Необходимо, прежде всего, уяснить, за счёт чего инерционные и безынерционные КИС различаются по точности.

Следует обратить внимание на то, что при оптимизации инерционных КИС требуется больший объём информации о характеристиках оцениваемого параметра и погрешностей измерения, чем для безынерционных КИС, и при отсутствии априорной информации о характеристиках оцениваемого параметра или изменении их при эксплуатации в широких пределах целесообразно построить инвариантную КИС.

Для изучения темы 3.2 следует пользоваться [1, 2, 4]. Рассматривая три основные схемы построения двухканальных КИС (с параллельной фильтрацией, с фильтром разностного сигнала, с корректирующим фильтром) необходимо четко уяснить их достоинства, недостатки и условия реализации. При этом следует принимать во внимание то, что условия обеспечения инвариантности и астатизма системы взаимосвязаны.

Материал темы 3.3 изучается по [1, 2, 4, 6]. Следует уяснить, что при инерционном оптимально-инвариантном оценивании сигналов на основе схемы с фильтром разностного сигнала, суть применения фильтрации Винера и Калмана не изменяется, а только изменяются обозначения оцениваемого параметра, его оценки, наблюдаемого сигнала и помехи.

Качество обработки сигналов характеризуется дисперсией ошибки оптимальной оценки, выражение для которой входит составной частью в набор математических соотношений для фильтров Винера и Калмана.

Тему 3.4 следует изучать по [1, 2, 4, 5]. Рассматривая вопросы анализа КИС, необходимо учитывать, что при его выполнении помимо характеристик ошибки должен определяться показатель эффективности комплексирования. Изучая параметрический синтез КИС, следует понять его отличие от оптимального синтеза, проявляющееся, в частности в том, что для первого характерно наличие ограничений при определении системы. Также необходимо усвоить взаимосвязь параметрического синтеза и таких требований к КИС как инвариантность и астатизм.

Регулярная составляющая погрешности второго измерителя имеет вид  $\xi_p = \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – центрированная случайная величина.

Статистические характеристики погрешностей измерителей приведены в табл. 1. Характеристики погрешности первого измерителя выбираются по первой букве фамилии студента, а второго измерителя – по второй букве фамилии.

Требуется:

1. Выполнить параметрический синтез фильтра разностного сигнала с обеспечением астатизма необходимого порядка.
2. Определить показатель эффективности комплексирования в установленном режиме.

Таблица 1

Исходные данные к контрольной работе									
Цифры номера	Характеристики погрешности первого измерителя				Характеристики погрешности второго измерителя				
	$D_1$	$\alpha_1, c^{-1}$	$\beta_1, c^{-1}$	$\nu_1$	$D_2$	$\alpha_2, c^{-1}$	$\beta_2, c^{-1}$	$\nu_2$	
А, Б, В	45	1,2	2,0	1	16	0,025	0,025	1	
Г, Д, Е	55	1,0	0	0	20	0,013	0	1	
Ё, Ж, З, И	65	0,8	0	0	25	0,008	0	0	
Й, К, Л, М	60	1,2	0	0	36	0,015	0,015	1	
Н, О, П	70	1	0	1	90	0,01	0,01	1	
Р, С, Т	35	0,9	1,5	1	75	0,005	0	0	
У, Ф, Х	25	1,5	1,7	1	60	0,02	0	1	

Материал темы 4.1 изучается с использованием [1, 7]. Рассматривая алгоритмы классификации сигналов по различным критериям, необходимо провести сравнение структур и параметров этих алгоритмов. Следует также обратить внимание на отличие показателей качества, используемых при классификации сигналов и при оценивании сигналов.

При изучении материала темы 4.2 можно использовать [1, 2, 6, 7]. Необходимо уяснить, что снятие ограничения на алгоритм фильтрации сигналов с учётом надёжности измерителей в виде его линейности позволяет получить новое качество КИС. Поскольку нелинейный алгоритм сложнее чем линейный, то следует рассмотреть способы упрощения первого, например переход к безынерционной обработке, не забывая при этом о проверке точности системы по среднеквадратическому показателю.

#### КОНТРОЛЬНАЯ И КУРСОВАЯ РАБОТЫ

В соответствии с программой дисциплины в первом семестре двухсеместрового курса выполняется одна контрольная работа, а во втором – курсовая работа.

#### Задание к контрольной работе

Исходные данные:

Комплексная система построена по схеме с фильтром разностного сигнала. При этом делается допущение о том, что два её измерителя являются безынерционными. Погрешность первого измерителя включает в себя только флуктуационную составляющую, а второго – флуктуационную и регулярную составляющие. Флуктуационные составляющие погрешностей обоих измерителей не коррелированы между собой и описываются ковариационными (корреляционными) функциями общего вида

$$K_i(\tau) = D_i e^{-\alpha_i |\tau|} \left( \cos \beta_i \tau + \frac{\nu_i \alpha_i}{\beta_i} \sin \beta_i |\tau| \right), \quad i=1, 2,$$

где  $i$  – номер измерителя. В частных случаях ковариационные функции  $K_i(\tau)$  принимают следующий вид:

$$K_i(\tau) = D_i e^{-\alpha_i |\tau|} \cos \beta_i \tau \quad \text{при } \beta_i \neq 0, \nu_i = 0,$$

$$K_i(\tau) = D_i e^{-\alpha_i |\tau|} (1 + \alpha_i |\tau|) \quad \text{при } \beta_i = 0, \nu_i = 1,$$

$$K_i(\tau) = D_i e^{-\alpha_i |\tau|} \quad \text{при } \beta_i = 0, \nu_i = 0.$$

Ц, Ч, Ш	75	1	1	1	70	0,008	0,008	1
Щ, Ъ, Ы, Ь	80	1,4	1,6	1	40	0,013	0	0
Э, Ю, Я	85	0,8	0,8	1	50	0,01	0,01	0

#### Методические указания к выполнению контрольной работы

Контрольная работа выполняется после изучения тем 3.1–3.3. Практические рекомендации по выполнению задания изложены в [3]. Параметрический синтез включает в себя следующие этапы:

1. Получение описания статистических характеристик погрешностей в частотной области, т.е. переход от ковариационных функций к спектральным плотностям (с. 32–34).

2. Выбор вида передаточной функции фильтра разностного сигнала из условия астатизма (с. 38–40). Целесообразно выбирать наиболее простую передаточную функцию, удовлетворяющую условию астатизма заданного порядка.

3. Вывод выражения для дисперсии ошибки комплексной системы как функции искоемых параметров  $p_j, j = \overline{1, l}$  передаточной функции (см. (2.21)).

На этом этапе погрешность измерителя с более широким спектром можно аппроксимировать белым шумом с постоянной спектральной плотностью  $c^2$ , равной спектральной плотности этой погрешности при  $\omega = 0$ , обосновав это приближение (для этого необходимо построить графики спектральных плотностей погрешностей). Общую дисперсию ошибки  $D_\xi$  системы можно представить через сумму двух составляющих:

$$D_\xi = D'_\xi + D''_\xi,$$

$$D'_\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_\Phi(j\omega)|^2 S_1(\omega) d\omega.$$

$$D_{\varepsilon}^{II} = \int_{-\infty}^{\infty} |1 - W_{\Phi}(j\omega)|^2 S_2(\omega) d\omega,$$

где  $D_{\varepsilon}^I$  – составляющая дисперсии ошибки системы, соответствующая широкополосной погрешности;  $D_{\varepsilon}^{II}$  – составляющая дисперсии ошибки, соответствующая низкочастотной погрешности;  $W_{\Phi}(j\omega)$  – частотная характеристика фильтра разностного сигнала.

Интегралы, определяющие дисперсию, приведены в [8] (приложение) и методика их вычисления в данном случае рассмотрена в [3], с. 35–47. В результате получается алгебраическая функция от искомого параметра, которую надо минимизировать. Аналитически минимум можно найти лишь в простейших случаях, и поэтому необходимо прибегнуть к численной минимизации с использованием компьютера. Для получения наглядного представления о зависимостях величин  $D_{\varepsilon}^I$ ,  $D_{\varepsilon}^{II}$  и  $D_{\varepsilon}$  от искомого параметра  $p_j$  следует построить их графические зависимости как функции от  $p_j$  и определить  $p_{j\text{opt}}$ , при котором  $D_{\varepsilon}$  имеет минимум.

Частотная характеристика фильтра  $W_{\Phi}(j\omega)$  при наличии регулярной составляющей погрешности первого измерителя  $\xi_p = \lambda_0$  должна обеспечивать астатизм первого порядка и, следовательно, иметь вид

$$W_{\Phi}(j\omega) = \frac{1}{1 + Tj\omega},$$

где  $T$  – постоянная времени фильтра. Требуется определить только один параметр  $T$  ( $p_1 = T$ ). Допустимый диапазон значений постоянной времени  $3c < T < 60c$ .

4. После того как найдено оптимальное значение постоянной времени, определяется дисперсия ошибки оптимальной оценки, а затем, сравнением её с дисперсией погрешности более точного измерителя  $D_{i\text{min}}$ , определяется показатель эффективности комплексирования

$$\gamma = \frac{D_{i\text{min}}}{D_{\varepsilon}}.$$

Все математические преобразования следует делать в общем виде, подставляя численные значения только в конечные результаты. Для выявления ошибок используйте правило размерностей (все слагаемые должны иметь одинаковую физическую размерность).

Определение показателя эффективности производится также как при параметрическом синтезе в контрольной работе.

Все математические преобразования следует делать в общем виде, подставляя численные значения только в конечные результаты. Для выявления ошибок используйте правило размерностей (все слагаемые должны иметь одинаковую физическую размерность).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы комплексирования приборов и систем летательных аппаратов. Учеб. пособие.
2. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов. Учеб. пособие.
3. Проектирование комплексных приборов и систем летательных аппаратов. Учеб. пособие.
4. Комплексные системы с памятью. Учеб. пособие.
5. Информационно-статистическая теория измерений. Часть 1. Учеб. пособие.
6. Информационно-статистическая теория измерений. Часть 2. Учеб. пособие.
7. Контроль и диагностика измерительно-вычислительных комплексов. Учеб. пособие.
8. Методы исследования навигационных устройств. Учеб. пособие.

#### Задание к курсовой работе

Исходные данные для курсовой работы совпадают с исходными данными для контрольной работы, но при этом считается, что погрешность первого измерителя не имеет регулярной составляющей, т.е.  $\xi_p = 0$ .

Требуется:

1. Выполнить оптимальный синтез фильтра разностного сигнала.
2. Определить показатель эффективности комплексирования.

#### Методические указания к выполнению курсовой работы

Методика оптимального синтеза фильтра разностного сигнала приведена в [3], с. 46–50.

Первый этап (с. 49) оптимального синтеза – определение спектральных плотностей погрешностей измерителей – предполагается уже произведённым во время выполнения контрольной работы. На втором этапе синтеза – определение оптимальной частотной характеристики фильтра  $W_{\Phi\text{opt}}(j\omega)$  – широкополосную погрешность необходимо аппроксимировать белым шумом, обозначив её спектральную плотность через  $c^2$ . Факторизация суммарной спектральной плотности на третьем этапе, т.е. определении функции  $\Phi(j\omega)$ , не представляет сложности, если числитель записан в виде

$$a_2 \omega^4 + a_1 \omega^2 + a_0 = (b_2(j\omega)^2 + b_1 j\omega + b_0)(b_2(-j\omega)^2 + b_1(-j\omega) + b_0)$$

Перемножив скобки в правой части и приравняв коэффициенты при одинаковых степенях  $\omega$  (мнимые члены после перемножения должны сократиться), получим три уравнения для определения трёх неизвестных  $b_2, b_1, b_0$  через известные  $a_2, a_1, a_0$ . В функцию  $\Phi(j\omega)$  включаем множители с положительными коэффициентами при  $j\omega$ .

Учитывая аппроксимацию одной из погрешностей белым шумом, оптимальную частотную характеристику фильтра можно получить на четвертом этапе по формуле (3.4). Дисперсию ошибки оптимальной фильтрации можно определить по формуле (3.7), её также можно вычислить по более простой формуле

$$D_{\varepsilon} = 2\pi c^2 \lim_{\omega \rightarrow \infty} j\omega W_{\Phi\text{opt}}(j\omega).$$