

МИНИСТЕРСТВО ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
КИЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
ИМЕНИ 60-ЛЕТИЯ СССР

На правах рукописи

МАРЦИШЕЛЬ ЯН

ОПТИМАЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ
И КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ В КУРСО-ДОПЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМЕ
СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ

Специальность 05.13.01 - Управление в технических системах

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1991

715 23, 500
Работа выполнена в Киевском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров гражданской авиации имени 60-летия СССР.

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор А.А.ТУНИК

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Л.С.БЕЛЯВСКИЙ
кандидат технических наук, доцент Г.Ф.БУБЛИК

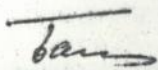
Ведущая организация:
Институт кибернетики Академии наук УССР

Защита диссертации состоится "26" июня 1991 года
в 14³⁰ часов на заседании специализированного Совета К 072.04.02
в Киевском институте инженеров гражданской авиации по адресу:
252058, Киев-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
кандидат технических наук



А.Г.Бессакова

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00815758 (Y)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Возрастающая интенсивность воздушного движения предъявляет повышенные требования к точности пилотажно-навигационного комплекса воздушных судов (ВС). В особенности это относится к легким и средним ВС, навигационное оборудование которых является достаточно простым и дешевым, но вследствие этого обладает невысокой точностью. В то же время интенсификация воздушного движения, усложнение задач, решаемых с помощью средних и легких самолетов и вертолетов требует существенного повышения точности их навигационных систем. Указанные работы являются весьма актуальными для польской авиационной промышленности, ориентированной на производство такого класса ВС.

Достижение высокой точности определения местоположения требует совершенствования существующих или создание принципиально новых навигационных приборов и систем повышенной точности. Важно подчеркнуть, что последний подход является дорогостоящим, в связи с чем для легких и средних ВС он неоправдан.

С другой стороны современный этап развития микропроцессорной техники дает возможность решить эту проблему программно-алгоритмическими методами — выполняя оптимальное комплексирование существующих приборов и систем, что существенно дешевле по сравнению с разработкой новых систем повышенной точности.

При решении указанных задач имеют место такие сложности, как пространственный и стохастический характер эксплуатационных возмущений, запаздывание информации по разным каналам измерений, априорная неопределенность, нестационарность сигналов. Использование на борту легких и средних ВС цифровой вычислительной техники для комплексирования требует разработки ее математического обеспечения с учетом указанных особенностей практических постановок задач.

Таким образом, разработка оптимального цифрового комплексирования навигационных измерителей, в том числе систем курсо-доплеровского счисления является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы. Отсутствие простых и удобных для практической реализации алгоритмов синтеза цифрового комплексирования навигационных систем, учитывавших особенности эксплуатации ВС, а также их моделирование предопределили следующие цели диссертационной работы:

1. Разработать алгоритм первичного комплексирования навигационных измерителей скорости в случае запаздывания в одном из каналов измерения.

2. Разработать алгоритм цифрового комплексирования курсо-доплеровского счисления пути с радионавигационными системами для определения географических координат положения, применительно к легким и средним ВС.

3. Провести цифровое моделирование комплексированной системы навигации (КСН).

Для достижения поставленной цели необходимо:

- сформулировать требования к синтезу КСН;
- определить исходную информацию для синтеза;
- разработать алгоритмическое и программное обеспечение синтеза и анализа КСН.

Методы исследования. Теоретические исследования основывались на применении методов теории автоматического управления, теории оптимальной фильтрации, современной теории оценивания, имитационного моделирования, математической статистике, теории матриц. Разработанные алгоритмы комплексирования исследовались методами моделирования на ЭВМ.

Научная новизна данной работы состоит в следующем.

1. Разработан алгоритм оптимального комплексирования измерителей с запаздыванием, основанный на винеровской теории фильтрации. Особенностью алгоритма является выполнение винеровской факторизации матрицы, элементы которой не содержат запаздывания.

2. На его основе предложен цифровой алгоритм первичного оптимального и субоптимального комплексирования мембранно-анероидных и доплеровских измерителей скорости.

3. Разработан алгоритм на базе калмановской фильтрации, отличающийся свойством адаптивности и робастности для практического применения в случае априорной неопределенности при комплексировании.

4. На его основе разработан алгоритм и программное обеспечение синтеза системы комплексирования курсо-доплеровского счисления пути с радиотехническими системами.

5. Разработан улучшенный вариант предложенного алгоритма для комплексирования курсо-доплеровского счисления пути и гиперболических РНС, обладавший повышенной точностью, робастностью и допускавший работу одного из измерителей.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты могут быть успешно использованы при синтезе цифровых комплексов систем навигации, особенно для легких и средних ВС.

Проведенные теоретические исследования оптимальной многомерной фильтрации с запаздыванием (винеровский подход), а также предлагаемого практически нерасходящегося алгоритма обладающего свойствами адаптивности (калмановский подход), имеют самостоятельные значения, поскольку могут служить основой для построения и оценки параметров систем оцениваемых подобными моделями.

Разработанные методы и алгоритмы доведены до программной реализации на Бейсике и могут быть широко использованы при решении задач цифровой обработки сигналов.

Реализация результатов. Результаты работы внедрены в учебном процессе КИИГА на кафедре автоматизированных систем управления и пилотажно навигационных комплексов и представлены для внедрения в Промышленном институте Авиации в Варшаве.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на У Всесоюзном симпозиуме "Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии" (Новосибирск, 1989г.), Республиканской НТК "Пути совершенствования пилотажно-навигационных комплексов и систем управления полетом" (Киев, 1989г.), ежегодных НТК профессорско-преподавательского состава (КИИГА, 1990, 1991г.г.), Всесоюзной НТК "Методы управления системной эффективностью функционирования электрофицированных и пилотажно-навигационных комплексов" (Киев, КИИГА, 1991г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ в СССР и в Республике Польша.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы включает 102 стр. основного текста, 9 стр. списка литературы из 106 наименований, 17 стр. иллюстраций и 34 стр. приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи диссертационных исследований, а также кратко описана структура диссертации.

Первая глава носит постановочный характер. Рассматривая особенности практических постановок задач указано, что создание

более точных навигационных комплексов, обладавших прежней структурой, но базирующихся на первичных измерителях более высокого класса точности, является труднодоступным и дорогостоящим процессом. Другим способом возможного повышения точности является комплексирование на базе новых структурных связей и оптимальной фильтрации, выполнение которой с применением цифровой техники может быть эффективнее и дешевле, чем разработка новых первичных измерителей.

В диссертационной работе главной задачей навигационного комплекса считается текущее определение местоположения ВС, то есть решение задачи навигации в узком смысле. Комплексирование навигационных измерителей разделяется на первичное, результатом которого является определение навигационных параметров, и вторичное, в процессе которого определяются координаты ВС. Основным критерием оптимизации принят квадратический критерий ошибки на выходе комплексированной системы.

Для малых и средних ВС характерно небольшое количество навигационного оборудования, состоящего из курсовой системы (КС), измерителя воздушной скорости (ИВС), доплеровского измерителя скорости (ДИС) и радионавигационной системы (РНС). В качестве РНС могут использоваться либо угломерно-дальномерное оборудование VDR/DME; либо гиперболические РНС типа "Лоран С" или "Дека" - для специализированных ВС (морские спасатели, патрулирование лесов и т.п.). Структурная схема одного из возможных вариантов комплексированной системы представлена на рис. 1, где n_1 , n_2 - погрешности определения скорости, δ_k , δ_c , δ_p , δ_v - погрешности определения курса, счисления координат, радиопараметра РНС; скорости соответственно. НВ - навигационный вычислитель, ПК - преобразование координат.

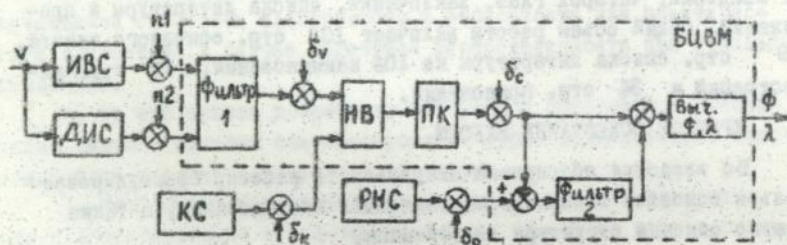


Рис. 1

Поскольку стохастическая погрешность определения курса носит явно нестационарный характер, это в свою очередь обуславливает такой же характер погрешности канала счисления, то вторичное комплексирование (фильтр 2) необходимо выполнять на базе оптимальной фильтрации Калмана. Одной из основных проблем практического применения фильтра Калмана является большая размерность полного математического описания сигналов и помех требующих высокой производительности бортового вычислительного комплекса, что не согласуется с классом ВС. Поэтому необходимыми являются:

1. Структурно-схемные упрощения (например, так как на рис. I включение фильтра по компенсационной схеме, тогда погрешности фильтрации не зависят от характера изменения самих параметров).

2. Ведение фильтрации в системе координат в которой работает РНС (зависимости погрешностей РНС в географических координатах нелинейны).

3. Линеаризация и упрощения в описании сигнала подлежащего фильтрации с применением робастных фильтров Калмана предотвращающих расходимость оценивания.

Для некоторых приборов, в том числе измерителей воздушной и доплеровской скорости, погрешности измерений и характер входных сигналов на отдельных участках полета ВС можно считать стационарными. Поэтому для первичного комплексирования этих измерителей (фильтр I, рис. I) можно применять спектральные методы оптимальной фильтрации Винера. Хотя такой фильтр оптимален на бесконечном времени, а о приближении к оптимальному измерению можно говорить после некоторого времени от начала работы, то простая его структура заслуживает внимания для практической реализации. Однако особенность рассматриваемых измерителей скорости, которую необходимо учитывать, является запаздывание информации в воздухопроводах, соединяющих приемники воздушного давления и мембранно-анероидные первичные измерители, в канале ИВС.

Первичное комплексирование для канала курса простыми средствами на основе винеровского подхода невозможно из-за нестационарности характеристик гироскопических приборов. Применение калмановской фильтрации отдельно для канала курса не всегда оправдано, особенно если ведется вторичная обработка, которая, как правило, строится на базе этой фильтрации.

Таким образом, основными задачами диссертационных исследований являются:

- разработка алгоритма первичного комплексирования измери-

телей скорости с учетом запаздывания информации в канале измерений ИВС;

- разработка алгоритма цифрового комплексирования курсо-доплеровского счисления пути с радионавигационными системами для определения географических координат, применительно к легким и средним ВС;

- проведение цифрового моделирования комплексированной системы навигации.

Во второй главе ставится и решается, на базе винеровского подхода, комплексирование навигационных измерителей с запаздыванием.

Для ряда практических задач модели объектов должны описываться с учетом запаздывания информации. Элементами запаздывания может характеризоваться как динамика измерителя, так и возмущающее воздействие (не обязательно во всех каналах). Структурная схема многомерного фильтра для некоррелированных измерений

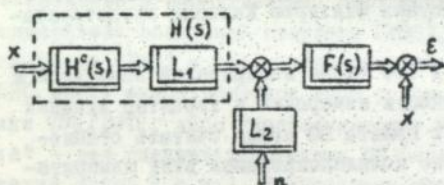


Рис.2

и некоррелированности погрешности между собой представлена на рис. 2. Для указанного случая матричная передаточная функция

$$H(s) = H^0(s) \cdot L_1$$

где $H^0(s)$ не содержит элементов с запаздыванием;

L_1 - матрицы запаздывания, $L_1 = \text{diag}(1, \dots, e^{t_m s}, \dots, 1)$; $L_2 = \text{diag}(1, \dots, e^{t_m s}, \dots, 1)$; $t < 0$; $F(s)$ - передаточная функция фильтра; ϵ - ошибка на выходе фильтра. Представлена структурная схема которая характерна для первичного комплексирования скорости. Для решения так поставленной задачи можно передаточную функцию измерителя с запаздыванием $H(s)$ аппроксимацией Паде свести к полиноминой записи. Однако такой подход увеличивает порядок уравнений, что усложняет и так непростую процедуру факторизации, а также порядок полученного решения, тем самым и аппаратную реализацию. Кроме того, полученное решение остается приближенным.

В работе предлагается другой подход. С учетом представленной на рис.2 структурной схемы ошибку на выходе фильтра можно записать выражением: $\epsilon = (FLH^0 - 1)x + FL\Gamma n$

Тогда дисперсия ошибки имеет вид

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [(FLH^0 - 1) S_{\text{хх}} (H_0^0 L_0^0 F_0^0 - 1) + FLL^{-1} S_{\text{нн}} L_0^{-1} L_0^0 F_0^0] ds, \quad (1)$$

* - эрмитово сопряжение.

Минимум дисперсии ошибки определяемый из условий обращения в нуль первой вариации δF_0 функционала (1): $\delta \langle \sigma^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \{ [FLH^0 S_{\text{хх}} H_0^0 L_0^0 + FLL^{-1} S_{\text{нн}} L_0^{-1} L_0^0 - S_{\text{хх}} H_0^0 L_0^0] \delta F_0 + \delta F [LH^0 S_{\text{хх}} H_0^0 L_0^0 + LL^{-1} S_{\text{нн}} L_0^{-1} L_0^0 - LHS_{\text{хх}}] \} ds \quad (2)$

Матрица F оптимального фильтра полученная из условий равенства нулю вариации функционала (2)

$$F = B_{\oplus} D^{-1} = B_{\oplus} Q^{-1} L^{-1}$$

$$\text{где } DD_0 = L(H^0 S_{\text{хх}} H_0^0 + L^{-1} S_{\text{нн}} L_0^{-1}) L_0^0 = LQQ_0 L_0^0 \quad (3)$$

$$QQ_0 = H^0 S_{\text{хх}} H_0^0 + S_{\text{нн}} \quad (4)$$

$$B_{\oplus} + B_{\ominus} = S_{\text{хх}} H_0^0 L_0^0 D_0^{-1}$$

Существенным преимуществом полученного решения является то, что матрица оптимального фильтра F зависит от матрицы Q, которая получается в результате факторизации выражения (4), которое не содержит элементов с запаздыванием.

На основе предложенного подхода рассмотрено оптимальное комплектирование воздушного измерителя скорости (ИВС) и доплеровского измерителя скорости (ДИС). В современных ДИС с вычислителем, учитывающим углы тангажа и крена, выходными параметрами являются поперечная и продольная скорости $W_{\text{хг}}$, $W_{\text{зг}}$. Если угол тангажа и угол скольжения близки к нулю, то на выходе ИВС сигнал $V_{\text{хг}} = W_{\text{хг}}$.

Если программное движение среднего самолета происходит с постоянной скоростью $V_0 = 600$ км/ч, то на некотором участке полета спектральную плотность ветра можно принять за спектральную плотность флуктуации скорости ВС. Для расчетов, после проведения анализа литературных данных, принято, что

$$S_{\text{хг}} = 100 / (0,25 - s^2) \text{ м}^2/\text{с}.$$

Спектральная плотность помех $S_{\text{шис}}$, в основном, обусловлена федингом и имеет сложный характер. Поскольку она более широкополосная чем $S_{\text{ивс}}$, то для расчетов можно ее считать белым шумом $S_{\text{шис}} = 0,25 \text{ м}^2/\text{с}$

Предаточные функции измерителей

$$H_1 = H_{\text{шис}} = 1; \quad H = H_{\text{ивс}} = \frac{e^{-0,025s}}{s+10}$$

Тогда

$$Q_{Q*} = \begin{bmatrix} H_1 H_{1\#} S_{Xr} + S_{DHC} & H_1 H_{2\#} S_{Xr} \\ H_2^0 H_{1\#} S_{Xr} & H_2^0 H_{2\#} S_{Xr} + S_{DHC} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{-0,25s^2 + 100,625}{0,25 - s^2} & \frac{100}{(-s+10)(-s^2+0,25)} \\ \frac{100}{(s+10)(-s^2+0,25)} & \frac{4s^2 + 501s + 200}{(-s^2+100)(-s^2+0,25)(-s^2+1)} \end{bmatrix}$$

После факторизации

$$Q^{-1} = \frac{s+0,5}{(s-s_1)(s-s_2)(s-s_3)} \begin{bmatrix} 2s^2 + 22,408s + 11,5586 & -11,6795s^2 - 18,475s - 16,7954 \\ -6,7182s - 8,1481 & 0,5s^3 + 15,3896s^2 + 117,786s + 98,9 \end{bmatrix}$$

где $s_1 = -0,50105$; $s_2 = -9,6319$; $s_3 = -20,8501$.

В результате сепарации

$$B_{\oplus} = \begin{bmatrix} \frac{9,5792}{s+0,5} & \frac{1,7094}{s+0,5} \end{bmatrix}$$

Оптимальный фильтр

$$F = \left[\frac{19,1583s^2 + 203,162s + 96,794}{(s-s_1)(s-s_2)(s-s_3)} ; \frac{0,8547s^3 + 10,2189s^2 + 175,342s + 8,17}{(s-s_1)(s-s_2)(s-s_3)} e^{0,025} \right]$$

Дисперсия ошибки на выходе фильтра $\langle \varepsilon^2 \rangle = 4,8096$ (м/с)².

Относительное значение $\langle \varepsilon^2 \rangle / \langle \varepsilon^2 \rangle_{S_{Xr}} = 0,048$.

Полученный фильтр содержит для второго канала упреждение

При цифровом комплексировании роль эту может исполнять экстраполятор. Нетрудно доказать, что если исключить из второго канала фильтра упреждение, а в первом добавить запаздывание на такую величину, то дисперсия ошибки останется без изменения для смещенного времени. Цифровая реализация такого фильтра имеет вид:

$$F_1 = \left(\frac{A_1 z}{z - e^{s_1 T_0}} + \frac{B_1 z}{z - e^{s_2 T_0}} + \frac{C_1 z}{z - e^{s_3 T_0}} \right) z^{0,02}$$

$$F_2 = \frac{A_2 z}{z - e^{s_1 T_0}} + \frac{B_2 z}{z - e^{s_2 T_0}} + \frac{C_2 z}{z - e^{s_3 T_0}}$$

где $A_1 = -0,00104$; $B_1 = 0,80703$; $C_1 = 18,35234$

$A_2 = 0,00992$; $B_2 = -2,2302$; $C_2 = -16,04271$.

Дисперсия $\langle \varepsilon_c^2 \rangle = 7,1557$ (м/с)². Увеличение дисперсии субоптимального фильтра к дисперсии оптимального фильтра $\langle \varepsilon_c^2 \rangle / \langle \varepsilon^2 \rangle = 1,488$. Величина эта остается небольшой и для цифровой реализации целесообразно выбрать субоптимальный фильтр, который существенно проще.

В третьей главе ставится и решается задача синтеза комплексированной системы курсо-долгировского счисления пути с коррекцией по РНС для определения географических координат легких и средних ВС.

Поскольку погрешности счисления пути имеют нестационарный

характер, то целесообразно комплексирование выполнять на базе калмановской фильтрации. Важными проблемами связанными с практическим осуществлением рассматриваемого комплексирования являются:

- выбор структурной схемы включения фильтра;
- возможные упрощения описания фильтра;
- обеспечение практической нерасходимости получаемых оценок.

Исходя из упрощений описания оцениваемого процесса применение фильтра Калмана, включенного по схеме компенсации (рис.1) позволяет не учитывать динамические погрешности, так как на вход его поступает только смесь погрешностей радиотехнической системы δ_p и погрешность счисления δ_c , и, следовательно, погрешность фильтрации не зависит от характера изменения самих навигационных параметров. А поскольку спектры погрешностей счисления - δ_c и РНС - δ_p значительно различаются, то задача выделения и компенсации погрешности δ_c может быть решена успешно.

На основе проведенного в работе анализа возможных описаний сигналов, подлежащих фильтрации следуют выводы:

1. Полный учет всех погрешностей в описании приводит к значительным размерностям математической модели в пространстве состояний и к сложностям осуществления фильтрации в реальном масштабе времени.

2. Даже такое описание не обеспечивает практической нерасходимости фильтра, вследствие неточности модели, отсутствия полной информации о свойствах помех и возмущений, ошибок счета ЦЕМ.

3. Применение робастной калмановской фильтрации для предотвращения расходимости позволяет упростить модель фильтра, а именно:

а) случайную погрешность РНС в виду ее широкополосного характера аппроксимировать белым шумом с дисперсией $\sigma_{РНС}^2$;

б) систематическую погрешность счисления в системе координат в которой работает РНС, на небольших участках времени, считать заданную выражением $x = x_1 + x_2 t$; x_1 - погрешность определения координат; x_2 - скорость нарастания погрешности;

в) случайная погрешность счисления x_3 имеет вид $\dot{x}_3 = -\lambda_3 x_3 + \sigma_x \sqrt{2 \lambda_3} W(t)$; где $W(t)$ - белый шум с единичной интенсивностью.

Тогда уравнения фильтра Калмана можно записать в виде

$$\dot{X} = AX + B \cdot W(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sigma_x \sqrt{2 \lambda_3} \end{bmatrix} W(t) \quad (5)$$

При совместной обработке информации по двум радиопараметрам, что характерно как для угломерно-дальномерных РНС (азимут, дальность) так и для гиперболических (две линии положения) размерность модели удваивается.

Если учесть низкочастотность случайной погрешности счисления, то на промежутках времени меньше, чем время корреляции, то дискретная модель для обработки информации по двум радиопараметрам примет вид:

$$X_{k+1} = F X_k + G_k = \begin{bmatrix} 1 & t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}; \quad Z_k = H_k X_k + V_k = \begin{bmatrix} 1 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + V_k$$

Ковариационные матрицы шумов измерения $R_k = \text{diag}(\sigma_{\text{РНС1}}^2, \sigma_{\text{РНС2}}^2)$

x_1, x_2 - погрешности определения координат в каналах счисления

x_3, x_4 - скорость нарастания погрешностей счисления.

Среди робастных фильтров Калмана внимания заслуживает

модификация с априорным выбором множителя S в уравнении ковариационной матрицы ошибок $P_{k+1/k} = S F_k P_{k/k} F_k^T + Q_k$ и фильтр* с расчетным увеличением множителя S производимого с учетом обновляемой последовательности $V_k = Z_k - H_k \hat{x}_k$ по формуле

$$S_k = \frac{1}{m_k} S_p [V_k V_k^T - H_k Q_k H_k^T - R_k] [H_k F_k P_{k-1} F_k^T H_k^T]^{-1} \quad (6)$$

Недостатками: первого - является необходимость проведения длительных экспериментов с целью правильного выбора S , второго - необходимость обращения матрицы, которая как правило, не является диагональной.

В работе предложен другой подход к рассматриваемой проблеме, базирующийся на расчетном увеличении матрицы входных шумов Q_k . Показано, что S^* модификация дает такой же результат как и изменение Q_k по формуле

$$Q_k' = Q_k + (s-1) F_k P_{k-1} F_k^T = Q_k + A_k$$

$$\text{где} \quad A_k = \frac{1}{m} S_p \left\{ [V_k V_k^T - (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)] [H_k H_k^T]^{-1} \right\} \quad (7)$$

где m - число измеряемых параметров.

Полный алгоритм фильтра представлен на рис. 3.

* Кузовков Н.Т., Карабанов С.В., Салычев О.С. - Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. - М.: Машиностроение, 1978. - 224 с.

С вычислительной точки зрения отличием (7) от (6) является то обстоятельство, что квадратная форма HH^T в большинстве случаев имеет диагональный вид, и тогда обратная матрица определяется непосредственно. Предложенный алгоритм является адаптивным, так как вычисление слагаемого A_k в дальнейшем используется для определения $P_{k/k-1}$. Выбор A_k согласно (7) обеспечивает привязку теоретической ковариационной матрицы ошибок оценивания $P_{k/k-1}$ к реальным через член $V_k V_k^T$, выражающий действительные ошибки оценивания.

Представленный алгоритм имеет ряд преимуществ. Однако его адаптивный характер, то есть учет не только априорного (теоретического) описания процесса, но и привязка реального через обновляемую последовательность может привести в случае аномальных измерений к значительному смещению оценки. Аномальные измерения в навигационных измерителях связаны с отказами или сбоями в их работе. Если на последующих шагах обработки поступающая информация будет правильной, то выходная оценка через некоторое время нормализуется. Выявление внезапного отказа датчика для предложенного алгоритма возможно, если формировать во время фильтрации статистику вида:

$$l_k = \sum_{i=k-M+1}^k V_i^T N_i V_i \quad (8)$$

имеющую распределение χ^2 с qM степенями свободы, где q - размерность вектора V_k ; M - усредняемые значения (ширина движущегося окна); $N_k = H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k$

Решающее правило (критерий) имеет вид: $l > l_0$ - отказ;
 l_0 - выбирается экспериментально.

Чтобы не усложнять алгоритма фильтрации предлагается эвристический характер построения защиты от отказов. Так как самого отключения отказавшего датчика недостаточно для приближения к оптимальной фильтрации, то необходимо на время отказа перестроить уравнение фильтра (чтобы ненужная информация не вошла в рекуррентное оценивание \hat{x}_k). При диагональной матрице R_k выключение из фильтра i -го датчика можно имитировать обращением в ноль элементов r_{ii} матрицы R_k^{-1} . В работе представлен полный алгоритм такого фильтра. Представленный алгоритм справедлив при отказах как любого измерителя, так и обоих вместе.

Для определения эффективности рассматриваемого комплексирования с применением предложенного алгоритма проведено цифровое моделирование. В качестве РНС была выбрана система "Лоран С". Определяющим фактом был тот, что зависимости связывающие координаты

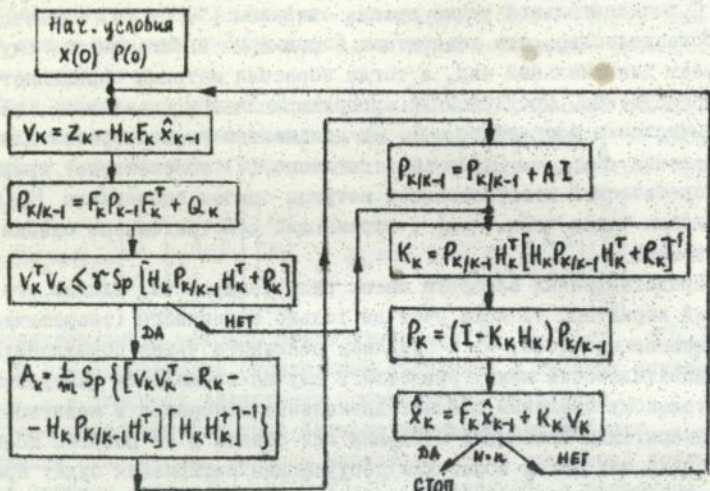


Рис. 3

гиперболической системы с географическими, сложнее чем полярных с географическими для систем угломерно-дальномерных $VOR/\Delta HE$, а тем самым влияние для принятого линеаризованного описания является более существенным. Моделирование проводилось для условий работы максимально приближенных к реальным. Задаваемые погрешности соответствовали: систематическая погрешность курса $M[K] = 1,5^{\circ}/\tau$; случайная определения курса $R_k(t) = b_k^2 e^{a_k t}$, $b_k = 0,4^{\circ}$, $a_k = 0,01$ 1/мин; случайная погрешность РНС $R_k(t) = b_p^2 e^{a_p t} \cos \beta t$, $b_p = 0,6$ мкс, $a_p = 0,02$ 1/с, $\beta = 0,04$ 1/с. Другие параметры, принятые при моделировании $V = 600$ км/ч, $K = -45^{\circ}$, шаг квантования $7,5$ с, начальная точка маршрута $\phi_p = 55^{\circ}$, $\lambda_p = 18^{\circ}$, расположение ведомой и ведущей РНС $\phi_o = 59^{\circ}$, $\lambda_o = 8^{\circ}$, $\phi_A = 61^{\circ}$, $\lambda_A = 20^{\circ}$, $\phi_B = 50^{\circ}$, $\lambda_B = 10^{\circ}$. Результаты моделирования представлены на рис. 4, 5, 6. На рис. 4, 5 показаны значения остатков погрешностей комплексированной системы в определении δ_{ϕ} - широты и δ_{λ} - долготы. Из приведенных графиков можно сделать вывод о нерасходимости оценок. На рис. 6 представлено сравнение суммарных среднеквадратических погрешностей: δ_p^2 - определения положения ЕС для РНС, δ_{ct}^2 - курсо-доплеровского счисления, δ_f^2 - комплексированной системы. Точность комплексированной системы выше в 4-6 раз чем отдельно взятых измерений РНС.

$\langle -9.1083348E-7, 2.266596E-7 \rangle$
 $t_0 = 7.53$ $n = 256$ $t = 32 \text{ min}$

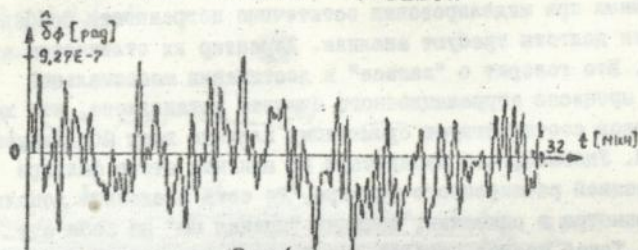


Рис. 4

$\langle -7.0456942E-6, 5.6601129E-6 \rangle$
 $t_0 = 7.53$ $n = 256$ $t = 32 \text{ min}$

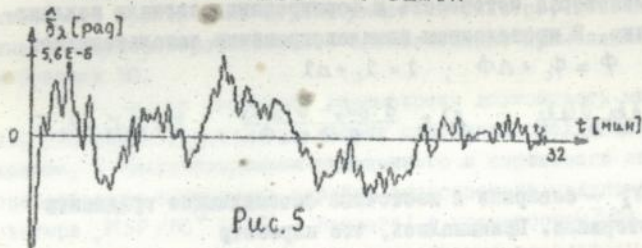


Рис. 5

$\langle 0.044782555 \rangle$ $t = 32 \text{ min}$
 $t_0 = 7.53$ $n = 256$

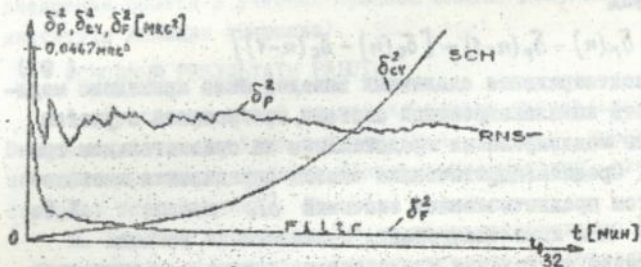


Рис. 6

В четвертой главе проведен анализ погрешности комплексированной системы.

Полученные при моделировании остаточные потребности особенно в определении долготы требуют анализа. Характер их отличается от белого шума. Это говорит о "запасе" в достижении максимальной точности. В процессе корреляционного анализа установлено, что характер остатков соответствует суммарному влиянию всех моделируемых погрешностей. Указано, что избавиться от влияния этого фактора можно реализацией расширенного фильтра, то есть введением дополнительного параметра в описание, который "принял бы" на себя эту погрешность. Такой подход нежелателен для практической реализации в реальном масштабе времени, так как связан с дополнительными осложнениями фильтра. Рассматривая более подробно определенное координат Φ, λ с применением градиентного метода линий положения установлено некоторая неточность в формировании сигнала подлежащего оцениванию. В проведенном комплексировании использовались зависимости $\Phi = \Phi_c + \Delta\Phi$; $\lambda = \lambda_c + \Delta\lambda$

$$\Delta\Phi = \frac{\delta T_A \gamma_2 - \delta T_A \gamma_1}{a \cdot D} ; \Delta\lambda = \frac{\delta T_B d_1 - \delta T_B d_2}{a \cdot D \cos \Phi} ; D = d_1 \gamma_2 - d_2 \gamma_1$$

где

$d_1, \gamma_1, d_2, \gamma_2$ - северные и восточные составляющие градиента временного интервала. Принималось, что параметр

$$\delta T = \{T + \delta_p(n) - [T + \delta_c(n)]\} - \{T + \delta_p(n-1) - [T + \delta_c(n-1)]\} = \delta_p(n) - \delta_c(n)$$

Такое упрощение возможно только в случае если погрешности являются близкими гауссового белого шума. В общем выражение для должно иметь вид

$$\delta T = \delta_p(n) - \delta_p(n-1) - [\delta_c(n) - \delta_c(n-1)] \quad (9)$$

В целях подтверждения сделанных выводов было проведено моделирование работы комплексированной системы, построенной с учетом (9). Результаты моделирования представлены на сравнительном графике (рис. 7). Среднеквадратическая ошибка определения местоположения с учетом предвычисленных значений δ_{FN}^2 меньше 1,5-2 раза чем δ_c^2 для комплексирования проведенного раньше.

Для сравнения на графике представлена среднеквадратическая ошибка δ_s^2 - комплексирования с применением "S" модификации фильтра Калмана при априорном выборе $S = 1,4$.

Полученные результаты в процессе моделирования работы комп-

$t_0 = 7:55$ 0.447 0.000 0.000 0.000 $t = 32 \text{ min}$

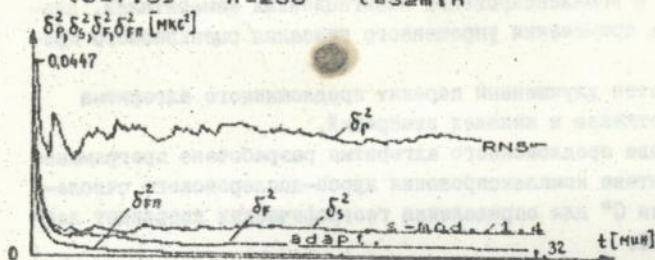


Рис. 7

лексированной системы курсо-доплеровского счисления пути и радионавигационных систем с упрощенным описанием и с применением предложенного практически нерасходящегося фильтра, позволяют сделать вывод о целесообразности его практического применения для легких и средних ВС.

В последнем параграфе рассмотрена возможность микропроцессорной реализации. Исходя из затрат связанных прежде всего с изготовлением, а также созданием отладочного и сервисного оборудования предлагается применение серийно выпускаемого модульного микрокомпьютера "MSP/80" (PIE - Варшава) с процессором Z80A.

В заключении сформулированы основные результаты исследований.

В приложении представлены листинги программ по синтезу и анализу, результаты расчетов, формулы, использованные при моделировании КСН курсо-доплеровского счисления с гиперболическими РНС, акт внедрения работы в учебный процесс КИИГА, документ Промышленного института Авиации (Варшава).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен новый подход к задачам оптимальной фильтрации Винера с учетом чистого запаздывания. Получено выражение оптимального фильтра не требующего факторизации матрицы, элементы которой содержат запаздывание.

2. На базе предложенного подхода представлено оптимальное и субоптимальное первичное комплексирование доплеровского и воздушного измерителей скорости.

3. На базе калмановской фильтрации разработан новый практичес-



ки нерасходящийся алгоритм, обладающий свойством адаптивности для применения в комплексировании навигационных измерителей, дающий возможность применения упрощенного описания оцениваемого процесса.

4. Разработан улучшенный вариант предложенного алгоритма защищенный от отказов в каналах измерений.

5. На основе предложенного алгоритма разработано программное обеспечение синтеза комплексирования курсо-доплеровского счисления и РНС "Лоран С" для определения географических координат легких и средних ВС.

6. Доказана целесообразность использования в комплексированной системе предвычисленной разности $\Delta\delta_p - \Delta\delta_c$ сигналов на входном фильтре для определения географических координат.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Я.Марцишель. Оптимальное комплексирование навигационных измерительных систем для первичных измерителей с запаздыванием. В кн.: Сборник научных трудов. Вопросы совершенствования информационно-воздушных судов. - Киев: КИИГА, 1989. С. 56-61.

2. Я.Марцишель, А.А.Туник. Цифровое оптимальное комплексирование навигационных бортовых измерителей. В кн.: Сборник тезисов докладов. ВС Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии. - Новосибирск, 1989 г. с. 163.

3. Я.Марцишель. Цифровое оптимальное навигационных бортовых измерителей при вторичной обработке информации. В кн.: Сборник тезисов докладов Всесоюзной НТК "Методы управления системной эффективностью функционирования электрофицированных и пилотажно-навигационных комплексов. - Киев: КИИГА, 1991 г. с. 47.

4. J. Marciszewski. Radar dopplerowski - przegląd najczesciej stosowanych rozwiazan. - Technika lotnicza i astronautyczna №8. 1984. s. 20-23

5. J. Marciszewski. Optymalna kompleksowa obrabka sygnalow informacyjnych pomiarowych urzadzen nawigacyjnych. - Prace Instytutu lotnictwa Warszawa 1991. №2. 16s.

Подписано в печать 24.05.91. Формат 60х84/16. Бумага типографская
Офсетная печать. Усл.печ.л. I,16, Уч.-изд.л. I,25.
Тираж 100 экз. Заказ № III-I. Цена 43 коп.

Редакционно-издательский отдел и типография КИИГА
252058. Киев-58, проспект Космонавта Комарова, I.

JD 25.320
AV 25.320

28