АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ
№ 5 1966

УДК 62—506

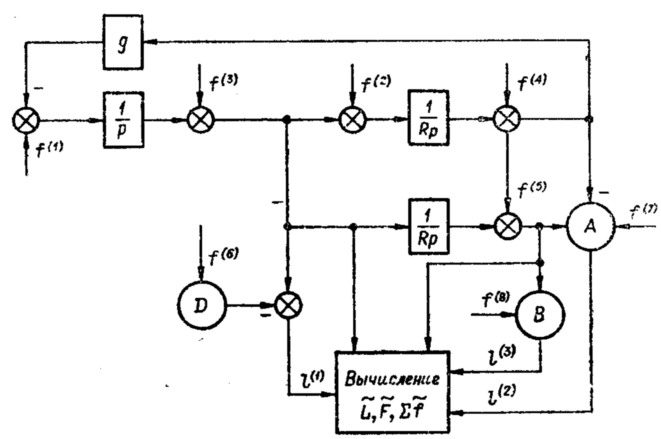
А. В. ВЕРШИНСКИЙ
(Москва)

О ПОСТРОЕНИИ АЛГОРИТМА САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Алгоритм статистической фильтрации изменяется в соответствии с уровнем систематических составляющих возмущений, определяемых на основе метода максимального правдоподобия и последовательного анализа.

Разрабатываемые в настоящее время принципы самоорганизации сложных систем охватывают широкий круг вопросов — от способов логического управления, выполнимых на ЦВМ, до построения нейросистем [1]. Методы самоорганизации в простейшем случае предусматривают автоматическое обнаружение отказов, разрегулировок и нестабильной работы измерительных средств, а также автоматическую ликвидацию последствий, вызываемых указанными нарушениями, путем реорганизации системы и настройки на оптимальный режим сглаживания случайных и компенсации систематических ошибок.

Под разрегулировками подразумеваются нарушения в системе приборов, приводящие к увеличению систематических ошибок координат выше допустимого уровня. Разрегулировки в измерительных системах, в частности в системах навигации, вызываются односторонним дрейфом гироскопов и интегрирующих устройств, разбалансировками и др.



Рассмотрим возможность обнаружения причин, вызывающих разрегулировки, и связанные с этим упрощения алгоритма статистической фильтрации. Будем полагать, что система состоит из одноканального инерциального ориентатора, внешних измерителей скорости D, углового положения A и координаты места B. На схеме модели ошибок, показанной на рисунке, обозначены возмущения $f^{(1)} - f^{(8)}$. Возмущения $f^{(1)}$ и $f^{(2)}$ приложены соответственно ко входам первого интегратора и гироскопа. Возмущения $f^{(3)}$, $f^{(4)}$ и $f^{(5)}$ являются начальными ошибками скорости, углового положения инерциальной платформы и координаты местоположения. Символами $f^{(6)}$, $f^{(7)}$ и $f^{(8)}$ обозначены ошибки внешних измерителей скорости, углового положения и координаты места. Эти ошибки являются входными возмущениями для системы статистической фильтрации.

Будем полагать, что система статистической фильтрации строится на основе метода максимального правдоподобия, обеспечивающего, как известно, высокую точность получения оценок координат при обработке нестационарных сигналов гироинерциальной системы.

Линейная комбинация переходной матрицы инерциального ориентатора и матрицы ошибок внешних измерителей имеет вид [2]

$$A = \left(\begin{matrix} \frac{1}{\omega} S\,\omega t_i & C\,\omega t_i - 1 & C\,\omega t_i & \frac{g}{\omega} S\,\omega t_i \\ 0 & -\frac{t_j}{R} & 0 & -1 \\ -\frac{1}{g} C\,\omega t_k + \frac{1}{g} & \frac{1}{\omega R} S\,\omega t_k - \frac{t_k}{R} & \frac{1}{\omega R} S\,\omega t_k & C\,\omega t_k - 1 \end{matrix}\right. \rightarrow$$

$$\left.\begin{matrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ \rightarrow 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{matrix}\right)_{\substack{i=\overline{1,I} \\ j=\overline{1,J} \\ k=\overline{1,K}}},$$

где ω — частота колебаний инерциальной системы ($g=\omega^2 R$);
S и C — синус и косинус;
$i=\overline{1,I}$ — означает $i=1, 2, \ldots, I$;
g — ускорение подъемной силы;
R — радиус Земли;
I, J и K — число соответствующих строк в A.

Матрице A соответствует уравнение ошибок

$$AF=L,$$

где L — вектор ошибок, получаемый в результате определения разностей между показаниями инерциального ориентатора и внешних измерителей координат;

$$L = \begin{pmatrix} l_i^{(1)} \\ l_j^{(2)} \\ l_k^{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta v_i - f_i^{(6)} \\ \Delta s_j - \beta_j - f_j^{(7)} \\ \Delta s_k - f_k^{(8)} \end{pmatrix}$$

F — вектор возмущений $f^{(i)}$, содержащий n компонент ($n=8$).

Если число измерений величины L превосходит число компонент, то по методу максимального правдоподобия можно найти оценки вектора систематических ошибок $\tilde{L}$ и вектора возмущений $\tilde{F}$:

$$\tilde{L} = A\,(A^T\,\Psi^{-1})^{-1}\,A^T\,\Psi^{-1}\,L;$$

$$\tilde{F} = (A^T\,\Psi^{-1}\,A)^{-1}\,A^T\,\Psi^{-1}\,L,$$

где Ψ — ковариационная матрица ошибок измерения.

Ковариационные матрицы оценок $\tilde{L}$ и $\tilde{F}$ имеют вид:

$$\Psi_{\tilde{L}} = A\,(A^T\,\Psi^{-1}\,A)^{-1}\,A^T;$$

$$\Psi_{\tilde{F}} = (A^T\,\Psi^{-1}\,A)^{-1}.$$

Оценки $\tilde{L}$ и $\tilde{F}$ можно использовать для компенсации или учета соответствующих ошибок. Выражения ковариационных матриц позволяют определить качество системы статистической фильтрации, и в частности, дисперсии оценок $\tilde{L}$ и $\tilde{F}$.

Некоторые из возмущений $f^{(i)}$ сохраняют постоянные значения в течение длительного периода эксплуатации. После компенсации таких возмущений их оценки, вычисленные при повторном применении полного алгоритма $\tilde{F}$, будут равны нулю и соответствующие неизвестные в $\tilde{F}$ можно опустить. В полученном таким образом упрощенном рабочем алгоритме, который обозначим $\tilde{F}'$, сохраняется оптимальность оценок, поскольку неучитываемые возмущения скомпенсированы с необходимой точностью.

Оценки $\tilde{f}^{(3)}$, $\tilde{f}^{(4)}$ и $\tilde{f}^{(5)}$ начальных ошибок, определяемые из $\tilde{F}'$, характеризуют качество системы обработки и компенсации. Действительно, если для данного цикла измерений получено, что начальные ошибки превосходят некоторый допустимый уровень, то, значит, компенсация в предыдущем цикле выполнена с недостаточной точностью. Следовательно, увеличение оценок начальных ошибок выше определенной границы является сигналом для перехода от рабочего $\tilde{F}'$ к полному $\tilde{F}$ алгоритму с целью уточнения оценок систематических ошибок и повторной компенсации этих ошибок. Переход к полному алгоритму приведет к уточнению сигналов компенсации в том случае, если увеличение начальных ошибок было вызвано появлением дополнительных (нескомпенсированных) систематических ошибок, не учитываемых рабочим алгоритмом.

Поскольку оценки $f^{(i)}$ содержат как систематическую, так и случайную составляющие, необходимо при определении уровня ошибки использовать методы, предусматривающие определение систематической составляющей. Для этой цели применим метод последовательного анализа, основанный на проверке гипотезы о наличии систематической ошибки с уровнем a_0 при альтернативе a_1. Выражение коэффициента правдоподобия имеет вид [3]

$$L_{Mi} = L_{Mi}\,(\tilde{f}_1^{(i)}, \tilde{f}_2^{(i)}, \ldots, \tilde{f}_M^{(i)}) = \frac{p_{a1}\,(\tilde{f}_1^{(i)}, \tilde{f}_2^{(i)}, \ldots, \tilde{f}_M^{(i)})}{p_{a0}\,(\tilde{f}_1^{(i)}, \tilde{f}_2^{(i)}, \ldots, \tilde{f}_M^{(i)})},$$

где p_a — плотность вероятности оценок $\tilde{f}_1^{(i)}, \tilde{f}_2, \ldots, \tilde{f}_M^{(i)}$, начального отклонения $f^{(i)}$ при значениях параметра $a = a_0$ и $a = a_1$.

В двухпороговом критерии

$$A < L_M < B,$$

где

$$A = \frac{1-\beta}{\alpha}; \quad B = \frac{\beta}{1-\alpha};$$

α и β — ошибки первого и второго рода, т. е. вероятности принять гипотезу a_1 при $a = a_0$ и гипотезу a_0 при $a = a_1$ соответственно.

Учитывая, что дисперсия σ^2 начальных ошибок известна из приведенной выше ковариационной матрицы, и полагая, что систематическая ошибка $f^{(i)}$ за время цикла измерений существенно не изменяется, при нормальном распределении ошибок измерительных приборов выражение L_M можно преобразовать так:

$$\frac{\sigma^2}{a_1 - a_0} \ln \frac{\beta}{1-\alpha} + M\,\frac{a_1 - a_0}{2} < \sum_{j=1}^{M} \tilde{f}_j^{(i)} <$$

$$< \frac{\sigma^2}{a_1 - a_0} \ln \frac{1-\beta}{\alpha} + M\,\frac{a_0 + a_1}{2}.$$

Зададим два уровня систематических ошибок $a_0 = 0$ и $a_1 = 2d$, где d — предельная величина систематической ошибки, которой можно пренебречь. Тогда

$$\frac{\sigma^2}{2d} \ln \frac{\beta}{1-\alpha} + Md < \sum_{j=1}^{M} \tilde{f}_j^{(i)} < \frac{\sigma^2}{2d} \ln \frac{1-\beta}{\alpha} + Md\,.$$

В соответствии с полученным неравенством производится суммирование оценок $\tilde{f}^{(i)}$, вычисляемых в каждом цикле статистической фильтрации. Если сумма оценок $\tilde{f}^{(i)}$ превзойдет правую часть неравенства, принимается решение о наличии существенных систематических ошибок и о переходе к общему алгоритму фильтрации. Если эта сумма меньше левой части неравенства, систематические ошибки отсутствуют. При нахождении суммы в границах, установленных неравенством, никакого решения не принимается и продолжается работа системы фильтрации с накапливанием оценок $\tilde{f}^{(i)}$.

Таким образом, при обработке информации в системе измерительных приборов в соответствии с рассмотренным алгоритмом наряду с возможностью упрощения, т. е. перехода от общего алгоритма к рабочему, имеется возможность обратного перехода от рабочего алгоритма к полному, необходимость чего устанавливается самой системой.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. A. Ostgaard, L. M. Butsch. Adaptive and Self Organizing Flight Control Systems.— IAS Paper, 1962, № 190.
2. Инерциальные системы управления. Под ред. Д. Питтмана. М., Воениздат, 1964.
3. Э. Леман. Проверка статистических гипотез. М., изд-во «Наука», 1964.

Поступила в редакцию
17 января 1966 г.,
окончательный вариант —
26 марта 1966 г.