УДК 629.735.05:621. 3(045)

Мачалин И.А., Костановский В.В.

ВЕКТОРНОЕ И МАТРИЧНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрен новый информологический подход к оценке эффективности систем диагностирования. Рассмотрены и проанализированы свойства векторных и матричных систем диагностирования, определены способы оптимального управления диагностированием. Полученные результаты позволяют обосновать требования к системам диагностирования сложных технических систем.

Ключевые слова: Диагностирование, управление диагностированием, параметры диагностирования, допуск, ошибка диагностирования, надежность.

1. Введение

Постановка проблемы. Повышение эффективности контроля, диагностирования и прогнозирования качества и надежности систем телекоммуникаций и защиты информации – важная и актуальная проблема. Очевидно, что выявление приоритетных научных направлений повышения эффективности диагностирования представляет не только фундаментальный теоретический интерес, но имеет и большую практическую значимость. От показателей диагностирования существенно зависит эффективность защиты информации, а в телекоммуникационных системах – качество и своевременность передачи информации.

Анализ исследований и публикаций. Решению этой проблемы посвящено ряд работ [1-5]. Несмотря на это, большинство закономерностей и свойств технологий диагностирования изучено недостаточно. Это обусловлено не только очевидной сложностью самой проблемы, но и отсутствием единых методологических принципов поиска оптимальных решений. Оптимально распределяя ресурсы по выявленным приоритетным научно-техническим направлениям поиска более эффективных способов построения систем диагностирования, можно существенно улучшить получаемые фундаментальные результаты и практическую организацию диагностирования. Это, в свою очередь, будет способствовать широкому использованию оптимальных методов обслуживания систем по состоянию [3-5], позволит использовать гибкие ресурсосберегающие технологии обслуживания и ремонта.

В работе [6] авторами были изложены общие теоретические закономерности и асимптотические свойства оптимального управления диагностической информологией для скалярных систем. Данная работа обобщает полученные ранее результаты по оценке достоверности и эффективности систем диагностирования.

Цель работы и постановка задач. Цель работы - рассмотреть закономерности и асимптотические свойства векторных и матричных систем, которые реализуют базовую информологию диагностирования (БИД), построенную на оптимальном управлении объемом диагностической информации.

Известными данными служат результаты решения задач диагностирования скалярных объектов с аналоговыми диагностическими сигналами [6], а также методы общей теории информации и системотехники. В роли ожидаемых результатов решения задачи выбраны закономерности и асимптотические свойства векторных и матричных систем диагностирования. Для решения задач использованы методы общей теории систем, функционального анализа и математического программирования.

2. Решение задач

В дальнейшем используются термины и понятия, введенные в работе [6]. Вначале рассмотрим векторные БИД системы.

Векторные БИД системы обладают большими возможностями управлять числом выбранных диагностических сигналов (ДС) n и числом взятых стробов m. Рассмотрим теоремы, утверждения которых составляют теоретическую основу векторных БИД.

Теорема 1. Если в векторной БИДС [6]:

1.1. Число ДС $n=1$.

1.2. Число стробов

$$m=2\Delta T\Delta F=\nu\,,$$

где $\Delta T,\Delta F,\nu$ - соответственно, длительность, полоса и база ДС.

1.3. Длительность стробов выбирается одинаковой и равной интервалу дискретизации диагностического сигнала по теореме Котельникова

$$\Delta t=1/2\,\Delta F\,. \tag{1}$$

1.4. Получаемая выборка средних значений стробов Y_1,Y_m в дальнейшем обрабатывается усреднением всех отсчетов с весами $a_i, i=1,m$, которые удовлетворяют условиям нормировки

$$\sum\nolimits_1^m a_i=1{,}0\le a\le 1\,.$$

1.5. В роли оптимальной оценки значения ДС выбирается среднее арифметическое значение

$$X_{opt}=Z_0=\sum\nolimits_1^m a_iY_i\,. \tag{2}$$

1.6. Все отсчеты берутся в одинаковых условиях:

$$\delta_i=\delta;\sigma_{\xi i}=\sigma_\xi;\Delta H_i=\Delta H_1\,.$$

1.7. Вероятности безотказной работы объекта для всех моментов диагностирования приблизительно одинаковы

$$P(t_1)=P(t_m)=P(t_1+\Delta T)\,,$$

где $P(t)$ - вероятность безотказной работы объекта по рассматриваемому ДС к моменту времени t, то справедливы следующие уравнения:

- отношение сигнал/шум, исчисляемое по оценке (4),

$$\Delta H_m=m\Delta H_1=\nu\Delta H_1\,;$$

- объем диагностической информации при m-кратном стробировании

$$I_m=2\Delta T\Delta F\ln\Delta H_1=\nu I_1=V_m\,;$$

- для нормированного безразмерного полудопуска

$$\eta=\frac{\delta/\sigma_\xi}{\sqrt{\Delta H_m}}=\frac{\delta/\sigma_\xi}{\sqrt{2\Delta T\Delta F\Delta H_1}}=\frac{\delta/\sigma_\xi}{\sqrt{\dfrac{V_m\Delta H_1}{\ln\Delta H_1}}}=\frac{\delta/\sigma_\xi}{\sqrt{\nu e^{\Delta D_1}}}\,.$$

Доказательство. Если справедливы условия (2), то все отсчеты как средние значения стробов представляют собою независимые случайные величины [6], которые имеют одно и то же распределение, близкое к гауссовому распределению. Из-за этого коэффициенты в сумме (4) будут одинаковыми и равными $1/m$. Дисперсия погрешности измерений для оценки (4), которая является среднеарифметическим значением, уменьшится в m раз, что равносильно увеличению отношения сигнал/шум в m раз. Отсюда следует справедливость соотношений (7) – (9), что и требовалось доказать.

Теорема 1 обобщает утверждения теорем 5,6 работ [5,6] на случай m.

Следствие 1.1. База ν ДС и отношение ΔH_1 одинаково влияют на нормированный полудопуск η.

Следствие 1.2. При объеме диагностического сигнала $I_1>1$ повышать эффективность диагностирования лучше за счет увеличения ν. Именно поэтому целесообразно применение стимулирующих и диагностических сигналов с большой базой (шумоподобных сигналов), которая не меньше базы объекта диагностирования.

Следствие 1.3. В БИДС - $l \times m$ существует пять управляемых параметров $\Delta H_1, \Delta F, \Delta T, \sigma_\xi, \delta$ с общим числом связей между ними $5 \times 4 = 20$, поэтому общее число управляемых переменных

$$U_{\min,m} = 2 \cdot 5^2 = 50 .$$

Следствие 1.4. В БИДС – $l \times m$ существует общее число способов управления БИД

$$N_{T,m} = 2^{50} - 1 = \left(2^{10}\right)^5 \cong 10^{15} .$$

Следствие 1.5. Применяя стимулирующие и диагностические сигналы с большой базой,

$$\nu >> 1 ,$$

можно существенно повысить эффективность диагностирования.

Асимптотическое свойство БИДС-$l \times m$ (АС4):

$$\lim_{m \to \infty} \eta(m) = \lim_{\nu \to \infty} \eta(\nu) \to 0 .$$

Увеличивая базу стимулирующих и диагностических сигналов, можно в предельном смысле абсолютно точно и достоверно оценивать состояние объекта, если наблюдать за ним непрерывно с помощью шумоподобного диагностического сигнала с базой $\nu = m \to \infty$. АС4 является обобщением АС1 на случай $m > 1$. Увеличение базы сигналов до значений больших, чем собственная база объекта диагностирования приводит к использованию систем диагностирования, избыточных по объему диагностических сигналов.

Как следует из теоремы 1, векторные БИДС ($l \times m$) обладают значительно большими возможностями по сравнению со скалярными БИДС (1×1). Прежде всего, за счет того, что в число управляемых переменных входят все параметры объема ДС и все параметры агрегатов БИД. Применение оптимального оценивания ДС по каждому стробу [5] еще более повышает эффективность БИДС-$1 \times m$, так как оно играет роль предварительной оптимальной фильтрации стробов. Такие системы будем обозначать БИДС-$l \times m$ - $\Phi_j \times \Phi_\nu$, имея ввиду, что Φ_j показывает наличие предварительной фильтрации j-го строба, а Φ_ν - общей фильтрации с учетом базы ν ДС.

Теорема 2. Если в векторной БИДС - $l \times l$:

2.1.Число l ДС удовлетворяет условию: $l < 1 \le n$.

2.2. Число стробов по каждому ДС $m_i = m = 1$.

2.3. Между l стробами существуют двусторонние связи.

2.4 Каждая связь характеризуется одним ДП,

то существует общее число управляемых переменных БИД

$$U_{l \times 1} = 2l^2 . \tag{3}$$

Доказательство. Если справедливы условия (2.1) - (2.4), то существуют две матрицы минимальным размером $l \times l$, эталонная и фактическая матрицы, элементы которых служат управляемыми переменными. Сумма всех элементов этих двух матриц составляет число, определяемое выражением (3), что и требовалось доказать.

Следствие 2.1. Общее число управляемых переменных $U_{l \times 1}$ в БИДС - $l \times 1$ пропорционально l^2.

Следствие 2.2. При $l = 0$ не существует способов управления БИД.

Следствие 2.3. Максимальное общее число управляемых переменных БИДС - $l \times 1$.

$$\max_l U_{l\times 1} = \underset{l}{SUP} U_{l\times 1} = U_{n\times 1} = 2n^2 \ .$$

Следствие 2.4. При независимых ДС общее максимальное число управляемых переменных минимально

$$\min_l U_{l\times 1} = \inf_l U_{l\times 1} = 2n \ .$$

Отсюда следует, что общепринятая практика использовать независимые диагностические сигналы сужает возможности оптимального управления БИД.

Следствие 2.5. Отсутствие возможности управлять эталонами сокращает общее число управляемых переменных до

$$\min \inf_l U_{l\times 1} = n \ .$$

Следствие 2.6. Рассмотрение БИДС - $l\times 1$ как l независимых скалярных БИДС - $l\times l$ позволяет использовать общее число управляемых переменных [5]

$$U_{1\times 1,l} = 2U_{A,C}^2 l = 32l \ .$$

Следовательно, возможности векторных БИДС-$l\times 1$ определяются числом l выбранных ДС и взаимосвязями между ними.

Асимптотическое свойство (АС5) БИДС- $l\times 1$:

$$\lim_{l\to\infty} U_{l\times 1} \to \infty \ .$$

Увеличение числа l ДС увеличивает возможности управления БИД.

Рассмотрим закономерности и асимптотические свойства матричных БИДС. Матричные БИДС - $l\times k$, $1<l<n$, $1<k<m$, обладают наиболее широкими возможностями управления БИД.

Теорема 3. Если в матричной БИДС - $l\times k$:

3.1.Число ДС $1<l\times n$.

3.2. Число стробов по i - му ДС равно $m_i = \nu_i$.

3.3. Максимальное число стробов по одному ДС

$$\max_i m_i = m_{\max} = m \ .$$

3.4. Между всеми $l\times k$ стробами существуют двусторонние связи.

3.5. Каждая связь характеризуется одним ДП,

то существует общее число управляемых переменных БИД

$$U_{l\times k} = 2l^2k^2 \ . \tag{4}$$

Доказательство. Если справедливы условия (3.1) - (3.5), то существуют две матрицы минимальным размером $l\times k$, эталонная и фактическая матрицы, элементы которых служат управляемыми переменными. Сумма всех элементов этих двух матриц составляет число (4), что и требовалось доказать.

Следствие 3.1. Рост чисел l и k одинаково влияет на число $U_{l\times k}$

Следствие 3.2. Общее число управляемых переменных $U_{l\times k}$ пропорционально квадрату произведения $l\times k$.

Следствие 3.3. При $l=0$ и/или $k=0$ не существует способов управления БИД.

Следствие 3.4. Максимальное общее число управляемых переменных в матричной БИДС

$$\max_{l,k} U_{l\times k} = \max_l \max_k U_{l\times k} = 2n^2m^2 \ . \tag{5}$$

Следствие 3.5. Использование l независимых ДС и k независимых стробов сужает возможности управления, так как в этом случае

$$U_{l\times k} = 2lk = U_{l\times k,\min} \quad .$$

Асимптотическое свойство (АС6) БИДС- $l \times k$:

$$\begin{cases} \lim\limits_{l\to\infty} U_{l\times k} \to \infty \\ \lim\limits_{k\to\infty} U_{l\times k} \to \infty \cdot \end{cases} \qquad (6)$$

Теорема 4. Если в матричной БИДС - $l \times k$:

4.1. Число ДС $1 \le l \le n$.

4.2. Число стробов по i -му ДС равно $m_i = \nu_i$.

4.3. Максимальное и минимальное число стробов

$$\max_i k_i = k_{\max}, \min_i k_i = k_{\min} .$$

4.4. Между всеми $l \times k$ стробами существуют двусторонние связи.

4.5. Каждая связь характеризуется одним ОП,

то существует общее число $N_{l\times k}$ способов управления БИД, которое определяется неравенством:

$$\sum\nolimits_1^{2l^2k^2_{\min}} C^i_{2l^2k^2_{\min}} \le N_{l\times k} \le \sum\nolimits_1^{2l^2k^2_{\max}} C^i_{2l^2k^2_{\max}} \; .$$

Доказательство. Если справедливы условия (4.1) - (4.5), то существуют две матрицы с минимальным размером $l \times k_{\min}$ и с максимальным размером $l \times k_{\max}$, эталонная и фактическая матрицы, элементы которых служат управляемыми переменными. Суммы всех элементов этих двух матриц составляют максимальное и минимальное числа управляемых переменных, рассчитываемые по формуле (4). Их использование для расчета общего числа сочетаний в каждом случае позволяет получить сложное неравенство (6), что и требовалось доказать.

Следствие 4.1. Общее максимальное число способов управления

$$N_{l\times k,\max} = 2^{2n^2m^2} - 1 .$$

Следствие 4.2. При независимых ДС и стробах общее максимальное число способов управления минимально и равно

$$\min N_{l\times k,\max} = 2^{2nm} - 1 .$$

Следствие 4.3. В матричных системах БИДС - $l \times k$ появляется возможность “матричной фильтрации” - получения оценок ДС типа

$$X_{opt} = \sum\nolimits_1^l \sum\nolimits_1^m a_{ij} Y_{ij} \; ,$$

что при определенных условиях позволяет существенно повысить эффективность диагностирования.

Следствие 4.4. В матричных системах БИДС - $l \times k$ появляется возможность “матричного управления” - управления элементами матрицы связей X_i и Y_{ij} , что позволяет задавать требуемую эффективность диагностирования и синтезировать системы с наперед заданными свойствами [3].

Следствие 4.5. Общепринятый подход к выбору ДС, который заключается в отборе независимых ДС, является неоправданным с точки зрения повышения эффективности диагностирования.

В матричных БИДС - $l \times k$ АС4 и АС5 проявляются в усиленном смысле:

$$\begin{cases} \lim\limits_{l\to\infty} U_{l\times k} \to \infty; \lim\limits_{k\to\infty} U_{l\times k} \to \infty; \\ \lim\limits_{l\to\infty} N_{l\times k} \to \infty; \lim\limits_{k\to\infty} N_{l\times k} \to \infty. \end{cases}$$

3. Выводы

Эффективность оптимального управления базовой информологией диагностирования в векторных и матричных системах полностью определяют асимптотические свойства этих систем, которые зависят от числа выбираемых диагностических параметров и числа стробов для каждого параметра. Большое число управляемых переменных (4), (5) и способов оптимального управления (6), (7) делают задачи морфологического синтеза различных способов и их сравнительного анализа особо актуальными. В то же время задачи поиска наилучшего способа становятся все более трудоемкими и требуют оптимизации самих процедур целенаправленного поиска. Утверждения и следствия теорем 1-4 позволяют определить асимптотические по l и k свойства АС4 - АС6 векторных и матричных систем.

Полученные результаты позволяют обосновать требования к системам диагностирования сложных технических систем, в частности, систем телекоммуникаций и защиты информации. Доказанные теоремы утверждают, что существуют способы оптимального управления БИД, но не раскрывают технологии построения систем диагностирования по этим способам. Например, не раскрываются технологии установления связей между управляемыми переменными, то есть технологии морфологического синтеза систем. Этот вопрос является достаточно актуальным и составляет предмет дальнейших исследований рассмотренной проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатов В.А. Метод избыточного диагностирования авиационных систем / В.А.Игнатов, Б.Н. Стоянов // Технологические процессы при эксплуатации радиоэлектронного оборудования гражданской авиации.- Киев: КИИГА.- 1985.- С.7-17.
2. Боголюбов Н.В. Управление информационной избыточностью систем диагностирования и контроля // Контроль и управление техническим состоянием авиационного и радиоэлектронного оборудования воздушных судов гражданской авиации / Н.В. Боголюбов, В.А. Игнатов -Киев: КИИГА.- 1986.- С.3-11.
3. Глухов В.В. Техническое диагностирование динамических систем.-М.: Транспорт.-2000.-256с.
4. Drenick R. F. The failure law of complex equipment// Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1996. -Vol. 8. – P.680-690.
5. Finkelshtein A. Economic optimization of off-line inspection in a process subject to failure and recovery / A. Finkelshtein, Y. T. Herer, T. Raz, I. Ben-Gal // IIE Transactions. - 2005. - Vol. 37, №11. - P. 995-1009.
6. Игнатов В.А. Оптимальное управление диагностированием изделий авиационной техники / В.А. Игнатов, И.А. Мачалин // Інформатизація і проблеми управління.- 2006.- №4. -С.45-54.

Надійшла: 21.05.2012
Рецензент: д.т.н., проф. Конахович Г.Ф.