

2. Jain M., Dovrolis C. End-to-end available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput // Proc. ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop. 2002. V. 32. No. 4. P. 295—308.

3. Callyam P., Sridharan M., Mandrawa W., Schopis P. Performance measurement and analysis of H. 323 traffic // Proc. 5th Int. Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2004). 2004. P. 137—146.

4. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., Morton A. STD 81, RFC 7679: A one-way delay metric for IPPM. [Электрон. ресурс]: <http://www.rfc-editor.org/info/rfc7679> (дата обращения 20.06.2016). DOI 10.17487/RFC7679.

5. Rec ITU-T Y.1541. Network Performance Objectives for IP-Based Services. Стандарт Международного союза электросвязи (МСЭ). International Telecommunication Union. 2003.

6. Каргин И. С. Анализ беспроводной многошаговой сети со случайным доступом и низким временем доставки пакетов // Информационные технологии и системы-2015: Сб. трудов 39-й междисциплинарной школы-конференции Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН. Сочи, 2015. С. 659—670.

7. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44—46.

8. Виноградов Н. И., Сагатов Е. С. Методика измерения односторонней сетевой задержки пакетов с синхронизацией ГЛОНАСС // Телекоммуникации. 2016. № 4. С. 16—23.

9. Bovy C. J., Mertodimedjo H. T., Hooghiemstra G., Uijterwaal H., Mieghem P. Analysis of end-to-end delay measurements in Internet // Proc. 3rd Int. Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2002). 2002. P. 1—8.

10. Shalunov S., Teitelbaum B., Karp A., Boote J., Zekauskas M. RFC 4656: A one-way active measurement protocol (owamp). [Электрон. ресурс]: <http://www.rfc-editor.org/info/rfc4656> (дата обращения 20.06.2016). DOI 10.17487/RFC4656.

11. Donnelly S., Graham I., Wilhelm R. Passive calibration of an active measurement system // Proc. 2nd Int. Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2001). P. 1—8.

12. Veiga H., Valadas R., Salvador P., Nogueira A., Pfeifferberger T., Strohmeier F. OWAMP Performance and Interoperability Tests // 4th Int. Workshop on Internet Performance, Simulation, Monitoring and Measurement (IPS-MoMe 2006), Salzburg, Austria, 2006.

13. Carbone L., Coccetti F., Dini P., Percacci R., Vespignani A. The spectrum of internet performance // Proc. 4th Int. Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2003). P. 75—88.

14. Mora F. Bring an atomic clock to your home with chrony // Linux Journal. 2002. No. 101. P. 3.

15. Кузьмин Д. А. Кластерный подход для высокопроизводительных вычислений // Компьютерное моделирование и новые технологии. 2003. № 7. С. 7—15.

Дата принятия: 23.06.2016.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.396(024)

Оптико-электронная система измерений координат объектов с адаптацией параметров разложения

А. А. УМБИТАЛИЕВ, В. В. ПЯТКОВ, А. К. ЦЫЦУЛИН, Г. В. ЛЕВКО, А. В. МОРОЗОВ

Научно-исследовательский институт телевидения,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: niit@niittv

Рассмотрена задача параметрической оптимизации оптико-электронной системы измерений координат объектов при вариациях чёткости и кадровой частоты и ограничении скорости считывания сигнала фотоприёмной матрицы. Показано, что оптимальные значения чёткости и кадровой частоты определяются методом выравнивания оценок дисперсий межэлементных и межкадровых разностей. Установлено, что для увеличения времени наблюдения с близкими значениями оценок указанных дисперсий пороги переключения можно снизить путём введения инерционности в тракт измерения дисперсий.

Ключевые слова: измерение координат, оценивание статистик видеосигнала, адаптация параметров разложения.

The parametric optimization of OES of coordinates measurement with variations of definition and frame rate by limiting the reading speed of the signal from the photosensor problem is considered. It is shown that the optimal values of clarity and frame rate are determined by the alignment of the inter-element and inter-frame difference variances estimates; switching thresholds can be decreased by introducing the delay into the mechanism of measuring these dispersions to increase the observation time with close values of the estimates of these variances.

Key words: coordinates measurement, video signal statistics evaluation, decomposition parameters adaptation.

Более полувека космические аппараты (КА) стыкуются на орбите с использованием радиотехнических и оптико-электронных измерительных систем (ИС), предназначенных

для нахождения изменяющихся во времени пространственных координат кооперируемых КА. Различным аспектам этих ИС (подробностям триангуляционного метода измерения

координат и оценкам зависимости точности измерений от дальности, возможностям повышения точности с помощью специальных реперов и алгоритмов, структуре и параметрам систем и специального программного обеспечения, автоматизации процесса стыковки) посвящены, в частности, работы [1—5].

Для обеспечения стыковки КА основополагающим является первый, так называемый главный контур управления летательным аппаратом, реализующий метод сближения КА. При использовании этого метода необходимо измерять координаты объекта наведения. Важным принципом измерения координат такого объекта, особенно на дальних дистанциях (когда требуется отслеживать координаты существенно малоразмерного объекта в телевизионном кадре), является следующее измерение. На базе этого принципа строятся следующие телевизионные координаторы объектов, реализующие второй внутренний замкнутый контур системы автоматического управления (САУ) [6].

Важную особенность контроля сближения и стыковки КА составляет введенный С. П. Королевым принцип итерационного измерения координат: при изменении дистанции между КА изменяются методы и параметры ИС. В последние годы этот принцип дополнен методом адаптации параметров разложения изображения твердотельными матричными фотоприемниками [6, 7]. Данное направление построения ИС связано, с одной стороны, с изменением во времени статистик видеосигналов (вызванных изменением дистанции между КА), с другой стороны — ограничением скорости считывания сигнала матричных фотоприемников. Задача поиска минимума суммарной погрешности оценивания пространственно-временных координат относится к изопериметрическим задачам (в классическом варианте — к нахождению фигуры максимальной площади при ограниченном периметре), переменными являются парциальные погрешности оценивания $\epsilon_k = D_{\Delta k}$, а «периметрами» — доступная скорость получения информации от фотоприемной матрицы. Для решения этого варианта задачи составляется уравнение Эйлера с неопределенными множителями Лагранжа. Решение уравнения аналогично решению задачи о распределении погрешности по спектру сигнала (вычислении энтальпии) и приводит к концепции: для каждого

сюжета (фоноцелевой обстановки) существует оптимальный видеоряд [6, 7]. Из концепции следует правило равенства дисперсий приращений сигнала по всем аргументам («равновесия» приращений). В простом случае наблюдения изображений в единственном спектральном диапазоне это правило соответствует требованию равенства дисперсий межэлементных (по горизонтали и по вертикали) и межкадровой разностей видеосигнала: $D_{\Delta x} = D_{\Delta y} = D_{\Delta t}$. Такое выравнивание, предполагающее процедуру измерения дисперсий приращений по различным координатам (рис. 1), позволяет минимизировать промах при измерении пространственно-временных координат КА. Этот условный оптимум параметров разложения ясен интуитивно, так как на большой дальности видимые размеры и скорость объекта малы, т. е. актуальна предельная четкость, а на малой дистанции размеры и скорость объекта велики, и требуется высокая кадровая частота.

Таким образом, система измерений координат объектов, кроме отмеченного выше второго контура слежения за КА, содержащего, в частности, устройство формирования изображения КА и вычисления его координат, включает подсистему измерений статистик сигналов и третий контур обратной связи, реализующие указанное выравнивание с помощью взаимобмена четкости (числа элементов разложения) и кадровой частоты. При этом необходимо использовать как традиционные методы обеспечения устойчивости системы автоматического управления во втором контуре слеющего измерителя с помощью нелинейности, обусловленной конечными размерами стробов слежения в телевизионном кадре, так и новые методы на основе нелинейностей и инерционности в третьем замкнутом контуре САУ [6—8]. Вместе с тем, в силу дискретности раstra матричных фотоприемников четкость изображения может изменяться только дискретно, что вносит свою специфику в синтез системы управления. При измерении координат объекта наблюдения в каждом кадре k возникает альтернатива в качестве телеизображения. В простейшем случае система, адаптивная к динамике сюжета, может быть в двух изменяющихся во времени состояниях: A_k^1 — высокая четкость (высокое разрешение и, как следствие, точность измерения), низкая

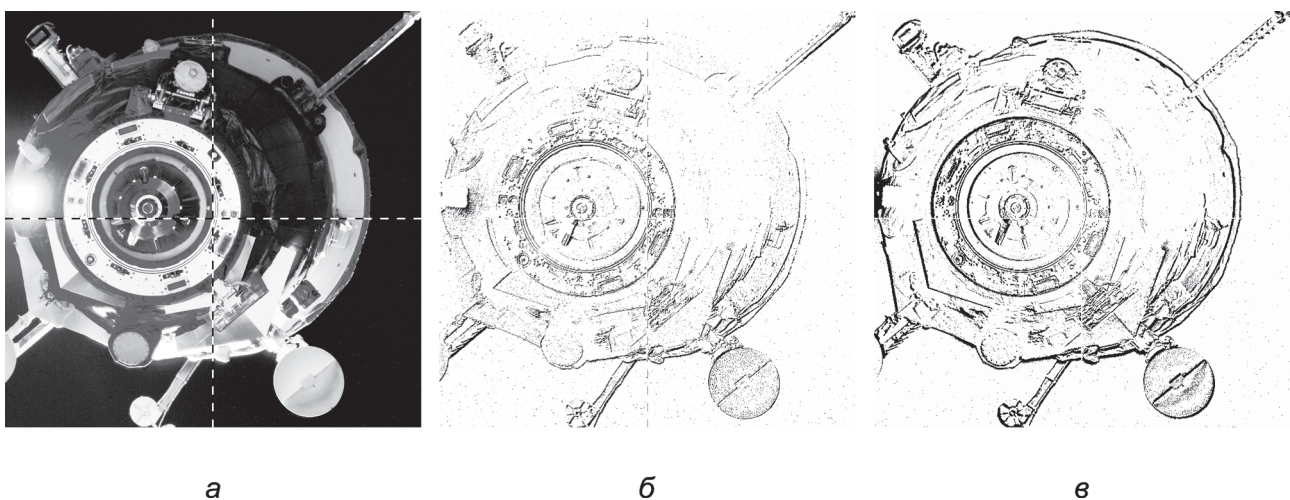


Рис. 1. Наблюдаемое изображение космического аппарата в процессе сближения (а), видеосигналы, полученные при межэлементной (б) и межкадровой (в) разности

кадровая частота; A_k^2 — пониженная чёткость, высокая кадровая частота.

При переходе из одного состояния в другое возможны различные варианты стабилизации уровня сигнала телекамеры. Вероятно, что при принятии решения о необходимости повышения кадровой частоты пиксели группируются по четыре («бининг» вида 2×2), а кадровая частота возрастает вдвое (для поддержания постоянства сигнала время накопления дополнительно сокращается в два раза). Правило динамического выравнивания дисперсий межэлементных и межкадровой разностей видеосигнала диктует построение системы управления с использованием формирователя отношения внутрикадровых и межкадровых статистик (дисперсий первых конечных разностей), которое далее будем называть опорной статистикой $z = D_{\Delta x} / D_{\Delta t}$ и сравнения её с верхним γ_v и нижним γ_n порогами. Правило формирования управляющих сигналов САУ, передаваемых на синхрогенератор телекамеры для переходов из состояний A_k^1 в A_k^2 и обратно, определяется расположением опорной статистики z относительно порогов принятия решения (подробнее см. [7]):

при $z > \gamma_v$ происходит переход в состояние с максимальной чёткостью;

при $z < \gamma_n$ осуществляется переход в состояние с максимальной кадровой частотой;

при $\gamma_n \leq z \leq \gamma_v$ сохраняется имеющееся состояние.

Минимальное отношение порогов $d = \gamma_v / \gamma_n$ соответствует изменению отношений интервалов пространственной и временной дискретизаций, в рассматриваемом случае $d = 4$. Однако для обеспечения устойчивости адаптивной системы недостаточно отношения порогов $d = 4$, обусловленного дискретностью раstra, из-за неизбежных шумов видеосигнала. Можно произвольно увеличить отношение порогов принятия решения, но так как в задачу системы наблюдения входит минимизация времени нахождения в состояниях с опорной статистикой $z \gg 1$ или $z \ll 1$, необходим статистический синтез системы на базе поиска оптимальных значений порогов.

Для этой задачи концепция адаптации проста: пока КА находится на большой дистанции следует использовать максимальную чёткость (состояние A_k^1), когда расстояние до

него мало — максимальную кадровую частоту (состояние A_k^2).

Результаты измерений, выполненных в [7], показывают, что монотонное изменение дальности в этой задаче порождает в среднем монотонное изменение опорной статистики z (рис. 2). Вместе с тем выявленные в ходе измерений флуктуации относительно сглаженной функции математического ожидания $\varphi(t)$ определяют необходимое увеличение отношения порогов, обеспечивающее устойчивость системы автоматического управления. Если считать, что наблюдаемый сигнал можно моделировать случайным процессом с нормальным распределением, включающим некоррелированные сигнальную и шумовую составляющие, то z является модифицированной статистикой Фишера—Снедекора [7]. Распределение $p(z|\varphi)$ симметрично при фиксированном математическом ожидании φ статистики z и больших объёмах выборки (соответствующих числу элементов фотоприёмной матрицы, обычно порядка $10^5 \dots 10^7$). Результаты расчёта по-

казывают, что при анализе в реальном времени каждого кадра (без задержки) при вероятности ложной тревоги (преждевременного изменения состояния системы, чреватого немедленным обратным изменением) $P_{\text{ЛТ}} \leq 10^{-3}$ пороги существенно отличаются от минимальных, диктуемых дискретностью раstra, и отношение порогов $d_{1 \leftrightarrow 2}$, при отсутствии флуктуаций равно четырем, должно быть увеличено примерно до девяти [11].

Высокое качество функционирования оптико-электронной системы измерений координат объектов обеспечивает адаптацию параметров разложения на основе поддержания (приближенного, с определённым доверительным интервалом) равенства оценок дисперсий приращений видеосигнала по всем аргументам. В силу дискретности изменений размеров пространственной зоны накопления (интервалов дискретизации по полю) размеры доверительного интервала $d = \gamma_v / \gamma_n$, т. е. отношения порогов принятия решения о переключении параметров разложения из состояния I в состояние J ($I < J$) имеют значения $d \geq (J/I)^2$: $d_{1 \leftrightarrow 2} \geq 4$ при переходе от полной чёткости к бинированию 2×2 ; $d_{2 \leftrightarrow 3} \geq 9/4$ при переходе от бинирования 2×2 к бинированию 3×3 ; $d_{3 \leftrightarrow 4} \geq 16/9 \approx 1,8$ при переходе от бинирования 3×3 к бинированию 4×4 .

Далее рассмотрим простой случай системы с двумя состояниями. В реальных системах невелика скорость изменения математического ожидания $\varphi(t)$ опорной статистики z , а её отклонения от среднего значения $\varphi(t)$ в соседних кадрах статистически независимы, в силу чего можно минимизировать время нахождения системы в «неправильном» состоянии (когда дисперсии приращений сигналов по различным аргументам существенно отличаются друг от друга) или в данном случае можно увеличить время пребывания системы в состоянии $1/2 < z < 2$. Эта задача относится к проблематике оптимальной фильтрации (в общем случае нелинейной), в ходе которой формируются оценки текущего значения производной математического ожидания $\varphi(t)$ статистики z по времени $d\varphi(t)/dt$. Функцию $\varphi(t)$ можно моделировать кусочно-линейной зависимостью, поскольку в реальных условиях стыковки КА работают корректирующие двигатели, вносящие аддитивные скачки в закон изменения $\varphi(t)$. В среднем функция $\varphi(t)$ имеет монотонный характер, поэтому её можно оценивать с использованием оптимального фильтра Калмана при введении переменной во времени инерционности. Этот вариант задачи нахождения оптимальной инерционности системы управления методологически схож с определением оптимальной инерционности линейного фильтра в теории фильтрации Колмогорова—Винера. Как и при линейной фильтрации, возникают два противоположных эффекта: введение инерционности уменьшает погрешность, обусловленную шумом, но увеличивает задержку (аналог линейной погрешности).

Тогда с учётом дискретности измерений $\varphi(n)$, где $n = 0, 1, 2 \dots$ (n соответствует моментам времени t_n) и вектора состояния $\Phi(n) = [\varphi(n) \dot{\varphi}(n)]^T$ алгоритм формирования параметров вектора оценок $\hat{\Phi}(n)$ будет иметь вид [12]:

$$\hat{\Phi}(n) = \Phi(n) \hat{\Phi}(n-1) + K(n) \Delta \varphi(n), \quad \hat{\Phi}(0) = \hat{\Phi}_0; \quad (1)$$

$$\Delta \varphi(n) = \varphi(n) - C \Phi(n) \hat{\Phi}(n-1);$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P}_3(n) &= \Phi(n) \mathbf{P}(n) \Phi^T(n), \mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0; \\ \mathbf{K}(n) &= \mathbf{P}_3(n) \mathbf{C}^T [\mathbf{C} \mathbf{P}_3(n) \mathbf{C}^T + \mathbf{R}(n)]^{-1}; \\ \mathbf{P}(n) &= \mathbf{P}_3(n) - \mathbf{K}(n) \mathbf{C} \mathbf{P}_3(n), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\Phi(n)$ — матрица экстраполяции размером 2×1 ; $\mathbf{K}(n)$ — весовая матрица; $\Delta\varphi(n)$ — невязка; $\mathbf{C} = [1 \ 0]$ — матрица-строка наблюдения размером 1×2 , показывающая, что из всего вектора состояния непосредственно измеряется только одна величина $\varphi(t)$; $\mathbf{P}_3(n)$, $\mathbf{P}(n)$ — ковариационные матрицы ошибок экстраполяции и оценивания размерами 2×2 , соответственно; $\mathbf{R}(n)$ — ковариационная матрица ошибок измерений, которая при указанной выше матрице наблюдения $\mathbf{C}$ представляется скаляром.

Здесь размерность оцениваемых параметров вектора состояния $\Phi(n) = [\varphi(n) \dot{\varphi}(n)]^T$ равна двум, «т» — символ транспонирования. Определяемые согласно (2) значения элементов весовой матрицы $\mathbf{K}(n)$ следует ограничивать снизу на заданном уровне для минимизации динамических погрешностей оценивания [8].

Ковариационная матрица $\mathbf{P}_{\Delta\varphi}$ невязки $\Delta\varphi(n)$ определяется выражением $\mathbf{P}_{\Delta\varphi}(n) = \mathbf{C} \mathbf{P}_3(n) \mathbf{C}^T + \mathbf{R}(n)$ [8], тогда ковариационная матрица произведения $\mathbf{K}(n) \Delta\varphi$ будет иметь вид

$$\mathbf{P}_{\mathbf{K}\Delta\varphi} = \mathbf{K}(n) [\mathbf{C} \mathbf{P}_3(n) \mathbf{C}^T + \mathbf{R}(n)] \mathbf{K}^T(n). \quad (3)$$

Подставим в (3) выражение для $\mathbf{K}(n)$ из (2), обозначив математическое ожидание символом $M\{\dots\}$, учтём свойство симметричности ковариационных матриц $\mathbf{P}_{\Delta\varphi}(n)$, $\mathbf{P}_3(n)$ и получим [8]:

$$M[\mathbf{K}(n) \Delta\varphi(n)] [\mathbf{K}(n) \Delta\varphi(n)]^T = \mathbf{K}(n) \mathbf{C} \mathbf{P}_3(n) = \mathbf{P}_3(n) - \mathbf{P}(n).$$

В предположении стационарности шумов измерений и системы слежения для установившегося режима работы запишем

$$\mathbf{P}_3(n) \approx \mathbf{P}_3(n+1); \quad \mathbf{P}(n) \approx \mathbf{P}(n-1); \quad \mathbf{K}(n) \approx \mathbf{K}(n-1),$$

откуда

$$\mathbf{P}_3(n+1) = \mathbf{K}(n) M[(\Delta\varphi(n))^2] \mathbf{K}^T(n) + \mathbf{P}(n) = \mathbf{K}(n) \mathbf{K}^T(n) \overline{(\Delta\varphi(n))^2} + \mathbf{P}(n).$$

Тогда весовую матрицу $\mathbf{K}(n)$ можно определить в соответствии с рекуррентными выражениями [13]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K}(n) &= \mathbf{P}_3(n) \mathbf{C}^T [\mathbf{C} \mathbf{P}_3(n) \mathbf{C}^T + \mathbf{R}(n)]^{-1}, \mathbf{P}_3(1) = \mathbf{P}_1; \\ \mathbf{P}(n) &= \mathbf{P}_3(n) - \mathbf{K}(n) \mathbf{C} \mathbf{P}_3(n); \\ \mathbf{P}_3(n+1) &= \mathbf{K}(n) \mathbf{K}^T(n) \overline{(\Delta\varphi(n))^2} + \mathbf{P}(n), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\overline{(\Delta\varphi(n))^2}$ следует находить статистически за несколько кадров.

Алгоритм оценивания параметров вектора $\Phi(n)$ по выражениям (1), (4) определяет структуру и параметры третьего контура управления (параметрами разложения фотоприёмной матрицы) и позволяет САУ минимизировать погрешности оценивания статистики $\varphi(t)$ как на её линейных участках, так и при скачкообразных изменениях $d\varphi(t)/dt$, реагируя на любые изменения входной величины $\varphi(t)$ изменением составляющих весовой матрицы $\mathbf{K}(n)$.

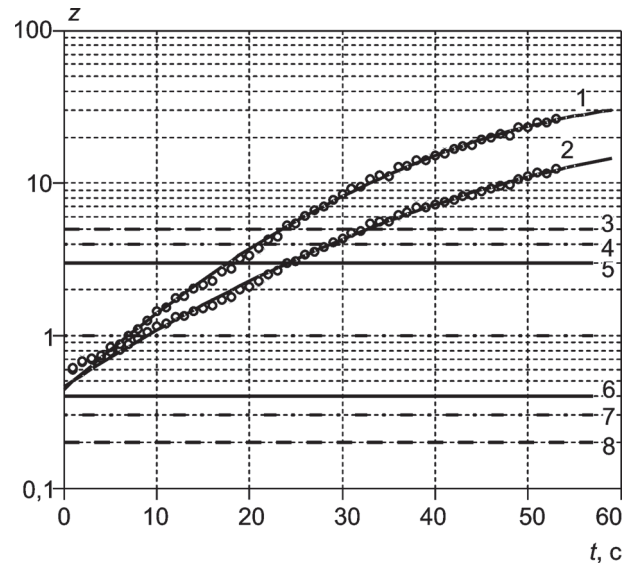


Рис. 2. Изменение статистики z в ходе относительного движения космического аппарата:

точки — эксперимент; кривые — аппроксимация; 1 — полное разрешение; 2 — бининг 2×2 ; 3, 8 — верхний и нижний пороги γ_1 ; 4, 7 — верхний и нижний пороги γ_m ; 5, 6 — верхний и нижний пороги γ_∞ .

Упрощённый вариант такой фильтрации можно реализовать с помощью нелинейного накопления, т. е. принятия решения после превышения опорной статистикой z уменьшенного порога подряд в нескольких кадрах. В этом простом случае существует оптимальное число m совместно анализируемых последовательных кадров, зависящее от текущего значения производной математического ожидания φ статистики z по времени $d\varphi(t)/dt$. Поэтому для минимизации времени нахождения системы в «неправильном» состоянии следует найти экстремум функционала

$$t_m = m + (\gamma_m - \gamma_\infty) / (d\varphi/dt) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Аналитическое решение задачи (5) возможно при явной формализации зависимости порога $\gamma_m(m)$. В аналитических функциях эта зависимость не выражается, и для оценок искомого значения оптимального числа кадров можно использовать аппроксимацию функции $\gamma_m(m)$. Численный анализ показал, что близкой аппроксимацией этой зависимости является функция $\gamma_m(m) \approx \gamma_\infty + m^{-1/4}$. Тогда, взяв производную dt_m/dm и приравняв её нулю, найдём оптимальное число m_0 кадров, в течение которых следует перемножать решения о превышении статистикой z порога γ_m :

$$m_0 \approx [4 d\varphi/dt]^{-4/5}. \quad (6)$$

Расчёт по (6) показывает, что при $d\varphi(t)/dt > 10^{-1}$ оптимальная инерционность составляет всего два кадра, а при характерной для средних дистанций наблюдения в задаче контроля стыковки КА $d\varphi(t)/dt = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ — несколько десятков кадров [7]. Для этих значений отношение порогов принятия решения о переключении параметров разложения $d_{1 \leftrightarrow 2} = 5,8 \dots 5,5$.

Выводы. Решение задачи минимизации погрешностей измерений изменяющихся во времени координат объектов при ограничении скорости считывания сигналов фотопри-

ёмных матриц позволяет найти условные оптимальные чёткость и кадровую частоту даже при их дискретно переключаемом взаимообмене. Обеспечение устойчивости САУ параметрами разложения ИС требует введения доверительного интервала при измерении статистик сигнала, превышающего минимально допустимое значение, определяемое дискретностью растра. Отношение порогов $d_{1\leftrightarrow 2}$ принятия решений об изменении параметров разложения, без флуктуаций равно четырем, при решении по одному кадру должно быть увеличено примерно до девяти. При введении в контуре управления оптимальной (2) или субоптимальной (6) инерционности, определяемой скоростью $d\varphi(t)/dt$ изменения математического ожидания φ отношения дисперсий межэлементных и межкадровых приращений, можно добиться отношения порогов $d_{1\leftrightarrow 2} = 5...6$ в актуальном диапазоне скоростей изменения φ , что обеспечит минимизацию времени нахождения системы вне зоны допустимых отклонений дисперсий измеряемых статистик от равновесия.

Литература

1. Брацлавец П. Ф., Росселевич И. А., Хромов Л. И. Космическое телевидение. М.: Связь, 1973.
2. Сагдуллаев Ю. С., Абдуллаев Д. А., Смирнов А. И. Основы телевизионного контроля процесса сближения космических аппаратов. Ташкент: Фан, 1997.

3. Бачевский С. В. Точность определения дальности и ориентации объекта методом пропорций в матричных телевизионных системах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2010. Вып. 1. С. 57—66.

4. Смирнов А. И., Ковин С. Д., Сагдуллаев Ю. С. Измерение дальности и скорости движения объектов по телевизионным изображениям // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2013. Вып. 1. С. 74—84.

5. Половко С. А., Вартанов В. Л., Козлов В. В. Помехоустойчивость телевизионно-компьютерных систем контроля сближения и стыковки космических аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2012. Вып. 1. С. 44—57.

6. Умбитаев А. А., Пятков В. В., Цыцулин А. К. Синтез прикладных телевизионных систем, адаптивных к динамике сюжета // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2015. Вып. 3. С. 88—99.

7. Умбитаев А. А., Пятков В. В., Цыцулин А. К. Статистический синтез управления телевизионной системой, адаптивной к динамике сюжета // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2016. Вып. 1. С. 3—11.

8. Пат. 2492506 РФ. Адаптивный следящий измеритель / Пятков В. В., Мелешко А. В. // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 25.

Дата принятия: 28.09.2016 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.192.4

Измерительная система для исследования дефектов пластин из сплавов с помощью сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей

С. Ф. ДМИТРИЕВ¹, А. В. ИШКОВ², А. О. КАТАСОНОВ³, Е. А. КОЛУБАЕВ⁴,
В. Н. МАЛИКОВ¹, А. М. САГАЛАКОВ¹, Л. И. ШЕВЦОВА⁵

¹ Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

² Алтайский государственный аграрный университет, Барнаул, Россия

³ ООО «НПФ «Гамма-Тест», Барнаул, Россия

⁴ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ФАНО), Томск, Россия

⁵ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия,
e-mail: osys11@gmail.com

На основе сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей разработана измерительная система для локальных исследований дефектов пластин из алюминий-магниевого сплава. Выполнена модификация фильтра Дельяна, позволяющая значительно повысить отношение сигнал—шум. Приведена зависимость отклика вихретокового преобразователя от дефектов в виде скрытых прорезей и отверстий внутри пластин при частотах 300—700 Гц сигналов возбуждающей обмотки.

Ключевые слова: сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь, алюминиевые сплавы, дефектоскопия.

The measuring system based on subminiature eddy-current transducers has been developed to carry out local investigations of aluminum-magnesium alloy plates for flaws. The Delia filter has been modified to allow the significant increase of signal-to-noise ratio. The dependence of eddy-current transducer response from the presence of flaws in alloys as hidden holes at signal frequencies comprised between 300—700 Hz on an exciting winding is presented.

Key words: subminiature eddy-current transducer, aluminum alloys, flaw detection.

Проблемы контроля качества проводящих материалов занимают важное место в современной прикладной физике и промышленном производстве. В индустриально развитых

странах общий объём расходов на контроль качества изделий составляет до 3 % стоимости выпускаемой продукции. В отраслях промышленности с повышенными требованиями