

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПЛЕНКИ ПАНОРАМНОГО АЭРОФОТОАППАРАТА

© 2007 г. А. В. Михалицын

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань

E-mail: michalic@mail.ru

Рассмотрено влияние отдельных звеньев аэрофотографической системы на качество изображения. Представлены методики определения требований к точности стабилизации скорости движения аэрофотопленики исходя из допустимого контраста изображения и определения функции передачи модуляции сдвига изображения по переходному процессу.

Коды OCIS: 110.3000, 110.4100.

Поступила в редакцию 13.11.2006.

Аэрофотографическая система должна обеспечивать выявление полезных оптических сигналов на фоне возможных помех и определение их характерных признаков, для этого она должна давать изображение требуемого качества. Для того чтобы обеспечить требуемое качество изображения, при разработке аэрофотографических систем необходимо учитывать влияние на него оптической системы, приемника излучения (в частности, аэрофотопленики), различных сдвигов, вибраций, расфокусировок, среды распространения излучения, источников излучения и самого предмета наблюдения, с точки зрения его оптических характеристик. Обобщенная аэрофотографическая система представлена на рис. 1.

Процесс прохождения информации в аэрофотографической системе (рис. 2) может быть представлен в виде последовательного соединения отдельных передаточных звеньев, влияние которых на преобразование информации является существенным. Каждое звено характеризуется своей оптической передаточной функцией. Модуль оптической передаточной функции звена, характеризующий зависимость коэффициента передачи модуляции T от пространственной частоты N , определяет функцию передачи модуляции (ФПМ или частотно-контрастная характеристика) звена аэрофотографической системы [1–3].

По определению ФПМ – отношение глубин модуляции выходного и входного сигналов синусоидальной формы, нормированное к единице на нулевой пространственной частоте, или [4]

$$T(N) = m'/m = k_{из}/k_{об}, \quad (1)$$

где m – глубина модуляции объекта, m' – глубина модуляции в изображении объекта, $k_{из}$ – контраст изображения объекта, $k_{об}$ – контраст объекта, N – пространственная частота.

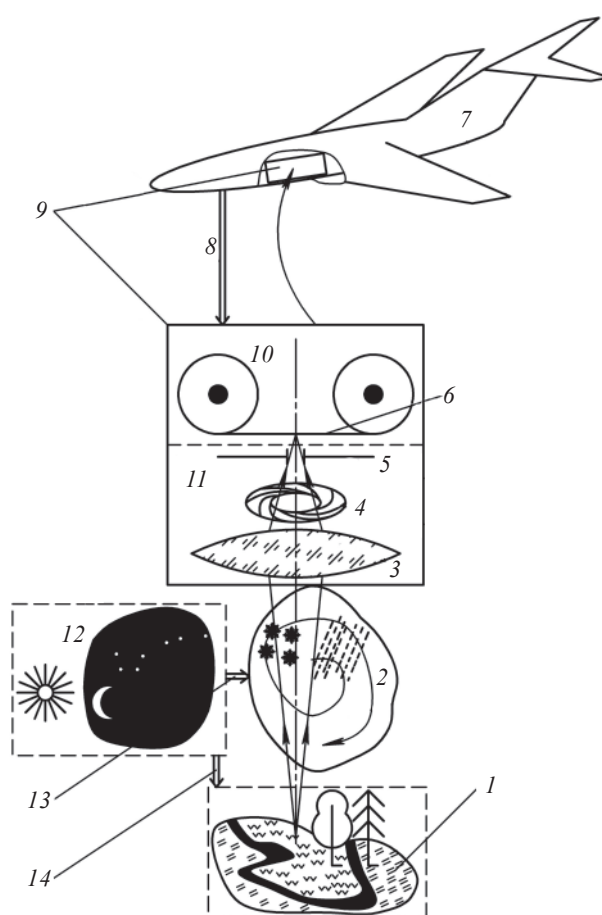


Рис. 1. Аэрофотографическая система. 1 – ландшафт, 2 – атмосфера, 3 – фотообъектив, 4 – диафрагма, 5 – фотозатвор, 6 – фотопленика, 7 – самолет (носитель), 8 – влияние самолета (носителя) на фотоаппарат, 9 – фотоаппарат, 10 – кассетная часть фотоаппарата, 11 – камерная часть фотоаппарата, 12 – источники излучения, 13 – влияние источников излучения на атмосферу, 14 – влияние источников излучения на ландшафт.

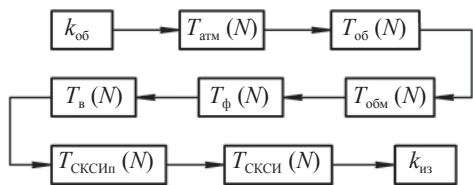


Рис. 2. Структурная схема прохождения информации в аэрофотографической системе. $k_{об}$ – контраст объекта, $k_{из}$ – контраст изображения, $T_{атм}(N)$ – ФПМ атмосферы, $T_{об}(N)$ – ФПМ объектива, $T_{обм}(N)$ – ФПМ системы аэрофотообъектив–аэрофотоматериал, $T_{ф}(N)$ – ФПМ системы фокусировки, $T_{в}(N)$ – ФПМ, учитывающая вибрации; $T_{СКСИп}(N)$ – ФПМ системы компенсации смаза изображения в направлении полета, $T_{СКСИ}(N)$ – ФПМ системы компенсации смаза изображения в направлении движения пленки, N – пространственная частота.

В то же время ФПМ аэрофотографической системы представляется как произведение ФПМ всех звеньев, существенно влияющих на качество изображения. Для панорамного аэрофотоаппарата можно выделить следующие звенья: атмосфера, фотообъектив, система фотообъектив–фотоматериал, система фокусировки, вибрация, система компенсации смаза изображения в направлении полета, система компенсации смаза изображения в направлении движения пленки. Таким образом, ФПМ аэрофотографической системы можно представить следующим образом:

$$T(N) = T_{атм}(N)T_{об}(N)T_{обм}(N)T_{ф}(N) \times T_{в}(N)T_{СКСИп}(N)T_{СКСИ}(N), \quad (2)$$

где $T_{атм}(N)$ – ФПМ атмосферы, $T_{об}(N)$ – ФПМ объектива, $T_{обм}(N)$ – ФПМ системы фотообъектив–фотоматериал, $T_{ф}(N)$ – ФПМ системы фокусировки, $T_{СКСИп}(N)$ – ФПМ системы компенсации смаза изображения в направлении полета, $T_{СКСИ}(N)$ – ФПМ системы компенсации смаза изображения в направлении движения пленки, $T_{в}(N)$ – ФПМ, учитывающая вибрации.

ФПМ атмосферы представляет собой произведение

$$T_{атм}(N) = T_{ар}(N)T_{та}(N), \quad (3)$$

где $T_{ар}(N)$ – ФПМ атмосферы, учитывающая аэрозольное рассеяние, записывается [5, 6] как

$$T_{ар}(N) = (k_{п} + k_{ф}) / (k_{п} + k_{ф} + 2k_{а}), \quad (4)$$

k – коэффициенты яркости ($п$ – предмета, $ф$ – фона, $а$ – аэрозоля); $k_{п} = \pi J_{п} / E_{з}$, $k_{ф} = \pi J_{ф} / E_{з}$, $k_{а} = \pi J_{а} / E_{з} \tau_{а}$, где J – яркость ($п$ – предмета, $ф$ – фона, $а$ – аэрозоля), $E_{з}$ – освещенность Земли, $\tau_{а}$ – коэффициент пропускания атмосферы; $T_{та}(N)$ – ФПМ атмосферы, учи-

тывающая ее турбулентность, может быть представлена в следующем виде [1, 4–6]:

$$T_{та}(N) = \exp(-2\pi^2 \sigma^2 f'^2 N^2), \quad (5)$$

σ – угловой размер линии размытия, зависящий от высоты полета и условий наблюдения ($\sigma = 2,5 \times 10^{-6}$ рад – для чистой атмосферы при наблюдении вниз с высоты менее 1700 м); f' – фокусное расстояние объектива.

ФПМ объектива может быть рассчитана следующим образом [1, 7]:

$$T_{об}(N) = T_{обд}(N)T_{обаоб}(N), \quad (6)$$

где $T_{обд}(N)$ – ФПМ идеального безабберационного объектива, учитывающая только дифракцию, $T_{обаоб}(N)$ – ФПМ объектива, учитывающая суммарное влияние aberrаций.

$$T_{обд}(N) = (2/\pi) \{ \arccos(\lambda N f' / D) - (\lambda N f' / D) [1 - (\lambda N f' / D)^2]^{1/2} \}, \quad (7)$$

$$T_{обаоб}(N) = \exp[-0,0035 D^2 \text{tg}(2\beta) / f'], \quad (8)$$

где λ – длина волны, D – диаметр входного зрачка объектива, f' – фокусное расстояние объектива, 2β – поле зрения объектива.

ФПМ системы аэрофотообъектив–аэрофотоматериал [1]

$$T_{обм}(N) = \exp(-2\pi^2 \rho^2 N^2), \quad (9)$$

где $\rho = 1,22 f' \lambda / D$.

ФПМ системы компенсации смаза изображения в направлении движения пленки для щелевого затвора [1, 5, 7]

$$T_{СКСИ}(N) = [\sin(\pi \Delta V t N)] / (\pi \Delta V t N), \quad (10)$$

где ΔV – погрешность регулировки скорости пленкопротяжного механизма, t – время экспонирования.

Учитывая особенность построения схемы панорамного аэрофотоаппарата [8, 9], для которого будет проведен расчет, а именно встречное движение аэрофотопленки и проецирующей щели, уравнение (10) запишется:

$$T_{СКСИ}(N) = [\sin(2\pi \Delta V t N)] / (2\pi \Delta V t N). \quad (11)$$

Для систем фокусировки, компенсации смаза изображения в направлении полета и возникающих вибраций в первом приближении ФПМ принимается равной величине $T_{СКСИ}(N)$. Тогда из формул (1), (2) и принятого допущения следует

$$T_{СКСИ}(N) = [k_{из} / (k_{об} T_{ар}(N) T_{та}(N) T_{обд}(N) T_{обаоб}(N) T_{обм}(N))]^{1/4}. \quad (12)$$

Исходя из того факта, что контраст изображения не должен быть меньше чем 0,08 [10], а контраст предметов на фоне Земли, таких как техника, выкрашенная в защитный цвет, при солнечном освещении на рабочей длине волны $\approx 0,3$ [10], можем вычислить по формулам (3)–(12) величину допуска на погрешность стабилизации скорости для времени экспонирования $1/200$ с и пространственной частоты системы $N = 26$ штр/мм:

$$T_{\text{та}}(N) = 0,998089, T_{\text{ар}}(N) = 0,974564,$$

$$T_{\text{обд}}(N) = 0,945181, T_{\text{обаб}}(N) = 0,357647,$$

$$T_{\text{обм}}(N) = 0,945181, T_{\text{СКСИ}}(N) = 0,968152,$$

$$\Delta V = 5,326 \times 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Следующим шагом по определению требований к точности стабилизации скорости является процесс моделирования систем управления качеством изображения панорамного аэрофотоаппарата, по результатам которого можно судить о допусках к скорости стабилизации движения пленки.

ФПМ сдвига изображения найдем, используя компьютерную имитационную модель (КИМ) совместной работы узлов пленкопротяжного механизма панорамного аэрофотоаппарата, построенную в пакете прикладных программ Simulink 4.0 приложения MatLAB 6.1. Модели отдельных узлов пленкопротяжного механизма представлены в работах [8, 9]. С помощью КИМ получены переходные процессы работы систем. Один из типовых переходных процессов отклонения скорости от стационарного режима движения пленки на экспонируемом участке представлен на рис. 3. Из графика переходного процесса видно, что на участке установившегося движения встречаются ошибки решения системы, которые возникают из-за дискретного решения.

Особенность графика переходного процесса, построенного в Simulink 4.0, такова, что он строится ломаной кривой, соединяющей точки решения, представляющие собой матрицу размерности $(2, n)$, где число n доходит до десятков тысяч, поэтому исключить точки ошибок решения вручную проблематично. Для того чтобы рассчитать ФПМ сдвига изображения в направлении движения пленки, применим следующую методику, которая реализована в m -файле сценария обработки результатов.

1. Из матрицы результатов решения исключаются значения, приходящиеся на время переходного процесса, используются только значения на интервале установившегося движения.

2. Из матрицы результатов решения устраняются значения, превышающие на 3σ среднее арифметическое значение величины ΔV в установившемся

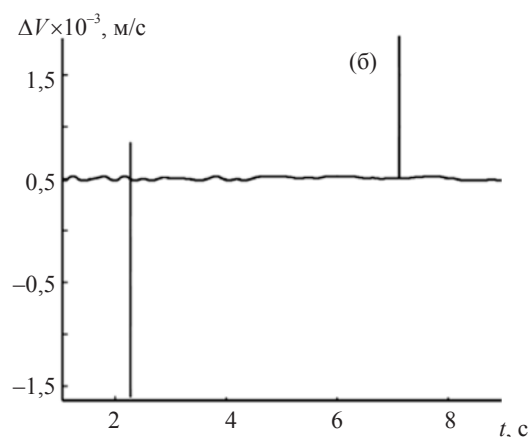
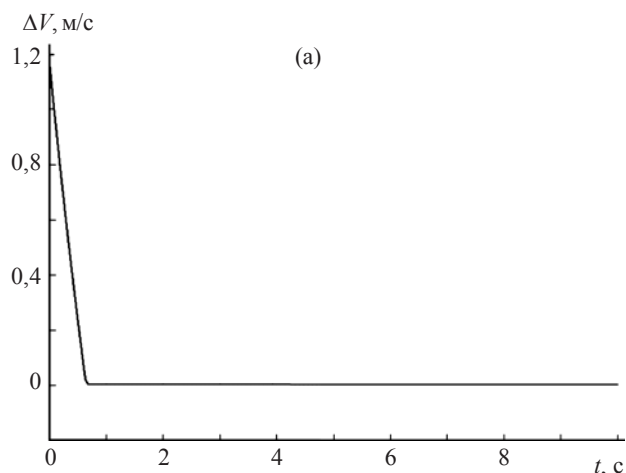


Рис. 3. Отклонение скорости движения пленки от стационарного режима: а – переходный процесс, б – установившийся режим.

движении. Среднеквадратичное значение σ определяется по формуле [11]:

$$\sigma = \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (M(2, i) - M_{\text{cp}}(2, :)) \right] / (n - 1) \right\}^{1/2},$$

где n – число точек решения, оставшихся после исключения из матрицы значений переходного процесса; $M(2, i)$ – значения второй строки матрицы решения (в MatLAB матрица значений переходного процесса представляется в виде: первая строка значения времени, вторая строка значения физической величины, для которой строится переходный процесс); $M_{\text{cp}}(2, :)$ – среднее арифметическое значение величин второй строки матрицы решения.

3. Вычисляются значения ФПМ для максимального, среднего и минимального значений отклонений скорости от стационарного режима в установившемся движении по формуле (10).

Блок-схема m -файла сценария обработки результатов представлена на рис. 4.

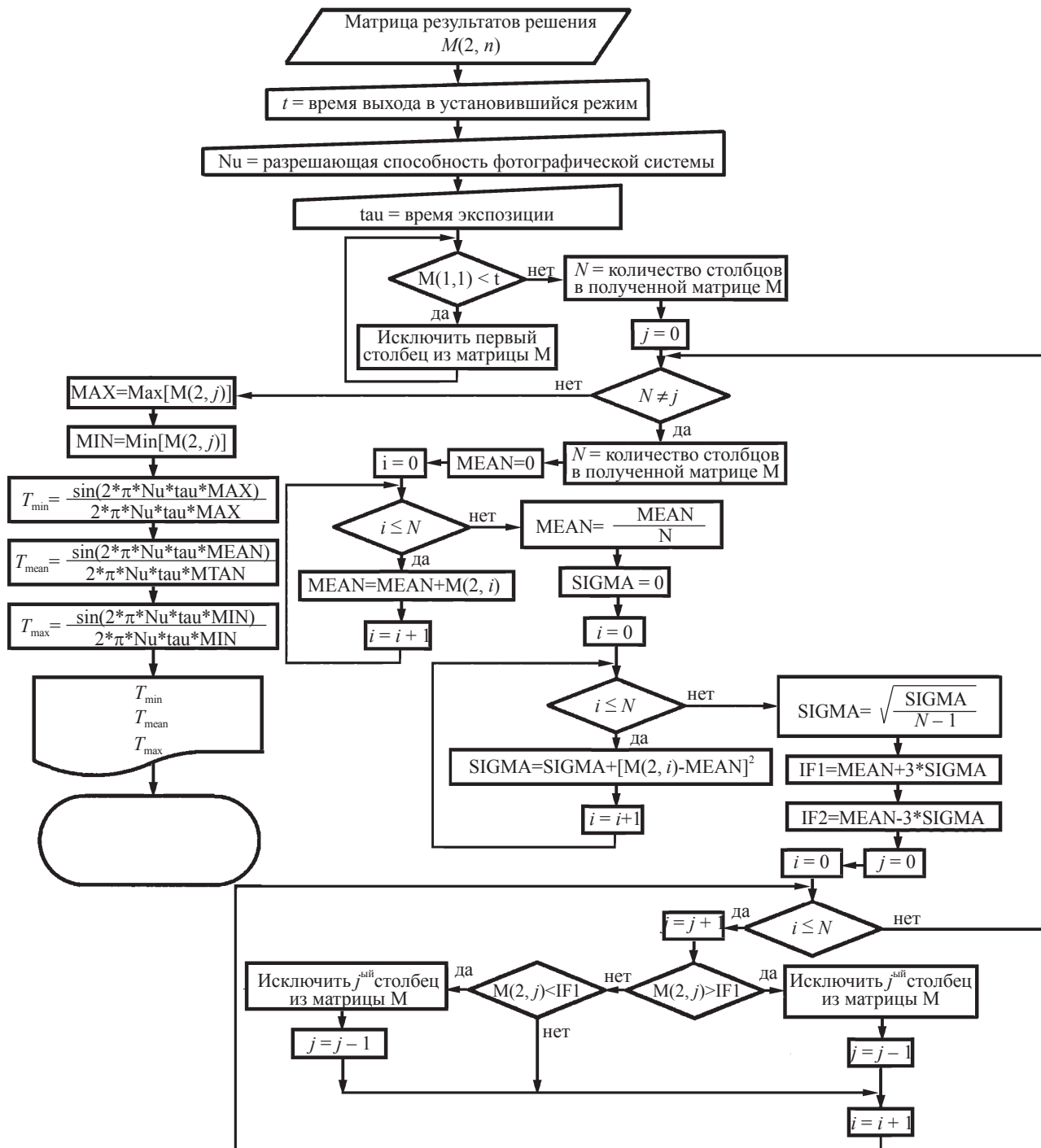


Рис. 4. Блок-схема сценария расчета функции передачи модуляции сдвига изображения.

Результатом работы m -файла будет список значений ФПМ для максимального, среднего и минимального значений отклонений скорости от стационарного режима в установившемся движении. Для переходного процесса, представленного на рис. 3, m -файл выдаст следующие значения:

$$T_{\min} = 0,9702, T_{\text{mean}} = 0,9723, T_{\max} = 0,9741.$$

Полученные результаты показывают, что смоделированная система удовлетворяет требованиям по ФПМ, представленным выше.

Заключение

Представленные материалы позволяют определить требования к скорости движения пленки па-

норамного аэрофотоаппарата на экспонируемом участке. Использование методики расчета ФПМ сдвига изображения по переходному процессу и использование представления ФПМ аэрофотографической системы как произведения ФПМ всех звеньев позволяет подходить более гибко к определению требований к точности работы систем управления качеством изображения панорамного аэрофотоаппарата. В частности, оценка ФПМ по переходному процессу и представление ФПМ как произведения ФПМ систем виброзащиты, фокусировки, компенсации смаза изображения, модели которых реализуются в пакете прикладных программ Simulink 4.0 приложения MatLAB 6.1, позволяют определять результирующую ФПМ этих систем и исследовать влияние каждой из систем на качество изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ребрин Ю.К.* Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. Киев: Типография Киевского ВВААИУ, 1988. 452 с.
2. *Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г.* Инфракрасные системы “смотрящего” типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
3. *Марешаль А., Франсон М.* Структура оптического изображения. Пер. с англ. / Под ред. Слюсарева Г.Г. М.: Мир, 1964. 295 с.
4. *Карасик В.Е., Орлов В.М.* Лазерные системы видения. Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 352 с.
5. *Мельканович А.Ф.* Фотографические средства и их эксплуатация. Издательство Министерства обороны СССР, 1984. 576 с.
6. *Москаленко Н.И.* Моделирование переноса излучения и лучистого теплообмена в атмосферах // НПО “Государственный институт прикладной оптики” (1957–1997 гг.). Научно-технический сборник / Под ред. Мирумянца С.О. 1997. Ч. 2. С. 475–503.
7. *Сокольский М.Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 221 с.
8. *Карнов А.И., Кренин В.А., Михалицын А.В.* Оценка влияния динамики системы панорамирования и систем подачи и намотки пленки с пружинными накопителями на качество изображения АФА с помощью компьютерных имитационных моделей // Оптическое общество им. Д.С. Рождественского. Сб. трудов 6-ой Межд. конференции “Прикладная оптика”. Том 3. Компьютерные технологии в оптике. СПб., 2004. С. 125–129.
9. *Карнов А.И., Кренин В.А., Михалицын А.В., Молин Д.А., Непогодин А.А., Фазылызов Р.Ф.* Исследование динамики систем панорамирования АФА и стабилизации скорости движения фотопленки с пружинными накопителями // Труды Всероссийской научно-практической конференции “Авиакосмические технологии и оборудование”. Казань, 2004. С. 547–553.
10. *Орлов В.А., Петров В.И.* Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. М.: Воениздат, 1989. 254 с.
11. *Пискунов Н.С.* Дифференциальное и интегральное исчисления: Учеб. для втузов. В 2-х т. Т. 2. М.: Интеграл-Пресс, 2002. 544 с.