

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Красильников А. В., Красильников Р. В. Моделирование процесса отделения необитаемого подводного аппарата от надводного носителя 5
- Денисов А. В., Бемянский М. А. Особенности моделирования случайно-неоднородной ионосферы в задаче о распространении радиоволн в околоземном пространстве 13

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Арсеньев В. Н., Булекбаев Д. А., Силантьев С. Б. Метод коррекции координат точки прицеливания ракеты космического назначения 18
- Аверьянов А. В., Барановский А. М., Эсаулов К. А. Определение пределов аппаратной избыточности информационных управляющих систем 23
- Лисов О. И., Чжо Зо Е, Пайе Тэйн Наинг. Методика оптимизации управления технологическими процессами распределенных систем 26
- Буйносов А. П., Стаценко К. А., Кислицын А. М. Автоматическая измерительная система для контроля геометрических параметров колесных пар локомотивов..... 31

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Непомнящий О. В., Хабаров В. А., Рыженко И. Н., Комаров А. А. Методы и средства определения частотной ошибки сигнала спутниковой связи в режиме реального времени 35

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Авдеев В. А., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Герасименко И. С., Добриков В. А., Иванов В. Ф., Козлов А. В., Сахно И. В., Симонов А. Б., Ткачев Е. А. Программный прием и обработка сигналов навигационной системы "Compass" 40

ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

- Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Поляризатор для эффективного намагничивания текущей жидкости 44

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Передельский Г. И. Мостовые цепи с импульсным питанием и уравниванием заземленными регулируруемыми элементами 50

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Андреев Л. Н., Ежова В. В., Дегтярева Г. С. Модульное проектирование оптических систем.....	57
Борзов С. М., Потатуркин О. И. Алгоритм выделения малоразмерных объектов на основе поиска пространственных аномалий для тепловизионных систем наблюдения.....	63
Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Реализация современного количественного теневого метода.....	68
Липатов А. Н., Экономов А. П., Макаров В. С., Захаркин Г. В., Богачев Д. Л., Румянцев Д. М., Антоненко С. А. Камера-спектрометр для исследований минералогического состава грунта.....	73
Трофимов В. А., Нагибин Ю. Т., Прокопенко В. Т., Уразгалиев В. Т. Исследование масштаба изображений проекционной картины эллипса поляризации света...	78
SUMMARY (<i>перевод Ю. И. Копилевича</i>).....	83

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Krasilnikov A. V., Krasilnikov R. V.** Simulation of Unmanned Underwater Vehicle Separation from Surface Carrier 5
- Denisov A. V., Belyansky M. A.** Peculiarities of Modelling of Randomly Inhomogeneous Ionosphere in the Problem of Radiowave Propagation in the Near-Earth Space 13

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Arsenyev V. N., Bulekbaev D. A., Silantyev S. B.** Coordinates Correction Method for Aiming Mark of Space Rocket 18
- Averianov A. V., Baranovsky A. M., Esaulov K. A.** Determination of Hardware Redundancy Limits of Information Control Systems 23
- Lisov O. I., Kyaw Zaw Ye, Pyae Thein Naing.** Optimization of Control over Technological Processes in Distributed Systems 26
- Buinosov A. P., Statsenko K. A., Kislitsyn A. M.** Automatic Measuring System for Control over Geometrical Parameters of Locomotive Wheel Pairs 31

COMPUTING TECHNIQUE

- Nepomnyashchy O. V., Habarov V. A., Ryzhenko I. N., Komarov A. A.** Methods and Means for Real-Time Estimation of Frequency Offset in Satellite Communication 35

GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

- Avdeev V. A., Bakholdin V. S., Gavrilov D. A., Gerasimenko I. S., Dobrikov V. A., Ivanov V. F., Kozlov A. V., Sakhno I. V., Simonov A. B., Tkachev E. A.** Program Receiving and Processing of Signals in Navigation System "Compass" 40

FINE MECHANICS DEVICES

- Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Yu.** Polarizer for Effective Magnetization of Flowing Liquid 44

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Peredelsky G. I.** Bridge Circuits with Pulse Supply and Balancing with Earthed Tunable Elements 50

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Andreev L. N., Ezhova V. V., Degtyareva G. S.** Modular Design of Optical Systems 57
- Borzov S. M., Potaturkin O. I.** Algorithm of Small-Sized Objects Detection with Thermovision Observing System Based on Localization of Spatial Anomalies 63

Zatsepina M. E., Kirillovsky V. K. Development of Modern Quantitative Shadow Method	68
Lipatov A. N., Ekonomov A. P., Makarov V. S., Zakharkin G. V., Bogachev D. L., Rumyantsev D. M., Antonenko S. A. Camera-Spectrometer for Research in Mineralogical Composition of Soil	73
Trofimov V. A., Nagibin Yu. T., Prokopenko V. T., Urazgaliev V. T. Scale Study of Projection Image of Polarization Ellipse	78
SUMMARY	83

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ, Р. В. КРАСИЛЬНИКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ОТ НАДВОДНОГО НОСИТЕЛЯ

Представлена математическая модель процесса траверзного пуска необитаемых подводных аппаратов, применяемых, в том числе, в целях исследования Мирового океана. Приведены результаты моделирования и сформулированы рекомендации по общему проектированию пускового комплекса.

Ключевые слова: необитаемые подводные аппараты, траверзный пуск, системный подход к проектированию, математическая модель.

Проектирование пускового комплекса. Способ траверзного группового отделения необитаемых подводных аппаратов (НПА) от надводного судна реализуется с помощью устройства, разработанного с участием авторов настоящей статьи [см. лит.]. Основу такой пусковой системы составляет стандартный 40-футовый контейнер, в котором располагаются касеты с НПА. Для пуска НПА с использованием гидравлической системы осуществляется наклон контейнера на определенный угол, после чего производится освобождение НПА от удерживающих захватов, что приводит к их отделению от носителя.

Одним из ключевых моментов при проектировании такого комплекса механизмов, как пусковая система, является системный подход к его созданию. В рассматриваемом случае системный подход к проблеме отделения необитаемых подводных аппаратов от надводного носителя базируется на комплексном анализе взаимосвязей в единой системе „корабль — контейнер — НПА“, функционирующей в заданных условиях эксплуатации. Рассмотрим указанные взаимосвязи более подробно.

Взаимосвязи „НПА — корабль“. Большинство необитаемых подводных аппаратов имеют ограниченный радиус действия, напрямую связанный с запасом энергии устройства. Именно поэтому для первоначальной доставки НПА в рабочий район используется надводный носитель. Для выполнения поставленной задачи НПА необходимо принять на корабль, закрепить на направляющих дорожках, а также обеспечить их штатное обслуживание в походе (проверку состояния энергетике и аппаратуры, пополнения энергоресурсов и т. д.) и подготовку (прежде всего, ввод программы работы устройств и приборов) к применению.

Взаимосвязи „контейнер — корабль“. Как отмечалось выше, контейнерное устройство предназначено для отделения НПА от носителя. Работа устройств и приборов контейнера требует соответствующего обеспечения надводного носителя гидравликой, электропитанием и т.д. Например, судно-носитель предназначено для транспортировки 40-футовых контейнеров международного класса и оснащено соответствующими гнездами для их крепления. Эти гнезда используются для размещения и крепления переходного блока, включающего устройства

для установки контейнера в наклонное положение, при котором обеспечивается последовательный и безопасный пуск НПА.

Взаимосвязи „контейнер — НПА“. Для повышения эффективности работы комплекса количество НПА в одном контейнере должно быть максимальным, т.е. кассета, вставляемая в контейнер, должна иметь соответствующее количество пусковых блоков, образованных направляющими. Каждый блок должен обеспечивать продольную и поперечную фиксацию аппарата при его хранении и транспортировке в подготовленном виде. Стопор продольной фиксации должен надежно удерживать НПА при наклонном положении контейнера. При этом механизм освобождения НПА от стопора должен быть дистанционным. Кроме того, каждый пусковой блок должен обеспечивать безопасное отделение НПА от носителя. Под безопасностью в данном случае понимается следующее:

— для аппарата (после полного выхода из контейнера) — успешное приводнение с сохранением работоспособности всех его систем;

— для носителя — исключение несанкционированных соударений с корпусом корабля при качке с удалением места приводнения аппарата (точки входа головной его части в воду) от борта судна не менее чем на 5 м (для исключения „присоса“ НПА к плоскости борта).

Кассета с расположенными в ней НПА также должна быть надежно зафиксирована во внутреннем объеме контейнера с учетом ходовых вибраций и качки корабля.

Такие жесткие требования к контейнеру обуславливают целесообразность предварительного снаряжения и подготовки НПА в наземных условиях с их погрузкой в заранее доставленные контейнеры.

Несомненно также, что требования к контейнерным устройствам должны быть сформированы с учетом всех неблагоприятных факторов (влияния внешней среды и погодных условий). При этом основным фактором, негативно влияющим на процесс отделения НПА от носителя, является волнение моря.

С учетом приведенных соображений была разработана математическая модель, описывающая процесс отделения НПА от носителя при регулярном волнении.

Математическая модель. При составлении модели рассматривался случай траверзного пуска НПА при бортовой качке. Для выявления основных закономерностей, характеризующих наклонный траверзный пуск длинномерного калиброванного по диаметру аппарата, продольная и килевая качки в первом приближении не учитывались.

Особенностью конструктивного решения рассматриваемой системы является наличие поворотного ролика, установленного на максимальном удалении (с учетом расположения в транспортном контейнере) от удерживаемого на стопоре НПА. Изменение контактных реакций при движении НПА по направляющей дорожке к поворотному ролику способствует снижению сил механического трения (от скольжения к качению) и тем самым увеличению скорости выхода НПА из контейнера и приводнению его вне потока, создаваемого движением судна, что должно исключить „присоса“ аппарата к борту и соприкосновение с носителем. Как отмечалось выше, расстояние от борта до места приводнения должно быть не менее 5 м.

В этих условиях при отделении НПА от судна-носителя могут быть выделены два этапа движения аппарата.

Первый этап движения. На этом этапе НПА перемещается по наклонной направляющей под действием движущей силы, являющейся проекцией силы тяжести на продольную ось НПА. Движение считается однонаправленным (вдоль направляющих) и безотрывным. Этап заканчивается, когда центр тяжести аппарата выходит за пределы оси поворотного ролика (линию опоры). При этом угловая скорость ω НПА в вертикальной плоскости его движения будет соответствовать угловой скорости Ω_n бортовой качки носителя, а начальный угол θ_1 дифферента НПА — наклону направляющей дорожки в этот момент времени.

Гравитационные волны, вызванные ветром, преобладают в открытых акваториях. Для корабля они являются основным постоянно действующим возмущением. При бортовой качке судно-носитель поворачивается на угол крена относительно центра тяжести, поэтому неподвижную систему координат ξ — η свяжем с точкой G — центром тяжести судна. Важным критерием остойчивости судна является метацентрическая высота h . Будем считать, что подъем контейнера незначительно влияет на положение центра тяжести корабля и параметры его качки.

На рис. 1 приведена схема корпуса судна и изменения его положения при бортовой качке; здесь θ_0 — угол подъема контейнера; R_p — радиус-вектор поворотного ролика; M — метациентр; r — радиус кривой, по которой смещается центр величины; C — центр величины.

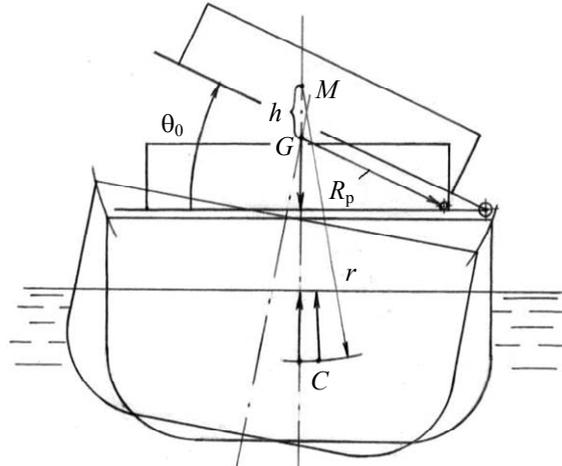


Рис. 1

При расчете бортовая качка принималась регулярной. Угол Θ_n крена корабля изменяется по синусоидальному закону:

$$\Theta_n = \Delta_n \sin(vt + \Theta_{n0}),$$

где Δ_n — угловая амплитуда качки судна; $v = 2\pi/T$ — частота бортовой качки; T — период качки; Θ_{n0} — угол крена корабля в момент начала движения НПА при пуске; t — текущее время.

Тогда угловая скорость Ω_n бортовой качки корабля будет определяться выражением

$$\Omega_n = v\Delta_n \cos(vt + \Theta_{n0}),$$

а начальное ее значение в момент начала движения НПА будет равно

$$\Omega_n = v\Delta_n \cos \Theta_{n0}.$$

Обозначим начальный угол по часовой стрелке радиус-вектора поворотного ролика R_p как θ_{p0} . Тогда при $\Theta_{n0} = 0$ начальные координаты оси ролика

$$\xi_{p0} = R_p \cos \theta_{p0}, \quad \eta_{p0} = R_p \sin \theta_{p0};$$

при качке текущие значения этих координат определяются как

$$\theta_p = \theta_{p0} + \Theta_n; \quad \xi_p = R_p \cos \theta_p, \quad \eta_p = R_p \sin \theta_p.$$

Одним из важнейших параметров при отделении НПА является высота борта судна-носителя. Так как в условиях качки она переменна, целесообразно ввести величину H_G — высоту центра тяжести судна над уровнем спокойной воды. В этом случае расстояние от оси ролика до уровня спокойной воды рассчитывается по формуле

$$l = H_G - \eta_p.$$

Схема начального положения аппарата на направляющей дорожке приведена на рис. 2, где $\theta_0 + \Theta_n$ — текущее угловое положение наклонной направляющей дорожки; a — положение центра тяжести от носовой оконечности изделия; b — расстояние от начального положения

носовой оконечности аппарата до конца направляющей дорожки; c — расстояние от конца дорожки до центра ролика; A — центр масс аппарата; mg — сила тяжести; F_d — сила контакта НПА с дорожкой; $F_{дв}$ — движущая сила; $F_{тр}$ — сила механического трения аппарата о дорожку.

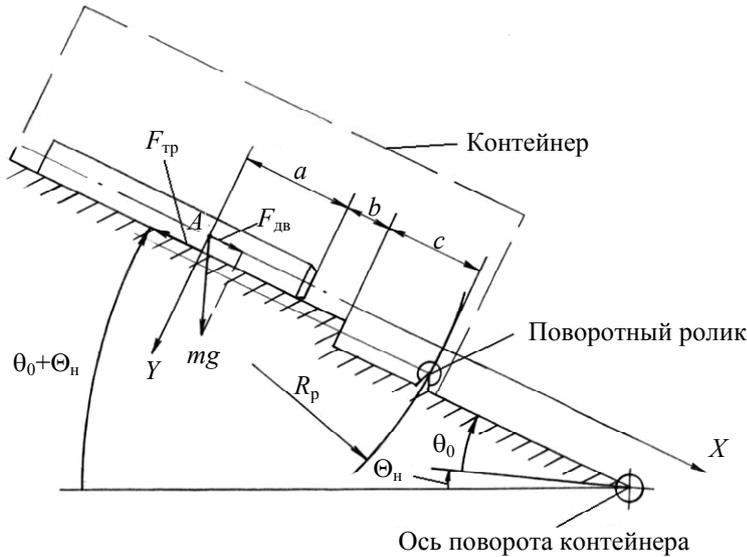


Рис. 2

На первой стадии первого этапа движения ($X \leq b + c$) можно записать общеизвестные соотношения при движении тела по наклонной плоскости:

$$F_d = mg \cos(\theta_0 + \Theta_n) + F_k;$$

$$F_{дв} = mg \sin(\theta_0 + \Theta_n);$$

$$F_{тр} = \mu_1 F_d,$$

где F_k — сила Кориолиса; μ_1 — коэффициент трения материала корпуса аппарата о направляющую дорожку.

Расчетная схема для второй стадии первого этапа движения НПА ($b + c < X \leq a + b + c$) приведена на рис. 3, здесь F_p — сила контакта НПА с роликом, V — скорость НПА.

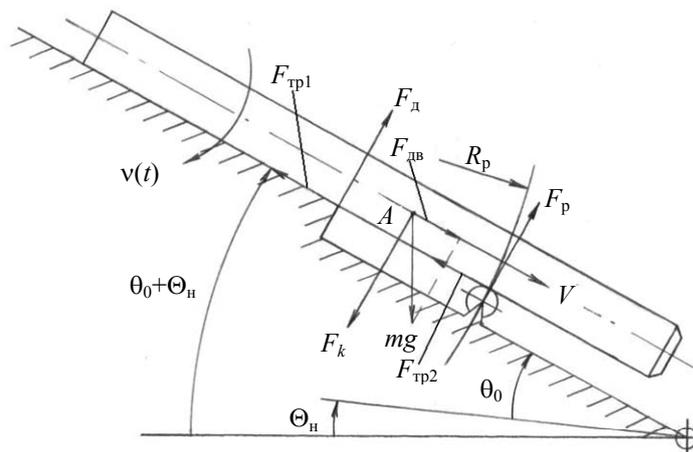


Рис. 3

На основе приведенных зависимостей сформирована расчетная модель первого этапа движения. Силы, действующие на аппарат, определяются выражениями

$$F_d = mg \cos(\theta_0 + \Theta_n) + F_k - F_p;$$

$$F_{дв} = mg \sin(\theta_0 + \Theta_n);$$

$$F_{тр1} = \mu_1 F_d; \quad F_{тр2} = \mu_2 F_p;$$

$$F_k = 2m\Omega_H V,$$

где μ_2 — коэффициент трения качения, m — масса НПА; при этом

$$F_p = 0, \text{ если } X \leq (a + b);$$

$$F_p = (X - a) [mg \cos(\theta_0 + \Theta_H) + F_k] / (b + c), \text{ если } X > (a + b).$$

С учетом приведенных соотношений система дифференциальных уравнений примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{1}{m} (F_{дв} - F_{тр1} - F_{тр2}), \\ \frac{dX}{dt} &= V. \end{aligned} \right\}$$

Второй этап движения. Основным допущением, принимаемым при рассмотрении второго этапа движения НПА, является предположение о его безотрывном от ролика поступательно-вращательном движении. Под действием моментов силы тяжести НПА и силы Кориолиса относительно поворотного ролика формируется угловая скорость ω НПА в вертикальной плоскости. По окончании контакта аппарата с роликом угловая скорость изменяться не будет, что определяет угол $\theta_{пр}$ его дифферента при приводнении.

Для второго этапа движения аппарата справедливы следующие расчетные соотношения:

— начальное положение центра опорного ролика при известном крене Θ_H судна:

$$\xi_{p1} = R_p \cos(\theta_{p0} + \Theta_H), \quad \eta_{p1} = R_p \sin(\theta_{p0} + \Theta_H);$$

— начальное положение центра тяжести НПА (точка A):

$$\xi_{A1} = \xi_{p1} + \left(r_p + \frac{d}{2}\right) \sin(\theta_0 + \Theta_H), \quad \eta_{A1} = \eta_{p1} - \left(r_p + \frac{d}{2}\right) \cos(\theta_0 + \Theta_H),$$

где d — диаметр калиброванной части аппарата; r_p — радиус ролика.

Проекции вектора скорости V НПА (определяемого по результатам моделирования движения изделия на первом этапе расчета) на оси неподвижной системы координат определяются как

$$V_\xi = V \cos(\theta_0 + \Theta_H), \quad V_\eta = V \sin(\theta_0 + \Theta_H).$$

Расчетная схема для второго этапа движения аппарата приведена на рис. 4, где α — угол атаки; K — точка, расположенная на носовой оконечности аппарата; θ — угол, образованный горизонтальной плоскостью и продольной осью НПА.

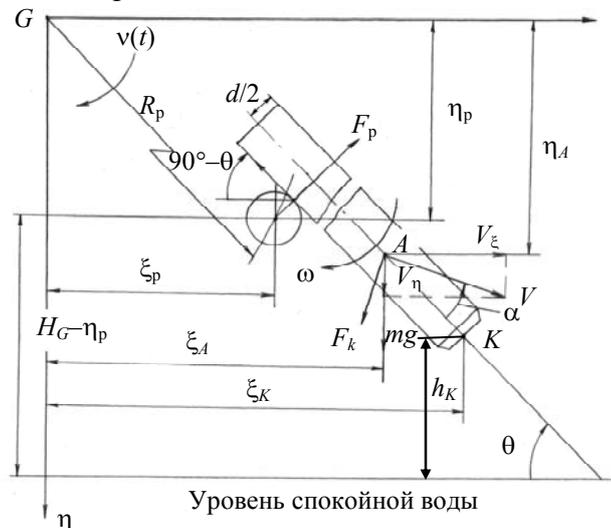


Рис. 4

Силы, действующие на аппарат, определяются выражениями

$$\begin{aligned} F_k &= 2\omega m V; \\ F_p &= mg \cos \theta + F_k \cos \alpha; \\ F_{тр} &= \mu_1 F_p. \end{aligned}$$

Соотношения, необходимые для составления математической модели (см. рис. 4):

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V_\xi^2 + V_\eta^2}; \\ \beta_V &= \arcsin(V_\eta/V); \\ \alpha &= \theta - \beta_V; \\ q &= \sqrt{(\eta_A - \eta_p)^2 + (\xi_A - \xi_p)^2 - \left(r_p + \frac{d}{2}\right)^2}; \\ h_n &= H_G - \eta_p + \left(r_p + \frac{d}{2}\right) \sin \theta, \\ h_K &= h_n - (q + a) \sin \theta. \end{aligned}$$

С учетом приведенных соотношений система дифференциальных уравнений примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dV_\xi}{dt} &= \frac{1}{m} (F_p \cos \theta - F_{тр} \sin \theta - F_k \sin \beta_V); \\ \frac{dV_\eta}{dt} &= \frac{1}{m} (mg + F_k \cos \beta_V - F_p \sin \theta - F_{тр} \cos \theta); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left(F_p q + F_{тр} \frac{d}{2} \right); \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega; \quad \frac{d\xi_A}{dt} = V_\xi; \quad \frac{d\eta_A}{dt} = V_\eta. \end{aligned}$$

Моделирование прекращается при $h_K = 0$ (начало приводнения НПА).

С помощью представленной математической модели был проведен ряд исследований.

Результаты исследований.

Исследование процесса приводнения НПА при изменении крена судна. Зависимость угла наклона носителя и его угловой скорости от фазового смещения угла качки γ в момент начала движения показана на рис. 5.



Рис. 5

Результаты исследования при основных углах подъема контейнера $\theta_0 = 24^\circ$ и $\theta_0 = 30^\circ$ (выбранных по результатам моделирования и экспериментов) приведены в табл. 1 и 2 соответственно, где приняты следующие обозначения: V_1 — скорость НПА при отделении от ро-

лика; $V_{пр}$ — скорость НПА при приводнении; $t_{пр}$ — время от момента начала движения НПА до его приводнения; $\theta_{пр}$ — угол между продольной осью НПА и поверхностью воды в момент приводнения; $\alpha_{пр}$ — значение угла атаки в момент приводнения НПА; $\omega_{пр}$ — угловая скорость НПА в момент приводнения; N — расстояние от борта корабля до точки приводнения. Значения параметров, представленные в таблицах, получены при следующих условиях: $H_G = 8$ м, $R_p = 6,1$ м, $T = 18$ с.

Таблица 1

Параметр	$\gamma = 0$	$\gamma = \pi/2$	$\gamma = \pi$	$\gamma = 3\pi/2$
V_1 , м/с	5,69	6,13	3,52	4,35
$V_{пр}$, м/с	10,79	11,56	17,55	11,03
$t_{пр}$, с	3,61	3,13	4,84	6,05
$\theta_{пр}$, ...°	54,60	55,38	74,55	61,27
$\alpha_{пр}$, ...°	-34,84	-34,30	-11,35	-13,60
$\omega_{пр}$, рад/с	1,28	1,12	1,97	1,75
N , м	4,94	5,01	2,41	3,89

Таблица 2

Параметр	$\gamma = 0$	$\gamma = \pi/2$	$\gamma = \pi$	$\gamma = 3\pi/2$
V_1 , м/с	6,68	7,14	5,55	5,24
$V_{пр}$, м/с	11,16	11,66	12,91	11,78
$t_{пр}$, с	2,92	2,60	3,31	3,91
$\theta_{пр}$, ...°	55,59	54,20	63,29	61,6
$\alpha_{пр}$, ...°	-30,23	-26,90	-10,77	-13,87
$\omega_{пр}$, рад/с	1,12	0,88	1,38	1,54
N , м	4,86	5,10	4,01	4,07

Так как значение N при $\theta_0 = 30^\circ$ и $\gamma = \pi/2$ мало отличается от аналогичного значения, получаемого при $\theta_0 = 24^\circ$, было принято решение о выборе угла подъема контейнера $\theta_0 = 24^\circ$ в качестве базового (в связи с меньшей величиной возвышения контейнера над палубой судна, а следовательно, меньшим влиянием на его остойчивость).

Исследование процесса приводнения НПА при изменении высоты борта судна. В качестве относительного критерия, который характеризует высоту борта носителя, была принята H_G — высота центра тяжести носителя над уровнем спокойной воды. С изменением высоты H_G изменяется осадка судна-носителя, а следовательно, и высота борта. Исследование проводилось для угла $\theta_0 = 24^\circ$. Высота H_G варьировалась в пределах от 7 до 4,5 м. Результаты исследования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	$H_G=7,0$	$H_G=6,0$	$H_G=5,0$	$H_G=4,5$
V_1 , м/с	6,13	6,13	6,13	6,13
$V_{пр}$, м/с	10,78	9,95	9,05	8,77
$t_{пр}$, с	3,05	2,96	2,85	2,81
$\theta_{пр}$, ...°	50,25	44,61	37,69	34,90
$\alpha_{пр}$, ...°	-29,48	-22,48	-12,23	-7,45
$\omega_{пр}$, рад/с	1,11	1,11	1,11	1,11
N , м	5,21	5,22	5,04	4,90

Исследование процесса приводнения НПА при изменении коэффициента μ_1 трения аппарата о направляющую дорожку. Изменение коэффициента μ_1 влияет на выходные параметры движения аппарата по окончании первого этапа отделения: изменяются величины действующих на аппарат сил, скорость движения, время окончания первого этапа. В соответствии с изменением параметров движения НПА на первом этапе изменяются и параметры его приводнения. Исследование проводилось для угла $\theta_0 = 24^\circ$. Значение коэффициента μ_1 варьировалось в пределах от 0,3 до 0,1 (расчетные данные для разных материалов направляющей

дорожки). На практике данная величина будет зависеть от материалов дорожки и корпуса НПА, качества обработки их поверхностей, наличия смазки между дорожкой и корпусом, а также ряда других факторов. Результаты исследования представлены в табл. 4 (при условиях, заданных для табл. 1, 2).

Таблица 4

Параметр	$\mu_1=0,3$	$\mu_1=0,2$	$\mu_1=0,1$
V_1 , м/с	6,13	6,92	7,51
$V_{пр}$, м/с	11,56	11,85	12,21
$t_{пр}$, с	3,13	2,69	2,39
$\theta_{пр}$, ...°	55,38	54,08	52,95
$\alpha_{пр}$, ...°	-34,30	-32,50	-30,93
$\omega_{пр}$, рад/с	1,12	1,14	1,11
N , м	5,01	5,13	5,66

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о возможности достижения параметров, необходимых для безопасного отделения аппаратов от надводного носителя с учетом воздействующего на носитель регулярного волнения. Представленная математическая модель позволяет производить проверку правильности выбора параметров проектируемого пускового комплекса, а также может быть полезна при создании и отработке опытного образца системы натурального масштаба.

ЛИТЕРАТУРА

Пат. 2372575 РФ, МПК F41F 5/04. Миносбрасывающий комплекс для надводного судна / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников, И. А. Шавырин // Оpubл. 10.11.09. Бюл. № 31.

Сведения об авторах

- Антон Валентинович Красильников** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, научно-исследовательский сектор перспективных энергетических установок, ст. науч. сотрудник;
E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru
- Роман Валентинович Красильников** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, научно-исследовательский сектор перспективных энергетических установок, ст. науч. сотрудник;
E-mail: r.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
05.07.13 г.

А. В. ДЕНИСОВ, М. А. БЕЛЯНСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ЗАДАЧЕ О РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

На основе канонического разложения Пугачева рассмотрена задача моделирования случайно-неоднородной составляющей одномерного ионосферного профиля электронной концентрации. В предположении, что случайное поле флуктуаций электронной концентрации нормально и стационарно, выбраны автокорреляционные функции для разных областей экваториальной ионосферы и получены характеристики случайных коэффициентов разложения.

Ключевые слова: случайные поля, моделирование неоднородностей ионосферы.

Введение. Для решения задач навигации и обеспечения дальней радиосвязи расчет радиополей необходимо осуществлять на протяжении всей трассы распространения радиоволн. На радиополя источников в приземном волноводном канале большое влияние оказывает состояние нижних слоев ионосферы, которая характеризуется концентрацией электронов $N_e(z)$ и эффективной частотой $\nu_{ij}(z)$ соударения составляющих ионосферу частиц, здесь z — расстояние от поверхности Земли.

Детерминированная модель ионосферы используется как при моделировании процессов распространения радиоволн в двумерно-нерегулярных сферических волноводных каналах [1, 2], так и при рассмотрении трехмерных крупномасштабных неоднородностей [3, 4].

Представим одномерную концентрацию электронов в ионосфере выражением

$$N_e(s) = N_e^{(0)}(s) + N_e^{(r)}(s),$$

где $N_e^{(0)}(s)$ — регулярная составляющая, $N_e^{(r)}(s)$ — случайная составляющая, $s = z/l$ — безразмерная переменная, l — характерный масштаб элементарной неоднородности.

Аналитическое задание случайной составляющей $N_e^{(r)}(s)$, на которую влияет множество факторов, не представляется возможным. В ограниченных пространственно-временных масштабах можно использовать стационарные модели. При допущении, что случайная составляющая профиля является нормальным стационарным случайным полем, достигается компромисс между достоверностью модели и ее сложностью.

Отметим, что в данном случае рассматривается дискретно-слоистая среда, размер каждого случайно выбранного слоя которой $l \ll 30$ км.

Моделирование случайного поля. При моделировании стационарного случайного поля $N_e^{(r)}(s)$ задается либо его спектральная плотность, либо автокорреляционная функция (АКФ), которые связаны между собой взаимным преобразованием Фурье (по теореме Винера — Хинчина).

Спектральная плотность задается на основе априорной информации, обусловленной различными факторами, влияющими на образование неоднородностей в ионосфере: в основном это акустико-гравитационные волны [5], метеоритные дожди, ионно-рекомбинационные процессы, землетрясения, терминатор, антропогенное воздействие, старты космических аппаратов, подземные, наземные и воздушные взрывы, эксперименты по высокочастотному нагреву ионосферы [6].

Ионосферу принято разделять на верхнюю (100—500 км от поверхности Земли) и нижнюю (50—100 км) области. В нижней области ионосферы преобладают мелкомасштабные неоднородности турбулентного характера. Как показывают расчеты [7], такое условное разделение связано с тем, что на высоте, превышающей примерно 100 км, для дневного состояния $N_e(z)$ ионосферы выполняются соотношения квазипродольной аппроксимации электромагнитных полей приземных источников; для ночного состояния эта высота составляет примерно 150 км.

В задачах распространения радиоволн СДВ-диапазона наибольший интерес представляют размеры области, существенной для отражения электромагнитных полей [8]; ее размер в дневных условиях составляет примерно 20—30 км от границы ионосферы [9], что соответствует нижней области ионосферы и в дневном, и в ночном состоянии.

Обратимся сначала к простому случаю, когда неоднородности крупномасштабные и описываются случайными полями. Это соответствует верхней области ионосферы, где турбулентность отсутствует. Рассмотрим следующую модель автокорреляционной функции:

$$K(s) = \sigma^2 \left(\frac{\sin(\Omega s)}{\Omega s} \right)^\rho \cos(\beta s), \quad s \in (-\infty; +\infty), \quad \rho = 2, \rho = 3, \quad (1)$$

где σ^2 — дисперсия; Ω — параметр, характеризующий случайное поле; β — преобладающая гармоника.

Для нижней области ионосферы, где турбулентность существенна, а следовательно, неоднородности носят мелкомасштабный характер, случайное поле описывается более сложной функцией, состоящей из суперпозиции двух АКФ вида (1):

$$K(s) = \sigma^2 \left[C_1 \left(\frac{\sin(\Omega s)}{\Omega s} \right)^\rho \cos(\beta s) + C_2 \left(\frac{\sin(2\Omega s)}{2\Omega s} \right)^\rho \cos(2\beta s) \right], \quad (2)$$

$$s \in (-\infty; +\infty), \quad \rho = 2, \rho = 3.$$

Будем считать, что вне области $(-\pi/\Omega; +\pi/\Omega)$ АКФ (1) и (2) обращаются в нуль. Тогда, периодически продолжая АКФ на остальной оси, получаем периодическую в среднеквадратическом смысле функцию с периодом $L = 2\pi/\Omega$, которую можно разложить в ряд Фурье:

$$K(s) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi s}{L}\right) + a_2 \cos\left(\frac{2\pi 2s}{L}\right) + \dots \quad (3)$$

Разложение АКФ в ряд Фурье соответствует каноническому разложению случайного поля флуктуаций [10]: $N_e^{(r)}(s) = N_e^{(0)} X(s)$, где

$$X(s) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{2\pi s}{L}\right) + B_1 \sin\left(\frac{2\pi s}{L}\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi 2s}{L}\right) + \dots, \quad (4)$$

здесь A_i, B_k — некоррелированные между собой случайные величины, распределенные по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и значениями дисперсий a_i, a_k , которые определены разложением в ряд (3).

Для верхней области ионосферы эти коэффициенты определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2\sigma^2}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin x}{x} \right)^\rho \cos\left(\frac{x}{q}\right) dx, \quad q \equiv \Omega/\beta; \\ a_k &= \frac{2\sigma^2}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin x}{x} \right)^\rho \cos\left(\frac{x}{q}\right) \cos(kx) dx, \quad q \equiv \Omega/\beta. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Мелкомасштабность неоднородностей нижней области ионосферы находит свое математическое выражение в том, что членов ряда в каноническом разложении Пугачева [10] больше, чем в случае, определяемом выражением (2):

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= C_1 \frac{2\sigma^2}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin x}{x}\right)^p \cos\left(\frac{x}{q}\right) dx + C_2 \frac{2\sigma^2}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin x}{x}\right)^p \cos\left(\frac{x}{q}\right) dx, \\ a_k &= C_1 \frac{2\sigma^2}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin x}{x}\right)^p \cos\left(\frac{x}{q}\right) \cos(kx) dx + C_2 \frac{2\sigma^2}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin x}{x}\right)^p \cos\left(\frac{x}{q}\right) \cos(kx) dx. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Спектр АКФ для $\rho=2$ и $\rho=3$ оказывается финитным. Сужение области определения АКФ вызывает изменение спектра — он становится инфинитным и может принимать отрицательные значения. Это приводит к тому, что ряд элементарных дисперсий a_k , начиная с некоторого номера, становится знакопеременным рядом, и эти члены не учитываются. Таким образом, каноническое разложение поля флуктуаций представляет собой конечный ряд Фурье.

Результаты численных расчетов. Сначала определим нули функции $a_0(q)$. Обращение в нуль постоянной составляющей в разложении Пугачева (4) соответствует только колебательному характеру поля неоднородностей, считаем это предположение априори выполненным. Если рассматривать спектральную плотность для всей области определения АКФ, не сужая ее, то значения $q=1/2$ соответствуют спектральной плотности, равной нулю. Поэтому при моделировании из корней выражения $a_0(q)=0$ выберем только крайние справа значения параметра q .

На рис. 1 приведены графики коэффициентов разложения $a_i(q)/\sigma^2$ при разных показателях степени ρ (см. выражения (5)) для верхней области ионосферы. Крайние справа значения q , при которых постоянная составляющая a_0 обращается в нуль, равны: $q = 0,42666$ при $\rho=2$ (рис. 1, а) и $q = 0,32332$ при $\rho=3$ (рис. 1, б).

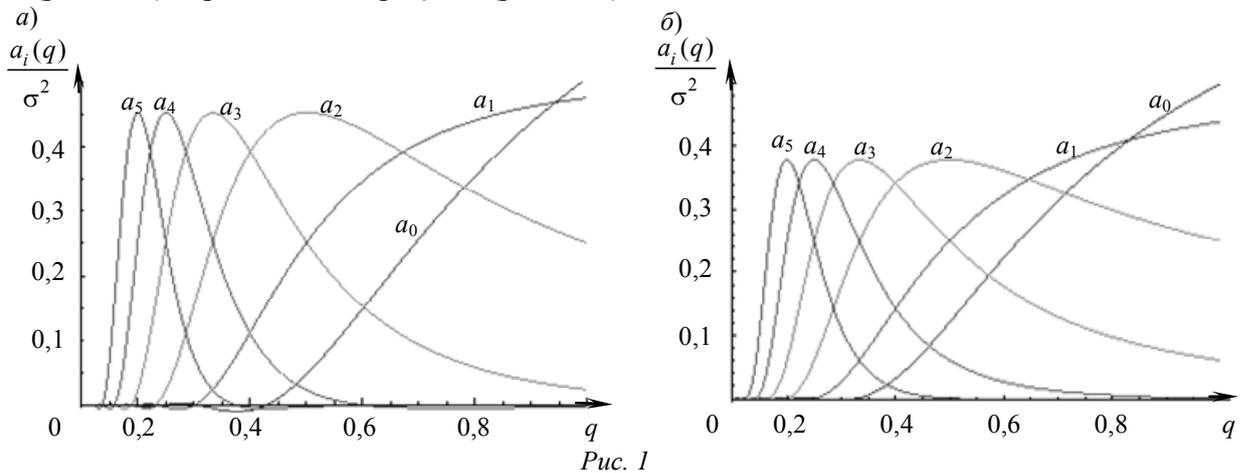


Рис. 1

Точность моделирования определяется количеством членов в выражении $1/\sigma^2 \left(\sum a_i\right)$ при фиксированных значениях параметра q . Суммирование ведется до первого неотрицательного значения, после чего ряд становится знакопеременным. Как известно [12], сумма отброшенных членов ряда не превосходит по абсолютной величине первого из отброшенных членов. Именно такое количество неотрицательных при $a_0(q)=0$ коэффициентов $a_i(q)$ показано на рис. 1, 2. В результате для указанных значений q при $\rho=2$ имеем $1/\sigma^2 \left(\sum a_i\right) = 0,997$ и при $\rho=3$ имеем $1/\sigma^2 \left(\sum a_i\right) = 0,999$, что свидетельствует о точности выбранных АКФ (1).

Аналогичные графики приведены и для нижней области ионосферы (см. формулы (6)) для $C_1 = C_2 = 0,5$ (рис. 2). В данном случае $q=0,434363$ при $\rho=2$ (рис. 2, а) и $q=0,324705$ при $\rho=3$ (рис. 2, б); $1/\sigma^2(\sum a_i)=0,987$ при $\rho=2$ и $1/\sigma^2(\sum a_i)=0,999$ при $\rho=3$, что также хорошо характеризует выбор АКФ для нижней области (2).

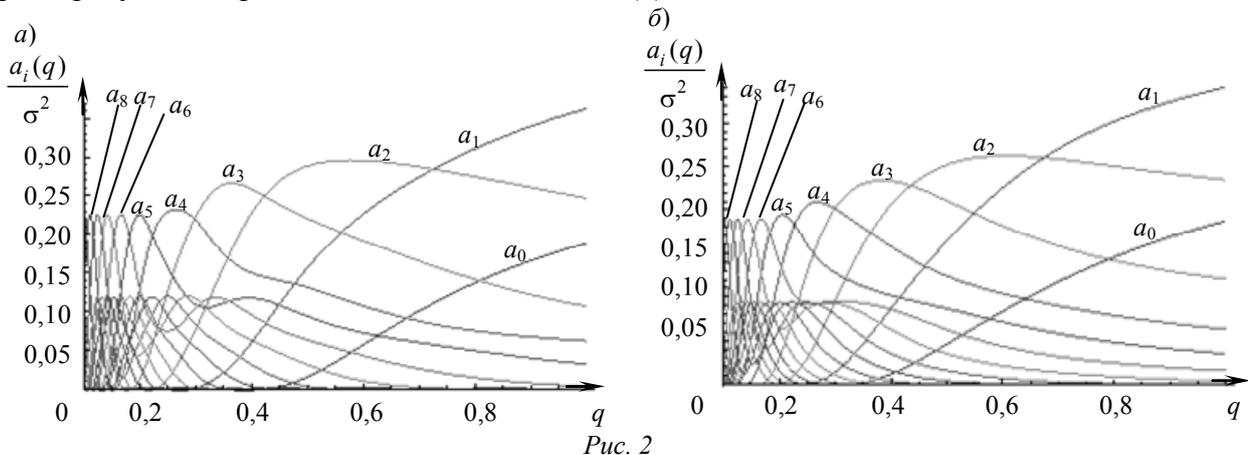


Рис. 2

Закключение. Предложенный в статье метод использования канонического разложения Пугачева для математического описания случайно-неоднородной составляющей одномерного ионосферного профиля экваториальной ионосферы оказывается эффективным при правильном выборе автокорреляционных функций. Рассмотренный способ моделирования одномерных неоднородностей может быть распространен и на объемные неоднородности. В последнем случае трехмерное случайное поле может быть задано как произведение трех взаимно некоррелированных полей. Отметим, что формально можно рассматривать каноническое разложение, выбрав в качестве периода разложения L всю ионосферу, но в этом случае невозможно задать АКФ. Предложенный подход представляется практичным в вычислительном плане, поскольку позволяет осуществлять контроль точности, что важно при решении численных задач расчета радиополей наземных или ионосферных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля — ионосфера и в ионосфере. М.: Наука, 1993. 150 с.
2. Иванов В. И., Рыбачек С. Т., Сенина В. Л. Электромагнитные поля, возбуждаемые в анизотропной ионосфере электрическими и магнитными диполями произвольной ориентации, расположенными в нерегулярном волноводе Земля — ионосфера // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. 4. Физика, химия. 1996. Вып. 1(№ 4). С. 31—45.
3. Соловьев О. В. Распространение низкочастотных радиоволн в возмущенном трехмерной крупномасштабной неоднородностью приземном волноводе // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. XLI, № 5. С. 588—601.
4. Коган Л. П. О распространении электромагнитных волн в волноводе Земля — ионосфера с плавной периодической неоднородностью импеданса верхней границы // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. XLI, № 3. С. 374—381.
5. Ахмедов Р. Р. Численное моделирование генерации акустико-гравитационных волн и ионосферных возмущений от наземных и атмосферных источников: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2004.
6. Excitation of artificial airglow by high power radio waves from the “Sura” ionospheric heating facility / P. A. Bernhart, W. A. Scales, S. M. Grash et al. // Geophys. Res. Lett. 1991. Vol. 18, N 8. P. 1477—1480.
7. Рыбачек С. Т., Белянский М. А. Основные особенности электромагнитных полей, создаваемых в нижней ионосфере низкочастотными приземными антеннами. Результаты численных расчетов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 6 (76). С. 44—48.

8. Кириллов В. В. Области, существенные при отражении электромагнитных волн от неоднородных проводящих слоев // Проблемы дифракции и распространения волн. 1986. № 20. С. 165—181.
9. Рыбачек С. Т. Электромагнитные поля плоской волны в неоднородной анизотропной ионосфере // Проблемы дифракции и распространения волн. 1981. № 18. С. 221—237.
10. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Физматлит, 1960. 884 с.
11. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Фinitные функции в физике и технике. М.: Книжный дом „ЛИБРОКОМ“, 2010. 416 с.
12. Смирнов В. И. Курс высшей математики. СПб: БХВ — Петербург, 2008. Т. 1. 624 с.

Сведения об авторах

- Александр Владимирович Денисов** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра радиотехники и телекоммуникаций; E-mail: A.V.Denisov@inbox.ru
- Максим Анатольевич Белянский** — ОАО «НТЦ „Завод Ленинец“», Санкт-Петербург; зам. начальника отдела; E-mail: maxim_belyansky@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем
и технологий НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
24.10.13 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 629.191

В. Н. АРСЕНЬЕВ, Д. А. БУЛЕКБАЕВ, С. Б. СИЛАНТЬЕВ

МЕТОД КОРРЕКЦИИ КООРДИНАТ ТОЧКИ ПРИЦЕЛИВАНИЯ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассматривается задача выбора точки прицеливания ракеты космического назначения, обеспечивающего падение отделяемой от ракеты части в заданный район земной поверхности. Приведено аналитическое решение, позволяющее найти такую точку прицеливания, при которой предстартовая коррекция полетного задания будет минимальной.

Ключевые слова: ракета космического назначения, точка прицеливания, отделяемая часть, эллипс рассеивания, район падения.

Введение. В настоящее время существует противоречие между двумя основными требованиями, предъявляемыми к пускам ракет космического назначения (РКН). Необходимо, с одной стороны, обеспечить требуемую точность решения целевой задачи РКН — выведение космических аппаратов (КА) в заданную область космического пространства, а с другой — гарантировать падение отделяемых частей (ОЧ) РКН в заданные районы земной поверхности. Существующие алгоритмы управления РКН (далее называемые оптимальными) обеспечивают решение этих задач с некоторой вероятностью, поскольку движение РКН на активном участке траектории и пассивное движение ОЧ после их отделения от РКН зависят от множества случайных факторов.

Возмущения, влияющие на РКН при движении на активном участке траектории, приводят к отклонениям параметров движения ракеты от расчетных значений и в результате к разбросу начальных параметров движения ОЧ после ее отделения от РКН. От этих характеристик непосредственно зависят расположение и размеры области рассеивания точек падения ОЧ на земной поверхности.

Возмущающие факторы, воздействующие на ОЧ после отделения от РКН (на пассивном участке траектории движения ОЧ), также приводят к изменению характеристик области рассеивания точек падения ОЧ. На этом участке полета наиболее существенное влияние на рассеивание оказывают разброс параметров ОЧ относительно номинальных величин, отклонения термодинамических параметров атмосферы от расчетных значений, а также ветровые возмущения в районе падения ОЧ. Область падения ОЧ обычно описывается эллипсом рассеивания.

Возрастающие требования по обеспечению безопасности населения и народнохозяйственных объектов, экологической безопасности, а также ограничения политического характера ведут к сокращению числа и уменьшению размеров районов, отводимых для падения отделяемых от РКН частей. В связи с этим для обеспечения гарантированного падения

ОЧ в отведенные районы необходимо непосредственно перед пуском ракеты космического назначения иметь оперативную информацию о состоянии атмосферы в этих районах.

В ряде случаев можно допустить, что возмущения, действующие на ОЧ на пассивном участке траектории движения, не оказывают существенного влияния на размеры эллипса рассеивания, а приводят к перемещению его центра относительно центра отведенного района падения. В результате вероятность падения ОЧ за пределами отводимого района может превысить допустимое значение. Обеспечить падение ОЧ в заданный район с требуемой вероятностью можно только путем изменения координат точки прицеливания РКН, определяющих начальные значения параметров движения ОЧ. Число таких точек может быть сколь угодно большим. Представляется очевидным, что точку прицеливания следует выбирать таким образом, чтобы отклонение траектории движения РКН от оптимальной было минимальным. При таком подходе потребуются минимальная предстартовая коррекция параметров алгоритма управления РКН, что не приведет к существенному ухудшению качества решения целевой задачи РКН [1]. С другой стороны, благодаря определению начальных условий движения ОЧ будет обеспечено ее падение в заданный район.

Постановка задачи. В общем виде модель возмущенного движения ОЧ на пассивном участке траектории может быть описана векторным нелинейным дифференциальным уравнением [2, 3]

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, t), \quad \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{h0}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_h(t) + \Delta\mathbf{x}(t)$ — n -мерный случайный вектор параметров движения ОЧ; $\mathbf{x}_h(t)$ — номинальное значение вектора параметров движения ОЧ; $\Delta\mathbf{x}(t)$ — вектор случайных отклонений параметров движения ОЧ от номинальной траектории; $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0)$ — начальное значение вектора параметров движения ОЧ в момент ее отделения от РКН; $\mathbf{x}_{h0} = \mathbf{x}_h(t_0)$ — номинальное (расчетное) значение вектора параметров движения ОЧ в момент ее отделения от РКН; $\boldsymbol{\lambda}$ — вектор случайных возмущений, действующих на движение ОЧ после ее отделения от РКН; t — время движения ОЧ от момента t_0 отделения от РКН до момента достижения земной поверхности (при высоте над поверхностью Земли $h=0$).

На земной поверхности координаты точки падения ОЧ в продольном (l) и боковом (b) направлениях относительно центра отведенного района падения характеризуются вектором $\mathbf{R} = [l \quad b]^T$, который полностью определяется вектором параметров движения центра масс ОЧ в момент достижения ею поверхности Земли: $\mathbf{x}|_{h=0} = \mathbf{x}_h|_{h=0} + \Delta\mathbf{x}|_{h=0}$. При расчетных значениях вероятностных характеристик возмущающих воздействий центр области рассеивания точек падения ОЧ, положение которого характеризуется вектором $\mathbf{R}_h = [l_h \quad b_h]^T$, совпадает с центром района падения. В этом случае $\mathbf{R}_h = 0$, а эллипс, ограничивающий область рассеивания, находится полностью внутри района падения.

При отклонениях характеристик возмущений от расчетных центр области рассеивания может не совпадать с центром отведенного района падения, т.е. $\mathbf{R}_h \neq 0$. В результате этого эллипс рассеивания может частично или полностью выходить за пределы района падения. Путем перемещения центра эллипса в продольном или (и) боковом направлении можно найти такое его новое положение $\mathbf{R}_T = [l_T \quad b_T]^T$, при котором эллипс рассеивания будет касаться границы района падения, находясь внутри него.

В этом случае задача сводится к определению вектора начальных параметров движения ОЧ $\mathbf{x}_{T0} = \mathbf{x}_T(t_0)$, минимально отличающегося от вектора $\mathbf{x}_{h0} = \mathbf{x}_h(t_0)$ и определяющего условия падения ОЧ в область, ограниченную эллипсом рассеивания с центром в точке (l_T, b_T) .

Определение координат точки прицеливания РКН. В первом приближении функциональную зависимость между разностью $\mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H$ и вектором $\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0}$ отклонений параметров движения РКН от номинальных значений в момент отделения ОЧ можно положить линейной, т.е.

$$\mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H = \mathbf{A}(\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0}). \quad (2)$$

Для определения матрицы \mathbf{A} используются известные подходы [4, 5].

В качестве вектора \mathbf{x}_{T0} , элементами которого являются координаты точки прицеливания РКН, определяющие падение ОЧ в заданный район, принимается

$$\mathbf{x}_{T0} = \arg \min_{\mathbf{x}_0} (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_{H0})^T \mathbf{W} (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_{H0}), \quad (3)$$

где \mathbf{W} — невырожденная $n \times n$ -матрица весовых коэффициентов.

Для решения задачи (2), (3) используется метод неопределенных множителей Лагранжа, в соответствии с которым минимизируемая функция имеет вид

$$L = (\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0})^T \mathbf{W} (\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0}) + 2\boldsymbol{\mu}^T [\mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H - \mathbf{A}(\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0})],$$

где $\boldsymbol{\mu}$ — вектор-столбец неопределенных множителей Лагранжа размерностью 2×1 .

Частные производные от функции L определяются по векторам \mathbf{x}_{T0} и $\boldsymbol{\mu}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}_{T0}} &= 2\mathbf{W}(\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0}) - 2\mathbf{A}^T \boldsymbol{\mu}; \\ \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\mu}} &= 2[\mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H - \mathbf{A}(\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0})], \end{aligned}$$

приравнивание которых к нулю дает два уравнения:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0}) - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\mu} &= 0, \\ \mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H - \mathbf{A}(\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0}) &= 0. \end{aligned}$$

Подстановка во второе уравнение величины

$$\mathbf{x}_{T0} = \mathbf{x}_{H0} + \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^T \boldsymbol{\mu}, \quad (4)$$

полученной из первого уравнения, позволяет найти вектор неопределенных множителей Лагранжа

$$\boldsymbol{\mu} = (\mathbf{A} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^T)^{-1} (\mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H).$$

Подстановка вектора $\boldsymbol{\mu}$ в уравнение (4) дает решение поставленной задачи:

$$\mathbf{x}_{T0} = \mathbf{x}_{H0} + \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^T)^{-1} (\mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H). \quad (5)$$

Нетрудно убедиться, что полученное решение обеспечивает выполнение условия (2). Действительно,

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0}) = \mathbf{A} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^T)^{-1} (\mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H) = \mathbf{R}_T - \mathbf{R}_H.$$

Пример. Рассмотрим движение отделяемой части (блока А) РКН „Союз-2“ на пассивном участке траектории (после отделения от ракеты). Начальные параметры движения ОЧ в гринвичской инерциальной системе координат задаются вектором

$$\mathbf{x}_{H0} = [x_{H0} \quad y_{H0} \quad z_{H0} \quad V_{x_{H0}} \quad V_{y_{H0}} \quad V_{z_{H0}}]^T,$$

где $x_{H0} = 460\,133$ м; $y_{H0} = 149\,932$ м; $z_{H0} = -43\,031$ м; $V_{x_{H0}} = 3598,88$ м/с; $V_{y_{H0}} = 525,27$ м/с; $V_{z_{H0}} = -345,30$ м/с.

При использовании модели стандартной атмосферы в процессе моделирования пассивного движения ОЧ центр эллипса рассеивания точек падения совпадает с центром района падения, т.е. $\mathbf{R}_H = 0$. Вследствие ветровых возмущений в районе падения ОЧ координаты центра эллипса рассеивания отклоняются от центра района падения в продольном направлении на $l_H = -30\,000$ м и в боковом направлении на $b_H = 5000$ м, т.е. $\mathbf{R}_H = [-30\,000 \quad 5000]^T$ [6].

Необходимо найти новые значения координат центра масс РКН в момент отделения блока А (новые начальные параметры движения блока А), при которых будет обеспечено его падение в центр отведенного района, т.е. $\mathbf{R}_T = [0 \quad 0]^T$. При этом требуется, чтобы составляющие вектора скорости ОЧ в момент ее отделения от РКН совпадали с номинальными, т.е.

$$V_{x_{T0}} = V_{x_{H0}} = 3598,88 \text{ м/с}; V_{y_{T0}} = V_{y_{H0}} = 525,27 \text{ м/с}; V_{z_{T0}} = V_{z_{H0}} = -345,30 \text{ м/с}. \quad (6)$$

Матрица \mathbf{A} линейной модели (2), полученная в соответствии с изложенным в работе [5] подходом, имеет следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1,44 & 2,71 & 4,66 & 67,66 & 48,36 & 342,48 \\ -0,93 & 0,37 & 0,19 & -175,96 & 60,15 & 27,47 \end{bmatrix}.$$

Обеспечить выполнение условий (6) можно различными способами. В частности, можно принять $\mathbf{W} = \text{diag}\{1, 1, 1, 10^9, 10^9, 10^9\}$. Тогда в соответствии с выражением (5) отделение блока А от РКН должно быть произведено в точке

$$\mathbf{x}_{T0} = [466\,658 \quad 150\,811 \quad -39\,121 \quad 3598,88 \quad 525,27 \quad -345,30]^T.$$

При изменении направления ветра положение центра эллипса рассеивания точек падения ОЧ и, как следствие, координаты точки прицеливания РКН также изменяются. Например, если направление ветра вдоль трассы полета РКН изменилось на противоположное и $\mathbf{R}_H = [30\,000 \quad 5000]^T$, то параметры движения РКН в момент отделения блока А задаются вектором

$$\mathbf{x}_{T0} = [462\,900 \quad 145\,920 \quad -47\,990 \quad 3598,88 \quad 525,27 \quad -345,30]^T.$$

Ужесточение требований к отклонению траектории движения РКН от расчетной также приводит к изменению координат точки прицеливания. Например, если дополнительно к условиям (6) требуется, чтобы в момент отделения блока А координата $z_{T0} = z_{H0} = -43\,031$ м, то весовую матрицу следует вычислять как $\mathbf{W} = \text{diag}\{1, 1, 10^9, 10^9, 10^9, 10^9\}$. Тогда при

$\mathbf{R}_H = [-30\,000 \quad 5000]^T$ координаты точки прицеливания в ГСК определяется вектором

$$\mathbf{x}_{T0} = [468\,207 \quad 156\,712 \quad -43\,031 \quad 3598,88 \quad 525,27 \quad -345,30]^T,$$

а при $\mathbf{R}_H = [30\,000 \quad 5000]^T$ — вектором

$$\mathbf{x}_{T0} = [460\,935 \quad 138\,436 \quad -43\,031 \quad 3598,88 \quad 525,27 \quad -345,30]^T.$$

Статистическое моделирование возмущенного движения ОЧ после отделения ее от ракеты в точке \mathbf{x}_{T0} показало, что погрешности определения координат центра эллипса рассеивания, связанные с использованием приближенной модели (2), не превышают 4 %.

Заключение. Решение (5) задачи (2), (3) демонстрирует зависимость вектора \mathbf{x}_{T0} от матрицы весовых коэффициентов \mathbf{W} . При изменении ее элементов может изменяться значение квадратичной формы $(\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0})^T \mathbf{W} (\mathbf{x}_{T0} - \mathbf{x}_{H0})$. Однако выбор этой матрицы никак не

влияет на положение центра эллипса рассеивания точек падения ОЧ, поскольку при любой невырожденной матрице \mathbf{W} подстановка вектора \mathbf{x}_{T0} в уравнение (2) обращает последнее в тождество.

В качестве весовой матрицы целесообразно использовать диагональную матрицу $\mathbf{W} = \text{diag}\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$. Поскольку, в общем случае, вектор \mathbf{x}_{T0} является шестимерным, то, варьируя диагональные элементы матрицы \mathbf{W} , можно найти такую точку прицеливания РКН, при которой коррекция алгоритма управления будет минимальной. При этом, как было отмечено выше, гарантируется падение ОЧ в заданный район земной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А. Метод синтеза программы движения ракеты космического назначения для минимизации затрат на выведение полезного груза // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 10. С. 11—15.
2. Теория полета ракет-носителей: Учебник для вузов / Г. И. Кудин, В. П. Насонов, С. К. Слезкинский, С. И. Ряполов, К. В. Хрусталева. МО РФ, 1994. 735 с.
3. Лебедев А. А., Герасюта Н. Ф. Баллистика ракет. М.: Машиностроение, 1970. 244 с.
4. Юсупов Р. М., Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981. 464 с.
5. Арсеньев В. Н., Кохановский А. Г., Фадеев А. С. Математическая модель связи изохронных вариаций переменных состояния системы управления с возмущениями параметров ее составных частей // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 3. С. 25—29.
6. Арсеньев В. Н., Булекбаев Д. А. Метод уточнения модельных значений параметров атмосферы для прогнозирования районов падения отделяемых частей ракет-носителей // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 1. С. 5—10.

Сведения об авторах

- Владимир Николаевич Арсеньев** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов, Санкт-Петербург; E-mail: vladar56@mail.ru
- Дастанбек Абдыкалыкович Булекбаев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра высшей математики, Санкт-Петербург; E-mail: atiman@mail.ru
- Сергей Борисович Силантьев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой
автоматики и электроники

Поступила в редакцию
30.12.13 г.

А. В. АВЕРЬЯНОВ, А. М. БАРАНОВСКИЙ, К. А. ЭСАУЛОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ АППАРАТНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Рассматривается типовая структура информационной управляющей системы, основу которой составляет микропроцессор. Представлены результаты анализа выигрышей в надежности функционирования многоканальных управляющих систем.

Ключевые слова: автоматизированная управляющая система, резерв, микропроцессор, информационные управляющие системы, надежность.

Системы автоматизированного дистанционного управления являются распределенными микропроцессорными управляющими системами. Под понятием „микропроцессорная система“ (МПС) подразумевается любая вычислительная или информационная управляющая система, в которой устройством обработки информации является микропроцессор, выполняющий, таким образом, системообразующую функцию. Использование МПС позволяет обеспечить децентрализованное управление технологическим процессом, что должно приводить к повышению надежности функционирования системы автоматизированного дистанционного управления.

Рассмотрим типовую структуру информационной управляющей системы (ИУС), основу которой составляет микропроцессор, входящий в состав микропроцессорного контроллера (МПК) [1]. Структура ИУС представлена на рис. 1.

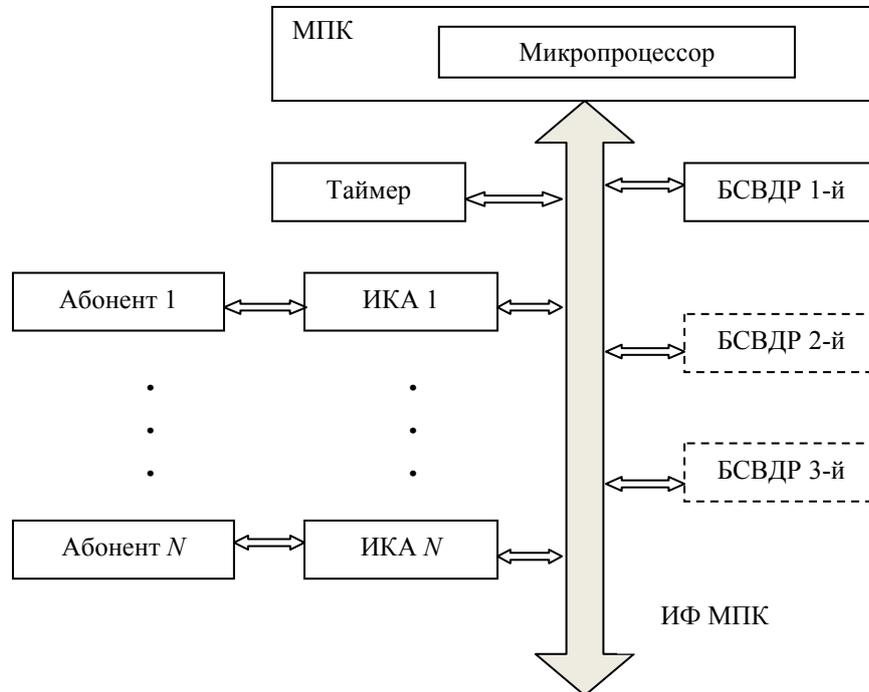


Рис. 1

Микропроцессорный контроллер взаимодействует со своими абонентами через системный интерфейс (ИФ МПК). Подключение N абонентов к системному интерфейсу производится через интерфейсные карты абонентов ИКА₁, ..., ИКА _{N} . Входящие в состав ИУС три блока синхронизации и восстановления достоверного результата (БСВДР) воспринимают интерфейсные сигналы МПК.

Система автоматизированного дистанционного управления реализует выполнение задач по управлению технологическими процессами, например подготовкой и проведением пуска ракет и космических аппаратов. При этом к самой системе предъявляются высокие требования по надежности, для выполнения которых применяют, как правило, трехканальную систему, содержащую три МПК. В этом случае каждый из БСВДР воспринимает интерфейсные сигналы МПК своего канала и двух других МПК и обеспечивает синхронизацию работы каналов.

На рис. 1 показана структура одного канала — первого, второй и третий каналы представлены только БСВДР (показаны пунктирными прямоугольниками) и их информационными связями с аналогичным блоком первого канала и его системным интерфейсом.

Мажоритирование информационных потоков осуществляется в БСВДР всех трех каналов. Блоки восстанавливают достоверное значение передаваемых кодов по правилу „2 из 3“. Интерфейсные сигналы каждого из каналов выдаются в аналогичные БСВДР двух других каналов. Если в трехканальной системе отсутствуют БСВДР второго и третьего каналов, то сигналы с выходов отдельных каналов поступают на единственный (первый) БСВДР, который выполняет функции мажоритарного элемента (МЭ). На его выходе появляется сигнал при совпадении сигналов с выходов двух каналов из трех. Выход из строя одного из трех каналов не приводит к искажению выходного сигнала системы автоматизированного дистанционного управления.

Следует отметить, что отказ одного канала приводит к снижению надежности системы до уровня $P_c = P_1 \times P_1$, где P_c и P_1 — вероятности безотказной работы (ВБР) всей трехканальной системы и одного канала соответственно. Управление технологическим процессом требует постоянного поддержания высокой надежности, поэтому при отказе одного из каналов крайне необходимо обеспечить повышение надежности системы в период восстановления хотя бы до уровня P_1 .

Другой особенностью трехканальной системы автоматизированного дистанционного управления с одним БСВДР (МЭ) являются высокие требования, предъявляемые к его надежности. Вероятность безотказной работы такого мажоритарного элемента должна практически равняться единице.

Включение в систему трех БСВДР (см. рис. 1) позволяет снизить требования к ВБР мажоритарного элемента. Использование такого показателя, как выигрыш в надежности функционирования многоканальной системы по сравнению с одноканальной, рассчитываемый по формуле

$$W = P_c / P_1,$$

позволяет оценить целесообразность многоканальной реализации системы автоматизированного дистанционного управления для достижения требуемых уровней надежности.

З а м е ч а н и е. При $P_1=0$ не происходит деления на ноль в формуле (1), так как числитель формируется в виде произведения сомножителей, одним из которых является P_1 .

В соответствии с представленными в работах [2, 3] рассчитанными значениями W для двухканальной системы, трехканальной с одним МЭ и трехканальной с тремя МЭ можно сформулировать следующие выводы:

— при $P_c = 0,999\dots 0,9999$ использование в системе (см. рис. 1) трех МЭ позволяет достичь уровня надежности двухканальной системы;

— трехканальная система с единственным МЭ при $P_1 < 1$ уступает по уровню надежности двухканальной системе, а на малых временных интервалах функционирования порядка 1,5 ч — даже одноканальной системе.

На рис. 2 представлены графики изменения значения W_i (см. формулу) в зависимости от P_1 , где W_2 — выигрыш в надежности функционирования двухканальной системы; W_3 — то же

для трехканальной системы с одним МЭ при $P_1=1$; $W_{3,3}$ — то же для трехканальной системы с тремя МЭ при $P_1=P_2=P_3=0,99$; W_5 — то же для пятиканальной системы с одним МЭ при $P_1=1$. (На рисунке приведены четыре кривые, соответствующие выигрышам, но графики для W_3 и $W_{3,3}$ практически неразличимы.)

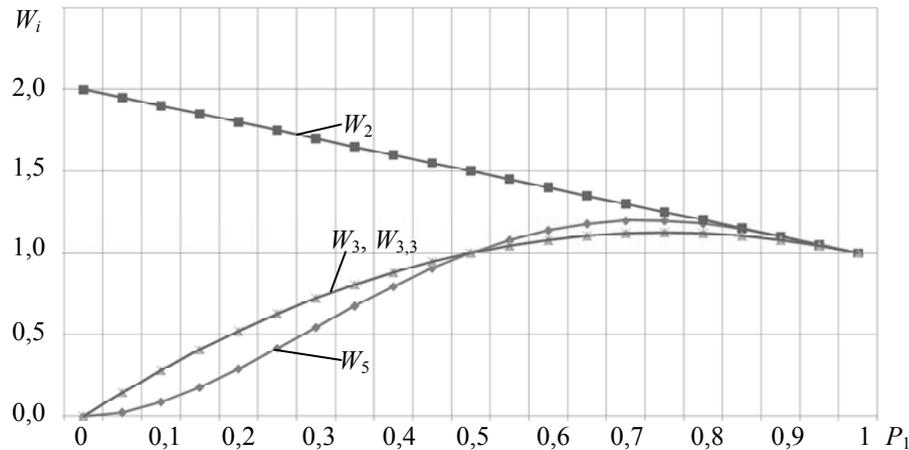


Рис. 2

Как видно из представленных диаграмм, максимальные значения W_5 , W_3 и $W_{3,3}$ (для пятиканальной и трехканальных систем) достигаются при $P_1=0,75$ и равны соответственно $W_5=1,1953$, $W_3=1,1250$, $W_{3,3}=1,1249$, что меньше выигрыша W_2 (двухканальной системы), равного $W_2=1,2500$. Очевидно, что вероятность безотказной работы $P_1=0,75$ характеризует недопустимо низкий уровень надежности одного канала, и построение на таких каналах многоканальных систем автоматизированного дистанционного управления неприемлемо.

При $P_1 > 0,9$ значения W_i для различных систем становятся практически одинаковыми: например, при $P_1=0,95$ получаем $W_5=1,0514$, $W_3=1,0450$, $W_{3,3}=1,0449$ и $W_2=1,0500$.

Из полученных результатов следует, что трехканальная структура системы автоматизированного дистанционного управления (см. рис. 1) уступает в надежности двухканальной системе. Таким образом, типовые структуры информационных управляющих систем, основу которых составляет микропроцессорный контроллер (подобные рассмотренной в данной статье), обладают аппаратной и программной избыточностью и нерациональны при многоканальной реализации.

Решение проблемы надежности функционирования таких систем заключается, прежде всего, в необходимости повышения безотказности работы одного канала управления, а не в увеличении количества каналов, не соответствующих заданным требованиям к надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированные системы управления подготовкой и пуском ракет космического назначения / В. И. Полянский, А. В. Аверьянов, А. И. Данилов и др. СПб: ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1997. 332 с.
2. Аверьянов А. В. Оценивание надежности автоматизированных систем управления подготовкой и проведением пуска космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 62—65.
3. Басыров А. Г., Гончаренко В. А., Забузов В. С., Кремез Г. В., Эсаулов К. А. Повышение устойчивости функционирования бортовых вычислительных систем по результатам космических экспериментов // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 70—74.

Сведения об авторах

Алексей Васильевич Аверьянов

— канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: Aver957@mail.ru

- Анатолий Михайлович Барановский** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Санкт-Петербург; E-mail: bamvka@mail.ru
- Константин Андреевич Эсаулов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: home5263@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-вычислительных
систем и сетей

Поступила в редакцию
24.04.13 г.

УДК 621.311:681.5

О. И. Лисов, Чжо Зо Е, Пайе Тэйн Наинг

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается задача организации эффективного управления распределенными системами, в частности энергетическими комплексами, с учетом динамики процессов выработки, распределения, аккумуляции и потребления энергетических ресурсов. Представлено решение задачи, базирующееся на теории линейного программирования, методе аналитической идентификации и мультиграфовых моделях.

Ключевые слова: оптимизация, управление, газотранспортный комплекс, граф, линейное программирование, процессно-ролевые модели.

В последние годы при производстве, транспортировке и потреблении энергоносителей возникает множество проблем, связанных с достоверностью управления технологическими процессами. Уровень развития современной техники и разработанные математические методы теории оптимизации процессов управления обеспечивают возможность решения большинства задач, возникающих в различных ситуациях.

В настоящей статье рассматривается решение задачи оптимального управления газотранспортными комплексами на основе линейного программирования, метода аналитической идентификации и мультиграфовых моделей. Газотранспортные комплексы (ГТК) представляют собой сложные производственные системы, включающие подсистемы выработки, распределения, аккумуляции и потребления энергетических ресурсов, в том числе вторичных энергоресурсов металлургического производства (доменный газ, отработанный пар и пр.) [1].

В настоящее время в России в среднем около 14 % газотранспортных комплексов находятся в эксплуатации более 30 лет, 56 % — от 10 до 30 лет и только 30 % — до 10 лет. Такая ситуация приводит к необходимости выполнения масштабных и дорогостоящих диагностических и ремонтных работ. Необходимость обеспечения приемлемого уровня эффективности функционирования ГТК определяет идентификацию множества его технических состояний как одну из наиболее важных научных проблем [2].

Контроль технического состояния ГТК осуществляется в основном относительно отдельных повреждений, которые в соответствии с системой методов безопасной эксплуатации причисляются к критическим и потенциально опасным. Оценка эксплуатирующими организациями технического состояния ГТК по результатам внутритрубной диагностики позволяет

получить обширные разновременные сведения об имеющихся повреждениях, но их объективный анализ затруднен вследствие большой размерности задачи идентификации.

Использование теории линейного программирования и метода аналитической идентификации технического состояния ГТК по агрегированным моделям позволяет выявить подконтрольные участки и определить ежегодный объем диагностических и восстановительных работ. Однако этот метод не позволяет определить уровень управленческих воздействий в организационно-технологической системе управления, так как не конкретизирует число и параметры повреждений, требующих восстановления [2—4].

Схема, демонстрирующая этапы технологического процесса непараметрической идентификации состояний ГТК, представлена на рис. 1.

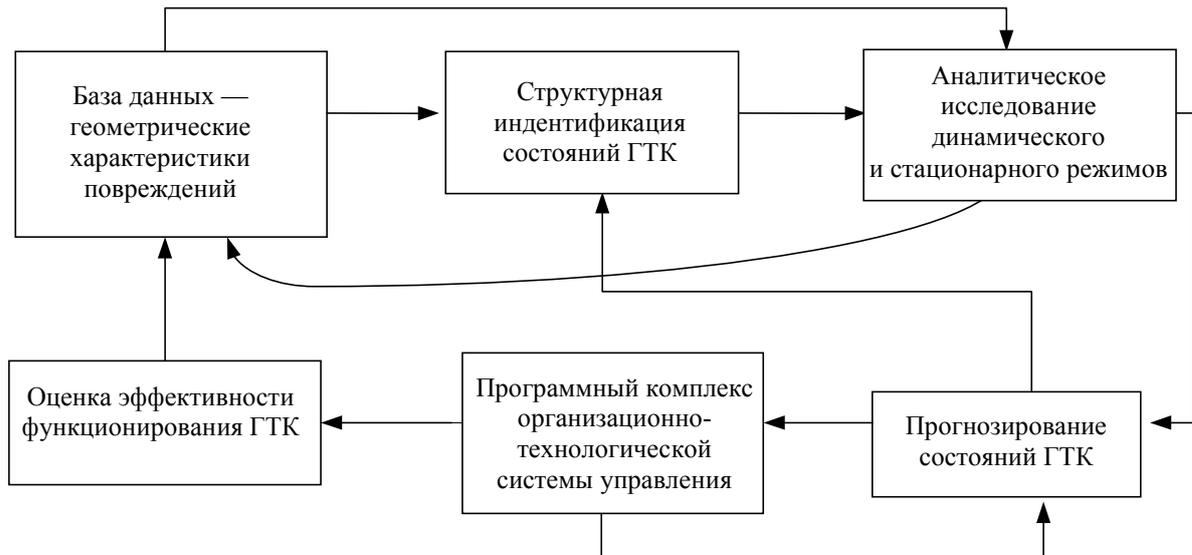


Рис. 1

Технологический процесс состоит из нескольких взаимосвязанных функциональных этапов. В начале процесса в целях определения конкретных условий текущего режима составляется база данных, содержащая геометрические характеристики повреждений оболочек. На этапе структурной идентификации состояний ГТК по значениям параметров повреждений формируются случайные функции по пространственной координате. Построение мультиграфовой модели (ММ) с конечным числом состояний осуществляется по параметру, значения которого образуют эргодическую стационарную случайную функцию. По каждому диагностическому срезу $r, r = 1, \dots, f$, формируется фрагмент (доля) ММ и определяются интервальные значения аналоговой переменной по выбранному параметру, которые отображаются на основные состояния $S_i, i = 0, \dots, n$, обеспечивая значительное снижение размерности задачи идентификации. Состояния, полученные для каждого фрагмента, дополняются композиционными $S_i, i = n + 1, \dots, m$, и соединяются между собой разнонаправленными ориентированными дугами, которые обозначаются как взаимные интенсивности повреждений $\lambda_{ij}, \mu_{ij}, i, j = 0, \dots, f$. Одноименные состояния разных фрагментов соединяются также дугами, которые обозначаются как переходные интенсивности повреждений $\lambda_{r(r+1)ii}, \mu_{(r=1)rii}, r = 0, \dots, f$. Композиционные состояния формируются теми же выделенными интервалами, обеспечивая возможность достижения конечного состояния. Алгоритмическим обеспечением этапа являются методики определения значений взаимных и переходных интенсивностей повреждений, основанные на установлении количества повреждений.

На следующем этапе проводится аналитическое исследование динамического и стационарного режимов с оценкой времени пребывания моделей ГТК в основных и композиционных

состояниях. Для этого этапа разработаны методы выявления доминирующих по значениям вероятностей состояний и структурного представления ММ путем преобразования систем дифференциальных уравнений к каноническому виду с коэффициентами усиления и постоянными времени, а также методы оценивания эффективности идентификации состояний и адекватности математических моделей. Математическое обеспечение комплекса содержит методики определения коэффициентов аналитических представлений ММ, позиционирования состояний по вероятностной шкале и определения количества повреждений, подлежащих восстановлению.

На этапе прогнозирования состояний ГТК по результатам их идентификации структурируется управленческая информация.

Графические представления одно- и двудольных ММ с разным количеством основных и композиционных состояний схематично представлены на рис. 2 и обозначены как $G_n^r(S_0^1, \dots, S_m^r)$, где G — мультиграфовая модель, r — номер последнего фрагмента-доли (у однодольных ММ не указан), n — число основных состояний, m — номер конечного состояния. Для упрощения графического представления ММ разнонаправленные дуги совмещены. Исходные состояния каждого фрагмента-доли с нулевым индексом обеспечивают „привязку“ модели к моментам диагностирования; конечные состояния характеризуют совокупность выделенных интервалов параметра аналоговой переменной.

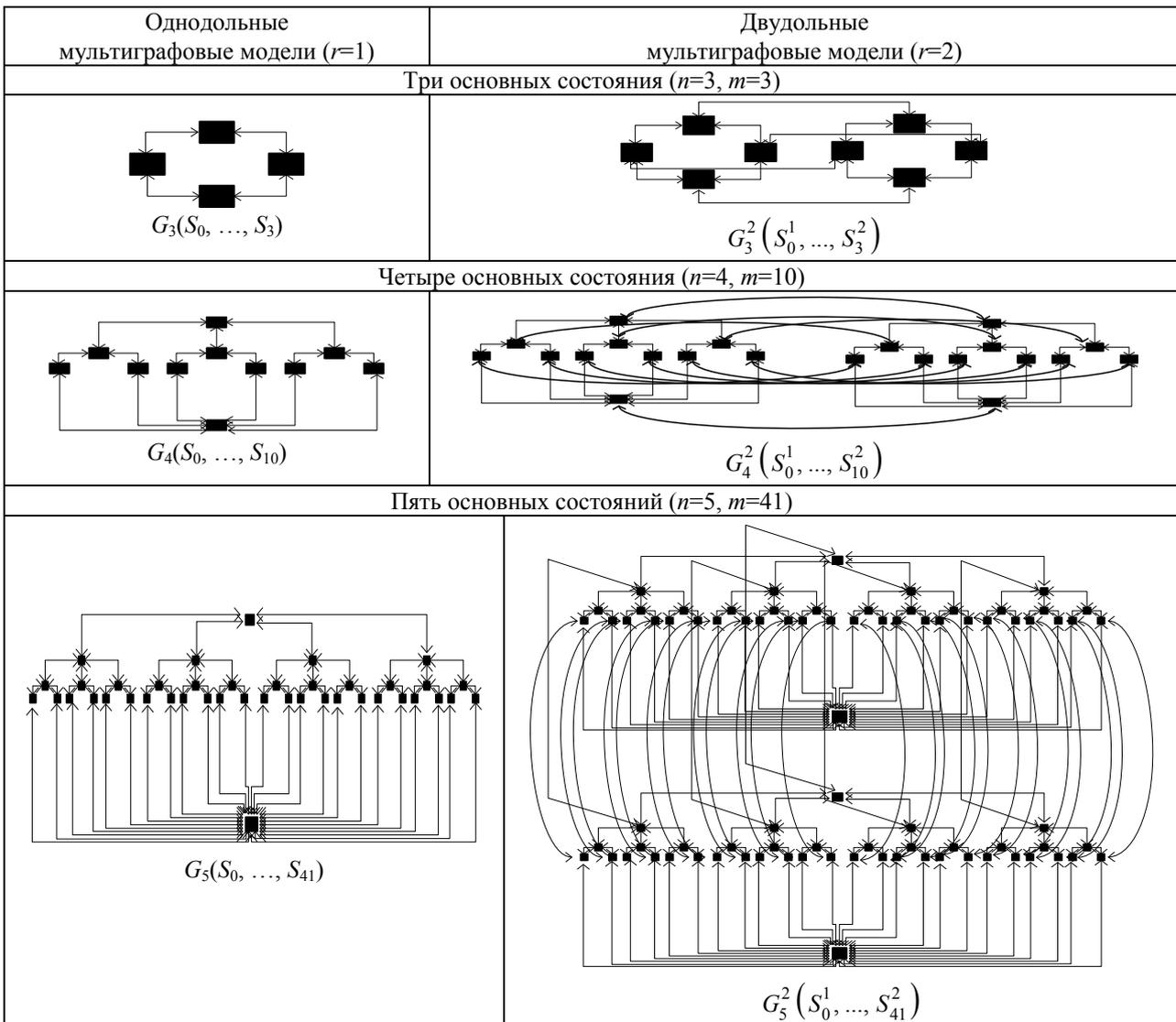


Рис. 2

В мультиграфовой модели составлены системы дифференциальных уравнений (СДУ) относительно вероятностей, характеризующих время пребывания моделей ГТК в выделенном множестве состояний. Приведем СДУ для ММ $G^2_4(S^1_0, \dots, S^2_{10})$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp^1_0(t)}{dt} &= p^1_1(t)\mu^1_{10} + p^1_2(t)\mu^1_{20} + p^1_3(t)\mu^1_{30} + p^2_0(t)\mu^1_{30} - p^1_0(t)(\lambda^1_{01} + \lambda^1_{02} + \lambda^1_{03} + \lambda^{12}_{00}); \\ \frac{dp^2_9(t)}{dt} &= p^2_3(t)\lambda^2_{39} + p^2_{10}(t)\mu^2_{109} - p^2_9(t)(\mu^2_{93} + \lambda^2_{910} + \mu^1_{99}) + p^1_9(t)\lambda^{12}_{99}; \\ \frac{dp^2_{10}(t)}{dt} &= p^2_4(t)\lambda^2_{410} + p^2_5(t)\lambda^2_{510} - p^2_6(t)\lambda^2_{610} + p^2_7(t)\lambda^2_{710} + p^2_8(t)\lambda^2_{810} + p^2_9(t)\lambda^2_{910} + \\ &+ p^2_{10}(t)(\mu^2_{104} + \mu^2_{105} + \mu^2_{106} + \mu^2_{107} + \mu^2_{108} + \mu^2_{109} + \mu^2_{110}) + p^1_{10}(t)\lambda^2_{1010}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\{p^1_0(t), \dots, p^2_{10}(t)\}$ — функции вероятностей состояний, здесь верхние индексы „1“ и „2“ соответствуют номерам этапов диагностирования, нижние индексы „0, ..., 10“ — номерам состояний.

Аналитические решения системы дифференциальных уравнений найдены разложением в степенной ряд со старшей степенью аргумента, зависящей от допустимой погрешности. Обобщенное аналитическое решение системы (1) до l -го порядка точности имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} p^1_0(t) &= p^1_0(0) + (p^1_1(0)\mu^1_{10} + p^1_2(0)\mu^1_{20} + p^1_3(0)\mu^1_{30} + p^2_0(0)\mu^{21}_{00} - \\ &- p^1_0(0)(\lambda^1_{01} + \lambda^1_{02} + \lambda^1_{03} + \lambda^{12}_{00}))t + h^1_{02}t^2 + h^1_{03}t^3 + h^1_{01}t^l; \\ p^1_1(t) &= p^1_1(0) + (p^1_0(0)\lambda^1_{01} + p^1_4(0)\mu^1_{41} + p^1_5(0)\mu^1_{51} + p^2_1(0)\mu^{21}_{11} - \\ &- p^1_1(0)(\mu^1_{10} + \mu^1_{14} + \mu^1_{15} + \mu^{12}_{11}))t + h^1_{12}t^2 + h^1_{13}t^3 + \dots + h^1_{1l}t^l; \\ p^2_{10}(t) &= p^2_{10}(0) + p^2_4(0)\lambda^2_{410} + p^2_5(0)\lambda^2_{510} + p^2_6(0)\lambda^2_{610} + p^2_7(0)\lambda^2_{710} + p^2_8(0)\lambda^2_{810} + \\ &+ p^2_9(0)\lambda^2_{910} + p^1_{10}(0)\lambda^{12}_{1010} - p^1_{10}(0)(\mu^2_{104} + \mu^2_{105} + \mu^2_{106} + \mu^2_{107} + \mu^2_{108} + \mu^2_{109} + \mu^{21}_{1010})t + \\ &+ h^2_{102}t^2 + h^2_{103}t^3 + h^2_{10l}t^l, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где h^1_{ij}, h^2_{ij} — коэффициенты полиномов, представляющие собой наиболее значимые алгебраические суммы, выраженные через интенсивности повреждений и начальные условия $\{p^1_0(0), \dots, p^2_{10}(0)\}$.

Совокупность разработанных мультиграфовых моделей с конечным числом состояний различают по представлениям: графическому — количество состояний, долей и дуг; аналитическому — тип решения и количество вероятностей; структурному — количество структурных звеньев, коэффициентов усиления и постоянных времени. Полученные аналитические представления ММ ГТК в стационарном режиме являются дробно-рациональными выражениями и могут быть использованы при идентификации, прогнозировании и выделении доминирующих состояний ГТК в целях оптимизации.

Для проведения имитационного моделирования, кроме значений интенсивностей повреждений и вероятностей состояний, необходима информация о статических коэффициентах усиления и динамических параметрах в виде постоянных времени. Для этого разработана модель, представляющая собой совокупность динамических звеньев, соединенных на выходе алгебраическими сумматорами. Полученные структурные представления позволяют проследить случайные переходы между состояниями и учесть влияние отдельных внешних воздействий.

Дальнейший анализ и оптимизация распределенных систем управления энергетическими потоками производятся на основе процессно-ролевых моделей. В этих моделях используются графы технологического процесса и системы управления. Особый интерес представляет совместное использование двух подходов к оптимизации системы управления технологическими процессами: на основе линейного программирования и процессно-ролевого представления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Портнов Е. М.* К вопросу создания интегрированных информационно-управляющих систем в энергетике // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2011. № 4. С. 77—80.
2. *Владова А. Ю., Владов Ю. Р.* Проектирование и разработка программной системы для идентификации коррозионных состояний продуктопроводов на основе графовых моделей // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2008. № 8. С. 50—55.
3. *Владова А. Ю., Владов Ю. Р.* Исследование вероятностей коррозионных состояний продуктопроводов моделированием на графах // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. № 5. С. 49—52.
4. *Владова А. Ю., Владов Ю. Р.* Структурная и параметрическая идентификация множества состояний оболочковых технических объектов на мультиграфах // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. № 5. С. 18—22.

Сведения об авторах

Олег Иванович Лисов

— д-р техн. наук, профессор; Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, кафедра информатики и программного обеспечения вычислительных систем, Москва; E-mail: olivlis@mail.ru

Чжо Зо Е

— канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, кафедра информатики и программного обеспечения вычислительных систем, Москва; E-mail: kyawzawye.47@gmail.com

Пайе Тэйн Наинг

— аспирант; Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, кафедра информатики и программного обеспечения вычислительных систем, Москва; E-mail: pyitheinnaing27@gmail.com

Рекомендована кафедрой информатики и программного обеспечения вычислительных систем

Поступила в редакцию
31.10.13 г.

А. П. Буйносов, К. А. Стаценко, А. М. Кислицын

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕСНЫХ ПАР ЛОКОМОТИВОВ

Рассмотрены принципы функционирования разработанной автоматической измерительной системы для контроля геометрических параметров колесных пар локомотивов, приведено описание разработки и аппаратной реализации приборов, интегрируемых в ее состав.

Ключевые слова: локомотив, колесная пара, параметры, прибор, измерительная система, программный комплекс.

В рамках комплексной автоматизированной системы управления железнодорожным транспортом в Уральском государственном университете путей сообщения (УрГУПС, Екатеринбург) на кафедре электрической тяги создана автоматическая измерительная система для контроля геометрических параметров колесных пар локомотивов [1], схема которой представлена на рис. 1.

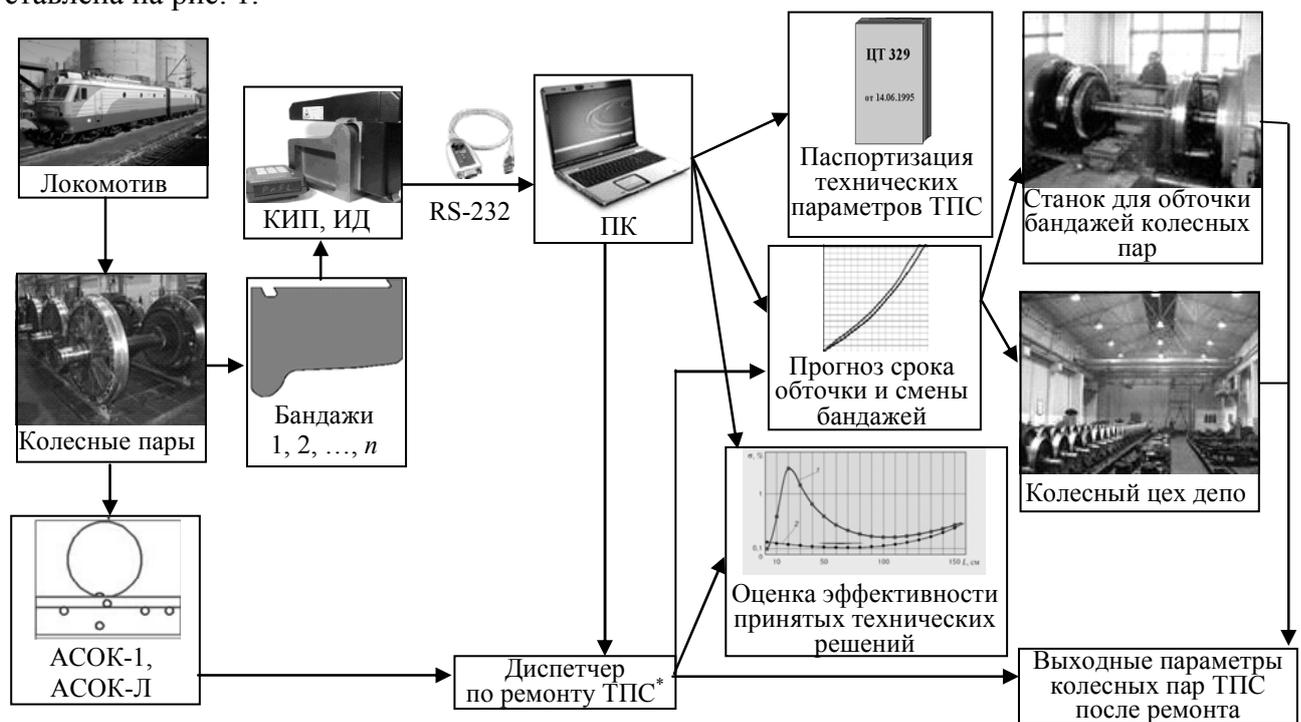


Рис. 1

Автоматическая измерительная система, объединяющая разработанные авторами настоящей статьи приборы и автоматическую систему обмера колесных пар при движении локомотива — АСОК-1 (АСОК-Л) [2], предназначена для оперативного высокоточного контроля основных параметров бандажей колесных пар: диаметра бандажей, разности диаметров бандажей, толщины гребня, проката (износ по кругу катания), крутизны гребня, расстояния между внутренними гранями колес, параллельности осей колесных пар в тележках и др., а также для ведения паспорта колесных пар и прогнозирования их ресурса до обточки и смены [3].

* ТПС (см. рис. 1) — тяговый подвижной состав.

Система содержит электронные автоматизированные переносные приборы — КИП (комплексный измеритель параметров) [4] и ИД (измеритель диаметра бандажей колесных пар) [5]. В состав обоих приборов входят вычислитель и измерительная скоба с установленными на ней двумя резистивными датчиками [6]. Вычислитель выполнен на базе микропроцессора, с помощью которого осуществляется измерение, обработка и индикация параметров непосредственно на месте проведения замеров. Все измеренные параметры, отображаемые в блоке индикации [7], хранятся в энергонезависимой памяти прибора в течение одной или нескольких рабочих смен.

Технические характеристики прибора КИП: диапазон измерения проката 0—8 мм, диапазон измерения толщины гребня 22—34 мм, диапазон измерения крутизны гребня 0—20 мм, погрешность измерения проката и толщины гребня $\pm 0,2$ мм, погрешность измерения крутизны гребня $\pm 0,1$ мм, дискретность индикации параметров 0,01 мм, время измерения не более 0,5 с.

Напряжение, снимаемое с датчиков прибора КИП, преобразуется 8-разрядными АЦП для каждого датчика отдельно и передается по шине данных в ответ на запрос центрального процессора [1].

Измерение параметров профиля гребня выполняется с учетом номинальной высоты гребня (30 мм). Датчик измерения высоты гребня и проката должен располагаться на расстоянии 70 мм от торца обода колеса (рис. 2).

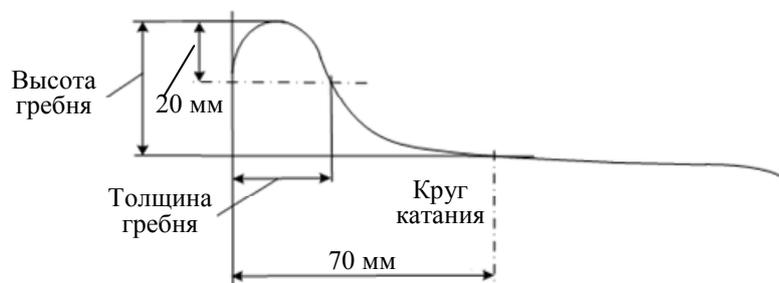


Рис. 2

Величина проката определяется как разность между измеренной высотой гребня и ее номинальным значением. Толщина гребня определяется прямым измерением на уровне 20 мм от его вершины при номинальной высоте гребня 30 мм и измерением на уровне 18 мм при номинальной высоте гребня 28 мм [8].

Технические характеристики прибора ИД: диапазон измерения диаметра колеса 910—1310 мм, погрешность измерения диаметра колеса не более $\pm 0,3$ мм, потребляемая мощность 0,5 Вт, дискретность индикации параметров $\pm 0,01$ мм, время измерения не более 0,5 с. Функциональная схема измерителя диаметра приведена на рис. 3.

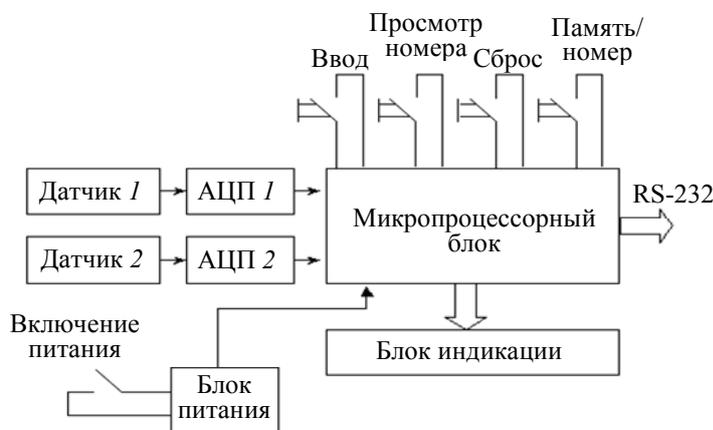


Рис. 3

Принцип измерения диаметра колесных пар основан на определении величины стрелы сегмента, образуемого при установке измерительной скобы на колесо [9]. В отличие от имеющихся аналогов, в которых измерительная скоба и датчики измерения устанавливаются

непосредственно на круг катания колеса, в приборе ИД скоба и один из датчиков устанавливаются на гребень колеса. В разработанном приборе для измерения высоты гребня установлен второй датчик. Такая конструкция позволяет минимизировать влияние углового смещения измерительной скобы относительно торца колеса на результат измерения. Диаметр колеса вычисляется как [10]

$$D = (a^2 + 4h^2)/4h - 2H_{гр},$$

где $H_{гр}$ — высота гребня, измеренная на расстоянии 82 мм от внутренней грани колеса; h — стрела сегмента; a — расстояние между базовыми опорами измерительной скобы.

При разработке прибора ИД было учтено, что на точность измерения влияет люфт хода датчика; уменьшить это влияние можно технологически [11, 12]. Погрешность измерения диаметра колеса при люфте датчика Δh определяется выражением

$$\Delta D = (1 - a^2/4h^2)\Delta h.$$

Диаметры колесных пар могут варьироваться в пределах от 910 до 1310 мм, поэтому, как было установлено, при изготовлении прибора необходимо обеспечить продольный люфт датчика не более 0,01 мм при базе ИД 350 мм. Кроме того, при разработке прибора было учтено, что на точность измерения влияют отклонения размеров между базовыми опорами измерительной скобы. Следовательно, точность соблюдения расстояния a не должна быть хуже $\pm 0,01$ мм. Было учтено также влияние смещения одной из опор относительно торца колеса на погрешность измерения диаметра [13].

Выражения для оценки этих погрешностей имеют следующий вид:

— оценка погрешности измерения высоты гребня

$$\Delta H_{гр} = (\Delta X/2)\operatorname{tg}\beta; \quad (1)$$

— оценка погрешности измерения диаметра колеса

$$\Delta D = 2\Delta H_{гр} = \Delta X \operatorname{tg}\beta, \quad (2)$$

где β — угол наклона поверхности катания колесной пары в точке измерения проката, $\beta = 1^\circ 25' 56''$ (по ГОСТ 11018-2011); ΔX — смещение одной из опор относительно другой, мм.

Погрешность (2) можно уменьшить, если шток датчика измерения диаметра по гребню колеса будет иметь наконечник диаметром не менее 20 мм. Вследствие использования наконечника смещение одной из опор измерительной скобы относительно торца колеса не влияет на результат измерения диаметра по гребню.

Система АСОК-1 (АСОК-Л), предназначенная для автоматического оперативного контроля параметров колесных пар, обеспечивает измерение параметров при движении поезда со скоростью до 50 км/ч. Использование системы АСОК позволяет, при наличии оперативных данных о колесных парах и при своевременном ремонте, продлить их ресурс и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций [14].

Важной частью разработанной измерительной системы контроля параметров колесных пар локомотивов является программный комплекс АРМ „Депо“. Программы, входящие в комплекс позволяют:

— создавать базу данных электронных паспортов колесных пар отдельно для каждого локомотива, при этом информация в базу данных поступает с электронных переносных приборов и (или) автоматических систем обмера колесных пар, относительная погрешность которых не превышает 2—5 %;

— определять степень износа бандажей и отслеживать динамику износа;

— прогнозировать изменение геометрических параметров колесных пар в зависимости от наработки;

— осуществлять стратегическое прогнозирование по всему парку локомотивов;

— максимально автоматизировать работу технического отдела.

Таким образом, разработанная автоматическая измерительная система с использованием приборов КИП и ИД, автоматической системы обмера колес при движении локомотива и

программного комплекса позволяет на самом высоком уровне производить мониторинг состояния колесных пар локомотивов, прогнозировать сроки обточки и ремонта бандажей, производить оценку принятых технических решений по снижению интенсивности износа колесных пар и повышению их ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйносов А. П. Методы повышения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. 455 с.
2. Наговицын В. С., Буйносов А. П., Балдин В. Л. Измерение параметров колесных пар локомотивов. Автоматизированная система: Монография. Саарбрюккен (Германия): Изд-во "LAP LAMBERT Academic Publishing", 2011. 244 с.
3. Балдин В. Л., Буйносов А. П. Автоматическая система мониторинга состояния бандажей колесных пар тягового подвижного состава // Вестн. ВЭЛНИИ. 2010. № 2(60). С. 113—125.
4. Буйносов А. П. Прибор для измерения параметров бандажей колесных пар тягового подвижного состава // Тяжелое машиностроение. 2011. № 3. С. 17—19.
5. Буйносов А. П. Определение допустимой разности диаметров бандажей колесной пары электровозов // Вестн. РГУПС. 2010. № 4. С. 25—34.
6. Буйносов А. П. Контроль бандажей колесных пар // Локомотив. 1991. № 9. С. 36.
7. Буйносов А. П. Автоматизированный контроль параметров колесных пар тягового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2010. № 7. С. 52—53.
8. Горский А. В., Буйносов А. П. Правильно измеряйте износ бандажей // Локомотив. 1991. № 12. С. 36—37.
9. Буйносов А. П. Как контролировать разность диаметров бандажей колесных пар // Локомотив. 1991. № 3. С. 35—37.
10. Буйносов А. П. Методы повышения ресурса колесных пар тягового подвижного состава: Монография. М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. 244 с.
11. Буйносов А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения: Монография. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2009. 224 с.
12. Буйносов А. П. Методы повышения ресурса бандажей колесных пар локомотивов: Монография. Саарбрюккен (Германия): Изд-во "LAP LAMBERT Academic Publishing", 2011. 284 с.
13. Буйносов А. П., Пышный И. М., Тихонов В. А. Ремонт локомотивов без прекращения их эксплуатации // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2012. Т. 60, № 1. С. 85—91.
14. Буйносов А. П., Наговицын В. С. Система бесконтактного измерения бандажей // Локомотив. 1995. № 12. С. 27—28.

Сведения об авторах

- Александр Петрович Буйносов** — д-р техн. наук, профессор; Уральский государственный университет путей сообщения, кафедра электрической тяги, Екатеринбург; E-mail: byinosov@mail.ru, ABuinosov@usurt.ru
- Константин Алексеевич Стаценко** — канд. техн. наук, доцент; Уральский государственный университет путей сообщения, кафедра электрической тяги, Екатеринбург; E-mail: kstatsenko@mail.ru
- Александр Михайлович Кислицын** — аспирант; Уральский государственный университет путей сообщения, кафедра электрической тяги, Екатеринбург; E-mail: alex_teem@mail.ru

Рекомендована кафедрой
электрической тяги

Поступила в редакцию
18.06.13 г.

О. В. НЕПОМНЯЩИЙ, В. А. ХАБАРОВ, И. Н. РЫЖЕНКО, А. А. КОМАРОВ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ОШИБКИ СИГНАЛА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассматриваются проблемы увеличения пропускной способности каналов модемной спутниковой связи и методы расчета частотной ошибки с позиций теории и практики цифровой обработки сигналов. Предложен метод расчета модуля комплексного числа на основе быстрого преобразования Фурье, позволяющий значительно снизить время обработки сигнала. Приведены результаты испытаний однокристалльных вычислителей, входящих в состав разрабатываемого комплекса спутниковой связи.

Ключевые слова: спутник, канал связи, цифровая обработка сигнала, система на кристалле, алгоритм.

Постоянно возрастающие объемы информации, передаваемой по каналам спутниковой связи, требуют поиска новых решений при создании приемопередающей аппаратуры. Известные решения, направленные на сокращение времени обработки сигнала, базируются на увеличении частоты передачи, снижении избыточности информации вследствие паразитных составляющих сигнала и использовании различных видов модуляции [1]. Одним из перспективных направлений повышения качества каналов спутниковой связи является использование высокостабильных генераторов частот, однако это существенно увеличивает конечную стоимость систем. Альтернативным решением является использование низкостабильных генераторов частоты с корректировкой сигнала по частотному смещению на принимающей стороне [2].

В рамках этого подхода решена задача увеличения скорости цифровой обработки сигнала демодулятором канала связи. При проектировании демодулятора было определено, что наибольший эффект достигается при уменьшении времени коррекции по частоте принятого сигнала в целях исключения смещения при переносе сигнала на нулевую частоту.

В большинстве случаев реализация алгоритмов коррекции осуществляется программно-аппаратным путем на базе процессоров цифровой обработки сигнала — DSP (Digital Signal Processor). Однако при высокой плотности информационного потока такие решения не обеспечивают требуемой скорости передачи данных, являясь также достаточно дорогостоящими и энергоемкими.

На начальной стадии алгоритма коррекции с помощью быстрого преобразования Фурье [3] вычисляется спектральная ошибка сигнала, при этом используется многократная операция вычисления модуля комплексного числа. Эта операция наиболее затратна по времени при расчетах спектра сигнала. При этом следует отметить, что большинство из существующих методов поиска модуля комплексной переменной (МКП) не позволяют осуществлять

обработку сигнала в режиме реального времени, поскольку не обеспечивают точность результата либо требуют больших временных затрат при расчете.

На рис. 1 представлена архитектура проектируемого модуля частотной коррекции, входящего в состав системы спутниковой связи. При проектировании данного модуля решалась частная задача аппаратной реализации системы расчета МКП. Известен [4] метод нахождения модуля комплексного числа:

$$r = |a + ib| = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (1)$$

При высокой скорости передачи данных в режиме реального времени возникает проблема, связанная со сложностью реализации многократных операций возведения в квадрат и извлечения корня, дающих результат с высокой точностью.

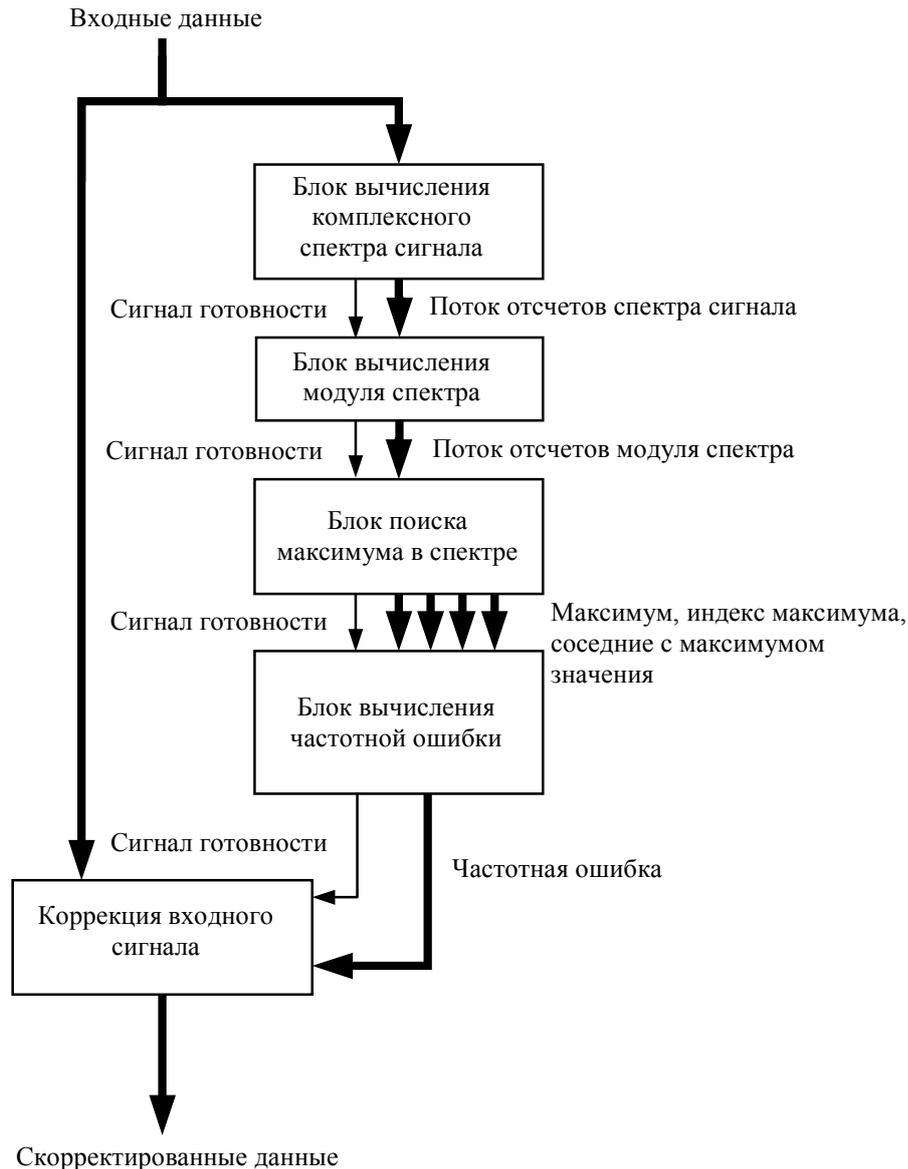


Рис. 1

Основой для разработки аппаратно-реализуемого алгоритма вычислений стал известный метод нахождения модуля комплексного числа, предложенный в работе [2]:

$$r = \max + \beta \cdot \min, \quad (2)$$

где \max — наибольшее значение из a и b , \min — наименьшее; β — коэффициент, принятый в работе [2] равным 0,375.

Известно [2], что комплексное число может быть интерпретировано как вектор. Метод, описанный в работе [2], имеет разную точность при различных значениях угла φ наклона вектора.

В программной среде MatLab были реализованы модели определения модуля комплексного числа согласно выражениям (1) и (2). На рис. 2 представлен результат вычисления модуля r по формуле (2) при различных значениях угла φ и $\beta=0,2774$, при этом истинное значение $r=1$. На графике прямая линия соответствует множеству векторов единичной длины, а кривая — длине вектора, рассчитанной согласно выражению (2). Получена минимальная средняя ошибка, равная 3,12 %, что недопустимо при расчетах частотной поправки.

Авторами настоящей статьи предложен метод вычисления модуля комплексного числа, обеспечивающий, с одной стороны, возможность аппаратной реализации в виде однокристалльной системы, а с другой — более высокие характеристики по производительности и достаточные по точности вычислений. Метод основан на расчетах в соответствии с формулой (2) и принципе подстановки „плавающих“ коэффициентов. Согласно работе [5] метод реализован в

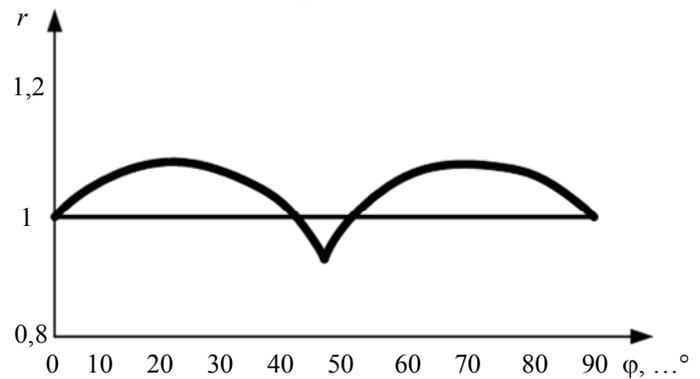


Рис. 2

виде конфигурируемой подсистемы, входящей в состав однокристалльного модуля управления демодулятором. Такой подход позволил обеспечить минимальное время расчета за счет высокой опорной частоты вычислителя и оптимизированной топологии кристалла.

При проектировании аппаратно-реализуемого алгоритма обработки сигнала было решено использовать различные значения β для разных углов φ . Однако расчет угла наклона вектора в режиме реального времени на основе его координатной сетки является не менее сложной вычислительной задачей.

На первом шаге алгоритма определяются максимальное (max) и минимальное (min) значения мнимой и действительной части комплексного числа (по модулю). Далее производится поиск старшей значащей единицы в выбранном максимальном значении числа и определяется вес (разряд). Используя несколько разрядов в выбранном минимальном значении числа, начиная с найденного веса можно с некоторой точностью определить диапазон углов, к которому принадлежит вектор. При этом точность расчетов можно повысить за счет увеличения количества анализируемых разрядов, что позволяет вычислить оптимальные значения коэффициентов β . Конкретное значение коэффициента β определяется из таблицы коэффициентов, которые были получены в результате экспериментального моделирования с помощью пакета MatLab (табл. 1).

Таблица 1

Разрядность выбранного минимального числа	$\varphi_{\min}, \dots^\circ$	$\varphi_{\max}, \dots^\circ$	r	β при двухступенчатом сложении
000	76	90	0,0875	0,0859
001	64	83	0,1494	0,1484
010	53	76	0,2493	0,2500
011	45	69	0,3153	0,3145
100	45	63	0,3346	0,3281
101	45	58	0,3541	0,3750
110	45	53	0,3739	0,3750
111	45	49	0,3939	0,3906

Был разработан и апробирован алгоритм расчета, согласно которому на первоначальном этапе определяются значения \min и \max , далее выделяется номер разряда старшей единицы значения \max . Затем, начиная от того же разряда в значении \min и исходя из требуемой точности расчета, задаются от 2 до 8 дополнительных младших разрядов числа \min . Угловой диапазон (количество углов расчета) для требуемого вектора определяется с учетом дополнительных разрядов числа \min . На заключительном шаге алгоритма для данного диапазона по сформированной таблице считывается значение β : например, при определении β на основе трех разрядов \min получаем 8 диапазонов. Для каждого диапазона найдено соответствующее значение β , при котором средняя ошибка минимальна.

В целях оптимизации топологии однокристального вычислителя операции умножения были заменены на операции логического сдвига, сложения и двухступенчатого сложения:

$$r = (\max + \min \gg x) + (\min \gg y + \min \gg z).$$

На рис. 3 представлена зависимость $r(\varphi)$, вычисленная с учетом „плавающих“ коэффициентов (рис. 4).

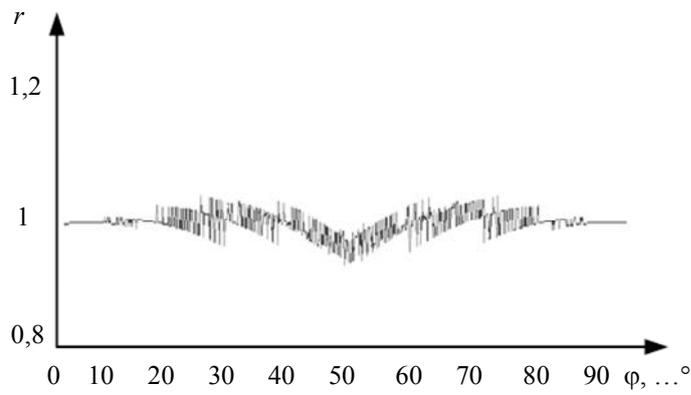


Рис. 3

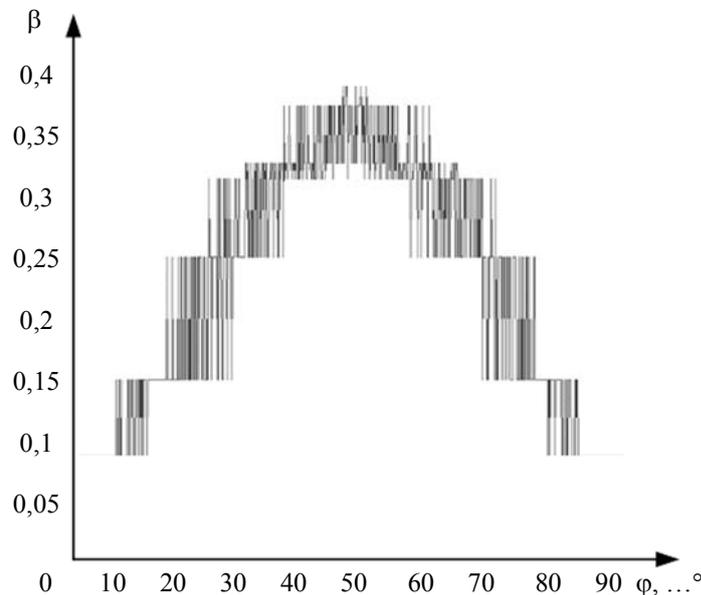


Рис. 4

Для проверки правильности предложенного метода были разработаны и протестированы аппаратные вычислители МКП для методов расчета по формулам (1) и (2), а также для метода „плавающих“ коэффициентов. Все три вычислителя были реализованы в виде СБИС на базе FPGA серии Spartan6 компании “Xilinx” (США). Следует отметить, что в целях минимизации задержек распространения сигнала при формировании топологии системы на кристалле

таблица коэффициентов размещалась в сверхоперативной памяти в непосредственной близости от вычислителя. Результаты тестирования СБИС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр расчета	Метод		
	классический	Nezami [2]	„плавающих“ коэффициентов
Частота, МГц	150	200	180
Средняя ошибка, %	0	4,2	1,37
Максимальная ошибка	0	9,6	6,5
Количество тактов на одно вычисление (без учета конвейеризации)	15	4	11

По результатам исследований и тестирования определены принципы обработки входного сигнала однокристалльным демодулятором, обеспечивающие наибольшую временную задержку. Предложен метод аппаратной коррекции сигнала, базирующийся на быстром преобразовании Фурье и использующий принцип „плавающих“ коэффициентов. В отличие от программно-аппаратных решений, предложенный метод реализован только на аппаратном уровне, что позволяет достичь максимальной пропускной способности канала. Реализованы подсистемы аппаратной коррекции, входящие в состав специализированной СБИС демодулятора сигнала спутниковой связи, и проведены предварительные испытания моделей и аппаратных систем демодуляции. В ходе испытаний достигнуты скорости обработки сигнала, позволяющие осуществлять коррекцию частотной ошибки в режиме реального времени на частотах преобразования свыше 180 МГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Elbert B. R.* The Satellite Communication Applications Handbook. Boston — London: Artech House Inc., 2004.
2. *Nezami M. K.* Wireless Digital Receiver Techniques. N. Y.: Noble Pub, 2004.
3. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов. М.: Бинном, 2006.
4. *Dubrulle A. A.* A class of numerical methods for the computation of pythagorean sums // IBM J. of Research and Development. 1983. Vol. 27, iss. 6. P. 582—589.
5. *Непомнящий О. В., Хныкин А. В.* Анализ проектирования вычислительных систем на кристалле // Исследования наукограда. 2012. № 1(1). С. 42—46.

Сведения об авторах

- Олег Владимирович Непомнящий** — канд. техн. наук, доцент; Сибирский федеральный университет, кафедра вычислительной техники, Красноярск; E-mail: 2955005@gmail.com
- Виталий Александрович Хабаров** — канд. техн. наук; Сибирский федеральный университет, кафедра вычислительной техники, Красноярск; E-mail: haba@inbox.ru
- Игорь Николаевич Рыженко** — аспирант; Сибирский федеральный университет, кафедра вычислительной техники, Красноярск; E-mail: rodgi@kras.ru
- Алексей Александрович Комаров** — аспирант; Сибирский федеральный университет, кафедра вычислительной техники, Красноярск; E-mail: komarovalal@gmail.com

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
17.09.13 г.

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 612.397.5

В. А. АВДЕЕВ, В. С. БАХОЛДИН, Д. А. ГАВРИЛОВ, И. С. ГЕРАСИМЕНКО,
В. А. ДОБРИКОВ, В. Ф. ИВАНОВ, А. В. КОЗЛОВ, И. В. САХНО,
А. Б. СИМОНОВ, Е. А. ТКАЧЕВ

ПРОГРАММНЫЙ ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ “COMPASS”

Представлен разработанный программно-аппаратный комплекс, предназначенный для приема и обработки сигнала спутниковой навигационной системы “Compass” (Китай). Приведены описание технологии программного приема навигационных сигналов, которая обеспечивает возможность корреляционной обработки новых сигналов, а также результаты экспериментов.

Ключевые слова: спутниковая навигация, обнаружение сигнала, программный приемник, программный коррелятор, система “Compass”.

Появление новых сигналов спутниковых навигационных систем обуславливает необходимость разработки навигационной аппаратуры нового поколения и модернизации используемых образцов. Выполнение этих условий возможно при создании новых приемников спутниковых навигационных систем, основанных на технологии программного приема и обработки сигналов.

Используемая для систем ГЛОНАСС/GPS/Galileo технология программного приема позволяет в короткие сроки осуществлять прием и обработку сигналов глобальной спутниковой навигационной системы “Compass” (BeiDou, Китайская Народная Республика). В перспективе к 2020 г. система должна иметь орбитальную группировку в составе 35 спутников, из них пять — на геостационарной орбите, три — на наклонной геосинхронной орбите, четыре — на средневысотной круговой орбите. На момент написания статьи (лето 2013 г.) в системе насчитывалось 13 спутников: шесть геостационарных, три геосинхронных, четыре среднеорбитальных. 27 декабря 2011 г. Управление по спутниковой навигации Китая опубликовало предварительную версию интерфейсного контрольного документа системы “Compass”. Основные параметры сигналов системы “Compass” приведены в таблице.

Обозначение сигнала	Несущая частота, МГц	Ширина спектра, МГц	Тактовая частота дальномерного кода, МГц	Тип модуляции
B1	1561,098	4,092	2,046	QPSK
B1-2	1589,742	4,092	2,046	QPSK
B2	1207,14	24	10,23	QPSK
B3	1268,52	24	10,23	QPSK

Примечание. QPSK — Quadrature Phase Shift Keying (квадратурная фазовая манипуляция).

В настоящей статье, в продолжение работ [1—3], представлено описание экспериментального программного приемника и приведены результаты приема и обработки навигационных сигналов системы “Compass”. Для приема открытого сигнала В1 системы авторами настоящей статьи разработан программно-аппаратный комплекс (макет программного приемника навигационных сигналов). Экспериментальный комплекс, структурная схема которого приведена на рис. 1, содержит широкополосную антенну АТ302 диапазонов L1 и L2, входящую в состав геодезического навигационного приемника LEIKA GPS—System 300; широкополосный малошумящий усилитель (МШУ) с центральной частотой 1590 МГц со сплиттером производства ЗАО „КБ НАВИС“ (Санкт-Петербург); устройство преобразования и оцифровки сигнала на базе блока NI PXIe-1062Q фирмы “National Instruments” (США) и персональный компьютер. В качестве опорного генератора для макета приемника использовался рубидиевый стандарт частоты Ч1-81/2.

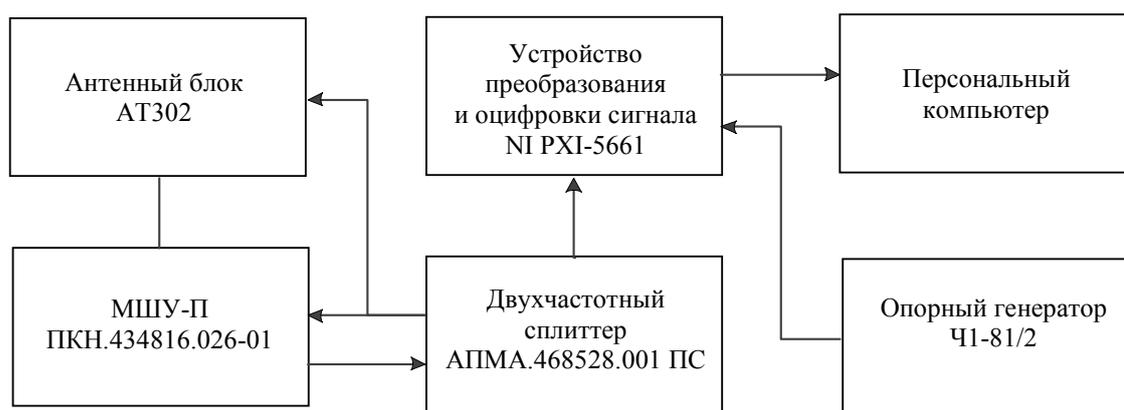


Рис. 1

Антенна, установленная на крыше здания высотой около 40 м, соединена с приемником кабелем длиной 30 м. Сигнал с выхода антенны поступает на МШУ с коэффициентом усиления 29,5 дБ и затем на сплиттер, обеспечивающий подачу питания напряжением 12 В на антенну и на усилитель, а также развязку по питанию с векторным анализатором высокочастотных сигналов NI PXI-5661. Входящий в состав анализатора модуль NI PXI-5600 обеспечивает понижение частоты сигнала до видеочастоты, а модуль NI PXI-5142 обеспечивает аналого-цифровое преобразование квадратурного сигнала с частотой дискретизации 5 МГц в 16-разрядные отсчеты. Далее оцифрованный видеосигнал поступает на персональный компьютер для последующей обработки.

Экспериментальный прием сигнала осуществлялся в Санкт-Петербурге 11.07.2012 г. в 16.49 по московскому времени, когда по данным целеуказаний в зоне радиовидимости находились среднеорбитальные навигационные спутники с номером псевдослучайного дальномерного кода (ПДК, или англ. Pseudo-Random Noise (PRN) Ranging Code) 11 и 12. Обработка записанного сигнала проводилась в два этапа: сначала поиск и обнаружение, затем слежение за параметрами сигнала.

Поиск сигналов по доплеровской частоте осуществлялся в диапазоне ± 5 кГц с шагом 100 Гц, поиск по задержке — на интервале от 0 до 4091 с шагом 0,5 длительности отсчета ПДК, равного $t=0,24$ мкс. Интервал когерентного накопления сигнала в программном корреляторе задавался равным 1 мс, а интервал некогерентного накопления на выходе коррелятора — 5 мс. На рис. 2, а, б представлены результаты обнаружения сигналов спутников с кодами PRN 11 и PRN 12 (а — по задержке, б — по частоте) в виде сечений двумерной корреляционной функции.

Анализ графиков показывает, что сигналы обоих спутников устойчиво обнаруживаются. При этом время запаздывания и доплеровский сдвиг частоты для PRN 11 и PRN 12 составляют соответственно $t_{11} = 8,28$ мкс и $t_{12} = 151,44$ мкс, $F_{d,11} = 900$ Гц и $F_{d,12} = -2300$ Гц.

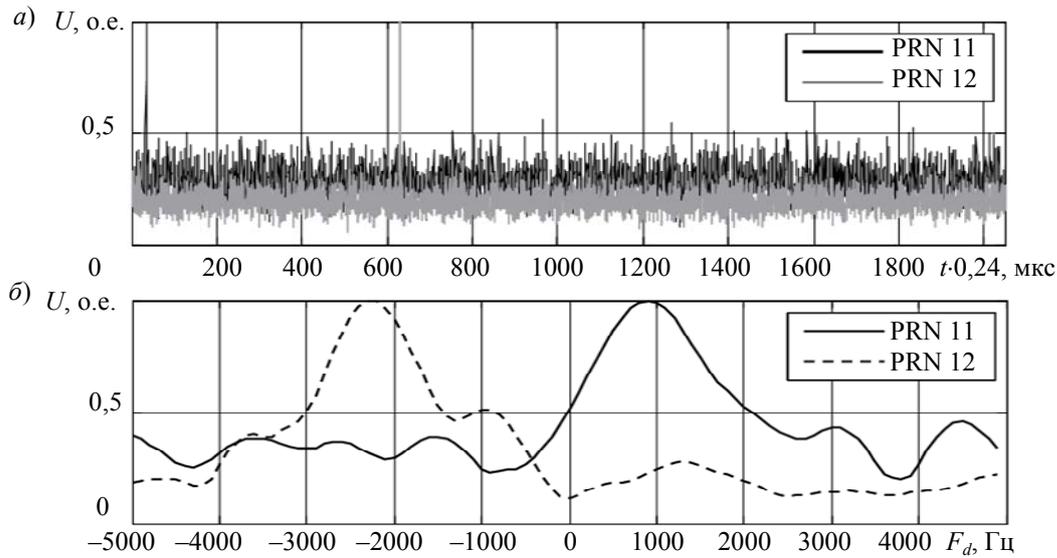


Рис. 2

График результатов некогерентного накопления сигналов с кодами PRN 11 и PRN 12 на выходе коррелятора (рис. 3) показывает, что при увеличении интервала накопления (T) до 200 мс отношение сигнал/шум (q) возрастает от 9—10 до 16,5 дБ.

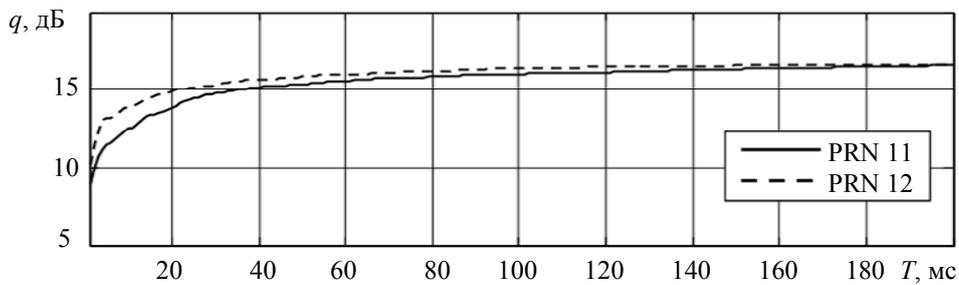


Рис. 3

На рис. 4 представлены синфазная (I) и квадратурная (Q) составляющие сигнала на выходе программного коррелятора в режиме слежения за сигналом спутника с кодом PRN 12. Синфазная составляющая сигнала отражает его модуляцию символами навигационного сообщения, длительность которых составляет 20 мс. Для наглядности представления символов информации сигнал был демодулирован вторичным кодом Ньюмана — Хофмана [4, 5], длительность которого также составляла 20 мс. Выделение навигационного сообщения на время проведения эксперимента не представлялось возможным, поскольку описание структуры навигационного кадра отсутствовало.

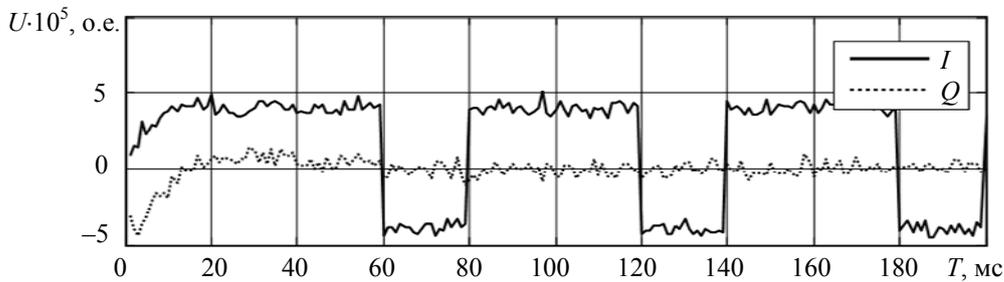


Рис. 4

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

- навигационные сигналы системы “Compass” устойчиво обнаруживаются и отслеживаются по задержке дальномерного кода и несущей частоте;
- основные характеристики принятых навигационных сигналов типа В1 соответствуют заявленным в интерфейсном контрольном документе;

— экспериментальный комплекс на основе макета программного навигационного приемника позволяет отрабатывать технологию приема и обработки сигналов системы “Compass” и сигналов других навигационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахолдин В. С., Герасименко И. С., Добриков В. А., Иванов В. Ф., Сахно И. В., Ткачев Е. А. Применение нейропроцессора L1879VM1 для поиска и обнаружения сигналов ГЛОНАСС/GPS // Прил. к журн. „Нейрокомпьютеры: разработка, применение“. 2006. № 21. С. 95—99.
2. Бахолдин В. С., Герасименко И. С., Добриков В. А., Дубинко Ю. С., Иванов В. Ф., Сахно И. В., Симонов А. Б., Ткачев Е. А. Прием и обработка сигналов первого навигационного спутника системы Galileo // Тр. Второй Всерос. конф. „Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО—2007)“, 2—5 апр. 2007 г., Санкт-Петербург. СПб: Ин-т прикладной астрономии РАН, 2007. Вып. 17. С. 148—157.
3. Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Герасименко И. С., Добриков В. А., Иванов В. Ф., Симонов А. Б., Сахно И. В., Ткачев Е. А. Программный приемник сигналов спутниковых навигационных систем на базе СБИС K1879XK1Я // Тр. ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 230—235.
4. BeiDou-SIS-ICD-Test, 2011-12 [Электронный ресурс]: <<http://www.beidou.gov.cn>>.
5. [Электронный ресурс]: <http://www.witchnav.cz/doku.php?id=beidou_b1_story1>.

Сведения об авторах

- Владимир Алексеевич Авдеев** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: apex7@rambler.ru
- Владимир Станиславович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: bvs@email.ru
- Денис Александрович Гаврилов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: gdanas@yandex.ru
- Игорь Станиславович Герасименко** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: iger60@mail.ru
- Владимир Анатольевич Добриков** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: dwa33@mail.ru
- Вадим Федорович Иванов** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; ст. преподаватель; E-mail: vf_ivanov@list.ru
- Алексей Васильевич Козлов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: kozlov_aleks@mail.ru
- Игорь Викторович Сахно** — д-р техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: Vstrecha10@mail.ru
- Андрей Борисович Симонов** — Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; преподаватель; E-mail: ab_simonov@rambler.ru
- Евгений Андреевич Ткачев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: tke33@mail.ru

Рекомендована кафедрой
космической радиолокации и радионавигации

Поступила в редакцию
27.06.13 г.

В. В. ДАВЫДОВ, В. И. ДУДКИН, А. Ю. КАРСЕЕВ

ПОЛЯРИЗАТОР ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ ТЕКУЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Рассматривается способ локального уменьшения времени продольной релаксации чистой воды в момент нахождения ее в поляризаторе. Приведены результаты экспериментального исследования одновременного влияния постоянного электрического и магнитного полей на время продольной релаксации при различных температурах чистой воды.

Ключевые слова: магнит-поляризатор, сосуд-поляризатор, намагниченность, время продольной релаксации, вязкость.

Введение. В соответствии с требованиями, предъявляемыми в настоящее время к измерительным устройствам, погрешность измерений не должна превышать 0,2—0,5 % [1]. Другим важным требованием, наряду с точностью, является надежность измерителей. Основной показатель надежности — время, в течение которого прибор сохраняет работоспособность при допустимой погрешности измерений. Это время зависит как от конструкции прибора, так и от его назначения и условий применения [2]. Третье требование — обеспечение диапазона измерений физической величины при допустимой погрешности [1, 3].

Ядерно-магнитные измерители физических величин, предназначенные для работы с потоком жидкости, обладают высокой степенью надежности благодаря отсутствию непосредственного контакта с исследуемой средой [4]. Однако для обеспечения точности измерений (при допустимой погрешности) такие измерители должны иметь устройство для эффективного намагничивания. Для полного намагничивания жидкая среда должна находиться в зоне действия магнитного поля в течение времени T_n , не меньшего чем $3T_1$, где T_1 — время продольной релаксации жидкости [5]. В случае нарушения соотношения между T_n и T_1 жидкость намагничивается не полностью [6]. При этом зависимость величины намагниченности жидкости от времени нахождения ее в магнитном поле (на интервале от 0 до $3T_1$) носит нелинейный характер [5, 7]. Максимальная крутизна кривой намагниченности текущей жидкости приходится на интервал от T_1 до $2T_1$. В этом случае, как правило, величина намагниченности составляет 30—80 % от максимально возможной для данного магнитного поля [5, 8, 9]. Если по каким-либо причинам (в основном из-за увеличения скорости протекания) жидкость в поляризаторе находится в течение времени, меньшего $2T_1$, это приводит к высокой погрешности измерений.

Точность измерений в таких приборах определяется отношением сигнал/шум в схеме регистрации сигнала ЯМР и связана как с однородностью магнитного поля в зоне расположения катушки регистрации, так и с величиной намагниченности жидкости [10, 11]. Однородность магнитного поля в зоне расположения катушки регистрации сигнала ЯМР — постоянная величина, так как влияние внешних воздействий устраняется конструктивными осо-

бенностями прибора; величина однородности может измениться только при значительном изменении температуры окружающей среды, что приведет к разогреву магнитов. Поэтому отношение сигнал/шум в схеме регистрации сигнала ЯМР в основном будет определяться величиной намагниченности жидкой среды и временем действия релаксационных процессов при протекании жидкости от поляризующей магнитной системы до катушки регистрации сигнала ЯМР.

Намагничивание жидкости и релаксационные процессы. Амплитуда сигнала ЯМР в катушке регистрации пропорциональна величине намагниченности жидкой среды. Намагниченность жидкости, поступившей в катушку регистрации, описывается следующей формулой [5]:

$$M_p = \chi_0 H_n \left[1 - \exp\left(-\frac{V_n}{qT_1}\right) \right] \exp\left(-\frac{V_{тр}}{qT_1}\right), \quad (1)$$

где χ_0 — статическая ядерная магнитная восприимчивость; H_n — напряженность поля в зазоре магнита-поляризатора, V_n — объем сосуда-поляризатора жидкости; q — расход жидкости; $V_{тр}$ — объем соединительного трубопровода между поляризатором и катушкой регистрации.

Согласно выражению (1) существует оптимальный расход жидкости $q_{опт}$, при котором величина намагниченности максимальна. Отклонение от значения $q_{опт}$ приводит к уменьшению намагниченности, что автоматически уменьшает амплитуду регистрируемого сигнала ЯМР. Уменьшение величины M_p вследствие уменьшения или увеличения q до значения, при котором отношение сигнал/шум становится меньше трех, для проведения измерений в реальном времени недопустимо (погрешность измерения превышает 1 %). По значениям расхода q_1 и q_2 , при которых отношение сигнал/шум равно трем, определяется динамический диапазон измерения физической величины.

В связи с тем, что в технологических процессах часто используются потоки жидкости с большими расходами, при измерениях возникают проблемы, связанные с неполным намагничиванием жидкости. В настоящее время технологии создания принципиально новых высокоэнергетичных магнитных материалов практически себя исчерпали. Поэтому одним из обоснованных решений увеличения намагниченности для турбулентного потока жидкости с большим расходом является локальное уменьшение времени продольной (спин-решеточной) релаксации жидкости в момент нахождения ее в магнитной системе.

Для реализации этой задачи авторами предложен способ локального уменьшения времени релаксации T_1 и проведена его экспериментальная проверка. Для формирования турбулентного потока жидкости в момент нахождения ее в магнитной системе разработана конструкция сосуда-поляризатора.

Методика эксперимента. В качестве жидкой среды в эксперименте использовалась чистая вода (водопроводная вода, очищенная от механических примесей) комнатной температуры. Выбор в пользу чистой воды сделан, в первую очередь, вследствие изученности и простоты данной среды, а также достаточно большого времени продольной релаксации $T_1=3,6$ с при комнатной температуре (около 20 °С) по сравнению с другими жидкими средами. Кроме того, при незначительных колебаниях (± 2 °С) комнатной температуры (что может происходить во время эксперимента) изменения T_1 незначительны [12].

Механизм формирования времени релаксации T_1 для чистой воды обусловлен вращательным и поступательным (трансляционным) движением ее молекул, вызванным диполь-дипольным взаимодействием протонов [13]. Экспериментально установлено, что вклад в величину T_1 при вращательном движении молекул в три раза больше, чем при поступательном.

Время продольной релаксации для жидких сред, содержащих молекулы с двумя одинаковыми спинами, равными $1/2$, рассчитывается по следующей формуле [10, 13]:

$$T_1 = \frac{kt}{2\pi h^2 \gamma^4 \eta} \left(\frac{b^6}{a^3} + \frac{5}{3\pi N} \right), \quad (2)$$

где t — температура воды; a — радиус твердой сферы, при котором молекула аппроксимируется по формуле Стокса; b — расстояние между протонами; N — число протонов в 1 см^3 ; η — вязкость воды; k — постоянная Больцмана; h — постоянная Планка; γ — гиромагнитное отношение.

При постоянных значениях температуры и скорости потока жидкости изменение T_1 будет связано с изменением вязкости или факторами, влияющими на нее [10, 13].

Метод, позволяющий сократить время релаксации при нахождении жидкости в сосуде-поляризаторе, разработан с учетом особенностей строения молекулы воды, а также механизмов формирования времени T_1 . Для этих целей была разработана новая конструкция устройства намагничивания жидкости — поляризатора, структурная схема которого приведена на рис. 1, где 1 — полюсы постоянного магнита; 2 — сосуд-поляризатор; 3 — проводящие пластинки; 4 — участок трубопровода; 5 — изолирующие прокладки; 6 — источник постоянного напряжения.

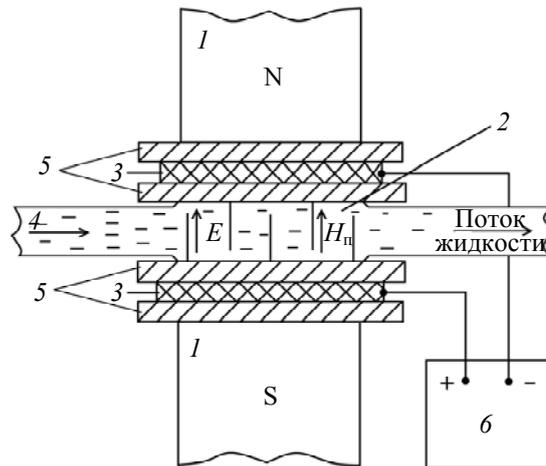


Рис. 1

В разработанной конструкции между полюсными наконечниками постоянного магнита с $B_n = 0,862 \text{ Тл}$ ($H_n = 685\,954 \text{ А/м}$) расположены две пластинки, на которые подается постоянное напряжение U . Расстояние между пластинками 14 мм. В результате в сосуде-поляризаторе, расположенном между пластинками, на поток чистой воды оказывает воздействие, кроме постоянного магнитного поля, еще и постоянное электрическое поле. Под действием сильного электрического поля изменяется средняя ядерная конфигурация молекул: электрический дипольный момент молекул воды выстраивается по полю E , а также смещаются электронные облака отрицательного заряда в пространстве вокруг ядер [13, 14].

Для того чтобы наблюдать уменьшение T_1 , необходимо, регулируя расход воды, переместить „точку регистрации“ сигнала ЯМР на спадающий участок кривой намагниченности [11, 15]. Было установлено, что при таком расходе для данного трубопровода в диапазоне температур от 15 до $26 \text{ }^\circ\text{C}$ число Рейнольдса превышает 3000. Это означает, что поток жидкости — турбулентный [16]. В этом случае основное влияние на вязкость потока чистой воды оказывает динамический коэффициент турбулентной вязкости η_t . При дальнейшем увеличении скорости и температуры потока влияние других компонентов вязкости снижается [16].

Для создания турбулентного потока при малых расходах жидкости и низких температурах в разработанной конструкции магнита-поляризатора реализована новая конструкция сосуда-поляризатора. В этом сосуде турбулентность создается перемешиванием двух встречных

потоков, что допустимо при небольших скоростях потока жидкости [16]. На рис. 2 представлена конструкция сосуда-поляризатора со схемой течения жидкости. Измерения показали, что гидравлические потери при использовании данной конструкции увеличатся на 6—7 % по сравнению с потерями при применении классической конструкции.

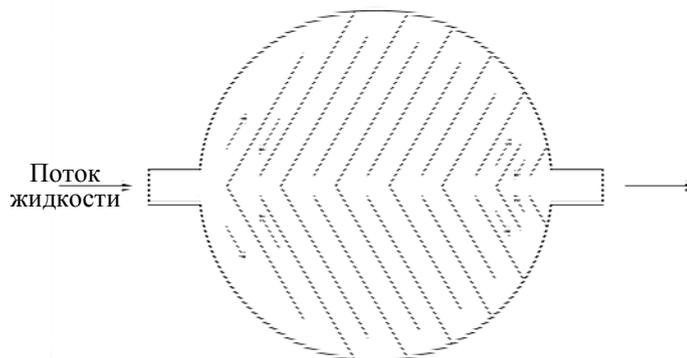


Рис. 2

Турбулентная вязкость сложным образом зависит от многих параметров потока, в частности от турбулентной пульсации скорости, на которую влияют энергии вращения и колебания в молекуле [14, 16]. В сильном электрическом поле увеличивается дипольный момент молекулы, что приводит к уменьшению этих энергий [14].

Для нескольких значений комнатной температуры (при этих температурах омагниченную чистую воду используют для производства „тяжелой“ воды и приготовления биологических растворов) было исследовано влияние электрического поля на время продольной релаксации T_1 . Для измерений T_1 с минимальной погрешностью экспериментальная установка была сконструирована таким образом, чтобы все измерения проводились при оптимальном расходе жидкости $q_{\text{опт}}$ и отношении сигнал/шум, равном 40 и выше. В соответствии со стандартной методикой, используемой, например, в минитографах при измерении времени релаксации [17], цикл измерения времени продольной релаксации повторялся 10 раз для усреднения данных по значениям T_1 и оценки погрешности измерения. На рис. 3 представлены полученные зависимости для различных значений температуры потока чистой воды: 1 — $t = 16,2$ °C; 2 — $t = 19,4$ °C; 3 — $t = 25,1$ °C.

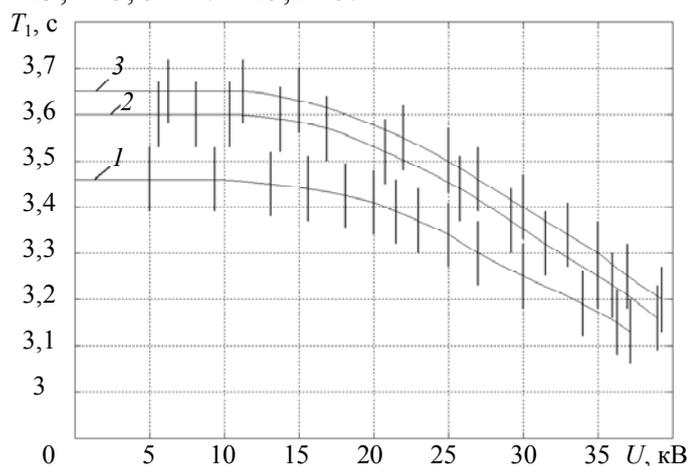


Рис. 3

На основе полученных экспериментальных результатов можно сделать следующий вывод: под действием сильного электрического поля (близкого по величине напряжению пробоя воздуха) значение T_1 уменьшается, что позволяет его достоверно зарегистрировать. Экспериментальные данные согласуются с теоретическими представлениями о том, что при увеличении температуры чистой воды измеренные величины T_1 при одинаковом воздействии электрического поля будут увеличиваться.

Заключение. Предложенный метод и разработанные конструкции поляризатора и сосуда-поляризатора представляют интерес и для практики, и для физики магнитных явлений. При этом надежность модифицированного прибора не ухудшилась.

Кроме того, перспективными представляются исследования по структуре льда, полученного из чистой воды, подвергшейся одновременному воздействию электрического и магнитного полей. Такой лед может быть получен, например, путем быстрой заморозки чистой воды сразу после воздействия на нее этих полей на выходе из поляризатора как в кювете, так и в ответвлении трубопровода. Лед представляет собой поликристаллическое тело, в котором кристаллическая структура определяется строением молекул воды и некоторыми ее макроскопическими свойствами — вязкостью, модулем упругости и др. [18]. Значительное уменьшение времени продольной релаксации T_1 в жидкой среде, связанное с увеличением вязкости среды, может вызвать изменения в кристаллической структуре льда.

В настоящее время известны 3 аморфные разновидности и 15 кристаллических модификаций льда. Возможное появление новых модификаций льда представляет как научный, так и практический интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабардина С. И., Шефер Н. И. Измерения физических величин. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2009. 152 с.
2. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. М.: Лань, 2005. 112 с.
3. Davydov V. V. Applying of nuclear-magnetic flowmeter-relaxometer for sewage control // Thes. of the 6th Intern. Youth Environmental Forum "ECOBALTICA'2006". St. Petersburg, 2006. P. 142.
4. Давыдов В. В., Семенов В. В. Нестационарный режим работы нутационных ЯМР расходомеров и магнитометров // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 3. С. 151—153.
5. Жерновой А. И., Латышев Г. Д. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. М.: Атомиздат, 1964. 254 с.
6. Жерновой А. И., Стасевич В. М. Расходомер жидкости на принципе ЯМР // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1965. Т. 8, № 2. С. 6—30.
7. Брановер Г. Г., Циннобер А. Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. М.: Наука, 1970. 380 с.
8. Davydov V. V. The different work regimes of the nutation nuclear-magnetic flowmeter // Contemporary Technical Physics, J. of Boston Phys. Soc. 1998. Vol. 9, N 3. P. 74—77.
9. Давыдов В. В. Влияние неоднородного магнитного поля на время продольной релаксации T_1 текущей жидкости // Инженерно-физич. журн. 2000. Т. 73, № 4. С. 819—822.
10. Лёше А. Ядерная индукция. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 678 с.
11. Жерновой А. И. Ядерно-магнитные расходомеры. Л.: Машиностроение, 1985. 136 с.
12. Davydov V. V. The calculation relaxation times T_1 and T_2 for flow liquid // Intern. J. of Modern Physics. 1998. Vol. 7, N 9. P. 798—801.
13. Абрагам А. Ядерный магнетизм. М.: Изд-во иностр. лит., 1967. 686 с.
14. Татевский В. В. Строение молекул. М.: Химия, 1977. 512 с.
15. Давыдов В. В., Дудкин В. И. Режим работы меточного ЯМР-расходомера на основе эффекта параметрического резонанса // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 5. С. 49—51.
16. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
17. Марусина М. Я., Нейронов Ю. И. Метод определения времени релаксации протонов моторного масла и возможности его практического использования // Науч. приборостроение. 2010. Т. 20, № 2. С. 37—41.
18. Богородский В. В., Гаврилов В. П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 584 с.

Сведения об авторах

- Вадим Владимирович Давыдов** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;
E-mail: davydov_vadim66@mail.ru
- Валентин Иванович Дудкин** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;
E-mail: vidoodkin@mail.ru
- Антон Юрьевич Карсеев** — студент; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра квантовой электроники;
E-mail: antonkarseev@gmail.com

Рекомендована кафедрой
квантовой электроники

Поступила в редакцию
02.10.13 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.733:621.314.33

Г. И. ПЕРЕДЕЛЬСКИЙ

МОСТОВЫЕ ЦЕПИ С ИМПУЛЬСНЫМ ПИТАНИЕМ И УРАВНОВЕШИВАНИЕМ ЗАЗЕМЛЕННЫМИ РЕГУЛИРУЕМЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Представлено решение задачи определения параметров сложных двухполюсников с использованием мостовых цепей с импульсным питанием и отдельным уравниванием заземленными регулирующими элементами. Сформулированы условия равновесия измерительных цепей и предложены аналитические соотношения для расчета параметров двухполюсников с использованием экспериментально полученных результатов.

Ключевые слова: мостовая цепь, импульсное питание, условие равновесия, регулируемый элемент.

Во входных узлах устройств сбора и первичной обработки информации используются измерительные цепи, к которым подключаются различные датчики. Одной из разновидностей измерительных цепей являются мостовые электрические цепи. Первые публикации о результатах исследования мостовых цепей с импульсным питанием [1, 2] относятся к середине прошлого века. Разработаны такие мостовые цепи для определения параметров двухэлементных [3], трехэлементных [4] и четырехэлементных [5] двухполюсников. Среди вариантов решения задачи определения параметров многоэлементных двухполюсников [6] были названы именно устройства на основе мостовых цепей с импульсным питанием.

Многоэлементный двухполюсник может состоять из эквивалентной схемы датчика, датчика вместе с линией связи, включенных совместно нескольких параметрических датчиков, например, подключенных к одной мостовой цепи двух резистивных и двух емкостных датчиков.

В устройствах сбора и первичной обработки информации нагрузкой генератора питающих импульсов является мостовая цепь с включенным в нее датчиком (или датчиками). С увеличением скважности импульсов уменьшаются средняя мощность, потребляемая мостовой цепью, и средние мощности на элементах мостовой цепи, в том числе и на датчике. Это вызывает уменьшение температурной составляющей погрешности измерения. В частности, посредством выбора соответствующей (большой) скважности импульсов можно уменьшить и размеры датчика, и температурную составляющую погрешности, при этом уменьшаются вносимые тепловые и электрические искажения.

Импульсный характер выходного сигнала мостовой цепи позволяет применять известные в импульсной технике методы выделения информативных сигналов из помех. Так, для подавления низкочастотной помехи питание мостовой цепи осуществляется парными двухполярными импульсами напряжения и применяется схема вычитания [7], в которой напряже-

ния помехи вычитаются, а напряжения информативного сигнала суммируются. В случаях когда данные методы являются важными или даже определяющими, целесообразно использовать мостовые цепи с импульсным питанием: например, в помещениях для прочностных и теплопрочностных испытаний крупногабаритных и дорогостоящих изделий, где весьма высок уровень помех [7, 8].

В работе [9] обоснована возможность в паузе между импульсами отключать электронные блоки, особенно электроемкие, от источников постоянного напряжения устройств на основе мостовых цепей с импульсным питанием. Это позволяет экономить электроэнергию, что улучшает энергетические показатели устройств. Время хранения радиоэлектронных элементов заметно превышает гарантированный срок их эксплуатации, поэтому такие показатели названных устройств, как срок службы и надежность повышаются. Реальное время работы отключаемых электронных блоков существенно меньше времени работы аппаратуры во включенном состоянии. Это реальное время уменьшается приблизительно в двадцать раз при скажности питающих мостовую схему импульсов, равной двадцати. Малое потребление энергии, увеличение срока службы и повышение надежности являются важными показателями для различной аппаратуры.

В четырехплечих мостовых электрических цепях с импульсным питанием для отдельного уравнивания необходимо обеспечить выполнение двух положений:

- 1) питание мостовых цепей следует осуществлять импульсами с изменением напряжения во время импульса по закону степенных функций;
- 2) двухполюсник с элементами уравнивания должен совпадать по количеству элементов, их свойствам и способу включения с двухполюсниками одной из структур, приведенных в работе [10].

Результаты анализа более двухсот мостовых цепей с отдельным уравниванием, приведенные в работе [5], позволяют определять параметры всех вариантов реальных (имеющих потери) двухэлементных, трехэлементных и четырехэлементных двухполюсников [6]. Количество их настолько большое, что исключена необходимость в мостовых цепях, в которых свойство отдельного уравнивания отсутствует.

На рис. 1—3 приведены схемы четырехплечих мостовых цепей I, II, III, где сплошными линиями показаны цепи, для которых выполняются оба вышеприведенных условия. В известной мостовой цепи I (см. рис. 1) [11] элементы уравнивания включены в резистивно-емкостный двухполюсник $C1—R1—C2—R2$; в мостовой цепи II (см. рис. 2) [12] — в резистивно-индуктивный двухполюсник $R1—L1—R2—L2$, и, наконец, в мостовой цепи III (см. рис. 3) [5] — в двухполюсник с разнородными реактивными элементами $C1—R1—L1—R2$.

Мостовые цепи уравниваются образцовыми регулируемыми элементами: резисторами переменного сопротивления, конденсаторами переменной емкости и катушками переменной индуктивности. Размеры таких элементов существенно больше, чем размеры элементов с нерегулируемыми параметрами. Поэтому паразитные емкости относительно „земли“ незаземленных образцовых регулируемых элементов тоже значительно больше. Паразитные емкости предопределяют соответствующую составляющую погрешности измерения. Эта составляющая возникает из-за нестабильности паразитных емкостей, так как они существенно изменяются с течением времени вследствие изменения влажности, старения, расположения окружающих предметов в пространстве и, особенно, изменения температуры. На незаземленные регулируемые уравнивающие элементы в более сильной степени влияют электромагнитные помехи и наводки. Для ослабления этого влияния уравнивающие элементы помещают в электрические и магнитные экраны [13]. При этом возникает вопрос, с какой вершиной мостовой цепи лучше соединять экраны. Каждый из имеющихся вариантов соединения не является безупречным. Для заземленных уравнивающих элементов очевидно, что экраны следует соединять с „землей“.

Регулируемый уравнивающий элемент, например резистор, может быть выполнен в виде матрицы резисторов, коммутируемых электронными ключами. В этом случае приходится использовать дополнительные „развязывающие“ элементы (трансформаторы, оптронные пары) и согласующие схемы. В мостовых устройствах, при прочих равных условиях, предпочтение отдается мостовым цепям с наибольшим числом заземленных регулируемых элементов уравнивания, и лучшим является вариант, когда заземлен один из двух выводов.

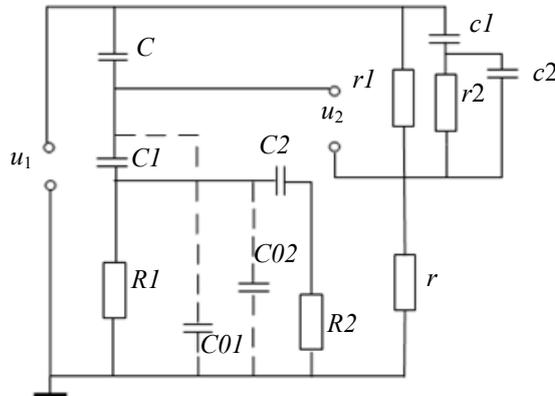


Рис. 1

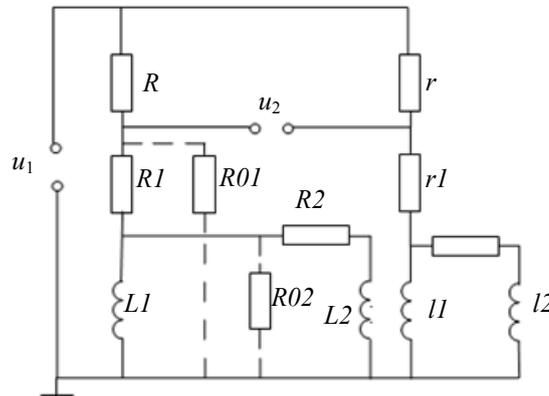


Рис. 2

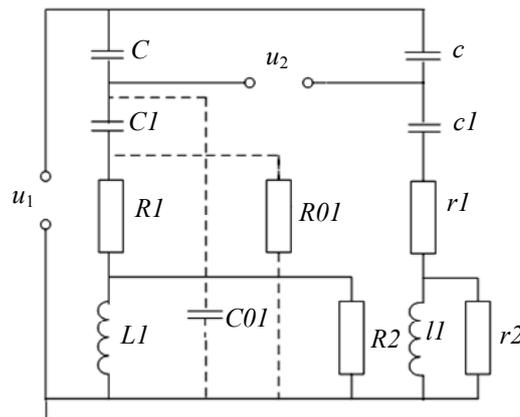


Рис. 3

В настоящей статье поставлена задача обосновать целесообразность использования мостовых цепей, уравнивающихся только заземленными регулируемыми элементами.

Рассмотрим сначала мостовую цепь I (см. рис. 1). В данном случае целесообразно в двухполюсник с уравнивающими элементами мостовой цепи вводить такой же элемент, как и незаземленный, и один из его выводов соединять с общей шиной (заземлять). Так как в мостовой цепи I таких элементов два — $C1$ и $C2$, то следует вводить два дополнительных конденсатора $C01$ и $C02$ (показаны пунктирными линиями), и один из двух выводов каждого

из них заземлять. Для конденсатора $C01$ вывод можно соединять с измерительной диагональю первой ветви мостовой цепи, а для конденсатора $C02$ — с общим выводом резистора $R1$ и конденсатора $C2$. Вторым вариантом соединения — включение конденсатора $C01$ параллельно резистору $R1$, а конденсатора $C02$ — параллельно резистору $R2$. Первый вариант соединения оказался перспективным.

Конденсаторы $C01$ и $C02$ заземлены и их следует выбирать в качестве регулируемых уравнивающих элементов. В этом случае конденсаторы $C1$ и $C2$ имеют постоянное (нерегулируемое) значение емкости и меньшие по сравнению с конденсаторами $C01$ и $C02$ размеры.

При обобщенном анализе [14] выражение для выходного напряжения мостовой цепи содержит условия ее равновесия и обобщенные коэффициенты. Последние не имеют принципиального значения, выражаются громоздкими формулами и здесь не приводятся. Рассмотрим условия равновесия мостовой цепи.

На первом этапе уравнивания на мостовую цепь I подается последовательность импульсных сигналов прямоугольной формы. От момента окончания переходного процесса и до момента окончания импульса в выходном импульсе мостовой цепи имеется плоская вершина. Напряжение этой плоской вершины приводится к нулю однократной регулировкой заземленного уравнивающего конденсатора $C01$ и тем самым выполняется первое условие равновесия мостовой цепи:

$$A_1 = Cr_1 - r(C_1 + C_{01}) = 0. \quad (1)$$

Затем на втором этапе на мостовую цепь подается последовательность импульсов линейно изменяющегося напряжения. В этом случае каждый импульс напряжения неравновесия (выходное напряжение) мостовой цепи также имеет плоскую вершину. Напряжение такой вершины приводится к нулю однократной регулировкой заземленного резистора $R1$, что обеспечивает выполнение второго условия равновесия:

$$A_2 = C_1 R_1 (Cr_1 - C_{01} r) - c_1 r r_1 (C_1 + C_{01}) = 0. \quad (2)$$

В результате этого действия первое условие равновесия не нарушается, так как регулируемый параметр $R1$ не входит в выражение (1). Это избавляет от неоднократной регулировки двух параметров.

Далее на третьем этапе на мостовую цепь поступают квадратичные импульсы напряжения. По окончании переходного процесса каждый импульс напряжения неравновесия имеет плоскую вершину, напряжение которой приводится к нулю однократной регулировкой заземленного конденсатора $C02$, что обеспечивает выполнение третьего условия равновесия мостовой цепи:

$$A_3 = CC_1 r_1 r_2 - r[(C_1 + C_{01})(C_2 + C_{02})r_1 + C_1 C_{01}(r_1 + r_2)] = 0. \quad (3)$$

При этом условия (1) и (2) по-прежнему выполняются, так как регулируемый параметр $C02$ в них не содержится; это избавляет от многократной регулировки в данном случае трех, а в общем случае нескольких уравнивающих параметров.

Наконец, на четвертом этапе на мостовую цепь подаются кубические импульсы. По окончании переходного процесса импульсы напряжения неравновесия имеют плоские вершины, напряжение которых приводится к нулю посредством однократной регулировки заземленного резистора $R2$. В результате выполняется четвертое условие равновесия:

$$A_4 = C_1 C_2 R_2 r_2 (Cr_1 - C_{01} r) - C_2 r r_1 R_2 (C_1 C_{01} + C_1 C_{02} + C_{01} C_{02}) - c_2 r r_1 r_2 [C_1 C_{01} + (C_1 + C_{01})(C_2 + C_{02})] = 0. \quad (4)$$

Как и ранее, предыдущие три условия равновесия не нарушаются, так как регулируемое сопротивление $R2$ в них не входит.

Мостовая цепь I к полному равновесию не приводится. После четырех этапов уравнивая каждый импульс напряжения неравновесия содержит всплески в начале импульса и после его окончания. Всплески напряжения, определяемые суммой экспоненциальных слагаемых, в течение переходного процесса затухают до нуля. Такие мостовые цепи относят к квазиуравновешенным.

Для мостовой цепи I отсчет искомых параметров r_1, c_1, r_2, c_2 производится исходя из четырех условий равновесия (1)—(4):

$$r_1 = r \frac{C_1 + C_{01}}{C}, \quad (5)$$

$$c_1 = C_1 R_1 \frac{C r_1 - C_{01} r}{r r_1 (C_1 + C_{01})}, \quad (6)$$

$$r_2 = r r_1 \frac{C C_{01} + (C_1 + C_{01})(C_2 + C_{02})}{C_1 (C r_1 - C_{01} r)}, \quad (7)$$

$$c_2 = C_2 R_2 \frac{C_1 r_2 (C r_1 - C_{01} r) - r r_1 (C_1 C_{01} + C_1 C_{02} + C_{01} C_{02})}{r r_1 r_2 [C_1 C_{01} + (C_1 + C_{01})(C_2 + C_{02})]}. \quad (8)$$

В правой части выражения (5) значения всех параметров известны. Полученное из него значение сопротивления r_1 используется в последующих формулах (6) — (8) для определения значений параметров двухполюсника. Аналогично значение емкости c_1 , полученное из формулы (6), и значение сопротивления r_2 , полученное из (7), используются в последующих выражениях.

Для уравнивания четырехплечей мостовой цепи I (см. рис. 1) только заземленными регулируемыми элементами в резистивно-емкостный двухполюсник вводятся дополнительные элементы. Аналогичным образом дополнительные элементы можно вводить в резистивно-индуктивный двухполюсник с уравнивающими элементами. В частности, в известной [12] мостовой цепи (показана сплошными линиями на рис. 2) в резистивно-индуктивный двухполюсник следует вводить уравнивающие резисторы $R01$ и $R02$ (показаны пунктирными линиями), так как в нем имеются незаземленные резисторы $R1$ и $R2$. Один из выводов каждого из резисторов $R01, R02$ заземлен, другой вывод можно подключить к имеющимся элементам только двумя способами.

Мостовая цепь II (см. рис 2), как и предыдущая I, уравнивается в четыре этапа. На каждом из этапов на мостовую цепь подается последовательность импульсов одной из форм: прямоугольной, линейно изменяющейся, квадратичной или кубической; однократной регулировкой соответствующего заземленного элемента приводится к нулю напряжение плоской вершины выходных импульсов мостовой цепи. Последовательность регулирования уравнивающих элементов — $R01, L1, R02, L2$.

Отсчет определяемых параметров r_1, l_1, r_2, l_2 производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{r R_1 R_{01}}{R(R_1 + R_{01})}, \\ l_1 &= L_1 \frac{r R_{01} - R r_1}{R(R_1 + R_{01})}, \\ r_2 &= R_2 R_{02} \frac{r R_{01} - R r_1}{R[(R_1 + R_{01})(R_2 + R_{02}) + R_2 R_{02}]}, \\ l_2 &= L_2 \frac{R_{02}(r R_{01} - R r_1) - R r_2 (R_1 + R_{01} + R_{02})}{R[(R_1 + R_{01})(R_2 + R_{02}) + R_2 R_{02}]}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В четырехплечих мостовых цепях (см. рис. 1, 2) в двухполюсниках с уравнивающими элементами имеются только однородные реактивные элементы (конденсаторы или катушки индуктивности). Схема создания мостовых цепей с уравниванием только заземленными регулирующими элементами сохраняется и при разнородных реактивных элементах в двухполюснике с уравнивающими элементами. Так, в двухполюснике $C1, R1, L1, R2$ с элементами уравнивания мостовой цепи III (показано сплошными линиями на рис. 3) содержатся разнородные реактивные элементы [5]. Ни один из выводов конденсатора $C1$ и резистора $R1$ не заземлен. Поэтому в двухполюсник также следует вводить дополнительные конденсатор $C01$ и резистор $R01$, один из выводов которых соединяется с „землей“. Другой вывод конденсатора $C01$ можно подключить к общим выводам либо конденсаторов C и $C1$, либо конденсатора $C1$ и резистора $R1$, либо резистора $R1$ и катушки индуктивности $L1$. К положительному результату приводит первый вариант соединения (показан пунктирными линиями). Незаземленный вывод резистора $R01$ можно соединять с общими выводами конденсатора $C1$ и резистора $R1$, а также конденсаторов C и $C1$. Здесь к положительному результату приводит тоже первый вариант (показан пунктирными линиями). Тогда конденсатор $C1$ и резистор $R1$ следует выбирать с постоянными значениями параметров, а мостовую цепь уравнивать только заземленными регулирующими элементами $C01, R01, L1, R2$.

При рассмотрении мостовой цепи III (см. рис. 3) используется аналогичный схемам I и II подход. В данном случае последовательность регулирования уравнивающих элементов — $C01, R01, L1, R2$. Отсчет искомых параметров c_1, r_1, l_1, r_2 производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= c \frac{C_1 + C_{01}}{C}, \\ r_1 &= C_1 R_1 R_{01} \frac{C c_1 - c C_{01}}{c c_1 (C_1 + C_{01})(R_1 + R_{01})}, \\ l_1 &= \frac{L_1 C_1 R_{01} (C c_1 - c C_{01}) - c c_1 r_1 (L_1 C_1 + L_1 C_{01} + C_1 C_{01} R_1 R_{01})}{c c_1 (C_1 + C_{01})(R_1 + R_{01})}, \\ r_2 &= l_1 R_2 \frac{L_1 C_1 R_{01} (C c_1 - c C_{01}) - c c_1 r_1 (L_1 C_1 + L_1 C_{01} + C_1 C_{01} R_1 R_{01})}{c c_1 [L_1 C_1 C_{01} r_1 R_{01} (R_1 + R_2) + l_1 R_2 (L_1 C_1 + L_1 C_{01} + C_1 C_{01} R_1 R_{01}) + l_1 L_1 (C_1 + C_{01})(R_1 + R_{01})]}. \end{aligned} \right\} (10)$$

При необходимости в мостовые цепи можно вводить не два дополнительных заземленных элемента уравнивания, а только один, причем любой. Например, в мостовую цепь III можно ввести дополнительный регулируемый конденсатор $C01$, а дополнительный резистор $R01$ не вводить. Тогда последовательность регулирования элементов на различных этапах уравнивания мостовой цепи — $C01, R1, L1, R2$, и один из четырех регулируемых элементов, а именно резистор $R1$, является незаземленным. При этом первая формула в системе уравнений (10) сохраняется, а остальные три формулы принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= C_1 R_1 \frac{C c_1 - c C_{01}}{c c_1 (C_1 + C_{01})}, \\ l_1 &= c_1 \frac{L_1 (C c_1 - c C_{01}) - c c_1 C_{01} R_1 r_1}{c c_1 (C_1 + C_{01})}, \\ r_2 &= l_1 C_1 R_2 \frac{L_1 (C c_1 - c C_{01}) - c c_1 C_{01} R_1 r_1}{c c_1 [L_1 C_1 C_{01} r_1 (R_1 + R_2) + l_1 C_1 C_{01} R_1 R_2 + l_1 L_1 (C_1 + C_{01})]}. \end{aligned} \right\} (11)$$

Четырехплечие мостовые цепи на основе левых ветвей (см. рис. 1, 2) предназначены для определения параметров двухполюсников с однородными реактивными элементами, всех двухэлементных и всех трехэлементных двухполюсников. Среди четырехэлементных имеются такие двухполюсники, параметры которых однозначно не определяются. В работе [6] они

названы неразрешимыми двухполюсниками. Мостовые цепи I и II позволяют определять параметры всех разрешимых четырехэлементных двухполюсников с однородными реактивными элементами, а мостовая цепь III — параметры восьми вариантов четырехэлементных двухполюсников с двумя разнородными реактивными элементами [5].

Рассмотренные мостовые цепи прошли экспериментальную проверку на моделях с помощью программы Workbench 9.0 и на реальных лабораторных макетах. Результаты испытаний подтвердили приведенные в статье положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эйтц Дж. Г., Лукас Д. Х., Джонсон Д. Д.* Метод многоканального измерения физических величин при помощи импульсных методов применительно к исследованию напряжений // Прикладная механика и машиностроение. 1952. № 4. С. 3—25.
2. *Юдин Е. Е.* Анализ импульсных мостовых схем // Автоматика и телемеханика. 1962. № 3. С. 407—412.
3. *Каменев Л. В.* Мостовые импульсные схемы для измерения электропроводности и диэлектрической проницаемости // Автоматизация химических производств. 1962. Вып. 1. С. 39—41.
4. А.с. 467273, СССР. Автоматический мост переменного тока / *А. А. Чеснис* // Б.И. 1975. № 14.
5. *Передельский Г. И.* Мостовые цепи с импульсным питанием. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
6. *Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П.* Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
7. *Цапенко М. П., Диковский Я. М., Картюк Б. В.* и др. Тензометрическая система для прочностных испытаний // Приборы и системы управления. 1976. № 1. С. 31—33.
8. *Серьезнов А. Н.* Измерения при испытаниях авиационных конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1976. 238 с.
9. А.с. 1567985, СССР. Мостовое измерительное устройство / *Г. И. Передельский* // Б.И. 1990. № 20.
10. *Передельский Г. И.* О свойстве многоэлементных электрических цепей // Электричество. 1989. № 2. С. 73—75.
11. *Передельский Г. И., Нечаев И. А., Нечаева Н. Н.* Упрощение анализа измерительных цепей с многоэлементными двухполюсниками // Измерительная техника. 1995. № 10. С. 48—50.
12. А.с. 1150555, СССР. Мостовой измеритель параметров пассивных двухполюсников / *Г. И. Передельский, А. У. Касьянов* // Б.И. 1985. № 14.
13. *Карандеев К. Б.* Специальные методы электрических измерений. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. 344 с.
14. *Передельский Г. И.* Многоплечие мостовые цепи с уравниванием регулируемыми резисторами // Измерительная техника. 1999. № 6. С. 50—54.

Сведения об авторе

Геннадий Иванович Передельский — д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра электроснабжения, Курск;
E-mail: kafedra.es@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
электроснабжения

Поступила в редакцию
16.05.13 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317

Л. Н. АНДРЕЕВ, В. В. ЕЖОВА, Г. С. ДЕГТЯРЕВА

МОДУЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматривается принцип синтеза оптических модулей, их типы и коррекционные свойства. Приведены оригинальные оптические схемы и результаты абберационного расчета оптических систем различного назначения.

Ключевые слова: оптический модуль, абберации, асферика, объектив, окуляр, конденсор.

Модульный принцип проектирования оптических систем, базирующийся на использовании основ теории аббераций третьего порядка [1—6], заключается в том, что системы синтезируются из оптических элементов (модулей) с известными коррекционными свойствами.

В качестве оптических модулей при расчете оптических систем различного назначения, в том числе светосильных объективов, конденсоров, объективов и окуляров микроскопа, используются апланатические мениски с различным линейным увеличением, линзы с асферическими поверхностями второго порядка и гиперхроматические линзы.

Выражения для коэффициентов аббераций третьего порядка (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5) определяют монохроматические абберации оптических систем, состоящих из тонких компонентов [1]:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \sum_{N=1}^{N=k} hP; \\ S_2 &= \sum_{N=1}^{N=k} HP - J \sum_{N=1}^{N=k} W; \\ S_3 &= \sum_{N=1}^{N=k} \frac{H^2}{h} P - 2J \sum_{N=1}^{N=k} \frac{H}{h} W + J^2 \sum_{N=1}^{N=k} \Phi; \\ S_4 &= \sum_{N=1}^{N=k} \Phi\pi, \quad \pi \approx \frac{1}{n} \approx 0,65; \\ S_5 &= \sum_{N=1}^{N=k} \frac{H^3}{h^2} P - 3J \sum_{N=1}^{N=k} \frac{H^2}{h^2} W + J^2 \sum_{N=1}^{N=k} \Phi(3 + \pi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $N=1\dots k$ — число компонентов; h и H — высоты пересечения первого и второго параксиальных лучей с компонентами соответственно; Φ — оптическая сила компонентов; J — инвариант Лагранжа — Гельмгольца; n — показатель преломления оптического элемента.

Из выражений системы (1), вытекает целесообразность синтеза оптических систем из апланатических компонентов (модулей), для которых $W \approx P \approx 0$.

Параметры конструктивных элементов апланатических менисков (рис. 1, а, б), для которых $W = P = 0$, вычисляются по формулам [1]

$$s = r \left(1 + \frac{n'}{n} \right); \quad s' = r \left(1 + \frac{n}{n'} \right), \quad (2)$$

где n' — показатель преломления среды, в которой находится мениск; n — показатель преломления для основной длины волны оптического материала мениска.

Радиусы линзы с асферической поверхностью второго порядка, для которой $W = 0$ (см. рис. 1, в), вычисляются по формулам

$$r_1 = \frac{n^2 - 1}{n^2} f'; \quad r_2 = \frac{n^2 - 1}{n^2 - n - 1} f', \quad (3)$$

где f' — фокусное расстояние линзы, а n — показатель преломления оптического материала линзы с увеличением $\beta = 1^\times/n$ для основной длины волны.

Путем замены первой сферической поверхности на асферическую второго порядка и интерполяции e^2 достигается условие $P = 0$, т.е. линза становится апланатической.

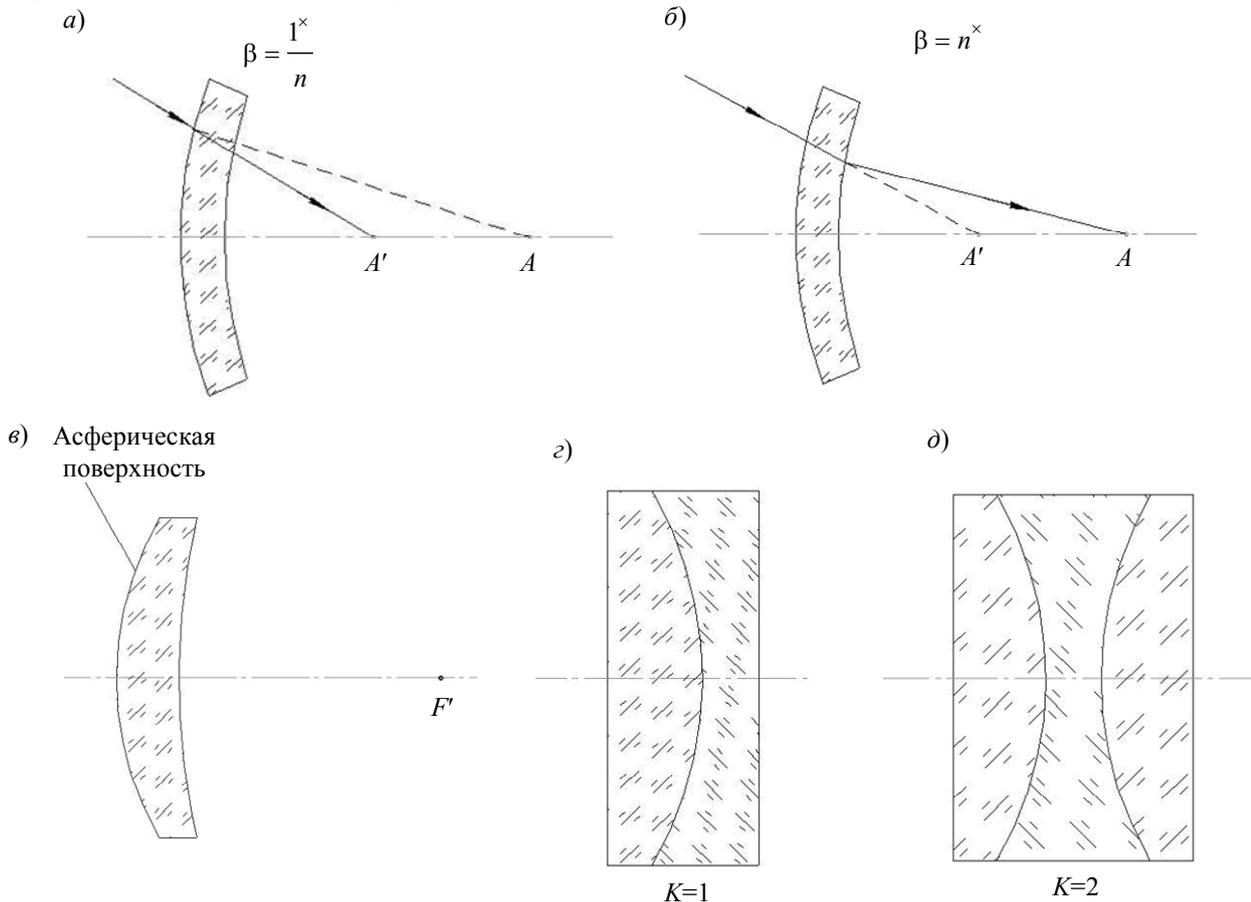


Рис. 1

Для коррекции хроматических aberrаций в оптическую систему вводится гиперхроматическая линза [3, 5], представляющая собой афокальную плоскопараллельную пластинку, склеенную из линз положительной и отрицательной оптической силы из оптических материалов, разность показателей преломления которых мала, а разности средних дисперсий значительны (см. рис. 1, з, д). Так как гиперхроматическая линза располагается перед объективом в параллельном ходе лучей, то она не вносит монохроматических aberrаций.

Хроматизм положения, вносимый гиперхроматической линзой в фокальную плоскость объектива, определяется выражением

$$ds' = f'_{06}{}^2 \frac{\Delta n}{r_{xp}} K, \quad (4)$$

где f'_{06} — фокусное расстояние объектива; Δn — разность средних дисперсий материалов гиперхроматической линзы; r_{xp} — радиус „хроматической“ поверхности; K — число „хроматических“ поверхностей.

При расчете конденсоров, как правило, коррекции подлежат сферическая aberrация и кома [1—3]. Оптическая схема конденсора включает одиночную линзу с асферической поверхностью второго порядка и с увеличением $\beta = \frac{1^x}{n_1}$ в зависимости от числовой апертуры одного или нескольких апланатических менисков. В этом случае фокусное расстояние линзы с асферической поверхностью определяется как

$$f' = f'_k n_1^m, \quad (5)$$

где f'_k — фокусное расстояние конденсора, n_1 — показатель преломления оптического материала апланатического мениска с увеличением $\beta = \frac{1^x}{n}$, m — количество апланатических менисков.

На рис. 2, *a* и в табл. 1 приведены оптическая схема и aberrации конденсора с $f' = 30$ мм, $A = 0,75$, $2\omega = 12^\circ$.

При расчете светосильных объективов с небольшим полем ($2\omega = 1 \dots 2^\circ$), кроме коррекции сферической aberrации и комы, необходима коррекция хроматических aberrаций, которая осуществляется путем размещения перед объективом гиперхроматической линзы (рис. 2, *б*) [7]. Остаточные aberrации объектива с $f' = 100$ мм, $D/f' = 1:2,5$, $2\omega = 2^\circ$ приведены в табл. 2.

При расчете светосильных объективов с угловым полем $2\omega = 6 \dots 10^\circ$ необходима коррекция полевых aberrаций, астигматизма и кривизны поверхности. На рис. 2, *в* приведена оптическая схема объектива с $f' = 100$ мм, $D/f' = 1:1,5$, $2\omega = 10^\circ$ [8], содержащего гиперхроматическую линзу, плосковогнутую линзу с асферической поверхностью, два апланатических мениска с увеличением $\beta = \frac{1^x}{n_1}$ и апланатический мениск с $\beta = n_2^x$. Апланатический мениск с увеличением $\beta = n_2^x$ имеет отрицательную оптическую силу, благодаря чему и выполняется условие $\sum \Phi = 0$ в системе уравнений (1), обеспечивающее коррекцию астигматизма (S_3) и кривизны поверхности (S_4). В этом случае фокусное расстояние линзы с асферической поверхностью определяется по формуле

$$f' = f'_{06} \frac{n_1^m}{n_2}, \quad (6)$$

где n_2 — показатель преломления оптического материала апланатического мениска отрицательной оптической силы с увеличением $\beta = n_2^x$.

В табл. 3 и 4 приведены aberrации этого объектива.

На рис. 2, *г* и в табл. 5, 6 приведены оптическая схема и aberrации планохроматического объектива микроскопа с $f' = 40$ мм, $A = 0,15$, $2\omega = 6^\circ$. Для увеличения числовой апертуры в оптическую схему следует ввести апланатические мениски с линейным увеличением $\beta = n^x$.

У окуляров микроскопа коррекции подлежат полевые aberrации: астигматизм, дисторсия, хроматизм увеличения.

Из системы уравнений (1) следует, что при $W = 2,7$ и $P = 4,4$ [6]

$$S_3 = -P - 2W + 1 = 0, \quad S_5 = -P + 3W - 3,7 = 0. \tag{7}$$

Наиболее близко этим требованиям удовлетворяет оптическая система в виде плоско-выпуклой линзы, обращенной плоской поверхностью к выходному зрачку. Путем замены сферической поверхности на асферическую второго порядка достигается оптимальная коррекция астигматизма и дисторсии. Введение в оптическую схему окуляра гиперхроматической линзы позволяет исправить хроматизм увеличения.

На рис. 2, δ и в табл. 7 приведены оптическая схема и aberrации широкоугольного окуляра микроскопа с увеличенным удалением выходного зрачка: $\bar{\Gamma} = 10^\times$, $2y' = 20$ мм [9].

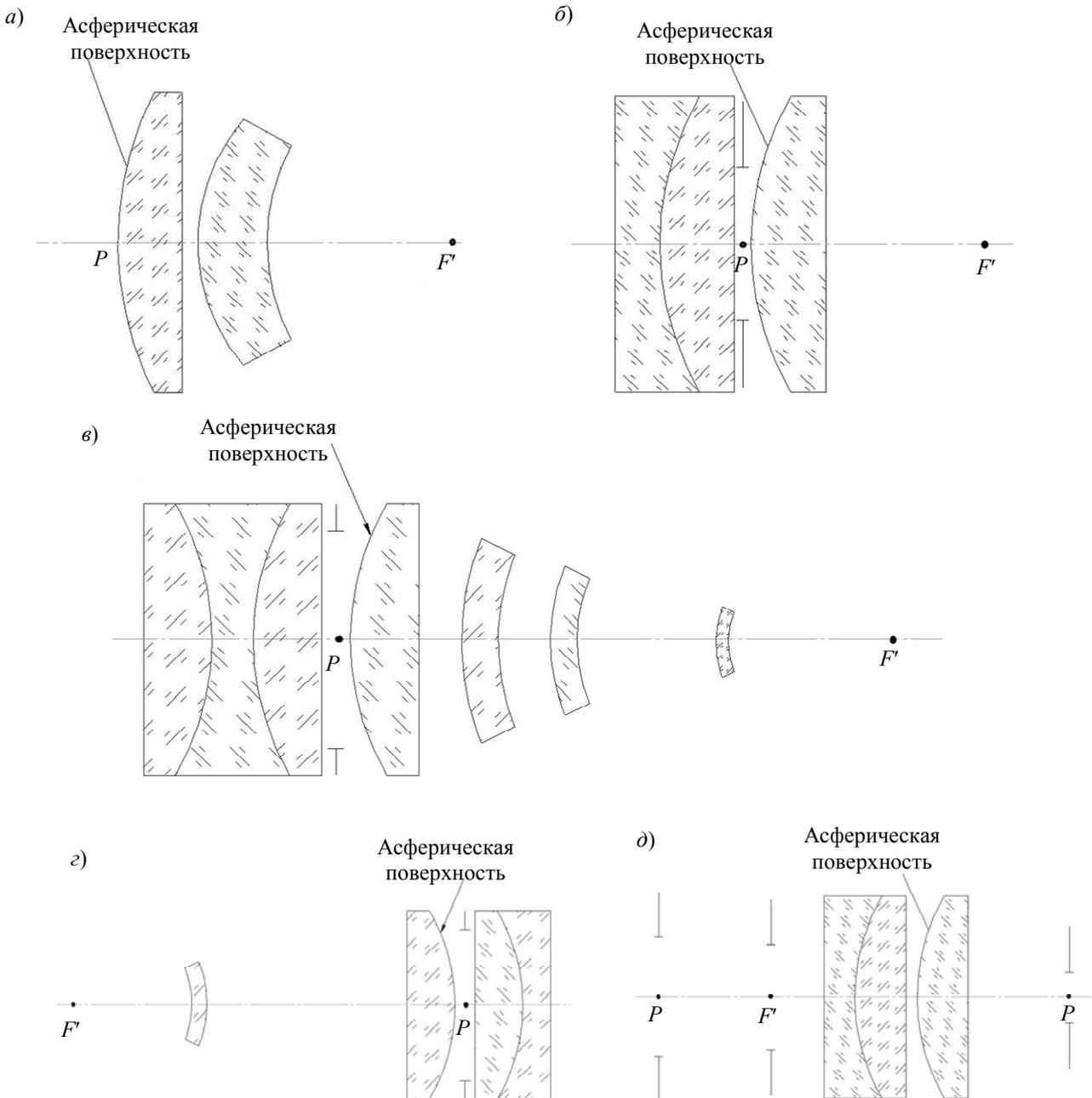


Рис. 2

Таблица 1

h	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм
22,5	1,4	-0,08	-0,09	-0,17	-0,42
15,9	0,65	-0,01	0	-0,23	-0,46
0	0	0	0	0	-0,49

Таблица 2

h	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм
20	0,21	-0,02	-0,004	-0,04	0,007
14	0,14	0	0	-0,03	0,003
0	0	0	0	0	0,001

Таблица 3

h	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$, мм
25	0,26	-0,01	-0,002	-0,05	0,11
17,5	0,18	0,005	0,001	-0,03	0
0	0	0	0	0	-0,08

Таблица 4

ω	y' , мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_s - z'_m$, мм
-5°	8,988	0,01	0,01	0
-3°30'	6,268	-0,02	-0,08	0,06
0	0	0	0	0

Таблица 5

h	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	W_e	$W_{F'}$	$W_{C'}$
6	0,15	-0,016	-0,002	0,02	-0,06	0,51	0,39
4,2	0,10	-0,001	0	0,01	0,01	0,12	0,37
0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 6

ω	y' , мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_s - z'_m$, мм
-3°	2,15	0,006	-0,003	0,009
-2°	1,40	0,002	-0,005	0,007
0	0	0	0	0

Таблица 7

ω	s_p , мм	s'_p , мм	y' , мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y'/y'$, %
-21°	-29,6	147	9,90	-1,28	-1,28	0	1,4
-15°	-28,0	147	6,95	-0,59	-0,59	0	0,7
0	-26,4	147	0	0	0	0	0

Примечание. В табл. 1—7 приняты следующие обозначения: σ' — апертурный угол; $\Delta s'$ и $\Delta y'$ — продольная и поперечная составляющие сферической аберрации; η — отступление от условия неизопланатизма, определяющее кому; $S'_{F'} - S'_{C'}$ — хроматизм положения; W_e , $W_{F'}$, $W_{C'}$ — волновые аберрации, вычисленные в долях длины волны; ω — угол пересечения главного луча с оптической осью; y' — размер изображения; z'_m и z'_s — меридиональная и сагиттальная составляющие астигматизма; $z'_s - z'_m$ — астигматизм; s_p и s'_p — положение входного и выходного зрачка.

Итак, показана эффективность применения апланатических оптических модулей при расчете различных оптических систем. Использование апланатических модулей расширяет допуски при изготовлении и сборке оптических систем.

Рассчитанные объективы и окуляр имеют оригинальные оптические схемы и защищены патентами Российской Федерации [7—12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
2. *Русинов М. М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
3. *Панов В. А., Андреев Л. Н.* Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976.
4. *Зверев В. А., Точилина Т. В.* Опотехника проектирования оптических приборов. СПб: СПб ГИТМО, 2005.
5. *Андреев Л. Н.* Прикладная теория аберраций: Учеб. пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.
6. *Андреев Л. Н., Ежова В. В.* Прикладная теория аберраций: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2011. Ч. II.
7. Пат. 100300 РФ, G02B 9/04. Двухлинзовый объектив / *Л. Н. Андреев, В. В. Ежова*. 15.07.2010.
8. Пат. 121089 РФ, G02B 9/04. Объектив / *Л. Н. Андреев, С. В. Куцевич*. 10.05.2012.
9. Пат. 100640 РФ, G02B 25/00, на полезную модель „Окуляр микроскопа“ / *Л. Н. Андреев, В. В. Ежова*. 15.07.2010.
10. Пат. 126482 РФ, G02B 25/00, на полезную модель „Окуляр микроскопа“ / *Л. Н. Андреев, А. Н. Пригода*. 22.02.2012.
11. Пат. 130417 РФ, G02B 13/00, на полезную модель „Объектив“ / *Л. Н. Андреев, В. В. Ежова, С. В. Куцевич, Г. С. Дегтярева*. 20.07.2013.
12. Пат. 133947 РФ, G02B 9/12, на полезную модель „Афокальный компенсатор сферической аберрации“ / *Л. Н. Андреев, В. В. Ежова, Г. С. Дегтярева*. 31.05.2013.

Сведения об авторах

- Лев Николаевич Андреев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики
- Василиса Викторовна Ежова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: evv_foist@mail.ru
- Галина Сергеевна Дегтярева** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
22.02.13 г.

С. М. БОРЗОВ, О. И. ПОТАТУРКИН

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОИСКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ АНОМАЛИЙ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

Рассматривается допускающий аппаратную реализацию алгоритм обработки данных для обнаружения тепловых объектов, основанный на поиске пространственных аномалий яркости и градиента яркости тепловизионных изображений. Приведены результаты анализа эффективности реализованного метода с использованием данных, полученных в условиях реальной фоноцелевой обстановки.

Ключевые слова: обработка тепловизионных изображений, обнаружение объектов, пространственные аномалии.

Введение. Для эффективного решения задачи обнаружения и распознавания целей в реальных условиях необходимо, чтобы приборы наблюдения имели встроенные функции обработки регистрируемых изображений для выделения фрагментов, потенциально содержащих объекты исследования. Такие фрагменты при выводе информации на монитор оператора отмечаются маркерами, что способствует принятию окончательного решения об обнаружении цели. Выполняемая в автоматическом режиме обработка основана на анализе пространственного распределения яркости изображения методом скользящего окна и оценке вероятности наличия объектов в различных точках наблюдаемой сцены. При этом данная оценка традиционно производится путем определения соответствия между анализируемыми фрагментами и априорным описанием объектов [1]. Однако, как показала практика, в условиях реальной фоноцелевой обстановки такой подход оказывается недостаточно эффективным вследствие возможных изменений освещенности, значительной удаленности и неизвестных ракурсов наблюдаемых объектов, наличия существенных искажений атмосферы и разнообразного динамичного фона. Поэтому для обнаружения малоразмерных объектов в поле наблюдения предлагается использовать метод, основанный на описании фона для каждой сцены с последующим поиском фрагментов, параметры которых не соответствуют полученному описанию. Такой подход в литературе называется поиском аномалий [2], не требует выполнения предварительных процедур обучения и позволяет обнаруживать в поле зрения системы наблюдения нетипичные по определенным параметрам фрагменты на неоднородном фоне.

В настоящей статье представлены результаты разработки программно-алгоритмических средств для выделения малоразмерных объектов по данным тепловизионных систем наблюдения на основе поиска пространственных аномалий, а также результаты исследования эффективности данных средств в условиях естественного фона.

Алгоритм обработки данных. Предлагаемый подход основан на определении некоторых признаков, характеризующих каждый фрагмент изображения, и оценке статистических параметров распределений признаков для всего кадра. Так как аномалии являются редким явлением, предполагается, что даже наличие информации о них во входных данных не окажет существенного влияния на описание нормальных классов фрагментов. Поэтому оценка статистических параметров распределений каждого признака производится по всей совокупности данных.

Выбор системы признаков осуществляется с учетом специфики объектов исследования. Поскольку тепловые объекты на тепловизионных изображениях характеризуются яркими отсчетами и примерные размеры объектов, как правило, известны, практический интерес пред-

ставляет использование в качестве признака разности между средней яркостью центральной зоны ω анализируемого фрагмента и средней яркостью его периферии Ω :

$$F_1(x, y) = \frac{1}{N_\omega} \sum_{\omega(x, y)} I(x, y) - \frac{1}{N_\Omega} \sum_{\Omega(x, y)} I(x, y),$$

где x, y — пространственные координаты, I — яркость исходного изображения, N_ω и N_Ω — количество отсчетов яркости в центральной и периферийной зонах.

Кроме того, для изображений таких объектов характерно наличие значительных перепадов яркости, по этой причине полезным признаком следует считать разность между средними значениями модуля пространственного градиента яркости в центральной зоне фрагмента и в периферийной зоне:

$$F_2(x, y) = \frac{1}{N_\omega} \sum_{\omega(x, y)} |\nabla I(x, y)| - \frac{1}{N_\Omega} \sum_{\Omega(x, y)} |\nabla I(x, y)|.$$

При этом размер центральной зоны должен соответствовать размеру изображений обнаруживаемых объектов, а для вычисления значений модуля пространственного градиента используется преобразование Собела с окном размером 3×3 элемента [3].

В полученных двумерных массивах данных, описывающих пространственное распределение используемых признаков, осуществляется поиск локальных максимумов. С этой целью выполняется обработка изображения методом скользящего окна. Если значение центрального отсчета оказывается больше значений остальных отсчетов в окне, то это значение сохраняется, в противном случае — обнуляется. В результате такой обработки сохраняются только отсчеты локальных максимумов, остальные точки обнуляются:

$$M_i(x, y) = \begin{cases} F_i(x, y) & \text{при } F_i(x, y) > \max(F_i(x+k, y+l)), k, l \in \Omega; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Далее рассчитывается среднее μ_i и среднеквадратическое отклонение σ_i ненулевых значений для каждого из сформированных цифровых массивов $M_i(x, y)$ и выполняется пороговая обработка с использованием метода „сигм“:

$$R_i(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } M_i(x, y) > \mu_i + n\sigma_i; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где n — уровень порога обнаружения.

В результате для каждого из признаков вычисляется бинарный массив. Положения ненулевых элементов в этом массиве соответствуют координатам фрагментов на исходном изображении, аномальных по данному признаку. Множитель n выбирается экспериментально.

На заключительном этапе выполняется совмещение результатов обнаружения по различным признакам путем пересечения:

$$P(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } R_1(x, y) \cap [R_2(x, y)]_\Omega; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $[\cdot]$ — логическое суммирование по окрестности Ω .

При этом если расстояние между центрами аномальных по различным признакам фрагментов меньше половины размера окна зоны Ω , их относят к одному объекту, и положение объекта определяют по полю, сформированному с использованием признака F_1 .

Выделение объектов по тепловизионным изображениям. Возможность реализации рассматриваемых алгоритмов подтверждается примером обработки изображений земной поверхности, полученных сканирующим радиометром „Агрос“ в диапазоне 8,0—11,8 мкм. Раз-

мер изображения 1000×1000 отсчетов, поиск аномалий осуществляется при размере центральной зоны 7×7 элементов.

Исходное изображение приведено на рис. 1, а, а на рис. 1, б, в представлен результат расчета методом скользящего окна признаков, характеризующих организацию полутонов фрагментов изображения, и результат поиска локальных максимумов в полученных полях признаков. Далее выполнялся расчет среднего и среднеквадратического отклонения (СКО) значений обнаруженных максимумов, пороговая обработка (критерий трех СКО) и совмещение результатов поиска по отдельным признакам путем пересечения. Результаты комбинированного поиска пространственных аномалий яркости и градиента яркости представлены на рис. 1, г.

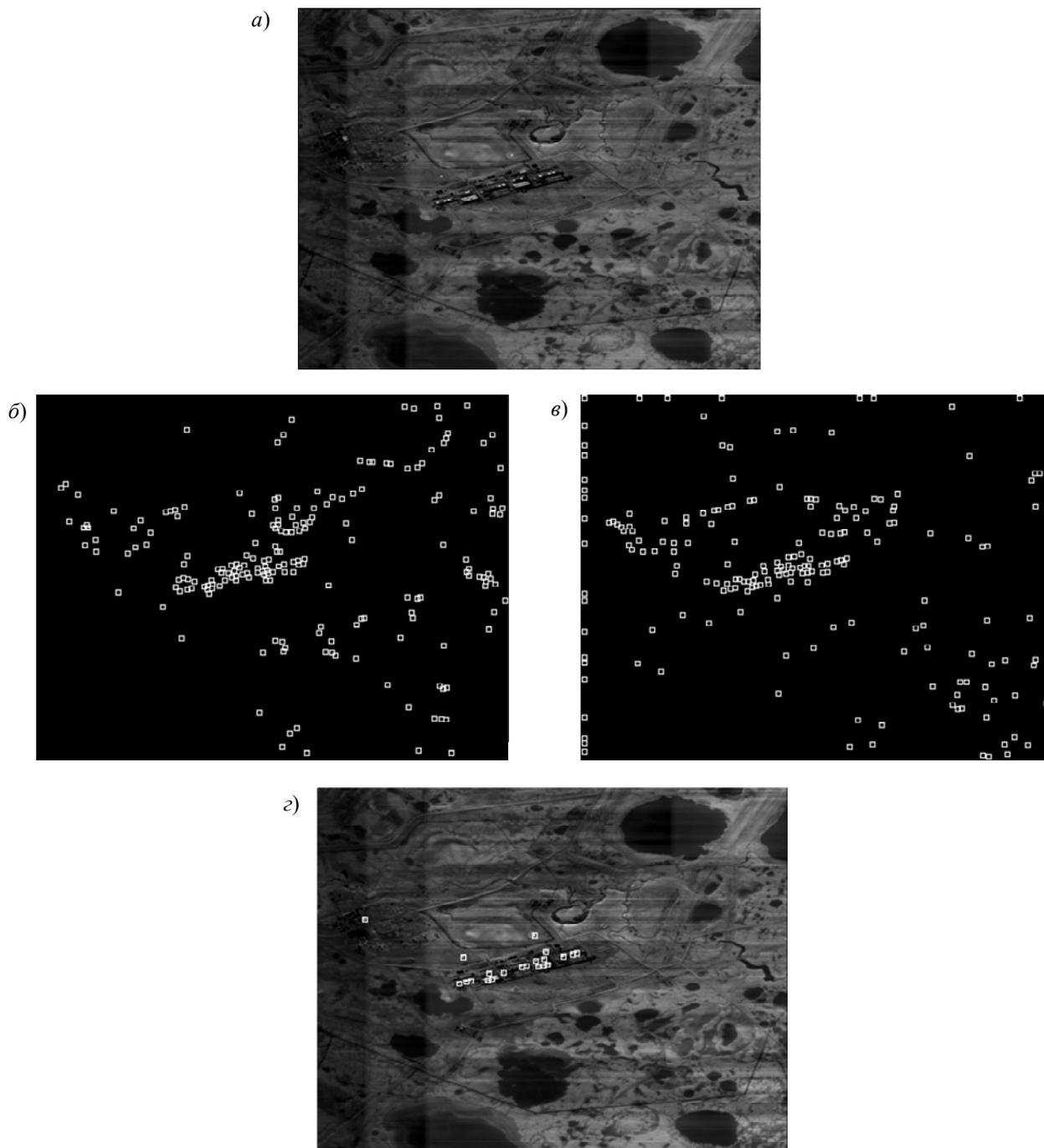


Рис. 1

Анализ эффективности метода был выполнен путем сравнения результатов обнаружения с экспертной оценкой (изображение предварительно было просмотрено оператором и

выбраны зоны, содержащие, по его мнению, объекты). В табл. 1 приведено количество ложных тревог и пропусков целей при различных уровнях используемого порога (n).

Таблица 1

n	F_1		F_2		$F_1 \& F_2$	
	Ложная тревога	Пропуск цели	Ложная тревога	Пропуск цели	Ложная тревога	Пропуск цели
2	48	1	37	0	10	0
3	15	3	5	3	0	3
4	1	4	0	4	0	6

Другим примером реализации алгоритмов является обработка видеопоследовательности, полученной с болометрического тепловизора ТБ-4 [4] (разработчик — Новосибирский филиал Института физики полупроводников (НФ ИФП) СО РАН „КТИ ПМ“). Съемка проводилась в условиях полигона. Объект наблюдения — фигура человека в полный рост на реальном фоне при дальности 700 м. Поиск аномалий выполнялся по разности средних значений яркости и градиента яркости центральной и периферийной зон фрагментов (критерий трех СКО). Рис. 2 демонстрирует результаты поиска объекта на одном из кадров последовательности по отдельным признакам: a — по яркости, b — по градиенту яркости; результат совмещения показан на рис. 2, $в$.

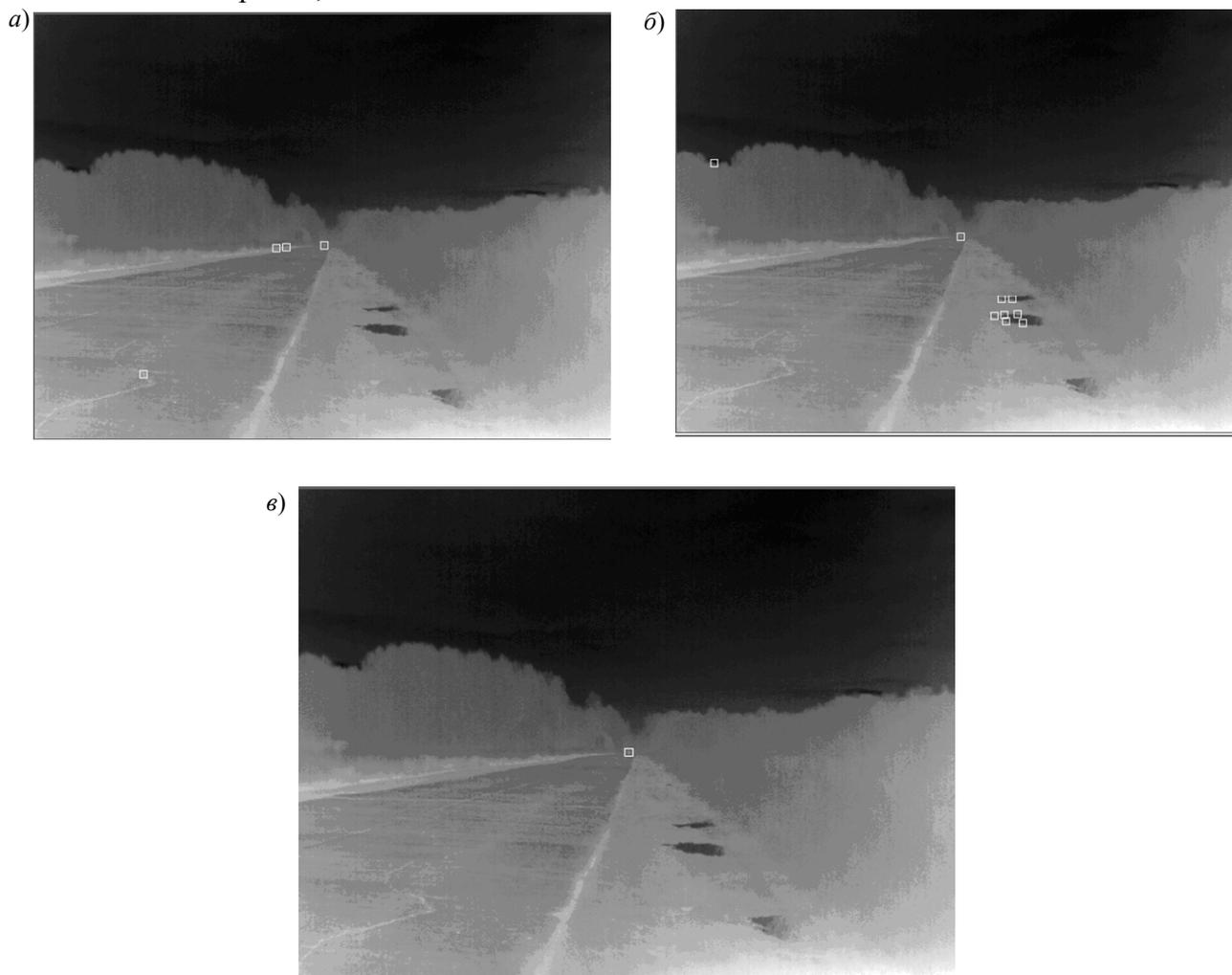


Рис. 2

Количество ложных тревог и пропусков цели, рассчитанное для последовательности 50 кадров, при различных значениях n приведено в табл. 2.

Таблица 2

n	F_1		F_2		$F_1 \& F_2$	
	Ложная тревога	Пропуск цели	Ложная тревога	Пропуск цели	Ложная тревога	Пропуск цели
2	3109	0	3761	0	103	0
3	2016	3	978	0	12	3
4	1610	19	411	0	0	19
5	748	30	247	9	0	33

Анализ представленных данных показывает, что наибольшая эффективность поиска достигается при реализации комбинированного метода обработки (по яркости и по пространственному градиенту яркости). Количество ложных тревог при его использовании уменьшается в десятки раз при незначительном росте пропусков цели. Результаты, полученные для видеопоследовательности с учетом размеров кадров (640×480 пкс), соответствуют вероятности ошибки обнаружения на уровне 10^{-6} . Достигнутая вероятность может быть в дальнейшем существенно уменьшена путем выполнения дополнительной процедуры совмещения результатов поиска по нескольким последующим кадрам. Количество кадров для совмещения определяется динамичностью наблюдаемой сцены, а также требованием к времени принятия решения системой наблюдения при обнаружении.

Заключение. Для решения задачи автоматического обнаружения тепловых объектов по изображениям в ИК-диапазоне в условиях реальной фоноцелевой обстановки предложено использовать метод поиска пространственных аномалий, основанный на определении степени несоответствия признаков отдельных фрагментов распределению значений признаков, полученному по всему изображению. Вычисление признаков при этом предложено осуществлять на основе сравнения яркости и пространственного градиента яркости центральной и периферийной зон фрагментов. Приведены примеры обработки изображений, полученных с помощью тепловизионной аппаратуры наблюдения в реальных условиях с применением созданных программно-алгоритмических средств. Показано, что разработанный метод позволяет обнаруживать на тепловизионных изображениях объекты (техника, человеческие фигуры), основываясь на их специфике. При этом наибольшая эффективность достигается в случае реализации комбинированного адаптивного поиска пространственных аномалий яркости и градиента яркости.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НФ ИФП СО РАН „КТИ ПМ“ А. В. Голицыну и М. Ю. Цивинскому, предоставившим для проведения исследований видеопоследовательности, зарегистрированные в реальных условиях.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-07-00202), Программы Президиума РАН (проект № 15.3) и программы СО РАН (интеграционный проект № 74).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roth P. M., Winter M. Survey of appearance-based methods for object recognition // Techn. Report ICG-TR-01/08, Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology (Austria). 2008. Jan. 68 p.
2. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly detection: A survey // ACM Computing Surveys. 2009. Vol. 41(3), Art. 15. 58 p.
3. Прэт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир. 1982. Т. 2. 480 с.
4. Голицын А. В., Журов Г. Е., Цивинский М. Ю., Голицын А. А., Яшина Т. В., Навражских В. А., Мишанин С. С. Тепловизионный прицел для стрелкового оружия // Тез. докл. Рос. конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники „Фотоника—2011“. Новосибирск: ИФП СО РАН, 2011. С. 148.

*Сведения об авторах***Сергей Михайлович Борзов**

— канд. техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, лаборатория информационной оптики, Новосибирск; заведующий лабораторией; E-mail: borzov@iae.nsk.su

Олег Иосифович Потатуркин

— д-р техн. наук, профессор; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск; заместитель директора по научной работе; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет; E-mail: potaturkin@iae.nsk.su

Рекомендована ученым советом
ИнститутаПоступила в редакцию
22.03.13 г.

УДК 535.317.2

М. Е. ЗАЦЕПИНА, В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ

**РЕАЛИЗАЦИЯ
СОВРЕМЕННОГО КОЛИЧЕСТВЕННОГО ТЕНЕВОГО МЕТОДА**

Представлен оригинальный количественный теневой метод, основанный на преобразовании теневой картины ножа Фуко в геометрическую модель тенеграммы линейной решетки. Результатами количественной оцифровки и компьютерной обработки геометрической модели являются карта ошибок волнового фронта и характеристики качества изображения, формируемого исследуемой оптической системой.

Ключевые слова: теневой метод, нож Фуко, геометрическая модель тенеграммы линейной решетки, изофотометрия, деформации волнового фронта.

Введение. Существующий визуальный теневой метод ножа Фуко, разработанный в 1856 г. и широко применяемый в наши дни в оптической практике, позволяет по полутоновой картине наблюдать деформации волнового фронта и по ним оценивать характер преобладающих аберраций данной оптической системы. Метод ножа Фуко используется преимущественно для технологического контроля в виде качественных оценок состояния оптических элементов и систем. Метод позволяет лишь в ограниченном объеме производить количественные оптические измерения поперечных аберраций и не позволяет получать полную топограмму (контурную карту) волнового фронта для последующей обработки в целях расчета характеристик качества оптического изображения [1].

Посредством компьютерного наложения на исходную теневую картину (тенеграмму) линейного фотометрического клина можно программно сформировать изображение системы параллельных полос с отдельными искривлениями. Это изображение можно рассматривать как геометрическую модель тенеграммы линейной решетки. Расшифровка полученной модели тенеграммы линейной решетки позволяет измерять волновые аберрации и рассчитывать характеристики качества изображения, формируемого исследуемой оптической системой.

Экспериментальные исследования. Схема установки, разработанной для реализации предлагаемого изофотометрического теневых метода, представлена на рис. 1 [2], где 1 — лампа, 2 — конденсор, 3 — матовое стекло, 4 — тест-объект „полубесконечная щель“, 5 — объектив коллиматора, 6 — исследуемый объектив (фотообъектив Индустар-50), 7 — выходной зрачок исследуемого объектива, 8 — нож Фуко, перекрывающий изображение тест-объекта, 9 — объектив регистрирующей фотокамеры, 10 — матричная камера, 11 — приемник изображения, 12 — компьютер.

Теневой прибор Фуко оснащен матричной фотокамерой, передающей оптическое изображение теневой картины ножа Фуко в компьютер, который содержит программу формирования системы изофот и комплекс программного обеспечения для обработки результатов контроля.

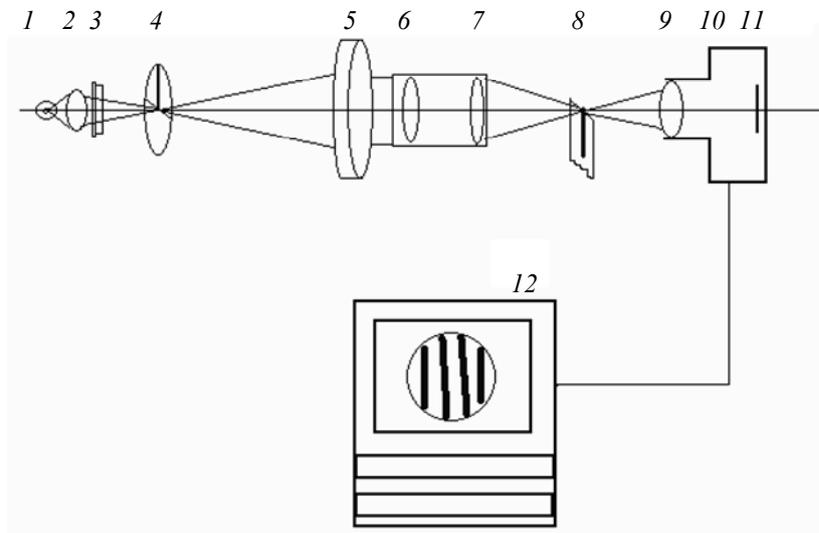


Рис. 1

Перечислим основные отличительные особенности данной оригинальной схемы.

1. Тест-объектом служит полубесконечная щель по Филберу [3], которая впервые используется для количественного исследования aberrаций на базе изофотометрического теневого метода. Такой тест-объект обеспечивает пропорциональность освещенности в тенеграмме уровню поперечных aberrаций функции деформаций исследуемого волнового фронта.

2. Используемый источник света — лампа накаливания, работающая с пониженным напряжением.

3. Узел крепления исследуемого объектива обеспечивает возможность его поворота на заданный угол без смещения с оптической оси. При этом положения тест-объекта и края ножа Фуко при работе не изменяются, что упрощает методику исследований.

Для расчета функции волновых aberrаций и характеристик качества изображения, формируемого исследуемой оптической системой, необходимо расшифровать две теневые картины, полученные при повороте ножа Фуко и тест-объекта вокруг оптической оси на 90° . Лезвие ножа Фуко проходит через точку геометрического фокуса на оптической оси установки, плоскость ножа нормальна к оптической оси. Тест-объект („полубесконечная щель“) представляет собой отрезок освещенной щели с параллельными краями, перекрытой непрозрачной заслонкой; край заслонки расположен по нормали к краям щели.

Использование метода изофотометрии позволяет произвести трансформацию плавной функции распределения освещенности в теневой картине ножа Фуко в систему контуров изофот функции распределения освещенности в тенеграмме.

Две теневые картины Фуко, одна из которых получена при повороте ножа на 90° , после выделения изофот трансформируются в две картины полос, подобные теневым картинам Ронки. Следовательно, две картины полос могут быть количественно расшифрованы в программе, созданной ранее для обработки соответствующих интерферограмм поперечного сдвига.

Первым этапом обработки является фильтрация полученных теневых картин в программе Adobe Photoshop, что позволяет устранить шумы тенеграммы и способствует более стабильной работе алгоритмов расшифровки. На рис. 2 показаны теневые картины, полученные в результате фильтрации, при расположении ножа Фуко по оси X (а) и по оси Y (б).

Итак, для настройки изофотограммы теневой картины на режим прямолинейных полос (по аналогии с классическим интерференционным методом, где прямолинейные полосы получаются путем введения фазового клина) выполняется компьютерное наложение фотометрического (амплитудного) клина на исходную теневую картину. Эта операция является вторым этапом обработки теневых картин [4] (также в программе Adobe Photoshop): см. рис. 3 — *a* — при расположении ножа Фуко по оси X , *б* — по оси Y .

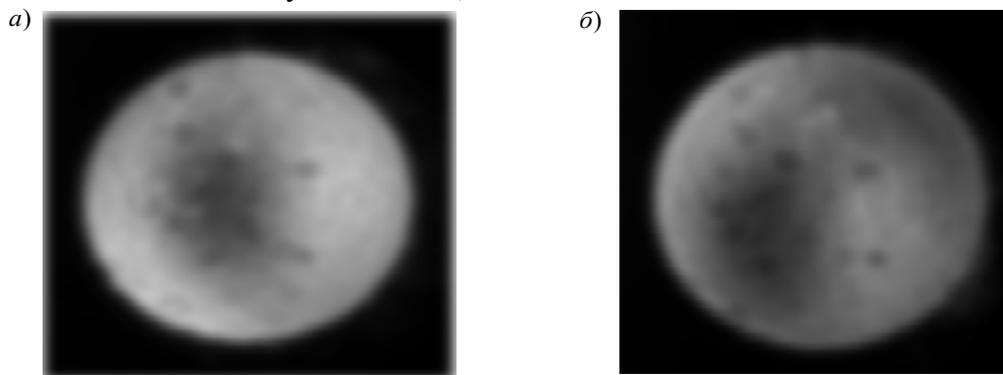


Рис. 2

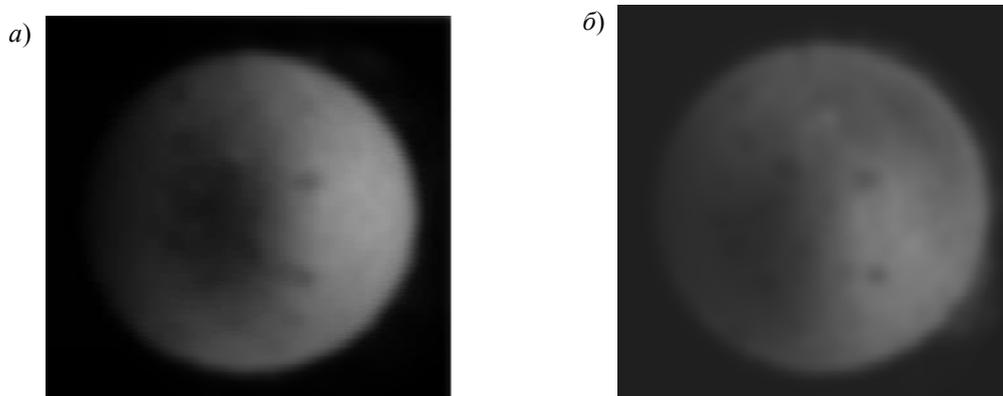


Рис. 3

В качестве инструмента для формирования контурной карты как системы изофот теневой картины ножа Фуко использовалась программа МБВК (многоуровневый блок выделения контура в изображении), разработанная на кафедре прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Экспериментально полученные геометрические модели тенегрмм линейной решетки в процессе формирования системы изофот показаны на рис. 4 (*a* — при расположении ножа Фуко по оси X , *б* — по оси Y).

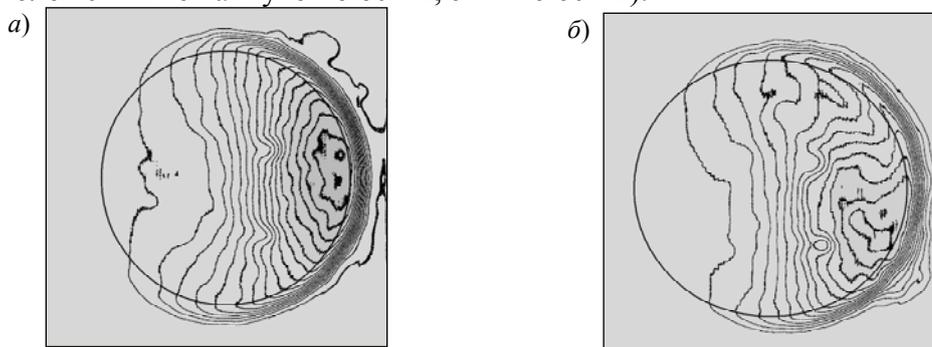


Рис. 4

Для дальнейшей количественной обработки была применена программа “Tiger” [4], позволяющая восстанавливать волновой фронт и анализировать результаты путем обработки двух тенегрмм как интерферограмм (с указанным направлением сдвига) с получением карты

деформаций волнового фронта исследуемой оптической системы, таблицы коэффициентов Цернике, а также характеристик качества оптических систем, таких как функция рассеяния точки, функция рассеяния линии, частотно-контрастная характеристика и функция концентрации энергии в пятне рассеяния [2].

Программа “Tiger” обладает существенным преимуществом, состоящим в повышении точности определения координат точек при расшифровке системы полос в 5—10 раз по сравнению с возможностями других распространенных программ расшифровки интерферограмм.

Обработка тенеграмм линейной решетки в программе “Tiger” позволила получить:

- профиль волнового фронта $W(X, Y)$ (рис. 5, а);
- трехмерную диаграмму поверхности волновых aberrаций (рис. 5, б);
- таблицу коэффициентов Цернике (рис. 6, а);
- график частотно-контрастной характеристики $T(\nu)$ (рис. 6, б), показывающий, что разрешающая способность объектива для заданного контраста (по критерию Фуко) $T(\nu)=0,2$ составляет ≈ 30 лин/мм.

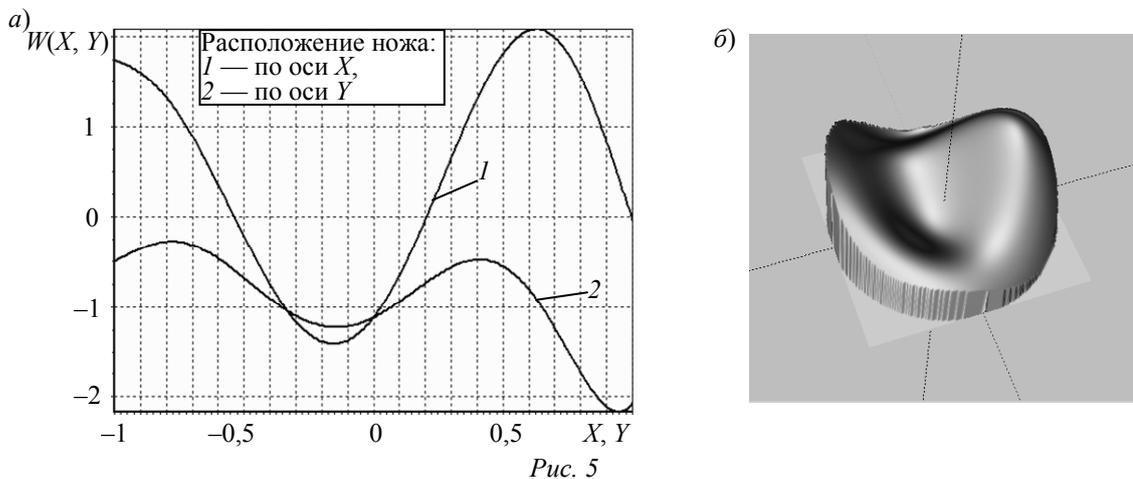


Рис. 5

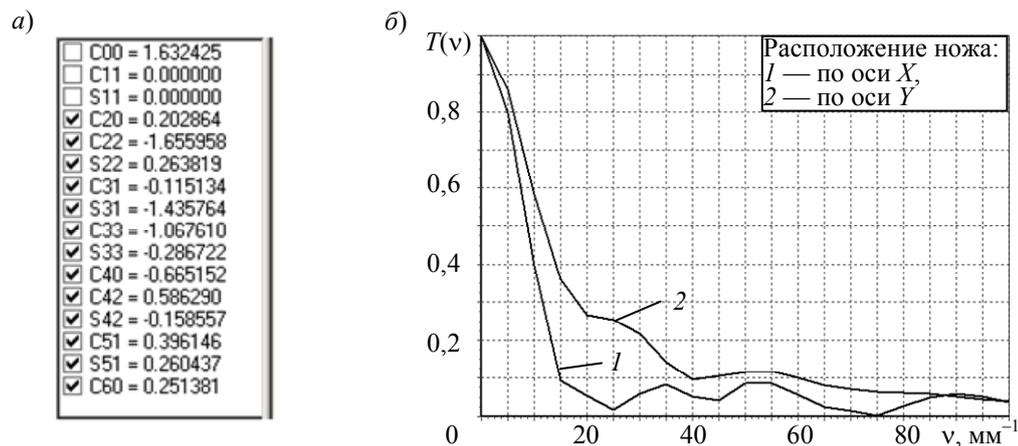


Рис. 6

Таким образом, использование предлагаемого метода позволяет при обработке теневой картины получить не только качественную, но и исчерпывающую количественную информацию для оценки и измерения характеристик качества исследуемой оптической системы и оптической поверхности.

Дополнительным этапом изофотометрического теневого метода (для наглядного отображения и калибровки метода и компьютерной изофотометрической аппаратуры) является этап сопоставления интерферограммы исследуемого объектива Индустар-50, полученной

экспериментально на интерферометре Физо (рис. 7, а), и интерферограммы этого же объектива, синтезированной в программе Zebra Simulator (рис. 7, б) с применением массива коэффициентов Цернике (см. рис. 6, а).

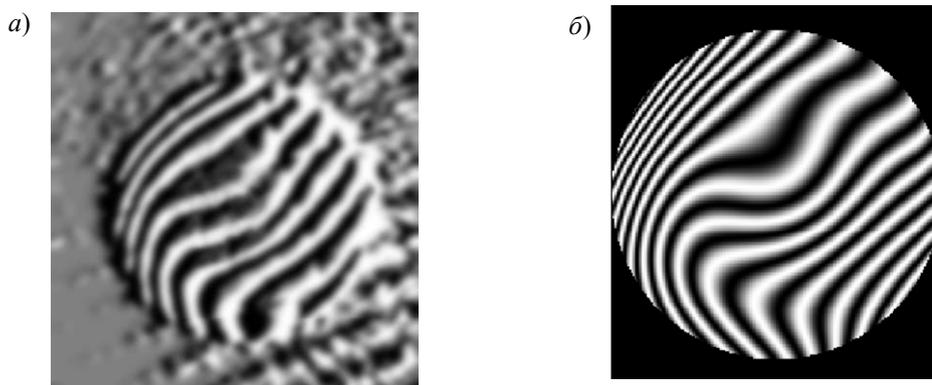


Рис. 7

Анализ рис. 7 отчетливо показывает, что интерферограмма, полученная при контроле на интерферометре Физо, в высокой степени подобна синтезированной интерферограмме. Это, в свою очередь, указывает на высокую степень достоверности изофотометрического теневого метода при определении деформаций волнового фронта исследуемой системы и, как следствие, количественных характеристик качества изображения, формируемого теневой системой.

Заключение. Предложенный и разработанный количественный изофотометрический теневой метод в современной компьютерной реализации указывает перспективы создания на основе теневого метода ножа Фуко автоматизированного измерительного комплекса для контроля волновых aberrаций и ошибок прецизионных оптических поверхностей, а также для расчета необходимых характеристик качества изображения, формируемого контролируемой системой.

Кроме того, следует отметить, что при использовании метода Ронки необходимо с повышением точности контролируемой оптической системы повышать частоту решетки, что сопровождается раздвоением картины зрачка вплоть до исчезновения интерферограммы. Разработанный метод изофотометрии тенеграммы ножа Фуко преодолевает этот недостаток метода Ронки. Согласно исследованиям Д. Д. Максудова [5], чувствительность контроля теневыми методами может достигать уровня $1/20$ — $1/30$ длины волны, что позволяет судить о соответствующей точности исследований, проводимых изофотометрическим теневым методом.

Предложенный метод компьютерной изофотометрии может быть применен при разработке теневых установок нового поколения, отличающихся простотой, высокой скоростью (работа в реальном времени) и высокой точностью (погрешность менее 5 %), возможностью работы на любой выделенной длине волны, а также малой чувствительностью к вибрациям (в отличие от подавляющего большинства применяемых интерферометров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Современный количественный теневой метод с применением средств компьютерных технологий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2(171). С. 226—230.
2. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Схемное решение установки для определения ошибок волнового фронта современным количественным теневым методом повышенной точности // Сб. тр. Междунар. конф. „Оптика—2013“. СПб: НИУ ИТМО, 2013. С. 310—312.
3. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество изображения. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 115 с.

4. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения: Учеб. пособие. СПб: Изд-во „Лань“, 2010. 304 с.
5. Максудов Д. Д. Изготовление и использование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.

Сведения об авторах**Марина Евгеньевна Зацепина**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: marichka_za@list.ru

Владимир Константинович Кирилловский

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптикиПоступила в редакцию
30.12.13 г.

УДК 681.078

А. Н. ЛИПАТОВ, А. П. ЭКОНОМОВ, В. С. МАКАРОВ, Г. В. ЗАХАРКИН,
Д. Л. БОГАЧЕВ, Д. М. РУМЯНЦЕВ, С. А. АНТОНЕНКО

КАМЕРА-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТА

Рассматривается оптоэлектронный прибор, предназначенный для исследования минералогического состава различных типов грунта и, в частности, определения минералогического состава и структуры лунного грунта (реголита). Представлен используемый для решения поставленной задачи совмещенный метод спектрального и импульсного люминесцентного анализа на основе одного детектора.

Ключевые слова: оптический спектрометр, интерференционные фильтры, оптическая матрица, люминесцентный анализ, минералогический состав.

Введение. Минералогический состав грунта полярных областей Луны не исследовался посадочными аппаратами. В рамках текущих проектов „Луна-Глоб“ (запуск в 2015 г.) и „Луна-Ресурс“ (запуск в 2017 г.) предполагается проведение таких исследований. Для этих целей разработан прибор, позволяющий в окружающем посадочный аппарат пространстве рассмотреть значительную часть поверхности (на сотни метров вокруг посадочной станции). При небольшом поле зрения прибора это достигается путем механической развертки, поэтому могут быть исследованы значительные участки поверхности, а некоторые участки окружающего ландшафта, включая отдельно лежащие камни, расположенные вблизи (до 1...2 м), могут быть исследованы с очень высоким пространственным разрешением.

Методы исследования минералогического состава грунта в видимом диапазоне с помощью многополосного фотометра (или спектрометра) [1] и фотолюминесцентного анализа [2] используются достаточно давно как на Земле, так и в космосе. Тем не менее для исследования Луны совмещенный анализ не применялся. Как известно, люминесцентный анализ необычайно чувствителен. С его помощью можно обнаружить в пробе наличие вещества с концентрацией $\sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$ г/г. Совместное применение двух методов расширяет возможности прибора в целом, что позволяет с высокой вероятностью по полученным спектрам восстановить истинный минералогический состав исследуемого грунта.

Создание прибора, реализующего методы фотометрического и фотолюминесцентного анализа [3], потребовало большого объема исследований по изучению возможности совмещения обоих методов в одном устройстве. Алгоритмы обработки и возможности их модификации тесно связаны с техническими требованиями, предъявляемыми к аппаратуре космического исполнения.

Аппаратное обеспечение прибора. В состав прибора (камеры-спектрометра), структурная схема которого представлена на рис. 1, входят оптическая головка, устройство двухосной развертки и устройства обработки и управления. В режиме работы по отраженному солнечному излучению качество спектрального изображения слабо зависит от дальности.

Оптическая головка камеры содержит:

- объектив с постоянным фокусным расстоянием, формирующий изображение в плоскости фотоприемного устройства (ФПУ), соответствующее полю зрения $26 \times 26^\circ$;
- клиновидный интерференционный линейный фильтр, устанавливаемый перед входным окном ФПУ и ограничивающий поле зрения до $12 \times 26^\circ$;
- блок ФПУ с термоэлектрическим элементом Пельтье, выполняющий функцию термостабилизации ФПУ для снижения уровня шума;
- гибко-жесткую плату контроллера ФПУ, состоящую из платы управления и платы фотоприемника; в состав платы контроллера входит буферное ОЗУ для временного хранения кадров, полученных от ФПУ;
- модуль импульсной подсветки, выполненный на основе импульсного УФ-светодиода с оптическими элементами, для обеспечения равномерного распределения энергии в телесном угле, незначительно превышающем поле зрения камеры.

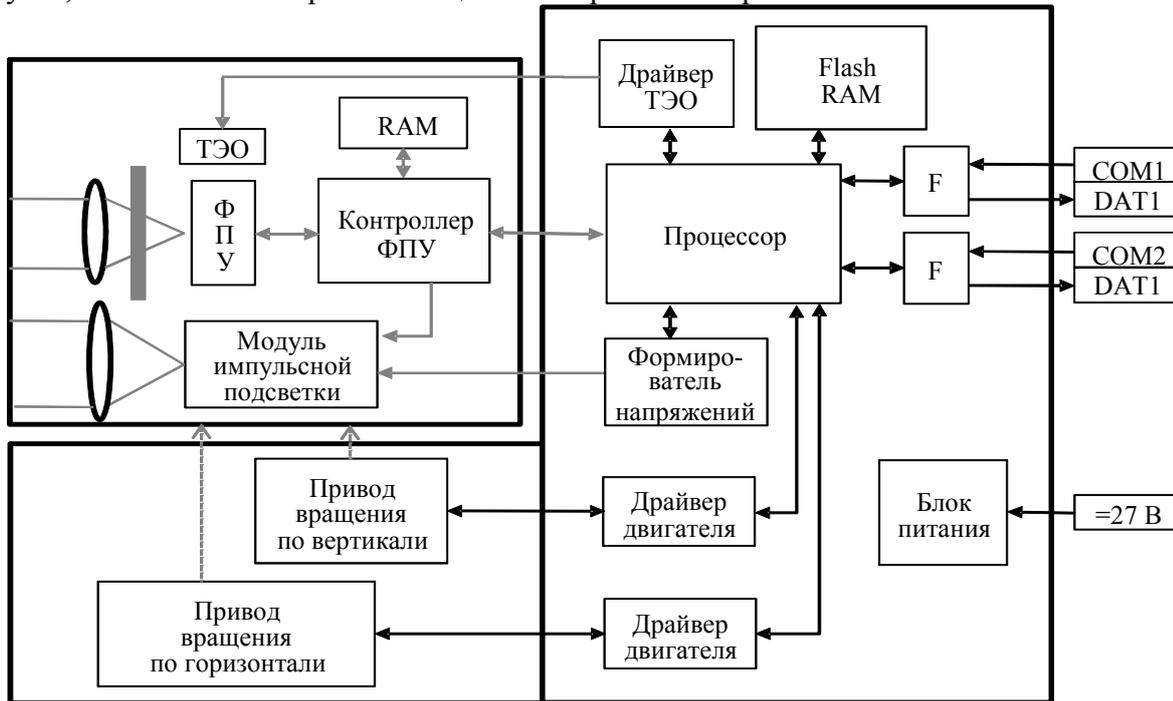


Рис. 1

Объектив должен иметь спектральный диапазон от 0,3 до 1,06 мкм, большую светосилу и высокую разрешающую способность. Для решения этой задачи в Национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург) был разработан и изготовлен принципиально новый объектив „ЛУНАР-1УФ“, оптическая схема которого приведена на рис. 2. Силовыми компонентами объектива являются одиночные положительные линзы, а коррекционными элементами — два склеенных мениска и специально примененная близфокальная линза. Фокусное расстояние объектива $F = 21,0$ мм,

угол поля зрения $2\omega=37^\circ$, относительное отверстие $D:f = 1:2,4$, что свидетельствует о его большой светосиле. Освещенность на краю поля изображения с учетом геометрического виньетирования составляет 0,73% от освещенности в центре поля. Абсолютная дисторсия объектива не превышает 0,01 мм. Измеренная визуальная разрешающая способность объектива в видимом диапазоне составляет примерно 500 лин/мм, что обеспечивает хорошее пространственное разрешение.

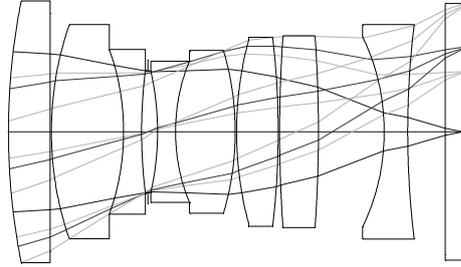


Рис. 2

Поскольку объектив работает в видимом, ближнем инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах хроматизм объектива исправляется сочетанием оптических материалов — кварца и флюорита. При этом хроматические aberrации корректируются в диапазоне от $\lambda_1=0,3$ мкм до $\lambda_2=1,06$ мкм с помощью двух склеенных менисков, где роль „флинтового“ материала выполняет кварц марки КУ. Близфокальная линза исправляет остаточный астигматизм и кривизну поля изображения.

При создании прибора особую сложность представляло размещение фильтра на матрице в связи с использованием достаточно большого поля зрения системы $12\times 26^\circ$. Эффективная пропускная способность клиновых интерференционных фильтров сильно зависит от угла падения лучей на их поверхность. Наилучшее качество достигается при перпендикулярном падении лучей, поэтому фильтр располагался максимально близко к поверхности. Были проведены расчеты зависимости параметров фильтра от угла падения лучей для различных длин волн. Поскольку каждая зона фильтра имеет угловой размер около $0,5^\circ$, понятно, что смещением центральной волны можно пренебречь или учесть его при калибровке, а пропускная способность полосового фильтра меняется незначительно.

Контроллер ФПУ, собранный на программируемой логической матрице (FPGA), представляет собой цифровой автомат, который формирует необходимые последовательности сигналов для запуска импульсного ультрафиолетового источника, получения кадров изображения от ФПУ с сохранением их в буферном ОЗУ и управления работой термоэлектрического элемента объектива (ТЭО).

Источник ультрафиолетового излучения конструктивно связан с оптической головкой. Поле излучения источника должно совпадать с полем зрения объектива или быть несколько большим. В качестве источника используются два ультрафиолетовых светодиода, которые включаются одновременно. Концентрация излучения светодиода обеспечивается несложной оптикой.

В состав прибора также входят (см. рис. 1):

- модуль в виде платы, на которой расположена вся электронная часть, включая процессор и блок питания;
- привод вращения оптической головки прибора по горизонтали, обеспечивающий установку оптической оси с погрешностью не более $6^\circ/1024\pm 20''$ в пределах угла поля зрения по горизонтали $\pm 70^\circ$;
- привод вращения оптической головки прибора по вертикали, обеспечивающий установку оптической оси с погрешностью не более $5^\circ/1024\pm 20''$ в пределах угла поля зрения по вертикали $\pm 25^\circ$.

Функционально узел двухосной платформы выделен на рис. 1, но конструктивно он связан с модулем управления камерой. Двухосная платформа представляет собой раму с двумя приводами. На выходах редукторов устанавливаются червячные пары для жесткой фиксации положения оптической головки. В приборе используются привод фирмы MAXON (Германия) и червячная пара специальной разработки для согласования угла поворота с полем зрения камеры.

Сигналы управляющих драйверов для двигателей приводов формируются с помощью двух таймеров, каждый из которых содержит три 16-разрядных счетчика. Таймеры вырабатывают трехфазные сигналы управления. Фаза сигналов определяется по импульсам датчиков Холла, встроенных в двигатели. Для определения крайних положений поворотной платформы прибора выделено 4 входа в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), которые могут быть подключены к концевым датчикам Холла или к микросхемам, измеряющим ток потребления двигателей, для установки платформы вплотную к упору. Такие усложнения конструкции обусловлены тем, что для качественной съемки панорамы желательно обеспечить точность позиционирования платформы не хуже $\pm 20''$.

Узел процессора построен на базе микросхемы ATSAM3N, производимой фирмой ATMEL (США). Данная микросхема представляет собой однокристалльный микропроцессор с 32-разрядным ядром CORTEX-M3, работающим на частоте 48 МГц, имеет ОЗУ (RAM) емкостью 24 Кбайт и ПЗУ (Flash) емкостью 256 Кбайт. Микросхема включает два таймера А и В. Все порты URT и SPI подключены к согласующим последовательным интерфейсам RS-485. Через шину данных PIO подключена внешняя Flash-память емкостью 1 Гбайт. Распределение внутренних ресурсов микросхемы производится при инициализации системы.

В качестве энергонезависимой памяти применена микросхема MT29F8G08ABABA фирмы "Micron Technology" (США), представляющая собой NAND Flash-память, выполненную по SLC-технологии со стандартным (ONFI) 8-разрядным интерфейсом управления. Микросхема имеет следующую организацию хранения данных:

- 8-битовая страница размером 4096+224 бит;
- блок, состоящий из 128 страниц (512 + 28 Кбит);
- 2 плана по 1024 блока.

Общая емкость микросхемы 8 Гбит. Минимальное время операции асинхронного ввода—вывода составляет 25 нс, что соответствует возможной частоте изменения выходной цепи при выполнении процессором команд изменения бита. Доступ к микросхеме памяти осуществляется через контроллер параллельного ввода—вывода (PIO) процессора. Управляющие сигналы формируются программно. Ожидаемое время записи или чтения байта составляет 200 нс.

Оптическая головка подключена к контроллеру SPI процессора с помощью интерфейса в виде двух дифференциальных каналов RS-485. При включении питания камеры загружается конфигурация ПЛИС-прибора, для этой операции по каналам передаются два сигнала — CLK и MOSI. Данные конфигурации передаются из встроенной Flash-памяти процессора с использованием контроллера прямого доступа к памяти (PDC). По окончании загрузки конфигурации процессор продолжает работу в режиме "Master", ПЛИС принимает команды и переключает приемопередатчик RS-485 (цепи MOSI/MISO) в режим передачи сигналов к процессору при выполнении команды чтения данных. Данные принимаются во встроенную память процессора (RAM) по строкам видеоизображения в режиме канала прямого доступа. Скорость передачи данных (0,2...48 Мбит/с) определяется настройками контроллера SPI.

Программно-алгоритмическое обеспечение прибора. Алгоритмы используются для решения следующих задач:

- съемка полной панорамы в трех спектральных полосах: синей — 460...590 нм; зеленой — 570...665 нм; красной — 660...780 нм;

— съемка спектра отраженного солнечного излучения в 50 спектральных диапазонах (от 278 до 1020 нм с шагом 12 нм) для фрагмента $X \times Y^\circ$,

— съемка спектра люминесценции, вызванной вспышкой импульсной УФ-лампы, в 50 спектральных диапазонах для фрагмента $X \times Y^\circ$.

Одиночный кадр изображения можно представить в виде множества полос, каждая из которых соответствует своему спектральному диапазону. Каждому пространственному полю зрения будут соответствовать 50 одиночных кадров. Число 50 определяется числом спектральных полос клинового фильтра.

Размер одиночного кадра спектра $50 \times 20 \times 330$ пкс. Погрешность наложения отдельных кадров по горизонтали не превышает 1 пкс. Совмещение по вертикали может быть осуществлено с большей погрешностью. Размер одиночного кадра по вертикали и горизонтали при необходимости может изменяться в зависимости от размера исследуемого объекта. Таким образом, один спектр будет состоять из 50 одиночных кадров в заданном пространственном угле. Непараллельность спектральных полос фильтра и строк ФПУ выравнивается с точностью 1 пкс. Механизм перемещения по горизонтали обеспечивает установку оптической оси камеры с точностью, также не превышающей угловой размер пиксела. Матрица развернута так, чтобы строки были расположены по вертикали, тогда номер строки определяет спектральный диапазон. Во время съемки панорамы данные будут суммироваться в окне размером 4×4 пкс в пределах спектральной полосы и сохраняться в памяти в виде набора сжатых спектральных полос. Такой режим сжатия информации необходим для получения RGB-панорамного изображения размером $140 \times 54^\circ$, для чего понадобится осуществить бортовую обработку суммированием спектральных полос всех спектров.

Режим съемки спектров во время проведения люминесцентного анализа аналогичен. Перед съемкой одиночного кадра включается УФ-вспышка, время задержки между окончанием вспышки и съемкой не более 1 мкс. Съемка одиночного кадра должна многократно повторяться для улучшения соотношения сигнал/шум. Количество повторных вспышек определяется расстоянием до исследуемого объекта.

Заключение. Рассмотренный в статье совмещенный метод, т.е. совместное применение спектрометрического и фотолюминесцентного анализа в видимом диапазоне, расширяет возможности разработанного прибора, что позволяет с высокой вероятностью по полученным спектрам восстановить истинный минералогический состав исследуемого грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабушкин А. А., Бажулин П. А., Королев Ф. А., Лившин Л. В., Прокофьев В. К., Стриганов А. Р. Методы спектрального анализа. М.: Изд-во МГУ, 1962.
2. Лившин В. Л. Фотолюминесценция жидких и твердых веществ. М.—Л.: Гостехиздат, 1951.
3. Каралис В. Н., Корнеева Э. А. Аппаратура для флуоресцентного анализа. М.: Наука, 1970.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Липатов** — канд. физ.-мат. наук; Институт космических исследований РАН, Москва; ст. науч. сотрудник; E-mail: slip@iki.rssi.ru
- Алексей Павлович Экономов** — канд. физ.-мат. наук; Институт космических исследований РАН, Москва; ст. науч. сотрудник; E-mail: alekonomo@yandex.ru
- Владислав Сергеевич Макаров** — Институт космических исследований РАН, Москва; ведущий специалист; E-mail: vmakarov@mx.iki.rssi.ru
- Геннадий Владимирович Захаркин** — ЗАО СП „Интеррастро“, Москва; ведущий специалист; E-mail: eslab@mail.ru
- Дмитрий Львович Богачев** — ОАО „НТЦ Завод Ленинец“, Санкт-Петербург; инженер-оптик; E-mail: dmitry@mail.ru

- Дмитрий Михайлович Румянцев** — УНПЦ „Руссар“, Санкт-Петербург; директор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; E-mail: oda2606@yandex.com
- Сергей Анатольевич Антоненко** — ЗАО СП „Интеррастро“, Москва; ведущий специалист; E-mail: eslab@mail.ru

Рекомендована
Институтом космических
исследований РАН

Поступила в редакцию
19.04.13 г.

УДК 535.512

В. А. ТРОФИМОВ, Ю. Т. НАГИБИН, В. Т. ПРОКОПЕНКО, В. Т. УРАЗГАЛИЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРОЕКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ЭЛЛИПСА ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Исследован масштаб изображения проекционной картины эллипса поляризации при определении векторных характеристик светового пучка методом оптического гетеродинамирования. Приведены рекомендации по снижению влияния наблюдаемой зависимости на результаты измерений.

Ключевые слова: поляризация, оптическое гетеродинамирование, интерференционная картина, амплитудно-фазовые характеристики, фотоприемник.

Фотоэлектрическое преобразование световой волны при измерении параметров поляризации может быть осуществлено либо методом некогерентного (прямого) фотодетектирования, либо методом когерентного фотодетектирования (оптического гетеродинамирования) [1]. Некогерентное детектирование при регистрации интенсивности световой волны, прошедшей через определенным образом ориентированные оптические элементы, позволяет путем расчета определить параметры поляризации исследуемой световой волны. К достоинствам этого метода можно отнести простоту реализации измерительной схемы и отсутствие особых требований к когерентности источника излучения, а к недостаткам — невозможность регистрации фазовой информации в реальном масштабе времени.

Метод когерентного детектирования требует при регистрации информации пространственного совмещения информационного светового пучка с опорным, что обуславливает возникновение световых биений. При регистрации световых биений можно измерить амплитудно-фазовые характеристики световой волны в реальном масштабе времени.

Интенсивность светового пучка, представляющего собой результат суперпозиции двух (m, n) плоских квазимонохроматических волн, с учетом невозможности появления перекрестных или интерференционных членов между ортогональными составляющими можно представить выражением [2]

$$\langle I_j(r, t) \rangle = \left\langle \left[E_j^{m*}(r, t) + E_j^{n*}(r, t) \right] \left[E_j^m(r, t) + E_j^n(r, t) \right] \right\rangle, \quad j = x, y, \quad (1)$$

или иначе

$$\langle I_j(r, t) \rangle = \left\langle \left| E_j^m(r, t) \right|^2 + \left| E_j^n(r, t) \right|^2 \right\rangle + 2 \left[\langle E_j^m(r, t) \rangle \right]^{1/2} \left[\langle E_j^n(r, t) \rangle \right]^{1/2} \operatorname{Re}[\gamma_j(r, t)], \quad (2)$$

где $\gamma(r, t)$ — комплексная степень когерентности.

Каждое из этих уравнений описывает интерференцию линейно поляризованных квази-мономатических волн. В соответствии с теорией оптической когерентности второго порядка [3] третье слагаемое в формуле (2) представляет собой вещественную часть функции взаимной когерентности, которая содержит полную информацию об амплитудно-фазовых соотношениях, т.е. о поляризации световых пучков рассматриваемой суперпозиции.

Информация о векторных характеристиках световых волн, определяемая относительным распределением интенсивности в указанных интерференционных картинах, может быть преобразована при фотоэлектрической регистрации во временную зависимость электрических сигналов методом оптического гетеродинамирования.

Функциональная схема экспериментальной установки, реализующая этот метод, представлена на рис. 1. Луч света от источника 1 через входную диафрагму 5 попадает на светоделитель 6 и делится на два пучка, которые отражаются от зеркал 8 и 9. В одном из плеч интерферометра установлен линейный поляризатор 7 с азимутом 45° . На пути интерферирующих лучей установлена призма Волластона 10 для пространственного разделения ортогональных компонент поляризации. Вследствие перемещения зеркала 9 фотоприемники 11 и 12 регистрируют сигналы биений, поступающие на вертикальные x и горизонтальные y пластины монитора 14. Управление разностью хода в интерферометре осуществляется поступающим на пьезокерамический сканер зеркала 9 пилообразным напряжением, которое вырабатывается генератором 13. Изменение формы поляризации в исследуемом пучке задается линейными поляризаторами 2, 4 и четвертьволновой пластинкой 3.

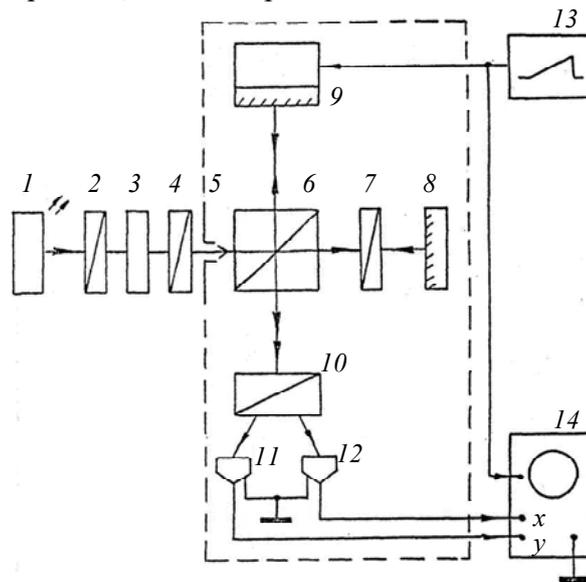


Рис. 1

Расчет оптической схемы и пространственное разделение ортогональных компонент поляризации света позволяет электрические сигналы с выходов фотоприемников 11, 12 представить выражением [4]

$$i_x = \eta |E'_x|^2; \quad i_y = \eta |E'_y|^2, \quad (3)$$

где η — чувствительность фотоприемников.

Выделив переменные составляющие в уравнениях (3), можно записать

$$i_x = (\eta/\text{tg}\theta)\beta E_x; \quad i_y = \eta C_T C_R C_{R'} \beta E_y, \quad (4)$$

здесь θ — азимут поляризатора 7 (см. рис. 1); $C_T \equiv T_y/T_x$; $C_R \equiv R_y/R_x$; $C_{R'} \equiv R'_y/R'_x$, где T, R — коэффициенты пропускания и отражения света соответственно; $\beta = \beta(E_x, E_y, \Delta\varphi)$ —

функция, описывающая нелинейную зависимость электрических сигналов от параметров поляризации исследуемой световой волны, где $\Delta\varphi$ — разность фаз составляющих E_x и E_y электрического вектора E .

Из выражения (4) следует, что отношение регистрируемых фототоков

$$i_x/i_y = (1/C_T C_R C_R' \operatorname{tg}\theta) [E_x/E_y] \approx E_x/E_y. \quad (5)$$

Разность фаз фототоков $\Delta\Phi'$ определяется выражением

$$\Delta\Phi' = \operatorname{arctg} \frac{C_T E_y \sin \Delta\varphi}{\operatorname{tg}^{-1}\theta \cdot E_x + C_T E_y \cos \Delta\varphi} + \operatorname{arctg} \frac{E_x \sin \Delta\varphi}{C_T \operatorname{tg}\theta \cdot E_y + E_x \cos \Delta\varphi}. \quad (6)$$

Фазовый сдвиг, вносимый светоделителем, и двулучепреломление в оптических элементах схемы могут быть представлены в уравнении (6) постоянным членом $\Delta\varphi_{\text{ап}}$, так что $\Delta\Phi = \Delta\Phi' + \Delta\varphi_{\text{ап}}$. Этот дополнительный фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{\text{ап}}$ исключается фазосдвигающими элементами в электрических цепях.

Потери света при отражении от зеркал интерферометра и прохождении оптических элементов могут быть учтены при введении в формулу (5) постоянного коэффициента $C_{\text{п}}$, тогда $i_x/i_y = (C_{\text{п}} C_T C_R C_R' \operatorname{tg}\theta)^{-1} [E_x/E_y]$. Таким образом, если в канале x осциллографа коэффициент усиления равен $K_{\text{ус.}x} = (C_{\text{п}} C_T C_R C_R' \operatorname{tg}\theta) K_{\text{ус.}y}$, то фигура Лиссажу в точности воспроизводит проекционную картину исследуемой поляризации.

Как следует из уравнений (4), амплитуды фототоков (а следовательно, и размеры эллипса на экране монитора) нелинейно зависят от параметров исследуемой поляризации. Функция $\beta(E_x, E_y, \Delta\varphi)$, описывающая эту зависимость, играет роль масштабного коэффициента:

$$\beta(E_x, E_y, \Delta\varphi) = \left(E_x^2 + C_T^2 \operatorname{tg}^2 \theta \cdot E_y^2 + 2C_T \operatorname{tg}\theta \cdot E_x E_y \Delta\varphi \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Для линейно поляризованного луча света с азимутом α составляющие вектора E (с учетом $|E|=1$, $\Delta\varphi=0$) определяются как $E_x = \cos \alpha$, $E_y = \sin \alpha$. Тогда выражение (7) принимает следующий вид:

$$\beta(\alpha) = \left(\cos^2 \alpha + C_T^2 \operatorname{tg}^2 \theta \cdot \sin^2 \alpha \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Таким образом, из уравнений (7) и (8) следует, что масштаб изображения на экране монитора является функцией не только параметров исследуемой поляризации $(E_x, E_y, \Delta\varphi)$, но и параметрически зависит от величины $C_T \operatorname{tg}\theta$.

Экспериментальная проверка зависимости (8) основывается на следующих рассуждениях: выражение (7) можно представить в виде $i_x = \beta E_x$, $i_y = \beta E_y$, тогда для линейной поляризации соотношение $(i_x^2 + i_y^2)^{1/2} = \beta (E_x^2 + E_y^2) = \beta$ однозначно определяет вид функции $\beta(\alpha)$. Таким образом, измеряя амплитуды токов i_x и i_y в зависимости от азимута линейной поляризации α , можно определить искомую зависимость.

Изображение на экране монитора соответствует характеру изменений электрического вектора исследуемой световой волны. Однако размер изображения изменяется, становясь минимальным при $\alpha = 135^\circ$. Измеренные в соответствии с предложенным методом нормирован-

ные значения масштабного коэффициента $\beta(\theta)/\beta(0)$ при значении $C_T = 0,69$, измеренном путем фотометрирования, близки к расчетным (рис. 2, здесь сплошная линия — расчет, пунктирная — эксперимент).

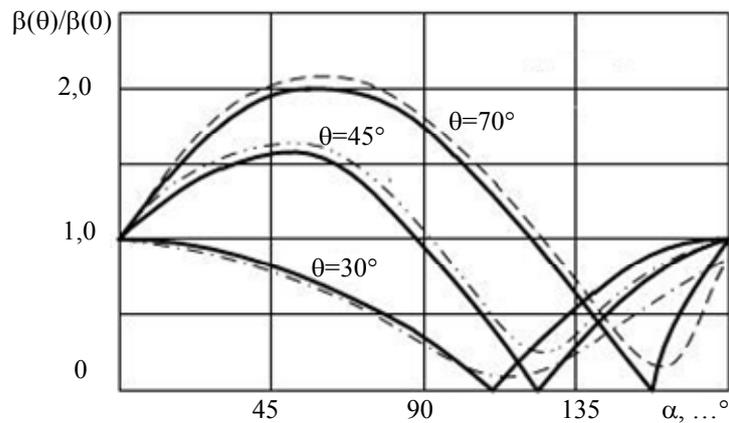


Рис. 2

Наблюдаемые расхождения результатов могут быть связаны с наличием в реальной схеме фазовой анизотропии оптических элементов, которые не учитывались при расчете. Характерная особенность рассматриваемой функции — появление резкого минимума: это говорит о том, что при интерференционном исследовании некоторых форм поляризации мощность сигналов биений может быть соизмерима с мощностью шума. Низкое отношение сигнал/шум в данном случае может стать причиной высокой погрешности измерений и усложнить обработку выходных сигналов. При проектировании интерференционных поляриметров, предназначенных для решения конкретных задач, этот недостаток устраняется при соответствующем выборе оптических характеристик интерферометров и ориентации линейного поляризатора.

Таким образом, согласно результатам исследования формирование из исследуемого пучка опорного, соответствующего условиям $E_y/E_x = 1$ и $\Delta\varphi = 0$, приводит к зависимости параметров проекционной картины эллипса поляризации от коэффициента C_T . Выявленная зависимость позволяет путем изменения азимута линейного поляризатора в опорном плече схемы гетеродинамирования оптимизировать масштаб изображения проекционной картины эллипса поляризации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росс М. Лазерные приемники: Пер. с англ. М.: Мир, 1969. 281 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
3. Гудмен Дж. Статистическая оптика: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 528 с.
4. Дмитриев А. Л. Эллисометр с визуализацией проекционной картины на экране осциллографа // Оптика и спектроскопия. 1972. Т. 32, № 1. С. 191.

Сведения об авторах

- Владимир Анатольевич Трофимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: troftu@mail.ru
- Юрий Тихонович Нагибин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: nagibin77@mail.ru

- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники;
E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Василий Темуржанович Уразгалиев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники;
E-mail: urazgaliev@list.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
05.06.13 г.

SUMMARY

P. 5—12.

SIMULATION OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLE SEPARATION FROM SURFACE CARRIER

A mathematical model is developed to describe transversal launch of unmanned underwater vehicle from surface carrier. Results of simulation are presented. Recommendations on general design of the launcher are formulated.

Keywords: unmanned underwater vehicle, transversal launch, system approach to design, mathematical model.

Data on authors

- Anton V. Krasilnikov* — Cand. Techn. Sci.; State Marine Technical University of St. Petersburg, Research Sector of Promising Power Installations; Senior Scientist; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru
- Roman V. Krasilnikov* — Cand. Techn. Sci.; State Marine Technical University of St. Petersburg, Research Sector of Promising Power Installations; Senior Scientist; E-mail: r.v.krasilnikov@mail.ru

P. 13—17.

PECULIARITIES OF MODELLING OF RANDOMLY INHOMOGENEOUS IONOSPHERE IN THE PROBLEM OF RADIOWAVE PROPAGATION IN THE NEAR-EARTH SPACE

Canonical Pugachev decomposition is used for modelling of randomly inhomogeneous component of one-dimensional electron concentration profile in the ionosphere. For the case of normal and stationary random field of electron concentration, autocorrelation functions are chosen for specific regions of equatorial ionosphere and characteristics are obtained for random decomposition coefficients.

Keywords: random field, modelling of inhomogeneous ionosphere.

Data on authors

- Alexander V. Denisov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Radio Engineering and Telecommunications; E-mail: A.V.Denisov@inbox.ru
- Maxim A. Belyansky* — SRC “Leninets Plant” Inc., St. Petersburg; Deputy Head of Department; E-mail: maxim_belyansky@mail.ru

P. 18—22.

COORDINATES CORRECTION METHOD FOR AIMING MARK OF SPACE ROCKET

The problem of aiming mark choice to ensure the rocket separated part fall in a given Earth surface area is considered. Analytical solution is presented which allows for determination of aiming mark with minimal pre-starting correction of flight program.

Keywords: space rocket, aiming mark, separated part, dispersion ellipse, impact area.

Data on authors

- Vladimir N. Arsenyev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaisky Military Space Academy, Department of Onboard Information and Measuring Complexes, St. Petersburg; E-mail: vladar56@mail.ru
- Dastanbek A. Bulekbaev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaisky Military Space Academy, Department of Higher Mathematics; St. Petersburg; E-mail: atiman@mail.ru
- Sergey B. Silantyev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems, St. Petersburg

P. 23—26.**DETERMINATION OF HARDWARE REDUNDANCY LIMITS OF INFORMATION CONTROL SYSTEMS**

Typical structure of information control system (ICS) based on a microprocessor is considered. A gain in reliability of multi-channel ICS functioning is analyzed.

Keywords: automated control system, reserve, microprocessor, information control system, reliability.

Data on authors

- Alexey V. Averianov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Calculation Systems and Nets, St. Petersburg; E-mail: Aver957@mail.ru
- Anatoly M. Baranovsky* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Systems of Space Rockets Preparation and Launch, St. Petersburg; E-mail: bamvka@mail.ru
- Konstantin A. Esaulov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Calculation Systems and Nets, St. Petersburg; E-mail: home5263@yandex.ru

P. 26—30.**OPTIMIZATION OF CONTROL OVER TECHNOLOGICAL PROCESSES IN DISTRIBUTED SYSTEMS**

Organization of effective control over distributed systems, in particular power complex, with the account for dynamics processes of the production, distribution, accumulation and consuming of energy resources, is considered. A solution of the problem is presented; it is based on the theory of linear programming, analytic identification method, and multi-graph models.

Keywords: optimization, control, gas-transport complex, graph, linear programming, process-role models.

Data on authors

- Oleg I. Lisov* — Dr. Techn. Sci., Professor; National Research University of Electronic Technology, Department of Informatics and Computing Systems Software, Moscow; E-mail: olivlis@mail.ru
- Kyaw Zaw Ye* — Cand. Techn. Sci.; National Research University of Electronic Technology, Department of Informatics and Computing Systems Software, Moscow; E-mail: kyawzawye.47@gmail.com
- Pyae Thein Naing* — Post-Graduate Student; National Research University of Electronic Technology, Department of Informatics and Computing Systems Software, Moscow; E-mail: pyitheinnaing27@gmail.com

P. 31—34.

AUTOMATIC MEASURING SYSTEM FOR CONTROL OVER GEOMETRICAL PARAMETERS OF LOCOMOTIVE WHEEL PAIRS

Principles of functioning of an automatic measuring system developed for control over geometrical parameters of locomotive wheel pairs are considered. Description of design and hardware realization of the devices integrated into the system is provided.

Keywords: locomotive, wheel pair, parameters, device, measuring system, program complex.

Data on authors

- Alexander P. Buinosov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Ural State University of Railway Transport, Department of Electric Traction, Ekaterinburg; E-mail: byinosov@mail.ru, ABuinosov@usurt.ru
- Konstantin A. Statsenko* — Cand. Techn. Sci.; Ural State University of Railway Transport, Department of Electric Traction, Ekaterinburg; E-mail: kstatsenko@mail.ru
- Alexander M. Kislitsyn* — Post-Graduate Student; Ural State University of Railway Transport, Department of Electric Traction, Ekaterinburg; E-mail: alex_teem@mail.ru

P. 35—39.

METHODS AND MEANS FOR REAL-TIME ESTIMATION OF FREQUENCY OFFSET IN SATELLITE COMMUNICATION

The problem of increase in satellite modem communication channel bandwidth is considered. Methods for estimation of frequency error are analyzed in terms of both theory and practice of digital signal processing. An approach is proposed to calculation of complex number module based on the Fast Fourier Transform technique. The approach is shown to reduce significantly the computation time of signal processing. Test results obtained with system on a chip used in the satellite communication complex under development are presented.

Keywords: satellite, communication channel, digital signal processing, system on a chip, algorithm.

Data on authors

- Oleg V. Nepomnyashchy* — Cand. Techn. Sci.; Siberian Federal University, Department of Computer Facilities, Krasnoyarsk; E-mail: 2955005@gmail.com
- Vitaliy A. Habarov* — Cand. Techn. Sci.; Siberian Federal University, Department of Computer Facilities, Krasnoyarsk; E-mail: haba@inbox.ru
- Igor N. Ryzhenko* — Post-Graduate Student; Siberian Federal University, Department of Computer Facilities, Krasnoyarsk; E-mail: rodgi@kras.ru
- Alexey A. Komarov* — Post-Graduate Student; Siberian Federal University, Department of Computer Facilities, Krasnoyarsk; E-mail: komarovalal@gmail.com

P. 40—43.

PROGRAM RECEIVING AND PROCESSING OF SIGNALS IN NAVIGATION SYSTEM “COMPASS”

The software complex developed for signal receiving and processing in satellite navigation system “Compass” (China) is presented. Technology of program receiving of navigation signals allowing for correlation processing is described, results of experiments are demonstrated.

Keywords: satellite navigation, signal detection, program receiver, program correlator, system “Compass”.

Data on authors

- Vladimir A. Avdeev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; E-mail: apex7@rambler.ru
- Vladimir S. Bakholdin* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; E-mail: bvs@email.ru

- Denis A. Gavrilov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; E-mail: gdanas@yandex.ru
- Igor S. Gerasimenko* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; E-mail: iger60@mail.ru
- Vladimir A. Dobrikov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; E-mail: dwa33@mail.ru
- Vadim F. Ivanov* — Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; Senior Lecturer; E-mail: vf_ivanov@list.ru
- Alexey V. Kozlov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; E-mail: kozlov_aleks@mail.ru
- Igor V. Sakhno* — Dr. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; E-mail: Vstrecha10@mail.ru
- Andrey B. Simonov* — Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; Lecturer; E-mail: ab_simonov@rambler.ru
- Evgeny A. Tkachev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Radiolocation and Radionavigation, St. Petersburg; E-mail: tke33@mail.ru

P. 44—49.

POLARIZER FOR EFFECTIVE MAGNETIZATION OF FLOWING LIQUID

The problem of local reduction of longitudinal relaxation time of pure water in polarizer is considered. Simultaneous effect of stationary electric and magnet fields on longitudinal relaxation time of pure water at various temperatures is studied experimentally.

Keywords: magnet-polarizer, vessel-polarizer, magnetization, spontaneous relaxation time, viscosity.

Data on authors

- Vadim V. Davydov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Quantum Electronics; E-mail: davydov_vadim66@mail.ru
- Valentin I. Dudkin* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Quantum Electronics; E-mail: vidoodkin@mail.ru
- Anton Yu. Karseev* — Student; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Quantum Electronics; E-mail: antonkarseev@gmail.com

P. 50—56.

BRIDGE CIRCUITS WITH PULSE SUPPLY AND BALANCING WITH EARTHED TUNABLE ELEMENTS

The problem of parameters estimation for complex two-port networks using bridge circuits with pulse supply and balancing with earthed controllable elements. Conditions of measuring circuit equilibrium are formulated, analytical relations are proposed for estimation of two-port network parameters on the base of experimentally obtained data.

Keywords: bridge circuit, pulse supply, equilibrium conditions, tunable element.

Data on author

- Gennady I. Peredelsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; Southwest State University, Department of Electric Power Supply, Kursk; E-mail: kafedra.es@yandex.ru

P. 57—62.

MODULAR DESIGN OF OPTICAL SYSTEMS

Principle of modular design, types of optical modules and their corrective properties are considered. Original optical schemes are described; results of aberration calculation for various optical systems, including high-aperture objectives, condensers, microscope objectives and oculars are presented.

Keywords: optical module, aberrations, aspheric, objective, ocular, condenser.

Data on authors

- Lev N. Andreev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics
- Vasilisa V. Ezhova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: evv_foist@mail.ru
- Galina S. Degtyareva* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics

P. 63—68.

ALGORITHM OF SMALL-SIZED OBJECTS DETECTION WITH THERMOVISION OBSERVING SYSTEM BASED ON LOCALIZATION OF SPATIAL ANOMALIES

An algorithm of thermal image processing for heated object detection is developed. The algorithm allowing for hardware realization is based on localization of anomalies in distributions of irradiance and its gradient in infrared image. Results of the algorithm efficiency tests carried out with data obtained in actual situation are presented.

Keywords: infrared image processing, object detection, spatial anomalies.

Data on authors

- Sergey M. Borzov* — Cand. Techn. Sci.; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of RAS, Laboratory of Information Optics, Novosibirsk; Head of the Laboratory; E-mail: borzov@iae.nsk.su
- Oleg I. Potaturkin* — Dr. Techn. Sci., Professor; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk; Deputy Director for Scientific Work; Novosibirsk National Research State University; E-mail: potaturkin@iae.nsk.su

P. 68—73.

DEVELOPMENT OF MODERN QUANTITATIVE SHADOW METHOD

Original quantitative method of shadow image digitization is developed. The method is based on transformation of Foucault knife-edge shadow pattern into a geometrical model of shadow image of linear grating. The proposed approach is reported to provide a map of analyzed wave front deformations and image quality characteristics of the optical system.

Keywords: shadow method, Foucault knife-edge, geometrical model of lateral shear interferogram, izofotometry method, wavefront deformation.

Data on authors

- Marina E. Zatsepina* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: marichka_z@list.ru
- Vladimir K. Kirillovsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: vkkir@mail.ru

P. 73—78.

CAMERA-SPECTROMETER FOR RESEARCH IN MINERALOGICAL COMPOSITION OF SOIL

An optoelectronic instrument is developed for determination of mineralogical composition of various soils, including the lunar soil (regolith). A combined method of single-detector spectral and luminescent analysis employed in the instrument is described.

Keywords: optical spectrometer, interference filters, optical matrix, luminescent analysis, mineralogical structure.

Data on authors

- Alexander N Lipatov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Space Research Institute, Moscow; Senior Scientist; E-mail: slip@iki.rssi.ru
- Alexey P. Ekonomov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Space Research Institute, Moscow; Senior Scientist; E-mail: alekonomo@yandex.ru
- Vladislav S. Makarov* — Space Research Institute, Moscow; Leading Specialist; E-mail: vmakarov@mx.iki.rssi.ru
- Gennady V. Zakharkin* — Closed Joint-Stock Company “Interastro”, Moscow; Leading Specialist; E-mail: eslab@mail.ru
- Dmitry L. Bogachev* — SRC “Leninets Plant” Inc., St. Petersburg; Optical Engineer; E-mail: dmitry@mail.ru
- Dmitry M. Rumyantsev* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Engineering Design Center for Studies and Research “Russar”, St. Petersburg; Director; E-mail: oda2606@yandex.com
- Sergey A. Antonenko* — Closed Joint-Stock Company “Interastro”, Moscow; Leading Specialist; E-mail: eslab@mail.ru

P. 78—82.

SCALE STUDY OF PROJECTION IMAGE OF POLARIZATION ELLIPSE

The problem of light beam vector characteristics measurement with optical heterodyne method is considered. Scale of projection image of polarization ellipse is studied. Some precautions against the observed perturbations on measuring accuracy are suggested.

Keywords: polarization, optical heterodyning, interference picture, amplitude-phase characteristics, photodetector.

Data on authors

- Vladimir A. Trofimov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Informational Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; E-mail: troftu@mail.ru
- Yury T. Nagibin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Informational Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; E-mail: nagibin77@mail.ru
- Victor T. Prokopenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Informational Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Vasily T. Urazgaliev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Informational Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; E-mail: urazgaliev@list.ru