

УДК 515.317.1

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ СБОРА ИНФОРМАЦИИ

Г. Н. Мальцев,

доктор техн. наук, профессор

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Приводятся методика и результаты расчетов потенциальной разрешающей способности наземных оптико-электронных систем, формирующих изображения с естественной (пассивный режим) и лазерной (активный режим) подсветкой. Полагается, что при естественной подсветке формируются некогерентные изображения, а при лазерной подсветке – спекл-изображения, по которым оценивается форма наблюдаемого объекта. Разрешающая способность определяется по величине порогового контраста. Показано, что предельная разрешающая способность в пассивном режиме в два раза выше, чем в активном, однако при сильных атмосферных фазовых искажениях и сглаживании изображений матричным фотоприемником разрешающая способность в пассивном и активном режимах практически совпадает.

The methodic and results of computation of the potential resolution of ground optical optoelectronic systems, which forming of images with natural (passive regime) and laser (active regime) illumination, are presented. Thinks that at natural illumination the non-coherent images are forming and at laser illumination the speckle-images are forming and by then the form of observing objects is estimated. The resolving power is estimated by value of threshold contrast. Shows that the limiting resolution at passive regime at two times higher that at active regime, but at strong atmosphere phase distortions and image smoothing by matrix photodetector the resolution at passive and active regimes practically conform.

Оптико-электронные системы (ОЭС) сбора информации получают широкое распространение при решении задач наблюдения и распознавания удаленных объектов, измерения параметров их движения, наведения и целеуказания. Основной информационной характеристикой ОЭС, предназначенных для наблюдения и распознавания объектов по регистрируемым изображениям, является разрешающая способность, определяемая как способность системы воспроизводить изображения штрихов специального тест-объекта (миры) [1–3]. Такой подход к определению потенциальной разрешающей способности ОЭС обусловлен преимущественным использованием при распознавании объектов по оптическим изображениям дешифрирования – неавтоматизированной обработки специально подготовленными операторами-дешифровщиками, по крайней мере, на этапе принятия решений.

Для аналитической оценки потенциальной разрешающей способности ОЭС при дешифрировании изображений общепринятым является использование метода порогового контраста, основанного на решении частотно-контрастного уравнения (разрешающая способность по Фуко) [1, 4]. Первоначально эта методика была сфор-

мулирована для оптических систем с фотографической регистрацией некогерентных изображений. С развитием матричных фотоприемных устройств она была распространена на оптические системы с оптико-электронной регистрацией изображений. Дальнейшее обобщение этого метода состоит в его распространении на ОЭС, формирующие изображения наблюдаемых объектов с лазерной подсветкой. При лазерной подсветке наблюдаемых объектов в ОЭС регистрируются спекл-изображения с пятенной структурой [5, 6], однако в предположении, что при дешифрировании спекл-изображений действуют те же закономерности зрительного восприятия, что и при дешифрировании некогерентных изображений, можно с учетом свойств спекл-изображений распространить метод порогового контраста и на этот режим наблюдения.

Введение в структуру ОЭС канала лазерной подсветки не исключает возможности наблюдения объектов и в естественной подсветке [7], поэтому будем полагать, что анализируемая ОЭС сбора информации используется для наблюдения объектов и с естественной, и с лазерной подсветкой. Наблюдение с лазерной подсветкой соответствует активному режиму работы, а наблюдение

с естественной подсветкой – пассивному режиму. Распространение метода порогового контраста на ОЭС, формирующие спекл-изображения, позволяет получить сопоставимые оценки потенциальной разрешающей способности ОЭС с заданными характеристиками в активном и пассивном режимах работы, в том числе с учетом атмосферных искажений, влияющих на разрешающую способность наземных оптических систем.

Для сравнения разрешающей способности ОЭС в пассивном и активном режимах работы необходимо при выбранных характеристиках ОЭС решать частотно-контрастное уравнение для случаев формирования некогерентных изображений и спекл-изображений. В общем случае частотно-контрастное уравнение имеет вид

$$CT(\kappa) = K_{\text{пор}}(\kappa), \quad (1)$$

где C – контраст тест-объекта (миры); $T(\kappa)$ – частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) сквозного тракта формирования изображения (включая среду распространения); $K_{\text{пор}}(\kappa)$ – пороговая характеристика системы регистрации, учитывающая влияние всех значимых источников зашумления регистрируемого изображения и пороговое отношение сигнал/шум зрительного анализатора. Разрешающей способности соответствует пространственная частота κ_0 , являющаяся наименьшим корнем уравнения (1).

С пространственной частотой κ_0 может быть связано линейное разрешение на наблюдаемом объекте

$$\Delta l = R / (\kappa_0 F),$$

где R – расстояние до объекта, F – фокусное расстояние оптической системы. Кроме того, с нормированной пространственной частотой $\kappa_0 \lambda F / D$, где λ – рабочая длина волны, D – диаметр апертуры оптической системы, удобно сравнивать другие показатели качества оптических систем – коэффициент Штреля, эквивалентный диаметр приемной апертуры [8].

Были выполнены расчеты разрешающей способности ОЭС по величине порогового контраста при формировании изображений с естественной и лазерной подсветкой в условиях атмосферных фазовых искажений.

При решении частотно-контрастного уравнения (1) для случая формирования некогерентных оптических изображений использовались ЧКХ сквозного тракта

$$T(\kappa) = T_0(\kappa)T_\varphi(\kappa)T_{\text{прм}}(\kappa) \quad (2)$$

и пороговая характеристика

$$K_{\text{пор}}(\kappa) = \frac{\pi}{4} \sqrt{K_{\text{пор.з}}^2(\kappa) + K_{\text{пор.ф}}^2(\kappa) + K_{\text{пор.д}}^2(\kappa)}, \quad (3)$$

где $T_0(\kappa)$ – ЧКХ некогерентной оптической системы; $T_\varphi(\kappa)$ – ЧКХ среды распространения, учитывающая действующие фазовые искажения; $T_{\text{прм}}(\kappa)$ – ЧКХ матричного фотоприемника; $K_{\text{пор.з}}(\kappa)$ – пороговая характеристика зрительного анализатора; $K_{\text{пор.ф}}(\kappa)$ – пороговая характеристика флуктуационного шума регистрации; $K_{\text{пор.д}}(\kappa)$ – пороговая характеристи-

ка шума дискретизации изображения матричным фотоприемником. Коэффициент $\pi/4$ соответствует переходу от прямоугольных пространственных частот миры, для которых определяются составляющие пороговой характеристики $K_{\text{пор}}(\kappa)$, к синусоидальным.

При решении частотно-контрастного уравнения для случая формирования спекл-изображений использовались ЧКХ сквозного тракта

$$T(\kappa) = T_\varphi(\kappa)T_\psi(\kappa)T_{\text{прм}}(\kappa) \quad (4)$$

и пороговая характеристика

$$K_{\text{пор}}(\kappa) = \frac{\pi}{4} \times \sqrt{K_{\text{пор.з}}^2(\kappa) + K_{\text{пор.ф}}^2(\kappa) + K_{\text{пор.д}}^2(\kappa) + K_{\text{пор.сп}}^2(\kappa)}, \quad (5)$$

отличающиеся от соответствующих характеристик (2) и (3) для случая формирования некогерентных оптических изображений использованием вместо ЧКХ $T_0(\kappa)$ эквивалентной ЧКХ оптической системы, $T_\psi(\kappa)$, формирующей спекл-изображения, и введением в пороговую характеристику составляющей $K_{\text{пор.сп}}(\kappa)$ – пороговой характеристики спекл-шума.

В качестве ЧКХ оптической системы $T_0(\kappa)$ использовалась оптическая передаточная функция (ОПФ) безабберационной некогерентной оптической системы с круглой апертурой диаметром D :

$$T_0(\kappa) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\kappa \lambda F}{D}\right) - \frac{\kappa \lambda F}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa \lambda F}{D}\right)^2} \right], & \kappa \leq \frac{D}{\lambda F}, \\ 0, & \kappa > \frac{D}{\lambda F}. \end{cases} \quad (6)$$

ЧКХ среды распространения задавалась в виде

$$T_\varphi(\kappa) = \exp\left[-\frac{1}{2} D_\varphi \left(\frac{\kappa \lambda F}{D}\right)\right], \quad (7)$$

где $D_\varphi(\rho)$ – структурная функция действующих фазовых искажений, приведенных к плоскости приемной апертуры. Атмосферные фазовые искажения описывались структурной функцией

$$D_\varphi(\rho) = 6,88 \left(\frac{\rho}{r_0}\right)^{5/3} \left[1 - Q\left(\frac{\rho}{D}\right)\right]^{1/3}, \quad (8)$$

где r_0 – радиус когерентности искажений (радиус Фрида). Степень атмосферных фазовых искажений характеризует отношение D/r_0 . При $Q = 0$ использованная структурная функция (8) соответствует атмосферным искажениям при «длинной» экспозиции, при $Q = 1$ – атмосферным искажениям при «короткой» экспозиции.

Использование «короткой» экспозиции рассматривалось в качестве простейшего метода повышения разрешающей способности оптических систем, формирующих изображения в условиях атмосферных искажений [8]. При экспозиции (здесь под экспозицией понимается выдержка при регистрации) порядка 10–20 мс для крупно-

масштабных фазовых искажений выполняется условие «замороженности». Эти искажения обуславливают смещения изображения наблюдаемого объекта в целом и разрешающая способность по сравнению с «длинной» экспозицией улучшается.

Эквивалентная ЧКХ оптической системы при формировании спекл-изображений задавалась в виде

$$T_{\Theta}(k) = \begin{cases} T_0(k), k \leq \frac{\sqrt{S}}{2\lambda F}, \\ 0, k > \frac{\sqrt{S}}{2\lambda F}, \end{cases} \quad (9)$$

где $T_0(k)$ – ОПФ некогерентной оптической системы (6). Ограничение пространственных частот огибающей, передаваемых оптической системой при формировании спекл-изображений, частотой $k = \sqrt{S}/(2\lambda F)$ соответствует дифракционному ограничению разрешающей способности когерентных оптических систем [5] и обусловлено дискретностью представления огибающей спекл-изображения регистрируемой пятенной структурой.

Пространственную дискретизацию изображения при регистрации его матричным фотоприемником описывает ЧКХ

$$T_{\text{прм}}(k) = \frac{\sin(\pi ka)}{\pi ka}, \quad (10)$$

где a – линейный размер элемента матрицы. Соотношение между размером элемента матрицы и размером дифракционного элемента разрешения (пятна спекл-структуры) характеризует коэффициент $k = aD/(\lambda F)$.

Шумы зрительного анализатора полагались постоянными во всем диапазоне пространственных частот: $K_{\text{пор,з}} = 0,02$ при $0 \leq k \leq D/(\lambda F)$. Такое описание шумов зрительного анализатора соответствует предположению, что дешифровщик может выбирать удобные для него яркость экрана, время экспозиции и другие характеристики условий наблюдения [1, 4].

Флуктуационный шум матричного фотоприемника при регистрации изображения тест-объекта типа штриховой миры описывался пороговой характеристикой

$$K_{\text{пор,ф}}(k) = \frac{q_{\text{пор}} \sqrt{2}\sigma_{\text{ф}}^k}{1,3g \sqrt{N}}, \quad (11)$$

где $q_{\text{пор}}$ – пороговое отношение сигнал/шум зрительного анализатора; g – градиент воспроизведения тонов; $\sigma_{\text{ф}}$ – эффективное значение флуктуационного шума в элементе матричного фотоприемника (аналог постоянной Селвина фотопленки); N – число штрихов тест-объекта.

Шум пространственной дискретизации (пикселизации) изображения описывался пороговой характеристикой

$$K_{\text{пор,д}}(k) = \frac{q_{\text{пор}} \sin[\pi(ka - 1)]}{1,3g \pi(ka - 1)}, \quad (12)$$

где a – линейный размер элемента матрицы (пикселя), в пределах которого происходит осреднение регистрируемой интенсивности изображения.

Спекл-шум, обусловленный пятенной структурой регистрируемого спекл-изображения, описывался пороговой характеристикой

$$K_{\text{пор,сп}}(k) = \frac{q_{\text{пор}} \pi k \lambda F}{1,3g \sqrt{10S}} [T_0(k)]^{-1/2}, \quad (13)$$

где $T_0(k)$ – ОПФ некогерентной оптической системы (6); S – площадь приемной апертуры.

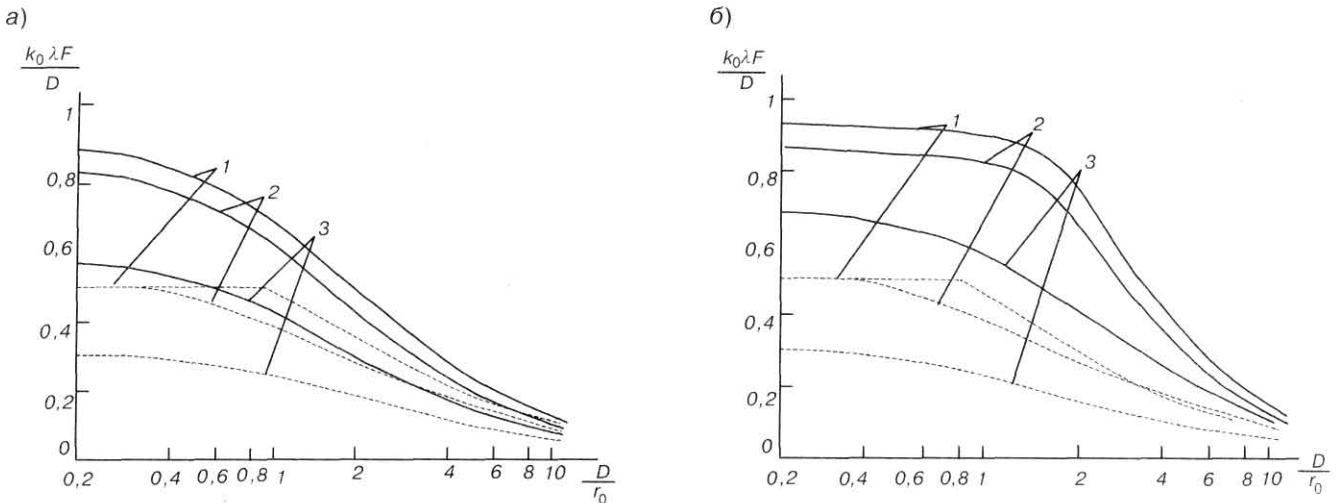
Приведенная пороговая характеристика спекл-шума (13) получена исходя из анализа статистических свойств спекл-изображений [5, 6] и соответствует нормированному среднеквадратическому значению пространственного спектра спекл-шума на пространственной частоте k в спекл-изображении пятиштриховой миры ($N = 5$).

Следует отметить, что в реальных условиях применения ОЭС сбора информации могут иметь место и другие источники искажений пространственного спектра формируемого изображения и шумов регистрации. Они также могут учитываться в ЧКХ (2), (4) и пороговых характеристиках (3), (5) при решении частотно-контрастного уравнения (1). Так, могут быть введены ЧКХ смаза, дефокусировки и других факторов, в тех или иных условиях значимых для определения разрешающей способности ОЭС [9].

При расчетах полагалось: $D/F = 1; 10$, $\lambda = 0,5$ мкм, $q_{\text{пор}} = 2$, $\sigma_{\text{ф}} = 0,5$ мкм, $g = 2$, и варьировались параметры C , D/r_0 и k . Учет величин D/F и λ имеет значение, поскольку при переходе к нормированной пространственной частоте $k\lambda F/D$ появляется зависимость пороговой характеристики флуктуационного шума от относительного отверстия оптической системы D/F и рабочей длины волны λ .

Рис. 1 иллюстрирует влияние атмосферных искажений на разрешающую способность ОЭС при формировании изображений в пассивном и активном режимах работы. Здесь показаны зависимости нормированной пространственной частоты $k_0\lambda F/D$ от отношения D/r_0 при различном контрасте наблюдаемого объекта и формировании изображений с «длинной» (а) и «короткой» (б) экспозицией. Полагалось $k = 0,1$. Кривые 1 соответствуют сильноконтрастным ($C = 1$), кривые 2 – среднеконтрастным ($C = 0,6$), кривые 3 – слабоконтрастным ($C = 0,2$) объектам, сплошные линии соответствуют пассивному режиму работы (некогерентные изображения), штриховые линии – активному режиму работы (спекл-изображения).

При $D/r_0 < 0,2$ в случае «длинной» экспозиции и при $D/r_0 < 0,6$ в случае «короткой» экспозиции нормированная пространственная частота $k_0\lambda F/D$ приближается к своим предельным значениям, соответствующим отсутствию атмосферных искажений. При формировании некогерентных изображений имеет место заметный выигрыш в разрешающей способности при регистрации изображений с «короткой» экспозицией по сравнению с «длинной» экспозицией, в то время как при формировании спекл-изображений зависимости $k_0\lambda F/D$ от D/r_0 для «длинной» и «короткой» экспозиции практически совпадают. Это свидетель-



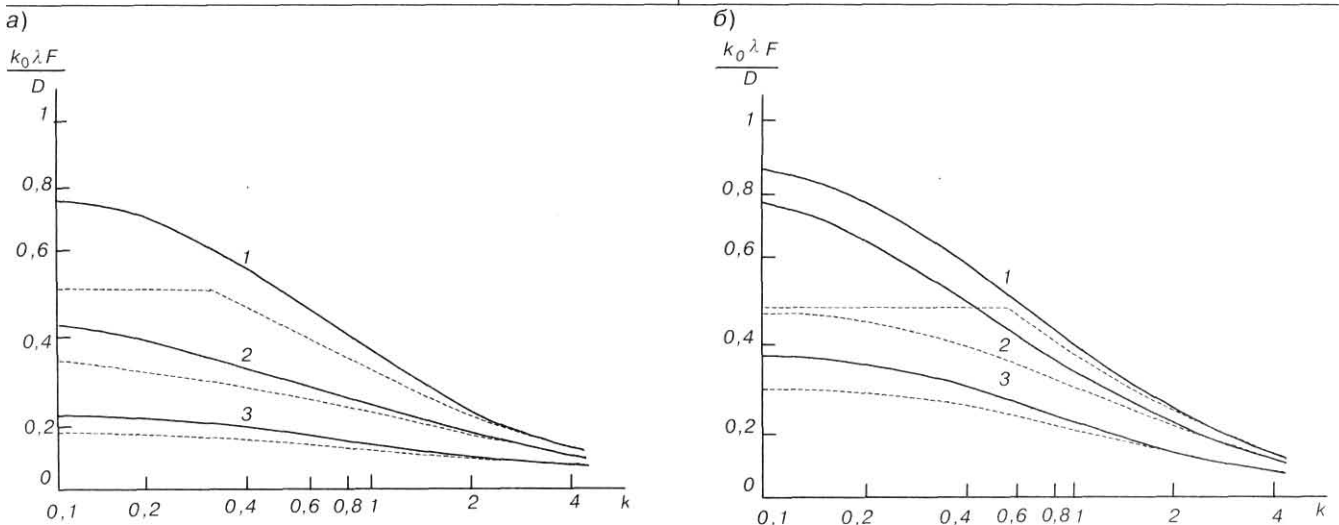
■ Рис. 1. Влияние на разрешающую способность ОЭС действующих атмосферных искажений: а – при «длинной» экспозиции; б – при «короткой» экспозиции

стует о том, что при формировании спекл-изображений использование «короткой» экспозиции для повышения разрешающей способности неэффективно. В той области значений D/r_0 , где при формировании некогерентных изображений «короткая» экспозиция позволяет повысить разрешающую способность, при формировании спекл-изображений доминирующее влияние на разрешающую способность оказывает спекл-шум. При этом влияние спекл-шума оказывается более значительным, чем ограничение пространственных частот огибающей спекл-изображения, передаваемых эквивалентной ЧКХ (9), которое проявляется только в случае сильноконтрастных объектов и при слабых атмосферных искажениях ($D/r_0 < 0,6$).

Рис. 2 иллюстрирует влияние шума пространственной дискретизации на разрешающую способность ОЭС при формировании изображений в пассивном и активном режимах работы. Здесь показаны зависимости нормированной пространственной частоты $k_0 \lambda F / D$ от коэффициента k , характеризующего степень сглаживания изображе-

ния матричным фотоприемником, при различной степени атмосферных фазовых искажений и формировании изображений с «длинной» (а) и «короткой» (б) экспозицией. Полагалось $S = 1$. Кривые 1 соответствуют слабым атмосферным искажениям ($D/r_0 = 0,5$), кривые 2 – средним искажениям ($D/r_0 = 2$), кривые 3 – сильным искажениям ($D/r_0 = 5$), сплошные линии соответствуют пассивному режиму работы (некогерентные изображения), штриховые линии – активному режиму работы (спекл-изображения).

Шум пространственной дискретизации оказывает определяющее влияние на разрешающую способность ОЭС при $k > 1$, когда значения нормированной пространственной частоты $k_0 \lambda F / D$, соответствующей формированию некогерентных изображений и спекл-изображений, практически совпадают. При уменьшении k в области $k < 1$ разрешающая способность при формировании некогерентных изображений увеличивается и стремится к своим предельным значениям, соответствующим уровню действующих атмосферных фазовых



■ Рис. 2. Влияние на разрешающую способность ОЭС степени сглаживания изображения матричным фотоприемником: а – при «длинной» экспозиции; б – при «короткой» экспозиции

искажений, а при формировании спекл-изображений разрешающая способность насыщается в области $k_0 \lambda F / D \leq 0,5$ вследствие доминирующего влияния спекл-шума. При этом ограничение пространственных частот огибающей спекл-изображения, передаваемых эквивалентной ЧКХ (6), проявляется только в случае сильноконтрастных объектов и при слабой степени сглаживания изображения матричным фотоприемником ($k < 0,4$ при «длинной» экспозиции и $k < 0,6$ при «короткой» экспозиции).

Приведенные соотношения позволяют с единых позиций проводить анализ потенциальных характеристик и информационных возможностей ОЭС, формирующих некогерентные изображения наблюдаемых объектов в пассивном режиме и спекл-изображения в активном режиме. Результаты расчетов показывают, что в различных условиях наблюдения соотношение между разрешающей способностью в пассивном и активном режимах работы может быть различным. Активный режим, обладая преимуществами с точки зрения возможности управления излучением подсветки и работы при больших уровнях фонового шума, вследствие пятенной структуры формируемых спекл-изображений всегда проигрывает пассивному режиму в разрешающей способности. Предельная разрешающая способность при формировании некогерентных изображений в два раза выше, чем при формировании спекл-изображений. Однако при определенных условиях (сильные атмосферные искажения, высокая степень сгла-

живания изображений матричным фотоприемником) разрешающая способность систем с некогерентной и когерентной подсветкой практически совпадает, оставаясь при этом далекой от своих предельных значений.

Литература

1. Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. – Киев: Техника, 1981. – 134 с.
2. Зега Э. П., Иванов А. П., Кацев И. Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. – Минск: Наука и техника, 1985. – 328 с.
3. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
4. Живичин А. Н., Соколов В. С. Дешифрирование оптических изображений. – М.: Недра, 1980. – 254 с.
5. Гудмен Д. Статистическая оптика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 528 с.
6. Матвеев И. Н., Протопопов В. В., Троицкий И. Н., Устинов Н. Д. Лазерная локация. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
7. Воробьев В. И. Оптическая локация для радиоинженеров. – М.: Радио и связь, 1983. – 176 с.
8. Устинов Н. Д., Матвеев И. Н., Протопопов В. В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
9. Якушков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.

Ю. П. Иванов, В. Г. Никитин, В. Ю. Чернов

Контроль и диагностика измерительно-вычислительных комплексов: Учеб. пособие / СПб.: СПбГУАП, 2004. – 98 с.: ил. ISBN 5-8088-0114-1

Изложены основные понятия, задачи, методы и способы контроля и диагностики технического состояния измерительно-вычислительных комплексов летательных аппаратов. Описаны обобщенная структура и основные характеристики систем контроля, основные показатели достоверности контроля и ее составляющие, а также выбор допусков на параметры контроля и методы принятия решений в процессе контроля. Рассмотрены методы, аппаратные и программные средства цифровых измерительно-вычислительных комплексов с помощью систем встроенного контроля и диагностики.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 190300 «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы», 131000 «Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов», а также магистров по направлению 5515 «Приборостроение» и бакалавров по направлению 5520 «Эксплуатация авиационной и космической техники».

В. П. Иванов
В. Г. Никитин
В. Ю. Чернов

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
КОМПЛЕКСОВ

