

Л. В. ТЫМКУЛ, В. М. ТЫМКУЛ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ В ПРОИЗВОЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

Предлагаются методика, математическое обеспечение и структура алгоритма компьютерного моделирования работы приборов ночного видения в произвольно поляризованном свете.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, прибор ночного видения, поляризованный свет.

Вопросам разработки теории математических и компьютерных моделей функционирования приборов ночного видения (ПНВ) посвящен ряд работ [1—5]. Так, в статье [1] рассмотрена теория формирования яркости изображения объектов и фона на экране ПНВ активного и пассивного типов в приближении геометрической оптики. В этой же работе получены выражения для абсолютного и относительного контраста изображения объектов на экране ПНВ, следует отметить, что авторам удалось вполне точно отразить основные функциональные составляющие оптического излучения, которые формируют суммарную яркость изображения объектов и фона на экране ПНВ пассивного и активного типа.

Для использования теории линейных систем при расчете характеристик ПНВ в статьях [2, 3] нами на основе положений физической оптики разработаны теория и математическая модель функционирования ПНВ активного и пассивного типа в неполяризованном свете. В этих работах получены математические модели пространственно-частотных спектров (ПЧС)

яркости изображения объектов и фона, а также аналогичные спектры абсолютного и относительного контраста объектов, на основании которых представлена методика расчета дальности действия и разрешения ПНВ. В статье [4] представлена математическая модель работы ПНВ пассивного типа в поляризованном свете. В работе [5] рассмотрена модель структурного описания ПНВ и проведена компьютерная оценка дальности распознавания объектов наблюдения.

Интерес к анализу возможностей и моделированию работы поляризационных ПНВ вызван в основном двумя факторами, которые сформулированы в работе [4]. Согласно этой статье, первый фактор связан с возможностью повышения наблюдаемого контраста в поляризованном свете за счет подавления поляризационным фильтром уровня излучения фона. Это позволяет увеличить дальность действия и распознавания ПНВ. Однако имеет место и другой, противоположный, фактор — энергия оптического излучения при прохождении через поляризационный фильтр в виде линейных поляризаторов и фазовых пластинок снижается. Это может привести к уменьшению дальности действия и распознавания. Очевидно, что сопоставление этих двух противоположных факторов и формирует суммарный (положительный/отрицательный) эффект функционирования поляризационных ПНВ.

В этой связи целью настоящей статьи является разработка методики компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа в произвольно поляризованном свете.

В основу компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа в произвольно поляризованном свете заложены теория и математические модели работы этих приборов в поляризованном и неполяризованном свете [2—4]. Согласно этим работам, математические модели работы ПНВ пассивного типа содержат следующие информационные соотношения:

— для модуля пространственно-частотного спектра (ПЧС) яркости изображения объекта $L_o(v, \mu)$ и фона $L_\phi(v, \mu)$ на экране ПНВ в произвольно поляризованном свете;

— для модуля ПЧС абсолютного $\Delta L(v, \mu)$ и относительного $K(v, \mu)$ контраста в изображении объектов на экране ПНВ в произвольно поляризованном свете;

— составляющие модуля ПЧС яркости изображения объекта, формирующегося за счет подсветки излучением неба $L_{он}(v, \mu)$ и Луны $L_{ол}(v, \mu)$;

— составляющие модуля ПЧС яркости изображения фона, формирующегося за счет подсветки излучением неба $L_{фн}(v, \mu)$ и Луны $L_{фл}(v, \mu)$;

— выражение для модуля ПЧС яркости рассеянного излучения слоя атмосферы $L_c(v, \mu)$ между объектом и прибором;

— для частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) оптической системы ПНВ $h_{опт}(v, \mu)$ и электронно-оптического преобразователя (ЭОП) $h_{эоп}(v, \mu)$;

— для модуля ПЧС яркости темнового свечения экрана $L_3(v, \mu)$ как внутренней помехи;

— выражения, связывающие пространственные частоты v и μ разрешаемых элементов в пространстве изображений по координатам x и y с критическими размерами объекта a_x и a_y , фокусным расстоянием объектива ПНВ f' , линейным увеличением ЭОП V' , дальностью l и числом периодов N_p пространственной миры, разрешаемых вдоль критического размера объекта.

На основе работ [2—4] указанные соотношения в математических моделях имеют следующий вид:

$$L_o(v, \mu) = \left\{ \left[L_{он}(v, \mu) + L_{ол}(v, \mu) \right] \left[1 + P_o \cos 2(t_o - \alpha) \right] + L_c(v, \mu) \left[1 + P_\phi \cos 2(t_\phi - \alpha) \right] \right\} \tau_\pi h_{опт}(v, \mu) h_{эоп}(v, \mu) + L_3(v, \mu); \quad (1)$$

$$L_{\Phi}(v, \mu) = \left\{ \left[L_{\Phi H}(v, \mu) + L_{\Phi L}(v, \mu) \right] \left[1 + P_{\Phi} \cos 2(t_{\Phi} - \alpha) \right] + L_c(v, \mu) \left[1 + P_{\Phi} \cos 2(t_{\Phi} - \alpha) \right] \right\} \tau_{\Pi} h_{\text{опт}}(v, \mu) h_{\text{эоп}}(v, \mu) + L_3(v, \mu); \quad (2)$$

$$\Delta L(v, \mu) = \left| L_o(v, \mu) - L_{\Phi}(v, \mu) \right|; \quad (3)$$

$$K(v, \mu) = \left| \left[L_o(v, \mu) - L_{\Phi}(v, \mu) \right] / \left[L_o(v, \mu) + L_{\Phi}(v, \mu) \right] \right|; \quad (4)$$

$$h_{\text{опт}}(v, \mu) = e^{-2\delta_{\text{об}}^2(v^2 + \mu^2)}; \quad (5)$$

$$h_{\text{эоп}}(v, \mu) = e^{-2\delta_{\text{эоп}}^2(v^2 + \mu^2)}; \quad (6)$$

$$v = N_p l / a_x f' V; \quad (7)$$

$$\mu = N_p l / a_y f' V. \quad (8)$$

Здесь (P_o, t_o) , (P_{Φ}, t_{Φ}) — степень и азимут поляризации излучения объекта и фона соответственно; $\delta_{\text{об}}$, $\delta_{\text{эоп}}$ — диаметр пятна рассеяния объектива и ЭОП ПНВ соответственно; α — азимут поляризации линейного поляризатора, установленного перед объективом ПНВ; τ_{Π} — коэффициент пропускания поляризатора.

Следует отметить, что составляющие модуля ПЧС яркости изображения объекта получают следующим образом:

$$L_{\text{оH}}(v, \mu) = L_{\text{оH}} \left[\left(\frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} \beta_{\text{пс}}(\Psi_H) e^{-j2\pi(v x + \mu y)} dx dy \right| \right]; \quad (9)$$

$$L_{\text{оЛ}}(v, \mu) = L_{\text{оЛ}} \left[\left(\frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} \beta(\Psi_H) e^{-j2\pi(v x + \mu y)} \cos \Psi_L dx dy \right| \right]; \quad (10)$$

$$L_c(v, \mu) = L_c \left[\left(\frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} e^{-j2\pi(v x + \mu y)} dx dy \right| \right]; \quad (11)$$

$$L_3(v, \mu) = L_3 \left[\left(\frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} e^{-j2\pi(v x + \mu y)} dx dy \right| \right]. \quad (12)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения: $\beta(\Psi_H)$, $\beta_{\text{пс}}(\Psi_H)$ — индикатриса коэффициента яркости отражения покрытия поверхности объекта при направленном и полусферическом освещении соответственно; S_o — площадь поверхности объекта в пространстве изображений; Ψ_L , Ψ_H — угол между нормалью к элементу поверхности объекта и направлением на Луну и на наблюдателя.

Следует отметить, что значения $L_{\text{оH}}$, $L_{\text{оЛ}}$, L_c , L_3 выражаются через параметры составных звеньев ПНВ и объектно-фоновой обстановки следующим образом [1]:

$$L_{\text{оH}} = (k\eta\tau_{\text{опт}}L_{\text{нH}}d^2\rho\beta_{\text{пс}}/4(f')^2 V^2) e^{-\sigma l}; \quad (13)$$

$$L_{\text{оЛ}} = (k\eta\tau_{\text{опт}}E_L d^2\rho\beta/4\pi(f')^2 V^2) e^{-\sigma l}; \quad (14)$$

$$L_c = (k\eta\tau_{\text{опт}}L_{\text{нн}}d^2 / 4(f')^2 V^2)(1 - e^{-\sigma l}); \quad (15)$$

$$L_3 = k\eta j / k_{\text{эоп}}\pi V^2, \quad (16)$$

где $L_{\text{нн}}$ — яркость излучения ночного неба; $E_{\text{л}}$ — освещенность, создаваемая излучением Луны в месте расположения объекта; d — диаметр входного зрачка объектива ПНВ; $\tau_{\text{опт}}$ — коэффициент пропускания оптической системы ПНВ без поляризационного фильтра; k , $k_{\text{эоп}}$ — коэффициенты использования соответственно системой „прибор-глаз“ и фотокатодом ЭОП; η — коэффициент усиления ЭОП; φ , j — интегральная чувствительность и плотность тока термоэлектронной эмиссии фотокатода ЭОП; σ — объемный показатель ослабления атмосферы; ρ — диффузный коэффициент отражения поверхности объекта.

В свою очередь, модули ПЧС яркости изображения фона на экране ПНВ получаются аналогично соотношениям (9)—(12).

Представим алгоритм компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа в поляризованном и неполяризованном свете.

1. Ввод исходных данных для следующих информационных модулей:

- параметры ПНВ и его составных звеньев;
- условия естественного освещения и метеорологическое состояние атмосферы;
- параметры объектно-фоновой обстановки и условия наблюдения;
- поляризационные характеристики объекта и фона.

2. Формирование операторов расчета модулей ПЧС яркости изображения объекта и фона, согласно соотношениям (1) и (2).

3. Представление соотношений (3) и (4) в виде

$$\Delta L(v, \mu) = |L_o(v, \mu) - L_{\phi}(v, \mu)| \geq mL_3(v, \mu); \quad (17)$$

$$K(v, \mu) = \left| \frac{L_o(v, \mu) - L_{\phi}(v, \mu)}{L_o(v, \mu) + L_{\phi}(v, \mu)} \right| \geq K_{\text{п}}, \quad (18)$$

где m — отношение сигнал/шум в изображении объекта на экране ПНВ; $K_{\text{п}}$ — пороговый контраст глаза оператора-наблюдателя.

4. Формирование операторов расчета абсолютного $\Delta L(v, \mu)$ и относительного $K(v, \mu)$ контрастов на экране ПНВ при заданном числе периодов N_p .

5. Организация цикла по дальности l до выполнения условий:

$$\Delta L(v, \mu) = mL_3(v, \mu); \quad K(v, \mu) = K_{\text{п}}. \quad (19)$$

6. Выдача значения дальности решения поставленной задачи l_p , которое соответствует условию (19):

$$l_p = l(N_p) \Big|_{\Delta L(v, \mu) = mL_3(v, \mu); K(v, \mu) = K_{\text{п}}}. \quad (20)$$

На основании указанного алгоритма была разработана программа моделирования работы ПНВ в среде Borland Delphi 7.

Для подтверждения достоверности предлагаемой методики компьютерного моделирования работы ПНВ в поляризованном и неполяризованном свете в работе проведены исследования зависимости дальности обнаружения, распознавания и идентификации ПНВ МПН-8КМ от наблюдаемого контраста и метеорологической дальности видимости.

Получено, что дальность обнаружения, распознавания и идентификации в поляризованном свете больше, чем в неполяризованном приблизительно в полтора раза. При этом параметры поляризации отражения объекта и фона следующие: $P_o = 0,4$; $P_{\phi} = 0,5$; $t_o = 0$; $t_{\phi} = 90^\circ$. Коэффициент пропускания поляризатора $\tau_{\text{п}} = 0,85$; азимут поляризации линейного поляризатора $\alpha = 0$.

1. Разработана математическая модель работы ПНВ пассивного типа в поляризованном и неполяризованном свете, на основании которой предложены методика, алгоритм и программа их компьютерного моделирования.

2. Предложенные методику и программу можно использовать как для моделирования работы традиционных ПНВ пассивного типа в различных условиях естественного освещения, объектно-фоновой обстановки и состояния атмосферы, так и для анализа возможности и условий повышения дальности действия при работе в поляризованном свете.

3. На основании анализа полученных количественных результатов и данных работ [4] выявлено, что при наличии частичной поляризации излучения фона за счет эффекта его частичного подавления поляризационным фильтром имеет место увеличение дальности обнаружения, распознавания и идентификации объектов в поляризационных ПНВ пассивного типа.

4. В свою очередь, при наличии частичной поляризации излучения как объекта, так и фона, поляризационная фильтрация в ПНВ эффективна в случае близости значений коэффициентов отражения объекта и фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухопаров С. А., Пизюта Б. А. К вопросу дальности действия приборов ночного видения // Тр. НИИГАиК. 1974. Т. 32. С. 45—48.
2. Тымкул Л. В., Тымкул В. М. Оптико-математическая модель приборов ночного видения пассивного типа // Сб. тез. докл. Междунар. конф. „Прикладная оптика–2000“. СПб, 2000. С. 216.
3. Тымкул В. М., Тымкул Л. В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета. Новосибирск: СГГА, 2005. 215 с.
4. Тымкул Л. В. Математическая модель работы приборов ночного видения в поляризованном свете // Сб. матер. III Междунар. науч. конгр. „ГЕО-Сибирь-2007“. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 2. Новосибирск: СГГА, 2007. С. 14—18.
5. Малинин В. В., Цепиногова З. М., Попов Г. Н., Моисеенко Г. А., Моисеенко В. В. Функциональное компьютерное моделирование телевизионных приборов ночного видения // Там же. Ч. 1. Новосибирск: СГГА, 2007. С. 29—33.

Сведения об авторах

Любовь Васильевна Тымкул

— д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск; E-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Василий Михайлович Тымкул

— д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск; E-mail: kaf.oep@ssga.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
24.02.09 г.