УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЕМ НАСЕКОМЫХ С помощью оптической фильтрации

Ю.А. Плешкова, А.М. Лихтер

Рассмотрена модель процесса передачи оптической информации насекомым различных классов, в которой учтены шумы от естественных и искусственных источников электромагнитного излучения оптического диапазона, а также влияние режима естественной освещенности в различное время года и суток, геометрических параметров и особенностей ландшафта местности на энергетические и информационные характеристики процесса передачи информации. Для увеличения количества передаваемой информации и, как следствие, повышения эффективности управления предложено применять внешнюю (оптическую) фильтрацию.

Ключевые слова: оптическое излучение, передача информации, насекомые, оптическая фильтрация.

ВВЕДЕНИЕ

Системы управления живыми объектами на биофизической основе нашли широкое применение в различных сферах промышленности и аграрного сектора экономики. В первую очередь, это относится к рыбопромысловым системам с использованием физических полей различной природы: световых, акустических, электрических и др. [1, 2].

Управление поведением живых объектов основано на их положительной или отрицательной реакции на определенный физический раздражитель. В частности, для насекомых свет играет роль «привлекающего» фактора [3], в связи с чем системы управления поведением насекомых с применением разнообразных источников электромагнитного излучения оптического диапазона широко используются в растениеводстве, а также в сфере туризма [4—6]. К сожалению, существующие устройства имеют низкую эффективность, сложную конструкцию и ограниченный диапазон применения.

Среди сенсорных систем животных, в их числе и насекомых, зрительный анализатор занимает особое место. По сложности организации и многообразию воспринимаемой информации он далеко превосходит другие органы чувств. Острота зрения, или разрешающая способность, характеризует способность глаза различать степень расчлененности объектов, в том числе отличать две точки от одной более крупной. Для фасеточного глаза существует простая зависимость между расстоянием до объекта и числом различимых деталей: чем ближе объект, тем больше деталей видит насекомое. Для описания экспериментальных кривых (рис. 1) относительной спектральной чувствительности глаз насекомых различных классов зрения [3] были подобраны функции, дающие наилучшее приближение экспериментальных данных, и методом наименьших квадратов рассчитаны их параметры:

— монохромное зрение:

$$\tau_1(\lambda) = 0,044 + \frac{2,6}{1+e^{\frac{\lambda-550}{60}}} \left(1 - \frac{1}{1+e^{\frac{\lambda+550}{9,94}}}\right);$$

— дихромное зрение:

$$\begin{aligned} \tau_2(\lambda) &= 0,02 + \frac{0,98}{1+e^{\frac{\lambda-400}{10}}}, \\ \tau_2(\lambda) &= e^{-2\left(\frac{\lambda-498}{83}\right)^2}; \end{aligned}$$

— трихромное зрение:

$$\begin{split} \tau_{3}(\lambda) &= 0,2 + 0,96e^{-2\left(\frac{\lambda - 415}{73}\right)^{2}},\\ \tau_{3}(\lambda) &= \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{\lambda - 569}{18}\right)}} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{\lambda - 647}{12}}}\right),\\ \tau_{3}(\lambda) &= 0,4 + 0,8e^{-0,5\left(\frac{\lambda - 480}{67}\right)^{2}\left(1 - \frac{\lambda - 480}{268}\right)\left(1 - \frac{\lambda - 480}{67}\right)^{2} - 3} \end{split}$$

где λ , нм, — длина волны.

Один из способов повышения эффективности систем управления поведением насекомых с оптическими источниками заключается в применении

51



Рис. 1. Графики относительной спектральной чувствительности глаз насекомых для разных классов зрения: *a* — монохромного; *б* — дихромного; *в* — трихромного



Рис. 2. Схема передачи оптической информации насекомым

внешней (оптической) фильтрации, которая позволяет во много раз увеличить пропускную способность канала передачи информации объекту управления (рис. 2) с учетом класса зрения насекомого (моно-, ди- или трихромного), а также спектральной излучательной способности источника, пропускания атмосферы Земли, географических, геометрических и ландшафтных характеристик системы. Повышение эффективности может быть достигнуто с помощью методики оптимального проектирования оптико-электронных систем и расчета рабочих параметров их элементов на основе информационных критериев качества — отношение «сигнал/шум» С/Ш и информационной пропускной способности [7] $\Pi = \Delta f \log_2(1 + C/III)$, где Δf — полоса частот, воспринимаемая органом зрения насекомого.

О результативности применения упомянутой методики проектирования можно судить по значению величины $\eta = \Pi_2/\Pi_1$, где Π_2 и Π_1 — информационная пропускная способность канала с оптическим фильтром и без него, соответственно.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ Оптической информации насекомым

Сигнал, воспринимаемый глазом насекомого [8], можно представить в виде

57

$$C = \frac{m}{l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) f(\lambda) \tau(\lambda) \exp(-q(\lambda)l) d\lambda, \qquad (1)$$

где $l = \sqrt{x^2 + (h_2 - h_1)^2}$, x — расстояние между селективным источником излучения и объектом управления по горизонтали, h_1 — расстояние от земной поверхности до объекта управления, h_2 — высота источника над поверхностью земли, $r(\lambda)$ функция спектральной излучательной способности селективного источника света, $f(\lambda)$ — спектральная функция пропускания оптического фильтра, $\tau(\lambda)$ — функция относительной спектральной чувствительности глаза насекомого, *т* — коэффициент, учитывающий различие между функциями видности глаза человека и насекомого, $q(\lambda) = k(\lambda) + \sigma(\lambda)$ и $k(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания атмосферы в ультрафиолетовой и видимой частях спектра; $\sigma(\lambda) = 0.83 N A^3 \lambda^{-4}$ — спектральный коэффициент рэлеевского рассеяния [9], N-число молекул в 1 м³, A — площадь поперечного сечения молекул, м².

Считая, что шумы от естественных и искусственных источников излучения аддитивно складываются [1], приходим к выражению для общего шума Ш в виде:

$$III = III_{c} + III_{c,3} + III_{H,3} + III_{c,0} + III_{H,0}, \quad (2)$$

где $Ш_c$, $Ш_{c.3}$, $Ш_{u.3}$, $Ш_{c.o}$ и $Ш_{u.o}$ — шумы, обусловленные прямой солнечной засветкой, а также отражением соответственно солнечного и искусственного излучения от земной поверхности и нижней кромки облачного покрова.

С учетом математической модели оптического канала передачи информации в системах управления поведением насекомых [10, 11] выражения для шумов $Ш_{c.o}$ и $Ш_{u.o}$, обусловленных отражением излучения Солнца и искусственного селективного источника от облаков, имеют вид

$$III_{c.o} = \frac{m}{\pi} \left(\frac{R_c}{R_{3.o}}\right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, T) k(\lambda) \tau(\lambda) \times \\ \times Noise(\lambda) \exp(-q(\lambda)) (1 - \rho(\lambda)) d\lambda, \qquad (3)$$

$$III_{\mu,o} = \frac{m}{h_2^2 \pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) f(\lambda) \tau(\lambda) Noise(\lambda) \times \exp(-q(\lambda)h_2)(1-\rho(\lambda)) d\lambda, \qquad (4)$$

где $\xi(\lambda, T)$ — спектральное распределение излучения Солнца, R_c и $R_{3.0}$ — радиусы Солнца и земной орбиты, $Noise(\lambda) = (\mu(\lambda)S_1 + \upsilon(\lambda)S_2 + \psi(\lambda)S_3), \mu(\lambda), \upsilon(\lambda)$ и $\psi(\lambda)$ — спектральные характеристики отражения почвы, воды и растительности соответственно, S_1 , S_2 и S_3 — их весовые коэффициенты, которые задаются с помощью датчика случайных чисел, генерирующего последовательность с равномерным распределением в заданном интервале значений, $\rho(\lambda)$ — спектральный коэффициент поглощения нижней кромки облачного слоя [2, 12].

Датчик случайных чисел применяется для имитации реальных условий функционирования систем управления [13]: $S_1 = \text{rnd}(1)$, $S_2 = \text{rnd}(1 - S_1)$ и $S_3 = 1 - S_1 - S_2$, где $\text{rnd}(1) - \phi$ ункция, позволяющая получить равномерно распределенное случайное число в заданном интервале значений [0, 1].

В качестве примера для дальнейших расчетов будем использовать произвольные варианты N_1 , N_2 и N_3 наборов весовых коэффициентов S_1 , S_2 и S_3 (табл. 1).

В результате расчетов по формулам (3) и (4) установлено, что шумы $Ш_{c.o}$ и $Ш_{u.o}$ слабо влияют на отношение «сигнал/шум» и ими можно пренебречь в выражении (2).

Для описания шумов III_c и $III_{c,3}$ исследуем влияние времени года и суток на интенсивность солнечного излучения оптического диапазона, падающего на поверхность Земли. Энергетическая осве-

Таблица 1

Наборы весовых коэффициентов отражательных характеристик природных поверхностей

Коэффициент	N_1	N_2	N ₃	
S_1	0,696	0,543	0,211	
S_2	0,133	0,199	0,437	
S_3	0,171	0,257	0,353	

щенность земной поверхности на заданной широте при ясной погоде в заданное время *t* суток [6]:

$$E(n, t) = \begin{cases} Q\cos\theta(n, t), \cos\theta(n, t) > 0, \\ 0, \cos\theta(n, t) < 0, \end{cases}$$

где Q — постоянная инсоляции, равная солнечной постоянной, n — число полных суток, прошедших от начала года; время t задается в интервале $0 < t < \tau_0$, где $\tau_0 = 24$ ч.

Зависимость от времени косинуса угла падения θ солнечных лучей имеет вид

$$\cos\theta(n, t) = \cos\delta(n)\cos\left[\frac{2\pi}{\tau_0}\left(t + \frac{\tau_0}{2}\right)\right] + \sin\delta(n).$$

Здесь δ — склонение, которое дополняет до $\pi/2$ угол между земной осью и направлением к центру солнечного диска. Синус угла склонения Солнца δ как функция числа *n* истекших суток от начала года выражается формулой $\sin\delta(n) = \sin\eta \cos\epsilon(n)$, где η — угол между земной осью и перпендикуляром к плоскости земной орбиты ($\eta = 23^{\circ} 27'$), $\epsilon(n)$ — азимутальный угол земной оси, зависимость которого от времени года, т. е. от номера суток *n*, выражается формулой:

$$\varepsilon(n) \approx \frac{2\pi\tau_0}{\tau_1}(n-172).$$

С учетом принятых допущений шум от прямой солнечной подсветки можно представить в виде:

$$III_{\rm c} = m \left(\frac{R_{\rm c}}{R_{\rm 3.0}}\right)^2 \cos\theta(n, t) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, T) k(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda,$$

а шум при отражении солнечного излучения от подстилающей поверхности в виде

$$III_{c.3} = \frac{m}{\pi} \left(\frac{R_c}{R_{3.0}}\right) \cos\theta(n, t) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, T) k(\lambda) \tau(\lambda) \times Noise(\lambda) d\lambda.$$

Тогда, с учетом выражений (1) и (2), окончательно получим:

$$\frac{C}{M} = \frac{m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) f(\lambda) \exp(-q(\lambda)l) d\lambda}{l^2 (III_c + III_{c,3} + III_{n,3})}$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ Внешней фильтрации на процесс передачи оптической информации в системах управления поведением насекомых

При расчетах информационных и энергетических характеристик канала передачи оптической информации без применения внешней фильтрации

-53





Рис. 3. Графики зависимости отношения «сигнал/шум» от высоты h_2 для насекомых с трихромным видом зрения без применения (---) оптического фильтра и с применением (----) фильтра Гаусса: a — вольфрамовая лампа ($\lambda_0 = 520$ нм, $\sigma = 350$ нм); δ — галогенная лампа ($\lambda_0 = 450$ нм, $\sigma = 200$ нм); δ — ксеноновая лампа ($\lambda_0 = 350$ нм, $\sigma = 50$ нм)



Рис. 4. Графики зависимости отношения «сигнал/шум» от расстояния *х* для насекомых с трихромным видом зрения без применения (---) оптического фильтра и с применением (----) фильтра Гаусса: *a* – вольфрамовая лампа (λ₀ = 520 нм, σ = 350 нм); *б* – галогенная лампа (λ₀ = 450 нм, σ = 200 нм); *в* – ксеноновая лампа (λ₀ = 350 нм, σ = 50 нм)

были получены значения отношения «сигнал/шум» в приделах от 0,003 до 1, что может оказаться недостаточным для эффективного обеспечения процесса управления поведением насекомых [10, 14].

Наиболее распространены фильтр Гаусса

$$f(\lambda) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma}\right)^2\right]$$

и фильтр Лоренца

$$f(\lambda) = \frac{a}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta}\right)}$$

Расчеты показали, что полосовые фильтры и фильтры верхних и нижних частот [1, 9] дают существенное увеличение значения отношение «сигнал/шум», в то время как применение оптических

Таблица 2

Информационные характеристики канала передачи оптической информации насекомым с трихромным видом зрения

Фильтр	С/Ш	Π_1	(<i>C/Ш</i>) _ф	Π_2	η			
Галогенная лампа								
Гаусса ($\lambda_0 = 400$ нм, $\sigma = 300$ нм)	0,02	0,29	0,11	0,151	0,52			
Лоренца ($\lambda_0 = 500$ нм, $\Delta = 250$ нм)	0,02	0,29	0,06	0,084	0,29			
Ксеноновая лампа								
Гаусса ($\lambda_0 = 300$ нм, $\sigma = 150$ нм)	0,09	0,124	0,85	0,88	7,1			
Лоренца ($\lambda_0 = 450$ нм, $\Delta = 350$ нм)	$4 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$	0,036	6,3			
вольфрамовая лампа при T = 1500 K								
Гаусса ($\lambda_0 = 400$ нм, $\sigma = 250$ нм)	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	$9,76 \cdot 10^{-3}$	0,013	2,3			
Лоренца ($\lambda_0 = 350$ нм, $\Delta = 350$ нм)	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	0,015	2,7			



Рис. 5. Зависимость отношения «сигнал/шум» от параметров фильтра Лоренца Δ (*a*) и λ_0 (*б*)

фильтров Лоренца и Гаусса в сочетании с селективными источниками излучения значительно увеличивает количество информации, получаемой насекомыми, что способствует повышению эффективности процесса управления (рис. 3 и 4).

Из анализа графиков (см. рис. 3 и 4) следует, что во всех случаях наблюдается увеличение отношения «сигнал/шум», причем в некоторых случаях почти на порядок, что свидетельствует об эффективности применения оптической фильтрации сигнала в системах управления поведением насекомых (табл. 2, где *C/Ш* и (*C/Ш*)_ф — отношение «сигнал/шум» без применения и с применением фильтрации соответственно).

Максимальное отношение «сигнал/шум» для насекомых с трихромным видом зрения достигается, когда в качестве селективного источника света применяется галогенная лампа, а в качестве фильтра — оптический фильтр Лоренца с параметрами $\lambda_0 = 600$ нм, $\Delta = 450$ нм (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена математическая модель процесса передачи оптической информации насекомым с применением внешней фильтрации. На ее основе исследованы зависимости энергетических и информационных характеристик канала передачи информации в системах управления поведением насекомых для различных фильтров. Показано, что фильтрация во всех случаях существенно улучшает информационные характеристики систем управления.

На основе математического моделирования проведена структурная и параметрическая оптимизация канала передачи оптической информации.

Полученные результаты могут быть полезны для разработчиков систем управления поведением насекомых в случаях, когда отношение «сигнал/шум» принимает значения, недостаточные для эффективного управления.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Зуев В.Е., Креков Г.М. Современные проблемы атмосферной оптики. — М.: Гидрометеоиздат, 1986. — Т. 2. — 256 с.
- Лихтер А.М. Моделирование систем управления процессами лова рыбы. — Астрахань: Изд. дом «Астраханский государственный университет», 2007. — 290 с.
- Мазохин-Поршняков Г.А. Руководство по физиологии органов чувств насекомых. — М.: Изд-во МГУ, 1977. — 456 с.
- Андреевский А.С. Устройство для защиты от кровососущих насекомых / Свидетельство на полезную модель № 66889.
- 5. Газалов В.С. Установки электрофизической защиты садов от насекомых-вредителей / Рациональная электрификация сельского хозяйства. М., 1984. С. 6—9.
- Пат. 2001100190 РФ. Устройство для защиты от кровососущих летающих насекомых / А.П. Рыбкин, В.П. Казаков.
- Лихтер А.М. Оптимальное проектирование оптико-электронных систем. — Астрахань: Изд. дом «Астраханский государственный университет», 2004. — 241 с.
- Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Логос, 1999. — 408 с.
- Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическое моделирование в биофизике. Введение в теоретическую базу. — М., 2001. — 315 с.
- 10. Плешкова Ю.А., Лихтер А.М. Модель процесса передачи оптической информации в системах управления поведением насекомых // Экологические системы и приборы.— 2010. — № 12. — С. 24—27.
- 11. Сергеев М.П., Зарнаев Н.А., Шуляков П.А. Электронный отпугиватель комаров / Свидетельство на полезную модель № 80725.
- 12. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. — СПб.: Наука, 2003. — 474 с.
- Бобнев М.П. Генерирование случайных чисел. М.: Энергоатомиздат, 1997. — 230 с.
- 14. Плешкова Ю.А., Лихтер А.М. Моделирование зависимостей информационных и энергетических характеристик систем управления поведением насекомых от их геометрических параметров // Экологические системы и приборы. — 2011. — № 2. — С. 25—29.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Новосельцевым.

Плешкова Юлия Александровна — аспирант, 🖂 pjulia@pisem.net,

Лихтер Анатолий Михайлович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, ☎ (8512) 61-08-84, ⊠ kofl@aspu.ru,

Астраханский государственный университет.