
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 551.463.5:535.31

Ю. И. БЕЛОУСОВ, Д. В. ИВАНОВ

УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛУКТУАЦИЙ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИГОРИЗОНТНОЙ ОБЛАСТИ МОРЯ В АЛГОРИТМАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ИНФРАКРАСНЫХ ПРИБОРОВ

Исследована зависимость закона распределения флуктуаций инфракрасной пригоризонтной области моря от условий наблюдения и параметров оптической системы применительно к разработке алгоритмов автоматической обработки сигналов в оптико-электронных системах. Даны рекомендации относительно выбора методов адаптации алгоритмов обработки к текущим условиям наблюдения.

Ключевые слова: обработка изображений, оптико-электронные системы, фоноцелевые модели.

В настоящее время повышение эффективности оптико-электронных систем (ОЭС) напрямую связывается с увеличением их чувствительности и разрешающей способности. Однако наращивание только потенциальной пороговой чувствительности оптических каналов уже не дает пропорционального прироста их эффективности. Одновременно с увеличением чувствительности каналов ОЭС снижается их помехозащищенность, поскольку возрастает вклад фоновых и организованных помех, на фоне которых необходимо выделять пороговые сигналы от целей.

При разработке алгоритмов обнаружения оптических сигналов необходимо в максимальной степени ориентироваться на реальные статистические характеристики фоновых помех, поскольку использование простейших моделей фоновых помех может привести к результату, который будет оптимален в абстрактном случае, но в реальных условиях приведет к снижению эффективности ОЭС в целом.

В настоящей статье рассматривается вопрос использования известной „модели ИК-излучения взволнованной поверхности моря“ [1] при оценке зависимости статистических характеристик флуктуаций фонового излучения от условий наблюдения пригоризонтной области моря с помощью ИК-приборов применительно к разработке алгоритмов автоматической обработки сигналов.

Общая сложность задачи состоит в том, что целый ряд параметров ИК-канала ОЭС зависит от того фона, на котором наблюдается цель. Эта зависимость неоднозначна и определяется как характеристиками условий наблюдения, так и характеристиками самого прибора. Например, в зависимости от фоновой засветки изменяется дисперсия шумов при регистрации сигнала, т.е. один и тот же по амплитуде оптический сигнал, наблюдаемый на различном

фоне, обуславливает разное отношение сигнала к внутреннему шуму на выходе фотоприемного устройства, причем статистические данные флуктуаций фонового излучения и внутренних шумов могут либо быть близкими, либо существенно различаться.

При этом преобладающими могут оказаться либо фоновые шумы, либо внутренние. Их совокупное воздействие заметным образом различается. Эта проблема становится все более существенной по мере повышения чувствительности ИК-прибора. Наиболее характерно ее проявление при наблюдении пространства вблизи линии морского горизонта.

Непосредственно у линии горизонта флуктуации фонового излучения относительно малы по амплитуде и соизмеримы с флуктуациями внутренних шумов прибора. Статистические характеристики суммарного шума соответствуют характеристикам суммы двух независимых случайных процессов с законами распределения, близкими к нормальному.

Периферийные зоны поля обзора в большинстве ситуаций отличаются от области линии горизонта как по среднему значению, так и по характеру и размаху флуктуаций яркости. Из-за этого изменяется соотношение вкладов внешних и внутренних шумов. Доминирующими становятся фоновые шумы, а их распределение отличается от нормального закона, и для них алгоритмы, оптимальные при выделении сигналов из шумов с нормальным законом распределения, могут давать существенный проигрыш по сравнению с другими. При изменении соотношения внутренних и внешних шумов вероятность правильного обнаружения может изменяться незначительно, в то время как вероятность ложных тревог изменяется на несколько порядков. Это положение в принципе характерно для всех ситуаций наблюдения в пригоризонтной области моря, но степень различия характеристик фоноцелевой обстановки в центре и на периферии поля зрения ИК-канала зависит от его величины и будет разной, например, при разной кратности увеличения оптической системы одного и того же прибора. В режиме наблюдения за надводной обстановкой в широком поле зрения амплитуда фоновых помех велика, а в режиме сопровождения и выработки координат цели в узком поле зрения флуктуации существенно сглаживаются. Кроме того, в ИК-приборах, как правило, сохраняется количество элементов в изображении. И тогда при изменении поля обзора происходит разное усреднение в пределах одного пиксела (элементарного поля зрения). Одновременно изменяются и амплитуда полезного сигнала, и характеристики воспринимаемых фоновых помех. Если в приборе производится автоматическая обработка сигналов, то она должна быть адаптивной, иначе приводит в каком-то случае к проигрышу.

Предметом исследования настоящей статьи являются вид и параметры закона распределения флуктуаций ИК-излучения взволнованной поверхности моря (ВПМ). В общем виде полученные результаты применимы как для сканирующих, так и для несканирующих ИК-приборов. Три особенности существенным образом влияют на применение разработанных для них в [1] аналитических выражений к оценкам для конкретных параметров ОЭС.

Первая особенность заключается в резкой зависимости вида и параметров закона распределения флуктуаций фонового ИК-излучения морской поверхности от угла места вблизи линии горизонта.

Вторая особенность связана с тем, что в реальных приборах происходит усреднение пространственных статистических характеристик в пределах конечного мгновенного поля зрения прибора, причем степень усреднения также зависит от угла места линии визирования. В общем случае для каждой строки изображения флуктуации фонового излучения моря имеют разные статистические характеристики, так как каждый элемент фотоприемника усредняет флуктуации ИК-излучения с разных по площади участков ВПМ, находящихся на различных расстояниях от прибора.

Третья особенность состоит в том, что при изменении углового поля обзора существенным образом изменяется гистограмма распределения яркости фонового сигнала в кадре как по количеству и положению максимумов, так и по ее ширине (динамическому диапазону).

В настоящей статье приводятся результаты исследования зависимости вида и параметров закона распределения флуктуаций ИК-излучения ВПМ от размеров мгновенного поля зрения (пиксела) прибора при различных углах места линии визирования пригоризонтной области моря.

Расчеты базируются на приведенных в [1—3] выражениях для плотности распределения вероятности $w(L)$ и параметров закона распределения флуктуаций спектральной энергетической яркости (СЭЯ) L [Вт/см²·ср·мкм] ИК-излучения участка ВПМ. Они получены в рамках стохастической фазетной модели в [1—3] и относятся к „точечным“ характеристикам излучения моря, т.е. описывают параметры оптического поля столь малого участка поверхности, что единственное требование к его размерам состоит в том, чтобы он содержал достаточное для применения статистических методов количество фазетов. В системе координат, связанной с ИК-прибором, этот участок наблюдается под углами Φ и α . Угол Φ отсчитывается в вертикальной плоскости относительно угла визирования линии горизонта Φ_r . Угол α в горизонтальной плоскости отсчитывается относительно главного направления распространения волнения.

Применительно к рассматриваемой задаче в пределах поля зрения прибора (δ_v — в вертикальной и δ_r — в горизонтальной плоскости) происходит оптическое усреднение статистических характеристик флуктуаций излучения ВПМ. Формально это можно выразить интегрированием значения СЭЯ в пределах углового мгновенного поля зрения $\omega = \delta_v \times \delta_r$, но тогда полученная величина имеет размерность спектральной энергетической светимости M [Вт/см²·мкм] в направлении (Φ, α) :

$$M(\Phi, \alpha) = \iint_{\omega} L(\Phi, \alpha) d\delta_v d\delta_r.$$

При малых значениях ω процедуру интегрирования с определенной погрешностью можно заменить умножением подынтегральной функции на значение области интегрирования $\delta_v \times \delta_r$. Для значений углов ω , в пределах которых подынтегральная функция изменяется заметно, необходимо осуществлять интегрирование без упрощений.

Из исследований [1] известно, что в горизонтальной плоскости характеристики флуктуаций излучения моря изменяются достаточно монотонно по характеру и весьма мало по значению при изменениях угла визирования α в довольно больших пределах. Поэтому для всех характеристик допустимо интегрирование по α заменить умножением на δ_r .

Однако в вертикальной плоскости все статистические параметры имеют сложный характер в зависимости от угла наблюдения Φ , а воспринимаемое наблюдателем ИК-излучение подстилающей поверхности — поверхности моря — $M_{\text{восп}}(\Phi, \alpha)$ ослабляется в $\tau(\lambda, \Phi)$ раз атмосферной трассой, длина которой также зависит от угла визирования Φ и высоты наблюдателя. Кроме того, собственное ИК-излучение этой трассы добавляется к ослабленному ею же излучению моря, причем коэффициент излучения атмосферы ε связан с коэффициентом ее пропускания

$$\varepsilon(\lambda, \Phi) = 1 - \tau(\lambda, \Phi),$$

поэтому при больших значениях δ_v необходимо осуществлять интегрирование без упрощений

$$M_{\text{восп}}(\Phi, \alpha) = \iint_{\omega} \left\{ L(\Phi, \alpha) \tau(\lambda, \Phi) + L_v^0 [1 - \tau(\lambda, \Phi)] \right\} d\delta_v d\delta_r,$$

где L_v^0 — яркость излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой воздуха.

Чем ниже расположена ОЭС над уровнем моря, тем сильнее зависят статистические характеристики наблюдаемого фона от угла места линии визирования. Например, для высоты 25 м над уровнем моря при изменении угла визирования непосредственно ниже линии горизонта на $0,2^\circ$ расстояние от поверхности моря до наблюдателя изменяется от 17 до 4 км.

Поэтому вариации характеристик фонового излучения этой зоны во многом обусловлены изменениями оптических свойств атмосферной трассы.

В зависимости от состояния небосвода, соотношения температуры моря (T_s) и воздуха (T_a), радиационная температура излучения морского фона может быть больше, равна или меньше температуры излучения АЧТ с температурой воды (L_s^0). Поэтому, например, слабо нагретая цель может изменять знак своего оптического контраста по мере сближения из-за того, что наблюдается на фоне разных по яркости фрагментов подстилающей поверхности — поверхности моря.

Анализ результатов расчетов статистических характеристик флуктуаций воспринимаемого ИК-излучения фона проводится для условий сплошной облачности (СО) и ясного небосвода (ЯН) при соотношениях $T_s < T_a$ и $T_s > T_a$.

Из совокупности статистических характеристик ИК-излучения ВПМ как фона наиболее просто выражается среднее значение флуктуаций ИК-излучения моря (первого момента) [3]:

$$M_{\text{восп}}^{\text{СО}}(\Phi, \alpha) = \omega \left\{ \left(L_s^0 - [L_s^0 - L_a^0] A(\Phi, \alpha) \right) \tau(\lambda, \Phi) + L_a^0 [1 - \tau(\lambda, \Phi)] \right\},$$

$$M_{\text{восп}}^{\text{ЯН}}(\Phi, \alpha) = \omega \left\{ \left(L_s^0 - [L_s^0 - L_a^0] A(\Phi, \alpha) - [L_a^0 - L_3] Z(\Phi, \alpha) \right) \tau(\lambda, \Phi) + L_a^0 [1 - \tau(\lambda, \Phi)] \right\}.$$

Здесь L_a^0 — СЭЯ АЧТ при температуре воздуха; L_3 — СЭЯ излучения небосвода в зените; $A(\Phi, \alpha)$ и $Z(\Phi, \alpha)$ — специальные функции, описывающие эффективное спектральное отражение ИК-излучения от ВПМ с учетом трехмерного характера волнения и эффекта затенения и в общем случае — поляризацию ИК-излучения.

Выражение для второго момента — дисперсии флуктуаций фонового излучения моря $D(L)$ — полученное в статье [1], преобразуется в соответствии с рекомендациями [4]: „постоянный множитель может быть вынесен за знак дисперсии, если этот множитель возвести при этом в квадрат“. Если не рассматривать (в первом приближении) флуктуации собственного излучения атмосферной трассы, то „постоянными множителями“ являются значения мгновенного поля зрения прибора и коэффициент спектрального пропускания атмосферы. Формально при преобразованиях они играют роль масштабных коэффициентов и не влияют на вид пространственно-временных зависимостей дисперсии флуктуаций воспринимаемого излучения $D[M_{\text{восп}}]$ при наблюдении объектов на фоне морской поверхности:

$$D[M_{\text{восп}}^{\text{СО}}(\Phi, \alpha)] = [\omega \tau(\lambda, \Phi)]^2 (L_s^0 - L_a^0)^2 D_1,$$

$$D[M_{\text{восп}}^{\text{ЯН}}(\Phi, \alpha)] = [\omega \tau(\lambda, \Phi)]^2 [(L_s^0 - L_a^0)^2 D_1 + 2(L_s^0 - L_a^0)(L_a^0 - L_3) D_2 + (L_a^0 - L_3)^2 D_3].$$

D_1 — D_3 — специальные функции [1], имеющие смысл дисперсий — флуктуаций коэффициентов отражения отдельных facets относительно „средних“ („эффективных“) коэффициентов отражения единичных участков ВПМ (D_1 и D_3) и второго смешанного момента (D_2) флуктуаций коэффициентов отражения facets относительно соответствующих средних значений с учетом трехмерного характера волнения и эффекта затенения скользящих лучей.

Следует отметить связанную с поляризацией ИК-излучения особенность оценки статистических характеристик оптического поля ВПМ. В расчетные выражения среднего значения СЭЯ входят формулы коэффициентов отражения для каждой из двух поляризационных составляющих, а выражение для „неполяризованного излучения“ записывается как полусумма модулей комплексных коэффициентов отражения воды. Для дисперсии флуктуаций яркости коэффициент отражения входит во второй степени, поэтому методически правильно рассчитывать по отдельности характеристики флуктуаций для каждой из составляющих поляризации, а дисперсию флуктуаций суммарного излучения определять как среднее геометрическое значение дисперсий флуктуаций поляризационных составляющих ИК-излучения ВПМ.

Наиболее сложные трансформации претерпевает выражение для закона распределения флуктуаций воспринимаемого ИК-излучения морского пригоризонтного фона $w(M_{\text{восп}})$ по отношению к найденному в [1] выражению для плотности распределения вероятности флуктуаций энергетической яркости ВПМ $w(L_{\text{восп}})$. Помимо введения масштабных множителей ω и $\tau(\lambda, \Phi)$ дополнительно нужно учесть собственное излучение атмосферной трассы. Полагая его независимым от физических факторов, обуславливающих флуктуации ИК-излучения ВПМ, оно формально трактуется как „сдвиг“ плотности распределения вероятности по оси абсцисс ($M_{\text{восп}}$). Причем в зависимости от соотношения значений температуры воздуха и воды этот „сдвиг“ может быть направлен как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения абсолютных значений $M_{\text{восп}}(\Phi, \alpha)$:

$$w[M_{\text{восп}}(\Phi, \alpha)] = w\{[l\tau^{-1} - L_a^0(1 - \tau(\lambda, \Phi))]\omega^{-1}\}(\tau(\lambda, \Phi)\omega)^{-1}.$$

Здесь l — нормированная СЭЯ для подансамбля облачности СО или ЯН [1, 2].

Приведенные выше аналитические выражения позволяют расчетным путем выявить особенности фоноцелевой обстановки применительно к выработке наиболее рациональных алгоритмов обработки ИК-изображений. Результаты расчетов, послужившие основой для анализа и выводов, представлены на рис. 1—4.

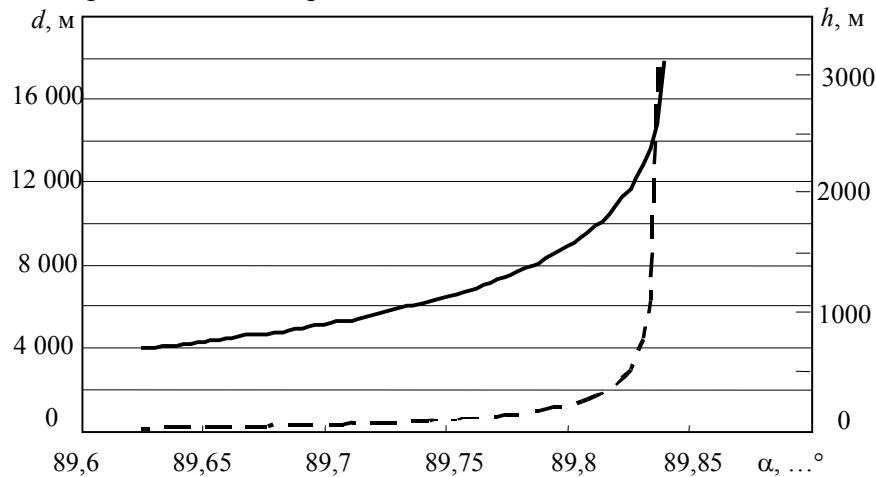


Рис. 1

На рис. 1 приведена зависимость расстояния (d , сплошная кривая) до наблюдаемого участка поверхности и продольного размера пиксела от угла места линии визирования (h , пунктир). Высота размещения прибора 25 м, мгновенное поле зрения 0,2 мрад.

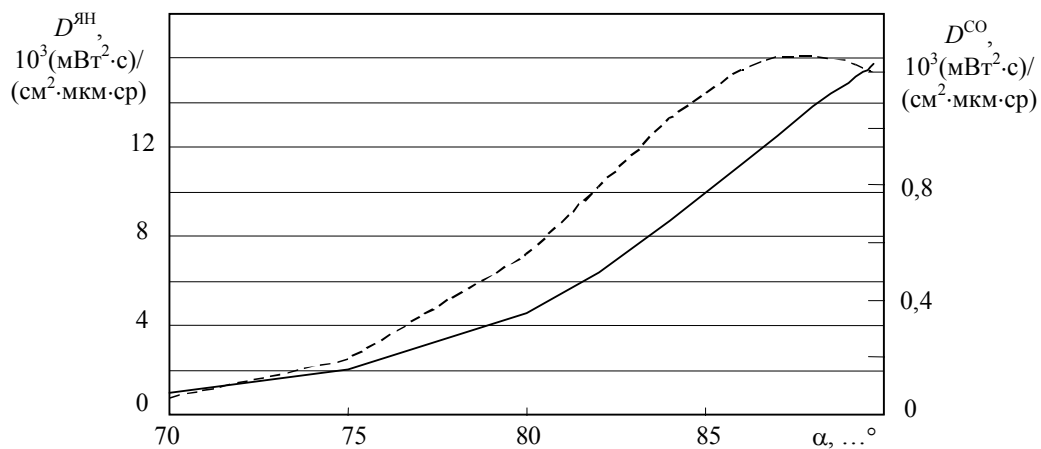


Рис. 2

На рис. 2 представлена зависимость дисперсии флуктуаций яркости от угла места линии визирования (сплошная кривая — $D^{\text{ЯН}}$, пунктир — $D^{\text{СО}}$).

На рис. 3 приведена зависимость плотности вероятности СЭЯ ИК-излучения ВПМ от угла места линии визирования при скорости ветра $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, ненаправленном волнении и сплошной облачности, $T_a = 285$, $T_s = 290 \text{ К}$ (Φ — 1 — 89, 2 — 85, 3 — 80, 4 — 70°).

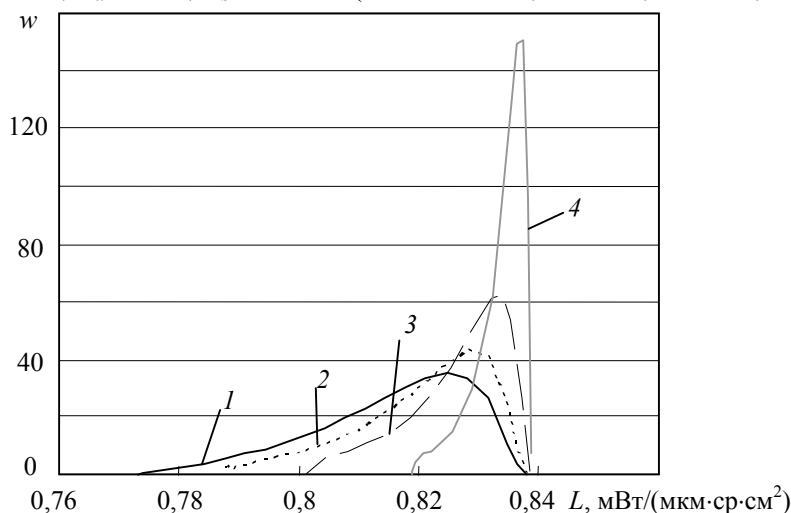


Рис. 3

На рис. 4 представлено распределение воспринимаемой яркости излучения ВПМ для различной длины атмосферной трассы (l — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 5 км). Сплошная облачность, $\Phi=85^\circ$.

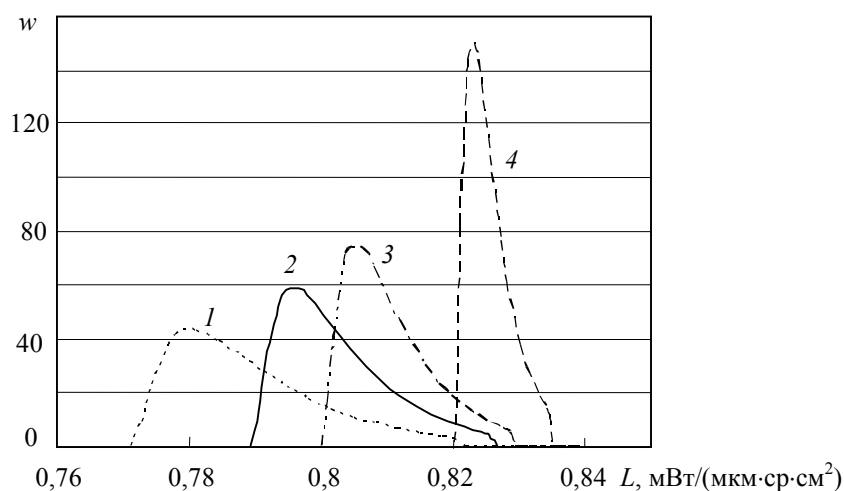


Рис. 4

Выводы можно сформулировать в следующем виде.

1. При наблюдении надводной поверхности с помощью дискретного ФПУ (матричного или сканирующего) для каждой строки изображения пригоризонтной области моря статистические характеристики флуктуаций излучения фона различны как по виду, так и по параметрам закона распределения флуктуаций.

2. В ОЭС с изменением углового поля зрения (дискретным или плавным) необходима адаптация алгоритмов обработки изображений к изменяющимся статистическим характеристикам флуктуаций излучения фона.

3. Поскольку большинство алгоритмов обработки сигналов ориентируется на гауссово распределение шумов, то важно количественное определение параметров условий, при которых они становятся негауссовыми и встроенные алгоритмы обработки сигналов становятся неоптимальными.

4. Для задач автоматического выделения сигналов на фоне внутренних и внешних шумов изменение закона распределения помех при выборе процедуры оптимальной фильтрации

и обработки сигналов или при выработке решающих правил обуславливает необходимость использования адаптивных алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов Ю. И., Иванов Д. В., Утенков А. Б. Модель ИК излучения взволнованной поверхности моря // Оптич. журн. 1994. № 10. С. 22—26.
2. Белоусов Ю. И., Иванов Д. В., Утенков А. Б. Метод расчета плотности вероятности яркости ИК излучения взволнованной поверхности моря в диапазоне 3—14 мкм // Оптич. журн. 1999. № 8. С. 36—42.
3. Белоусов Ю. И., Демидов Е. Ф. Средняя составляющая ИК излучения моря // Изв. АН СССР. Сер. Физика атм. и океана. 1982. Т. 18, № 2. С. 206—211.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969.

Сведения об авторах**Юрий Иванович Белоусов**

— д-р техн. наук, профессор; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; зам. директора;
E-mail: lab6@eoss.ru

Дмитрий Владимирович Иванов

— канд. техн. наук; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; ст. науч. сотр.;
E-mail: lab6@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.