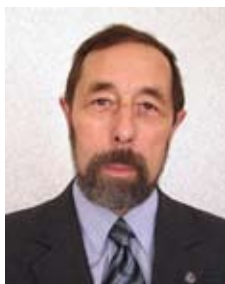


УДК 628.946.22

К.К. Васильев, Э.Д. Павлыгин

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ НАВЕДЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ



*Васильев Константин Константинович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, член-корреспондент АН республики Татарстан, окончил радиотехнический факультет Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина), заведующий кафедрой «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета. Имеет монографии, учебные пособия и статьи в области статистического синтеза и анализа информационных систем. [e-mail: vkk@ulstu.ru].*



*Павлыгин Эдуард Дмитриевич, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института, первый заместитель генерального директора по науке ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: mars@mv.ru].*

### Аннотация

Рассмотрены принципы построения и элементы системы автоматического обнаружения сигнала от движущегося источника света и слежения за его пространственным перемещением. С помощью методов обработки изображений синтезированы оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы обнаружения светового сигнала на фоне мешающих отражений и даны оценки их эффективности. Проанализированы ошибки, возникающие в системе автоматического наведения и слежения за источником света. Разработан программный комплекс имитационного 3D-моделирования надводной окружающей обстановки, включающей два корабля, на одном из которых находится корреспондент, а на втором – система управления визиром. Программные модули моделирования корреспондента и слежения за корреспондентом работают под ОС Windows XP / Windows Vista с использованием Net.Framework 3.5 и локальной вычислительной сети, поддерживающей UDP-протокол. Получены экспериментальные значения дисперсии ошибки наведения визира.

Ключевые слова: обнаружение, изображение, помехи, дисперсия ошибки, система управления, программный комплекс.

### Abstract

Principles of construction and elements of the system of automated detection of a signal of a moving light source and tracking its spatial movement are considered. With the use of methods for image processing, optimal and quasioptimal algorithms of light signal detection against a background of stirring reflections are synthesized and their efficiency is estimated. Errors occurred in the system of automated targeting and tracking of the light source are analyzed. The program complex of 3D-simulation of surface picture including two ships is developed. A participant takes place on the first ship, sight control system – on the second one. Program modules for simulation of a participant and participant tracking are operated by Windows XP / Windows Vista operating system with the use of Net.Framework 3.5 and LAN supporting User Datagram Protocol. The experimental values of sight acquiring error dispersion are obtained.

Key words: detection, image, noises, error dispersion, control system, program complex.

**ВВЕДЕНИЕ**

В ФНПЦ АО «НПО Марс» создан прототип светосигнальной системы нового поколения, который обеспечивает высокоскоростные каналы передачи данных на расстоянии до 30 км [1]. Использование прожектора со светодиодами видимого и инфракрасного диапазонов позволяет решать как традиционные задачи (освещение ближней и дальней зоны, передача сигналов кода Морзе), так и новые задачи, связанные с передачей информации на высоких скоростях. Для реализации процедуры автоматизированной передачи и приема информации по световым каналам связи разработан программно-аппаратный комплекс, учитывающий особенности распространения светового сигнала, а также влияние перемещения источника и приемника излучения под действием качки. Приемное устройство такого комплекса состоит из визира и видеокамеры для наблюдения и автоматического наведения на источника света.

Проблемы обнаружения объектов и их сопровождения в процессе взаимного движения рассматривались в ряде работ [2–5]. Вместе с тем, обнаружение светового сигнала прожектора, оценка его пространственного положения на фотоприемной матрице (ФПМ) и слежение за перемещением в условиях морского волнения имеют ряд особенностей. В настоящей работе рассмотрены основные принципы построения системы обнаружения и оценивания координат источника излучения, проведен анализ погрешностей определения положения светового пятна и системы автоматического управления (САУ) визиром, размещенным на стандартном двухосном карданном подвесе. Эти результаты были положены в основу представленной программы имитационного моделирования системы оптической связи.

**ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ**

Перед началом сопровождения необходимо решить задачу обнаружения светового пятна на фоне мешающих изображений и шума. Эту задачу можно формализовать следующим образом [2, 5]. Пусть производятся наблюдения

$$z_j^t = x_j^t(\bar{\chi}_t) + n_j^t, \quad \bar{j} \in J_t, \quad t = 1 \dots k, \quad (1)$$

случайного поля (СП)  $x_j^t$  с пространственно-временными корреляционными связями и аддитивных помех  $n_j^t$ , представляющих собой независимые случайные величины с нулевыми средними и дисперсиями  $\sigma_n^2$ . Вектор параметров  $\bar{\chi}_t$  позволяет учесть, например, возможные взаимные пространственные смещения и повороты соседних кадров изображения.

Появление детерминированного сигнала приводит к изменению модели (1) лишь в области индексов  $\bar{j} \in G \subset J$  (рис. 1). В частности, область  $G$  может быть частью последнего из наблюдаемых кадров:

$$z_j^k = s_j + x_j^k(\bar{\chi}_k) + n_j^k, \quad \bar{j} \in G, \quad (2)$$

где  $\{s_j, \bar{j} \in G\}$  – отсчеты полезного (обнаруживаемого) сигнала.

В рассмотренных условиях необходимо найти правило проверки гипотезы  $H_0$  об отсутствии аномалии в области  $G$  при альтернативном предположении  $H_1$  о справедливости модели (2).

При заданных вероятностных характеристиках компонент моделей (1), (2) могут быть определены соответствующие условные плотности распределения вероятностей (ПРВ) наблюдений  $w(Z|H_0)$  и  $w(Z|H_1)$ . Поэтому для решения задачи обнаружения следует воспользоваться сравнением с пороговым уровнем отношения правдоподобия:  $\Lambda = w(Z|H_1) / w(Z|H_0)$ .

Для упрощения вычислений представим условные ПРВ в виде произведений:

$$w(Z|H_{0,1}) = w(Z_0|H_{0,1})w(Z_G|Z_0, H_{0,1}),$$

где  $Z_G$  – совокупность наблюдений по области  $G$ ;

$Z_0$  – совокупность всех наблюдений, не принадлежащих области предполагаемого сигнала. Поскольку  $w(Z_0|H_0) = w(Z_0|H_1)$ , то после преобразований с учетом гауссовской аппроксимации ПРВ [2, 5], получим следующее правило обнаружения светового пятна:

$$L = \sum_{\bar{l}, \bar{j} \in G} s_j V_{\bar{l}, \bar{j}}^{-1} (z_j^k - \hat{x}_{\bar{j}}^k) \begin{cases} \geq \lambda_0 - \text{сигнал есть,} \\ < \lambda_0 - \text{сигнала нет,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $\hat{x}_{\bar{j}}^k = M \{x_j^k | Z_0\}$  – оптимальный прогноз значений СП  $x_j^k$ ,  $\bar{j}, \bar{l} \in G$ , построенный на основе всех имеющихся наблюдений  $Z_0$ , не принадлежащих области сигнала;  $V_{\bar{l}, \bar{j}} = P_{\bar{l}, \bar{j}} + \sigma_n^2 E_{\bar{l}, \bar{j}}$ ;  $P_{\bar{l}, \bar{j}}$  – ковариационная матрица ошибок оптимального прогноза;  $E_{\bar{l}, \bar{j}}$  – единичная матрица. Таким образом, процедура обнаружения включает в себя компенсацию мешающих изображений с помощью вычитания из наблюдения  $z_j^k$  оптимального прогноза  $\hat{x}_{\bar{j}}^k$ , найденного на основе всех наблюдений, не принадлежащих области  $G$ . После компенсации мешающих изображений осуществляется линейное весовое суммирование остатков. Для реализации представленного алгоритма формируется скользящее окно, в котором выделяется область  $G$  появления сигнала и область обучающих отсчетов для составления прогноза (рис. 1). На каждой пространственной позиции этого окна принимается решение относительно наличия или отсутствия светового пятна.

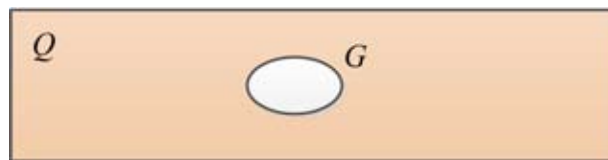


Рис. 1. Область  $G$ , в которой может появиться сигнал;  $Q$  – дополнительная область

**АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СИГНАЛА НА ФПМ**

После обнаружения светового пятна необходимо дать оценку его пространственного положения, определить отклонения  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  (рис. 2) направления на источник света  $\alpha_y, \beta_y$  от угловых координат  $\alpha, \beta$  оси визира и передать эту информацию в САУ визиром.

Для нахождения наилучшего алгоритма определения положения  $\Delta\alpha, \Delta\beta$  отметки цели относительно центра ФПМ будем считать, что после компенсации  $(z_{ij}^k - \hat{x}_{ij}^k)$  мешающих изображений, остатки представляют собой отсчеты белого шума  $n_{ij}$  с дисперсией  $\sigma_n^2$ , где  $(i, j)$  – номер элемента ФПМ. Тогда наблюдения являются суммой

$$z_{ij} = S_0 f_{ij}(\Delta\alpha, \Delta\beta) + n_{ij},$$

полезного сигнала с амплитудой  $S_0$  и шума. Форма сигнала определяется функцией  $f_{ij}(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ . Совместная плотность распределения наблюдений запишется в виде:

$$w(\{z_{ij}\}/\Delta\alpha, \Delta\beta) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \right)^N \times \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{i,j} (z_{ij} - S_0 f_{ij}(\Delta\alpha, \Delta\beta))^2 \right],$$

где  $N$  – общее число элементов ФПМ в окне оценивания положения светового пятна. Оптимальный алгоритм оценивания должен быть основан на поиске максимума  $w(\{z_{ij}\}/\Delta\alpha, \Delta\beta)$  или на решении системы двух уравнений правдоподобия:

$$\sum_{i,j} \frac{\partial w(\{z_{ij}\}/\Delta\alpha, \Delta\beta)}{\partial \alpha} = 0,$$

$$\sum_{i,j} \frac{\partial w(\{z_{ij}\}/\Delta\alpha, \Delta\beta)}{\partial \beta} = 0.$$

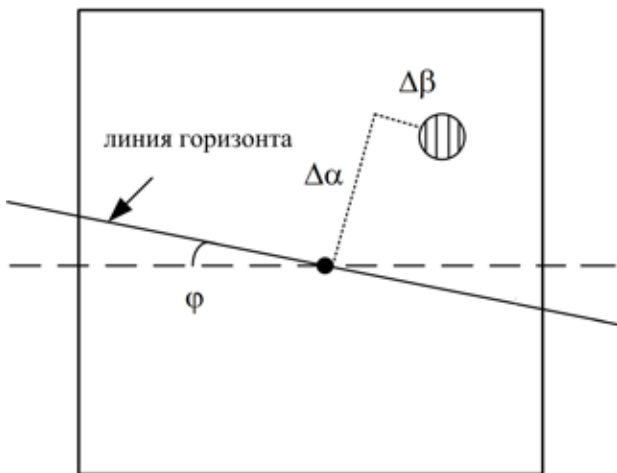


Рис. 2. Координаты светового пятна относительно заданной точки

При симметричной форме сигнала процедура заключается в поиске таких значений  $\Delta\alpha, \Delta\beta$ , для которых

$$\sum_{i,j} z_{ij} \frac{\partial f_{ij}(\Delta\alpha, \Delta\beta)}{\partial \alpha} = 0 \quad \text{и} \quad (4)$$

$$\sum_{i,j} z_{ij} \frac{\partial f_{ij}(\Delta\alpha, \Delta\beta)}{\partial \beta} = 0.$$

Технически можно реализовать такой алгоритм с помощью четырех стробов  $c_1, c_2, c_3, c_4$ , в которых осуществляется весовое суммирование (рис. 3). Размер всех четырех стробов должен быть больше размера светового пятна. Осуществляется поиск такого положения, при котором выполняются условия (4).

Для определения дисперсии ошибки оценивания координат с помощью оптимального алгоритма (4) воспользуемся нижней границей, определяемой первенством Крамера-Рао [6]. С этой целью найдем информа-

ционную матрицу Фишера  $I = \begin{pmatrix} I_\alpha & I_{\alpha\beta} \\ I_{\alpha\beta} & I_\beta \end{pmatrix}$ . Обратная

матрица  $I^{-1}$  является нижней границей ковариационной матрицы ошибок оценивания положения пятна на ФПМ. При малых  $\Delta\alpha \approx 0, \Delta\beta \approx 0$  и симметричной форме  $S_{ij}$  светового пятна элементы побочной диагонали  $I_{\alpha\beta} = (1/\sigma_n^2) \sum_{i,j} (\partial S_{ij}/\partial \alpha)(\partial S_{ij}/\partial \beta)$  будут равны нулю и ошибки в каналах оценивания азимута и угла места оказываются некоррелированными.

Рассмотрим, например, световое пятно гауссовской формы:

$$S_{ij} = S_0 \exp \gamma_0^2 \left( -(i\Delta x - \alpha)^2 - (j\Delta x - \beta)^2 \right), \quad (5)$$

где  $1/\gamma_0$  – радиус сечения пятна на уровне  $1/e$ ;

$\Delta x$  – размер одного элемента ФПМ. В этом случае

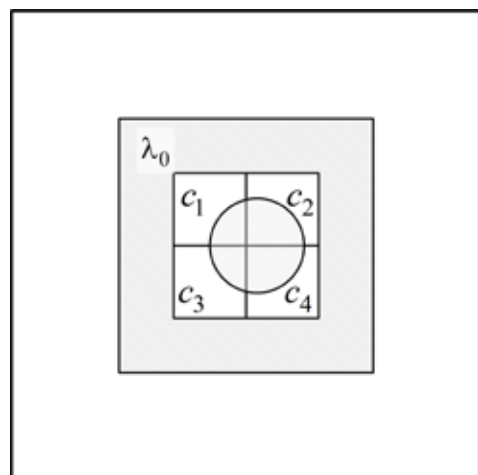


Рис. 3. Стробы системы слежения

$$I_{\alpha\beta} = 4 \frac{S_0^2 \Delta x^2 \gamma_0^4}{\sigma_n^2} \sum_i i \exp(-2\gamma_0^2 (i\Delta x)^2) \times \\ \times \sum_j j \exp(-2\gamma_0^2 (j\Delta x)^2),$$

$$I_\beta = q \sum_{i,j} \left( \frac{\partial S_{ij}}{\partial \beta} / S_0 \right)^2 = \\ = 4q\gamma_0^4 \sum_{ij} j^2 \Delta x^2 \exp(-2\gamma_0^2 ((i\Delta x)^2 + (j\Delta x)^2)),$$

где  $q = S_0^2 / \sigma_n^2$ .

Таким образом, минимально достижимая дисперсия ошибки определяется следующим соотношением:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{\Delta x^2}{qA_0}, \tag{6}$$

где  $A_0 = 4A_1A_2$ ;  $A_1 = \sum j^2 \Delta x^3 \gamma_0^3 \exp(-2\gamma_0^2 (j\Delta x)^2)$ ;  
 $A_2 = \sum \Delta x \gamma_0 \exp(-2\gamma_0^2 (j\Delta x)^2)$ .

При больших размерах пятна суммы  $A_1$  и  $A_2$  можно приближенно заменить интегралами и тогда  $A_0 \cong \pi/2$  и  $\sigma_\alpha^2 / \Delta x^2 \cong 0,64 / q$ . Заметим, что погрешность  $\sigma_\alpha / \Delta x$  определяет среднеквадратичное число элементов ФПМ, на которое отклоняется оценка от истинного значения азимута.

Таким образом, при заданных характеристиках оптической системы и условий наблюдения полученные формулы позволяют определить погрешности измерения координат светового пятна на ФПМ. Заметим, что в условиях качки при отсутствии гиросtabilизированной платформы для решения задачи управления целесообразно использовать сигналы от гиро-азимут-горизонт-компыаса, позволяющие сохранить направление и горизонтальность линии визирования. Для учета изменяющегося угла  $\phi$  наклона линии горизонта на ФПМ (рис. 2) необходимо пересчитывать имеющиеся рассогласования для получения действительных угловых сдвигов  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$ .

**Анализ ошибок САУ**

САУ угловым положением визира имеет два одинаковых по структуре канала: азимутальный и угломестный (рис. 4). В угловом дискриминаторе (УД) вырабатывает-

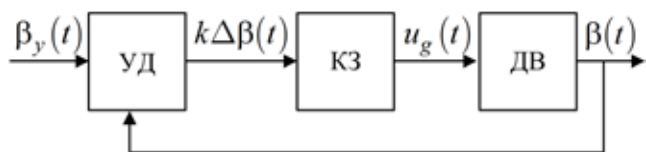


Рис. 4. Система слежения по азимуту

ся сигнал  $k\Delta\beta(t)$ , пропорциональный рассогласованию между направлением на источник света  $\beta_y(t)$  и положением оптической оси  $\beta(t)$ . Этот сигнал проходит через корректирующее звено (КЗ) с передаточной функцией  $K_c = (1 + pT)/p$ , позволяющей обеспечить нулевую ошибку системы по скорости. Выходной сигнал  $u_g(t)$  этого звена поступает на шаговый электродвигатель (ДВ). Структурная схема системы слежения (рис. 4) может быть преобразована в следующую эквивалентную схему (рис. 5).

Коэффициент передачи разомкнутой САУ  $H(p)$  при возможном угловом взаимном перемещении источника света и ФПМ с постоянной скоростью, как правило, должен содержать два интегратора:  $H(p) = k(1 + pT)/p^2$ . При этом предполагается, что инерционность привода карданного подвеса мала по сравнению с постоянной времени САУ. Для случая малых скоростей взаимного перемещения, характерных для угломестного канала, можно использовать САУ с одним интегратором:  $H(p) = k/p$ . Кроме полезного сигнала ошибки  $\epsilon_\beta = \beta_y - \beta$ , на вход САУ поступает помеха  $n(t_i)$ , дисперсия которой  $\sigma_\beta^2$  при близком к оптимальному оценивании приближенно определяется формулой (6). Эту помеху следует рассматривать как периодический импульсный случайный процесс [3, 6, 7]. Энергетический спектр такого процесса известен [3, 4, 6]:  $G(\omega) = \sigma_\beta^2 T (\sin^2 \omega T / 2) / (\omega T / 2)^2$ , где  $T = t_i - t_{i-1}$  – период съема информации с ФПМ. Поскольку период  $T$  обычно значительно меньше полосы пропускания САУ, то можно полагать, что на входе САУ действует белый шум со спектральной плотностью  $G(\omega) = \sigma_\beta^2 T$ . В этом случае дисперсия ошибки слежения на выходе САУ может быть найдена по формуле:

$$\sigma_\epsilon^2 = \frac{\sigma_\beta^2 T}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{H(j\omega)}{1 + H(j\omega)} \right)^2 d\omega.$$

Для САУ с одним интегратором  $H(j\omega) = k/j\omega$ , и тогда

$$\sigma_\epsilon^2 = k\sigma_\beta^2 T.$$

Таким образом, для заданных характеристик видеосистемы и карданного подвеса найденное выражение с учетом (6) позволяет определить дисперсию ошибки слежения за источником света.

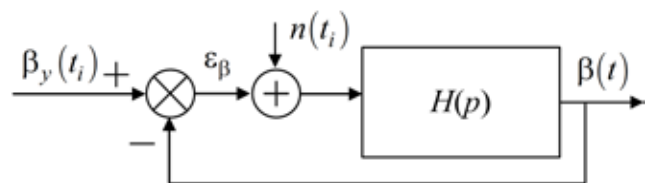


Рис. 5. Эквивалентная схема САУ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ

Для оценки величин погрешностей САУ визиром в сложных условиях был разработан программный комплекс имитационного 3D-моделирования надводной окружающей обстановки, включающей два корабля, на одном из которых находится корреспондент, а на втором – САУ визиром (рис. 6).

Программные модули моделирования корреспондента и слежения за корреспондентом работают под ОС Windows XP / Windows Vista с использованием Net.Framework 3.5 и локальной вычислительной сети, поддерживающей UDP-протокол.

В главном окне программы выполняется трехмерное моделирование морского волнения с двумя кораблями, на одном из которых расположен корреспондент, а на втором размещена ТВ-камера для слежения за ним. В верхнем правом углу главного окна отображаются кадры с ТВ-камеры, следящей за корреспондентом.

Программный модуль позволяет изменять положение кораблей в трехмерной сцене путем их управления курсорными клавишами. Кроме того, в программе предусмотрена возможность движения корабля с корреспондентом относительно корабля с камерой. Это достигается путем нажатия на кнопку  в панели инструментов. Повторное нажатие на эту кнопку приведет к остановке перемещения. Вторая кнопка на панели инструментов  позволяет включать и выключать световые сигналы корреспондента, моделируя таким образом возможные помехи при его наблюдении.

В главном окне отображается текущий кадр, принятый с ТВ-камеры по UDP-протоколу, в котором кружком отмечено положение наблюдаемого корреспондента. При имитационном моделировании выполнялось смещение корабля с корреспондентом относительно второго корабля, на котором находится визир. Волнение моря с величиной волны 4 метра определяло вертикальное смещение кораблей от-

носительно друг друга. В результате возникали ошибки рассогласования между центральной точкой кадра и изображением светового пятна в следящей камере. Соответственно, величина рассогласования определялась как число пикселей между центральной точкой кадра и центром тяжести пятна по каждой из двух координат.

Оценки рассогласования САУ визиром для разрешающей способности камеры 400×300 пикселей вычислялись при различных расстояниях между кораблями и

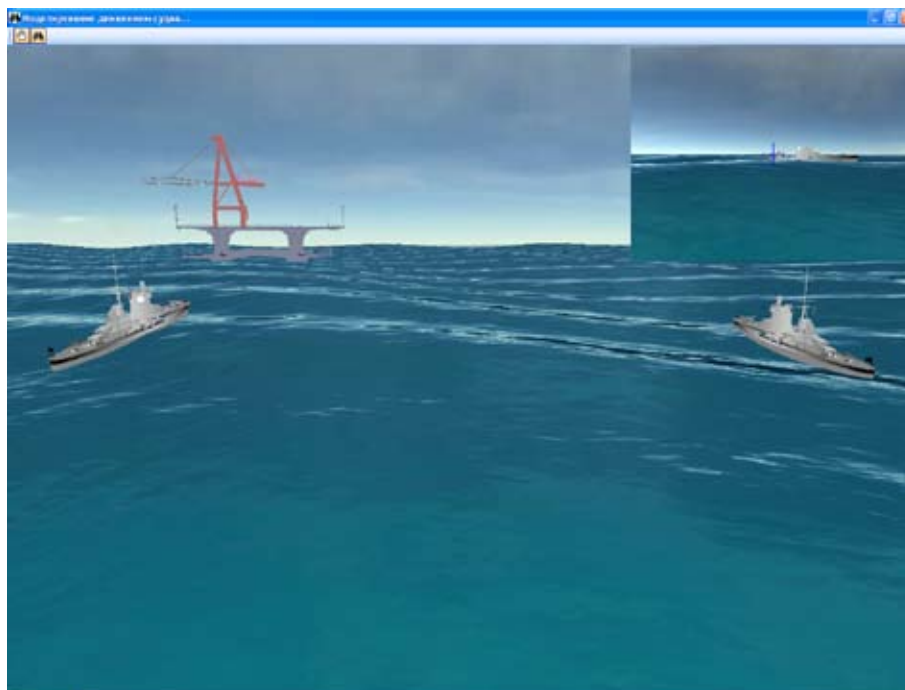


Рис. 6. Главное окно программы имитационного 3D-моделирования

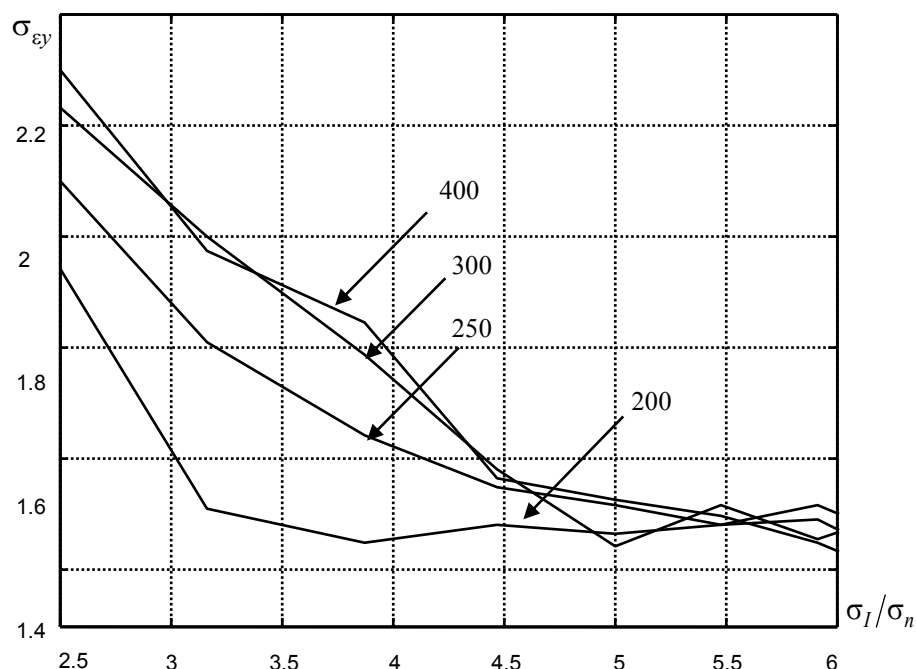


Рис. 7. Зависимости СКО ошибок рассогласования системы наведения при различном расстоянии между абонентами

значениях отношения сигнал/шум  $\sigma_I/\sigma_n$ , где  $\sigma_I$  — среднее квадратическое отклонение (СКО) уровней пикселей корреспондента;  $\sigma_n$  — СКО шума кадра. СКО ошибок рассогласования по вертикали  $\sigma_{ey}$  и горизонтали  $\sigma_{ex}$  вычислялись с помощью статистического моделирования по 1000 наблюдениям (рис. 7).

Анализ полученных данных статистического моделирования показывает примерно линейное снижение СКО погрешностей рассогласования при увеличении значений сигнал/шум с 2,5 до 6. Для диапазона расстояний между кораблями от 200 до 400 метров значения погрешностей оказываются близкими, начиная со значения  $\sigma_I/\sigma_n = 5$ . Это объясняется незначительными взаимными вертикальными перемещениями кораблей при величине гребня волны в 4 метра. Следует отметить близкий характер экспериментальных и теоретических зависимостей СКО погрешностей измерений. Вместе с тем, проведение моделирования позволяет учесть ряд дополнительных факторов, таких как волнение моря, прозрачность атмосферы, особенности взаимного движения кораблей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты позволяют осуществить проектирование и реализацию всех основных элементов приемной аппаратуры перспективной морской системы светосигнальной связи [1]. В качестве технических средств рассмотрено применение оптического визира с фотодиодом и видеокамеры с ФПМ, расположенных на двухосном или трехосном карданном подвесе [1, 4]. Основой для создания программного обеспечения являются квазиоптимальные процедуры обнаружения и определения положения светового пятна на ФПМ, а так-

же алгоритмы слежения по двум угловым координатам. Пример реализации системы как комплекса имитационного моделирования показывает высокую эффективность разработки даже в условиях волнения при использовании двухосного карданного подвеса. При этом применялся дополнительный модуль расчета угла наклона линии горизонта на ФПМ и соответствующего поворота изображения для удобства работы оператора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоскоростные морские системы светосигнальной связи нового поколения / Э.Д. Павлыгин, К.К. Васильев, С.В. Елягин, С.С. Гаврилов // Автоматизация процессов управления. – 2013. – № 4 (34). – С. 3–6.
2. Васильев К.К., Балабанов В.В. Обнаружение точечных сигналов на фоне мешающих изображений // Радиотехника. – 1991. – № 10. – С. 86–89.
3. Васильев К.К. Теория автоматического управления (следающие системы) : учеб. пособие. 2-е изд. – Ульяновск : УлГТУ, 2001. – 97 с.
4. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. – М. : Радиотехника, 2008. – 176 с.
5. Васильев К.К., Крашенинников В.Р. Статистический анализ последовательностей изображений. – М. : Радиотехника, 2016. – 242 с.
6. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М. : Радио связь, 1989. – 654 с.
7. Васильев К.К. Применение статистических методов при проектировании корабельных систем связи и автоматического управления движением // Автоматизация процессов управления. – 2011. – № 1 (23). – С. 72–77.