

Потенциальная точность системы слежения за объектами датчиками различных физических полей с комплексированием наблюдений

Д. Г. Сергиенко, email: sergienkodg@yandex.ru ¹

В. И. Лютин, email: lyutin_v_i@mail.ru ²

¹ Воронежский государственный технический университет

² Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина

***Аннотация.** В работе на основе теории совместной нелинейной фильтрации дискретных и непрерывных марковских последовательностей синтезирован квазилинейный алгоритм и составлена структурная схема системы автоматического слежения за выбранным объектом. Установлено, что способ объединения результатов наблюдений заключается в весовом суммировании сигналов регулирования с весами, равными произведению вероятностей обнаружения объекта и вероятностей перехода в новое состояние. Анализ качества слежения показал, что совместным наблюдением несколькими датчиками с невысокими показателями качества возможно слежение за плохо видимым или преднамеренно замаскированным объектом.*

***Ключевые слова:** комплексирование результатов наблюдений; теория нелинейной фильтрации; отношение правдоподобия; автоматическое слежение; обратная связь по решению.*

Введение

Всё возрастающее применение систем обеспечения безопасности мест скопления людей и техники приводит к необходимости совершенствования систем автоматического слежения за выделенными объектами различного назначения. В связи с этим актуальным является повышение точности и помехозащищённости автоматических систем слежения, что приводит к необходимости использования данных о пространственно-энергетических характеристиках объектов и фонов, получаемых различными способами при наблюдении собственных и отражённых излучений объекта и в различных участках спектра электромагнитного излучения – ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном, радиоволновом [1]. При этом изображение

просматриваемой области пространства не интерпретируется как обычный зрительный образ, воспринимаемый человеком, а является многомерным образом, пригодным для машинного восприятия и представляющим собой добываемую всеми доступными наблюдателю средствами совокупность сведений об окружающих наблюдателя объектах [2, 3].

Цель работы – синтез алгоритма автоматического слежения за выбранным объектом с применением комплексирования известных средств слежения в различных диапазонах длин волн собственных и отражённых излучений и оценка точности автоматического слежения.

1. Синтез алгоритма автоматического слежения за целью

Автоматическое слежение за целью заключается в совмещении оптической оси комплексированной системы датчиков с линией визирования выбранного объекта. По величине углов отклонения оптической оси датчиков от линии визирования цели в вертикальной и горизонтальной плоскостях вырабатываются команды системы слежения в сторону цели.

Методом решения подобных задач, является применение теории нелинейной фильтрации, в частности, теории совместной фильтрации дискретных и непрерывных марковских процессов [3, 4, 5]. При этом характер изменений вида объекта в каждом из каналов наблюдения, обусловленный поворотами и преднамеренными видоизменениями наблюдаемого объекта, предполагается описывать дискретной марковской цепью, причём сами виды объекта и их число заранее заданы, а характер изменения единых для изображений во всех каналах наблюдения непрерывных параметров – угловых отклонений линии визирования от оптической оси в двух взаимно перпендикулярных плоскостях – от кадра к кадру в силу медленности их изменения предполагается описывать гауссовской марковской последовательностью в дискретном времени.

Примем, что наблюдение за предварительно выбранным объектом ведётся с помощью N датчиков наблюдения (каналов), каждый из которых соответствует одному из диапазонов длин волн, а совмещение линии визирования и оптической оси нужно выполнить в одной плоскости, т.е. наблюдение зависит от многих дискретных и одного непрерывного параметров. Пусть на первом шаге наблюдения, когда человеком выбирается объект слежения, запоминаем вь всеми датчиками слежения, априорное распределение вероятностей дискретных параметров – равномерное $P(\mu_1^{(n)}) = M_n^{-1}$; где M_n – число различаемых

дискретных параметров в n -том канале наблюдения; $\mu^{(n)} = \overline{1, M_n}$ – значения дискретных параметров, определяющих вид наблюдаемого объекта в n -том канале наблюдения, $n = \overline{1, N}$. Для каждого из дискретных параметров для последующих шагов заданы одношаговые условные вероятности $\pi_n \left(\mu_k^{(n)} \middle| \mu_{k-1}^{(n)} \right)$ перехода дискретных параметров $\mu^{(n)}$ из состояния $\mu_{k-1}^{(n)}$ на $(k-1)$ -том шаге в состояние $\mu_k^{(n)}$ на k -том шаге. Допустим также, что априорное рекуррентное стохастическое уравнение для изменений непрерывного параметра в дискретном времени имеет вид

$$\lambda_k = R_\lambda \cdot \lambda_{k-1} + \sigma_\lambda \cdot \sqrt{1 - R_\lambda^2} \cdot \xi_k, \quad (1)$$

где R_λ – коэффициент корреляции между значениями параметра на соседних шагах; σ_λ^2 – априорная дисперсия параметра; ξ_k – гауссовская случайная последовательность; $\overline{\xi_k} = 0$, $\overline{\xi_k^2} = 1$, $k = \overline{1, 2, \dots}$.

В каждом канале на фоне аддитивного гауссовского шума наблюдаются последовательности изображений объекта и прилегающего фона на плоскости $\{s_{ijk}^{(n)}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}), i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, n = \overline{1, N}\}$ [2. 3]

$$y_{ijk}^{(n)} = s_{ijk}^{(n)}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) + n_{ijk}^{(n)}, \quad (2)$$

где $n_{ijk}^{(n)}$ – отсчёты белых шумов с дисперсиями σ_n^2 ; i, j – номера элементов изображений; I_n, J_n – размеры изображений в каждом из n каналов наблюдения.

При малом уровне собственных шумов в случае медленных изменений непрерывного параметра (постоянного в каждом кадре), и с применением разложения логарифма функционала отношения правдоподобия (ЛФОП) в ряд Тейлора по непрерывному параметру в окрестности значения $\lambda_k^0 = R_\lambda \cdot \hat{\lambda}_{k-1}$, соответствующего максимуму экстраполированной плотности вероятности непрерывного параметра, алгоритм фильтрации записывается в виде трёх уравнений: для апостериорной вероятности дискретного параметра, оценки и дисперсии оценки непрерывного параметра

$$P_{ps}(\mu_k^{(n)}) = C_k \cdot \prod_{m=1}^{M_k} \left[\exp \left\{ \Pi_k(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(m)}) \right\} \cdot \sqrt{\chi_k(\mu_k^{(m)}) \cdot D_k^{-1}} \times \right. \\ \left. \times \exp \left\{ \frac{1}{2} \cdot \chi_k(\mu_k^{(m)}) \cdot \left[\Pi'_\lambda(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(m)}) \right]^2 \right\} \right], n = \overline{1, N}, \quad (3)$$

$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^\vartheta + \sum_{n=1}^N \pi_n(\mu_{k,n} | \mu_{k-1,n}) \cdot \chi_k(\mu_k^{(n)}) \cdot \sum_{m=1}^{M_k} P_{ps}(\mu_k^{(m)}) \cdot \Pi'_\lambda(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(n)}) \quad (4)$$

$$d_k = \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{n=1}^N P_{ps}(\mu_k^{(n)}) \cdot \left[\left\{ \frac{D_k \left[\Pi'_\lambda(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(n)}) \right]}{1 - D_k \cdot \overline{\Pi''_{\lambda\lambda}}(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(n)})} + \lambda_k^\vartheta - \hat{\lambda}_k \right\}^2 + \chi_k(\mu_k^{(n)}) \right] \quad (5)$$

где $\Pi_k(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = \sum_{m=1}^{M_k} \sigma_n^{-2} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ijk}^{(n)} \cdot s_{ijk}^{(m)}(\lambda_k, \mu_k^{(m)})$, $n = \overline{1, N}$ – логарифм

функционала отношения правдоподобия параметров [4, 5, 8]; C_k – постоянная нормировки; μ_k , $n = \overline{1, N}$ – значения дискретных параметров в N каналах наблюдения на k -том шаге; $d_0 = (1 - R_\lambda^2) \cdot \sigma_\lambda^2$ – дисперсия плотности вероятности перехода; R_λ – коэффициент корреляции значений параметра на соседних шагах; σ_λ^2 – априорная дисперсия параметра; $D_k = d_0 + R_\lambda^2 \cdot d_{k-1}$ – дисперсия экстраполированной оценки непрерывного параметра; $\Pi'_\lambda(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(n)})$ – производная от ЛФОП; $\chi_k(\mu_k^{(n)}) = D_k / [1 - D_k \cdot \overline{\Pi''_{\lambda\lambda}}(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(n)})]$ – кумулянт экстраполированного распределения вероятностей непрерывного параметра; $\overline{\Pi''_{\lambda\lambda}}(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(n)}) = -q_{\mu k} \cdot R''_{\lambda\lambda}(0, \mu_k)$ – сигнальная часть второй производной ЛФОП [5, 6]; $q_{\mu k}$ – отношение сигнал/шум; $R''_{\lambda\lambda}(0, \mu_k)$ – вторая производная от функции корреляции наблюдаемого изображения.

Решение о значениях параметров μ_k , $k = \overline{1, N}$, и λ_k принимается по критерию максимума апостериорных вероятностей. Решение о наблюдаемом объекте всегда принимается на каждом шаге. При этом один из эталонов – фон. Для фона принимается $\overline{\Pi''_{\lambda\lambda}}(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(n)}) = 0$, а при принятии решения о фоне $P_{ps}(\mu_k^{(n)})|_{\mu = \text{фон}} = \max$.

При высоком отношении сигнал/шум, когда $D_k^{-1} \ll \overline{\Pi''_{\lambda\lambda}}(\lambda_k^\vartheta, \mu_k^{(n)})$, дисперсия оценки непрерывного параметра асимптотически равна [2]

$$d_k \equiv \sum_{m=1}^{M_n} \sum_{n=1}^N P_{ps}(\mu_k^{(n)}) \cdot \frac{1}{-\overline{\Pi}_{\lambda\lambda}''(\lambda_k^{\circ}, \mu_k^{(n)})}. \quad (6)$$

Данное выражение определяет минимальное значение дисперсии оценки непрерывного параметра, соответствующее границе, задаваемой неравенством Рао-Крамера.

Минимальные значения величин $\chi_k(\mu_k^{(n)})$ при высоком отношении сигнал/шум асимптотически равны D_k , поэтому для упрощения алгоритмов величина $\chi_k(\mu_k^{(n)})$ принимается одинаковой и равной κ_n для всех значений дискретного параметра каждого канала и соответствующей стационарному режиму наблюдения, наступающему после захвата объекта на автосопровождение. Тогда алгоритм рекуррентного оценивания непрерывного параметра (4) принимает вид

$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^{\circ} + \sum_{n=1}^N \kappa_n \cdot \pi_n(\mu_{k_n} | \mu_{k-1_n}) \cdot \sum_{m=1}^{M_n} P_{ps}(\mu_k^{(m)}) \cdot \Pi'_{\lambda}(\lambda_k^{\circ}, \mu_k^{(m)}). \quad (7)$$

Апостериорные вероятности дискретных параметров равны [7]

$$P_{ps}(\mu_k^{(n)}) \equiv \exp\left\{\overline{\Pi}_k(\lambda_k^{\circ}, \mu_k^{(n)})\right\} \cdot \left[\sum_{m=1}^{M_n} \exp\left\{\overline{\Pi}_k(\lambda_k^{\circ}, \mu_k^{(m)})\right\}\right]^{-1}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (8)$$

Вычисление оценки непрерывного параметра выполняется в виде весовой суммы производных от ЛФОП, определяющих сигналы управления поворотом системы слежения за объектом в каждом из каналов, с весами, равными апостериорным вероятностям обнаружения объекта в различных физических полях. Учёт вероятностей перехода для дискретных параметров позволяет отсеleccionировать быстрые изменения изображения объекта, каковых не может быть в силу инерционности объекта. Тем самым обеспечивается помехозащищённость алгоритма слежения [6, 7]. Заметим, что данный вывод получен объективно в результате синтеза, а не эвристически.

На рис. 1 приведена структурная схема системы автоматического слежения с комплексированием наблюдений в различных диапазонах длин волн.

На рисунке обозначено: ДИ_n, $n = \overline{1, N}$ – датчики изображений; ГПП – гиросtabilизированная поворотная платформа; БД_n – блоки дискриминаторов; БЭ_n – банки эталонных изображений; БАВ_n – блоки апостериорных вероятностей; Σ – сумматоры; Э – экстраполятор.

Отличительная особенность синтезированной структурной схемы заключается в её замкнутости, как системы автоматического

регулирования с обратной связью по решению, чего не удаётся получить, используя теорию оценивания непрерывных параметров [5]. Действие обратной связи по решению при высоком качестве обнаружения сводится к выбору сигнала управления с выхода дискриминатора того дискретного параметра, для которого вероятность обнаружения наибольшая. Замкнутая система размыкается, если апостериорная вероятность дискретного параметра равна нулю, или если объект обнаружен с высокой вероятностью как неожиданно быстро переместившийся за счёт маловероятности быстрых переходов.

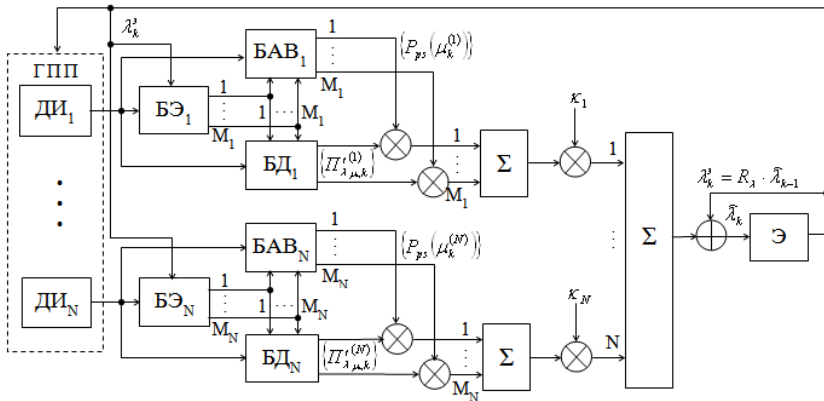


Рис. 1. Структурная схема комплексированной системы автоматического слежения

2. Анализ точности автоматического слежения

Аналитическое решение задачи оценки точности автоматического слежения возможно получить при условии, что в каждом из каналов наблюдается объект с плановой проекцией в виде прямоугольника с постоянным контрастом на равномерном фоне и обнаруживается с вероятностью p_n , определяемой выражением (3), которое в этих условиях приводится к виду [2, 3, 9].

$$p_n = 0.5 - \Phi_0^{-1}(F - 0.5) - q_n, \quad n = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где $\Phi_0(q) = (2\sqrt{\pi})^{-1} \int_0^q \exp\{-t^2/2\} dt$ – нормированная функция ошибок [9],

F – вероятность ложной тревоги.

Для комплексированной системы датчиков параметр обнаружения объекта равен [8]

$$q = \sum_{n=1}^N q_n, \quad (10)$$

где q_n – отношение сигнал/шум в n -м канале.

Вероятность обнаружения объекта комплексированной системой датчиков изображений P определяется подстановкой (10) в (9).

Точность слежения определяется из рекуррентного уравнения для апостериорной дисперсии оценивания непрерывного параметра d_k , которое с введением понятия относительной апостериорной дисперсии $\delta_k^2 = d_k / \sigma_\lambda^2$, где $\sigma_\lambda^2 = (\alpha_0 \cdot L)^2$ – априорная дисперсия непрерывного параметра при среднеквадратическом угловом отклонении α_0 линии визирования от оптической оси при отсутствии слежения и дальности наблюдения L , примет вид [2, 3]

$$\delta_k^2 = P \left/ \left\{ \left[1 + R_\lambda^2 \cdot (\delta_{k-1}^2 - 1) \right]^{-1} + z \right\} + (1 - P) \left/ \left[1 + R_\lambda^2 \cdot (\delta_{k-1}^2 - 1) \right]^{-1} \right. \right. \cdot \quad (11)$$

где $z = \sigma_\lambda^2 q$ – обобщённый параметр обнаружения объекта комплексированной системой.

На практике стационарное значение δ устанавливается через 5...20 шагов наблюдения, что при частоте кадров 30 Гц соответствует времени 0,1...0,3 сек.

Вероятность удержания оптической оси комплексированной системы слежения в пределах видимой проекции объекта равна [9]

$$P_c = [0,5 - \Phi_0(\Delta\varphi_g / (\sigma_\lambda \cdot \delta))] \cdot [0,5 - \Phi_0(\Delta\varphi_v / (\sigma_\lambda \cdot \delta))] \cdot \quad (12)$$

где $\Delta\varphi_g, \Delta\varphi_v$ – угловые размеры видимой проекции объекта; δ – стационарное решение уравнения (9).

Если для одного из каналов известна вероятность обнаружения объекта P_N , то из выражения (9) при вероятности ложной тревоги F_N определяется параметр обнаружения, используемый при расчёте точности слежения

$$q_N = \Phi_0^{-1}(F_N - 0,5) - \Phi_0^{-1}(0,5 - P_N) \cdot \quad (13)$$

На рис. 2. приведены графики зависимостей ошибок системы слежения Δ , м, от параметра q и вероятности P обнаружения объекта при различных дальностях наблюдения L комплексированной системой датчиков. При расчёте ошибок слежения $\Delta = \delta \cdot \sigma_\lambda$ с применением рекуррентного выражения (11) принято, что $\alpha_0 = 5$ мрад, $R_\lambda = 0,99$, $F = 0,01$.

Увеличение параметра обнаружения объекта более 7 в рассматриваемом случае не приводит к снижению ошибок слежения, следовательно, ухудшение условий наблюдения объекта в каждом из каналов парируется увеличением числа каналов наблюдения [6, 7]. Поэтому для сохранения работоспособности комплексированной системы датчиков, необходимо всемерно повышать параметр и вероятность обнаружения каждым из датчиков.

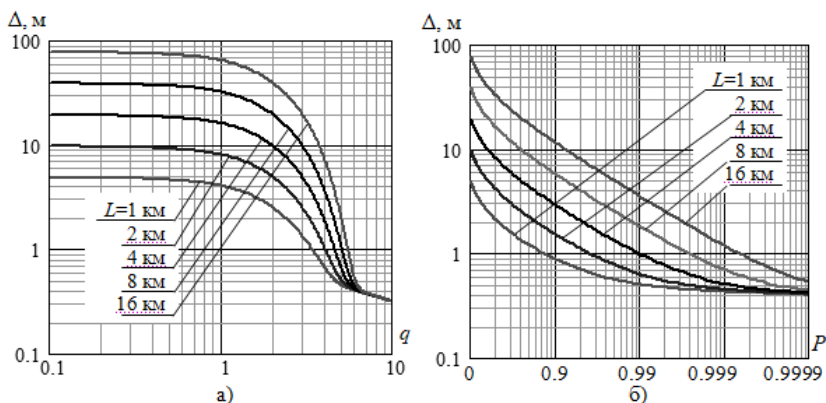


Рис. 2. Зависимости ошибок слежения при различных дальностях наблюдения: (а) от параметра обнаружения объекта; б) от вероятности обнаружения объекта

Заключение

Оптимальный способ объединения результатов наблюдения объекта в замкнутых комплексированных системах автоматического слежения заключается в формировании единого сигнала управления поворотом совмещённой оптической оси вслед за объектом как результата весового суммирования сигналов рассогласований, вырабатываемых каждой из систем наблюдения. В качестве весовых коэффициентов используются произведения вероятности обнаружения объекта и вероятности перехода состояний объекта, что является обратной связью по решению. Установлено, что в системах автоматического слежения всегда можно определить минимальное значение параметра обнаружения, при котором точность слежения не зависит от дальности наблюдения объекта. Высокое качество слежения достигается за счёт увеличения числа каналов наблюдения с невысокими показателями качества, что является проявлением синергетического эффекта: совместным наблюдением нескольких

датчиков с невысокими показателями качества возможно слежение за плохо видимым или преднамеренно замаскированным объектом, чего не удаётся достичь применением одного высококачественного датчика.

Список литературы

1. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации : / М. С. Ярлыков – М. : Радио и связь, 1985. – 345 с.
2. Лютин, В.И. Потенциальная точность самонаведения беспилотных летательных аппаратов с комплексированием наблюдений в различных физических полях / В.И.Лютин, Е.Н.Десятирикова Е.А.Почепцов // Материалы XX Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». 13-14 февраля 2020 г. ISBN 978-5-9500320-2-2. Том 6, с.144...155.
3. Лютин, В. И. Алгоритм автоматического слежения при наблюдении объектов в различных физических полях / В. Лютин // Радиосистемы, выпуск 57, «Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн». – 2001. – №10. – С. 33-36.
4. Амиантов, И. Н. Избранные вопросы статистической теории связи : / И. Н. Амиантов – М. : Советское радио, 1971. – 416 с.
5. Тихонов, В. И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный приём сигналов / В .И. Тихонов, Н. К. Кульман. – М.: Советское радио, 1976. – 704 с.
6. Евдокимов, В. И. Высокоточное оружие и борьба с ним : / В. И. Евдокимов – СПб. : Издательство «Лань», 2013. – 496 с.
7. Юхно, П. М. Преднамеренные оптические помехи высокоточному оружию : / П. М. Юхно ; ISBN 978-5-93108-149-6 – Мягкая обложка – Издательство: Радиотехника, 2017. – 640 с.
8. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции : / Г. Ван Трис ; М. : Советское радио, 1972. – Т. 1 – 742 с.
9. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. / Е. С. Вентцель. – 11-е изд. стер. – М. : КНОРУС, 2010. – 664 с.