

# Технология комплексирования результатов наблюдения датчиками различных физических полей при автоматическом наведении беспилотных летательных аппаратов в заданную точку

В. И. Лютин  
ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского  
и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Е. Н. Десятирикова<sup>1</sup>, В. Е. Белоусов,  
Т. Б. Харитонов, И. П. Абросимов  
Воронежский государственный технический  
университет, Воронеж, Россия  
<sup>1</sup>science2000@ya.ru

**Аннотация.** С применением теории нелинейной фильтрации условных марковских процессов синтезирован квазилинейный алгоритм автоматического наведения беспилотного летательного аппарата, на основе которого определён способ объединения результатов наблюдений в различных физических полях и диапазонах длин волн собственных и отражённых излучений. На основе полученного алгоритма в гауссовском приближении установлены потенциальные возможности по точности слежения автоматической комплексированной системой датчиков.

**Ключевые слова:** комплексирование результатов наблюдений; автоматическое слежение; точность слежения; теория нелинейной фильтрации; отношение правдоподобия; вероятность обнаружения

## I. ВВЕДЕНИЕ

Всё возрастающее применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для доставки небольших грузов населению, в частности, в труднодоступных и малонаселённых местностях [1, 2], в автоматическом режиме приводит к необходимости повышения точности и помехозащищённости автоматических систем слежения за областью пространства, где расположен получатель груза или интересующий объект. В связи с этим актуальным является использование информации о пространственно-энергетических характеристиках объектов и фонов, получаемой как различными способами при наблюдении собственных и/или отражённых излучений объекта, так и в различных участках спектра электромагнитного излучения – ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном, радиоволновом [3, 4]. При этом изображение просматриваемой области пространства не интерпретируется как обычный зрительный образ, воспринимаемый человеком, а является трёх-, четырёх- и более мерным образом, пригодным для машинного восприятия и представляющим собой добываемую всеми доступными наблюдателю средствами сово-

купность сведений об окружающих наблюдателя объектах. Стремление к использованию результатов наблюдений объекта в различных участках спектра электромагнитного излучения приводит к необходимости разработки систем с комплексированными средствами слежения, в составе которых применяются телевизионные, тепловизионные, радиолокационные и другие средства формирования изображений [5, 6]. Кроме того, БЛА оснащаются инерциальной навигационной системой [5], корректируемой по сигналам от приёмника космической системы глобального позиционирования (GPS) [5, 6].

Цель работы – установление принципа построения и определение потенциальной точности слежения систем автоматического наведения БЛА с комплексированием средств слежения в различных физических полях и диапазонах длин волн собственных и отражённых излучений.

## II. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ

Автоматическое слежение заключается в совмещении оптической оси комплексированной системы датчиков с линией визирования объекта. По величине углов отклонения оптической оси датчиков от строительной оси БЛА в вертикальной и горизонтальной плоскостях вырабатываются команды корректировки движения БЛА.

Методом решения подобных задач является применение теории нелинейной фильтрации дискретных и непрерывных марковских процессов [7]. При этом характер изменений вида объекта в каждом из каналов наблюдения, обусловленный поворотами и преднамеренными видоизменениями наблюдаемого объекта, описывается 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 описывается гауссовской марковской последовательностью.

Примем, что наблюдение объекта ведётся в  $N$  каналах, каждый из которых соответствует одному из физических полей, а совмещение линии визирования и оптической оси нужно выполнить в одной плоскости. Пусть смена значений дискретного параметра описывается последовательностью с независимыми состояниями с равными одношаговыми условными вероятностями перехода  $\pi_m(\mu_k^{(n)}|\mu_{k-1}^{(n)})=1/M_n$ , где  $M_n$  – число различаемых дискретных параметров;  $\mu_k^{(n)}=\overline{1, M_n}$  – значения дискретных параметров, определяющих вид наблюдаемого объекта в  $n$ -том канале наблюдения,  $n=\overline{1, N}$ . Априорное рекуррентное стохастическое уравнение для изменений непрерывного параметра в дискретном времени имеет вид

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

где  $R_\lambda$  – коэффициент корреляции значений параметра на соседних шагах;  $\sigma_\lambda^2$  – априорная дисперсия параметра;  $\xi_k$  – последовательность стандартных нормальных чисел.

Будем считать, что в каждом канале на фоне аддитивного гауссовского шума наблюдаются последовательности изображений объекта и прилегающего фона на плоскости  $\{s_{ijk}^{(n)}(\lambda_k, \mu_k^{(n)})\}$ ,  $i=\overline{1, I}$ ,  $j=\overline{1, J}$ ,  $n=\overline{1, N}$

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

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

В силу независимости шумов функция правдоподобия параметров записывается в виде [7, 8]

$$L(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = \prod_{m=1}^{M_n} \prod_{i=1}^{I_n} \prod_{j=1}^{J_n} w\{y_{ijk}^{(n)} - s_{ijk}^{(m)}(\lambda_k, \mu_k^{(m)})\}, \quad n=\overline{1, N},$$

где  $w(\bullet)$  – плотности распределения вероятностей значений отсчётов шумов,  $\mu_k$ ,  $n=\overline{1, N}$  – значения дискретных параметров в  $N$  каналах наблюдения на  $k$ -том шаге. Тогда логарифм одношаговой функции правдоподобия (ЛОФП) записывается в виде

$$\Pi_k(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = \sum_{m=1}^{M_n} \Pi_{km}(\lambda_k, \mu_k^{(m)}), \quad n=\overline{1, N}.$$

При гауссовском характере шумов и в случае неэнергетических параметров ЛОФП записывается в виде [7, 8, 9]

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

Финальное апостериорное совместное распределение вероятностей параметров  $\lambda_k, \mu_k^{(n)}$ ,  $n=\overline{1, N}$  равно

$$w_{ps}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = h_k \cdot \exp\{\Pi_k(\lambda_k, \mu_k^{(n)})\} \cdot w^3(\lambda_k, \mu_k^{(n)}), \quad n=\overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $h_k^{-1} = \sum_{n=1}^N \int_{\{\lambda_k\}} \exp\{\Pi_k(\lambda_k, \mu_k^{(n)})\} \cdot w^3(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) d\lambda_k$  – постоянная нормировки.

Входящая в это выражение экстраполированная плотность вероятности непрерывного параметра равна

$$w^3(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) = \int \prod_{\{\lambda_{k-1}\}} \prod_{m=1}^{M_n} w(\lambda_k, \mu_k^{(m)}|\lambda_{k-1}, \mu_{k-1}^{(m)}) w_{ps}(\lambda_{k-1}, \mu_{k-1}^{(m)}) d\lambda_{k-1}, \quad n=\overline{1, N} \quad (2)$$

где

$$w(\lambda_k, \mu_k^{(m)}|\lambda_{k-1}, \mu_{k-1}^{(m)}) = w(\lambda_k|\lambda_{k-1}) p(\mu_{k-1}^{(m)}) \pi(\mu_k^{(m)}|\mu_{k-1}^{(m)})$$

$p(\mu_{k-1}^{(m)})$ ,  $m=\overline{1, N}$  – апостериорные вероятности дискретных параметров в  $m$  каналах на  $(k-1)$ -ом шаге.

Решение о значениях параметров  $\mu_k$ ,  $k=\overline{1, N}$ , и  $\lambda_k$  принимается на критерию максимума апостериорных вероятностей

$$P_{ps}(\mu_k^{(n)}) = \int_{-\infty}^{\infty} w_{ps}(\lambda_k, \mu_k^{(n)}) w(\lambda_k) d\lambda_k$$

$$\hat{\mu}_k = \arg \max_n P_{ps}(\mu_k^{(n)}).$$

При малом уровне собственных шумов в случае медленных изменений непрерывного параметра (постоянного в каждом кадре), безусловное финальное апостериорное распределение вероятностей непрерывного параметра

$w_{ps}(\lambda_k) = \sum_{n=1}^N w_{ps}(\lambda_k, \mu_k^{(n)})$  целесообразно искать в виде

гауссовского закона [7, 10], в котором апостериорное среднее  $m_k$  является оценкой непрерывного параметра  $\hat{\lambda}_k = m_k$ , а апостериорная дисперсия  $d_k$  характеризует точность слежения.

С применением разложения ЛОФП в ряд Тейлора по непрерывному параметру в окрестности значения  $\lambda_k^3 = R_\lambda \cdot \hat{\lambda}_{k-1}$ , соответствующего максимуму экстраполированной плотности вероятности непрерывного параметра, из выражений (1) и (2) получается алгоритм фильтрации в виде трёх уравнений для апостериорной вероятности дискретного параметра, оценки и дисперсии оценки непрерывного параметра

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

$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^3 + \sum_{n=1}^N \pi_n(\mu_{k-1}^{(n)}|\mu_{k-1}^{(n)}) \cdot \chi_k(\mu_k^{(n)}) \cdot \sum_{m=1}^{M_n} P_{ps}(\mu_k^{(m)}) \cdot \Pi'_k(\lambda_k^3, \mu_k^{(n)}) \quad (3)$$

$$d_k = C_k \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_n} \frac{\exp\{P(\lambda_k^3, \mu_k^{(m)})\}}{\sqrt{\chi_k(\mu_k^{(n)}) \cdot D^{-1}}} \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \cdot \chi_k(\mu_k^{(n)}) \cdot [P'_{\lambda}(\lambda_k^3, \mu_k^{(m)})]^2\right\} \times \\ \times \left[\chi_k(\mu_k^{(n)}) \cdot P'_{\lambda}(\lambda_k^3, \mu_k^{(m)}) + \lambda_k^3 - \hat{\lambda}_k\right]^2 + \chi_k(\mu_k^{(n)})$$

где  $C_k$  – постоянная нормировки;  $d_0 = (1 - R_{\lambda}^2) \cdot \sigma_{\lambda}^2$  – дисперсия плотности вероятности перехода;  $D = d_0 + R_{\lambda}^2 \cdot d_{k-1}$  – дисперсия экстраполированной оценки непрерывного параметра;  $P'_{\lambda}(\lambda_k^3, \mu_k^{(n)})$  – производная от ЛОФП;  $\chi_k(\mu_k^{(n)}) = D / [1 - D \cdot \bar{P}_{\lambda\lambda}''(\lambda_k^3, \mu_k^{(n)})]$  – кумулянт экстраполированного распределения вероятностей непрерывного параметра;  $\bar{P}_{\lambda\lambda}''(\lambda_k^3, \mu_k^{(n)}) = -q_{\mu k} \cdot R_{\lambda\lambda}''(0, \mu_k)$  – сигнальная часть второй производной ЛОФП [3];  $q_{\mu k}$  – отношение сигнал/шум;  $R_{\lambda\lambda}''(0, \mu_k)$  – вторая производная от функции корреляции наблюдаемого изображения.

Минимальные значения величин  $\chi_k(\mu_k^{(n)})$  равны  $D$ , поэтому для упрощения алгоритмов величина  $\chi_k(\mu_k^{(n)})$  принимается одинаковой и равной  $K_n$  для всех значений дискретного параметра каждого канала и соответствующей стационарному режиму наблюдения, наступающему после предварительного указания местоположения объекта и включения режима его сопровождения перед пуском БЛА. Тогда алгоритм оценивания непрерывного параметра (3) принимает вид

$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^3 + \sum_{n=1}^N K_n \cdot \sum_{m=1}^{M_n} P_{ps}(\mu_k^{(m)}) \cdot P'_{\lambda}(\lambda_k^3, \mu_k^{(m)}). \quad (4)$$

Апостериорные вероятности дискретных параметров равны [11]

$$P_{ps}(\mu_k^{(n)}) \equiv \exp\{P_k(\lambda_k^3, \mu_k^{(n)})\} \cdot \left[ \sum_{m=1}^{M_n} \exp\{P_k(\lambda_k^3, \mu_k^{(m)})\} \right]^{-1}, \quad n = \overline{1, N}$$

Оценка непрерывного параметра формируется как весовая сумма сигналов рассогласования с весами, равными апостериорным вероятностям обнаружения объекта в различных физических полях [12].

### III. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ

Структурная схема синтезированной системы приведена на рисунке 1. На рисунке обозначено: ДИ<sub>n</sub>,  $n = \overline{1, N}$  – датчики изображений; ГПП – гиросtabilизированная поворотная платформа; БД<sub>n</sub> – блоки дискриминаторов; БЭ<sub>n</sub> – банки эталонных изображений; БАВ<sub>n</sub> – блоки апостериорных вероятностей;  $\Sigma$  – сумматоры; Э – экстраполятор. Отличительная особенность синтезированной структурной схемы заключается в её замкнутости, как системы автоматического управления с обратной связью по решению. Подобный результат не удаётся получить, используя теорию оценивания непрерывных параметров.

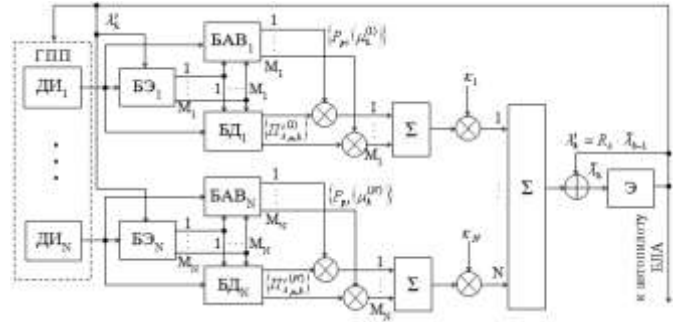


Рис. 1. Структурная схема комплексированной системы автоматического слежения.

### IV. АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ

Потенциальная точность слежения определена при допущении, что в каждом из каналов наблюдается объект с постоянным контрастом на равномерном фоне и обнаруживается с вероятностью  $P_n$  [10].

$$P_n = 0,5 - \Phi_0^{-1}(F - 0,5) - q_n, \quad n = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где  $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\{-t^2/2\} dt$  – нормированная функция ошибок;  $q_n$  – параметр обнаружения объекта;  $F$  – вероятность ложной тревоги.

Параметр обнаружения объекта комплексированной системой датчиков равен

$$q = \sum_{n=1}^N q_n \quad (6)$$

Вероятность обнаружения объекта комплексированной системой датчиков изображений равна [9]

$$P = 0,5 - \Phi_0^{-1}(F - 0,5) - q.$$

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 значении  $\alpha_0$  углового отклонения неуправляемого полёта БЛА и дальности пуска  $L$ , примет вид [11]

$$\delta_k^2 = \frac{P}{[1 + R_{\lambda}^2 \cdot (\delta_{k-1}^2 - 1)]^{-1} + z} + \frac{1 - P}{[1 + R_{\lambda}^2 \cdot (\delta_{k-1}^2 - 1)]^{-1}} \quad (7)$$

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

Вероятность удержания оптической оси комплексированной системы слежения в пределах видимой проекции объекта равна [10]

$$P_c = [0,5 - \Phi_0(\Delta\varphi_g/(\sigma_\lambda \cdot \delta))] \cdot [0,5 - \Phi_0(\Delta\varphi_v/(\sigma_\lambda \cdot \delta))], \quad (8)$$

где  $\Delta\varphi_g, \Delta\varphi_v$  – угловые размеры видимой проекции заданной области пространства;  $\delta$  – стационарное решение рекуррентного уравнения (7).

Если один из параметров  $q_N$  не определён, но известна вероятность обнаружения объекта  $P_N$ , то из выражения (5) при вероятности ложной тревоги  $F_N$  недостающий параметр обнаружения равен

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

Так как основным ограничивающим фактором применения средств наблюдения каждого из каналов является дальность, то особенности комплексированных систем зачастую заключаются в использовании каждого из каналов поочерёдно.

На рис. 2,а и 2,б приведены зависимости ошибок системы слежения  $\Delta$ , 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 (7) принято, что  $\alpha_0 = 10$  мрад,  $R_\lambda = 0,99$ ,  $F = 0,01$ .

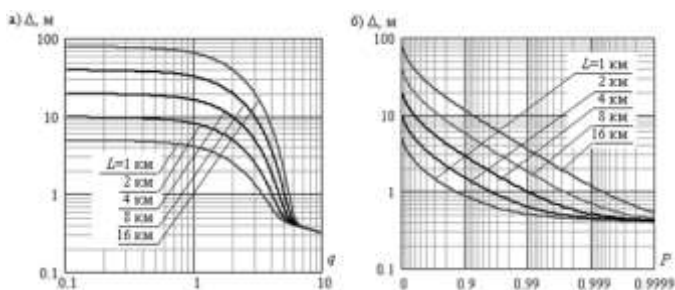


Рис. 2. Зависимости ошибок слежения при различных дальностях наблюдения: (а) от параметра обнаружения объекта; б) от вероятности обнаружения объекта.

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В комплексированных системах автоматического слежения оптимальный способ объединения результатов наблюдения различными системами заключается в формировании единого сигнала управления поворотом совмещённой оптической оси вслед за объектом как результата весового суммирования сигналов рассогласований, вырабатываемых каждой из систем наблюдения, причём в каче-

стве весовых коэффициентов используются значения вероятностей обнаружения объекта каждой из систем наблюдения. Анализ качества комплексированной системы показал, что существует значение параметра обнаружения, при котором точность слежения не зависит от дальности наблюдения объекта, причём может быть произведён размен числа доступных каналов наблюдения на качество обнаружения объекта в каждом из них, что является проявлением синергетического эффекта: совместным наблюдением нескольких датчиков с невысокими показателями качества возможно слежение за плохо видимым или преднамеренно замаскированным объектом, чего нельзя достичь при использовании одного высококачественного датчика.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Статья подготовлена при поддержке гранта Российского научного фонда «Программно-целевое управление комплексным развитием Арктической зоны РФ (проект №14-38-00009)». Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] N. Didenko, D. Skripnuk, O. Mirolyubova, and M. Radion, "Analysis of rural areas development of the region using the ADL-model," *Research for Rural Development*, 2017, vol. 2, pp. 142-147. doi:10.22616/rtd.23.2017.061
- [2] I. Efremova, N. Didenko, D. Rudenko, and D. Skripnuk, "Disparities in rural development of the russian arctic zone regions", Paper presented at the *Research for Rural Development*, 2017, vol. 2, pp. 189-194. doi:10.22616/rtd.23.2017.067
- [3] Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985. 345 с.
- [4] Y. Klochkov, A. Gazizulina, N. Golovin, A. Glushkova, and S. Zh, "Information model-based forecasting of technological process state," *2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems: Trends and Future Directions, ICTUS 2017*, 2018, pp. 709-712. doi:10.1109/ICTUS.2017.8286099
- [5] Борисов Е.Г., Евдокимов В.И. Высоточное оружие и борьба с ним. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 496 с.
- [6] Юхно П.М. Преднамеренные оптические помехи высокоточному оружию. Издательство: Радиотехника, 2017. 640 с. ISBN 978-5-93108-149-6.
- [7] Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный приём сигналов. М.: Сов.радио, 1976. 704 с.
- [8] Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи. М.: Сов.радио, 1971, 416 с.
- [9] Лютин В.И. Технология комплексирования тепловизионных и радиометрических изображений в задачах распознавания объектов// Радиотехника. Научно-технические технологии. 2003. №11-12, с.3-6.
- [10] Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. 11-е изд. стер. М.: КНОРУС, 2010. 664 с.
- [11] Лютин В.И. Алгоритм автоматического слежения при наблюдении объектов в различных физических полях // Радиосистемы, выпуск 57, «Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн», 2001. №10, с.33-36.
- Lutin V.I., Mager V.E., Desyatirnikova E.N. The Processing of Signals from Sensors to Observe Objects in Various Physical Fields, in Proc. 2018 IEEE ElConRus, St. Petersburg and Moscow, Russia, Jan.29 – Febr.1, 2018, pp.1132-1137.