

Помехозащищённая радиометрическая система автоматического слежения

В. И. Лютин

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

Е. Н. Десятирикова

Воронежский государственный технический
университет
Воронеж, Россия
science2000@ya.ru

В. Е. Магер

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Россия
mv@qmd.spbstu.ru

Аннотация. Проведено исследование помехозащищённой системы автоматического слежения за одиночными транспортными средствами по их излучению в миллиметровом диапазоне длин волн, синтезированной с применением статистически оптимального алгоритма совместной фильтрации непрерывных и дискретных марковских последовательностей.

Ключевые слова: статистически оптимальный алгоритм; помехозащищённая система автоматического слежения; апостериорная вероятность

I. ВВЕДЕНИЕ

Скрытым способом слежения за перемещением транспортных средств является применение радиометрии миллиметрового диапазона длин волн. Устойчивым признаком отличия транспортного средства от подстилающей земной поверхности является радиояркостный температурный контраст, обусловленный различием излучений транспортного средства, как металлического объекта, и фона в миллиметровом диапазоне длин волн. Как правило, металлические объекты имеют отрицательный температурный контраст за счёт отражения излучения холодного неба. При этом для повышения скрытности объектов применяют специальные излучатели, которые в лучшем случае выравнивают температурный контраст, но чаще инвертируют его. В связи с этим актуальной является задача синтеза устройства слежения, как по отрицательному, так и по положительному температурному контрасту объектов в миллиметровом диапазоне длин волн.

Целью настоящей работы является решение задачи синтеза статистически оптимального алгоритма совместного различения дискретного параметра и оценивания непрерывных параметров сигнала и определение структуры оптимального устройства слежения за объектом по излучению в миллиметровом диапазоне длин волн при неизвестном температурном контрасте.

II. СИНТЕЗ АЛГОРИТМА

Проведение вероятностно-статистического синтеза вызвано неоптимальностью эвристических решений при определении принципов построения радиометрических систем слежения, а также отсутствием сведений о принципах построения радиометрических систем совместного обнаружения объекта и слежения за его угловым положением.

Результатом наблюдения объекта является изображение, представляющееся, как правило, двумерным массивом отсчётов и зависящее от дискретного случайного параметра, определяющего вид наблюдаемого объекта в данном физическом поле, и от двух непрерывных случайных параметров, определяющих угловые отклонения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях линии визирования объекта и оси системы наблюдения. Характер смены вида объекта, обусловленный поворотами и преднамеренными видоизменениями наблюдаемого объекта, предполагается описывать дискретной случайной последовательностью, причём сами виды объекта и их число заранее заданы, а характер изменения непрерывных параметров предполагается описывать гауссовской марковской последовательностью.

Алгоритм совместной фильтрации дискретной и непрерывной марковских последовательностей известен [1,2], заключается в определении апостериорной вероятности $P_{ps}(\mu_k)$ дискретного параметра μ_k , оценке $\hat{\lambda}_k$ непрерывного параметра λ_k и вычислении дисперсии оценки d_k на k -ом шаге наблюдения. Алгоритм записывается в виде [3]

$$P_{ps}(\mu_k) = C_k \cdot \exp\left\{\Pi(\lambda_k^0, \mu_k)\right\} \cdot \sqrt{\chi_k(\mu_k) \cdot D^{-1}} \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \cdot \chi_k(\mu_k) \cdot \left[\Pi'_\lambda(\lambda_k^0, \mu_k)\right]^2\right\}, \quad (1)$$
$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^0 + \sum_{\mu=1}^M P_{ps}(\mu_k) \cdot \chi_k(\mu_k) \cdot \Pi'_\lambda(\lambda_k^0, \mu_k)$$

$$d_k = C_k \cdot \sum_{\mu=1}^M \frac{\exp\{\Pi(\lambda_k^0, \mu_k)\}}{\sqrt{\chi_k(\mu_k) \cdot D^{-1}}} \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} \cdot \chi_k(\mu_k) \cdot [\Pi'_\lambda(\lambda_k^0, \mu_k)]^2\right\} \times \\ \times \left[\chi_k(\mu_k) \cdot \Pi'_\lambda(\lambda_k^0, \mu_k) + \lambda_k^0 - \hat{\lambda}_k \right]^2 + \chi_k(\mu_k),$$

где C_k – постоянная нормировки; $D = d_0 + R_\lambda^2 \cdot d_{k-1}$ – дисперсия экстраполированной оценки непрерывного параметра; $\Pi'_\lambda(\bullet)$ – первая производная от логарифма одношаговой функции правдоподобия (ЛОФП) по параметру, представляющая собой дискриминационную характеристику системы слежения; $\chi_k(\mu_k) = D \cdot [1 - D \cdot \bar{\Pi}_{\lambda\lambda}''(\lambda_k^0, \mu_k)]^{-1}$ – кумулянт экстраполированной плотности вероятности непрерывного параметра; $\bar{\Pi}_{\lambda\lambda}''(\lambda_k^0, \mu_k) = -q_{\mu k} \cdot R_{\lambda\lambda}''(0, \mu_k)$ – сигнальная часть второй производной ЛОФП [4]; $q_{\mu k} = (2\sigma_n^2)^{-1} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [s_{ijk}^*(\lambda_k, \mu_k)]^2$ – отношение сигнал/шум, определяемое как отношение энергии наблюдения к спектральной плотности шума [5]; $R_{\lambda\lambda}''(0, \mu_k)$, – вторая производная от нормированной автокорреляционной функции наблюдения при точном совмещении линии визирования объекта с точкой прицеливания.

Значения величин $\chi_k(\mu_k)$ при высоких отношениях сигнал-шум стремятся к нулю, а при отношениях сигнал/шум близких к нулю – не превышают величины D . Для приведения алгоритмов к упрощённому виду целесообразно выбрать величину $\chi_k(\mu_k)$ одинаковой для всех значений μ и соответствующей номинальному режиму наблюдения. Выбранное значение, обеспечивающее сходимость алгоритма вычисления оценки непрерывного параметра, обозначим κ_k и назовём шагом подстройки.

В этих условиях алгоритм оценивания непрерывного параметра (1) принимает вид [6]

$$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^0 + \kappa_k \cdot \sum_{\mu_k=1}^M P_{ps}(\mu_k) \cdot \Pi'_\lambda(\lambda_k^0, \mu_k) \quad (2)$$

Апостериорные вероятности дискретного параметра равны [4]

$$w_{ps}(\mu_k) \cong \exp\{\Pi_k(\lambda_k^0, \mu_k)\} \cdot \left[\sum_{\mu=1}^M \exp\{\Pi_k(\lambda_k^0, \mu_k)\} \right]^{-1}$$

Как видно из асимптотически оптимального алгоритма (2) оценка непрерывного параметра, определяющего положение объекта, формируется как весовая сумма сигналов рассогласования, определяемых первыми производными от ЛОФП. При этом в качестве весов выступают апостериорные вероятности обнаружения объектов, что позволяет считать синтезированный алгоритм помехозащищённым, так как при нулевой вероятности обнаружения объекта оценка непрерывного параметра равна её экстраполированному значению

$\hat{\lambda}_k = \lambda_k^0$. Это соответствует автоматическому размыканию контура самонаведения. Алгоритм (2) допускает обобщение на большее число дискретных и непрерывных параметров. В синтезированном алгоритме и соответствующей ему структурной схеме используется обратная связь по решению.

III. СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ОПТИМАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА СЛЕЖЕНИЯ

На рис. 1 изображена обобщённая структурная схема системы автоматического слежения. Она содержит блок вычисления апостериорной вероятности (БАВ), в котором вычисляется апостериорная вероятность дискретного параметра, блок точности (БТ), в котором вычисляются кумулянты апостериорного распределения непрерывного параметра для каждого из значений дискретного параметра, дискриминатор (Д), в котором определяются производные от ЛОФП, блок решений (БР), выдающий значение дискретного параметра для принятого наблюдения по правилу выбора параметра, для которого апостериорная вероятность максимальна, экстраполятор (Э), в котором вычисляется экстраполированная оценка непрерывного параметра, два умножителя и сумматор.

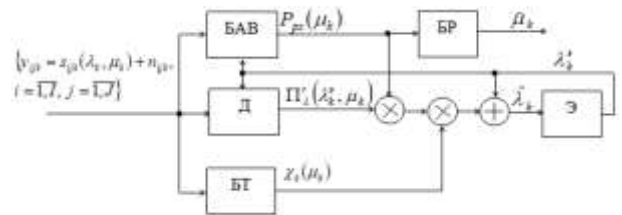


Рис. 1. Обобщённая схема системы слежения

Многоэлементное наблюдение, представляющее аддитивную смесь сигнала и шума $\{y_{ijk} = s_{ijk}(\lambda_k, \mu_k) + n_{ijk}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$, поступает на блоки БАВ, Д, БТ. В дискриминаторе Д вычисляется производная $\Pi'_\lambda(\lambda_k^0, \mu_k)$, являющаяся по существу сигналом ошибки в замкнутой системе слежения. Вычисленная в БАВ апостериорная вероятность $P_{ps}(\mu_k)$ в умножителе перемножается с сигналом ошибки, далее произведение умножается на кумулянт апостериорного распределения $\chi_k(\mu_k)$. Полученное произведение складывается с экстраполированной в экстраполяторе Э оценкой непрерывного параметра λ_k^0 . На выходе сумматора образуется текущее значение оценки непрерывного параметра $\hat{\lambda}_k$. Экстраполированная оценка подаётся в БАВ и Д, тем самым образуя замкнутую систему слежения.

Замкнутая система размыкается, если апостериорная вероятность дискретного параметра равна нулю.

Рассмотрим синтез структурной схемы системы автоматического слежения радиометрическим датчиком. Непрерывные параметры – угловые положения объекта относительно линии визирования радиометрической

системы наблюдения. Дискретный параметр – множество значений радиояркой температуры, состоящее, по меньшей мере, из трёх значений: температуры объекта, температуры фона, температуры преднамеренного шумового излучения от объекта. Результат наблюдения представляет собой аддитивную смесь сигнала, зависящего от радиояркой температуры, и некоррелированного нормального белого шума с дисперсией σ_n^2

$$y_k = s_k(\lambda_k, \mu_k) + n_k$$

Вычисление производной от ЛОФП заменяется конечной разностью по правилу [2]

$$P'(\lambda_k^3, \mu_k) \cong \sigma_n^{-2} \cdot (s_k(\lambda_k^3 + \Delta\lambda, \mu_k) - s_k(\lambda_k^3 - \Delta\lambda, \mu_k)) / (2\Delta\lambda)$$

Причём по этому правилу вычисляются две производные по смещению линии визирования в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Блок апостериорных дисперсий целесообразно исключить, используя вместо кумулянта постоянный коэффициент усиления.

Технически для вычисления производных от ЛОФП потребуется установка 4-х приёмников излучения с отклонёнными по углу на $\pm\Delta\lambda_1$ по вертикали и на $\pm\Delta\lambda_2$ по горизонтали линий максимального приёма от оси системы наблюдения, т. н. схема Пэйджа [4].

Структурная схема помехозащищённой системы слежения изображена на рисунке 2 [6]. Она содержит 4 приёмника излучения с отклонёнными по углу на $\pm\Delta\lambda_1$ по вертикали и на $\pm\Delta\lambda_2$ по горизонтали линий максимального приёма от оси системы наблюдения.

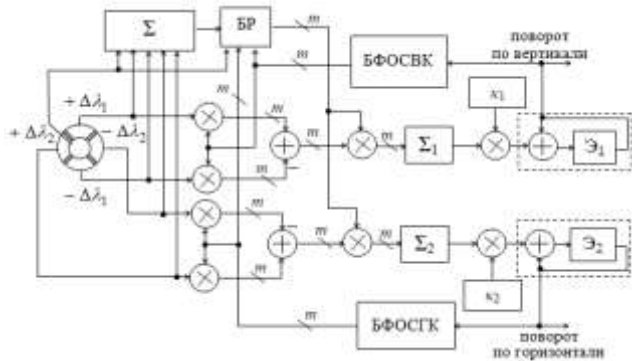


Рис. 2. Структурная схема помехозащищённой системы слежения

Сигналы от приёмников подаются на m -размерные умножители по числу m различаемых сигналов и на сумматор Σ . Сигнал от пятого, центрального, приёмника и сумма сигналов от 4-х разнесённых приёмников подаются на блок различения БР, в котором вычисляются m вероятностей различаемых значений дискретного параметра. В блоках формирования опорных сигналов вертикального и горизонтального каналов (БФОСВК и БФОСГК) вычисляются опорные сигналы для экстраполированных значений угловых отклонений по вертикали и горизонтали. В m -размерных умножителях и сумматорах вычисляются m сигналов рассогласования для

каждого из различаемых значений дискретного параметра, которые умножаются на соответствующие вероятности значений дискретного параметра.

Полученные произведения суммируются в сумматорах Σ_1 вертикального канала управления и Σ_2 горизонтального канала управления, суммы умножаются на коэффициенты усиления κ_1 и κ_2 соответственно, и далее суммируются с экстраполированными оценками параметров. Экстраполированные с соответствующими сумматорами (на рисунке обведены пунктиром) представляют собой рекурсивные фильтры первого порядка.

Помехозащищённость системы слежения обусловлена выбором в качестве одного из различаемых значений дискретного параметра температуры помехового излучения генераторов шумовых помех, устанавливаемых на объекте слежения. При принятии решения о наличии помехового излучения дискриминационная характеристика автоматически изменяет наклон на противоположный.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Стационарное значение относительной угловой дисперсии $\delta^2 = d/\sigma_0^2$, где d – угловая дисперсия промаха, необходимое для анализа точности наведения, определяется из рекуррентного уравнения для апостериорной дисперсии оценивания непрерывного параметра при $k \rightarrow \infty$, что соответствует установлению режима захвата объекта на сопровождение. Рекуррентное уравнение имеет вид

$$\delta_k^2 = 1 + P_{обн} \cdot \left\{ \left(\left[1 + R_\lambda^2 \cdot (\delta_{k-1}^2 - 1) \right]^{-1} + q \right)^{-1} - 1 \right\}$$

где q – параметр обнаружения объекта по радиометрическому изображению; $P_{обн}$ – вероятность обнаружения цели радиометрическим датчиком; $R_\lambda = 0,9 \dots 0,99$ – коэффициент корреляции случайного процесса, описывающего угловые отклонения линии визирования цели.

График установления стационарного значения апостериорной дисперсии при коэффициенте корреляции случайного процесса, описывающего угловые отклонения линии визирования цели $R_\lambda = 0,999$, вероятности ложной тревоги $F = 0,01$ для трёх значений параметра обнаружения цели приведён на рис. 3.

На практике стационарное значение устанавливается через 5...10 шагов наблюдения.

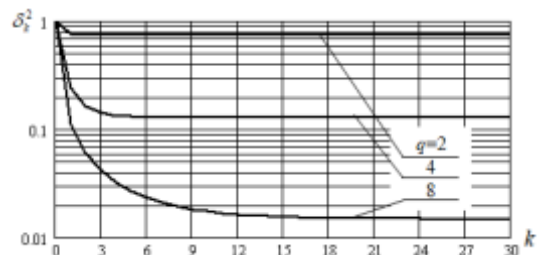


Рис. 3. График установления относительной апостериорной дисперсии

Аналитическое выражение для вероятности обнаружения имеет вид

$$P_{Обн} = 1/2 - \Phi_0(\Phi_0^{-1}(1/2 - F) - q)$$

где $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-u^2/2} du$ – нормированная функция ошибок [7]; $\Phi_0^{-1}(\bullet)$ – обратная нормированная функция ошибок; F – вероятность ложной тревоги; q – параметр обнаружения цели.

При $q \rightarrow 0$ вероятность обнаружения объекта стремится к вероятности ложной тревоги, а относительная угловая дисперсия промаха δ_k^2 стремится к единице, что соответствует отсутствию слежения.

Параметр обнаружения для случая наблюдения однородного объекта на однородном фоне определяется выражением [8]

$$q_{PM} = (T_o \cdot k + T_\phi \cdot (1 - k) - T_\phi) / \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_n^2},$$

где T_o, T_ϕ – яркостные температуры объекта и фона в миллиметровом диапазоне; $\sigma_T = \sigma_\phi = \sigma_o$ – СКО яркостной температуры наблюдаемых поверхностей; σ_n – температурная чувствительность радиометрического датчика; $k = S_o/S_3$ – коэффициент заполнения площади мгновенного поля зрения радиометрического датчика S_3 площадью объекта S_o [8].

Среднеквадратическое отклонение относительно центра наблюдаемого объекта определяется выражением $\sigma_d = \sigma_o \cdot D_0 \cdot \sqrt{\delta^2}$, где D_0 – дальность наблюдения; δ^2 – стационарное значение относительной угловой дисперсии; σ_o^2 – априорная угловая дисперсия наблюдения без слежения при дальности D_0 .

Вероятность потери объекта системой слежения равна

$$P_{Пот} = 1 - \left[\Phi_0\left(\frac{a_{II}/2}{\sigma_d}\right) - \Phi_0\left(\frac{-a_{II}/2}{\sigma_d}\right) \right] \cdot \left[\Phi_0\left(\frac{b_{II}/2}{\sigma_d}\right) - \Phi_0\left(\frac{-b_{II}/2}{\sigma_d}\right) \right]$$

где a, b – длина и ширина видимой проекции объекта.

Результаты расчёта точности слежения представлены на рис. 4 в виде графиков зависимости вероятности потери объекта от параметров помеховых воздействий (коэффициента пропускания радиоизлучения миллиметрового диапазона длин волн τ , мощности генератора шумовых помех $P_{ГШ}$ [5]).

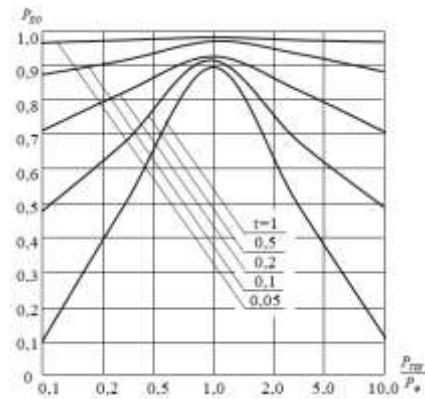


Рис. 4. Зависимости вероятности потери объекта от точности имитации фона с применением генераторов шума при различных значениях коэффициента пропускания излучения

Таким образом, в результате синтеза получена структурная схема помехозащищённой системы автоматического слежения. Установлено, что оптимальным способом слежения является весовое суммирование сигналов управления системой автоматического слежения, вырабатываемых по результатам наблюдения объекта при различных значениях дискретного параметра. Веса определяются вероятностями различения изображений объекта. Исследование синтезированной системы показало, что наилучший эффект достигается при совместном снижении коэффициента пропускания среды распространения излучения, и выравнивании температурного контраста объекта с фоном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лютин В.И. Автоматическое наведение при наблюдении объектов в различных физических полях. В сб.: «Радиотехника» №10, 2001.
- [2] Лютин В.И. Алгоритмы совместного различения и синхронизации при приёме сигналов дискретной информации. В сб.: Труды учебных институтов связи. Обработка информации в системах связи. Изд. ЛЭИС. 1981 г., с. 24...30.
- [3] Lutin V. I., Desyatirikova E. N., Myshovskaya L.P., Chernenkaya L.V. "The Technology for Integrating Observation Results with Sensors of Various Physical Fields with Automatic Guidance of Unmanned Aerial Vehicles at a Given Point", In Proc. of 2020 23rd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2020, 2020, pp.105–108, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198787
- [4] Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи. М.: «Сов. радио», 1971.
- [5] Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный приём сигналов. М.: Сов. радио, 1975. 704 с.
- [6] Лютин В.И., Артюх С.Н. Синтез помехозащищённой системы автоматического слежения по излучению объекта в миллиметровом диапазоне. В сб.: Вопросы оборонной техники, №1, 2010 г.
- [7] Lutin V. I., Desyatirikova E. N., Kashkarov V. M. "Guidance accuracy of aerial vehicles in accordance with edge earth surface", In Proc. of 2020 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2020, 2020, pp. 381–384, doi:10.1109/ITQMIS51053.2020.9322848
- [8] Скольник М.И. Справочник по радиолокации Т4. М.: Сов. Радио, 1978 г. 376 с.