

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.513.675

В. И. Гаркушенко

ОЦЕНИВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕЛИ
С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ*Ключевые слова: оценивание и прогнозирование углового положения цели, дискретный наблюдатель.*

Рассматривается задача оценивания и прогнозирования углового положения цели в следящей системе с оптическим прибором, установленного в карданном подвесе на подвижном носителе. Предполагается, что цель движется прямолинейно с постоянной скоростью в земной системе координат. Доступными для измерения являются угол азимута и угол места в системе координат носителя, который также движется прямолинейно с постоянной скоростью или неподвижен. Для решения данной задачи известны два подхода. В первом подходе используется модель движения цели в декартовой или полярной системе координат, которая применяется в различных модификациях алгоритмов фильтрации по Калману. Несмотря на высокую точность оценивания, здесь точность прогнозирования углового положения цели существенно зависит от заданной виртуальной дальности. Во втором подходе используются модели в угловых координатах, с помощью которых удается прогнозировать угловое положение цели на длительные интервалы времени. Недостатком данных алгоритмов по сравнению с первым подходом является повышенная чувствительность к помехам измерений. Поэтому в наших предыдущих работах были разработаны непрерывные модели движения цели с пониженной чувствительностью к помехам измерений. Однако использование данных моделей при дискретных измерениях требует применение приближенных методов интегрирования, что снижает точность прогнозирования. В связи с этим в настоящей статье предлагается способ построения точной дискретной модели углового движения цели, которая используется в наблюдателе для оценивания и прогнозирования ее углового положения при наличии шумов измерений. Особенностью полученной модели является ее линейность относительно вспомогательных нелинейных функций от угла азимута и угла места, что позволяет использовать алгоритмы фильтрации по Калману. При отсутствии статистических данных о помехах измерений, но известных их граничных значений, получены гарантированные оценки угла азимута и угла места для дискретного наблюдателя. Эффективность предложенного алгоритма подтверждается результатами моделирования.

V. I. Garkushenko

ESTIMATING AND FORECASTING TRACK ANGLES USING A DISCRETE OBSERVER

Keywords: estimating and forecasting track angles, discrete observer.

This paper considers the problem of estimating and forecasting track angles in a tracking system equipped with optics installed in a cardan suspension on a mobile carrier. The target is supposed to move rectilinearly at a constant speed within the earth-fixed axis system. Measurable are the azimuth angle and the elevation within the system of coordinates of the carrier that moves rectilinearly at a constant speed, too, or is fixed. Two approaches to solving this problem are known. In the first approach, the model is used that describes target movement in Cartesian or polar coordinates, which is used in various modifications of Kalman filtration algorithms. Despite the high accuracy of estimation, here the precision of forecasting track angles depends largely on the predefined virtual range. In the second approach, the models are applied in angular coordinates, using which track angles can be forecasted for longer time intervals. The disadvantage of those algorithms, as compared to the first approach, is their increased sensitivity towards measurement errors. Therefore, we developed in our previous studies continuous target movement models having the reduced sensitivity towards measurement errors. However, using these models in discrete measurements requires applying approximate integrating methods, which decreases the precision of forecasting. For this reason, this paper proposes a method of building a precise discrete model of track angles, which is used in observer to estimate and forecast track angles thereof in presence of measurement noises. A specific feature of the model obtained is its linearity as related to the non-linear helper functions of azimuth and elevation, which allows us to use Kalman filtration algorithms. In the absence of statistics regarding measurement errors, but at their limit values being known, the guaranteed estimates of azimuth and elevation have been obtained for a discrete observer. The efficiency of the algorithm proposed is proven by the simulating results.

Введение

Задача оценивания положения и скорости движения излучающей цели в земной системе координат по последовательности угловых измерений оптико-электронной системой (или системой с пеленгатором), установленной на подвижном носителе, является основной задачей для систем слежения.

Особенностью данной задачи является нелинейность функции угловых наблюдений для декартовых

координат или нелинейность динамики системы для полярных координат. При этом точность оценивания координат и скоростей движения цели без измерения дальности здесь существенно зависит от траектории движения носителя, что связано с проблемой наблюдаемости цели [1-3].

При неподвижном носителе условие наблюдаемости цели не выполняется и определить координаты цели без измерения дальности невозможно. В этом случае актуальной является задача оценивания

углового положения цели при наличии шумов измерений, и предсказания ее углового положения на изображении оптического приемника.

Решение данной задачи для случая прямолинейного движения цели рассмотрено в работах [4,5], в которых приводятся точные математические модели определения углового положения цели по дискретным измерениям углов азимута и места. Однако полученные алгоритмы существенно зависят от уровня шумов измерений.

В работах [6,7] для случая прямолинейного и равномерного движения цели предложены алгоритмы оценивания и предсказания с использованием непрерывных нелинейных моделей углового движения цели, работоспособные в условиях высокого уровня шумов измерений. В работе [8] рассмотрен алгоритм с приближенной дискретной моделью углового движения цели. Недостатком данных алгоритмов является необходимость вычисления производных от углов [6] и использования приближенных разностных схем [7,8], что снижает точность оценивания и прогнозирования.

В связи с этим в данной работе предлагается точная дискретная модель углового движения цели, движущейся прямолинейно с постоянной скоростью. Полученная модель используется в наблюдателе для оценивания и прогнозирования углового положения цели при наличии шумов измерений.

Модели углового движения цели относительно носителя

Будем полагать, что носитель с установленным на нем оптическим прибором движется прямолинейно и равномерно в земной системе координат. При этом цель движется прямолинейно с постоянной скоростью V в системе координат (СК) носителя $S_n(x, y, z)$, где ось z направлена вертикально вверх. С измерительным прибором, установленным на носителе в карданном подвесе, связана СК $S_T(x_T, y_T, z_T)$, где ось x_T совпадает с оптической осью прибора, которая при наведении оптической оси прибора на цель в момент времени t_0 повернута на угол азимута α_{T0} и угол места θ_{T0} в СК носителя. Вводится также вспомогательная СК $S_n(x_n, y_n, z)$, представленная на рис. 1, которая повернута относительно СК носителя на угол $\alpha_T^0 = \alpha_{T0} - \pi/2$.

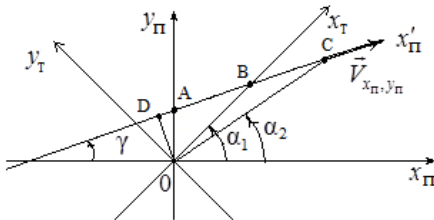


Рис. 1– Проекция линейной траектории объекта на плоскость $S_n(x_n, y_n, 0)$

На рис. 1 показана проекция $V_{x_n, y_n} = V \cos \beta$ вектора скорости \vec{V} и линейной траектории объекта на

плоскость $S_n(x_n, y_n, 0)$, где β – угол наклона траектории.

В момент времени t_0 проекция оптической оси прибора x_T проходит через точку А, т.е. совпадает с направлением оси y_n ; γ – угол проекции траектории с осью x_n ; OD – кратчайшее расстояние до проекции траектории.

Измерение углового положения цели проводится в дискретные моменты времени $t_i = iT_0$, $i = 1, 2, 3, \dots$ с периодом дискретности T_0 . На рис. 1 показано, что моменту времени t_1 соответствует угол $\alpha_1 = \alpha_{T1} - \alpha_T^0$ и пройденное расстояние $AB = VT_0 \cos \beta$; моменту времени t_2 соответствует угол $\alpha_2 = \alpha_{T2} - \alpha_T^0$ и пройденное расстояние $AC = 2AB$.

Для момента времени t_i справедливо выражение:

$$\operatorname{tg}(\alpha_i - \gamma) = \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma + ia_i}, \quad (1)$$

где постоянный параметр $a_i = a$ определяется по формуле:

$$a_i = \frac{\cos \alpha_i}{i \sin(\alpha_i - \gamma) \cos \gamma}, \quad (2)$$

где $a_1 = AB / OD$.

Из выражения (1) следует уравнение относительно неизвестных констант $\operatorname{tg} \gamma$ и a :

$$\operatorname{tg} \gamma + ia = \frac{1 + \operatorname{tg} \alpha_i \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \alpha_i - \operatorname{tg} \gamma}. \quad (3)$$

Для момента времени t_{i+1} получим второе уравнение:

$$\operatorname{tg} \gamma + (i+1)a = \frac{1 + \operatorname{tg} \alpha_{i+1} \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \alpha_{i+1} - \operatorname{tg} \gamma}. \quad (4)$$

Из уравнений (3), (4) после исключения неизвестной константы a получим уравнение:

$$(i+1)\operatorname{tg} \alpha_{i+1} = i \operatorname{tg} \alpha_i + b_i, \quad (5)$$

где $b_i = \operatorname{tg} \gamma$.

Вводя вектора состояния $X_i = [i \operatorname{tg} \alpha_i \ b_i]^T$ для уравнения (5), получим модель угла азимута:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= AX_i, \quad i = 1, 2, \dots, \\ Y_i &= c^T X_i, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\alpha_{Ti} = \operatorname{arctg}(Y_i / i) + \alpha_T^0 \pm \pi,$$

где $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $c^T = [1 \ 0]$. При этом параметр a_i определяется по формуле

$$a_i = \frac{1 + X_{2i}^2}{Y_i - i X_{2i}}. \quad (7)$$

Для угла места θ_T в СК $S_n(x_n, y_n, z)$ в моменты времени t_i справедливо выражение:

$$z_i = \frac{OD \operatorname{tg} \theta_{Ti}}{\sin(\alpha_i - \gamma)}, \quad (8)$$

где z_i – значение высоты цели.

Используем также вспомогательную СК $S'_n(x'_n, 0, z)$, представленную на рис. 2, которая расположена в вертикальной плоскости движения цели.

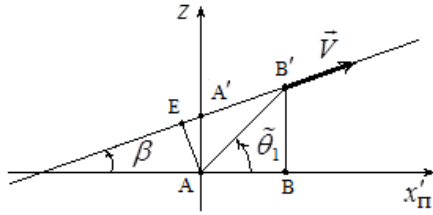


Рис. 2 – Проекция линейной траектории объекта на плоскость $S'_n(x'_n, 0, z)$

На рис. 2 показано, что моменту времени t_1 соответствует угол $\tilde{\theta}_1$, высота $z_1 = BB'$ и пройденное расстояние $A'B' = VT_0$. Для момента времени t_i справедливо выражение:

$$z_i = tg \tilde{\theta}_i \frac{OD \cos \alpha_i}{\sin(\alpha_i - \gamma) \cos \gamma}. \quad (9)$$

Тогда из (8) и (9) получим формулу:

$$tg \theta_{ti} = \frac{\cos \alpha_i}{\cos \gamma} tg \tilde{\theta}_i. \quad (10)$$

В плоскости $S'_n(x'_n, 0, z)$ для углов $\tilde{\theta}_i, \beta$ справедливы выражения аналогичные (1-7) при соответствующей замене обозначений.

Для угла $\tilde{\theta}_i$ и $\tilde{b}_i = tg \beta$ справедливо уравнение

$$(i+1) \frac{tg \tilde{\theta}_{i+1}}{\cos \gamma} = i \frac{tg \tilde{\theta}_i}{\cos \gamma} + \frac{\tilde{b}_i}{\cos \gamma}. \quad (11)$$

Тогда с учетом (10) и вектора состояния

$$\tilde{X}_i = \begin{bmatrix} i \frac{tg \tilde{\theta}_i}{\cos \gamma} & \frac{\tilde{b}_i}{\cos \gamma} \end{bmatrix}^T \text{ для уравнения (11) получим}$$

модель угла места:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{i+1} &= A\tilde{X}_i, \quad i=1,2,\dots, \\ \tilde{Y}_i &= c^T \tilde{X}_i, \\ \theta_{ti} &= arctg \left(i^{-1} \tilde{Y}_i \cos(\alpha_{ti} - \alpha_t^0) \right) \pm \pi. \end{aligned} \quad (12)$$

При этом параметр $\tilde{a}_i = A'B' / AE$ определяется по формуле

$$\tilde{a}_i = \frac{1 + \cos^2 \gamma \tilde{X}_{2i}^2}{\cos \gamma (\tilde{Y}_i - i \tilde{X}_{2i})}.$$

Таким образом, в отличие от известных моделей 6-го порядка в декартовых координатах [3], полученная дискретная модель (6), (12) углового движения цели имеет 4-й порядок, и в отличие от работ [4,5] записана в виде удобном для использования алгоритмов фильтрации.

Оценивание и прогнозирование углового положения цели

Ставится задача оценивания углового положения цели α_{ti}, θ_{ti} в СК носителя по результатам измерений углов

$$\alpha_{ti}^n = \alpha_{ti} + v_i, \quad \theta_{ti}^n = \theta_{ti} + \tilde{v}_i, \quad (13)$$

где v_i, \tilde{v}_i – помехи измерений, удовлетворяющие неравенствам:

$$|v_i| \leq q_v, \quad |\tilde{v}_i| \leq \tilde{q}_v. \quad (14)$$

Для построения оценки угла азимута $\hat{\alpha}_{ti}$ используется наблюдатель вида:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{i+1} &= A\hat{X}_i + l(Y_i^n - c^T \hat{X}_i) \varphi_i, \quad i=1,2,\dots, \\ Y_i^n &= i tg \alpha_i^n, \quad \alpha_i^n = \alpha_{ti}^n - \alpha_t^0, \\ \hat{\alpha}_{ti} &= arctg \left(i^{-1} c^T \hat{X}_i \right) + \alpha_t^0 \pm \pi, \end{aligned} \quad (15)$$

с начальным условием $\hat{X}_1 = [tg \alpha_1^n \ 0]^T$, где l – вектор настраиваемых коэффициентов, φ_i – индикаторная функция, равная 0, если в момент времени t_i цель пропадает на изображении оптического приемника, и равна 1 в противном случае.

Для построения оценки угла места $\hat{\theta}_{ti}$ используется наблюдатель вида:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{i+1} &= A\hat{X}_i + \tilde{l}(\tilde{Y}_i^n - c^T \hat{X}_i) \varphi_i, \quad i=1,2,\dots, \\ \tilde{Y}_i^n &= \frac{i tg \theta_{ti}^n}{\cos \alpha_i^n}, \\ \hat{\theta}_{ti} &= arctg \left(i^{-1} c^T \hat{X}_i \cos \hat{\alpha}_i \right) \pm \pi, \\ \hat{\alpha}_i &= \hat{\alpha}_{ti} - \alpha_t^0, \end{aligned} \quad (16)$$

с начальным условием $\hat{X}_1 = [tg \theta_{t1}^n (\cos \alpha_1^n)^{-1} \ 0]^T$, где \tilde{l} – вектор настраиваемых коэффициентов.

Из уравнений (6), (15) с учетом (13) следует уравнение в отклонениях $\Delta X_i = \hat{X}_i - X_i$:

$$\Delta X_{i+1} = F \Delta X_i + l w_i, \quad i=1,2,\dots, \quad (17)$$

где $F = A - lc^T$; $w_i = Y_i^n - Y_i$ – приведенная помеха измерения определяется по формуле

$$w_i = i(tg(\alpha_i + v_i) - tg \alpha_i). \quad (18)$$

Аналогично уравнению (17) записывается уравнение в отклонениях для угла места. При этом приведенная помеха измерения определяется по формуле

$$\tilde{w}_i = i \left(\frac{tg(\theta_{ti} + \tilde{v}_i)}{\cos(\alpha_i + v_i)} - \frac{tg \theta_{ti}}{\cos \alpha_i} \right). \quad (19)$$

В процессе слежения за целью отношение полезного сигнала к помехе измерения при $\alpha_i \ll v_i, \theta_{ti} \ll \tilde{v}_i, \sin v_i \approx v_i, \sin \tilde{v}_i \approx \tilde{v}_i$ оценивается с помощью выражений:

$$\begin{aligned} \frac{i tg \alpha_i}{w_i} &\approx \frac{0,5 \sin(2\alpha_{t0} - 2\alpha_{ti})}{v_i}, \\ \frac{i tg \theta_{ti} / \cos \alpha_i}{\tilde{w}_i} &\approx \frac{0,5 \sin 2\theta_{ti}}{\tilde{v}_i}. \end{aligned}$$

Согласно (14) для приведенных помех измерений (18), (19) справедливы верхние оценки:

$$|w_i| \leq q_{w_i} = i \left| \left| tg(\alpha_i + q_v \text{sign}(tg \alpha_i)) \right| - |tg \alpha_i| \right|,$$

$$|\tilde{w}_i| \leq q_{\tilde{w}_i} = i \left| \frac{\operatorname{tg}(\theta_{ti} + \tilde{q}_v \operatorname{sign}(\operatorname{tg} \theta_{ti}))}{|\cos(\alpha_i + q_v s_i)|} - \frac{\operatorname{tg} \theta_{ti}}{|\cos \alpha_i|} \right|,$$

где $s_i = \operatorname{sign}(\sin \alpha_i) \operatorname{sign}(\cos \alpha_i)$.

Из уравнения (17) найдем оценку для отклонения $c^T \Delta X_i = i(\operatorname{tg} \hat{\alpha}_i - \operatorname{tg} \alpha_i)$, которая имеет вид:

$$|c^T \Delta X_i| \leq J_i, \quad i = 2, 3, \dots,$$

где $\Delta X_1 = [w_1 \quad -\operatorname{tg} \gamma]^T$,

$$J_i = |c^T F^{i-1} \Delta X_1| + \sum_{j=1}^{i-1} |c^T F^{i-j-1} l| q_{w_j}.$$

Тогда верхняя $\hat{\alpha}_{ti}^+$ и нижняя $\hat{\alpha}_{ti}^-$ граница для оценки $\hat{\alpha}_{ti}$ при $i = 2, 3, \dots$ определяются с помощью выражений:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_{ti}^+ &= \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg}(\alpha_{ti} - \alpha_t^0) + i^{-1} J_i \right) + \alpha_t^0 \pm \pi, \\ \hat{\alpha}_{ti}^- &= \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg}(\alpha_{ti} - \alpha_t^0) - i^{-1} J_i \right) + \alpha_t^0 \pm \pi. \end{aligned} \quad (20)$$

Аналогично строятся верхняя $\hat{\theta}_i^+$ и нижняя $\hat{\theta}_i^-$ граница для оценки $\hat{\theta}_i$:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_i^+ &= \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \theta_i + i^{-1} \tilde{J}_i \cos \alpha_i \right) \pm \pi, \\ \hat{\theta}_i^- &= \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \theta_i - i^{-1} \tilde{J}_i \cos \alpha_i \right) \pm \pi, \end{aligned} \quad (21)$$

где $\tilde{J}_i = |c^T F^{i-1} \Delta \tilde{X}_1| + \sum_{j=2}^{i-2} |c^T F^{i-j-1} l| q_{\tilde{w}_j}$,

$$\Delta \tilde{X}_1 = \left[\tilde{w}_1 \quad -\cos \beta (\cos \gamma)^{-1} \right]^T.$$

Поскольку функции J_i , \tilde{J}_i содержат первое неопределенное слагаемое, то использование оценок возможно только при $t_i > t_n$, где за время t_n переходного процесса наблюдателей (15), (16) первые слагаемые затухают.

В случае, когда в момент времени $t_i > \mu t_n$, где μ – коэффициент запаса по времени оценивания углов, цель пропадает на изображении оптического приемника, индикаторная функция $\varphi_i = 0$ и с выходов наблюдателей формируются прогнозные значения углов для момента времени t_{i+k} по формулам:

$$\hat{\alpha}_{ti+k} = \operatorname{arctg} \left((i+k)^{-1} c_k^T \hat{X}_i \right) + \alpha_t^0 \pm \pi, \quad (22)$$

$$\hat{\theta}_{ti+k} = \operatorname{arctg} \left((i+k)^{-1} c_k^T \hat{X}_i \cos(\hat{\alpha}_{ti+k} - \alpha_t^0) \right) \pm \pi, \quad (23)$$

где $c_k^T = [1 \quad k]$.

Результаты моделирования

Для проверки эффективности предложенного алгоритма проведем моделирование процесса оценивания и предсказания движения цели в системе координат носителя с параметрами: $x_0 = 5700$ м, $y_0 = 1000$ м, $z_0 = 3000$ м; $V = -142,5$ м/с; $\gamma = -20$ град, $\beta = -10$ град; $T_0 = 0,04$ с.

В качестве помех измерения в (13) используется некоррелированные случайные величины с нулевым средним и дисперсиями $\sigma_v^2 = \sigma_{\tilde{v}}^2 = 3 \cdot 10^{-6}$, образу-

ющие последовательность белого шума, что соответствует среднеквадратическому отклонению 0,1 град.

Для построения гарантированной оценки точности оценивания в (14) приняты значения $q_v = \sigma_v$, $q_{\tilde{v}} = \sigma_{\tilde{v}}$.

Для наблюдателей (15), (16) из условия фильтрации помех измерений по заданным корням $0,95 \pm j0,05$ матрицы F найдены значения векторов $l = \tilde{l} = [0,107 \quad 0,005]^T$.

Проверка точности оценивания углов азимуту и места с помощью наблюдателей (15), (16) проводится методом Монте-Карло с использованием $N = 100$ независимых испытаний. При этом точность оценивания угла азимута проверяется по среднему значению среднеквадратического отклонения:

$$\operatorname{MRMSE} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \left(N^{-1} \sum_{j=1}^N (\hat{\alpha}_{ti}^{(j)} - \alpha_{ti})^2 \right),$$

где $\hat{\alpha}_{ti}^{(j)}$ – оценка угла азимута для j -ой реализации по методу Монте-Карло; $n = t_n / T_0$, t_n – время слежения за целью. Аналогичная оценка строится для угла места.

Из результатов моделирования следует, что при слежении за целью на интервале времени $t_n \leq t_i \leq t_n$, $t_n = 3$ с, $t_n = 100$ с значение MRMSE для угла азимута составляет 0,031 град, а для угла места 0,073 град. При этом для гарантированных оценок (20), (21) на интервале $30 \leq t_i \leq t_n$ достигаются значения:

$$\max_{30 \leq t_i \leq t_n} (\hat{\alpha}_{ti}^+ - \hat{\alpha}_{ti}^-) \approx 0,288 \text{ град};$$

$$\max_{30 \leq t_i \leq t_n} (\hat{\theta}_i^+ - \hat{\theta}_i^-) \approx 0,547 \text{ град}.$$

Также проведено моделирование процесса прогнозирования угла азимута и угла места, когда при $t_i \geq 15$ с цель пропадает на изображении оптического приемника. В этом случае с выходов наблюдателей (15), (16) при $\varphi_i = 0$ с использованием формул (22), (23) формируются прогнозные значения углов. На рис. 3 приведены графики изменения угла азимута (график -1) и угла места (график -2) цели и соответственно их прогнозные значения (график -3 и график -4), из которых следует, что на интервале времени $15 \leq t_i \leq t_n$ достигаются значения:

$$\max_{15 \leq t_i \leq t_n} |\hat{\alpha}_{ti} - \alpha_{ti}| \approx 2 \text{ град}; \quad \max_{15 \leq t_i \leq t_n} |\hat{\theta}_i - \theta_i| \approx 3 \text{ град}.$$

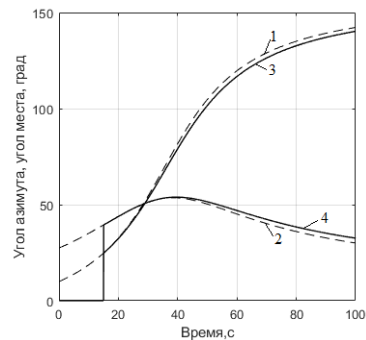


Рис. 3 – Изменение угла азимута, угла места цели и их прогнозные значения

Точность прогнозирования углового положения цели возрастает при увеличении времени работы наблюдателей.

Следует отметить, что для оценивания углового положения цели могут быть использованы различные модификации фильтра Калмана. Однако точность прогнозирования этих алгоритмов существенно зависит от задания виртуальной дальности до цели. При этом ошибки прогнозирования могут достигать неприемлемые значения [7].

Заключение

Таким образом, с помощью предложенной модели углового движения цели и построенных наблюдателей удастся обеспечить приемлемую для практики точность оценивания и прогнозирования углового положения цели при наличии шумов измерений. При отсутствии статистических данных о помехах измерений, но известных их граничных значений, получены гарантированные оценки угла азимута и угла места для дискретного наблюдателя. Эффективность предложенного алгоритма подтверждается результатами моделирования.

Дальнейшее повышение точности прогнозирования на основе предложенной модели может быть

достигнуто за счет использования комбинированных методов фильтрации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01045.

Литература

1. S.C. Nardone, V.J. Aidala, *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transaction son.* **17**, 2, 162-166 (1981).
2. К. В. Андреев, Е. Я. Рубинович, *Автоматика и телемеханика*, 1, 134-162 (2016).
3. А.Б. Миллер, Б.М. Миллер, *Информационные процессы*, **16**, 2, 103-111 (2016).
4. Б.А. Алпатов, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин, *Информационно-управляющие системы*, 5, 2-7 (2011).
5. Б.А. Алпатов, О.Е. Балашов, *Вестник РГРТУ*, 4, 5-10 (2014).
6. В.И. Гаркушенко, С.Х. Аль Барри, *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 4, 68-72 (2016).
7. С.Х. Аль Барри. Дисс. канд. техн. наук, ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, 2017. 182 с.
8. С.Х. Аль Барри, В.И. Гаркушенко, *Вестник технол. ун-та*, **20**, 3, 116-120 (2017).

© **В. И. Гаркушенко** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и управления» КНИТУ–КАИ, vigark@yandex.ru.

© **V. I. Garkushenko** – Associate Professor of the Department «Automation and control» KNRTU-KAI, vigark@yandex.ru.