

$$k \cdot \eta(\omega_0) = \frac{\left(\frac{R_H}{R}\right)_{\text{opt}}}{\left[ \cos\varphi + \left(\frac{R_H}{R}\right)_{\text{opt}} \cdot \frac{1}{\cos\varphi} \right] \left\{ \cos(\varphi - \varphi_1) + \frac{4}{\pi} \varphi_1 \left[ \cos\varphi + \left(\frac{R_H}{R}\right)_{\text{opt}} \cdot \frac{1}{\cos\varphi} \right] \right\}}. \quad (24)$$

С учетом (23) это выражение можно решить в виде  $\chi_{\text{доп}} = \text{tg}(\varphi_{\text{доп}}) = f(\varphi_1, k)$ , где  $\chi_{\text{доп}}$  и  $\varphi_{\text{доп}}$  – допустимые значения обобщенной расстройки и фазового сдвига контурного тока при фиксированном  $\varphi_1$  и заданной величине снижения КПД ( $k$ ).

Результаты этого решения представлены на рис. 3.

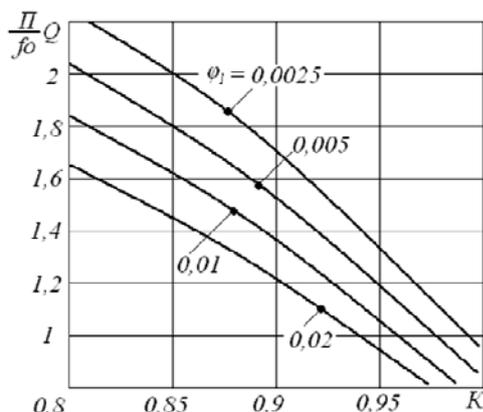


Рис. 3. Полоса рабочих частот усилителя:  
 $\Pi = 0,5(\chi_1 + \chi_2)$ ;  $\chi_1 = \chi(\omega_{\text{доп}} - \omega_0) \dots \omega > \omega_0$ ;  
 $\chi_2 = \chi(\omega_0 - \omega_{\text{доп}}) \dots \omega < \omega_0$

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- на умеренно высоких частотах ( $\varphi = 0,0025 - 0,005$ ) при допустимом снижении КПД на 20 % полоса рабочих частот усилителя может достигать удвоенной полосы пропускания контура на уровне 3 дБ;
- на высоких частотах ( $\varphi > 0,01$ ) падает и резонансное значение КПД и допустимая полоса рабочих частот;
- рабочую полосу частот можно регулировать подбором нагруженной добротности контура.

### Библиографические ссылки

1. Заездный А. М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. М. : Госэнергоиздат, 1961. 535 с.
2. Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Крук Б. И. Основы теории цепей : учебник для вузов ; под ред. В. П. Бакалова. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Горячая линия – Телеком, 2007. 426 с. : ил.

© Абрамов С. С., Михеенко А. М., Гусельников А. С., Абрамова Е. С., Павлов И. И., 2012

УДК 004.93:621.31

## РАЗРАБОТКА НАВИГАЦИОННОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А. М. Алешечкин<sup>1</sup>, Г. К. Макаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет  
 Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru  
<sup>2</sup>ОАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Сибири»  
 Россия, 660021, г. Красноярск, ул. Богграда, 144а. E-mail: MakarenkoGK@gmail.com

*Предложен алгоритм навигационного фильтра, реализующий получение сглаженных оценок координат объектов на основе измеренных значений псевдодальностей, полученных для сигналов совмещенного созвездия навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS.*

*Ключевые слова: навигационная задача, фильтр Калмана, ГЛОНАСС, GPS.*

## DEVELOPMENT OF NAVIGATION FILTER FOR ACCURACY INCREASE OF COORDINATES OF POINTS OF THERMAL IMAGES AT REMOTE DIAGNOSIS OF OVERHEAD POWER LINES

A. M. Aleshechkin<sup>1</sup>, G. K. Makarenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University  
 28 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru  
<sup>2</sup>JSC “Interregional Distribution Grid Company of Siberia”  
 144a Bograd street, Krasnoyarsk, 660021, Russia. E-mail: MakarenkoGK@gmail.com

In the article the authors offer an algorithm of navigation filter which makes possible to obtain the estimations of objects coordinates on the basis of the measured pseudoranges, obtained for signals of the co-located constellation of navigation satellites of GLONASS and GPS.

Keywords: navigation task, Kalman filter, GLONASS, GPS.

В настоящее время актуальной задачей энергетических систем является повышение эффективности методов диагностики энергетического оборудования.

Авторами статьи в работах [1; 2] предложен комплекс диагностики воздушных линий электропередачи, объединяющий в себе беспилотный летательный аппарат (БПЛА), навигационную аппаратуру спутниковых радионавигационных систем (НАП СРНС) и средства получения фото- и тепловизионных изображений. Данный комплекс обеспечивает координатную привязку получаемых фото- и тепловизионных изображений на основе использования координат и угловой ориентации БПЛА, получаемых от НАП СРНС, высоты полета над Землей, а также известных значений углов обзора средств получения изображений.

При решении задачи координатной привязки получаемых в ходе диагностики изображений, в настоящее время используется информация, получаемая в процессе решения стандартной навигационно-временной задачи [3]. При этом получаемые значения координат оказываются весьма подверженными влиянию случайной погрешности измерения псевдодальностей.

Вместе с тем при проведении съемки энергетических объектов (например, воздушных линий электропередачи) траектория БПЛА является достаточно гладкой, что открывает возможность эффективной фильтрации измеряемых координат БПЛА. Использование такой фильтрации позволяет ожидать значительного снижения случайной погрешности определения координат объектов, вызванной наличием шумовой погрешности измерения псевдодальностей в НАП СРНС.

Исходя из этого, в данной статье ставится задача разработки и исследования навигационного фильтра, предназначенного для решения навигационной задачи и фильтрации координат БПЛА, что позволит улучшить метрологические характеристики комплекса диагностики энергетических объектов.

В первом приближении для решения поставленной задачи предлагается фильтр Калмана [4], решающий навигационную задачу с фильтрацией измеренных НАП СРНС псевдодальностей для каждого навигационного космического аппарата (НКА) СРНС ГЛОНАСС и GPS. При этом в полученной системе уравнений будет содержаться  $n$  уравнений (по числу принимаемых НКА) с пятью неизвестными, которыми являются три пространственные координаты и две поправки к шкале времени потребителя относительно системного времени СРНС ГЛОНАСС и GPS.

Исходя из вышесказанного вектор состояний проектируемого фильтра Калмана имеет вид

$$\mathbf{S}_k = [x_k \quad y_k \quad z_k \quad \Delta\tau\Gamma_k \quad \Delta\tau G_k]^T, \quad (1)$$

где  $x_k, y_k, z_k$  – значения координат объекта на  $k$ -м шаге;  $\Delta\tau\Gamma_k, \Delta\tau G_k$  – значения разницы шкал времени НАП и НКА СРНС ГЛОНАСС и GPS на  $k$ -м шаге сопровождения, соответственно.

В случае задания модели движения объекта как неподвижного, возмущаемого случайными изменениями скорости распространения, уравнение состояний будет иметь вид

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + V_{x,k} \cdot T, \\ y_{k+1} = y_k + V_{y,k} \cdot T, \\ z_{k+1} = z_k + V_{z,k} \cdot T, \\ \Delta\tau\Gamma_{k+1} = \Delta\tau\Gamma_k + V_{\Delta\tau\Gamma,k} \cdot T, \\ \Delta\tau G_{k+1} = \Delta\tau G_k + V_{\Delta\tau G,k} \cdot T, \end{cases} \quad (2)$$

где  $V_{x,k}, V_{y,k}, V_{z,k}$  – случайные значения скорости объекта по соответствующим координатам с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями  $\sigma_v^2$ , полученные на  $k$ -м шаге сопровождения;  $V_{\Delta\tau\Gamma,k}, V_{\Delta\tau G,k}$  – случайные значения скорости изменения разницы шкал времени НАП и НКА для СРНС ГЛОНАСС и GPS (шум скорости) с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями  $\sigma_{V_{\Delta\tau\Gamma}}^2$  и  $\sigma_{V_{\Delta\tau G}}^2$  соответственно;  $T$  – интервал дискретизации, т. е. шаг обновления измерений (или состояний) объекта.

Уравнение (2) можно записать в матричном виде:

$$\mathbf{S}_{k+1} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{S}_k + \mathbf{G} \cdot \mathbf{V}_k, \quad (3)$$

где  $\mathbf{S}_k$  и  $\mathbf{S}_{k+1}$  – состояние объекта на  $k$  и  $k+1$ -м шаге фильтрации;  $\mathbf{\Phi} = \text{diag}(5 \times 5)$  – диагональная единичная матрица переходов вектора состояний от измерения к измерению, где  $\text{diag}()$  – символ диагональной матрицы;

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} T \cdot \sigma_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T \cdot \sigma_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T \cdot \sigma_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T \cdot \sigma_{V_{\Delta\tau\Gamma}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T \cdot \sigma_{V_{\Delta\tau G}} \end{bmatrix} -$$

вектор коэффициентов усиления шума состояний;

$\mathbf{V}_k = [V_{x,k} \quad V_{y,k} \quad V_{z,k} \quad V_{\Delta\tau\Gamma,k} \quad V_{\Delta\tau G,k}]^T$  – вектор случайных скоростей на  $k$ -м шаге фильтрации.

Исходя из заданных значений дисперсии шума состояний можно найти ковариационную матрицу шума состояний:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{G}^T. \quad (4)$$

В случае определения места объекта в псевдодальномерном режиме результаты измерений представляют собой псевдодальности НАП–НКА  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , где  $n$  – число принимаемых НКА.

Вектор измеренных значений псевдодальностей ОС–КС на  $k$ -м шаге фильтрации запишется в виде

$$\mathbf{Z}_k = [R_{1,k} \ \dots \ R_{n,k}]^T. \quad (5)$$

Матрица перехода пространства состояний в пространстве измерений вычисляется для значений координат объекта и разницы шкал времени, выбираемых из отфильтрованного вектора состояний  $\mathbf{S}_k$ , определенного для текущего шага сопровождения в соответствии с выражением

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} -kx_{1,k} & -ky_{1,k} & -kz_{1,k} & \frac{\partial R_1}{\partial \Delta\tau\Gamma_k} & \frac{\partial R_1}{\partial \Delta\tau G_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -kx_{n,k} & -ky_{n,k} & -kz_{n,k} & \frac{\partial R_n}{\partial \Delta\tau\Gamma_k} & \frac{\partial R_n}{\partial \Delta\tau G_k} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $kx_{i,k} = \frac{xn_i - x_k}{R_{0i,k}}$  – направляющие косинусы векторов-направлений, соединяющих точку начального приближения с  $i$ -м НКА, здесь  $xn_i - x$  координата  $i$ -го НКА (аналогично для  $ky_{i,k}$ ,  $kz_{i,k}$ );  $i = 1, \dots, n$  – текущий номер принимаемого НКА,

$R_{0i,k} = \sqrt{(xn_i - x_k)^2 + (yn_i - y_k)^2 + (zn_i - z_k)^2}$  – значение дальности от точки начального приближения до  $i$ -го НКА.

Ковариационная матрица погрешностей измерения псевдодальностей  $\mathbf{R}$  может в первом приближении быть предвычисленной для фиксированных значений погрешностей измерения псевдодальности. В этом случае можно положить измерения дальностей НАП–НКА равнозначными, т. е. принять дисперсии погрешностей измерения дальностей одинаковыми, равными  $\sigma_R^2$ . При этом значения погрешностей измерения дальностей принимаются некоррелированными, следовательно

$$\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_R^2). \quad (7)$$

Остальные основные уравнения фильтра Калмана широко известны [4] и использованы в классическом виде.

Перед началом фильтрации на выход фильтра поступает первое значение вектора состояний, получаемое путем решения стандартной навигационной задачи. Для стационарного объекта вектор состояния (1) – это координаты объекта и разницы шкал времени потребителя и соответствующего НКА. Далее эти переменные экстраполируются в соответствии с уравнением экстраполяции (3). При этом ковариационная матрица погрешностей оценки состояния объекта определяется на основе теории погрешностей косвенных измерений из матрицы погрешностей измерения радионавигационных параметров  $\mathbf{R}$ , которая, как было

отмечено выше, полагается заранее известной. После нахождения ковариационной матрицы погрешностей состояния объекта на первом шаге  $\mathbf{P}_{1/1}$  осуществляется расчет  $\mathbf{P}_{2/1}$ , а затем вычисляется коэффициент усиления фильтра на следующий шаг  $\mathbf{K}_2$  по известным выражениям [4], т. е. со второго шага фильтр при стационарной модели состояния объекта начинает работать в установившемся режиме.

Моделирование разработанного фильтра производилось при следующих исходных данных:  $\sigma_p = 40$  м [3] – среднеквадратические отклонения (СКО) измеряемых НАП псевдодальностей от НКА до НАП;  $\sigma_v, \sigma_v^2 = 1$  м/с – СКО случайных скоростей объекта;  $\sigma_{V\Delta\tau\Gamma} = \sigma_{V\Delta\tau G}, \sigma_v^2 = 10^{-6}$  с/с – СКО случайных скоростей изменения разницы шкал времени НКА и НАП;  $z = 1000$  – число статистических испытаний.

В результате моделирования фильтра получены СКО погрешностей определения прямоугольных геоцентрических фильтрованных координат точки:  $\sigma_X = 1,3$  м;  $\sigma_Y = 3$  м;  $\sigma_Z = 3$  м. В то же время решение стандартной навигационной задачи по результатам одномоментных измерений без фильтрации дает следующие значения СКО определения не фильтрованных координат заданной точки  $\sigma_{Xn} = 22$  м,  $\sigma_{Yn} = 33$  м,  $\sigma_{Zn} = 50$  м.

Результаты определения координат точки при фильтрации и без нее (решение стандартной навигационной задачи по результатам одномоментных измерений) приведены на рис. 1.

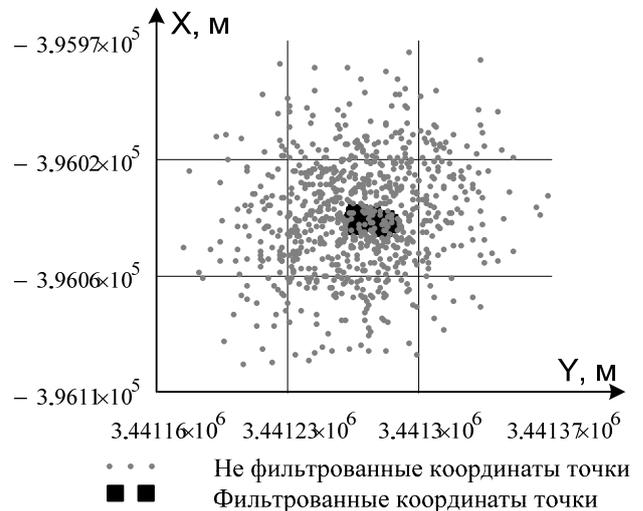


Рис. 1. Результаты моделирования фильтра Калмана

Полученные значения СКО погрешностей определения координат точки до и после фильтрации были использованы в программе, моделирующей процесс координатной привязки тепловизионных изображений для разработанного авторами статьи комплекса диагностики [1; 2]. Погрешности координатной привязки получаемых изображений рассчитаны методами

статистического моделирования, исходя из которых на измеряемые исходные параметры накладывались погрешности в виде случайных величин с заданными значениями СКО и нулевыми математическими ожиданиями. Затем проводилось заданное число статистических испытаний, в результате которых рассчитывались статистические оценки СКО определяемых параметров. В частности, был произведен расчет зависимости СКО погрешности определения пространственных координат одной из точек тепловизионного

изображения от угла азимута БПЛА, в соответствии с выражениями:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}, \sigma_{rn} = \sqrt{\sigma_{Xn}^2 + \sigma_{Yn}^2 + \sigma_{Zn}^2}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{Xn}, \sigma_{Yn}, \sigma_{Zn}, \sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$  – СКО погрешности определения прямоугольных геоцентрических координат точки до и после фильтрации, соответственно.

Расчеты проводились при исходных данных, отраженных в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные при моделировании разработанного навигационного фильтра

Наименование	Значение	СКО 1	СКО 2
Широта БПЛА	lat = 56°0' с. ш.	$\sigma_{lat} = 0,711''$ (22 м)	$\sigma_{lat} = 0,042''$ (1,3 м)
Долгота БПЛА	lon = 92°0' в. д.	$\sigma_{lon} = 1,904''$ (33 м)	$\sigma_{lon} = 0,173''$ (3 м)
Высота БПЛА	h = 400 м	$\sigma_h = 50$ м	$\sigma_h = 3$ м
Азимут БПЛА	az = 0°, 1°, ..., 360°	$\sigma_{az} = 10'$	
Угол места БПЛА	um = 0°	$\sigma_{um} = 20'$	
Крен БПЛА	kr = 0°, 10°, 20°, 30°	$\sigma_{kr} = 20'$	
Углы обзора камеры тепловизора	ax = 29°, ay = 22°	–	
Высота БПЛА	dh = 150 м	$\sigma_{dh} = 10$ м	
z = 100	Число статистических испытаний в каждом значении азимута БПЛА		

Зависимость СКО погрешности определения координат точки правого нижнего угла тепловизионного изображения (9) от азимута БПЛА приведена на рис. 2.

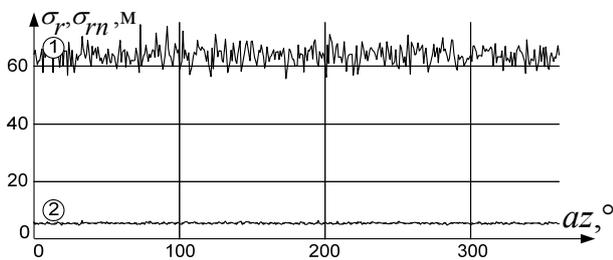


Рис. 2. Зависимость СКО погрешности определения координат точки правого нижнего угла тепловизионного изображения (9) от азимута БПЛА: 1 – до фильтрации; 2 – после фильтрации

Полученные результаты показывают, что погрешность определения пространственных координат заданной точки тепловизионного изображения без фильтрации, в соответствии с (9), составляет 64 м.

Таким образом, использование спроектированного и исследованного навигационного фильтра позволяет уменьшить погрешность определения пространственных координат заданной точки тепловизионного изображения до значения 5,5 м, что значительно улучшает эксплуатационные свойства комплекса [1; 2] и яв-

ляется достаточным для локализации повреждений и осуществления качественной диагностики. В настоящее время авторами осуществляется исследование реализаций навигационного фильтра применительно к моделям движения объекта с постоянной скоростью (модель второго порядка), а также с учетом наличия ускорений (модель третьего порядка). Данные модели позволят более адекватно описывать поведение БПЛА в полете и уточнить достижимые метрологические характеристики предложенного комплекса диагностики энергетических объектов.

**Библиографические ссылки**

1. Макаренко Г. К., Алешечкин А. М. Алгоритм координатной привязки тепловизионных снимков // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. Красноярск : Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2012. С. 33–37.
2. Алешечкин А. М. Способ геодезической привязки аэрофотоснимков // Вестник СибГАУ. 2011. № 7 (40). С. 58–62.
3. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М. : Эко-Трендз, 2000.
4. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М. : Радио и связь, 1993.

© Алешечкин А. М., Макаренко Г. К., 2013