

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»**

ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ В АППАРАТУРЕ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СРНС**

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №5

ФИО СТУДЕНТА: ЖЕРЕБИН В.Р.

ГРУППА: ЭР-15-15

ВАРИАНТ №: 3

ДАТА: 18.12.2019

ПОДПИСЬ: _____

ФИО ПРЕПОДАВАТЕЛЯ: ШАТИЛОВ А.Ю.

ОЦЕНКА: _____

МОСКВА, 2019 Г.

Дано

Из д.з. №4:

$\alpha = 1 \text{ с}^{-1}$ – ширина спектра флуктуаций радиального ускорения;

$T = 10 \text{ мс}$ – темп фильтрации, $T_d = 0,2 \text{ мкс}$ – темп работы АЦП;

$\omega_0 = 2\pi \cdot (1602 \text{ МГц})$ – несущая частота (для пересчетов);

$\omega_n = 2\pi \cdot (2 \text{ МГц})$ – промежуточная частота;

$\sigma_\alpha = 10 \text{ м/с}^2$ – среднеквадратическое ускорение;

$q_{c/n_0} = 10^{0.1 \cdot (30 \text{ дБГц})} = 10^3 \text{ [Гц]}$ – отношение мощности сигнала к спектральной плотности шума на входе приемника;

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}^2$ – скорость света в свободном пространстве;

$S_\xi = 2\sigma_\alpha^2 \alpha \left(\frac{\omega_0}{c}\right)^2 = 2 \cdot 10^2 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 1602 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8}\right)^2 = 2,25 \times 10^5$ – спектральная плотность мощности формирующего шума;

$\sigma_\xi^2 = \frac{S_\xi}{2T} = \frac{2,25 \times 10^5}{2 \cdot 10 \times 10^{-3}} = 1,126 \times 10^7$ – дисперсия формирующего шума;

$\sigma_\zeta = 0,5$ – СКО формирующего шума;

$\sigma_n = \frac{a_0}{2\sqrt{q_{c/n_0} T_d}} = \frac{1}{2\sqrt{10^3 \cdot 0,2 \times 10^{-6}}} = 35,4$ – СКО шума наблюдений.

Входная информация от инерциальной навигационной системы (ИНС):

δ_k – погрешность поддерживающего радиального ускорения от ИНС;

$\delta_k = \delta_{k-1} \cdot (1 - \alpha_\delta T) + \alpha_\delta T \cdot \chi_{k-1}$

χ_{k-1} – ДБГШ с дисперсией σ_χ^2 ;

$\alpha_\delta = 0,1 \text{ с}^{-1}$ – ширина спектра флуктуаций погрешности ускорения;

$\sigma_\delta = 1 \text{ м/с}^2$ – СКО погрешности ускорения;

$S_\chi = 2\sigma_\delta^2 \alpha_\delta = 2 \cdot 1^2 \cdot 0,1 = 0,2$ – спектральная плотность мощности шума;

$\sigma_\chi^2 = \frac{S_\chi}{2T} = \frac{0,2}{2 \cdot 10 \times 10^{-3}} = 10$ – дисперсия шума;

Задание

1. Провести синтез комплексного фильтра ФАП по модифицированному варианту комплексирования.

Изменим вектор состояний информационных параметров из д.з. №4

$$\mathbf{x}_k = [a_k \quad \varphi_k \quad \Omega_k \quad \delta_k]^T$$

добавив δ_k – погрешность поддерживающего радиального ускорения от ИНС;

Ускорение частоты ν_k , которое определялось как СП: $\nu_k = \nu_{k-1} \cdot (1 - \alpha T) + \alpha T \cdot \xi_{k-1}$, заменим на измерения радиального ускорения:

$$\nu_k = \gamma_k - \frac{\omega_0}{c} \delta_k$$

С учетом измерений от ИНС уравнения динамики информационных параметров в дискретном виде:

$$a_k = a_{k-1} + \zeta_{k-1}T,$$

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \Omega_{k-1}T,$$

$$\Omega_k = \Omega_{k-1} + \gamma_{k-1}T - \frac{\omega_0}{c}T\delta_{k-1},$$

$$\delta_k = \delta_{k-1} \cdot (1 - \alpha_\delta T) + \alpha_\delta T \cdot \chi_{k-1},$$

ζ_{k-1}, χ_{k-1} , – ДБГШ с дисперсиями σ^2_ζ и σ^2_χ соответственно

Фильтруемый процесс представим в виде многомерного марковского процесса:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}\boldsymbol{\xi}_{k-1}$$

С учетом уравнений динамики, выразим многомерные коэффициенты процесса:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{\omega_0}{c}T \\ 0 & 0 & 0 & (1 - \alpha_\delta T) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \alpha_\delta T \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\xi}_{k-1} = \begin{bmatrix} \zeta_{k-1} \\ \chi_{k-1} \end{bmatrix}$$

Формирующие шумы амплитуды и фазы полагаем независимыми, следовательно:

$$\mathbf{D}_\xi = M[\boldsymbol{\xi}_k \boldsymbol{\xi}_{k-1}^T] = \begin{bmatrix} \sigma^2_\zeta & 0 \\ 0 & \sigma^2_\chi \end{bmatrix}$$

Начальные условия изменяются:

$$\mathbf{D}_0 = \begin{bmatrix} 0,3^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pi^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (30 \text{ рад/с})^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1 \text{ м/с}^2)^2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} a_0 \\ \varphi_0 \\ \Omega_0 \\ \delta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \pi/12 \\ 100 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{\varphi}_0 \\ \hat{\Omega}_0 \\ \hat{\delta}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Амплитуда моделируется ступенькой:

$$a_k = \begin{cases} 1, & \text{при } t_k < 5 \text{ с;} \\ 0,5, & \text{при } t_k \geq 5 \text{ с.} \end{cases}$$

Все остальное остается без изменений из д.з. №4.

2. Графики временных зависимостей для ошибок фильтрации фазы

- мгновенной ошибки фильтрации фазы: $\varepsilon_\varphi(t_k) = \hat{\varphi}_k - \varphi_k$;
- предельные границы ошибок фильтрации фазы по уровню 3σ (по оценкам матрицы дисперсий фильтра $\mathbf{D}_{x,k}$):

$$+3\sqrt{D_{22}(t_k)}, \quad -3\sqrt{D_{22}(t_k)}, \quad t = 0 \dots 10 \text{ с}$$

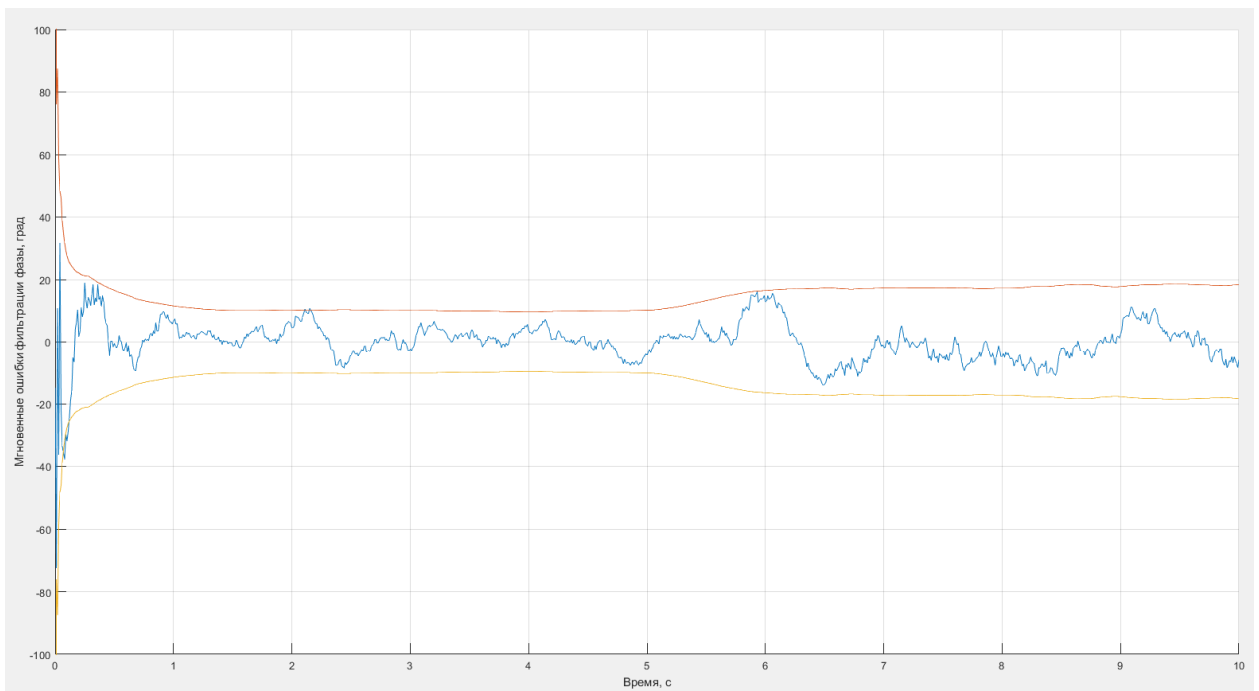


Рис.1. График временных зависимостей для ошибок фильтрации фазы

3. Построить на одном графике реализацию истинного радиального ускорения $v_k \cdot \frac{c}{\omega_0}$ и погрешности измерений радиального ускорения от ИНС δ_k

Так как радиальное ускорение определяется как $v_k = \gamma_k - \frac{\omega_0}{c} \delta_k$, то истинное радиальное ускорение $v_k \cdot \frac{c}{\omega_0} = \gamma_k \frac{c}{\omega_0} - \delta_k$

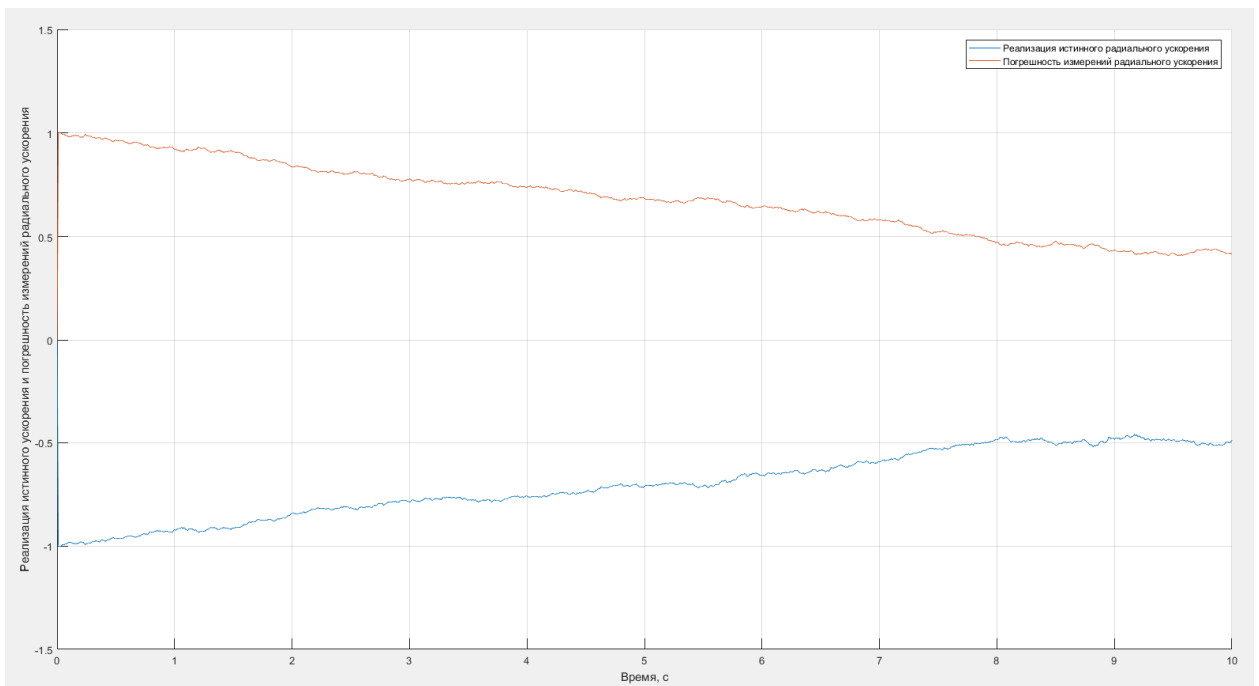


Рис.2. Графики реализации истинного радиального ускорения и погрешности измерений радиального ускорения

4. Выяснить, как и во сколько раз изменилась дисперсия ошибки фазы D_{22} по сравнению с д.з. №4 в установившемся режиме до и после скачка амплитуды

Сведем значения дисперсии ошибки фазы D_{22} для указанных случаев в таблицу:

Таблица 1. Дисперсии ошибки фазы D_{22}

	D_{22} (без поддержки от ИНС – д.з. №4)	D_{22} (с поддержкой от ИНС – д.з. №5)	Разница, раз
До скачка амплитуды	24	10,29	2,33
После скачка амплитуды	37,06	17,21	2,15

Дисперсия ошибки фазы D_{22} в установившемся режиме для компенсированного фильтра с поддержкой от ИНС уменьшилась в среднем в 2,24 раза, относительно фильтра без поддержки от ИНС.

5. Рассчитать выигрыш в помехоустойчивости:

Будем считать, что информационным параметром является фаза сигнала, тогда помехоустойчивость будет связана с дисперсией D_{22} . Зная разницу дисперсий, рассчитаем выигрыш в помехоустойчивости:

$$\Delta = 10 \log_{10} \left(\frac{D_{22} \text{ (без поддержки от ИНС – д.з. №4)}}{D_{22} \text{ (с поддержкой от ИНС – д.з. №5)}} \right) = 10 \log_{10}(2,24) = 3,5 \text{ дБ}$$

Выигрыш в помехоустойчивости при использовании фильтра с поддержкой от ИНС составляет в среднем 3,5 дБ.

Приложение

Листинг программы MATLAB

```
close all; clear all; clc;
format long

%% Параметры
% От НАП:
T = 10e-3;
Td = 0.2e-6;
N = T/Td;

t_start = 0;
t_stop = 10;
t = t_start:T:t_stop;
td = t_start:Td:t_stop;

q_dB = 30;
q = 10^(q_dB/10);

alpha = 1;
sigma_alpha = 10;
c = 3e8;

f0 = 1602e6;
omega0 = 2*pi*f0;
fp = 2e3;
omegap = 2*pi*fp;

% От ИНС
alpha_delta = 0.1;
sigma_delta = 1;

gamma = 0;

%% Шум от ИНС:
S_chi = 2*sigma_delta^2*alpha_delta;
D_chi = S_chi/(2*T);

%% Шум наблюдений
a0 = 1;
sigma_n = a0/(2*sqrt(q*Td));
D_n = sigma_n^2;

%% Формирующий шум
S_xi = 2*sigma_alpha^2*alpha*(omega0/c)^2;
D_xi = S_xi/(2*T);
D_zeta = 0.5^2;

%% Коэффициенты фильтра
F = [1 0 0 0;
      0 1 T 0;
      0 0 1 -(omega0/c)*T;
      0 0 0 1-alpha_delta*T];
G = [T 0;
      0 0;
      0 0;
      0 alpha_delta*T];
C = [1 0 0 0;
      0 1 0 0];
D_f = [D_zeta 0;
```

```

0 D_chi];

%% Начальные условия
x = [1; pi/12; 100; 1];
D = [.3^2 0 0 0;
     0 pi^2 0 0;
     0 0 34^2 0;
     0 0 0 1^2];
xf = [.5; 0; 0; 0];

%% Выделение памяти и начальные приближения
a = nan(size(t));          a(1) = x(1);
phi = nan(size(t));        phi(1) = x(2);
OMEGA = nan(size(t));      OMEGA(1) = x(3);
a_extr = nan(size(t));     a_extr(1) = 0;
phi_extr = nan(size(t));   phi_extr(1) = 0;
OMEGA_extr = nan(size(t)); OMEGA_extr(1) = 0;
D22 = nan(size(t));        D22(1) = D(2,2);

for k = 2:length(t)
    x = F*x + G*randn(1,1)*sqrt([D_zeta; D_chi]); %% Марковский СП
    x(3) = x(3) + gamma*T;
    a(k) = x(1);
    phi(k) = x(2);
    OMEGA(k) = x(3);
    delta(k) = x(4);

    v_true(k) = gamma*(c/omega0) - x(4);
    gamma = gamma + randn(1,1)*sqrt(0.0001*k*T); %% Винеровский СП

    %% экстраполяция
    xf = F*xf;
    D = F*D*F' + G*D_f*G';
    W = N/(2*D_n)*[1 0;
                   0 xf(1)^2];

    a_extr(k) = xf(1);
    phi_extr(k) = xf(2);
    OMEGA_extr(k) = xf(3);

    %% Дискриминация
    for i = 1:N
        i_m = (k-2)*N+i;
        if i_m*Td <= 5
            ai = 1;
        else
            ai = 0.5;
        end
        y = ai*cos(omegap*i_m*Td + phi(k)) + randn(1,1)*sigma_n;
        I(i) = y*cos(omegap*i_m*Td + phi_extr(k));
        Q(i) = y*sin(omegap*i_m*Td + phi_extr(k));
    end
    U_d1 = sum(I) * (1/D_n) - (xf(1)*N)/(2*D_n);
    U_d2 = -sum(Q) * (xf(1)/D_n);
    u_d = [U_d1; U_d2];

    %% Оценка
    D = inv(inv(D) + C'*W*C);
    xf = xf + D*C'*u_d;

    D22(k) = D(2,2);
end

```

```

epsilon_phi = (phi_extr - phi);

figure(1);
hold on, grid on;
plot(t, epsilon_phi*180/pi, t, [3*sqrt(D22); -3*sqrt(D22)]*180/pi)
ylim([-100 100]);
xlabel("Время, с");
ylabel("Мгновенные ошибки фильтрации фазы, град");

figure(2);
hold on, grid on;
plot(t, v_true, t, delta)
xlabel("Время, с");
ylabel("Реализация истинного ускорения и погрешность измерений радиального ускорения");

```