

Тульский государственный университет

ИВТС им. В.П. Грязева

Факультет САУ

Кафедра «1»

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ  
СИСТЕМА ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА  
ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО БЕСПИЛОТНОГО  
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА (БПЛА)

Типа Я.

Научный руководитель  
д.т.н., проф., Типа Он.

## Цель работы:

- Разработка теоретических основ проектирования микросистемной авионики микро- и мини-БПЛА, включающих вывод концепции и методики проектирования авионики с учётом аэродинамических характеристик планера БПЛА и характеристик информационно-измерительной системы пирометрического типа.

## Научные задачи:

1. разработка структуры авионики, определение её конструкции и элементного состава;
2. выбор конструкции планера БПЛА, определение его аэродинамических коэффициентов;
3. изучение пирометрической вертикали, её возможностей и ограничений;
4. разработка математического аппарата, позволяющего вычислять углы крена и тангажа по показаниям пирометрической вертикали;
5. изучение вопроса повышения качества работы пирометрической вертикали путём комплексирования с другими типами систем ориентации;
6. моделирование системы автоматического управления БПЛА с пирометрической вертикалью в своём составе с целью аналитического вычисления коэффициентов автопилота и оценки качества системы автоматического управления;
7. изготовление БПЛА и авионики с целью проведения натурных испытаний.

# Основные положения диссертации выносимые на защиту и обладающие научной новизной:

1. Концепция интегрированной модульной авионики современного БПЛА, структура и элементный состав интегрированной модульной авионики .
2. Математическое и экспериментальное обоснование возможности применения пирометров для задач определения угловой ориентации БПЛА.
3. Математическая модель пирометрической вертикали. Способ аппроксимации сигнала пирометрической вертикали противовесной функцией.
4. Шумовая характеристика пирометрической вертикали (зависимость шума от значения температурного градиента; зависимость градиента от погодных условий; экспериментально определённые граничные погодные условия, пригодные для работы пирометрической вертикали).
5. Способы комплексирования пирометрической вертикали с инерциальными и магнитными датчиками.
6. Методика проектирования авионики БПЛА с учётом параметров планера и параметров информационно-измерительной системы пирометрического типа, в рамках которой аэродинамические коэффициенты планера определяются методом «виртуальной продувки».

# Способы запуска и посадки БПЛА



Категории БПЛА	Радиус полета, км	Высота полета, м	Продолжительность полета, час	Взлетный вес, кг
Микро	<10	<250	<1	<5
Мини	~(10÷20)	50 ÷ 300	<2	~ 10
Вертолет	1000 ÷ 1500	100 ÷ 3000	10 ÷ 15	<2000
Низко и средне высотные	1000 ÷ 1500	100 ÷ 3000	<12	<1200
Привязные аэростаты	–	100 ÷ 4000	25 ÷ 35	<3000

# Аэродинамическая компоновка БПЛА



БПЛА ГранТ



БПЛА RQ-11 Raven



БПЛА MicroB



БПЛА Инспектор-К01

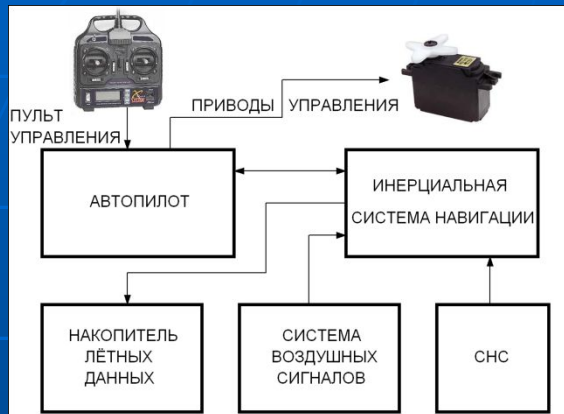


БЛА Иркут-850

# Элементы БПЛА в авиамодельной сфере



# Системы ориентации и автопилоты БПЛА



КСО «Текнол»



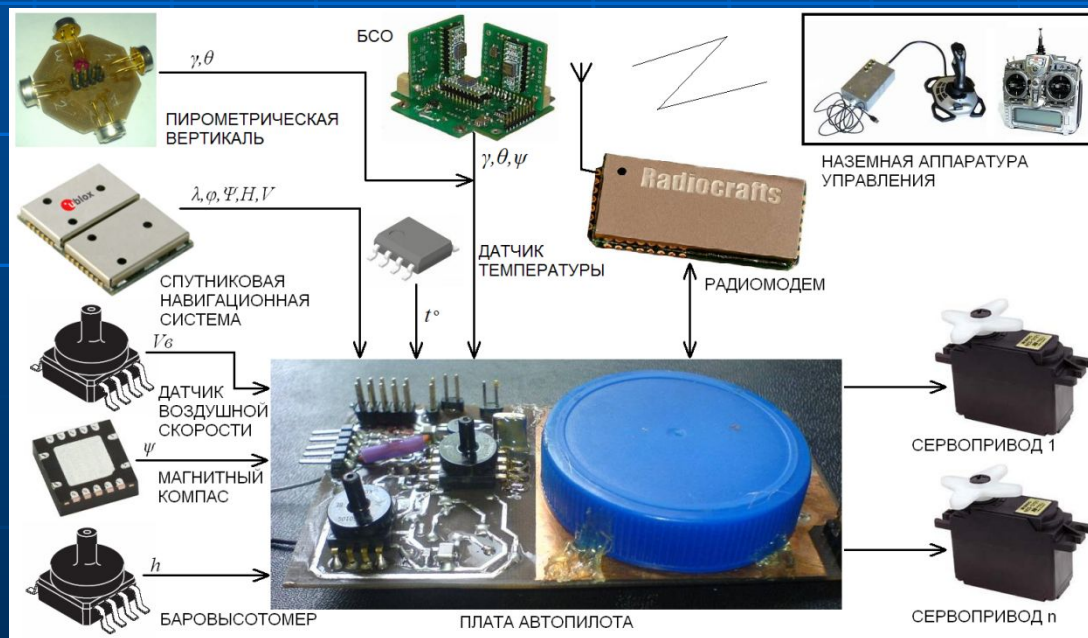
КСО AHRS510GA



КСО CMP41



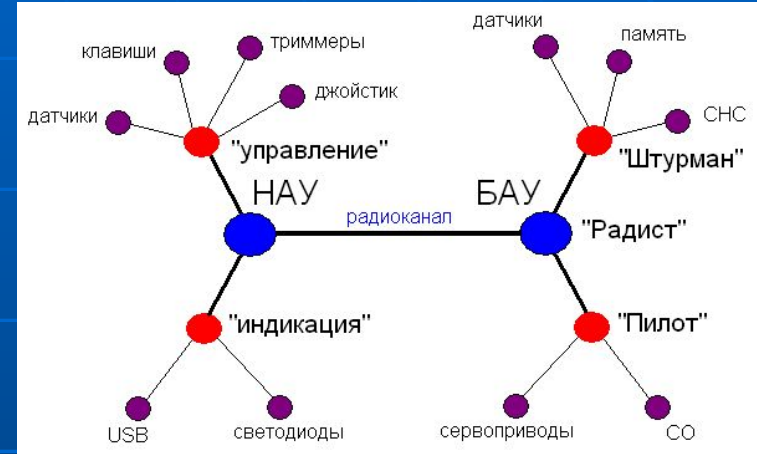
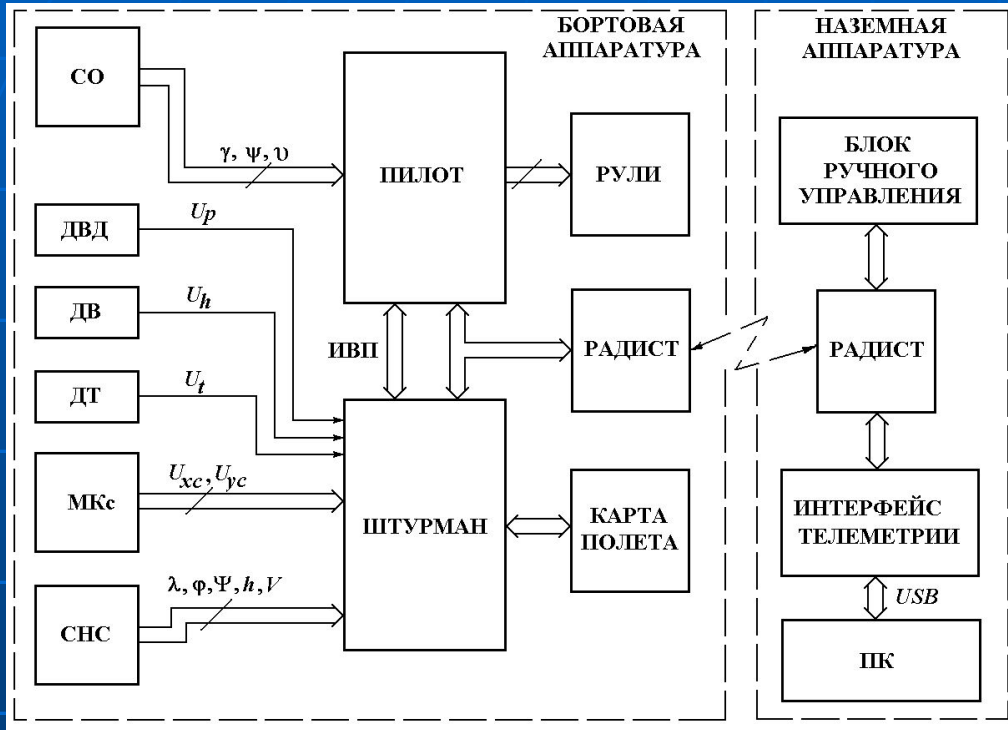
Автопилоты Kestrel и MP2128



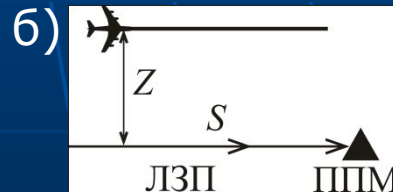
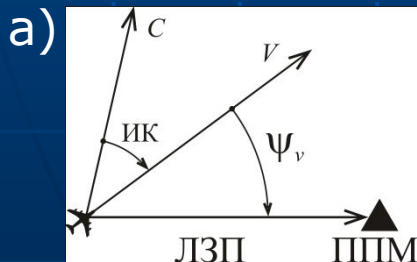
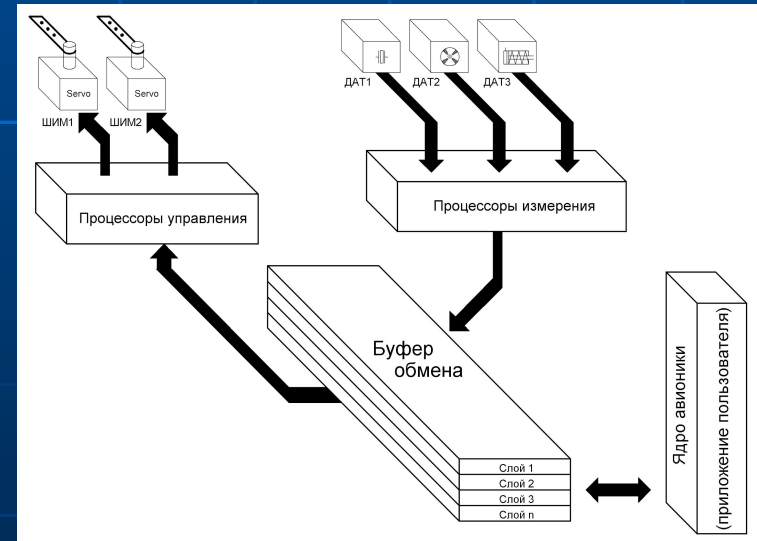
Обобщённая схема авионики БПЛА «Беркучи»



# Концепция интегрированной модульной авионики БПЛА «Беркучи»



## Структура сетевой ИМА



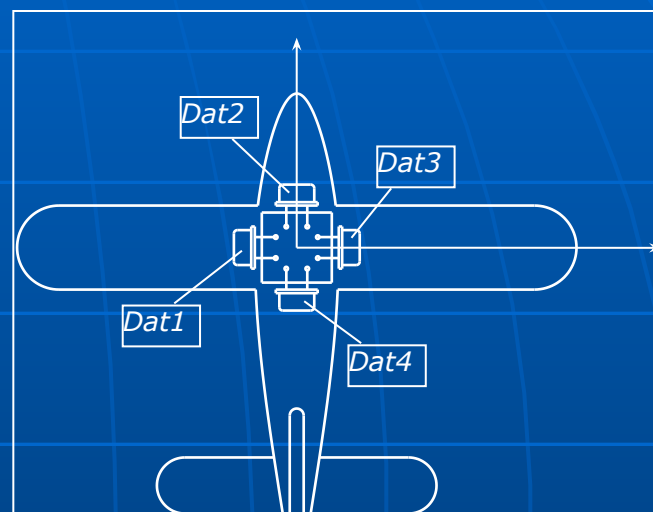
Способы управления полетом  
а – курсовой; б – маршрутный

## queue-система авионики

# Принцип действия пирометрической вертикали (ПВ)



Принцип действия ПВ



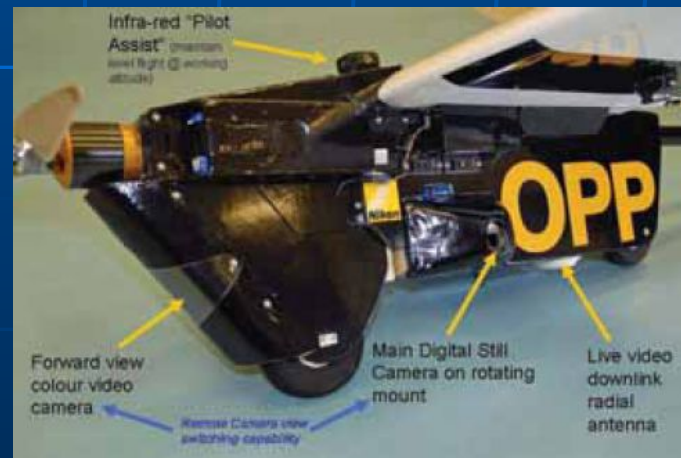
Установка ПВ на БПЛА



FMA CPD4

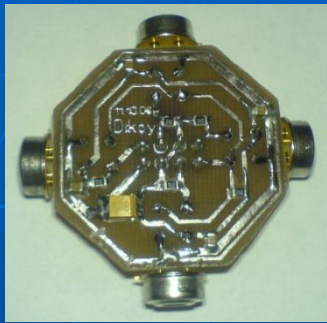


БПЛА FIU-301



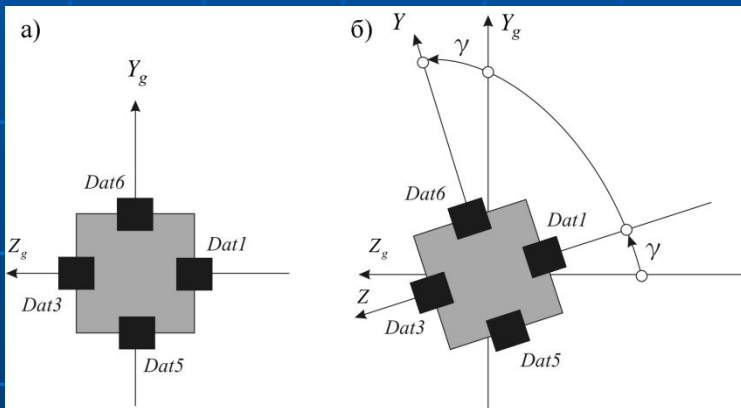
ПВ на БПЛА FIU-301

# Три способа вычисления углов ориентации



$$\gamma = \frac{(U_{Dat1} - U_{Dat3}) \cdot 90}{(U_{Dat1_{max}} - U_{Dat3_{max}})}, \quad \leftarrow 1$$

$$\theta = \frac{(U_{Dat2} - U_{Dat4}) \cdot 90}{(U_{Dat2_{max}} - U_{Dat4_{max}})}$$



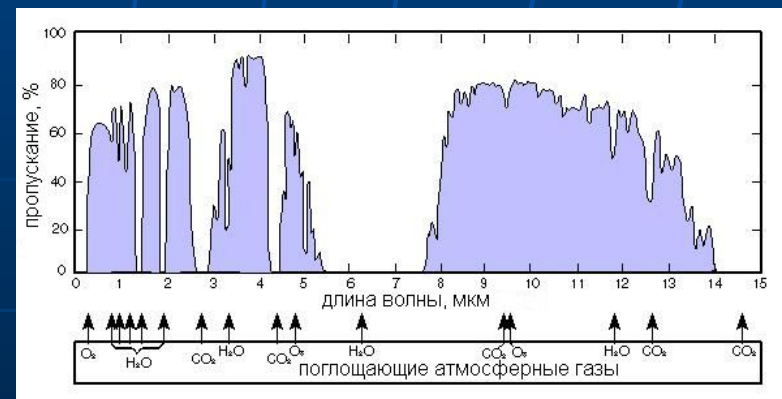
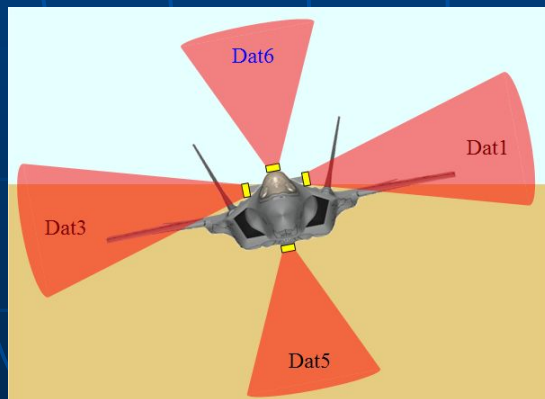
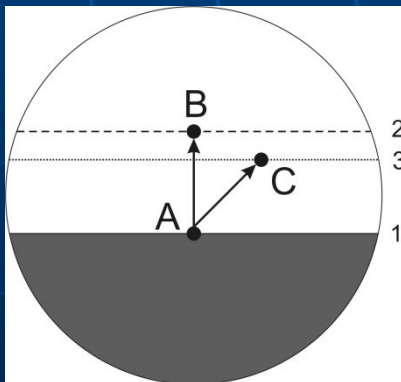
$$\Delta U_\gamma = U_{Dat1} - U_{Dat3}, \quad \Delta U_\theta = U_{Dat2} - U_{Dat4}, \quad \Delta U_g = U_{Dat5} - U_{Dat6}$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\Delta U_\gamma}{\Delta U_g}\right), \quad \theta = \arctan\left(\frac{\Delta U_\theta}{\Delta U_g}\right), \quad \leftarrow 2$$

$$I_\gamma = I \cdot \cos(\gamma)$$

$$grad = \sqrt{\Delta U_\gamma^2 + \Delta U_\theta^2 + \Delta U_g^2}$$

$$\frac{\Delta U_\gamma}{\Delta U_g} = \frac{\sin(\gamma)}{\cos(\gamma)} = tg(\gamma) \quad \gamma = \arctan\left(\frac{\Delta U_\gamma}{\Delta U_g}\right), \quad \theta = \arcsin\left(\frac{\Delta U_\theta}{grad}\right), \quad \leftarrow 3$$



# Разворот пирометрической вертикали на 45 градусов



$$\gamma = \frac{(U_{Dat1} - U_{Dat3}) \cdot 90}{(U_{Dat1_{max}} - U_{Dat3_{max}})}, \theta = \frac{(U_{Dat2} - U_{Dat4}) \cdot 90}{(U_{Dat2_{max}} - U_{Dat4_{max}})},$$

$$\Delta U_\gamma = U_{Dat1} - U_{Dat3},$$

$$\Delta U_\theta = U_{Dat2} - U_{Dat4}.$$

$$M' = \begin{vmatrix} \Delta U_\theta \\ \Delta U_\gamma \\ 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta U_\theta \\ \Delta U_\gamma \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta U_\theta \cos(\theta) + \Delta U_\gamma \sin(\theta) \\ -\Delta U_\theta \sin(\theta) + \Delta U_\gamma \cos(\theta) \\ 1 \end{vmatrix}$$

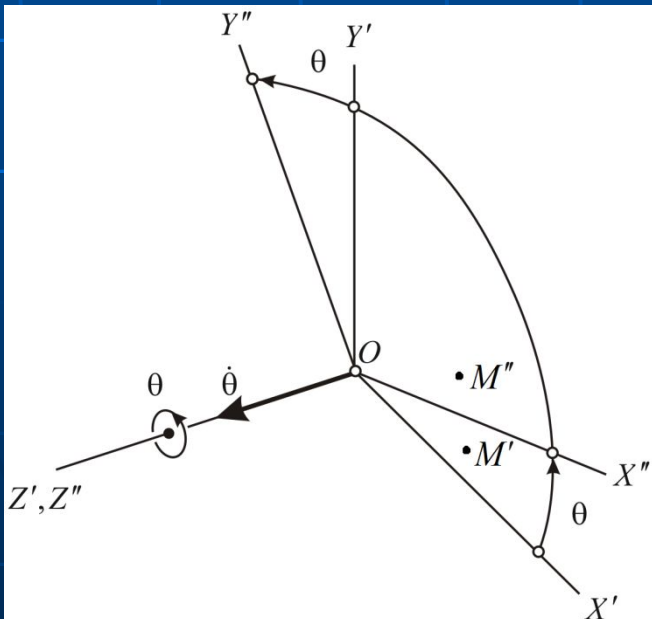
$$\Delta U_\theta' = \Delta U_\theta \cos(\theta) + \Delta U_\gamma \sin(\theta),$$

$$\Delta U_\gamma' = -\Delta U_\theta \sin(\theta) + \Delta U_\gamma \cos(\theta).$$

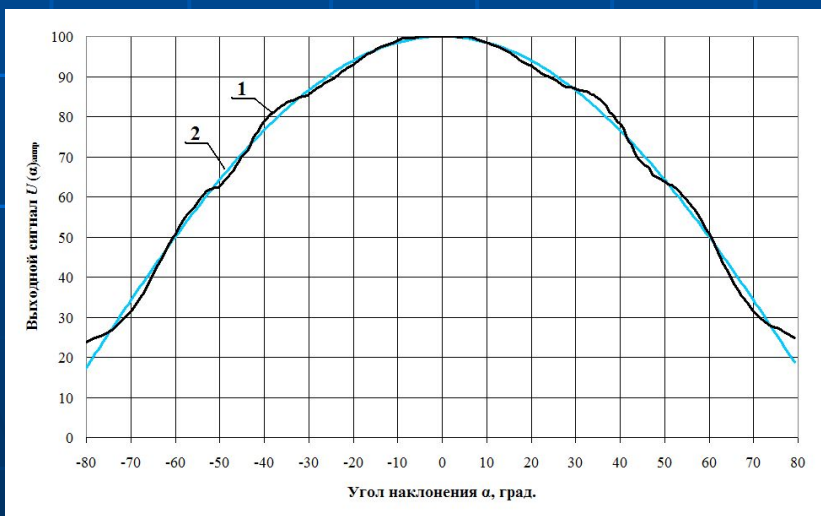
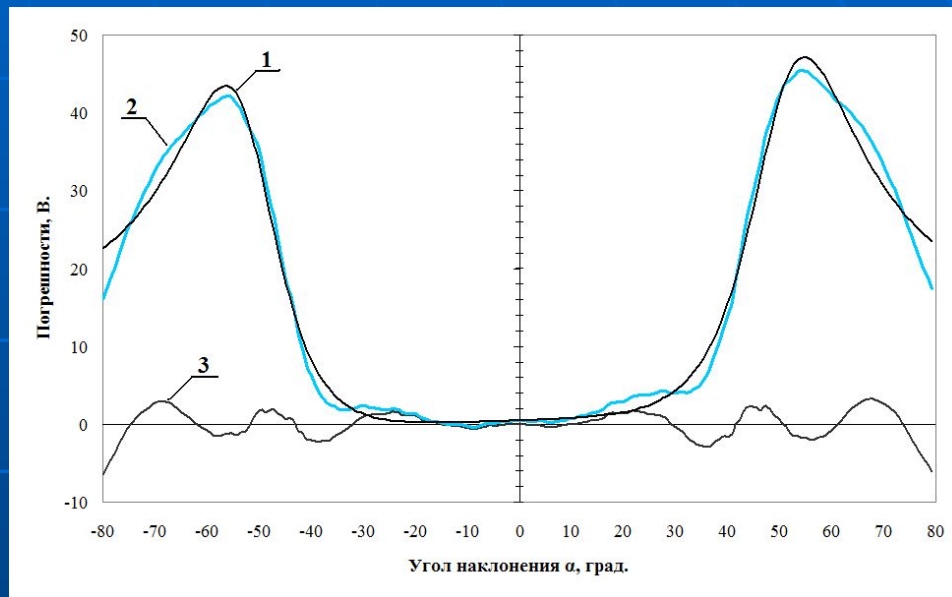
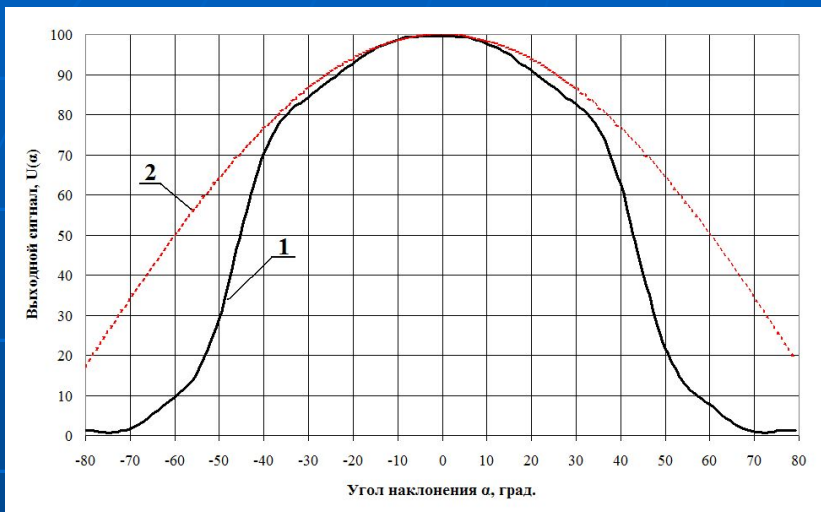
$$\Delta U_\theta' = \frac{\Delta U_\theta + \Delta U_\gamma}{\sqrt{2}}$$

$$\Delta U_\gamma' = \frac{-\Delta U_\theta + \Delta U_\gamma}{\sqrt{2}}$$

$$\gamma = \frac{(\Delta U_\theta' + \Delta U_\gamma') \cdot 90}{\Delta U_{\theta'_{max}} + \Delta U_{\gamma'_{max}}}, \theta = \frac{(-\Delta U_\theta' + \Delta U_\gamma') \cdot 90}{-\Delta U_{\theta'_{max}} + \Delta U_{\gamma'_{max}}}.$$



# Модель ПВ и аппроксимация её рабочей характеристики



Функции погрешностей, где

1:  $F(\alpha)_{\text{аппр}} = F(\alpha) \pm \Delta$ ;

2:  $F(\alpha) = K(\cos(\alpha) - U(\alpha))$ ;

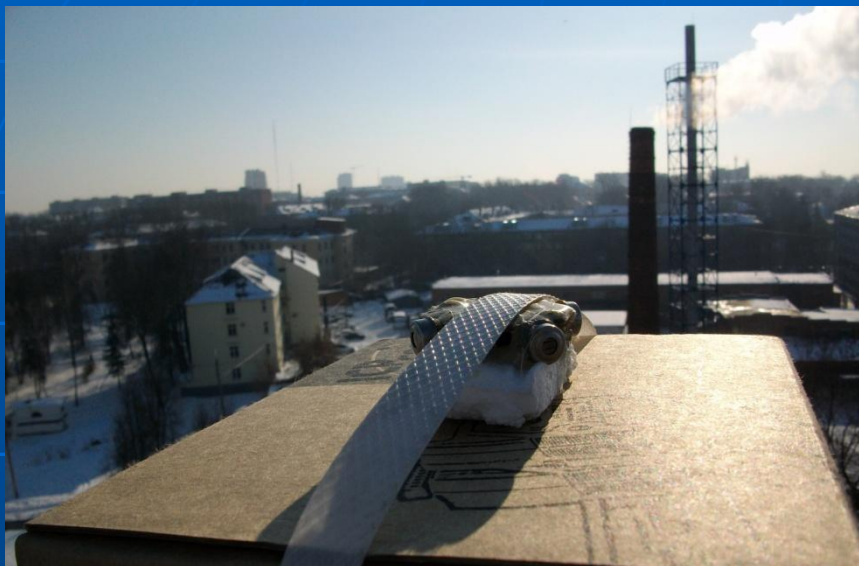
3:  $\Delta = F(\alpha) - F(\alpha)_{\text{аппр}}$

$$U(\alpha) = K(\cos(\alpha) - F(\alpha)) + \delta_{ei\tilde{n}} + \Delta\theta + \Delta n$$

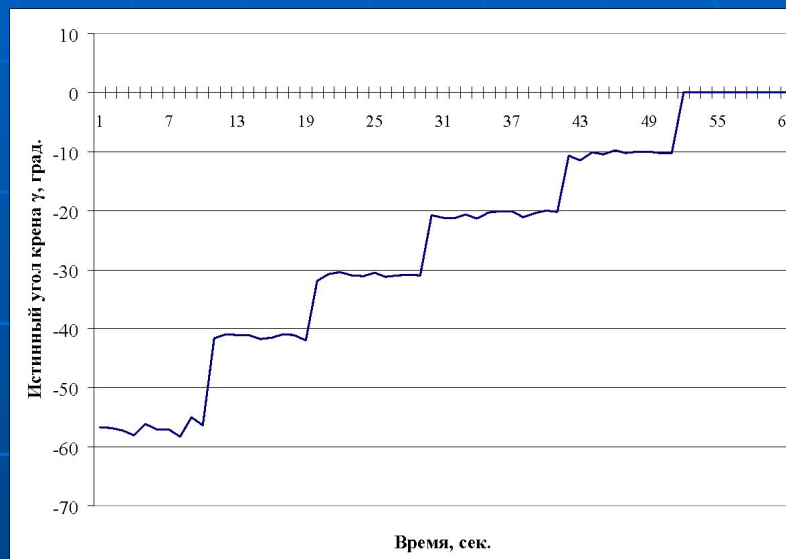
$$KU(\alpha)_{\text{аіііі}} = K(U(\alpha) + F(\alpha)_{\text{аіііі}}).$$

$$F(\alpha)_{\text{аіііі}} = 9,574 + \frac{-9,113 + 0,028\alpha + 6,156 \cdot 10^{-3} \alpha^2}{1 - 4,430 \cdot 10^{-4} \alpha - 6,404 \cdot 10^{-4} \alpha^2 + 3,126 \cdot 10^{-7} \alpha^3 + 1,315 \cdot 10^{-7} \alpha^4}$$

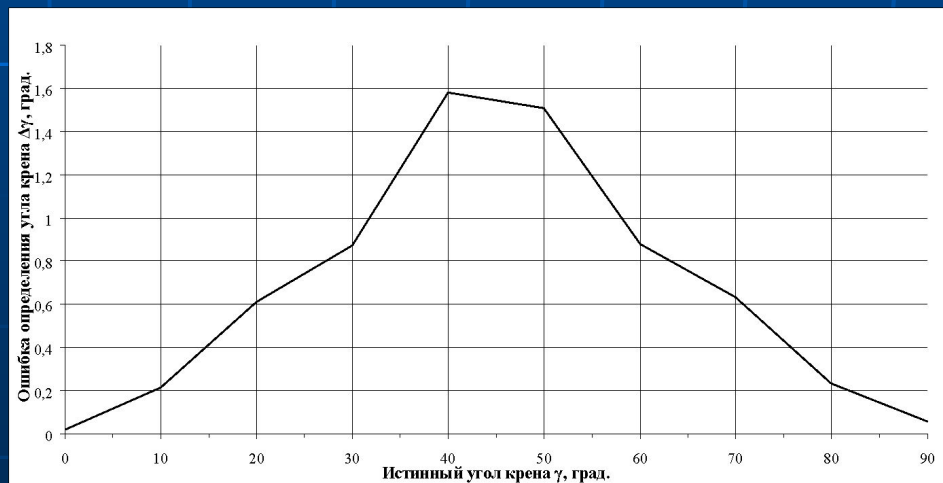
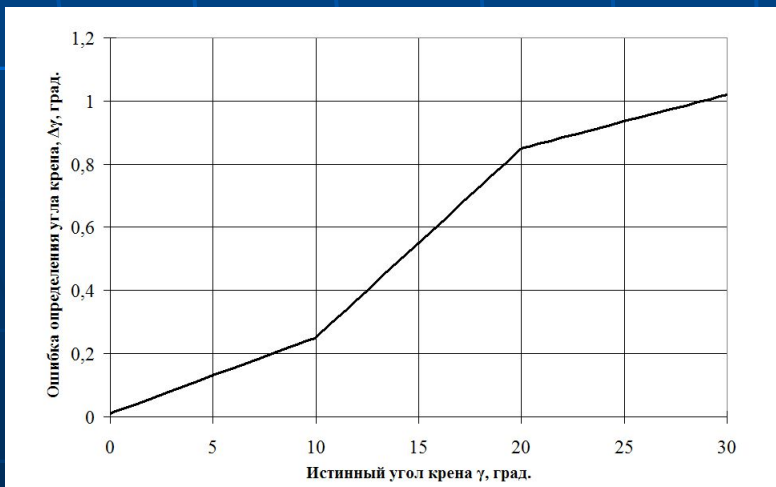
# Экспериментальные статические характеристики ПВ



Состав эксперимента

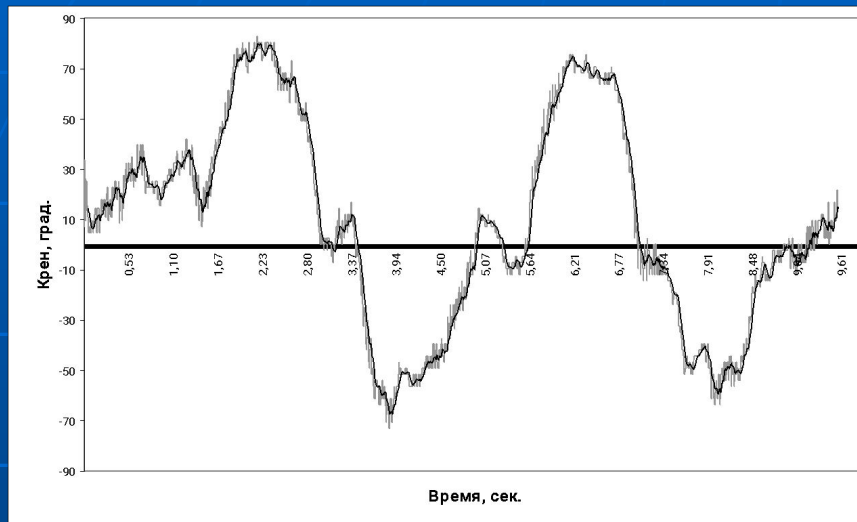


Погрешность вычисления угла ПВ



Экспериментальные статические характеристики ПВ с 4 (слева) и 6 (справа) пирометрами

# Шумовая характеристика ПВ. Подавление шума с помощью фильтра скользящего среднего

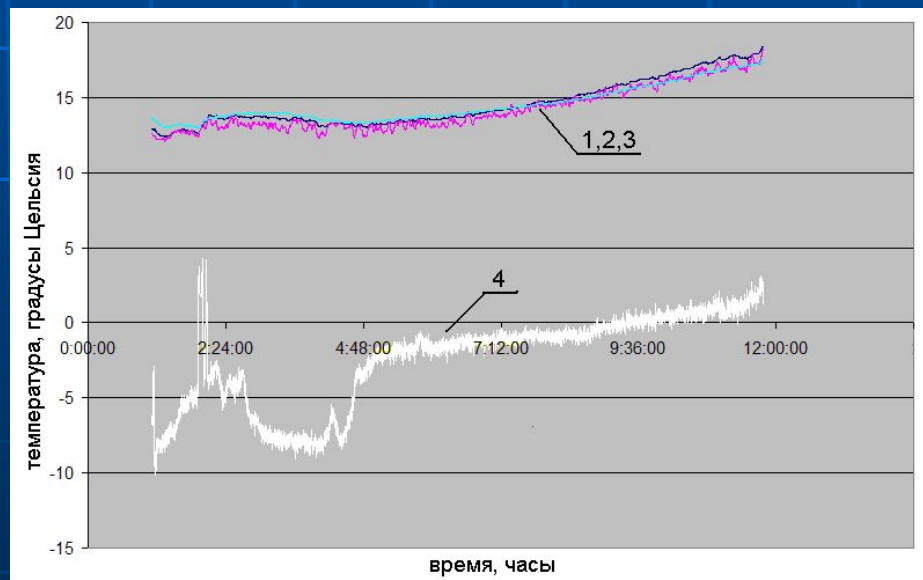


Исходный и фильтрованный сигналы

Погодные условия	Температура воздуха, °C	Разница температур земля/зенит, °C	Точность работы ПВ
Ясная зимняя ночь, нулевая облачность	-15	32	Высокая
Солнечный зимний день, нулевая облачность	-10	20	Высокая
Пасмурный зимний день, низкая снеговая облачность	-2	1,5	Низкая
Пасмурный зимний день, туман, низкая облачность	0	1	Не работает
Солнечный летний день, нулевая облачность	+25	40	Очень высокая
Начало ноября, солнечный день, лёгкая облачность	+5	19	Средняя

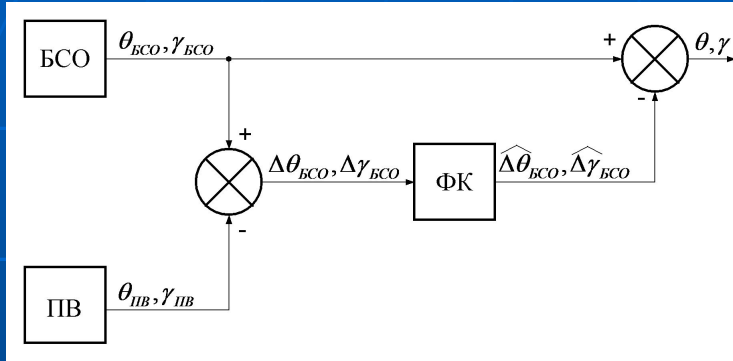
## Соответствие погодных условий и глубины фильтрации

Размер фильтра, выборки	Градиент, °C	Шум пирометра от полной шкалы (градиента).
8	grad > 20	<1%
16	10 < grad < 20	1%
32	5 < grad < 10	5%
64	1,5 < grad < 5	10%
лететь нельзя	grad < 1,5	>15%

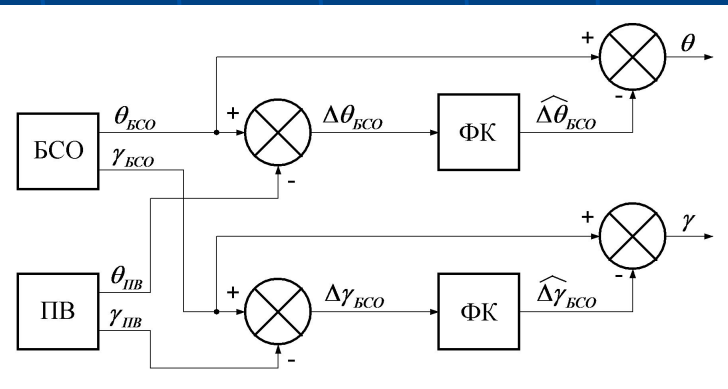
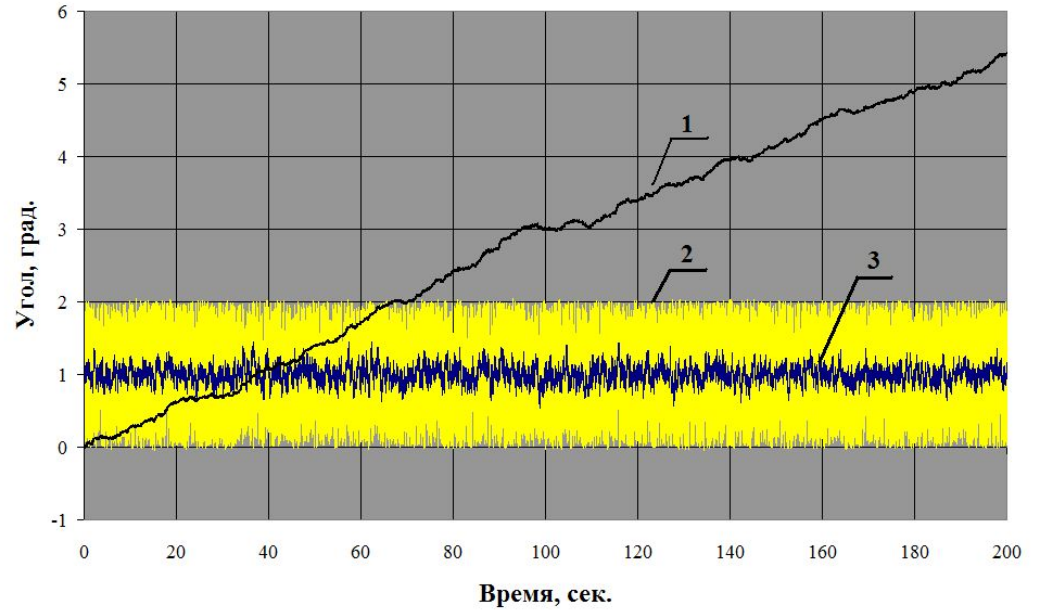


Суточные колебания температур

# Комплексирование по слабосвязанной схеме способом компенсации

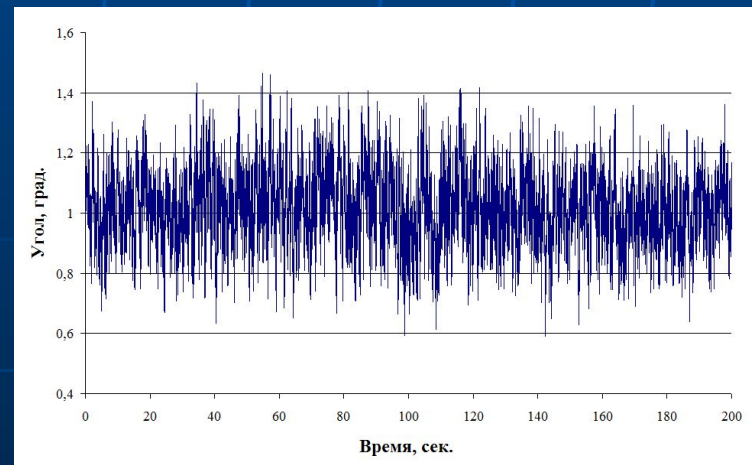


$$X = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{БСО} \\ \Delta\gamma_{БСО} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}. \quad X_i \approx X_{i-1} \approx const.$$



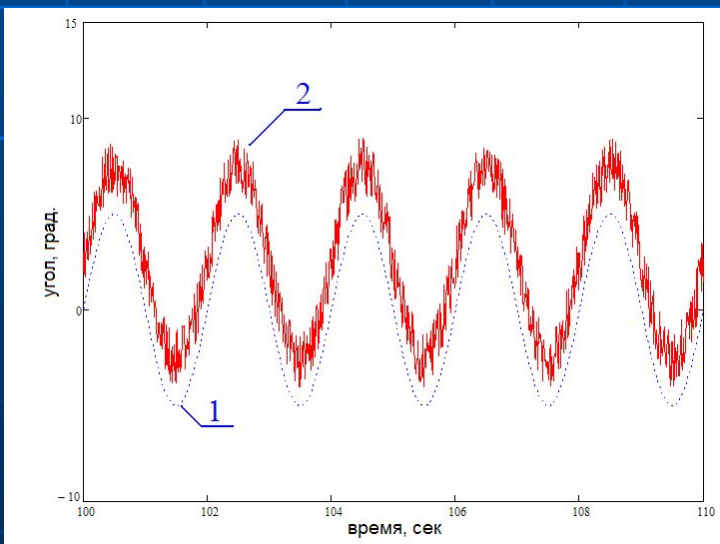
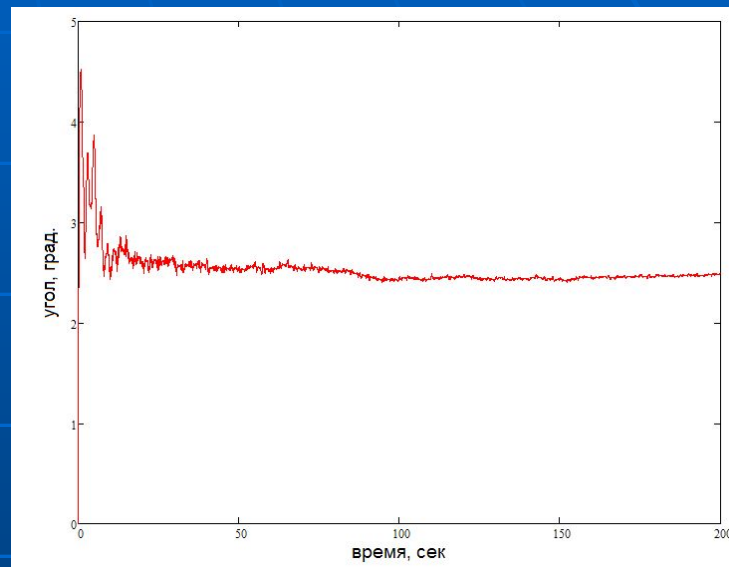
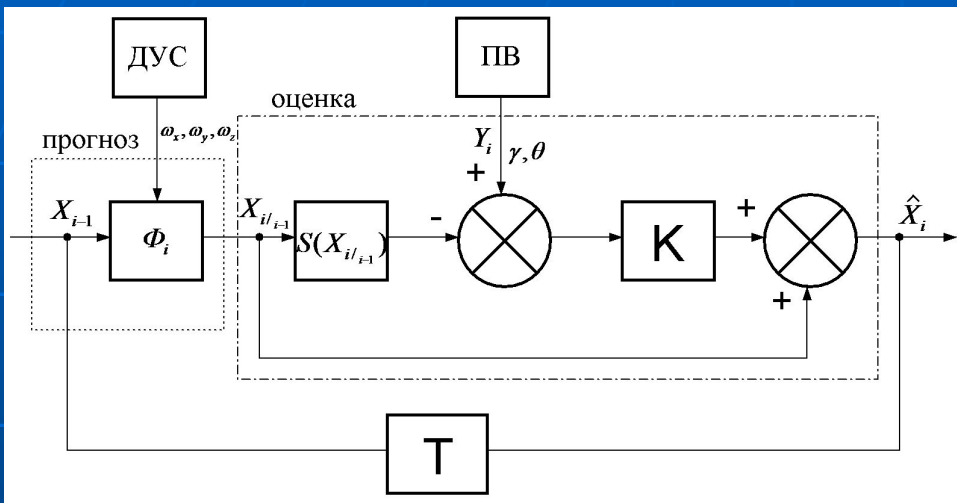
$$X_\theta = \Delta\theta_{АН\dot{I}},$$

$$X_\gamma = \Delta\gamma_{АН\dot{I}}.$$



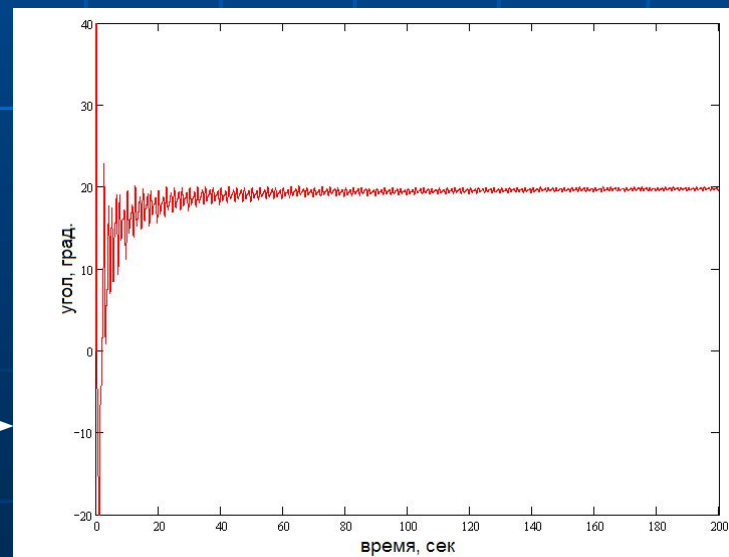


# Глубокое комплексирование способом фильтрации

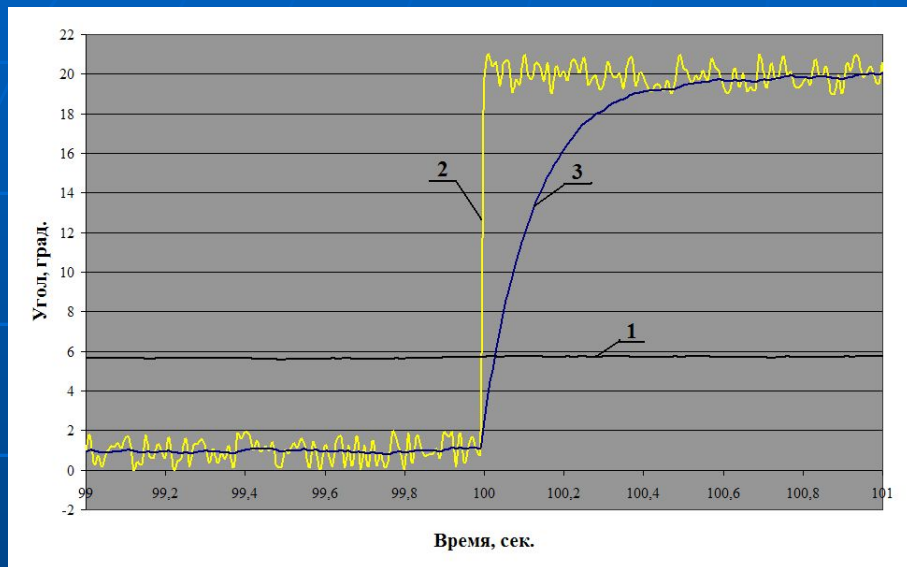


$$X = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \gamma \cos \theta \\ \cos \gamma \cos \theta \\ \Delta \theta \\ \Delta \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} \theta \\ \gamma \\ \Delta \theta \\ \Delta \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \rightarrow$$



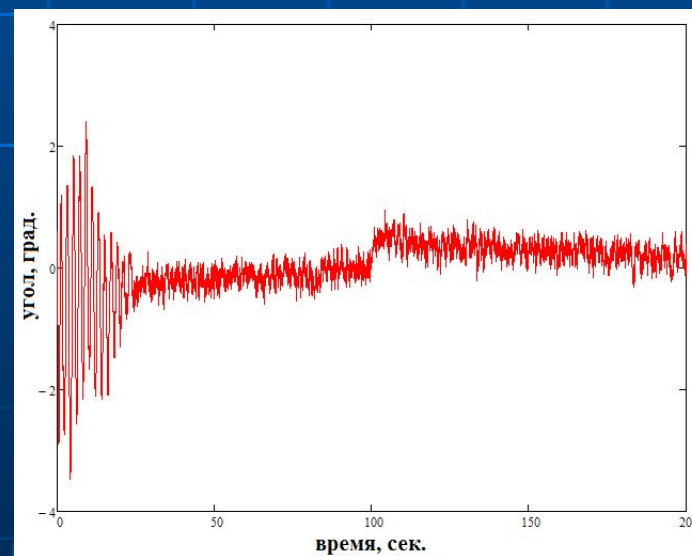
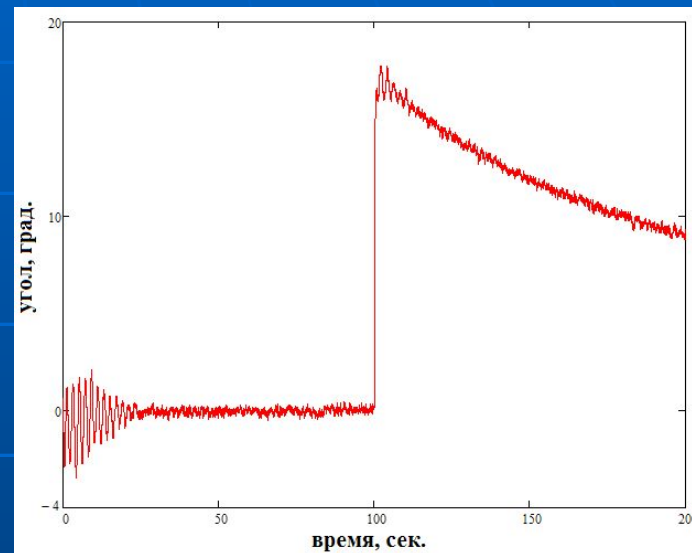
# Подавление помех по каналу ПВ



Способ компенсации

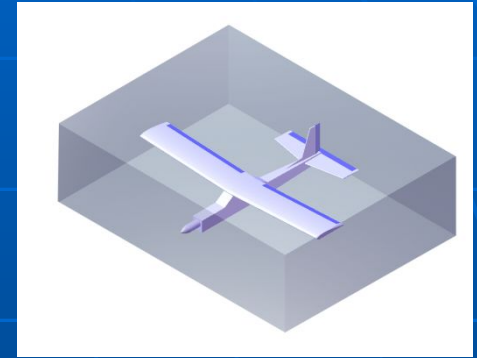
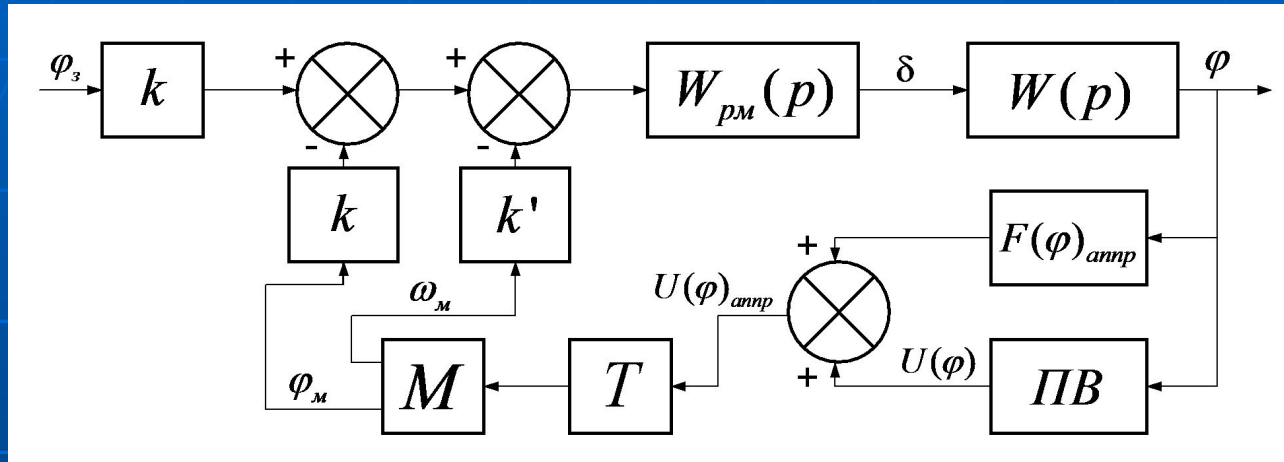
$$( Y_i - S(X_i) ) > B$$

Способ подавления помех по каналу ПВ с помощью ДУС защищён патентом на полезную модель по заявке № 2010110360/22(014575) от 22.03.2010 г.



Способ фильтрации

# Структурная схема и передаточные функции системы «БПЛА-автопилот»



$$W_{\delta i}(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$$

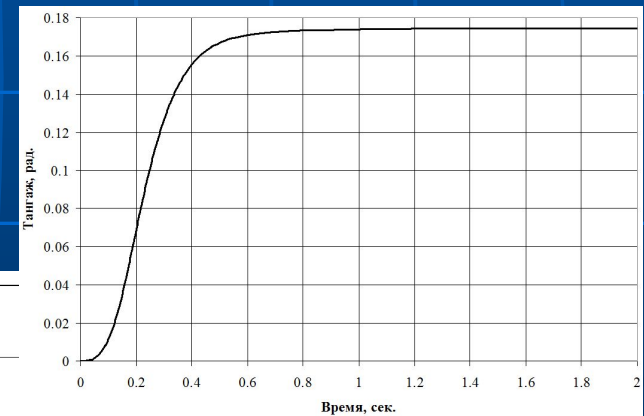
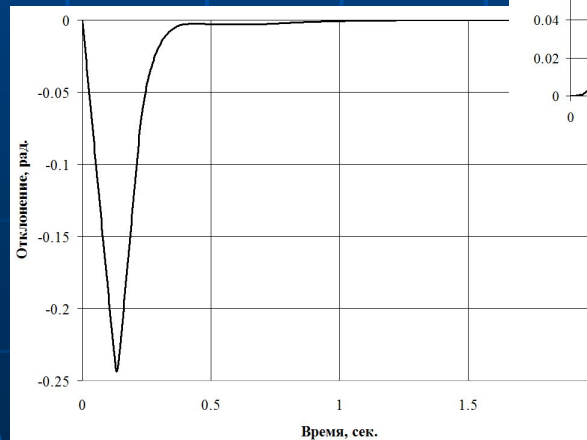
$$\ddot{I} \hat{A} = U(\varphi) = \cos(\varphi) - F(\varphi)$$

$$\delta = k\Delta\varphi + k' \frac{d\Delta\varphi}{dt}$$

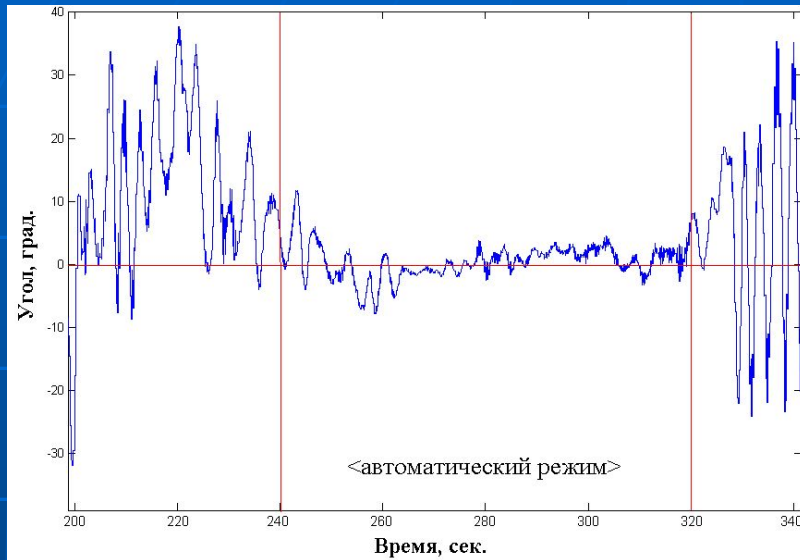
$$W_{\delta \gamma}(p) = \frac{\vartheta(p)}{\delta_{\gamma}(p)} = \frac{K_{\delta \gamma}}{p(T_{\gamma} p + 1)}$$

$$W_{\delta \vartheta}(p) = \frac{\vartheta(p)}{\delta_{\vartheta}(p)} = \frac{K_{\delta} K_{\vartheta} (T_{\vartheta} p + 1)}{p(T_{\alpha}^2 p^2 + 2\xi_{\alpha} T_{\alpha} p + 1)}$$

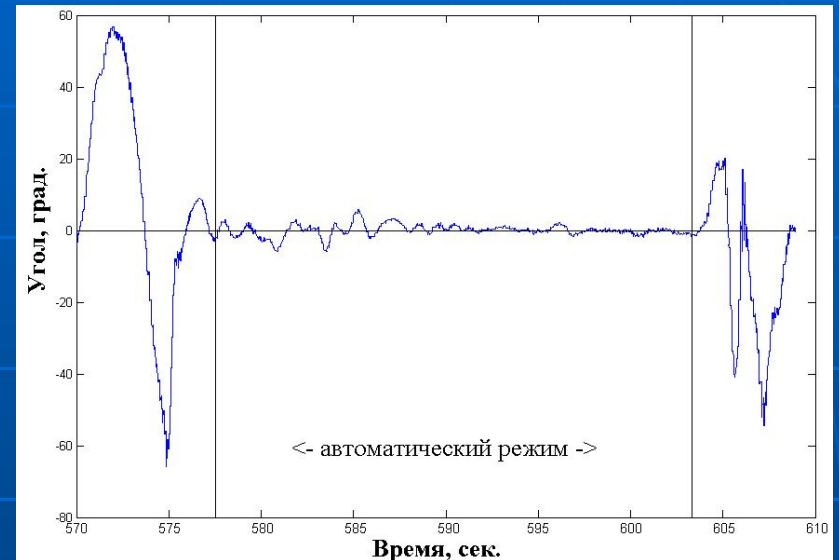
$$W_{\delta \psi}(p) = \frac{\vartheta(p)}{\delta_{\psi}(p)} = \frac{K_{\beta} K_{\psi} (T_{\psi} p + 1)}{p(T_{\beta}^2 p^2 + 2\xi_{\beta} T_{\beta} p + 1)}$$



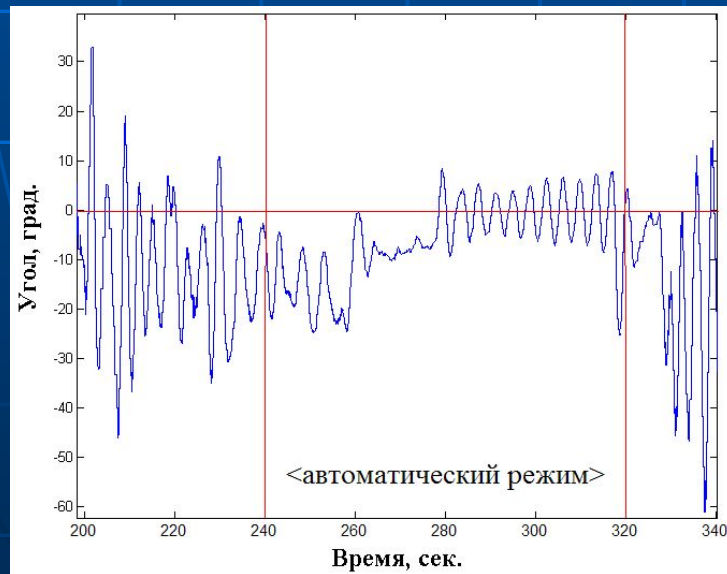
# Сравнение качества стабилизации



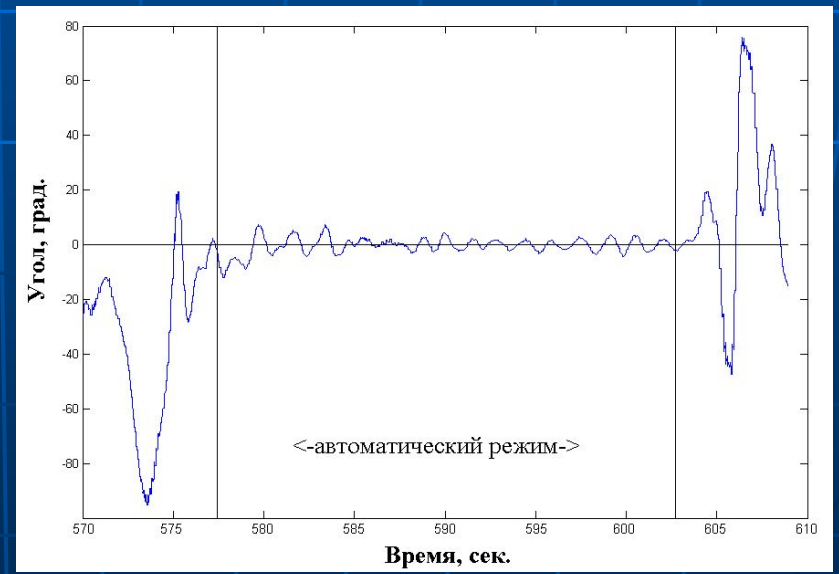
Крен, экспериментальные коэф.



Крен, рассчитанные коэф.

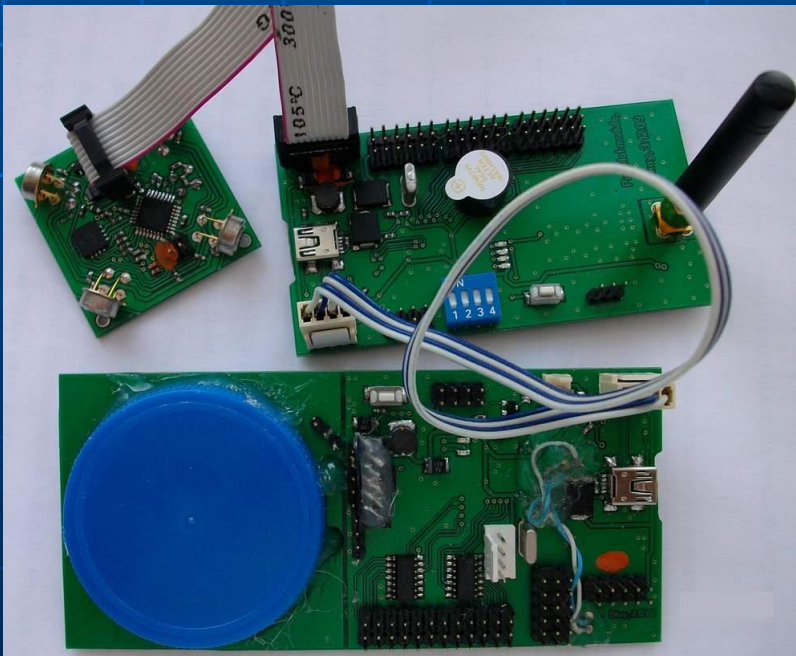


Тангаж, экспериментальные коэф.



Тангаж, рассчитанные коэф.

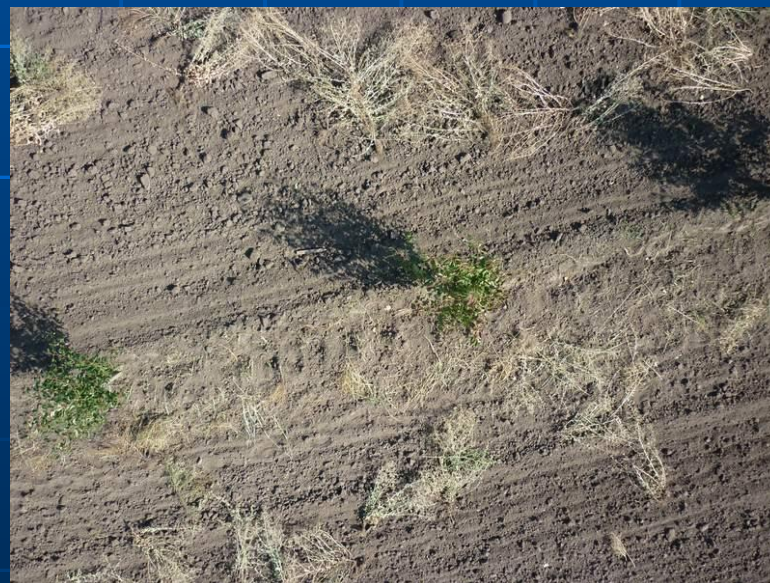
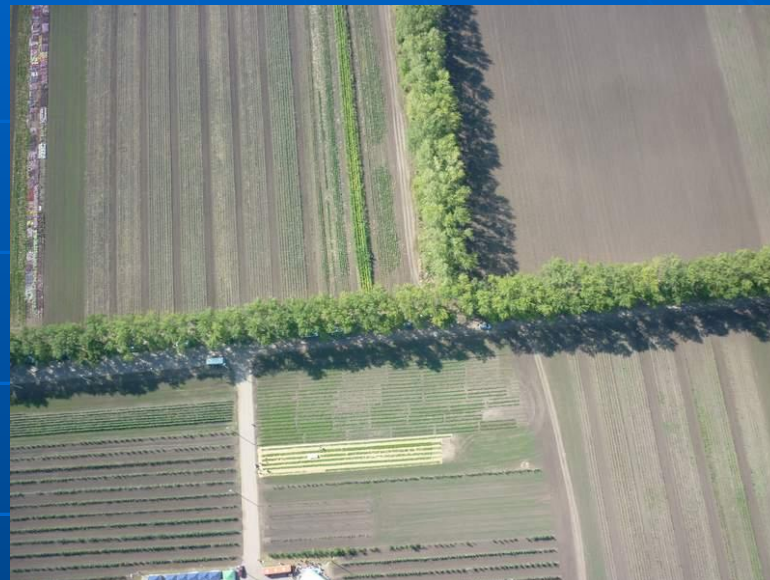
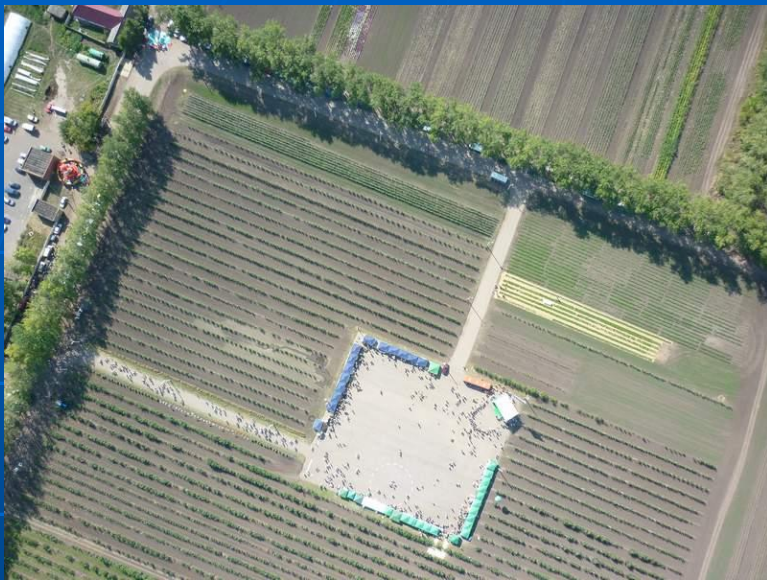
# БПЛА «Беркучи» с ИИС пирометрического типа



- Взлётная масса: до 2 кг\*.
- Масса полезной нагрузки: до 500 гр\*.
- Размах крыльев: 1500 мм\*.
- Масса аппаратуры управления: 105 гр.
- Габариты аппаратуры управления: две платы 45\*60 и 55\*90 мм.
- Время полёта: до 20 минут\*.
- Тип привода: электрический\*.
- Режимы управления: ручной, полуавтоматический, автоматический.

\* Может быть изменено по требованию потребителя

# Аэрофотосъёмка с БПЛА «Беркучи»



Фотографии сельхозугодий с борта БПЛА «Беркучи».

# Аэрофотосъёмка с БПЛА «Беркучи» (Колумбия)



# Результаты:

- Разработана концепция интегрированной модульной авионики (ИМА) с двудерным вычислителем, на основе которой получена сетевая архитектура организации ИМА БПЛА, инвариантная к составу модулей авионики.
- Исследована вертикаль пирометрического типа; получен математический аппарат вычисления углов крена и тангажа на основе показаний пирометрической вертикали.
- Разработаны опытные образцы пирометрической вертикали различного элементного состава; изучены области их применения, показатели точности, шумности и погодные ограничения.
- Разработаны три метода расширения функциональных возможностей пирометрической вертикали путём комплексирования её показаний с датчиком угловой скорости и бесплатформенной системой ориентации, которые позволяют эффективно подавлять шумовую и систематическую составляющую погрешности в сигнале комплексированной системы ориентации на базе пирометрической вертикали, а также эффективно бороться с мощными тепловыми помехами по каналу пирометрической вертикали. Метод мастер-фильтра защищён патентом на полезную модель.
- Разработан метод расширения возможностей пирометрической вертикали путём добавления угла курса в вырабатываемых параметрах введением в конструкцию пирометрической вертикали трёхосевого магнитометра, что упрощает интеграцию пирометрической вертикали в автопилоты, рассчитанные на работу с бесплатформенной системой ориентации. Решение защищено патентом на полезную модель.
- Проанализирован и испытан метод виртуальной продувки планера БПЛА с целью вычисления аэродинамических коэффициентов и получения передаточных коэффициентов автопилотов различной конфигурации.
- Разработан, изготовлен и испытан комплекс БПЛА «Беркучи» для применения в сельском хозяйстве для охраны садов, экологического мониторинга, контроля урожая и обучения персонала. Результаты испытаний комплекса подтвердили достоверность заявленных в диссертации положений и закреплены актом внедрения и протоколом испытаний.