



Влияние возмущений на точность стабилизации при отслеживании маршрутов на поверхности Земли

С. С. Ткачев, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник
Я. В. Маштаков, младший научный сотрудник

Содержание

- Актуальные задачи ДЗЗ
- Построения опорного движения
- Влияние возмущений на качество решения задачи ДЗЗ
- Заключение

Дистанционное зондирование Земли

Космическая съемка решает задачи

- прогноза погоды
- мониторинга окружающей среды
- построения карт
- слежения за объектами инфраструктуры
- разведки



Спутники ДЗЗ



Ресурс-П (ЦСКБ «Прогресс»)

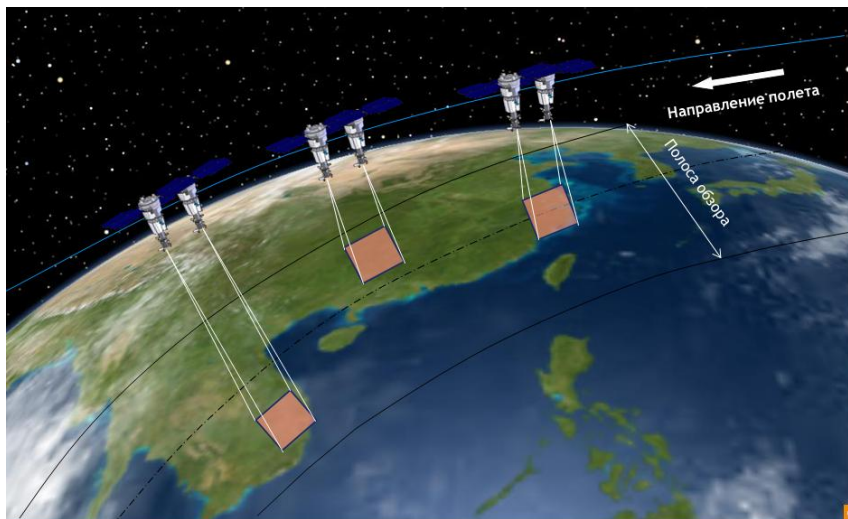
Высота орбиты, км	470-480
Наклонение, градус	97.28
Периодичность наблюдения, сутки	Не более 3
Фокусное расстояние, м	4
Угол поля зрения, градус	5.3
Разрешение в панхроматическом диапазоне, м	1.0
Разрешение в узких спектральных диапазонах, м	3.0-4.0
Полоса захвата, км	38

Высота орбиты, км	618-621
Наклонение, градус	97.98
Периодичность наблюдения, сутки	Не более 1
Фокусное расстояние, м	13.3
Угол поля зрения, градус	1.28
Разрешение в панхроматическом диапазоне, м	0.31
Разрешение в узких спектральных диапазонах, м	1.0-4.0
Полоса захвата, км	13.1



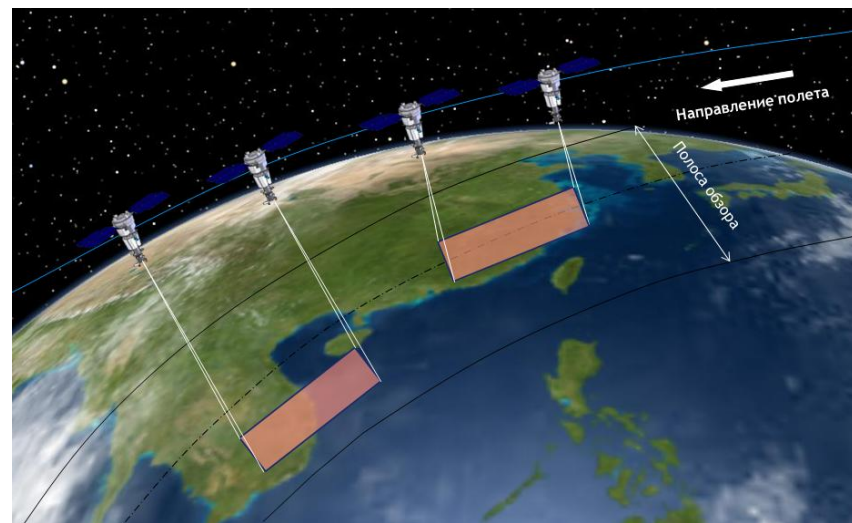
WorldView-3
(Ball Aerospace and Technologies)

Дистанционное зондирование Земли

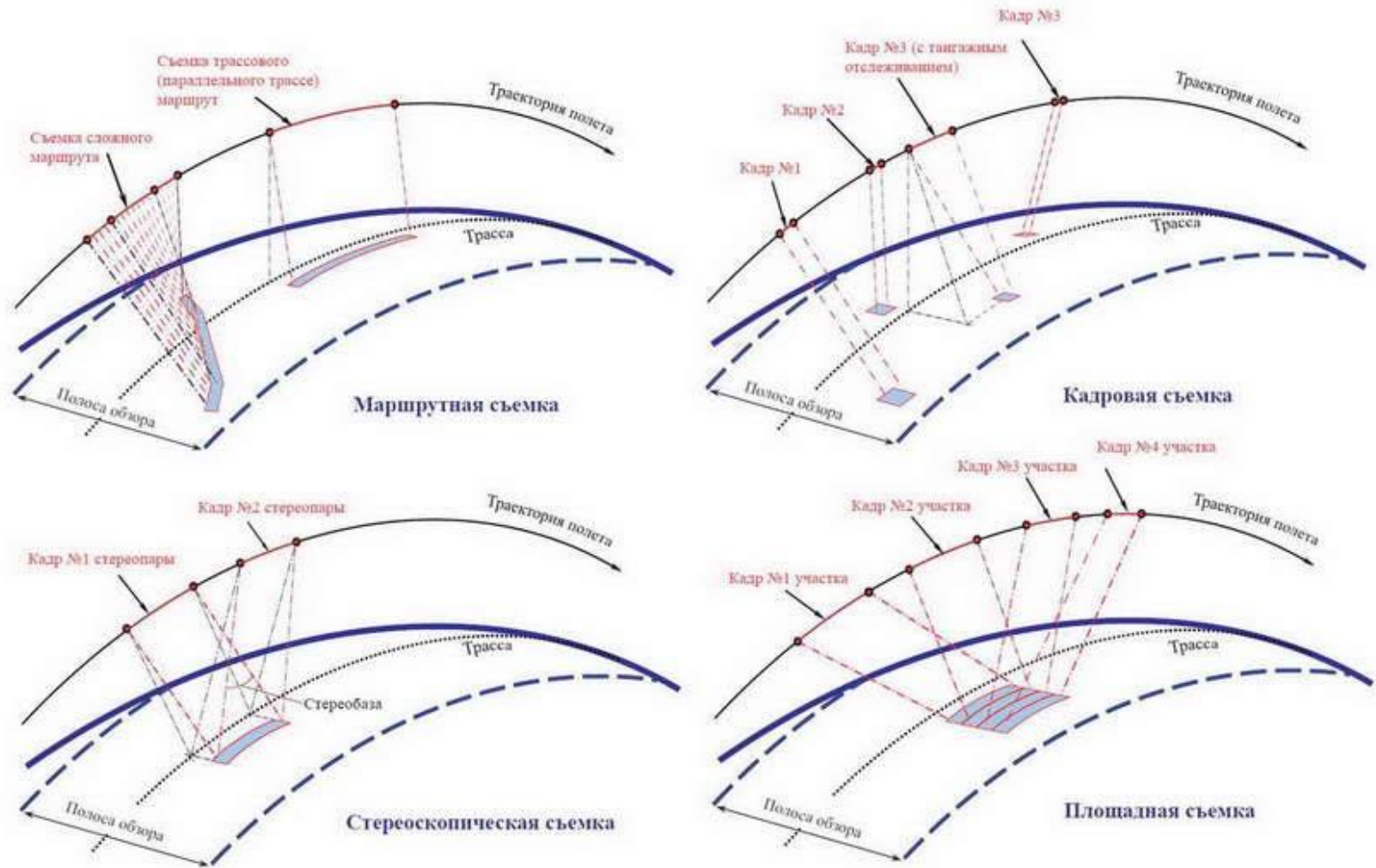


Объектная съемка «Ресурс-П»

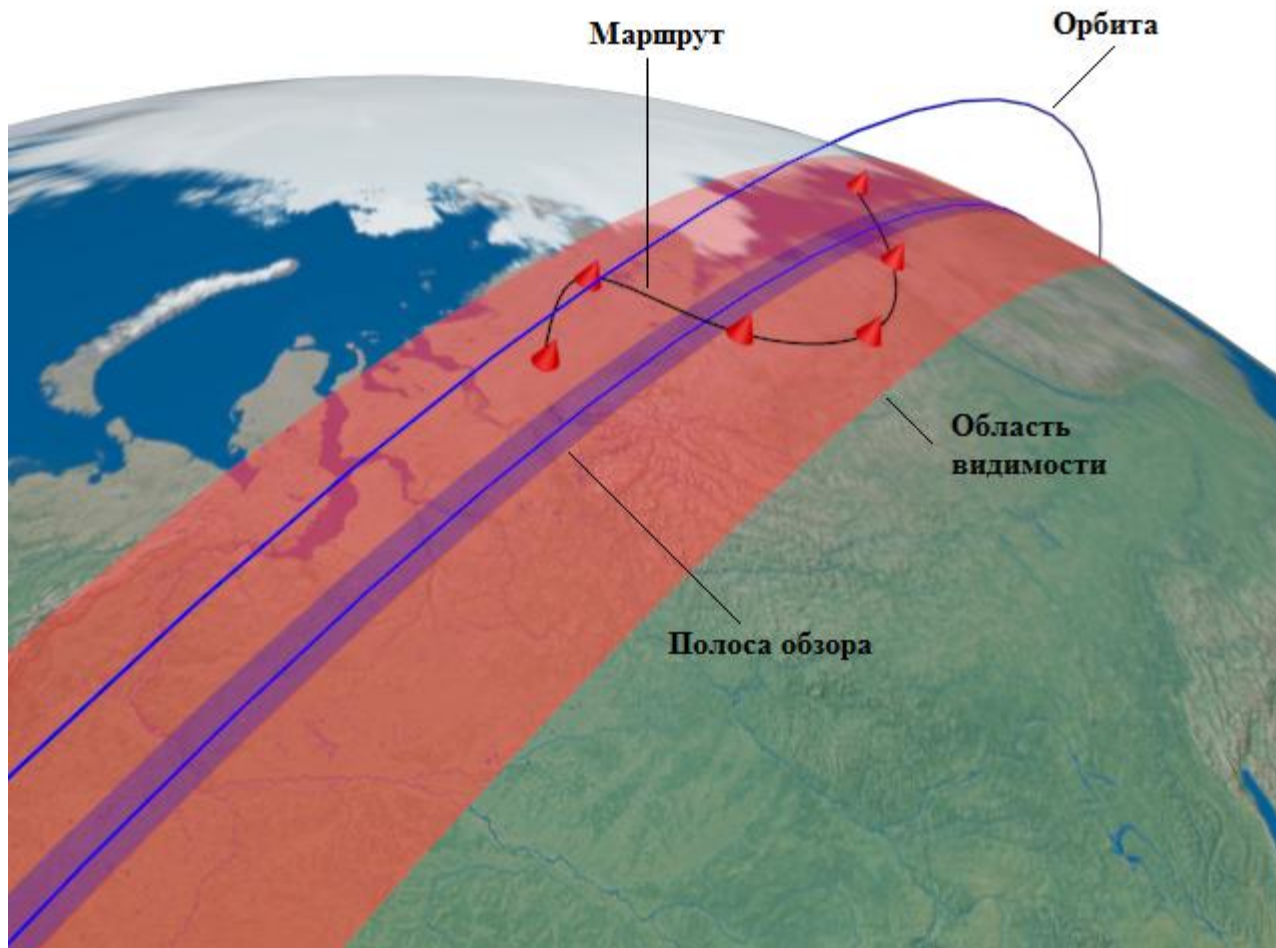
Маршрутная съемка «Ресурс-П»



Виды съемки



Маршрутная съемка



Отслеживание сложных маршрутов на поверхности Земли

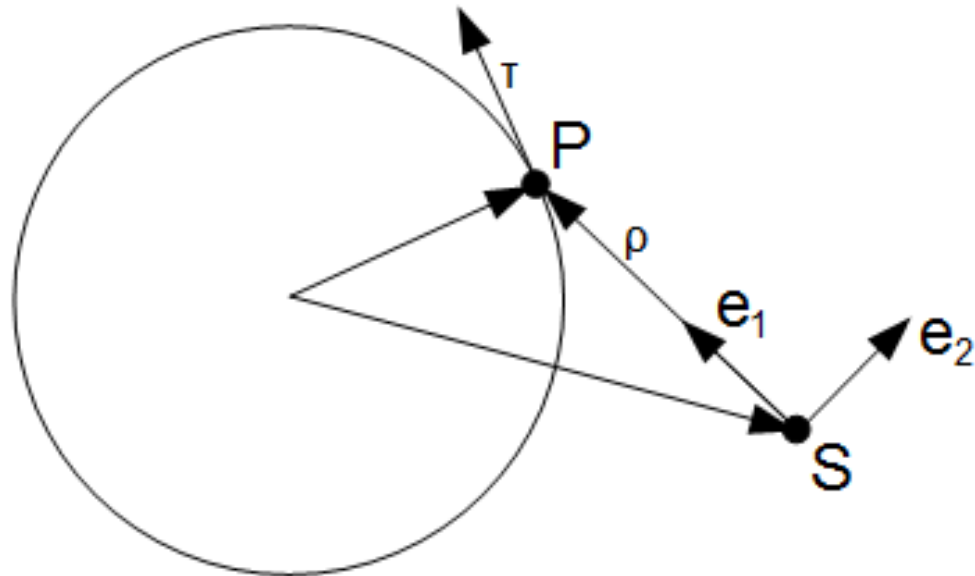
Синтез углового движения

Траектория параметризуется параметром $p(t)$

$$\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s}{\|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s\|} = \frac{\boldsymbol{\rho}}{\rho}, \mathbf{r}_p = \mathbf{r}_p(t, p(t))$$

$$\mathbf{e}_2 = \frac{\boldsymbol{\tau} - \mathbf{e}_1(\mathbf{e}_1, \boldsymbol{\tau})}{\|\boldsymbol{\tau} - \mathbf{e}_1(\mathbf{e}_1, \boldsymbol{\tau})\|}, \boldsymbol{\tau} = \frac{\partial \mathbf{r}_p}{\partial p}$$

$$\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2$$



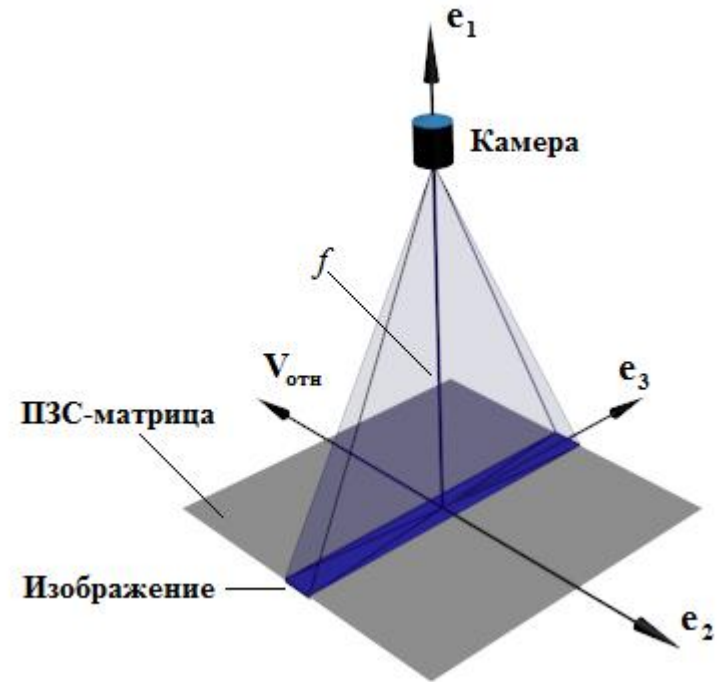
Синтез углового движения

$$(\mathbf{V}_{отн}, \mathbf{e}_3) = 0$$

$$(\mathbf{V}_{отн}, \mathbf{e}_2) = -\frac{V\rho}{f}$$

$$\mathbf{V}_{отн} = \boldsymbol{\Omega}_e \times \mathbf{r}_p - \mathbf{V}_s - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s)$$

$$\rightarrow \begin{cases} \omega_2 = -\frac{(\boldsymbol{\Omega}_e \times \mathbf{r}_p - \mathbf{V}_s, \mathbf{e}_3)}{\rho} \\ \omega_3 = \frac{(\boldsymbol{\Omega}_e \times \mathbf{r}_p - \mathbf{V}_s, \mathbf{e}_2)}{\rho} + \frac{V}{f} \end{cases}$$



Синтез углового движения

Для поиска ω_1 используются уравнения для матриц направляющих косинусов

$$\dot{\mathbf{B}} = \mathbf{WB}, \mathbf{W} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix}$$
$$\mathbf{B} = (\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3)^T, \dot{\mathbf{B}} = (\dot{\mathbf{e}}_1 \quad \dot{\mathbf{e}}_2 \quad \dot{\mathbf{e}}_3)^T$$

В итоге, можно получить одно уравнение на параметр траектории

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\rho(t, p)V}{f} \frac{1}{(\boldsymbol{\tau}(t, p), \mathbf{e}_2(t, p))}$$

Ошибки и качество съемки

Качество съемки

$\delta \mathbf{r}_p$ – ошибка направления на точку обзора (съемка не того, что нужно)

$\delta \mathbf{V}_{отн}$ – ошибка скорость бега изображения («смаз» снимка)

$$\begin{pmatrix} \delta \mathbf{r}_p \\ \delta \mathbf{V}_{отн} \end{pmatrix} = \mathbf{D} \begin{pmatrix} \delta \Psi \\ \delta \omega \\ \delta \mathbf{r}_s \\ \delta \mathbf{V}_s \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{– угловая ошибка (ошибки идентификации + стабилизации)} \\ \text{– ошибка по угловой скорости (идентификация + стабилизация)} \\ \text{– ошибка по орбитальному положению (идентификация)} \\ \text{– ошибка по орбитальной скорости (идентификация)} \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} \delta \Psi \\ \delta \omega \end{pmatrix} \text{ – характеризуют качество работы системы ориентации}$$

Ошибка по направлению

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{r}_p = & \left\{ \mathbf{e}_1 \frac{(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_1)(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_3)}{\sqrt{(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_1)^2 - (\mathbf{r}_s^2 - R^2)}} + \mathbf{e}_1(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_3) - \mathbf{e}_3 t \right\} \delta \alpha + \\ & + \left\{ \mathbf{e}_2 t - \mathbf{e}_1 \frac{(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_1)(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_2)}{\sqrt{(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_1)^2 - (\mathbf{r}_s^2 - R^2)}} - \mathbf{e}_1(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_2) \right\} \delta \beta + \\ & + \left\{ \mathbf{E}_{3 \times 3} - \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T + \frac{\mathbf{e}_1 \mathbf{r}_s^T}{\sqrt{(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_1)^2 - (\mathbf{r}_s^2 - R^2)}} - (\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_1) \frac{\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T}{\sqrt{(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_1)^2 - (\mathbf{r}_s^2 - R^2)}} \right\} \delta \mathbf{r}_s \end{aligned}$$

$$|\delta \mathbf{r}_p| \approx |\delta \mathbf{r}_s| + \rho |\delta \psi|$$

Ошибка по скорости

$$\delta V_{\parallel} = \left| \frac{f}{\rho} \mathbf{e}_3^T \left\{ ([\boldsymbol{\Omega} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega}]_{\times} \mathbf{D}_{1-3,1-3} + [\boldsymbol{\rho}]_{\times} \mathbf{A}^T [\boldsymbol{\omega}]_{\times} \mathbf{N}) \delta \boldsymbol{\psi} + [\boldsymbol{\rho}]_{\times} \mathbf{A}^T \delta \boldsymbol{\omega} + \right. \right.$$

$$\left. + ([\mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega}]_{\times} + [\boldsymbol{\Omega} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega}]_{\times} \mathbf{D}_{1-3,7-9}) \delta \mathbf{r}_s - \delta \mathbf{V}_s \right\} + \frac{f}{\rho} \left\{ (\mathbf{V}_{rel}, \mathbf{e}_1) \delta \alpha - (\mathbf{V}_{rel}, \mathbf{e}_2) \delta \gamma \right\} \Big|$$

$$\delta V_{\perp} = \left| \frac{f}{\rho} \mathbf{e}_2^T \left\{ ([\boldsymbol{\Omega} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega}]_{\times} \mathbf{D}_{1-3,1-3} + [\boldsymbol{\rho}]_{\times} \mathbf{A}^T [\boldsymbol{\omega}]_{\times} \mathbf{N}) \delta \boldsymbol{\psi} + [\boldsymbol{\rho}]_{\times} \mathbf{A}^T \delta \boldsymbol{\omega} + \right. \right.$$

$$\left. + ([\mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega}]_{\times} + [\boldsymbol{\Omega} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega}]_{\times} \mathbf{D}_{1-3,7-9}) \delta \mathbf{r}_s - \delta \mathbf{V}_s \right\} - \frac{f}{\rho} (\mathbf{V}_{rel}, \mathbf{e}_1) \delta \beta -$$

$$\left. + (\mathbf{V}_{rel}, \mathbf{e}_2) \frac{f}{\rho^3} \boldsymbol{\rho}^T \delta \mathbf{r}_s - (\mathbf{V}_{rel}, \mathbf{e}_2) \frac{f}{\rho^3} \boldsymbol{\rho}^T \mathbf{D} \delta \mathbf{x} \right|$$

$$|\delta V| \approx f |\delta \boldsymbol{\omega}|$$

Микроспутник TabletSat

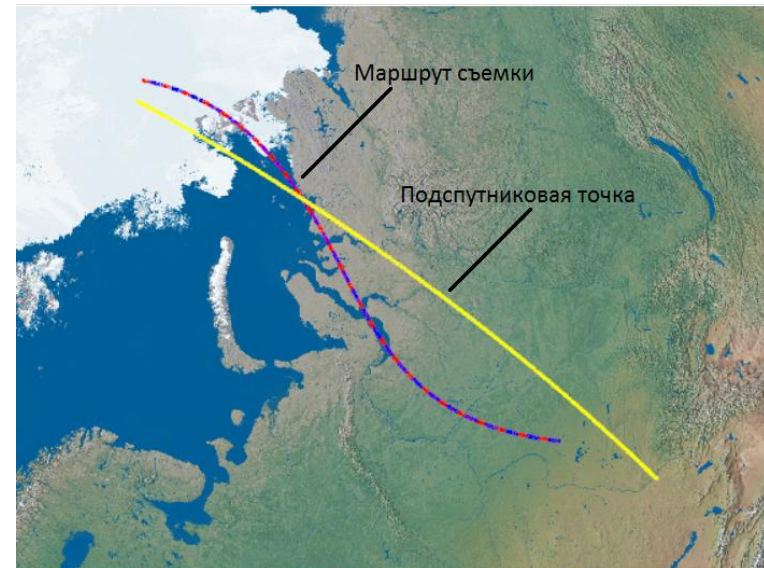
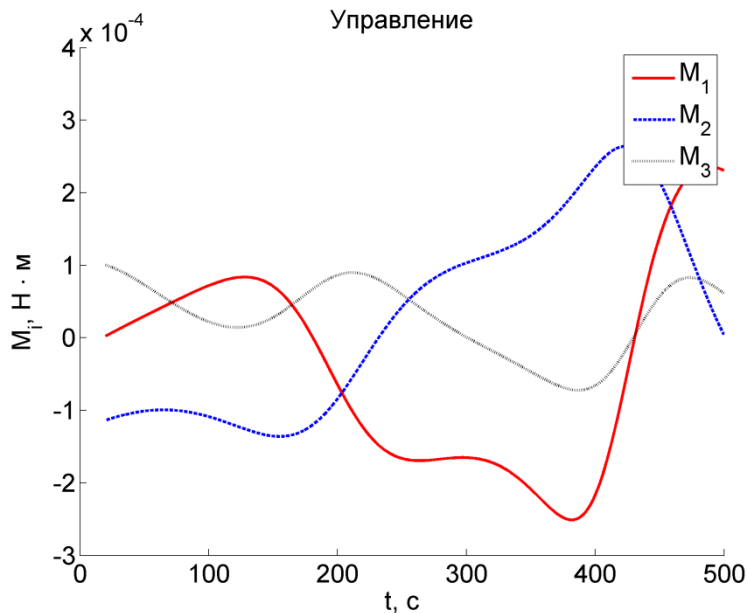
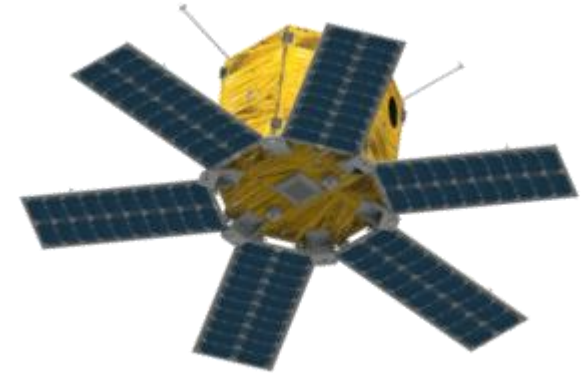
Масса: 26 кг

Перигей: 586.5 км

Апогей: 622.6 км

Разрешение: 15м

Запуск: 19 июня 2014



Микроспутник TabletSat

- Фокусное расстояние: 5920 мм
- Высота орбиты: 400 км
- Время экспозиции: 0.07 мс
- Размер пикселя: 7.4 мкм

Для обеспечения «хорошего» изображения

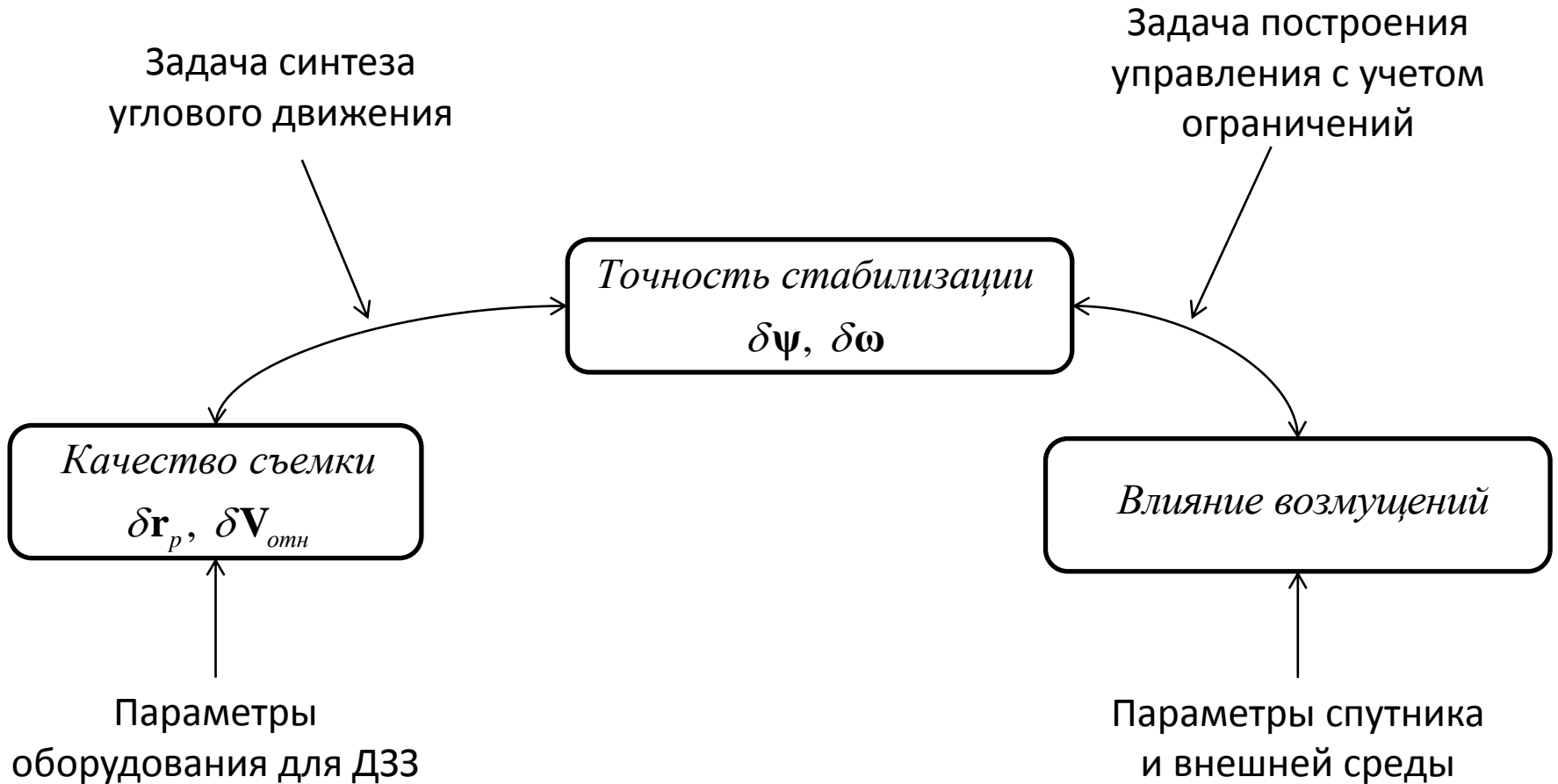
- За время экспозиции съезд изображения на 0.1 пикселя
- Ошибка наведения 10м

Получаемые оценки:

$$\|\delta\omega\| \leq 10^{-3} \text{ рад} / \text{с}$$

$$\|\delta\psi\| \leq 5''$$

Комплексный подход



Заключение

- Предложен алгоритм построения углового движения спутника ДЗЗ
- Проведена верификация предложенного алгоритма с помощью компьютерного моделирования
- Исследовано влияние ошибок определения ориентации и стабилизации на снимаемое изображение