

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОСПУТНИКА
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Ю. О. Кузнецов, О. О. Лабазов

Научно-производческое предприятие «Хартрон-Аркас»

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
МІКРОСПУТНИКА ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ**

Наведені результати дослідження основних факторів, що впливають на точність зйомки заданого району земної поверхні, аналізуються результати чисельних розрахунків.

Ключові слова: система управління, зйомка, зондування, мікросупутник.

Ju. A. Kuznetsov, O. A. Labazov

Scientific production association «Khartron-Arkos»

**INVESTIGATION OF THE PRECISION CHARACTERISTICS OF A MICROSATELLITE
CONTROL SYSTEM FOR THE PURPOSE OF THE REMOTE SENSING OF EARTH**

The results of an investigation of the main factors that have influence on the accuracy of photographing of the given territory of Earth's surface are given in the present paper. The analysis of these results and results of the numerical computation are also presented.

Keywords: control system, photographing, sensing, microsatellite.

В настоящее время все большую актуальность приобретают проблемы разработки высокоточных систем управления (СУ) космическими аппаратами (КА). Одним из наиболее перспективных направлений в области создания космической техники являются микроспутники. Эффективность применения микроспутников и, следовательно, эффективность решаемых ими практических задач существенным образом зависит от технических характеристик СУ аппарата, поэтому требования к точностным и эксплуатационным характеристикам СУ достаточно жесткие. Особенно это относится к микроспутникам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Жовтяк, 2007; Черный, 2008).

Традиционно повышение точности и надежности определения пространственной ориентации КА достигается на основе комплексирования измерителей различного принципа действия и применения принципа инерциальной ориентации. Однако для обеспечения прецизионной ориентации и стабилизации микроспутника ДЗЗ необходимо учитывать большое количество составляющих суммарной погрешности наведения специализированной аппаратуры (СА) на заданный район съемки.

Основным принципом функционирования рассматриваемой СУ является принцип бесплатформенной инерциальной ориентации по информации измерителя угловой скорости (ИУС) с коррекцией по данным астроизмерительной системы (АИС) (Бранец, 1992; Федосеев, 2007). Для определения параметров движения центра масс КА используется информация, формируемая приемником системы глобального позиционирования (GPS).

Работу микроспутника ДЗЗ условно можно разделить на участки:

- гашение угловых скоростей, получаемых микроспутником при его отделении от носителя и начальное построение ориентации спутника в орбитальной системе координат (ОСК) или инерциальной системе координат (ИСК) в течение заданного времени;

- поддержание трехосной ориентации спутника в ОСК (или ИСК) с заданной точностью при выполнении целевой задачи;

- реализация программных поворотов спутника относительно ОСК (или ИСК) на заданные углы и его стабилизация в развернутом положении с заданной точностью при выполнении съемки земной поверхности.

Необходимо определить основные составляющие суммарной погрешности, влияющие на точность съемки заданного района земной поверхности.

На суммарную погрешность наведения СА спутника при съемке влияют:

- ошибки при расчете программных углов спутника в наземном математическом обеспечении;

- ошибки систем навигации, наведения (СНН) и управления ориентацией и стабилизации (СУОС);

- ошибки при формировании снимков и их географической привязки в наземном математическом обеспечении.

Ошибки при расчете программных углов спутника в наземном математическом обеспечении (ошибки знания координат точки съемки в ИСК по широте и долготе) определим по формулам

$$d_{\text{ЛТИСК}} = \sqrt{d\delta_{\text{П}}^2 + d_{\text{лфФ}}^2 + (d\Pi_{\text{E}} S_0)^2 + (\Pi_{\text{E}} dS_0)^2 + d\gamma_{\text{л}}^2},$$

$$d\varphi_{\text{ТИСК}} = \sqrt{d\delta_{\text{П}}^2 + d_{\text{лфФ}}^2 + d\gamma_{\text{ф}}^2},$$

где $d\delta_{\text{П}}$ – ошибка определения координат точки съемки;

$d_{\text{лфФ}} = \frac{dI_{\text{T}}}{R_{\text{E}}}$ – ошибка знания положения точки съемки на земной поверхности в угловой форме;

dI_{T} – ошибка знания координат на земной поверхности известного объекта съемки;

R_{E} – радиус Земли;

$d\Omega_{\text{E}}$ – ошибка знания угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси;

Ω_{E} – угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси;

dS_0 – ошибка времени UTC, используемого в расчете программных углов поворота;

S_0 – время UTC, используемое в расчете программных углов поворота;

$d\gamma_{\lambda}$ – ошибка знания положения точки весеннего равноденствия по долготу;

$d\gamma_{\phi}$ – ошибка знания положения точки весеннего равноденствия по широте.

Формулу для определения ошибки знания координат точки съемки ($d\delta_{\text{П}}$), вызванную высотой места, получим из анализа рис. 1.

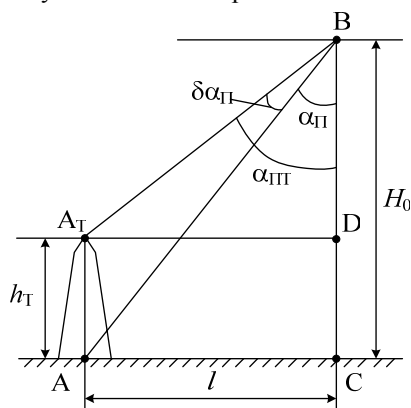


Рис. 1. К определению ошибки знания координат точки съемки, вызванной высотой места

Как следует из рис. 1, эта формула будет иметь вид

$$d\bar{b}_{\Pi} = \bar{b}_{\Pi T} - \bar{b}_{\Pi} = \operatorname{arctg}\left(\frac{H_0 \operatorname{tg} \bar{b}_{\Pi}}{H_0 - h_T}\right) - \bar{b}_{\Pi},$$

где H_0 – высота орбиты КА;

α_{Π} – программный угол для проведения съемки;

h_T – ошибка знания координат объекта съемки по высоте, вызванной принятой моделью формы Земли.

Для преобразования результата из угловой меры в линейную воспользуемся формулами

$$d_{TzT} = R_E \operatorname{tg} d\lambda_{\text{ТИСК}},$$

$$d_{TxT} = R_E \operatorname{tg} d\varphi_{\text{ТИСК}}.$$

Ошибки СНН и СУОС включают в себя:

- ошибки АИС;

- ошибки ИУС;

- ошибку навигационной системы в определении координат КА.

Определим остаточную динамическую ошибку АИС ($\delta_{\text{ДИНО}j}$, $j=x, y, z$).

Вектор ошибки стабилизации по угловой скорости с учетом ошибки знания орбитальной угловой скорости КА запишем в виде

$$\bar{\psi}_C = \begin{pmatrix} \psi_{Cx} \\ d\psi_0 + \psi_{Cy} \\ \psi_{Cz} \end{pmatrix},$$

где ψ_{Cj} – ошибка стабилизации по угловой скорости ($j=x, y, z$);

$$d\psi_0 = \sqrt{\frac{M}{r_d^3}} - \sqrt{\frac{M}{r^3}} \text{ – ошибка знания орбитальной угловой скорости КА;}$$

M – гравитационный параметр Земли;

$r = R_E + H_0$ – высота орбиты КА с учетом радиуса Земли;

R_E – радиус Земли;

H_0 – высота орбиты КА;

$r_{\delta} = r - \delta S_z$ – высота орбиты КА с учетом радиуса Земли и ошибки знания координат КА;

δS_z – ошибка знания координат КА.

Определим матрицу перехода от базовой системы координат (БСК) к приборной системе координат (ПСК) АИС:

$$M_{\text{АИСУСТ}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda_{\text{УСТ}} & \sin \lambda_{\text{УСТ}} \\ 0 & -\sin \lambda_{\text{УСТ}} & \cos \lambda_{\text{УСТ}} \end{pmatrix},$$

где $\lambda_{\text{УСТ}}$ – угол установки АИС.

Проекция вектора ошибки стабилизации по угловой скорости с учетом ошибки знания орбитальной угловой скорости КА на оси ПСК АИС представим в виде

$$\bar{\psi}_A = M_{\text{АИСУСТ}} \cdot \bar{\psi}_C.$$

Остаточную динамическую ошибку АИС определим по формуле

$$d_{\text{ДИНО}j} = \psi_{Aj} \cdot T_{\text{ИУС}},$$

где $T_{\text{ИУС}}$ – такт опроса ИУС.

Определим ошибку измерения АИС с учетом остаточной динамической ошибки:

$$d_{\text{ИА}j} = \sqrt{d_{\text{ИА}j}^2 + d_{\text{ДИНО}j}^2}, \quad (j=x, y, z)$$

где $d_{\text{ИА}j}$ – ошибка измерений АИС в канале j .

Ошибку определения ПСК АИС относительно ОСК определим по формуле

$$d_{\text{ПО}j} = \sqrt{d_{\text{ИАД}j}^2 + d_{\text{ОИ}j}^2}, \quad (j=x, y, z),$$

где $d_{\text{ОИ}j} = \frac{dS_j}{R_E + H_0}$;

dS_j – ошибка навигационной системы в определении координат КА;

R_E – радиус Земли;

H_0 – высота орбиты КА.

Ошибку БСК относительно ОСК по измерениям АИС представим в виде

$$\bar{d}_{\text{БО}} = M_{\text{АИСУСТ}}^T \cdot \bar{d}_{\text{ПОУ}},$$

где $d_{\text{ПОУ}j} = \sqrt{d_{\text{ПО}j}^2 + d_{\text{АИСУСТ}j}^2 + d_{\text{АИСУ}0j}^2}, \quad (j=x, y, z)$;

$d_{\text{АИСУСТ}j}$ – ошибка измерения угла установки АИС в канале j ;

$d_{\text{АИСУ}0j}$ – отклонение угла установки АИС в канале j от номинального положения за время эксплуатации.

Ошибку установки ИУС определим по формуле

$$d_{\text{ИУСУС}j} = \sqrt{d_{\text{ИУСУСТ}j}^2 + d_{\text{ИУСУ}0j}^2}, \quad (j=x, y, z),$$

где $d_{\text{ИУСУСТ}j}$ – ошибка измерения угла установки ИУС в канале j ;

$d_{\text{ИУСУ}0j}$ – отклонение угла установки ИУС в канале j от номинального положения за время эксплуатации.

Ошибку ИУС определим в виде

$$d_{\text{ш}j} = \sqrt{d_{\text{ш}xj}^2 + d_{\text{ш}y\text{СТ}j}^2}, \quad (j=x, y, z),$$

где $d_{\text{шУСТ}x} = \psi_0 (d_{\text{ИУСУС}z} \cos \varphi_{\text{П}} + d_{\text{ИУСУС}y} \sin \varphi_{\text{П}})$;

$$d_{\text{шУСТ}y} = \psi_0 (d_{\text{ИУСУС}x} \sin \varphi_{\text{П}});$$

$$d_{\text{шУСТ}z} = \psi_0 (d_{\text{ИУСУС}x} \cos \varphi_{\text{П}});$$

$d_{\omega_{\text{УСТ}j}}$ – ошибка измерений ИУС в канале j , вызванная остаточной погрешностью установки прибора на КА;

$d_{\omega_{\text{ух}j}}$ – уход ИУС в канале j ;

ω_0 – орбитальная угловая скорость;

$\varphi_{\text{П}}$ – программный угол для проведения съемки.

Ошибку определения ориентации БСК относительно ОСК в БИНС представим в виде

$$d\varphi = (d_{\text{ш}x} + d_{\text{ш}y}) T_{\text{С}} + d_{\text{БО}x},$$

$$d\chi = (d_{\text{ш}y} + d_{\text{ш}z}) T_{\text{С}} + d_{\text{БО}y},$$

$$d\psi = (d_{\text{ш}z} + d_{\text{ш}x}) T_{\text{С}} + d_{\text{БО}z},$$

где $d\omega_0$ – ошибка знания орбитальной угловой скорости КА;

$T_{\text{С}}$ – длительность съемки;

$d_{\text{БО}j}$ – ошибка БСК относительно ОСК по измерениям АИС, $(j=x, y, z)$.

Определим ошибку определения ориентации СА относительно ОСК в БИНС:

$$d\varphi_{\text{ОР}} = \sqrt{d\varphi^2 + d_{\text{САУСТ}x}^2},$$

$$d\psi_{\text{ОР}} = \sqrt{d\psi^2 + d_{\text{САУСТ}y}^2},$$

где $d_{\text{САУСТ}j}$ – ошибка угла установки в канале j специализированной аппаратуры в БСК, $(j=x, y, z)$.

Ошибку наведения СА с учетом ошибки стабилизации определим по формулам

$$d\varphi_{\text{ОС}} = \sqrt{d\varphi_{\text{ОР}}^2 + d\varphi_{\text{СТ}}^2},$$

$$d\psi_{\text{ОС}} = \sqrt{d\psi_{\text{ОР}}^2 + d\psi_{\text{СТ}}^2},$$

где $d\varphi_{\text{СТ}} = \frac{\psi_{\text{ЦХ}}^2 I_x}{2M_{\text{УПР}x}}$;

$$d\nu_{CT} = \frac{\psi_{ЦУ}^2 I_y}{2M_{УПРy}};$$

$\psi_{ЦУ}$ – ошибка стабилизации по угловой скорости в канале j , ($j=x, y, z$);

$M_{УПРj}$ – управляющий момент маховика в канале j ;

I_j – момент инерции КА в канале j .

Для преобразования результата из угловой меры в линейную воспользуемся формулами

$$d_{OzT} = H_0 \operatorname{tg} d\varphi_{OC},$$

$$d_{OxT} = H_0 \operatorname{tg} d\nu_{OC}.$$

Ошибку, вызванную запаздыванием аннотационной информации, представим в виде

$$d\varphi_{A\Phi} = \psi_{Цx} \Phi_{АНИ},$$

$$d\chi_{A\Phi} = (\psi_{Цy} + \psi_0) \Phi_{АНИ},$$

где $\psi_{Цj}$ – ошибка стабилизации по угловой скорости, ($j=x, y, z$);

$\Phi_{АНИ}$ – запаздывание в передаче аннотационной информации.

Для преобразования результата из угловой меры в линейную воспользуемся формулами

$$d_{HzT} = H_0 \operatorname{tg} d\varphi_{A\Phi},$$

$$d_{HxT} = H_0 \operatorname{tg} d\chi_{A\Phi}.$$

Определим суммарную погрешность определения ориентации спутника при съемке по формуле

$$d_{jT} = \sqrt{d_{TjT}^2 + d_{OjT}^2 + d_{HjT}^2}, \quad (j=x, z)$$

где δ_{TjT} – ошибка знания координат точки съемки в ИСК в канале j ;

δ_{OjT} – ошибка наведения СА с учетом ошибки стабилизации в канале j ;

δ_{HjT} – ошибка, вызванная запаздыванием аннотационной информации в канале j .

Исходные данные для расчета погрешности ориентации спутника при съемке приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета погрешности ориентации спутника при съемке

Наименование параметра	Имя параметра	Значение	Размерность	Примечание
Высота орбиты КА	H_0	670000	м	
Программный угол	$\alpha_{п}, \varphi_{п}$	35	град	
Ошибка знания координаты объекта съемки по высоте, вызванной принятой моделью формы Земли	h_T	200	м	
Ошибка знания координат на земной поверхности известного объекта съемки	δl_T	5	м	
Ошибка знания положения точки весеннего равноденствия по долготе	$\delta \gamma_\lambda$	0,00001	рад	
Ошибка знания положения точки весеннего равноденствия по широте	$\delta \gamma_\varphi$	0,00001	рад	
Ошибка знания угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси	$\delta \Omega_E$	$1 \cdot 10^{-9}$	рад/с	
Угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси	Ω_E	$7,292 \cdot 10^{-5}$	рад/с	
Ошибка времени UTC, используемого в расчете	δS_0	0,1	с	

Наименование параметра	Имя параметра	Значение	Размерность	Примечание
программных углов поворота				
Время UTC, используемое в расчете программных углов поворота	S_0	43200	с	
Ошибка стабилизации по угловой скорости в канале j	$\omega_{\Omega j}$	0,005	град/с	$j=x, y, z$
Гравитационный параметр Земли	μ	$398602 \cdot 10^9$	$\text{м}^3/\text{с}^2$	
Угол установки АИС	$\lambda_{\text{УСТ}}$	49	град	
Такт опроса ИУС	$T_{\text{ИУС}}$	0,1	с	
Ошибка навигационной системы в определении координат КА в канале j	δS_j	45	м	$j=x, y, z$
Радиус Земли	R_E	6371000	м	
Ошибка измерения угла установки АИС в канале j	$\delta_{\text{АИСУСТ}j}$	36	угл.с	$j=x, y, z$
Отклонение угла установки АИС в канале j от номинального положения за время эксплуатации	$\delta_{\text{АИСУО}j}$	60	угл.с	$j=x, y, z$
Ошибка измерения угла установки ИУС в канале j	$\delta_{\text{ИУСУСТ}j}$	300	угл.с	$j=x, y, z$
Отклонение угла установки ИУС в канале j от номинального положения за время эксплуатации	$\delta_{\text{ИУСУО}j}$	300	угл.с	$j=x, y, z$
Уход ИУС в канале j	$\delta \omega_{\text{ИУС}j}$	0,2	град/ч	$j=x, y, z$
Орбитальная угловая скорость	ω_0	0,0010686	рад/с	
Длительность съемки	T_C	10	с	
Ошибка угла установки в канале j специализированной аппаратуры в БСК	$\delta_{\text{САУСТ}j}$	180	угл.с	$j=x, y, z$
Управляющие моменты маховика	$M_{\text{УПР}x}$	0,015	Нм	
	$M_{\text{УПР}y}$	0,015	Нм	
	$M_{\text{УПР}z}$	0,015	Нм	
Моменты инерции КА	I_x	16,6	Нмс^2	
	I_y	18,0	Нмс^2	
	I_z	13,6	Нмс^2	
Запаздывание в передаче аннотационной информации	$\tau_{\text{АНИ}}$	0,3	с	

В табл. 2 представлены результаты расчетов по исходным данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 2

Результаты расчетов

Наименование параметра	Имя параметра	Значение	Размерность	Примечание
Ошибка знания координат точки съемки в ИСК в канале z, x	$\delta_{\text{Т}z\text{T}}$	938,4791	м	Ошибки при расчете программных углов спутника в наземном математическом обеспечении
	$\delta_{\text{Т}x\text{T}}$	896,0104	м	
Ошибка наведения СА с учетом ошибки стабилизации в каналах z, x	$\delta_{\text{О}z\text{T}}$	643,5909	м	Ошибки СНН и СУОС
	$\delta_{\text{О}x\text{T}}$	603,0257	м	
Ошибка, вызванная запаздыванием аннотационной	$\delta_{\text{Н}z\text{T}}$	17,54056 232,3307	м м	

Наименование параметра	Имя параметра	Значение	Размерность	Примечание
информации в каналах z, x	$\delta_{\text{НГТ}}$			
Суммарная погрешность определения ориентации спутника при съемке в каналах z, x	δ_{zT}	1138,095	м	Суммарная погрешность определения ориентации спутника при съемке
	δ_{xT}	1104,741	м	

Как показали исследования, наибольшее влияние на суммарную погрешность ориентации спутника при съемке оказывают программный угол для проведения съемки и ошибки знания координаты объекта съемки по высоте, вызванной принятой моделью формы Земли. Графическая интерпретация зависимости суммарной погрешности ориентации спутника при съемке в каналах z, x от программного угла для проведения съемки и ошибки знания координаты объекта съемки по высоте, вызванной принятой моделью формы Земли, представлена на рис. 2, 3.

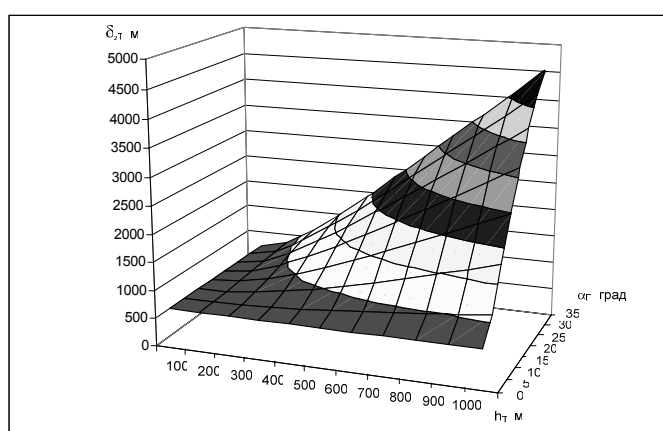


Рис. 2. Графическая интерпретация зависимости суммарной погрешности ориентации спутника при съемке в канале z от программного угла для проведения съемки и ошибки знания координаты объекта съемки по высоте, вызванной принятой моделью формы Земли

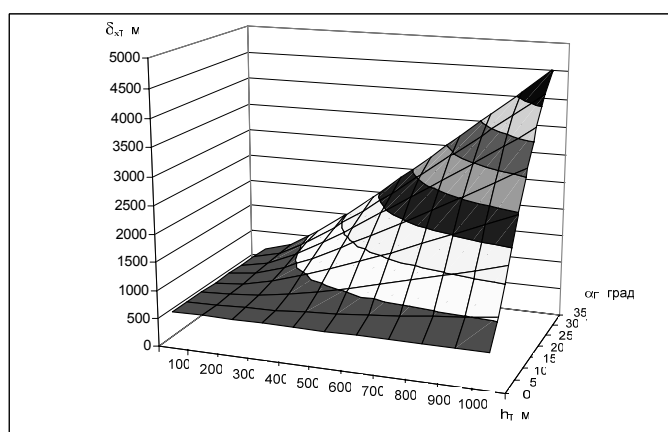


Рис. 3. Графическая интерпретация зависимости суммарной погрешности ориентации спутника при съемке в канале x от программного угла для проведения съемки и ошибки знания координаты объекта съемки по высоте, вызванной принятой моделью формы Земли

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований были определены основные факторы, влияющие на суммарную погрешность ориентации спутника при съемке:

- ошибки при расчете программных углов спутника в наземном математическом обеспечении;
- ошибка измерений АИС;
- ошибки установки АИС, ИУС, СА на спутнике;
- динамическая ошибка, вызванная запаздыванием (периодом обновления информации) в выдаче информации из АИС;
- уход ИУС;
- ошибка, вызванная запаздыванием аннотационной информации.

Из результатов расчетов видно, что основными составляющими в суммарной погрешности ориентации спутника при съемке являются ошибки при расчете программных углов спутника в наземном математическом обеспечении. Наибольшее влияние на величину этих ошибок оказывают программный угол для проведения съемки ($\alpha_{П}$) и ошибка знания координат объекта съемки по высоте, вызванная принятой моделью формы Земли (h_T). Таким образом, проведение съемки земной поверхности с учетом модели рельефа местности практически всегда является необходимым условием получения снимков высокой точности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Бранец В. Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1992. – 280 с.

Черный И. Интерес к малым спутникам растет / И. Черный, Л. Розенблюм // Новости космонавтики. – 2008. – Т. 18, № 3 (302). – С. 71.

Федосеев В. И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – М.: Логос, 2007. – 248 с.

Жовтяк В. Д. Американские космические системы дистанционного зондирования Земли / В. Д. Жовтяк и др. – Д.: ГП «КБ «Южное», 2007. – 55 с.

Надійшла до редколегії 19.06.08