

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОГРАММ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ СЪЕМКЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В РЕЖИМЕ ПЛОЩАДНОЙ СЪЕМКИ

О. В. Луць¹, Г. А. Борщева¹, Е. Д. Ярмольчук¹, А. А. Манойленко²

¹Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное»
имени М. К. Янгеля», ул. Криворожская 3, г. Днепр,
49008, Украина, e-mail: aparel@meta.ua

²Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина 72, г. Днепр,
49010, Украина, e-mail: aamz5@meta.ua

Анотація. В даний час зріс інтерес до космічних знімків поверхні Землі з високою роздільною здатністю на місцевості (від 1 до 10 м). Для отримання таких знімків необхідно використовувати довгофокусні оптичні системи (ОС), що мають обмежене поле зору, що не дозволяє проводити зйомку ділянок великої ширини. Для підвищення ефективності зйомки в сучасних космічних системах (КС) спостереження Землі передбачається можливість після закінчення зйомки однієї ділянки поверхні Землі перенацілювати ОС на іншу ділянку та провести його зйомку. При достатній швидкості перенацілення ОС можливе проведення зйомки двох і більш суміжних ділянок, що практично еквівалентно відповідного збільшення ширини поля огляду знімаючої апаратури. У зв'язку з цим виникає завдання наведення ОС, яке вирішується використанням відповідних технічних і програмних засобів керування кутовим рухом знімаючої апаратури. При створенні КС виникає також необхідність вирішення наступних задач: розрахунок програми кутового руху космічного апарату (КА) при заданій довжині знімаючих ділянок і заданому числі суміжних смуг, що підлягають зйомці, з метою визначення вимог до системи керування КА, а також розрахунок при заданих характеристиках системи орієнтації КА можливого числа і максимальної довжини знімаючих суміжних ділянок поверхні Землі. Для вирішення цих завдань необхідна математична модель програмного кутового руху КА. Наведено необхідні вихідні дані, математична модель і методика розрахунку кінематичних параметрів програмного кутового руху КА в режимі площинної трасової зйомки суміжних ділянок поверхні Землі, розташованих на заданій відстані від сліду траси КА; приклади і результати чисельних розрахунків програм кутового руху КА при наведенні апаратури дистанційного зондування.

Ключові слова: КОСМІЧНИЙ АПАРАТ, ПЛОЩИННА ЗЙОМКА, КУТОВИЙ РУХ.

Аннотация. Приведены необходимые исходные данные, математическая модель и методика расчета кинематических параметров программного углового движения космического аппарата (КА) в режиме площадной трассовой съемки смежных участков поверхности Земли, расположенных на заданном расстоянии от следа трассы КА; примеры и результаты численных расчетов программ углового движения КА при наведении аппаратуры дистанционного зондирования. Наведение ОС осуществляется за счет движения КА вокруг центра масс с помощью электромаховичных двигателей.

Ключевые слова: КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ПЛОЩАДНАЯ СЪЕМКА, УГЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ.

Abstract. Currently increased interest in satellite images of the Earth's surface with high resolution terrain (1 to 10 m). To obtain such images, you must use a long focus optical system (OS) having a limited field of view that does not allow the images of the large width. To increase the effectiveness of shooting in modern space systems (SS) Earth observation provides the opportunity after shooting a segment of the Earth's surface to redirect the OS to another area and spend it shooting. With sufficient speed shift OS it is possible to survey two or more adjacent parcels, which is almost equivalent to the corresponding increase in the width of the field of view of the removing apparatus. In this connection there is the task of restoring the OS, which is solved by the use of appropriate hardware and software control the angular movement of the removing apparatus. When creating the SS there is also the need to solve the following tasks: calculation of the program angular motion in a given length of the removable sections and a predetermined number of adjacent strips to be shot, with the purpose of definition of system requirements, spacecraft (SC) control and calculation under given characteristics of the system orientation of the SC possible number of the maximum length and remove adjacent portions of the surface of the Earth. To solve these tasks the mathematical model software of angular motion of the SC. Given the necessary initial data, mathematical model and method of calculation of kinematic parameters of a software angular motion of a SC in the mode of area highway shooting adjacent sections of the Earth's surface located at a predetermined distance from a trace route SC; examples and results of numerical calculations of the programmes angular motion by moving the instrument in remote sensing.

Key words: SPACECRAFT, AREAL SHOOTING, ANGULAR MOTION.

Введение

Одним из перспективных направлений в области ДЗЗ является создание космических систем (КС), включающих в свой состав несколько космических аппаратов (КА),

В настоящее время отмечается возрастание интереса к космическим снимкам поверхности Земли с высоким разрешением на местности (от 1 м до 10 м). Для получения снимков с таким разрешением необходимо использовать длиннофокусные оптические системы. Такие системы практически всегда имеют ограниченное (узкое) поле зрения, что не позволяет проводить съемку участков (полос) большой ширины.

Поэтому для повышения эффективности съемки в современных космических системах наблюдения Земли предусматривается возможность после окончания съемки одного участка поверхности Земли перенацеливать оптическую систему на другой снимаемый участок, и провести съемку другого участка [1; 2; 7–9].

В частности, КС "Січ-2М" и "Січ-2-1" предполагают обеспечение режима площадной съемки. При достаточной скорости перенацеливания возможно проведение съемки двух и более смежных участков, что практически эквивалентно соответственному увеличению ширины поля обзора снимающей аппаратуры.

В связи с этим возникает задача наведения оптической системы, которая решается с использованием соответствующих технических и программных средств управления угловым движением снимающей аппаратуры.

При создании КС возникает необходимость решения следующих задач [3 – 6]:

- расчет программы углового движения космического аппарата при заданной длине снимаемых участков и заданном числе смежных полос, подлежащих съемке, с целью определения требований к системе управления КА;

- расчет при заданных характеристиках системы ориентации КА

возможного числа и максимальной длины снимаемых смежных участков поверхности Земли.

Для решения этих задач необходимо, прежде всего, разработать математическую модель углового движения КА при съемке смежных участков поверхности Земли.

Постановка задачи

Объекты наблюдения с точки зрения планирования работы целевой аппаратуры КА можно разделить на точечные и площадные. Точечный объект имеет небольшие размеры и его снимок можно получить за один пролет КА. Для съемки площадного объекта необходимо несколько пролетов КА, в ходе которых будет получено множество смежных снимков, целиком покрывающих заданный район наблюдения.

Целью настоящей работы является разработка информационной технологии (математической модели, методики и программы моделирования) процесса перенацеливания оптической системы для проведения съемки смежных участков поверхности Земли.

Разработка методики проводилась для проектируемых КС "Січ-2-1" и "Січ-2М", в которых наведение оптических систем предполагается осуществлять за счет движения КА вокруг центра масс с помощью электромаховичных двигателей. Принцип площадной съемки заключается в последовательном получении на одном витке орбиты изображений двух смежных участков поверхности Земли, соприкасающиеся стороны которых расположены вдоль трассы КА.

Введем следующие понятия: дальний участок – участок, расположенный левее ближнего участка (когда участки находятся слева от трассы КА) и, соответственно, дальний участок – участок, расположенный правее ближнего участка (когда участки находятся справа от трассы КА). Расположение участков показано на рис. 1.

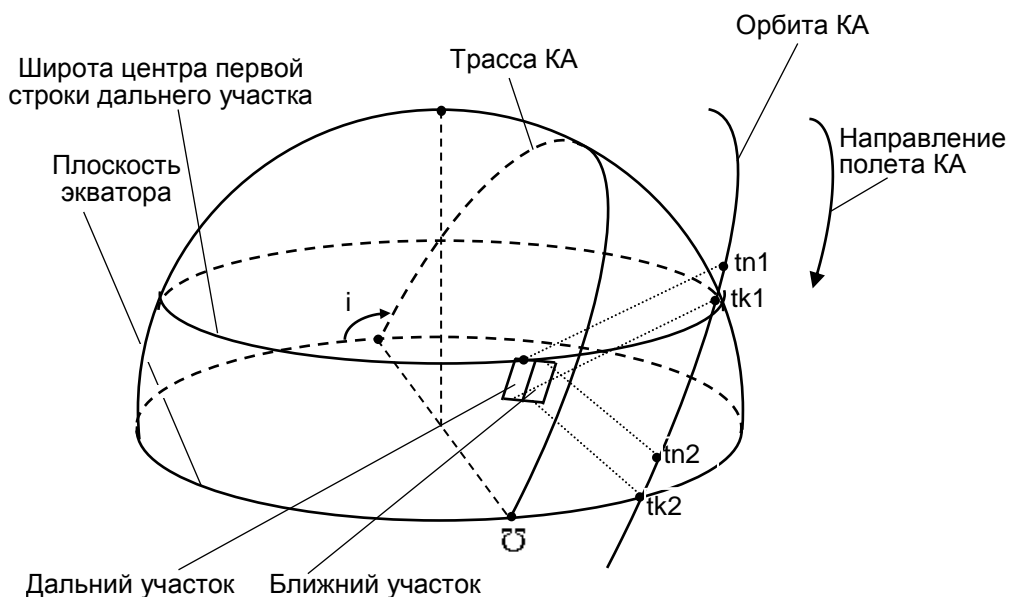


Рисунок 1 – Расположение участков съемки

Обозначим: $tn1$, $tk1$ – моменты времени, соответствующие началу и концу получения первого изображения; $tn2$, $tk2$ – моменты времени, соответствующие началу и концу получения второго изображения; t_z – момент времени, соответствующий минимальному угловому расстоянию между радиус-вектором КА и радиус-вектором дальнего участка.

Исходные положения и допущения

При разработке методики расчета кинематических параметров программного движения КА вокруг центра масс использованы следующие исходные положения и допущения:

- время отсчитывается от момента прохождения КА восходящего узла орбиты, на котором производится съемка;

- изображение двух смежных участков поверхности Земли, соприкасающиеся стороны которых расположены вдоль трассы КА, формируется путем последовательного получения двух изображений участков поверхности Земли из различных точек одного и того же витка орбиты КА;

- при расчете программ углового движения КА учитывается смещение снимаемого участка за счет вращения Земли;

- при расчете времени получения каждого изображения составляющая линейной скорости движения КА относительно снимаемого участка за счет вращения Земли принимается постоянной;

- каждое изображение участков формируется за счет орбитального движения КА путем последовательного получения строк изображения с помощью линейки чувствительных элементов;

- оптическая система аппаратуры дистанционного зондирования Земли жестко связана с КА, а ее наведение для площадной съемки осуществляется программным движением КА вокруг центра масс;

- при съемке каждого изображения углы тангажа, крена, рыскания остаются постоянными;

- в качестве модели Земли принята сфера радиусом 6371 км;

- Земля вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью;

- движение центра масс КА по орбите считается равномерным.

Для описания движения КА вокруг центра масс используются следующие правые системы координат.

Связанная система координат (ССК) $Ox_c y_c z_c$. Начало координат O совпадает с центром масс КА. Ось Oz_c направлена в сторону ракеты-носителя, ось Ox_c направлена в сторону полуплоскости стабилизации I , ось Oy_c дополняет систему координат до правой.

Орбитальная система координат (ОСК) $Ox_Oy_Oz_O$. Начало координат O совпадает с центром масс КА. Ось Oz_O направлена по радиус-вектору, соединяющему центр масс Земли с центром масс КА, ось Ox_O лежит в плоскости орбиты КА и направлена в сторону орбитального движения, ось Oy_O дополняет ОСК до

$$\begin{aligned} C_{11} &= \cos \vartheta \cos \psi + \sin \vartheta \sin \varphi \sin \psi, C_{12} = \cos \varphi \sin \psi, C_{13} = -\sin \vartheta \cos \psi + \cos \vartheta \sin \varphi \sin \psi, \\ C_{21} &= -\cos \vartheta \sin \psi + \sin \vartheta \sin \varphi \cos \psi, C_{22} = \cos \varphi \cos \psi, C_{23} = \sin \vartheta \sin \psi + \cos \vartheta \sin \varphi \cos \psi, \\ C_{31} &= \sin \vartheta \cos \varphi, C_{32} = -\sin \varphi, C_{33} = \cos \vartheta \cos \varphi. \end{aligned}$$

При нулевых углах тангажа, крена и рыскания направления соответствующих осей ОСК и ССК совпадают. Производится съемка участков, расположенных вдоль трассы КА. При съемке дальнего и ближнего участков КА аппарат находится не над снимаемыми участками, а на некотором расстоянии от них. Для описания положения центра проекции на местность какой-либо строки изображения снимаемого участка поверхности Земли, используются следующие правые системы координат.

Гринвичская система координат (ГСК) $O_GX_GY_GZ_G$. Начало координат O_G

$$\left. \begin{aligned} B_{11} &= -\cos(\lambda_\Omega(t))\sin(u(t)) - \sin(\lambda_\Omega(t))\cos(i)\cos(u(t)), \\ B_{12} &= -\sin(\lambda_\Omega(t))\sin(u(t)) + \cos(\lambda_\Omega(t))\cos(i)\cos(u(t)), \\ B_{13} &= \sin(i)\cos(u(t)), \\ B_{21} &= \sin(\lambda_\Omega(t))\sin(i), \\ B_{22} &= -\cos(\lambda_\Omega(t))\sin(u(t)), \\ B_{23} &= \cos(i), \\ B_{31} &= \cos(\lambda_\Omega(t))\cos(u(t)) - \sin(\lambda_\Omega(t))\cos(i)\sin(u(t)), \\ B_{32} &= \sin(\lambda_\Omega(t))\cos(u(t)) + \cos(\lambda_\Omega(t))\cos(i)\sin(u(t)), \\ B_{33} &= \sin(i)\sin(u(t)), \end{aligned} \right\}.$$

Приняты обозначения: i – наклонение орбиты КА; $u(t)$ – аргумент широты КА; $\lambda_\Omega(t)$ – Гринвичская долгота восходящего узла орбиты КА; t – текущий момент времени, который отсчитывается от момента прохождения КА восходящего узла орбиты; $\lambda_{\Omega 0}$ – Гринвичская долгота восходящего узла орбиты КА в момент времени $t = 0$; ω – скорость изменения Гринвичской долготы восходящего узла

правой. Переход от ОСК к ССК осуществляется тремя последовательными поворотами на углы тангажа ϑ – вокруг оси Oy_O , крена φ – вокруг повернутой оси $Ox_{\Pi'}$ и рыскания ψ – вокруг повернутой дважды оси $Oz_{\Pi''}$. Компоненты матрицы перехода от ОСК к ССК:

совпадает с центром Земли. Ось O_GX_G направлена в точку пересечения экватора с Гринвичским меридианом, ось O_GZ_G направлена в точку северного полюса, ось O_GY_G дополняет ГСК до правой.

Связь координат ГСК с координатами КА в ОСК осуществляется с помощью матрицы B :

$$\left. \begin{aligned} X_O &= B_{11}X_G + B_{12}Y_G + B_{13}Z_G, \\ Y_O &= B_{21}X_G + B_{22}Y_G + B_{23}Z_G, \\ Z_O &= B_{31}X_G + B_{32}Y_G + B_{33}Z_G, \end{aligned} \right\},$$

где B_{ij} – элементы матрицы перехода от ГСК к ОСК:

орбиты с учетом прецессии орбиты КА; ω_z – угловая скорость вращения Земли: $\lambda_\Omega(t) = \lambda_{\Omega 0} + \omega t$; $\omega = -\omega_z$; $\omega_z = 7,292 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

Относительная орбитальная система координат (ООСК) $O_RX_RY_RZ_R$. Начало координат O_R совпадает с центром масс КА. Ось O_RZ_R направлена по радиус-вектору, соединяющему центр Земли с центром масс КА, ось O_RX_R направлена вдоль касательной к трассе КА, ось O_RY_R дополняет ООСК до

правой. Ориентация снимающего прибора в ООСК обеспечивает расположение снимаемого участка вдоль трассы КА.

Связанная с проекцией на местность строки изображения система координат (УСК) $O_G X_L Y_L Z_L$. Начало координат O_G совпадает с центром Земли. Ось $O_G Z_L$ направлена по радиус-вектору, соединяющему центр Земли с центром проекции на местность строки изображения, ось $O_G X_L$ направлена параллельно касательной к трассе КА в момент времени t_c для проекции данной строки изображения, ось $O_G Y_L$ дополняет УСК до правой.

Матрица перехода от ОСК к ООСК:

$$R = \begin{vmatrix} \cos(Ad) & \sin(Ad) & 0 \\ -\sin(Ad) & \cos(Ad) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

где Ad – угол между касательной к трассе КА и плоскостью орбиты в момент времени t , $Ad = \arctg \frac{\omega_Z \sin(i) \cos(u(t))}{du - \omega_Z \cos(i)}$; du – угловая скорость орбитального движения КА,

$$du = \sqrt{\frac{\mu}{r^3}}; \mu - \text{гравитационный параметр}$$

Земли, $\mu = 3,986 \times 10^5 \text{ км}^3/\text{с}$; r – радиус-вектор КА, $r = h + R_Z$; h – высота орбиты КА; R_Z – средний радиус Земли.

Матрица перехода от ООСК к УСК, рассчитанная для момента, определяемого интервалом времени t_c , соответствующего положению проекции данной строки

$$\text{изображения: } L = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Для описания отображения наблюдаемой части поверхности Земли на картинную плоскость оптико-электронной системы (ОЭС) используется также система координат p_{xyz} фотоприемной структуры (СКФС). Начало координат p совпадает с главной точкой картинной плоскости. Номинальные направления осей СКФС совпадают с направлениями соответствующих осей ССК. Используется линейка чувствительных элементов, расположенная вдоль оси p_y . Ось p_z будем называть оптической осью ОЭС (рис. 2).

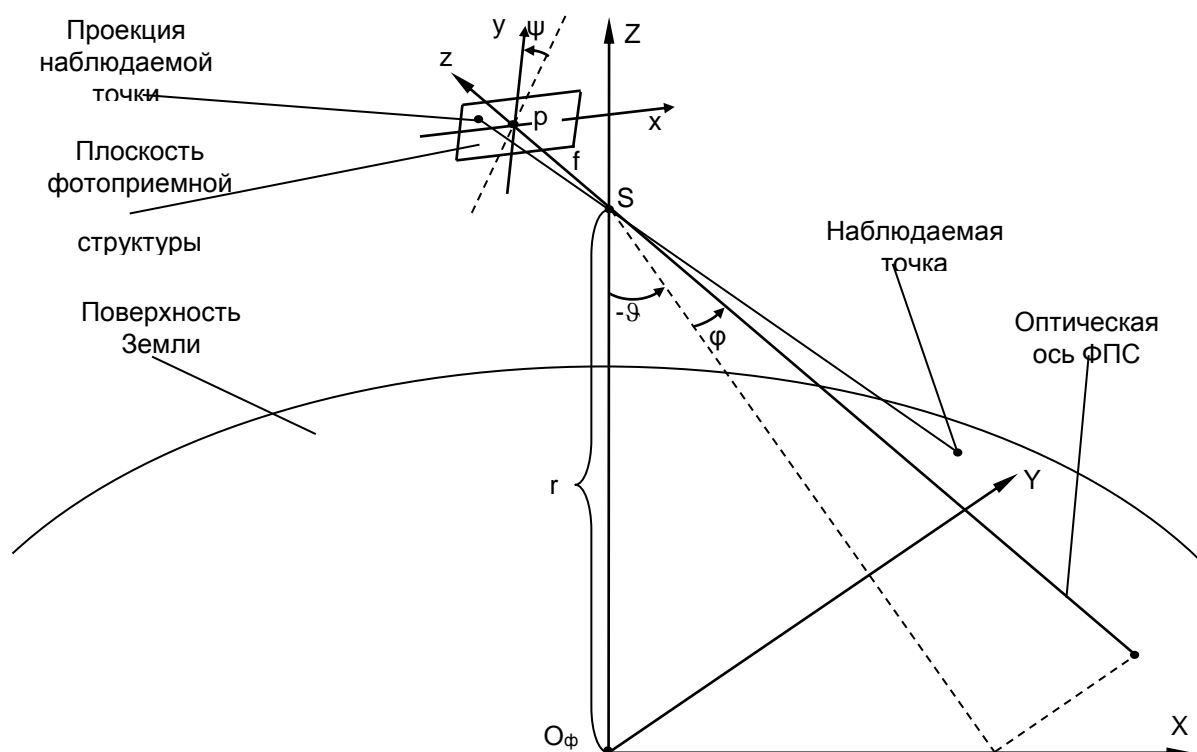


Рисунок 2 – Схема отображения наблюдаемой части поверхности Земли на картинную плоскость оптико-электронной системы

В связи с тем, что расстояние от центра проектирования S до центра масс КА намного меньше радиус-вектора r положения КА, при решении задачи наведения ОЭС принимаем, что координаты центра проектирования S в ГСК совпадают с координатами центра масс КА.

Координаты наблюдаемой точки в ОСК преобразуются в координаты точки изображения в СКФС в результате трех последовательных поворотов на углы тангажа ϑ , крена φ и рыскания ψ .

В качестве кинематических параметров движения КА вокруг центра масс рассматриваются углы ориентации ССК в ОСК, скорости и ускорения изменения этих углов.

Методика расчета программ углового движения КА при съемке поверхности Земли в режиме площадной съемки

Исходные данные. Для расчета кинематических параметров программного движения КА вокруг центра масс при проведении площадной съемки используются следующие исходные данные: h – высота орбиты КА; i – наклонение орбиты КА; u – аргумент широты КА в восходящем узле орбиты; Lu – длина снимаемого участка; γ – угол поля зрения сканера; δ_z – географическая широта центра первой строки дальнего участка; p – расстояние от трассы КА до центра первой строки дальнего участка ("+" если центр первой строки дальнего участка расположен слева относительно трассы КА или на трассе КА); ϑ_i – массив дискретных значений угла отклонения КА по тангажу; t_i – массив дискретных значений времени перенацеливания КА по тангажу. Методика расчета:

1. Время перенацеливания КА по тангажу, соответствующее углу перенацеливания по тангажу:

$$W(q) = \text{int } \text{erp}(CSW, \vartheta, t, X(q)), \quad (1)$$

где q – угол тангажа от 0 до 70 град с дискретностью 0,001 град;

$CSW = \text{pspline}(\vartheta, t)$ – стандартная функция для аппроксимации дискретных

значений угла перенацеливания КА по тангажу от времени перенацеливания по тангажу.

Функция CSW возвращает вектор коэффициентов вторых производных. Этот вектор используется в стандартной функции «interp». Аргументы ϑ и t должны быть вещественными векторами одинаковой длины. Значения в массиве ϑ должны быть вещественными и расположены в порядке возрастания.

Функция «pspline» генерирует кривую сплайна, которая приближается к параболе в граничных точках.

Функция $W(q)$ возвращает интерполируемое значение q , соответствующее аргументу $X(q)$. Вектор CSW вычисляется на основе векторов данных θ и t функции «pspline».

2. Аргумент широты КА:

$$u_z = \pi - \arcsin\left(\frac{\sin(\delta_z)}{\sin(i)}\right).$$

3. Радиус-вектор положения центра масс КА: $r = Rz + h$.

4. Скорость вращения Земли относительно орбиты КА: $\omega = -\omega_z$.

5. Угловая скорость орбитального движения КА:

$$du = \sqrt{\frac{\mu}{r^3}}.$$

6. Линейная скорость КА:

$$Vka = du \cdot r.$$

7. Угол между касательной к трассе КА и плоскостью орбиты:

$$Ad = \arctg\left(\frac{\omega_z \sin(i) \cos(u_z)}{du - \omega_z \cos(i)}\right).$$

8. Скорость движения подспутниковой точки:

$$Vc = du \cdot \frac{R}{\cos(Ad)}.$$

9. Момент времени, соответствующий минимальному угловому расстоянию между радиус-вектором положения центра масс КА и радиус-вектором центра дальнего участка:

$$t_z = \frac{(u_z - u)}{du}.$$

10. Время съемки участка: $\delta t = \frac{Lu}{V_c}$.

$$pitch = \text{root}\left[\frac{[-Lu + 2 \cdot Rz \cdot (\arcsin(\frac{h + Rz}{Rz} \cdot \sin(x)) - x)]}{V_c} - W(2 \cdot x), x\right],$$

где root – оператор нахождения корня уравнения;

x – аргумент уравнения, начальное приближенное значение угла тангажа;

$W(2 \cdot x)$ – функция, описывающая зависимость изменения времени поворота КА по тангажу от угла тангажа (аргумент уравнения x удваивается, так как рассчитывается перенацеливание КА в диапазоне углов от "- 9°" до "+ 9°").

Обозначим: S – длина трассы КА от момента окончания съемки дальнего

11. Угол тангажа, на который нужно отклониться КА, чтобы обеспечить необходимую длину снимаемого участка:

участка до начала съемки ближнего участка, $S = V_c \cdot t_{\text{до начала}} = V_c \cdot W(2 \cdot x)$; J – длина от подспутниковой точки в момент $tk1$ до конца дальнего участка на поверхности Земли; J_s – длина от подспутниковой точки в момент $tn2$ до начала ближнего участка на поверхности Земли,

$J = Rz \cdot (\arcsin(\frac{h + Rz}{Rz} \cdot \sin(x)) - x)$; Lu – длина снимаемого участка,

$$Lu = S - 2(S - J) = -S + 2 \cdot J = -V_c \cdot W(2 \cdot x) + 2 \cdot Rz \cdot (\arcsin(\frac{h + Rz}{Rz} \cdot \sin(x)) - x).$$

12. Угол, на который нужно повернуть КА по крену для нацеливания в центр

первой строки дальнего участка:

$$P = \arctg\left(Rz \cdot \frac{\sin(\frac{P}{Rz})}{r - Rz \cdot \cos(\frac{P}{Rz})}\right).$$

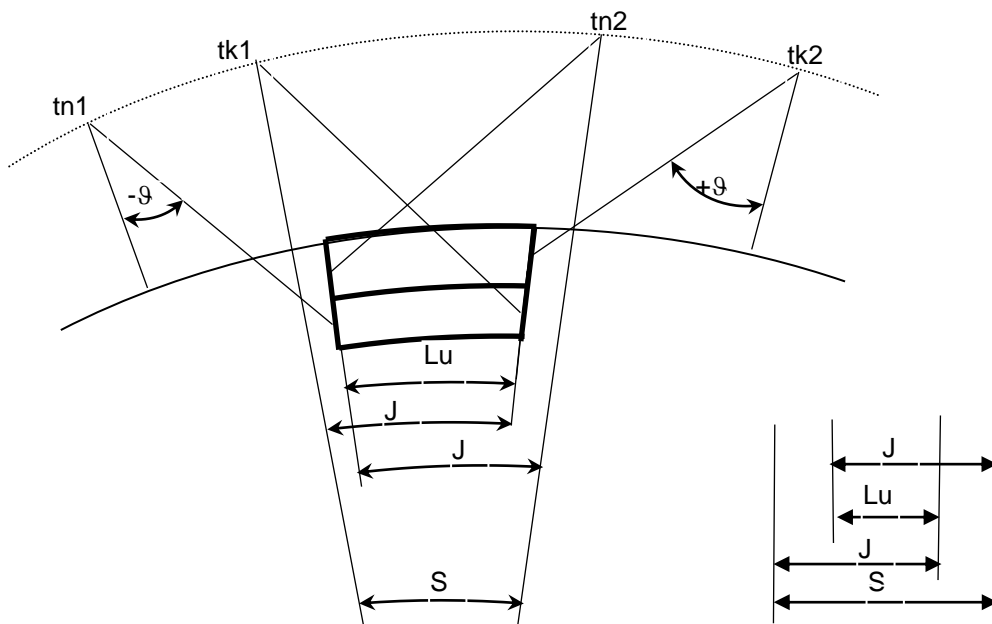


Рисунок 3 – Схема для расчета параметров движения КА во время съемки

13. Время нацеливания КА на дальний участок: $T_1 = W(x)$.

14. Время съемки дальнего участка:
 $T_2 = \frac{Lu}{V_c}$.

15. Время перенацеливания КА с дальнего на ближний участок: $T_3 = W(2 \cdot x)$.

16. Время съемки ближнего участка:
 $T_4 = T_2$.

17. Время приведения КА в дежурный режим ($\vartheta = 0$): $T_5 = T_1$.

18. Время площадной съемки:
 $ts = 2 \cdot \delta + T_3$.

19. Время начала съемки дальнего участка от момента прохождения КА восходящего узла: $tn1 = t_- z - \frac{ts}{2}$.

20. Время конца съемки дальнего участка от момента прохождения КА восходящего узла: $tk1 = tn1 + \delta$.

21. Время конца съемки ближнего участка от момента прохождения КА восходящего узла:
 $tk2 = t_- z + \frac{ts}{2}$.

22. Время начала съемки ближнего участка от момента прохождения КА восходящего узла:
 $tn2 = tk2 - \delta$.

23. Длительность перенацеливания КА с дальнего на ближний участок: $tr = ts - 2 \cdot \delta$.

24. Количество точек расчета при получении каждого изображения площадной съемки: $m = \frac{Lu}{100}$.

25. Шаг точек расчета: $n = 1..m$,
 $c_n = 100 \cdot n$.

26. Время прохождения пути от начала участка до n -ой точки: $t_n = \frac{c_n - 100}{V_c}$.

27. Аргумент широты КА на широте начала съемки: $ud0_n = du \cdot (t_n + t_- z - \frac{ts}{2})$.

28. Координаты центра проекции n -ой строки изображения в ССК:

$$AL_n = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ R1_n \end{vmatrix}, \quad RR = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{vmatrix}.$$

29. Координаты центра проекции n -ой строки изображения в ООСК:
 $ARC_n = AL_n - RR$.

30. Угол между касательной к трассе КА и плоскостью орбиты в момент времени

$$t_n: \Delta Ad_n = \arctg[\alpha z \cdot \sin(i) \cdot \frac{\cos(ud0_n)}{(du - \alpha z \cdot \cos(i))}]$$

31. Матрица перехода от ООСК к ОСК в момент времени t_n :

$$OC_n = \begin{vmatrix} \cos(\Delta Ad_n) & -\sin(\Delta Ad_n) & 0 \\ \sin(\Delta Ad_n) & \cos(\Delta Ad_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

32. Гринвичская долгота восходящего узла орбиты КА в момент времени t_n : $\lambda\Omega_n = \omega \cdot (t_- z - \frac{ts}{2} + t_n)$.

33. Шаг расчета по времени:
 $\Delta t = \frac{c_1}{V_c}, \quad j = 0..1;$

$$tt2_{(n,j)} = t_n + t_- z - \frac{ts}{2} + (2 \cdot j - 1) \cdot (\frac{ts}{2} - \frac{\delta}{2}).$$

34. Аргумент широты КА:
 $U1_{(n,j)} = tt2_{(n,j)} \cdot du$.

35. Геоцентрическая широта КА:
 $\phi ka_{(n,j)} = \arcsin[\sin(U1_{(n,j)}) \cdot \sin(i)]$.

36. Гринвичская долгота восходящего узла орбиты КА в момент времени t_n : $\lambda\Omega_{(n,j)} = \omega \cdot tt2_{(n,j)}$.

37. Компоненты матрицы перехода от ОСК к ГСК (B^T):

$$B1_n = \begin{vmatrix} \cos(\lambda\Omega_n) & \sin(\lambda\Omega_n) & 0 \\ -\sin(\lambda\Omega_n) & \cos(\lambda\Omega_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad B2_n = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i) & \sin(i) \\ 0 & -\sin(i) & \cos(i) \end{vmatrix};$$

$$B3_n = \begin{vmatrix} \cos(ud0_n) & \sin(ud0_n) & 0 \\ -\sin(ud0_n) & \cos(ud0_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; B4_n = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & -\sin(\frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{vmatrix};$$

$$B5_n = \begin{vmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & 0 & -\sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{vmatrix}; Bt_n = B5_n \cdot B4_n \cdot B3_n \cdot B2_n \cdot B1_n;$$

$$AGC_n = Bt_n^T \cdot (AOC_n + RR);$$

$$B6_n = \begin{vmatrix} \cos(\lambda\Omega_{(n,j)}) & \sin(\lambda\Omega_{(n,j)}) & 0 \\ -\sin(\lambda\Omega_{(n,j)}) & \cos(\lambda\Omega_{(n,j)}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; B7_{(n,j)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i) & \sin(i) \\ 0 & -\sin(i) & \cos(i) \end{vmatrix};$$

$$B8_{(n,j)} = \begin{vmatrix} \cos(U1_{(n,j)}) & \sin(U1_{(n,j)}) & 0 \\ -\sin(U1_{(n,j)}) & \cos(U1_{(n,j)}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; B9_{(n,j)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & -\sin(\frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{vmatrix};$$

$$B10_{(n,j)} = \begin{vmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & 0 & -\sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{vmatrix}; Bt_{(n,j)} = B10_{(n,j)} \cdot B9_{(n,j)} \cdot B8_{(n,j)} \cdot B7_{(n,j)} \cdot B6_{(n,j)} \cdot$$

$$\begin{vmatrix} X_oj_{(n,j)} \\ Y_oj_{(n,j)} \\ Z_oj_{(n,j)} \end{vmatrix} = B_{(n,j)} \cdot AGC_n - RR.$$

38. Скорости изменения координат:

$$DX_oj_{(n,j)} = \omega \cdot [Y_oj_{(n,j)} \cdot \sin(i) \cdot \sin(U1_{(n,j)}) - (Z_oj_{(n,j)}) \cdot \cos(i)] - du \cdot [Z_oj_{(n,j)}];$$

$$DY_oj_{(n,j)} = \omega \cdot [(Z_oj_{(n,j)}) \cdot \sin(i) \cdot \cos(U1_{(n,j)}) - X_oj_{(n,j)} \cdot \sin(i) \cdot \sin(U1_{(n,j)})];$$

$$DZ_oj_{(n,j)} = \omega \cdot [X_oj_{(n,j)} \cdot \cos(i) - Y_oj_{(n,j)} \cdot \sin(i) \cdot \cos(U1_{(n,j)})] + du \cdot X_oj_{(i,j)}.$$

39. Угол ориентации КА по тангажу:

$$\mathcal{G}_{(n,0)} = \arctg\left(\frac{X_oj_{(n,j)}}{Z_oj_{(n,j)}}\right).$$

40. Угол ориентации КА по крену:

$$\varphi_{(n,0)} = P,$$

$$\varphi_{(n,1)} = \arctg\left[-\frac{Y_oj_{(n,j)}}{Z_oj_{(n,j)}} \cdot \cos(\mathcal{G}_{(n,j)})\right] + P - \gamma \cdot N(p),$$

где p учитывает расстояние до центра первой строки дальнего участка, $N(p) = \text{if}(p \geq 0, 1, -1)$, если участки расположены слева от трассы.

Если $p \geq 0$, то $N(p) = 1$. Для нацеливания КА на ближний участок угол визирования сканера вычитается от программного угла отклонения КА по крену, происходит поворот в сторону трассы КА.

Если $p < 0$, то $N(p) = -1$. Для нацеливания КА на ближний участок угол визирования сканера прибавляется к

программному углу отклонения КА по крену, происходит поворот в сторону трассы КА.

41. Расстояние по широте от центра первой строки до центра центральной строки дальнего участка:

$$o = \frac{Lu \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - a \sin\left(\frac{\cos(\pi - i)}{\cos(\delta - z)}\right)\right)}{2}$$

42. Широта, на которой находится центр центральной строки дальнего участка: $\delta - z1 = \delta - z - \frac{o}{Rz}$.

43. Широта, на которой находится центр центральной строки ближнего участка:

$$\delta - z2 = \delta - z1 + \frac{\gamma \cdot p \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - a \sin\left(\frac{\cos(\pi - i)}{\cos(\delta - z1)}\right)\right)}{P \cdot Rz}.$$

44. Изменение широты от экватора до $\pi - i$: $\xi = 0,001 \cdot \deg \cdot \pi - i$.

45. Орбитальная скорость КА:

$$V_{orb} = \sqrt{\frac{\mu}{r}}.$$

46. Скорость перемещения проекции оси сканера на поверхность Земли за счет орбитального движения КА: $V1(\xi) = V_{orb} \cdot \frac{Rz}{r}$.

47. Угол между вектором орбитальной скорости КА и местной параллелью: $\alpha(\xi) = \frac{\pi}{2} - a \sin\left(\frac{\cos(\pi - i)}{\cos(\xi)}\right)$.

48. Проекция скорости $V1(\xi)$ на параллель: $Vp(\xi) = V1(\xi) \cdot \cos(\alpha(\xi))$.

49. Проекция скорости $V1(\xi)$ на меридиан: $Vm(\xi) = V1(\xi) \cdot \sin(\alpha(\xi))$.

50. Скорость движения поверхности Земли за счет собственного вращения: $Ve(\xi) = \omega \cdot Rz \cdot \cos(\xi)$.

51. Проекция суммы скоростей $V1(\xi)$ и $Ve(\xi)$ на параллель: $Vps(\xi) = Vp(\xi) + Ve(\xi)$.

52. Угол между вектором суммарной скорости и местной параллелью: $\beta(\xi) = a \tan\left(\frac{Vm(\xi)}{Vps(\xi)}\right)$.

53. Угол ориентации КА по рысканию: $\psi(\xi) = \beta(\xi) - \alpha(\xi)$.

Результаты расчетов. На рис. 4 представлены результаты расчетов зависимости программного угла отклонения КА по тангажу от длины участка съемки. Участки расположены слева от трассы КА. Расчеты проведены для случаев неподвижной и вращающейся Земли при условиях:

- длина участка от 50 до 350 км;
- расстояние от трассы КА до центра первой строки дальнего участка 50 км;
- географическая широта центра первой строки дальнего участка 45 град;
- угол визирования сканера 4 град.

Расчеты показывают, что зависимость практически линейна. Отклонение от линейности не превышает 2,46 %. Учет вращения Земли приводит к незначительному увеличению программного значения угла тангажа (~ 0,2 град).

На рис. 5 представлены результаты расчетов зависимости программного угла отклонения КА по крену от расстояния от трассы КА до центра первой строки участка. Расчеты проведены для случаев неподвижной и вращающейся Земли при расположении участков слева и справа от трассы КА при условиях:

- длина участка 350 км;
- расстояние от трассы КА до центра первой строки дальнего участка от ±50 до ± 350 км;
- географическая широта центра первой строки дальнего участка 45 град.

Очевидно, что в случае неподвижной Земли программные значения отклонения КА по крену для смежных участков должны отличаться на величину угла визирования сканера (~ 4 град). В этом случае достигается нулевое перекрытие смежных участков. При учете вращения Земли для перенацеливания КА на ближний участок программный угол крена должен быть меньше (когда дальний участок слева от трассы КА) или больше (когда дальний участок справа от трассы КА), так как за время съемки дальнего участка и перенацеливания Земля повернется и ближний участок сместится в сторону от трассы КА (когда дальний участок слева от трассы КА) или в сторону трассы КА (когда дальний участок справа от трассы КА).

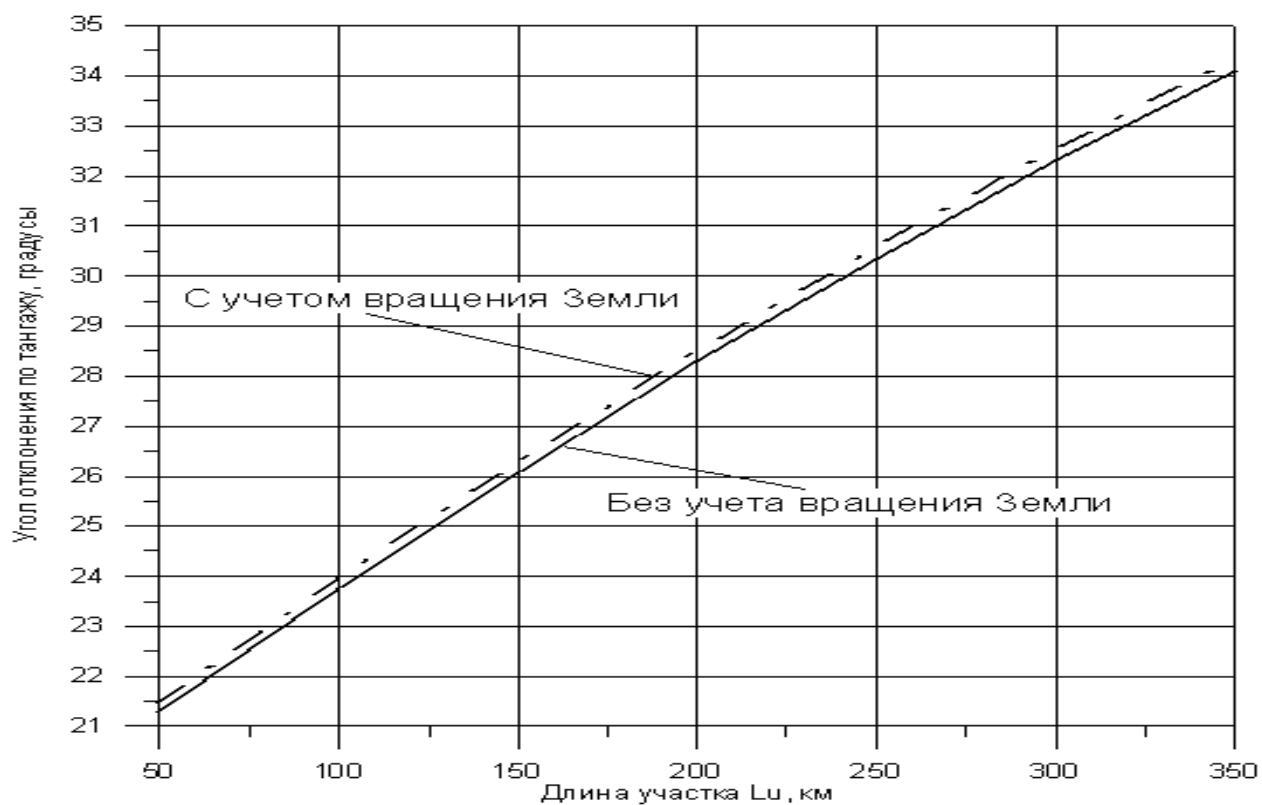


Рисунок 4 – Зависимость программного угла отклонения КА по тангажу от длины участка съемки

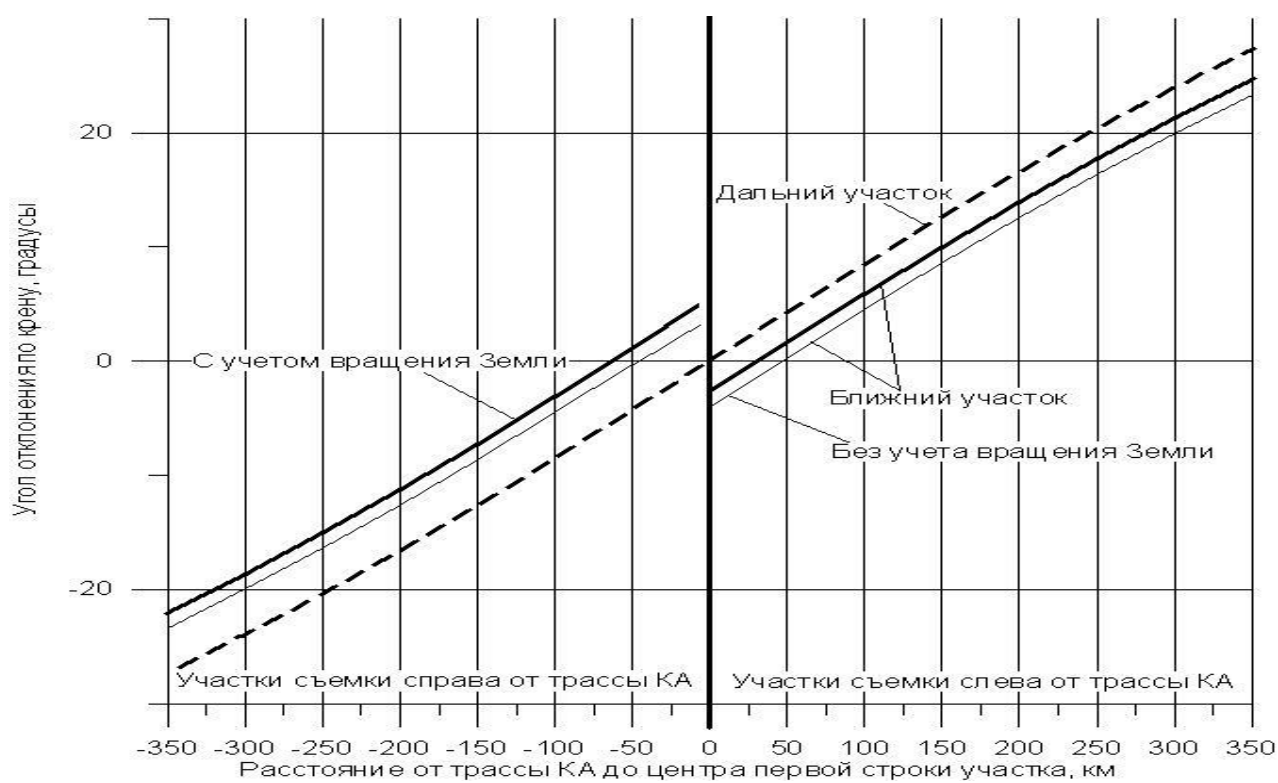


Рисунок 5 – Зависимость программного угла отклонения КА по крену от расстояния между трассой КА и центром первой строки участка

На рис. 6 представлены результаты расчетов зависимости программного угла отклонения КА по крену от расстояния от трассы КА до центра первой строки участка на разной географической широте. Расчеты проведены для случая расположения участков слева от трассы КА при условиях:

- длина участка 350 км;
- расстояние от трассы КА до центра первой строки дальнего участка от 50 до 350 км;
- географическая широта центра первой строки дальнего участка 0 и $\pi - i$.

На рис. 6 видно, что для нацеливания КА на центр первой строки дальнего участка независимо от географической широты необходимо совершить поворот КА по крену на расчетный угол, зависящий от расстояния до трассы КА. Для нацеливания КА на центр первой строки ближнего участка на широте $\pi - i$ нужно совершить поворот КА по крену на угол визирования сканера. В этом случае вектор линейной скорости движения поверхности Земли и вектор орбитальной скорости КА параллельны и направлены в противоположные стороны. На экваторе угол между векторами линейной скорости движения Земли и КА максимален, равен $\pi - i$. Для нацеливания КА на ближний участок при съемке участков слева от трассы нужно совершить поворот КА по крену на меньший угол.

На рис. 7 представлены результаты расчетов зависимости программного угла отклонения КА по крену от географической широты. Расчеты проведены для случая расположения участков слева и справа от трассы КА при условиях:

- длина участка 350 км;
- расстояние от трассы КА до центра первой строки дальнего участка ± 350 км;
- географическая широта центра первой строки дальнего участка 0 и $\pi - i$.

Очевидно, что отклонение КА по крену для дальнего участка не зависит от географической широты. На экваторе для нацеливания на ближний участок необходимо совершить поворот КА на угол, отличный от угла визирования сканера. Это определяется тем, что за время съемки дальнего участка и перенацеливания КА ближний участок сместится в сторону от трассы КА (когда дальний участок слева от трассы КА) и в сторону трассы КА (когда дальний участок справа от трассы КА). На широте $\pi - i$ вектор линейной скорости движения поверхности Земли направлен в сторону, противоположную вектору скорости движения КА. Для перенацеливания КА на ближний участок необходимо совершить поворот КА на угол визирования сканера. Техническое задание на разработку КС "Січ-2-1", "Січ-2М" предусматривает последовательное получение изображения со строками, перпендикулярными расчетному вектору текущей путевой скорости точек пересечения оптических осей сканеров с поверхностью Земли. В связи с этим необходимо поворачивать КА по рысканию.

На рис. 8 представлена зависимость программного угла отклонения КА по рысканию от географической широты. Разница программных углов по рысканию для участков 1 и 2 крайне мала, так как съемка проводится в узком диапазоне широт (до 3 град). Видно, что на экваторе программный угол отклонения КА максимален, так как угол между трассой КА и параллелью максимален.

На широте $\pi - i$ вектор линейной скорости движения поверхности Земли направлен в сторону, противоположную вектору скорости движения КА. Угол отклонения по рысканию равен нулю.

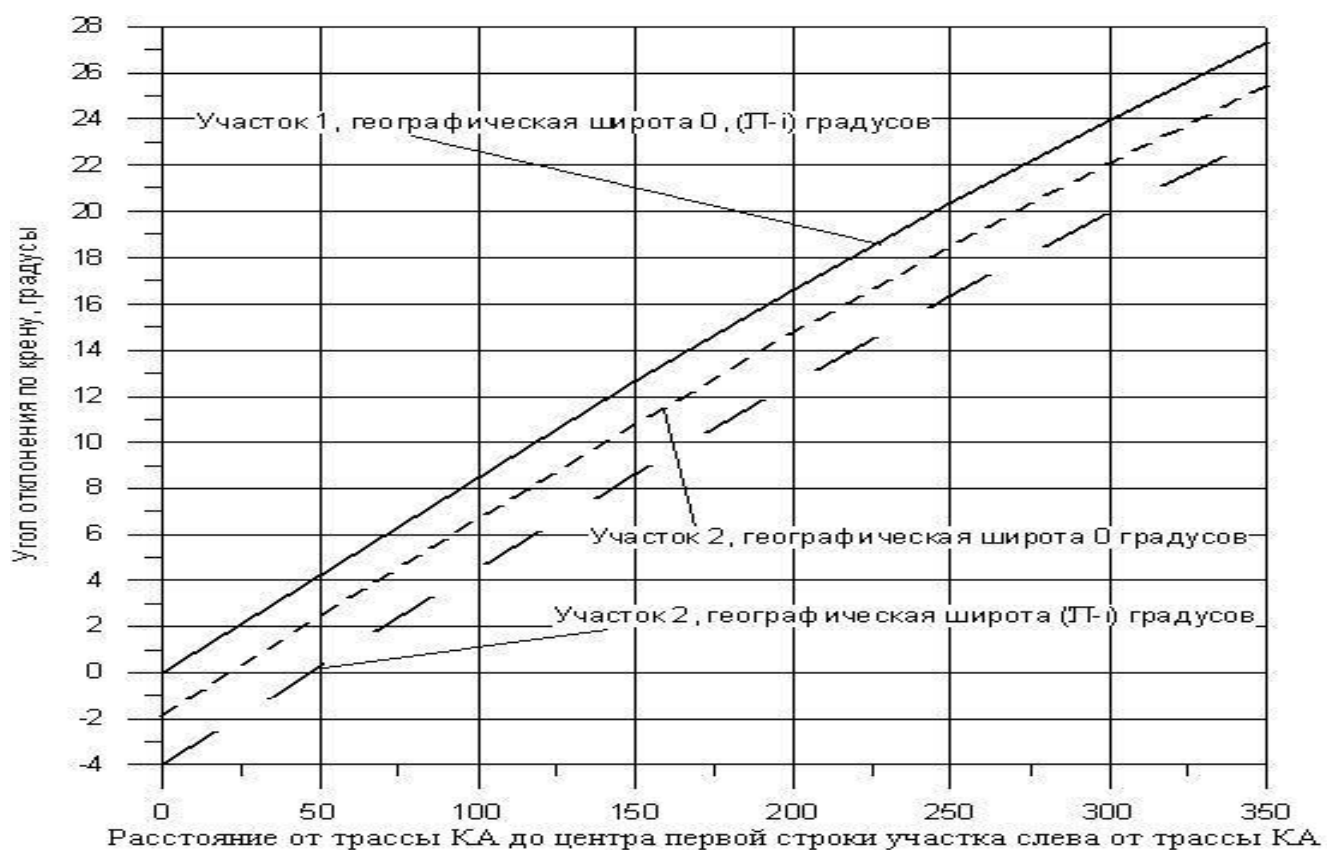


Рисунок 6 — Зависимость программного угла отклонения КА по крену от расстояния между трассой КА и центром первой строки участка на разной географической широте

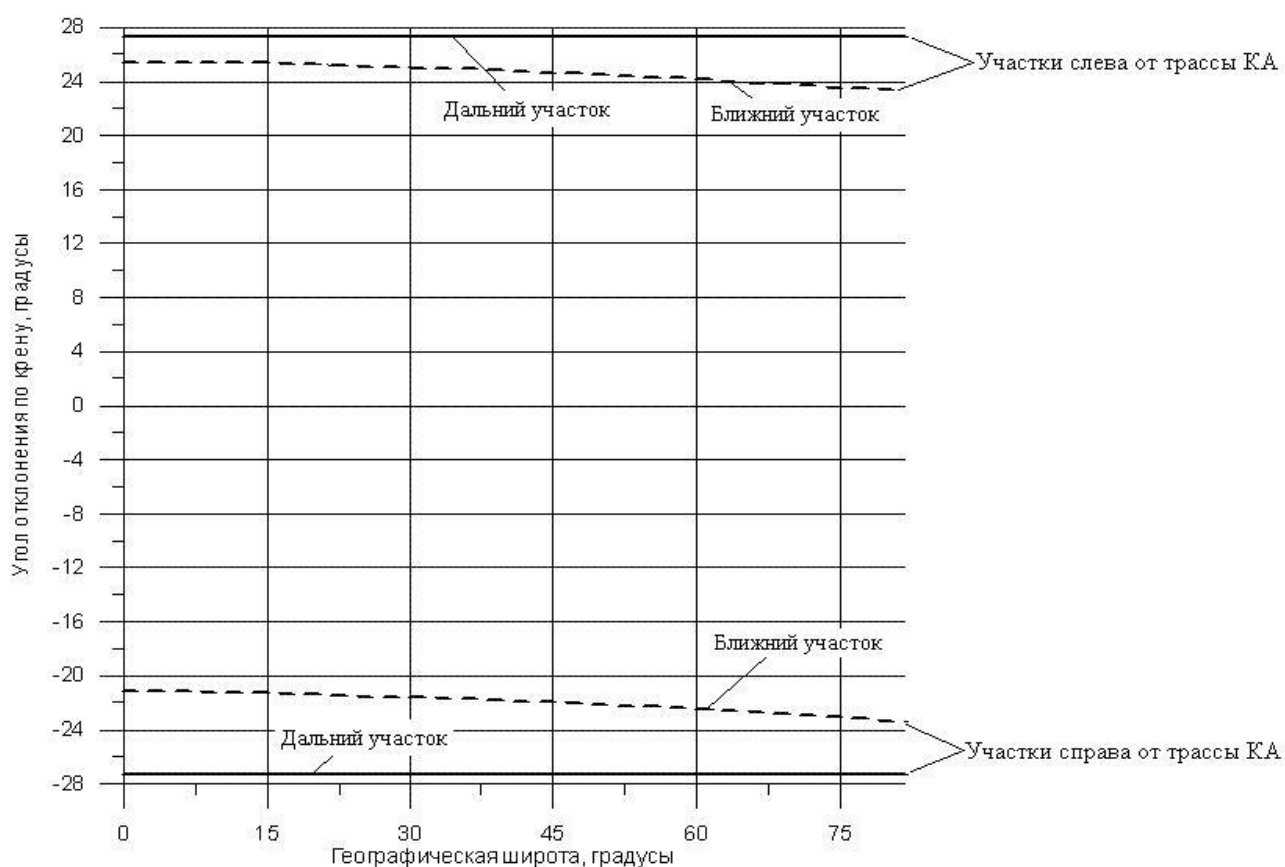


Рисунок 7 – Зависимость программного угла отклонения КА по крену от географической широты

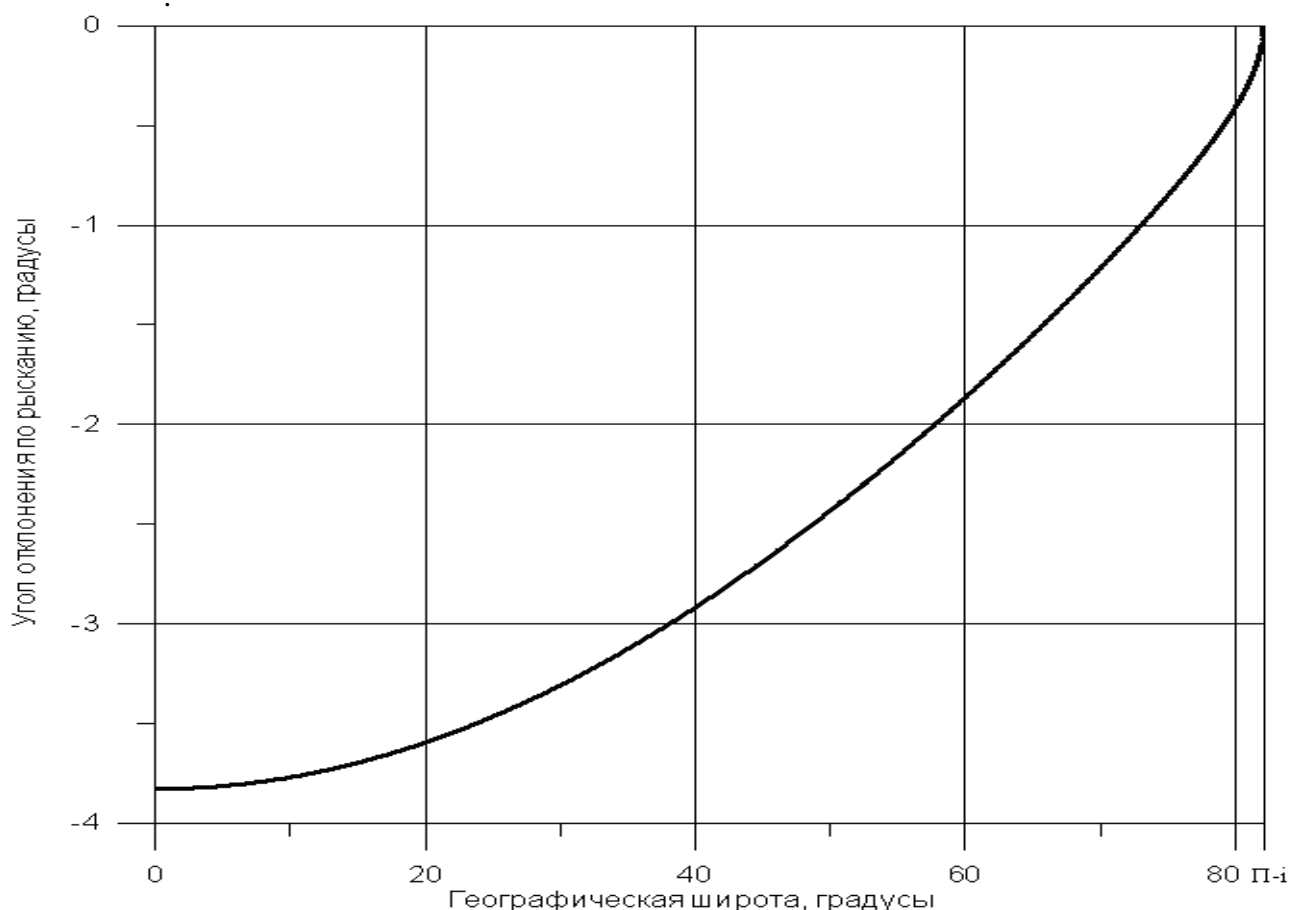


Рисунок 8 – Зависимость программного угла отклонения КА по рысканию от географической широты

Выводы

Разработана информационная технология расчета кинематических параметров наведения аппаратуры КА дистанционного зондирования при съемке поверхности Земли в площадном трассовом режиме. Приведены: исходные данные, необходимые для расчета кинематических параметров программного движения КА вокруг центра масс; методика расчета кинематических параметров программного движения КА; примеры и результаты численных расчетов программ движения КА вокруг центра масс при наведении аппаратуры дистанционного зондирования в режиме площадной трассовой съемки.

Библиографические ссылки

1. Бакланов А.И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. №2. С. 80 – 91.
2. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие. М.: «БИНOM» Лаборатория знаний. 2009. 234 с.
3. Батраков А.С. Общая модель для расчета и анализа скорости сдвига оптического изображения при съемке земной поверхности. Исследование Земли из космоса. № 4. 1989. С. 99 – 106.
4. Батраков А.С. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного

- зондирования. Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 7. С. 92 – 97.
5. Бутырин С.А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съёмке Земли. Известия Самарского научного центра РАН. 2007. Т. 9. № 3.
 6. Петрищев В.Ф. Оптимальное сканирование космическим аппаратом поверхности Земли: учебное пособие. Самара: Изд-во СГАУ. 2007. 96 с.
 7. Jacobsen K. Characteristics of very high resolution optical satellites for topographic mapping. Leibniz University Hannover, Germany, Institute of Photogrammetry and Geoinformation, Commission I, WG I/4. ISPRS Hannover Workshop 2011. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII - 4 / W19, pp. 137 –142.
 8. Brian Howley. AA236: Overview of a spacecraft attitude determination and control. Lockheed Martin Space System Company. – URL: <http://edge.rit.edu/edge/P07106/public/Docs/Research/LM Attitude Determination Control.pdf>.
 9. G. Di Mauro, M. Lawn, R. Bevilacqua. Survey on Guidance Navigation and Control Requirements for Spacecraft Formation-Flying Missions. JOURNAL OF GUIDANCE, CONTROL AND DYNAMICS. Vol. 41, №3, March 2018. doi:10.2514/1.G002868. pp. 581-603.

Надійшла до редколегії 15.03.2019

Сведения об авторах



Луць Олег Викторович.
Україна. ГП
“Конструкторське
бюро “Южне” ім.
М.К. Янгеля”.
Інженер-програміст.
Сфера інтересів –
системи
дистанційного
зондування Землі.



Ярмольчук Євгеній
Дмитрієвич.
Україна. ГП
“Конструкторське
бюро “Южне” ім.
М.К. Янгеля”.
Начальник відділу.
Сфера інтересів –
системи
дистанційного
зондування Землі.



Борщева Галина
Александрівна.
Україна. ГП
“Конструкторське
бюро “Южне” ім.
М.К. Янгеля”
Начальник групи.
Сфера інтересів –
системи
дистанційного
зондування Землі.



Манойленко Олександр
Алексєєвич. Україна.
Дніпровський
національний
університет ім. Олесь
Гончара. Кандидат
технічних наук,
доцент.
Сфера інтересів –
системи і процеси
управління.