

УДК 629.78: 681.51

НАВЕДЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МИНИ-СПУТНИКОВ В ГРУППИРОВКАХ ЗЕМЛЕОБЗОРА

Е.И. Сомов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, Молодогвардейская ул., 244
E-mail: e_somov@mail.ru

С.А. Бутырин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, Молодогвардейская ул., 244
E-mail: butyrinsa@mail.ru

Т.Е. Сомова

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, Молодогвардейская ул., 244
E-mail: te_somova@mail.ru

С.Е. Сомов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, Молодогвардейская ул., 244
E-mail: s_somov@mail.ru

Ключевые слова: группировка мини-спутников землеобзора, наведение, управление.

Аннотация: Рассматриваются проблемы наведения и управления движением мини-спутников в низкоорбитальных группировках землеобзора. Законы наведения основаны на явных соотношениях, которые связывают движение изображения в фокальной плоскости телескопа с пространственным перемещением мини-спутника. Представлены разработанные алгоритмы управления при площадной съемке заданного региона Земли, которая выполняется группировкой мини-спутников на солнечно-синхронных орбитах, и результаты компьютерной имитации, демонстрирующие их эффективность.

1. Введение

Для мини-спутников в составе низкоорбитальных группировок наблюдения Земли актуальны проблемы наведения, навигации и управления. Такие спутники имеют массу до 500 кг и крупногабаритные панели солнечных батарей для энергоснабжения бортовой аппаратуры, в частности системы управления движением (СУД) с бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС), которая корректируется сигналами навигационных спутников и кластера звёздных датчиков. Применение мини-спутников наблюдения на низких орбитах имеет ряд достоинств как в конструкции космического аппарата (КА), так и в задачах его миссии. Современные исследования, разработки и достижения по этой тематике представлены в обзорной статье [1], включая проблемы СУД как для оптико-электронных (SkySat), так и для радиолокационных спутников с синтезированной апертурой (Capella-36).

Статья представляет новые результаты авторов по управлению мини-спутниками в низкоорбитальных группировках при площадных съемках заданных регионов Земли.

2. Математические модели и постановка задачи

Применяются известные системы координат (СК) – инерциальная (ИСК, базис \mathbf{I}_\oplus), геодезическая Гринвичская (ГСК, базис \mathbf{E}), горизонтная (ГорСК, базис \mathbf{H}), орбитальная (ОСК) и связанная с КА (ССК, базис \mathbf{B}) системы координат с началом в его центре масс O . Используются также телескопная система координат (ТСК, базис \mathbf{S}) с началом в центре S оптического проектирования и СК поля изображения (ПСК O_i $x^i y^i z^i$, базис \mathbf{F}) с началом в центре O_i фокальной плоскости телескопа. На поверхности Земли маршрут съемки отображается следом проекций оптико-электронных преобразователей (ОЭП), составляя полосу захвата. Маршруту соответствует закон наведения КА требуемым движением оптического изображения на поверхности ОЭП. Ориентация ССК в ИСК определяется кватернионом $\mathbf{\Lambda}$ и вектором $\boldsymbol{\sigma}$ модифицированных параметров Родрига (МНР), а ориентация ССК в ОСК – углами крена ϕ_1 , рыскания ϕ_2 и тангажа ϕ_3 в последовательности 312. Используются векторы угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ и ускорения $\boldsymbol{\varepsilon}$, а также обозначения $\{\cdot\} = \text{col}(\cdot)$, $[\cdot] = \text{line}(\cdot)$ и $(\cdot)^t$, $[\times\cdot]$ для векторов и матриц. Задача статьи состоит в разработке законов наведения и управления движением мини-спутников в низкоорбитальных группировках землеобзора и их верификации.

3. Законы наведения при сканирующей съемке

Авторы создали оригинальные аналитические методы синтеза законов углового наведения КА при *сканирующих* съемках различных типов на основе вычислительных технологий космической геодезии при анализе поля скоростей движения изображений (СДИ) наземных целей на матрицах ОЭП с временной задержкой и накоплением (ВЗН). Вычисление кинематических параметров ориентации КА как явных функций времени выполняется на основе векторного сложения всех элементарных движений телескопа в ГСК с учетом перспективы наблюдения и задании начальных значений координат наземной цели вместе с требуемым азимутом сканирования.

Пусть векторы $\boldsymbol{\omega}_e^s = \{\omega_{ei}^s\}$ и $\mathbf{v}_e^s = \{v_{ei}^s\}$ представляют соответственно угловую скорость ТСК и скорость поступательного движения центра масс КА в ГСК, матрица $\tilde{\mathbf{C}} = \|\tilde{c}_{ij}\|$ задаёт ориентацию ТСК в ГСК и функция $D(t)$ представляет дальность точки наблюдения по оси визирования. Тогда для любой точки с координатами $(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i)$ в фокальной плоскости вектор нормированной СДИ $\tilde{\mathbf{V}}^i = \{\tilde{V}_y^i, \tilde{V}_z^i\}$ вычисляется как

$$(1) \quad \tilde{\mathbf{V}}^i = \begin{bmatrix} \tilde{V}_y^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i) \\ \tilde{V}_z^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{y}^i & 1 & 0 \\ \tilde{z}^i & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q^i \tilde{v}_{e1}^s - \tilde{y}^i \omega_{e3}^s + \tilde{z}^i \omega_{e2}^s \\ q^i \tilde{v}_{e2}^s - \omega_{e3}^s - \tilde{z}^i \omega_{e1}^s \\ q^i \tilde{v}_{e3}^s + \omega_{e2}^s + \tilde{y}^i \omega_{e1}^s \end{bmatrix}.$$

Здесь при фокусном расстоянии f_e телескопа применяются координаты $\tilde{y}^i = y^i/f_e$ и $\tilde{z}^i = z^i/f_e$, $\tilde{v}_{ei}^s = v_{ei}^s/D(t)$ и скалярная функция $q^i = 1 - (\tilde{c}_{21}\tilde{y}^i + \tilde{c}_{31}\tilde{z}^i)/\tilde{c}_{11}$.

При интегрировании кинематических уравнений пространственного движения КА с учетом (1) и сплайновой аппроксимации в явном виде получают значения векторов $\boldsymbol{\sigma}(t)$, $\boldsymbol{\omega}(t)$ и $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ – закона углового наведения КА как последовательности гладко сопряжённых сканирующих маршрутов (СМ) и поворотных маневров (ПМ) КА [2,3]. Созданы методы синтеза законов углового наведения КА для всех видов сканирующей съёмки, включая площадной обзор с ортодромическими маршрутами и получение

стереоизображений наблюдаемых объектов. Осевые линии *ортодромических* СМ соответствуют геодезическим линиям заданной высоты над земным эллипсоидом при сканировании по дуге «геодезического круга». При такой съемке $\forall t \in T \equiv [t_i, t_f]$ в точке $O_i = (0,0)$ фокальной плоскости телескопа должны выполняться такие два условия для компонентов вектора нормированной СДИ: (i) $\tilde{V}_y^i = \tilde{W}_y^i \equiv W_y^i / f_e$ и $\tilde{V}_z^i = 0$ при заданной продольной СДИ W_y^i ; (ii) вектор \tilde{V}^i направлен ортогонально оси $O_i z^i$ ПСК и след оси визирования совпадает с дугой «геодезического круга».

Законы наведения при площадной съемке основаны на ортодромических СМ с векторами МПР $\sigma(t)$ в виде сплайнов 7-го порядка [4]. Предполагается, что матрицы ОЭП имеют режим реверса, площадки землеобзора формируются 3 либо 5 сканами, а закон наведения КА при ПМ $\forall t \in T_p \equiv [t_i^p, t_f^p]$ с краевыми условиями общего вида $\Lambda(t_i^p) = \Lambda_i$, $\omega(t_i^p) = \omega_i$, $\varepsilon(t_i^p) = \varepsilon_i$; $\Lambda(t_f^p) = \Lambda_f$, $\omega(t_f^p) = \omega_f$, $\varepsilon(t_f^p) = \varepsilon_f$, $\varepsilon'(t_f^p) = \varepsilon'_f$ и символом $(\cdot)'$ локальной производной по времени синтезируется с векторами ε и ε' , ограниченными по модулю. При этом используются условия разрешимости задачи Дарбу и закон углового наведения КА с функциями $\Lambda^p(t)$, $\omega^p(t)$, $\varepsilon^p(t)$ формируется в виде совокупности гладко сопряженных векторных сплайнов.

4. Законы цифрового управления ориентацией мини-спутника

В СУД мини-спутника применяется силовой гироскопический кластер (СГК) на основе четырех гиродиннов (ГД) по схеме *2-SPE* (*2 Scissored Pair Ensemble*). При векторе кинетического момента (КМ) p -го ГД с ортом $\mathbf{h}_p(\beta_p)$ и столбце углов всех ГД $\beta = \{\beta_p\}$, $p = 1 \div 4$ СГК имеет вектор нормированного КМ $\mathbf{h}(\beta) = \Sigma \mathbf{h}_p(\beta_p)$ и вектор управляющего крутящего момента $\mathbf{M}^g(\beta, \dot{\beta}) = -\mathbf{H}' = -h_g \mathbf{A}_h(\beta) \mathbf{u}^g$, $\dot{\beta} = \mathbf{u}^g$ с матрицей $\mathbf{A}_h(\beta) = \partial \mathbf{h}(\beta) / \partial \beta$ и собственным КМ h_g каждого ГД. При отсутствии внешних возмущающих моментов и балансе СУД по вектору общего КМ $\mathbf{G} = \mathbf{J}\omega + \mathbf{H} \equiv \mathbf{0}$, где вектор кинетического момента СГК $\mathbf{H} = h_g \mathbf{h}(\beta)$, модель динамики ориентации спутника принимает простейший вид $\dot{\omega} = \varepsilon \equiv \mathbf{J}^{-1} \mathbf{M}^g$. Кватерниону угловой ошибки $\mathbf{E} \equiv (e_0, \mathbf{e}) = \tilde{\Lambda}^p \circ \Lambda$, где $\mathbf{e} = \{e_i\}$, соответствуют матрица $\mathbf{C}^e = \mathbf{I}_3 - 2[\mathbf{e} \times] \mathbf{Q}_e^t$, где $\mathbf{Q}_e = \mathbf{I}_3 e_0 + [\mathbf{e} \times]$, и вектор $\delta \phi = \{\delta \phi_i\} = \{2 e_0 e_i\}$ погрешности ориентации. Вектор ошибки по угловой скорости вычисляется по соотношению $\delta \omega = \omega - \mathbf{C}^e \omega^p(t)$.

При дискретной фильтрации вектора $\varepsilon = -\delta \phi$ получают значения ε_k^f вектора рассогласования в моменты t_k с периодом T_u , $k \in \mathbb{N}_0 \equiv [0, 1, 2, \dots]$, которые применяются в цифровом законе управления СГК [3]

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_{k+1} &= \mathbf{B} \mathbf{g}_k + \mathbf{C} \varepsilon_k^f, \tilde{\mathbf{m}}_k = \mathbf{K} (\mathbf{g}_k + \mathbf{P} \varepsilon_k^f); \\ \mathbf{M}_k^g &= \omega_k \times \mathbf{G}_k + \mathbf{J} (\mathbf{C}_k^e \varepsilon_k^p + [(\mathbf{C}_k^e \omega_k^p) \times] \omega_k + \tilde{\mathbf{m}}_k). \end{aligned}$$

Далее вектор \mathbf{M}_k^g аналитически распределяется в вектор \mathbf{u}_k^g командных скоростей ГД.

5. Результаты компьютерной имитация

Исследована баллистическая схема группировки из 72 мини-спутников при трёх КА в окрестности каждой из 24 плоскостей солнечно-синхронных орбит высотой около 600 км. Компьютерная имитация площадной съемки выполнена для двух стратегически важных районов Земли – ОАЭ с окрестностями Ормузского пролива (рис. 1) и акватории Мраморного моря с окрестностями Стамбула (рис. 2).

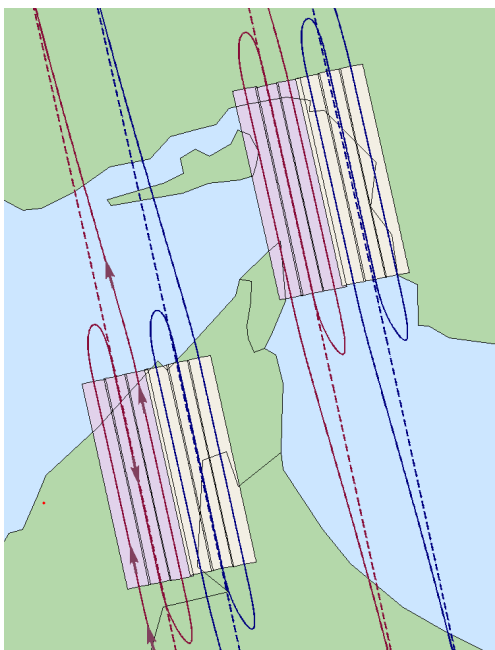


Рис. 1. Съемка окрестностей Ормузского пролива

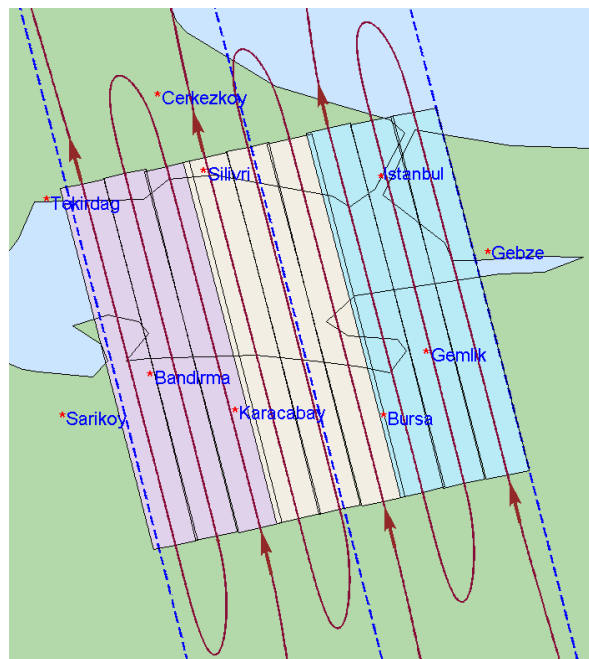


Рис. 2. Съемка Босфора и окрестностей Стамбула

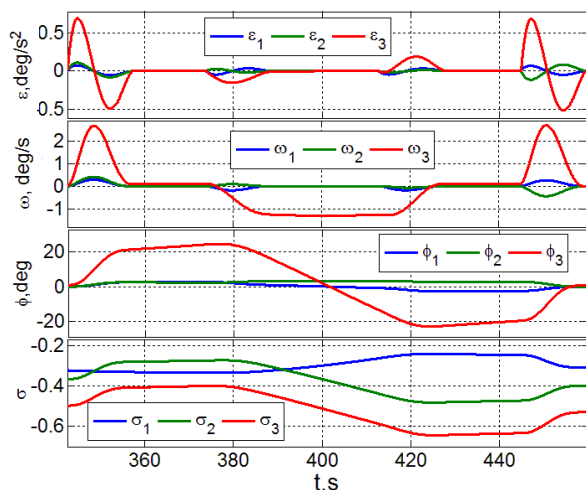


Рис. 3. Закон углового наведения КА #1.

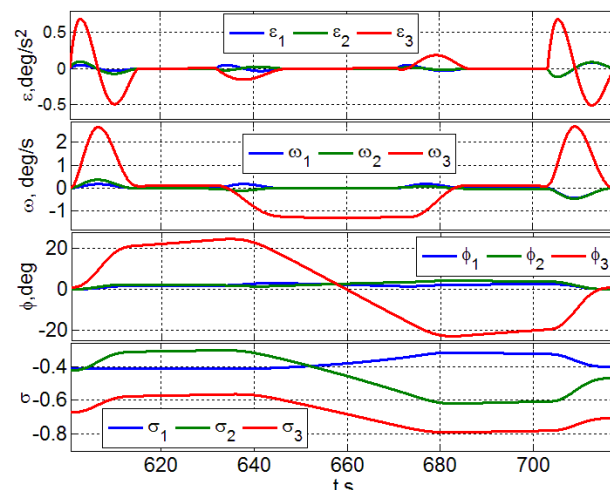


Рис. 5. Закон углового наведения КА #3.

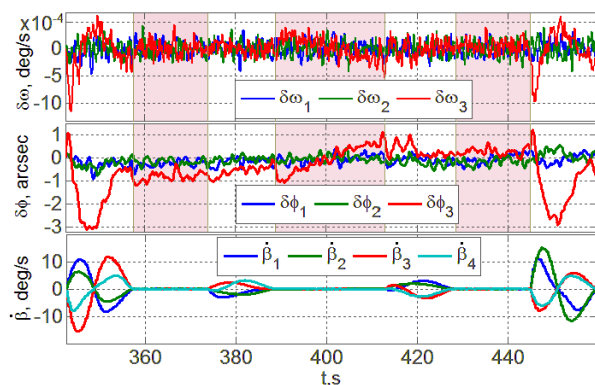


Рис. 4. КА#1, ошибки СУД и скорости ГД.

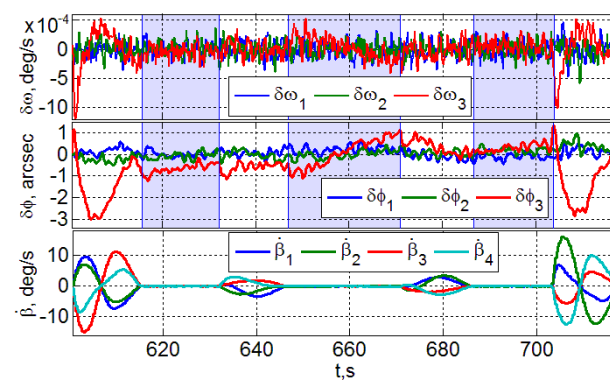


Рис. 6. КА#3, ошибки СУД и скорости ГД.

При имитации использовалась модель движения мини-спутников с массой 250 кг и SGK при КМ $h_g = 10$ Нмс всех ГД и периоде цифрового управления $T_u = 0,25$ с. Планирование съемки каждой локальной площадки из 3 сканов каждого из 2 либо 3 КА выполнялось с условием достижения наивысшего качества получаемого изображения.

На рис. 1 представлены ортодромические сканирующие маршруты КА#1 (три розовых скана), КА#2 (три жёлтых скана) площадной съёмки территории ОАЭ и также ортодромические СМ КА#3, КА#4 площадной съёмки Ормузского пролива. Значения долготы Ω восходящего узла (ВУ) орбит всех четырёх КА и моменты времени начала первых сканов представлены в [5]. Здесь отсчет времени движения КА выполняется от момента его прохождения ВУ очередного витка орбиты. На земной поверхности длина сканов равна 150 км, ширина одного скана с учетом перекрытия составляет 15 км, а общая ширина площади съёмки равна 90 км. На рис. 3 представлен синтезированный закон наведения КА#1 в виде гладко сопряженных сплайнов времени. Ошибки СУД КА#1 и скорости ГД при реализации этого закона наведения приведены на рис. 4 с участками съёмки, выделенными розовым цветом.

На рис. 2 приведена карта с тремя площадками съёмки пролива Босфор и акватории Мраморного моря, каждая площадка имеет три СМ, которые выполняются тремя КА – левым (КА#1, розовые сканы), центральным (КА#2, жёлтые сканы) и правым (КА#3, синие сканы). Здесь центральный скан КА#2 имеет длину 150 км и ширину 15 км. С учетом перекрытия сканов каждая площадка имеет размер $150 \times 44,5 \text{ км}^2$, а три таких смежных площадки – общую площадь $150 \times 131,8 \text{ км}^2$. На рис. 5 представлен закон наведения КА #3, а ошибки СУД КА #3 и скорости ГД при реализации этого закона наведения – на рис. 6 с участками съёмки, выделенными фиолетовым цветом. Принятая последовательность сканирования земной поверхности происходит в западном направлении, т.е. «справа-налево». При такой последовательности сканов восточный уход наблюдаемых объектов на поверхности Земли из-за перемещения КА в плоскости орбиты компенсируется изменением области землеобзора на запад за счет смены сканов. Такой вариант формирования сканов предпочтителен для космического землеобзора именно с солнечно-синхронных орбит – уменьшаются диапазон изменения и максимальные значения углов крена мини-спутника при площадной съёмке [5].

6. Заключение

Кратко представлены методы синтеза законов наведения и управления движением мини-спутников в низкоорбитальных группировках землеобзора, разработанные алгоритмы цифрового управления для выполнения площадной съёмки заданных регионов Земли и результаты имитации, демонстрирующие их эффективность..

Список литературы

1. Crisp N., Roberts P., Romano F. et al. System modelling of very low earth orbit satellites for Earth observation // Acta Astronaut. 2021. Vol. 187. P. 475-491.
2. Somov Ye., Butyrin S., Somova T., Somov S. In-flight verification of attitude control system for a land-survey satellite at a final of its manufacturing // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 30. P. 66-71.
3. Somov Ye., Butyrin S., Somova T. Guidance, navigation and control of a surveying satellite when an area imagery for disaster management // Math. Eng., Sci. Aerosp. 2019. Vol. 10, No. 3. P. 433-449.
4. Somova T. Attitude guidance and control, simulation and animation of a land-survey satellite motion // Journal of Aeronautics and Space Technologies. 2016. Vol. 9, No. 2. P. 35-45.
5. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е. Согласованное наведение и управление мини-спутниками в низкоорбитальных группировках космического землеобзора // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. Т. 25. № 2. С. 88-96.