

УДК 629.78.05

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЛАНОВ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ГРАФА

© 2013 К. В. Бузюев

ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Рассматривается планирование наблюдения набора маршрутов, лежащих в полосе обзора космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Предлагается алгоритм планирования наблюдения набора маршрутов, формирующего совокупность возможных планов в виде графа. Дано описание графа планов наблюдения и определены условия существования вершин и рёбер графа. Для выбора оптимального плана наблюдения предложены несколько критериев оптимальности. В соответствии с каждым предложенным критерием выбраны оптимальные планы наблюдения на основе результатов моделирования для набора из шести маршрутов.

*Космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, угловое движение, ориентированный граф, программа управления.*

**Введение.** Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) решают задачи составления тематических, топографических и специальных карт, уточнения существующих карт районов земной поверхности, составления земельных кадастров, исследования природных условий и ресурсов, изучения хозяйственной инфраструктуры и экологической обстановки, наблюдения за вялотекущими процессами [1], для которых характерен большой набор маршрутов – наблюдаемых участков земной поверхности. В современных КА ДЗЗ составление набора маршрутов, съёмку которых предстоит осуществить, производится в наземном комплексе управления и передаётся в бортовой комплекс управления (БКУ) в составе рабочих программ. После получения рабочей программы БКУ осуществляет формирование программы управления угловым движением (ПУУД) КА ДЗЗ, которая позволяет провести съёмку заданного набора маршрутов [2].

Под алгоритмом планирования наблюдения набора маршрутов будем понимать алгоритм действий, направленный на формирование такой ПУУД, которая позволяет провести съёмку этого набора маршрутов, а под планом наблюдения

набора маршрутов – такую программу управления угловым движением, которая обеспечивает съёмку всех маршрутов. При этом возможны различные варианты съёмки одного и того же маршрута и, как следствие, различные программы управления угловым движением КА ДЗЗ. Проблеме возможности формирования таких программ управления КА ДЗЗ непосредственно в БКУ посвящены работы [3–7]. При большом количестве маршрутов в наборе не всегда возможно сформировать программу управления, которая обеспечит съёмку всех маршрутов, лежащих в полосе обзора КА ДЗЗ, и тогда возможно построение множества ПУУД, каждая из которых обеспечивает съёмку части общего набора маршрутов. Такие программы управления будем называть планами наблюдения маршрутов. В этом случае необходимо определять оптимальный план наблюдения маршрутов, который будет реализован в БКУ.

Целью работы является разработка алгоритма для формирования плана наблюдения набора маршрутов, который позволяет получить совокупность возможных планов в виде одного графа. В работе дано описание графа планов наблюдения и определены условия существования вершин и рёбер графа. Для вы-

бора оптимального плана наблюдения предложено несколько критериев оптимальности.

**Граф планов наблюдения.** Рассмотрим набор из  $N_0$  маршрутов, лежащих в пределах полосы обзора КА ДЗЗ и заданных набором параметров

$$j_0, I_0, \Delta H, u_y, A_M, \left( \frac{W_{XII}}{D} \right)_{ЗАД}, t_M. \quad (1)$$

Здесь  $\varphi_0, \lambda_0$  – широта и долгота начальной точки маршрута,  $\Delta H$  – среднее превышение над общеземным эллипсоидом на маршруте,  $v_y$  – угол упреждения по тангажу на начало наблюдения маршрута,  $A_M$  – азимут центральной линии маршрута в начальной точке,  $(W_{XII}/D)_{ЗАД}$  – заданное значение параметра бега изображения,  $t_M$  – длительность съёмки маршрута [8].

Принадлежность маршрутов полосе обзора гарантирует, что для каждого маршрута можно найти время пересечения плоскостью, отклонённой на угол  $u_y$  от траверсной плоскости КА ДЗЗ, точки на поверхности общего земного эллипсоида [9], т.е.  $t_{HM}$  – время начала съёмки маршрута.

Для построения графа определим его вершину  $v_i$  как такое управление угловым движением КА ДЗЗ, которое обеспечивает съёмку маршрута на интервале  $[t_{HM}; t_{HM} + t_M]$ . При этом допускается выбор одного из возможных вариантов съёмки маршрута и соответствующей этому варианту ПУУД. Программу управления угловым движением, которая обеспечивает на интервале  $[t_{HM}^i + t_M^i; t_{HM}^j]$  переход от ориентации на момент окончания съёмки  $i$ -го маршрута к ориентации на момент начала съёмки  $j$ -го маршрута, будем называть ребром графа ( $u_{ij}$ ), соединяющим вершины  $v_i$  и  $v_j$ . Тогда план наблюдения некоего количества маршрутов будет являться подграфом, т.е. совокупностью некоторых вершин графа, описывающих эти маршруты, и рёбер графа, соединяющих эти вершины. Множество планов наблюдения, которые охватывают весь набор маршрутов, и составляют граф планов наблюде-

ния. Задача построения графа планов наблюдения декомпозируется на следующие подзадачи: поиск интервала наблюдения для построения ПУУД на маршруте, определение существующих вершин графов, определение существующих рёбер графов. После построения графа осуществляется выбор критерия оптимальности и поиск оптимального плана наблюдения в соответствии с выбранным критерием.

**Выбор оптимального плана наблюдения.** Программа управления угловым движением плана наблюдения может состоять из программы управления для наблюдения одного маршрута (в случае, когда граф состоит из одной вершины) или программы управления для последовательности из нескольких вершин графа, связанных рёбрами. Такая чередующаяся последовательность вершин  $v_j$  и соединяющих их ребер  $u_{ij}$ , для которой все вершины (а следовательно, и рёбра) различны, называется простой незамкнутой цепью [10]. Множество всех простых незамкнутых цепей графа в этом случае будет являться множеством планов наблюдения. Для каждого плана наблюдения введем  $f$  – функцию полезности. В общем случае

$$f = \sum_i C_i,$$

где  $C_i$  – коэффициент полезности вершины графа  $v_i$ . Индекс  $i$  пробегает значения всех вершин графа, включённых в план. Оптимальным будет такой план наблюдения, для которого:

$$f = \sum_i C_i \rightarrow \max.$$

Критерием оптимальности в задаче определения оптимальных планов наблюдения может являться количество включённых в план маршрутов съёмки или, например, суммарная длина снимаемых маршрутов.

В первом случае  $C_i = 1$  и функция полезности имеет вид:  $f = N$ , где  $N$  – число вершин графа, включённых в план.

Во втором случае  $C_i = L_i$ , где  $L_i$  – длина маршрута, для которого программа управления угловым движением соответствует вершине графа  $v_i$ . Функция полезности имеет вид:

$$f = \sum_i L_i.$$

**Алгоритм построения графа планов наблюдения.** Задачу построения графа планов наблюдения набора из  $N_0$  маршрутов можно декомпозировать на последовательно решаемые подзадачи:

1. Построение трассы полёта и полосы обзора КА ДЗЗ на интервале времени, для которого будет составляться граф, проверка принадлежности каждого маршрута, заданного набором параметров (1), полосе обзора КА ДЗЗ и нахождение интервалов наблюдения маршрутов.

2. Определение вершин и рёбер графа.

3. Формирование планов наблюдения, выбор критерия оптимальности и определение оптимального плана наблюдения.

Трасса полёта строится путём численного интегрирования уравнений движения центра масс КА ДЗЗ. Границы полосы обзора можно определить из заданного максимального отклонения КА ДЗЗ по углу крена по формуле:

$$\Delta L = H \cdot \text{tg} \gamma,$$

где  $\Delta L$  – расстояние от подспутниковой точки до края полосы обзора,  $H$  – высота полёта,  $\gamma$  – максимальный угол крена. Проверку принадлежности каждого маршрута, заданного набором параметров (1), полосе обзора КА ДЗЗ можно осуществлять по трём (начало, середина, конец маршрута) и более точкам. В данной работе делается допущение, что все маршруты принадлежат полосе обзора.

**Нахождение интервалов наблюдения маршрутов.** При формировании ПУ-УД необходимо определить время начала съёмки маршрута  $t_{\text{НМ}}$ . Для нахождения  $t_{\text{НМ}}$  необходимо проверить выполнение условия видимости начальной точки центральной линии маршрута (ЦЛМ) и поло-

жение её относительно плоскости упреждения. Условием видимости начальной точки ЦЛМ является положение центра масс КА над плоскостью её местного горизонта:

$$(\bar{l}_D \cdot \bar{l}_3) < 0,$$

где  $\bar{l}_D$  – нормированный вектор дальности от центра масс КА ДЗЗ до начальной точки ЦЛМ,  $\bar{l}_3$  – нормированный радиус-вектор начальной точки ЦЛМ на поверхности общеземного эллипсоида с учётом

$$\Delta H: \bar{l}_3 = \begin{pmatrix} \cos j \cdot \cos I \\ \cos j \cdot \sin I \\ \sin j \end{pmatrix}.$$

При выполнении условия видимости начальной точки ЦЛМ проверяется её положение относительно плоскости, отклонённой от траверсной плоскости КА ДЗЗ на угол упреждения по тангажу  $\vartheta_y$  (плоскость упреждения), путём вычисления знака функции

$$L_x = (\bar{l}_D \cdot \bar{X}_O) - \cos g \cdot \sin J_y,$$

где  $\cos g = \sqrt{1 - (\bar{l}_D \cdot \bar{Z}_O)^2}$ ,  $X_O, Z_O$  – оси орбитальной системы координат. Вычисление единичных векторов орбитальной системы координат в проекциях на оси инерциальной системы координат, совпадающих в данный момент времени  $t_i$  с осями ГСК, выполняется по формулам [9]:

$$\bar{Z}_O = -\frac{\bar{C}}{|\bar{C}|},$$

$$\bar{Y}_O = \frac{\bar{r}}{|\bar{r}|},$$

$$\bar{X}_O = \bar{Y}_O \times \bar{Z}_O,$$

$$\bar{C} = \bar{r} \times (\bar{V} + \bar{w}_3 \times \bar{r}),$$

где  $\bar{w}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.00007292115 \end{pmatrix}$  – вектор угловой скорости вращения Земли.

Момент пересечения плоскостью упреждения начальной точки ЦЛМ, характеризуемый сменой знака функции  $L_x$ ,

и будет искомым  $t_{HM}$ . После нахождения всех  $t_{HM}$  можно отсортировать исходный набор из  $N_0$  маршрутов таким образом, чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$t_{HM}^1 \leq t_{HM}^2 \leq \dots \leq t_{HM}^{i-1} \leq t_{HM}^i \leq \dots \leq t_{HM}^N.$$

**Условие существования вершины графа.** Под вершиной графа будем понимать программу управления угловым движением КА ДЗЗ, которая обеспечивает съёмку маршрута на интервале  $[t_{HM}; t_{HM} + \tau_M]$ . Будем рассматривать ПУУД, которая на интервале наблюдения маршрута обеспечивает для ЦЛМ выполнение следующих условий для параметров компенсации продольного ( $W_{XП}$ ) и поперечного ( $W_{ZП}$ ) бега изображения:

$$\frac{W_{XП}}{D} = \left( \frac{W_{XП}}{D} \right)_{зад} = const, \quad \frac{W_{ZП}}{D} = 0. \quad (2)$$

При формировании ПУУД необходимо учитывать ряд ограничений [4]:

– на допустимые диапазоны углов программных поворотов программной системы координат (ПСК) относительно орбитальной системы координат (ОСК) по тангажу ( $J$ ), крену ( $g$ ) и рысканию ( $y$ ):

$$J_{min} \leq J \leq J_{max}$$

$$g_{min} \leq g \leq g_{max} \quad (3)$$

$$y_{min} \leq y \leq y_{max},$$

– на допустимые значения модуля угловой скорости и углового ускорения ПСК относительно ИСК:

$$|\bar{w}(t)| \leq |w_{max}|, \quad |\bar{e}(t)| \leq e_{max}. \quad (4)$$

Для формирования ПУУД для съёмки маршрута по заданным характеристикам маршрута (1) и параметрам движения центра масс КА ДЗЗ выполняется расчёт по алгоритму, приведённому в [5]:

1. Вычисление дальности до точки маршрута:

$$\bar{D} = \bar{R}_3 - r.$$

2. Вычисление единичного вектора направления сканирования по маршруту:

$$\bar{l}_m(t_j) = \bar{n}_B \cdot \sin A - \bar{n}_C \cdot \sin A,$$

$$\text{где } \bar{n}_B = \begin{pmatrix} -\sin I \\ \cos I \\ 0 \end{pmatrix}, \bar{n}_C = \frac{\bar{R}_3 \times \bar{n}_B}{|\bar{R}_3 \times \bar{n}_B|} - \text{единич-}$$

ные вектора направления маршрута на восток и север соответственно.

3. Расчёт единичных векторов осей ПСК в ИСК:

$$\bar{Y}_П = -\frac{\bar{D}}{|\bar{D}|}, \bar{Z}_П = \frac{\bar{l}_m \times \bar{Y}_П}{|\bar{l}_m \times \bar{Y}_П|}, X_П = \bar{Y}_П \times \bar{Z}_П.$$

4. Расчёт углов ориентации ПСК в ОСК:

$$g = \arcsin(\bar{Y}_П \cdot \bar{Z}_O), \quad J = -\arcsin\left(\frac{\bar{Y}_П \cdot \bar{X}_O}{\cos g}\right), \quad y = -\arcsin\left(\frac{\bar{X}_П \cdot \bar{Z}_O}{\cos g}\right)$$

По полученным значениям углов тангажа  $J$ , крена  $g$  и рыскания  $y$  для интервала наблюдения маршрута можно определить ПУУД в виде непрерывных и дважды дифференцируемых функциональных зависимостей:

$$J(t), g(t), y(t). \quad (5)$$

Тогда условие существования вершины графа можно определить следующим образом: если для  $i$ -го маршрута, заданного набором параметров (1), удаётся определить непрерывную и дважды дифференцируемую программу управления угловым движением (5), которая обеспечивает на всём интервале  $[t_{HM}; t_{HM} + \tau]$  выполнение условия (2) и ограничений (3), (4), то вершина графа  $v_i$  существует.

**Условие существования ребра графа.** Пусть из исходного набора  $N_0$  маршрутов вершины графа существуют только для  $N_1$  маршрутов,  $N_1 \leq N_0$ . Обозначим каждую вершину индексом  $v_i$ , где  $i = \overline{1, N_1}$ . Для каждой вершины имеется ПУУД вида (5) и, следовательно, можно определить следующий набор параметров:

$$\{j(t_0), \mathcal{J}(t_0), \mathcal{J}(t_0), j(t_K), \mathcal{J}(t_K), \mathcal{J}(t_K)\}, \quad (6)$$

$$\text{где } j(t) = \begin{pmatrix} J(t) \\ g(t) \\ y(t) \end{pmatrix}, \quad t_0 = t_{HM}, \quad t_K = t_{HM} + \tau.$$

Под ребром графа ( $u_{ij}$ ), соединяющим вершины  $v_i$  и  $v_j$ , понимается ПУУД, которая обеспечивает на интервале  $[t_{HM}^i + \tau_M^i; t_{HM}^j]$  переход от ориентации на момент окончания съёмки  $i$ -го маршрута к ориентации на момент начала съёмки  $j$ -го маршрута. Поэтому условие существования ребра графа можно сформулировать следующим образом: если существует такая ПУУД вида (5), которая позволяет осуществить переориентацию от  $i$ -го маршрута к  $j$ -му маршруту и удовлетворяет ограничениям (4), то ребро графа  $u_{ij}$ , соединяющее вершины  $v_i$  и  $v_j$ , существует. Из условия существования ребра графа следует, что угловое положение на момент конца  $i$ -го маршрута отличается от углового положения на момент начала  $j$ -го маршрута. Иначе координаты широты и долготы последней точки  $i$ -го маршрута должны совпадать с координатами широты и долготы начальной точки  $j$ -го маршрута, т.е.  $j$ -й маршрут должен являться продолжением  $i$ -го маршрута и не может являться отдельной вершиной графа. Из условия существования ребра графа следует, что переориентация удовлетворяет ограничениям (4) и, следовательно,  $t_K^i < t_H^j$ . Поскольку  $t_K^j = t_H^j + \tau_j (\neq 0)$ , то можно сделать следующее заключение: если возможна переориентация от  $i$ -го маршрута к  $j$ -му маршруту, то невозможна переориентация от  $j$ -го маршрута к  $i$ -му маршруту, поскольку  $t_K^j = t_H^j + \tau_j > t_0^i = t_K^i - \tau_i$ . Следовательно, рёбра графа являются направленными, а сам граф – ориентированным [10].

Тогда задача формирования программы управления угловым движением для переориентации от  $i$ -го маршрута к  $j$ -му маршруту может быть сформулирована следующим образом: определить такую программу управления угловым движением вида (5), которая обеспечивает на всём интервале  $[t_K^i; t_0^j]$  непрерывность функций (5) и выполнение краевых условий:

$$j(t_0 = t_K^i) = j(t_K)^i, j(t_K = t_0^j) = j(t_0)^j,$$

$$j(t_0 = t_K^i) = j(t_K)^i, j(t_K = t_0^j) = j(t_0)^j,$$

$$j(t_0 = t_K^i) = j(t_K)^i, j(t_K = t_0^j) = j(t_0)^j,$$

$$t_0 = t_{HM}^i + t_i, t_K = t_{HM}^j,$$

где  $t_0$  – время начала участка переориентации,  $t_K$  – время конца участка переориентации,  $j(t)^i$  соответствует  $i$ -му маршруту,  $j(t)^j$  соответствует  $j$ -му маршруту,  $j(t)$  соответствует участку переориентации.

**Алгоритм формирования планов наблюдения.** Формирование множества возможных планов наблюдения предлагается осуществлять, исходя из условий существования вершин и рёбер графа, в следующем порядке:

1. Нахождение вершин графа (заполнение множества  $N_1$  – вершин графа) и проверка графа на наличие вершин (множество  $N_1$  – не пустое).

2. Создание первой незамкнутой цепи и включение в неё первой вершины из множества  $N_1$ . Под незамкнутой цепью графа понимается такая чередующаяся последовательность вершин  $v_j$  и соединяющих их рёбер  $u_{ij}$ , для которой все вершины (а следовательно, и рёбра) различны [10]. В предельном случае незамкнутая цепь графа может состоять только из одной вершины.

3. Организация итераций (по индексу  $j$ ) по перебору всех вершин графа, входящих в множество  $N_1$ . Для каждой существующей цепи составляется пара вершин  $v_i$  и  $v_j$ , где  $v_i$  – последняя вершина графа, включённая в текущую незамкнутую цепь,  $v_j$  –  $j$ -я вершина графа.

4. Для пары вершин  $v_i$  и  $v_j$  осуществляется проверка существования  $u_{ij}$  – ребра графа, соединяющего эти вершины. Если оно существует, то ребро  $u_{ij}$  и вершина  $v_j$  добавляются в текущую неза-

мкнутую цепь, итерация завершается, вершина  $v_j$  становится вершиной  $v_i$ .

5. Если ребра  $u_{ij}$  не существует, то создаётся новая цепь, включающая все вершины (и соединяющие их рёбра) предыдущей незамкнутой цепи, кроме последней вершины –  $v_i$ . Для новой незамкнутой цепи осуществляются проверка существования  $u_{i-1,j}$ . Если  $u_{i-1,j}$  найдено, то ребро  $u_{i-1,j}$ , вершина  $v_j$  добавляются в текущую незамкнутую цепь и итерация завершается. Иначе операция 5 повторяется до тех пор, пока в новой незамкнутой це-

пи не останется вершин. В этом случае итерация завершается созданием новой незамкнутой цепи, состоящей только из вершины  $v_j$ .

6. Исключение таких незамкнутых цепей, все вершины которых содержатся в других незамкнутых цепях.

**Построение графа планов наблюдения.** Рассмотрим поиск оптимального плана для набора из шести маршрутов съёмки, характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики маршрутов съёмки

Название характеристики	Размерность	Номер маршрута					
		1	2	3	4	5	6
Геоцентрическая широта начальной точки маршрута	градусы	16.359	34.872	53.623	66.327	38.879	66.328
Долгота начальной точки маршрута	градусы	-30.334	-23.978	-16.159	5.371	-5.976	8.246
Угол упреждения по тангажу на маршруте	градусы	18.391	35.554	25.238	40.6805	25.817	14.338
Абсолютный азимут маршрута	градусы	40	45	50	80	10	10
Отношение скорости бега изображения на маршруте к дальности	1/с	0.00471	0.00312	0.00266	0.00248	0.00185	0.0063
Длительность маршрута	с	33.25	63.5	109.75	72.375	175.375	78.625
Протяженность маршрута	км	150	200	300	150	350	400

В качестве начальных условий для интегрирования уравнений движения центра масс КА ДЗЗ выбраны вектора в гринвичской системе координат:

$$\vec{r}(t_0) = \begin{pmatrix} 6124.11508 \\ -3293.22244 \\ 0.000001 \end{pmatrix}, \quad \vec{V}(t_0) = \begin{pmatrix} 0.98642625 \\ 1.84129875 \\ 7.11308533 \end{pmatrix}, \quad t_0 = 11.04.2011 \ 14:37:35.250. \quad (7)$$



Рис. 1. Трасса полёта, границы полосы обзора КА ДЗЗ и маршруты съёмки на  $n$ -ом витке

На рис. 1 показаны трасса  $n$ -го витка полёта КА ДЗЗ после численного интегрирования уравнений движения центра масс, описанных в [9], для начальных условий (7) и маршруты съёмки, характеристики которых представлены в табл. 1.

Все маршруты съёмки заданы внутри полосы обзора  $n$ -го витка для того, чтобы было возможным определить интервалы наблюдения маршрутов съёмки и сформировать ПУУД, обеспечивающую их съёмку. Для каждого маршрута съёмки сформирована непрерывная и дважды дифференцируемая программа управле-

ния угловым движением, обеспечивающая выполнение условия (2) и ограничений (3), (4) с использованием алгоритма, изложенного в [4].

Таким образом, получены шесть вершин графа планов наблюдения. По предложенному алгоритму формирования планов наблюдения получены возможные планы наблюдения маршрутов, наложение которых на карту земной поверхности показано на рис. 2. Номера маршрутов,

включаемых в каждый план наблюдения, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Планы наблюдения

Номер плана	Маршруты, включаемые в план
1	1, 2, 3, 4
2	1, 5, 6
3	1, 2, 6
4	1, 5, 4

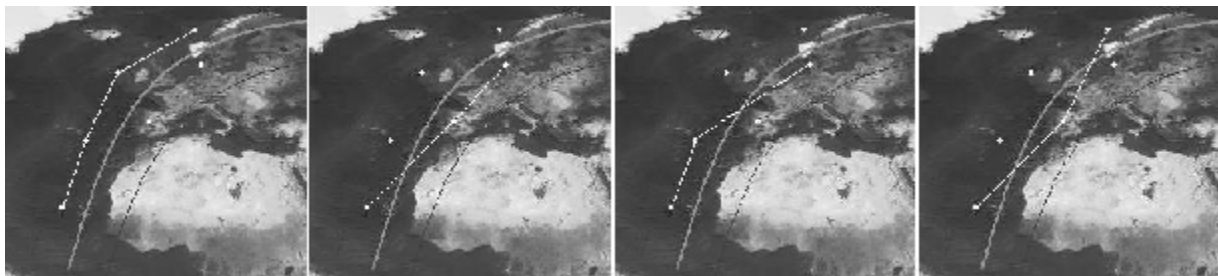


Рис. 2. Возможные планы наблюдения

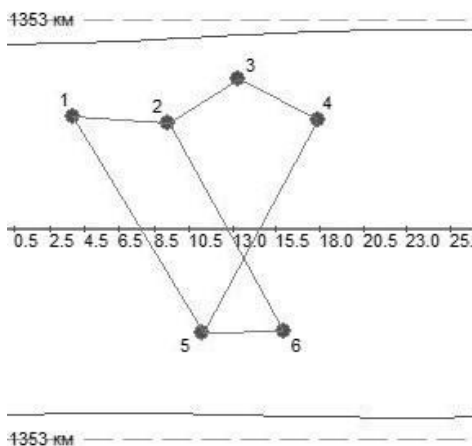


Рис. 3а. Граф планов наблюдения

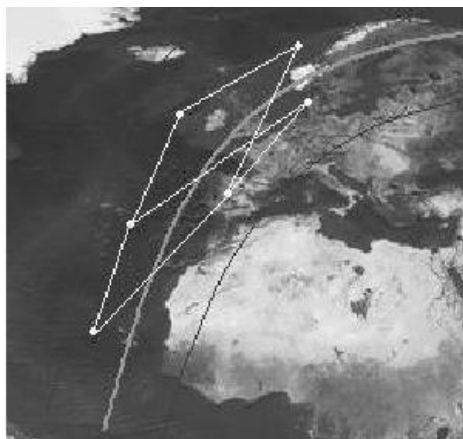


Рис. 3б. Наложение графа на карту земной поверхности

Совокупность планов наблюдения даёт граф планов наблюдения, представленный в проекции на плоскость полосы обзора на рис. 3а, и его наложение на карту земной поверхности, изображённое на рис. 3б. На рис. 3а точка на графике – это вершина графа, соответствующая маршруту, рёбра графа – это интервалы переориентации между маршрутами. Ось  $Ox$  – широта подспутниковой точки, ось  $Oy$  – отклонение от трассы начальной точки маршрута. Кривые сверху и снизу от графа – границы полосы обзора КА ДЗЗ.

Составим для каждого из планов наблюдения функции  $f$  двух видов:

$$f_1 = \sum_i 1 \text{ и } f_2 = \sum_i L_i .$$

В табл. 3 показаны возможные планы наблюдения, маршруты съёмки, включаемые в план наблюдения и соответствующие планам значения функций полезности.

Таблица 3. Планы наблюдения, дополненные значениями функции полезности

Номер плана	Маршруты, включаемые в план	Значение $f_1 = N$	Значение $f_2 = \sum_i L_i$
1	1, 2, 3, 4	4	800
2	1, 5, 6	3	900
3	1, 2, 6	3	750
4	1, 5, 4	3	650

Как видно из табл. 3, при выборе критерием оптимальности количества снятых маршрутов ( $C_i = 1$ )  $\max f_1 = 4$  и оптимальным будет первый план наблюдения из табл. 3. Для этого плана была получена программа управления угловым движением, обеспечивающая съёмку всех маршрутов, включённых в план. На рис. 4, 5 представлены зависимости углов крена, тангажа и рыскания и угловых скоростей соответственно. При выборе критерием оптимальности общей протяжённости

снятых маршрутов ( $C_i = L_i$ )  $\max f_2 = \sum_{i=1,5}^6 L_i = 900$  и оптимальным будет второй план наблюдения. Поскольку в этот план включены другие маршруты, то программа управления угловым движением (представлена на рис. 6, 7), обеспечивающая съёмку всех маршрутов, включённых в этот план, отличается от программы управления, представленной на рис. 4, 5.

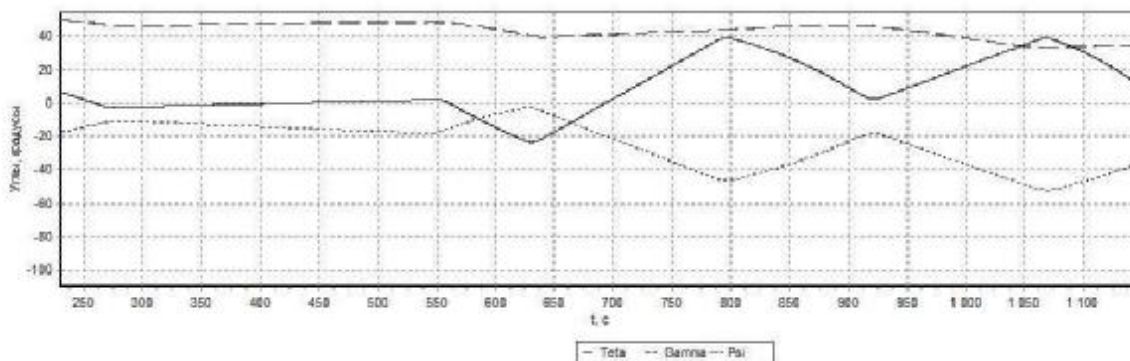


Рис. 4. Зависимость углов крена, тангажа и рыскания от времени для первого плана съёмки

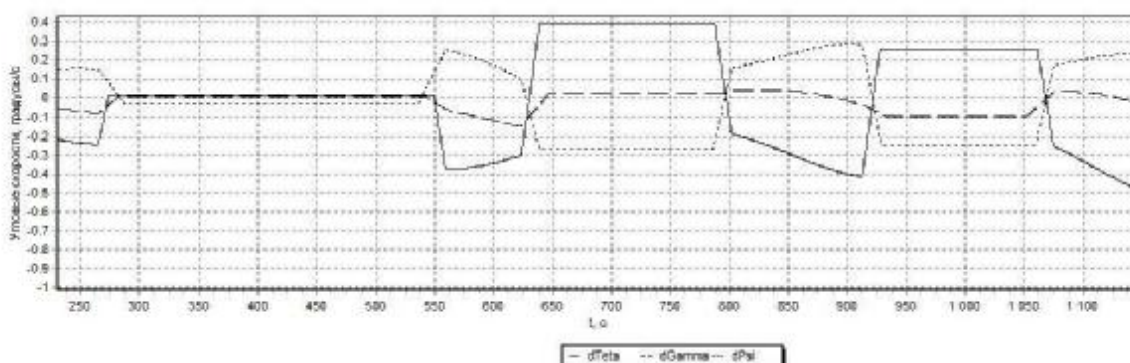


Рис. 5. Зависимость угловых скоростей крена, тангажа и рыскания от времени для первого плана съёмки



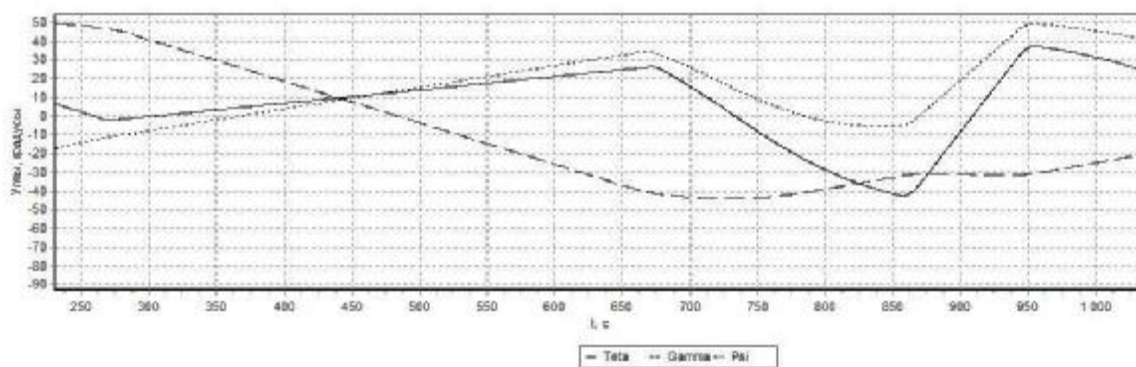


Рис. 6. Зависимость углов крена, тангажа и рыскания от времени для второго плана съёмки

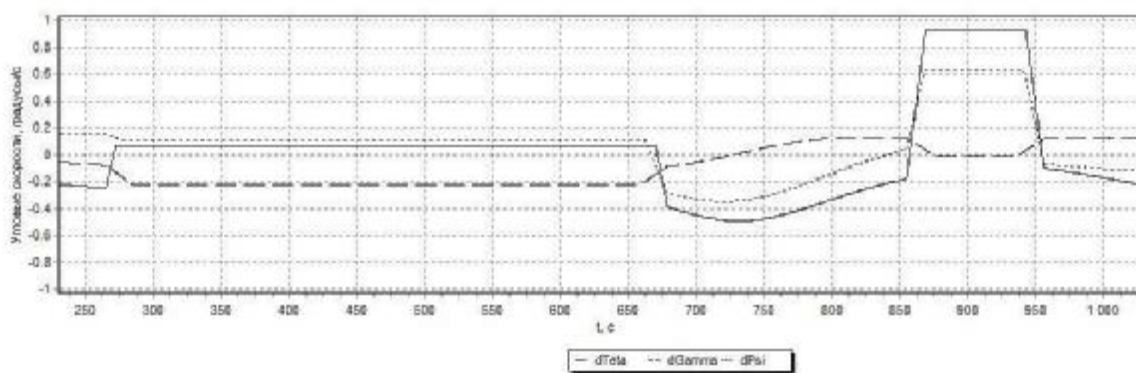


Рис. 7. Зависимость угловых скоростей крена, тангажа и рыскания от времени для второго плана съёмки

**Заключение.** Разработан алгоритм формирования плана наблюдения набора маршрутов, формирующий совокупность возможных планов в виде графа. С помощью алгоритма построен граф планов наблюдения маршрутов, получены четыре возможных плана, включающих в себя различные наборы маршрутов. Для каждого плана наблюдения составлены функции полезности в соответствии с предложенными двумя критериями оптимальности и выбраны оптимальные планы наблюдения, каждый из которых включает в себя набор маршрутов. Разработанная схема планирования съёмки с использованием ориентированного графа позволяет определить оптимальный план на заданном витке путём перебора различных вариантов по используемому критерию; построить возможные варианты планирова-

ния для  $N$  витков путём построения графов планов наблюдения для каждого витка с последующим их объединением в один общий граф, графически представить возможные планы съёмки для принятия оперативных решений.

### Библиографический список

1. Лебедев, В. В. Проектирование систем космического мониторинга [Текст] / В.В. Лебедев, И.Н. Гансвинд; Науч. Геоинформ. Центр РАН. – М.: Наука, 2010.
2. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии [Текст] / Кирилин А.Н. [и др.] // М.: Машиностроение, 2010.

3. Интегрированная система управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли [Текст] / Г.П. Аншаков [и др.] // IX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – Санкт-Петербург, 2002. – С.77-85.

4. Управление угловым движением КА ДЗЗ [Текст] / Г.П. Аншаков [и др.] // Полет. – 2006. – №6. – С. 12-18.

5. Моделирование программ управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования при сканировании набегающего потока районов наблюдения [Текст] / Г. П. Аншаков [и др.] // Сб. трудов XII Санкт-Петербургской конференции по интегрированным навигационным системам, 2005. – С. 58-64.

6. Формирование множества достижимости для кинематических характеристик углового движения космического аппарата в задачах дистанционного зонди-

рования Земли [Текст] / И.А. Блатов [и др.] // Вестник Самарского государственного университета. – 2004. – №4. – С. 201-214.

7. Бородин, М.С. Технология трёхосного сканирования в оптико-электронной космической съёмке [Текст] / М.С. Бородин // Космонавтика и ракетостроение. – 2008. – №2. – С. 75 - 82.

8. Дистанционное зондирование Земли. Космический комплекс «Ресурс-ДК1». Справочные материалы. Вып. 3. [Текст] / под ред. Ю.И. Носенко. - М.: Маджерик, 2006.

9. Основы теории полета космических аппаратов [Текст] / под ред. Г.С. Нариманова. – М.: Машиностроение, 1972.

10. Харрари, Ф. Теория графов [Текст] / Т.Харрари; пер. с англ. и предисл. В.П. Козырева; под ред. Г.П. Гаврилова. – Изд. 3-е, стереотипное. – М.: Ком-Книга, 2006.

## DETERMINATION OF OPTIMUM PLANS OF EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT DETAILED SURVEY BY THE USE OF A GRAPH

© 2013 K. V. Buzuev

State Research & Production Space Rocket Center «TsSKB-Progress», Samara

The paper deals with planning the observation of a set of routes lying in the swath of an Earth Remote Sensing (ERS) spacecraft. An algorithm of planning a detailed survey of the set of routes is proposed which makes up a complex of possible plans of the routes' detailed survey in the form of a graph. A description of the detailed survey plans graph is given and the conditions for the existence of graph nodes and edges are specified. Several criteria of optimality are proposed to provide the choice of the optimum detailed survey plan. Optimum detailed survey plans based on the simulation data for a set of six routes are chosen in accordance with each proposed criterion.

*Spacecraft, Earth Remote Sensing (ERS), angular motion, oriented graph, control program.*

### Информация об авторе

**Бузиев Константин Владимирович**, ведущий инженер-конструктор, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара. E-mail: [mail@samspace.ru](mailto:mail@samspace.ru). Область научных интересов: динамика полёта и управление движением космического аппарата.

**Buzuev Konstantin Vladimirovich**, principal design engineer, State Research & Production Space Rocket Center «TsSKB-Progress», Samara. E-mail: [mail@samspace.ru](mailto:mail@samspace.ru). Area of research: flight dynamics and control of spacecraft motion.