

УДК 519.6; 519.7

В.С. ДОМНИЧ

Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия

АНАЛИЗ СЛОЖНОСТИ МАРШРУТА EVA-2 АСТРОНАВТОВ ЛУННОГО КОРАБЛЯ APOLLO-16

В статье предлагается способ сравнения по сложности заданных маршрутов, который основан на представлении маршрута в виде конечного числа непересекающихся участков и анализе свойств движения по этим участкам. Динамика изменения значений показателей рассматриваемых свойств при движении по маршруту представляется в виде последовательностей, которые образуют код маршрута. В качестве формального аппарата для анализа сложности маршрутов предлагается использовать спектр динамических характеристик последовательности.

Ключевые слова: код маршрута, спектр динамических характеристик последовательности, анализ сложности движения.

Введение

В настоящей статье предлагается способ сравнения по сложности заданных маршрутов, который основан на разбиении маршрута на участки и анализе свойств каждого из участков с учетом их расположения на маршруте.

Значения показателей для каждого из свойств, характеризующих построенные участки, кодируются символами некоторого конечного алфавита и, при упорядочении их согласно выбранному направлению обхода участков, образуют последовательность, которая описывает динамику изменения соответствующего свойства при движении по маршруту. Набор, образованный последовательностями, построенными для всех рассматриваемых свойств, полагается полным описанием маршрута, так как содержит информацию о значении показателя каждого из свойств для любого участка маршрута.

В качестве формального аппарата для анализа и построения оценки сложности маршрута, представляемого в виде набора последовательностей кодовых знаков, предлагается использовать спектр динамических характеристик, который был введен и разработан В.А. Твердохлебовым в [1 – 3]. В данном спектре систематизируются динамические параметры, представляющие правила построения последовательности с использованием рекуррентных форм различных порядков.

В статье будет дано формальное определение спектра, описана схема построения кода маршрута и проведен анализ сложности маршрута EVA-2.

1. Спектр динамических характеристик последовательности

Пусть $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ – конечное множество и $\xi \in U^*$.

Спектр $\Omega(\xi)$ динамических характеристик последовательности ξ имеет иерархическую структуру, состоящую из пяти уровней

$$\Omega(\xi) = (\Omega_0(\xi), \Omega_1(\xi), \Omega_2(\xi), \Omega_3(\xi), \Omega_4(\xi)).$$

Для формального определения уровней $\Omega_0(\xi)$ – $\Omega_3(\xi)$ введем в рассмотрение следующие обозначения.

Определение 1. Для любой последовательности $\bar{\xi} \in U^V$ наименьший порядок рекуррентной формы, определяющей последовательность $\bar{\xi}$, будем обозначать $m_0(\bar{\xi})$.

Определение 2. Для любой последовательности $\bar{\xi} \in U^V$ и $m \in N^+$, где $1 \leq m \leq m_0(\bar{\xi})$, наибольшую длину начального отрезка последовательности $\bar{\xi}$, определяемого рекуррентной формой порядка m , будем обозначать $d^m(\bar{\xi})$.

Определение 3. Для любой последовательности $\bar{\xi} \in U^V$ и $m \in N^+$, где $1 \leq m \leq \lfloor \bar{\xi} \rfloor - 1$, число смен рекуррентных форм порядка m , требующихся при определении последовательности $\bar{\xi}$, будем обозначать $r^m(\bar{\xi})$.

Определение 4. Для любой последовательности

$\bar{\xi} \in U^V$ и $m \in N^+$, где $1 \leq m \leq m_0(\bar{\xi})$ и j , где $1 \leq j \leq r^m(\bar{\xi})$, длину j -го отрезка в определении последовательности $\bar{\xi}$ будем обозначать $d_j^m(\bar{\xi})$.

Используя введенные обозначения, определим спектр параметров, характеризующих последовательность, как следующую структуру:

$$\begin{aligned} \Omega_0(\bar{\xi}) &= \langle m_0(\bar{\xi}) \rangle; \\ \Omega_1(\bar{\xi}) &= \langle d^1(\bar{\xi}), d^2(\bar{\xi}), \dots, d^\alpha(\bar{\xi}) \rangle; \\ \Omega_2(\bar{\xi}) &= \langle r^1(\bar{\xi}), r^2(\bar{\xi}), \dots, r^\alpha(\bar{\xi}) \rangle; \\ \Omega_3(\bar{\xi}) &= \langle \Omega_3^1(\bar{\xi}), \Omega_3^2(\bar{\xi}), \dots, \Omega_3^\alpha(\bar{\xi}) \rangle, \end{aligned}$$

где $\alpha = m_0(\bar{\xi})$ и $\Omega_3^j(\bar{\xi}) = \langle d_1^j(\bar{\xi}), d_2^j(\bar{\xi}), \dots, d_{n_j}^j(\bar{\xi}) \rangle^*$

*(n_j – номер последнего отрезка в определении последовательности $\bar{\xi}$ как последовательности отрезков, определяемых отдельными рекуррентными формами порядка j).

2. Построение кода маршрута

Пусть задан маршрут, представленный кривой линией на топографической карте. Математический аппарат рассматриваемых спектров предназначен для систематизации числовых характеристик последовательности. Поэтому в излагаемом методе оценки сложности информация о маршруте преобразуется в код маршрута – набор последовательностей кодовых знаков.

Первым этапом построения кода маршрута является представление маршрута в виде конечного числа непересекающихся участков.

Выбор таких участков маршрута предлагается выполнить путем разбиения на фрагменты кривой линии, описывающей маршрут на карте, и сопоставления участков реального маршрута построенным фрагментам.

Данное разбиение может быть реализовано различными способами, например:

- Разбиение на фрагменты одинаковой длины.
- Разбиение на фрагменты, соответствующие участкам маршрута, имеющим одинаковую длину.
- Разбиение на фрагменты, соответствующие выбранным типовым участкам маршрута.
- Разбиение на фрагменты, выделенные по свойствам местности, по которой проложен маршрут.

В данной статье для иллюстрации метода использовалось разбиение исследуемого маршрута на фрагменты одинаковой длины.

Построенные фрагменты есть отрезки абстрактной кривой линии, представляющей проекцию реальной кривой линии маршрута на плоскость.

Для оценки сложности движения по маршруту необходимо интерпретировать эти фрагменты, сопоставляя им участки маршрута согласно масштабу и расположению линий уровня на топографической карте, и выделить свойства, существенные для оценки сложности движения по каждому из участков.

В качестве таких свойств могут использоваться:

- Угол наклона в направлении движения по маршруту. Значением данного свойства является величина угла между перпендикуляром к поверхности, по которой проходит маршрут, и касательной к реальной кривой линии маршрута. Перпендикуляр и касательная строятся из одной и той же точки, выбранной на участке.

- Средний угол наклона в направлении движения по маршруту. Значение данного свойства получается путем вычисления отношения величины интеграла вдоль кривой линии, соответствующей данному участку, от значения предыдущего свойства в каждой точке участка к длине этого участка.

- Разность высот точек, которые соответствуют концу и началу участка маршрута.

- Угол поперечного наклона. Значением данного свойства является величина угла между вертикалью и линией, направление которой задается векторным произведением направления движения по маршруту и внешней нормали к поверхности, построенными из одной и той же точки, выбранной на участке.

- Средний угол поперечного наклона. Значение данного свойства получается путем вычисления отношения величины интеграла вдоль кривой линии, соответствующей данному участку, от значения предыдущего свойства в каждой точке участка к длине этого участка.

- Свойства, характеризующие специфику местности, на которой расположен участок маршрута: наличие или отсутствие препятствий, их форма, размеры, характеристики грунта, атмосферные явления, оказывающие влияние на движение по данному участку и т.д.

- Свойства, характеризующие специфику траектории данного участка маршрута: количество поворотов, радиус и угол поворота, расстояние между поворотами и т.п.

В настоящей статье будут рассмотрены свойства, характеризующие разность высот точек, расположенных на концах участка, и угол поперечного наклона. В качестве точки, в которой строились линии, участвующие в вычислении значений показате-

ля последнего свойства, выбиралась точка, соответствующая середине фрагмента, сопоставленного участку маршрута.

Обозначим рассматриваемые свойства за R_1, R_2, \dots, R_p . Для каждого свойства R_i , где $1 \leq i \leq p$, определяется множество A_i знаков, которые будут использоваться для кодирования значений показателя свойства.

Сопоставим построенным участкам маршрута номера согласно порядку, в котором участки встречаются при обходе маршрута в заданном направлении. Пусть эти номера есть $1, 2, \dots, q$, тогда значение показателя i -го свойства, где $1 \leq i \leq p$, для j -го участка маршрута, где $1 \leq j \leq q$, будем обозначать как r_{ij} . При каждом фиксированном i , где $1 \leq i \leq p$, коды a_{ij} значений r_{ij} , где $1 \leq j \leq q$, составляют последовательность $\alpha_i = \langle a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iq} \rangle$. Полученный набор последовательностей $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ представляет собой код исследуемого маршрута.

3. Применение спектров динамических свойств последовательности для анализа сложности маршрута

Применение описанных выше спектров для оценки сложности маршрута будет представлено на примере маршрута EVA-2 астронавтов лунного корабля Apollo-16.

Фрагмент топографической карты района посадки Apollo-16 приведен на рис. 1, разность высот между линиями уровня составляет 10 м, а указанные на линиях уровня числа обозначают высоту уровня в метрах над поверхностью сферической луны радиуса 1738 км ([4]).

Маршруты астронавтов, которые согласно [5] были предусмотрены программой исследований, представлены на рис. 2.

Применим спектр динамических характеристик последовательности для сравнения по сложности двух этапов маршрута EVA-2, образованных начальным и заключительным фрагментами маршрута, протяженность каждого из которых составляет 4 км.

Будем рассматривать эти этапы как два различных маршрута, для которых введем обозначения M_1 (соответствует начальному этапу) и M_2 (соответствует заключительному этапу).

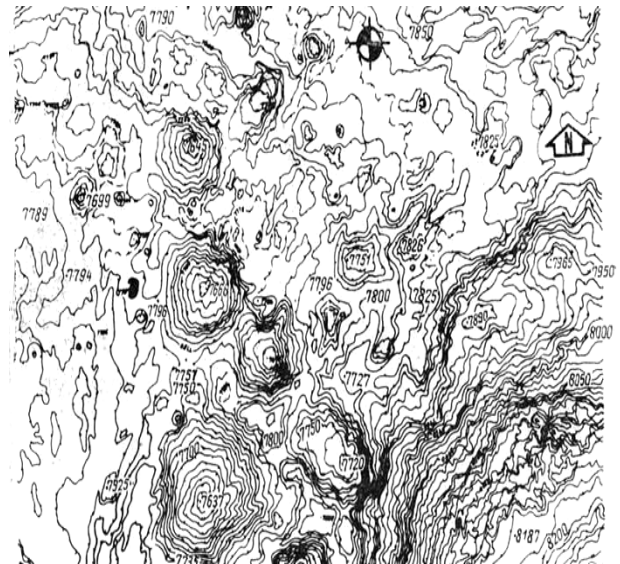


Рис. 1. Фрагмент топографической карты района посадки лунного корабля Apollo-16

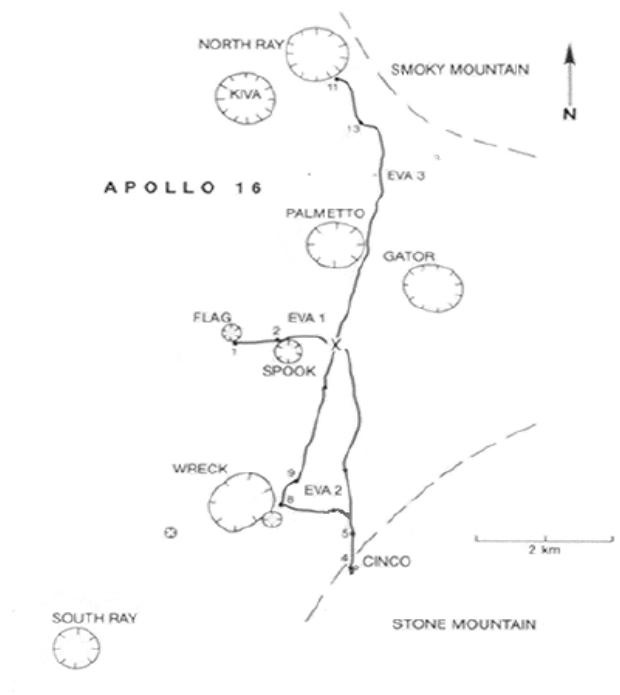


Рис. 2. Маршруты астронавтов лунного корабля Apollo-16

По схеме, изложенной в предыдущем разделе, строится код каждого из маршрутов M_1 и M_2 . Для разбиения маршрутов на участки было выбрано значение длины фрагментов равное 2 мм, что составляет 80 м на местности.

Данный выбор позволил сопоставить этим фрагментам участки маршрута, которые пересекают не более одной линии уровня на топографической карте. Построенные участки характеризуются свойствами R_1 (разность высот) и R_2 (угол поперечного наклона), для значений показателей которых требуется определить алфавиты кодовых символов.

В силу выбора длины фрагментов можно утверждать, что абсолютная величина разности высот между конечной и начальной точками любого участка не может превышать удвоенной разности высот между линиями уровня. Поэтому в качестве алфавита A_1 примем множество целых чисел, лежащих в отрезке $[-20,20]$: $A_1 = \{a_1 \in \mathbb{Z} \mid -20 \leq a_1 \leq 20\}$. Положим $A_2 = \{a_2 \in \mathbb{Z} \mid -45 \leq a_2 \leq 45\}$, так как максимальный допустимый крен лунохода «Ровер», использованного астронавтами для перемещения по маршруту, равен 45° .

По топографической карте рассчитываются значения показателей свойств R_1 и R_2 для участков каждого маршрута. Полученные значения кодируются символами алфавитов A_1 и A_2 путем округления значения показателя свойства до ближайшего целого числа. Эти символы образуют пары последовательностей $\alpha_1^{(1)}, \alpha_2^{(1)}$ и $\alpha_1^{(2)}, \alpha_2^{(2)}$, которые представляют собой код маршрутов M_1 и M_2 соответственно:

$$\alpha_1^{(1)} = \langle 0, -1, 0, -3, 0, -1, -1, 0, -2, 0, -1, 0, -1, 0, -2, -2, -1, -3, -2, -2, -1, -1, -1, -2, 0, -1, 2, 2, -2, -2, 0, -1, 0, 0, -3, -4, -2, -4, -3, -3, 0, -1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, -1 \rangle;$$

$$\alpha_2^{(1)} = \langle 0, -3, -2, -3, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 5, 5, 0, 5, 5, 0, 0, -5, -5, 0, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 0, -9, 0, 1, 0, 0, 0, 11, 1, 2, 8, -4, 2, 2, 4, 4, 2, 1, 1, 4, 2, 0 \rangle;$$

$$\alpha_1^{(2)} = \langle -6, -8, -9, -7, -8, -5, -5, -10, -8, -6, -4, -3, -8, -8, -6, -8, -8, -9, -10, -10, 0, 16, 16, 13, 8, 9, -20, -29, -20, -16, -20, -16, -16, -10, -8, -10, 0, 0, 9, 6, 9, 13, 6, 6, 4, 3, 3, 0 \rangle;$$

$$\alpha_2^{(2)} = \langle 0, 0, 0, 16, 16, 13, 0, 0, 0, -16, 0, 0, -16, 13, 16, 29, 13, 29, 13, 9, 9, 8, 4, 6, 10, 10, 13, 29, 0, 0, 0, 0, 0, 13, 9, 9, 16, -16, -8, -4, -6, -10, -8, -3, -8, -13 \rangle.$$

Сравнение маршрутов M_1 и M_2 по сложности предлагается осуществить путем анализа спектров динамических характеристик, построенных для последовательностей $\alpha_1^{(1)}$ и $\alpha_1^{(2)}$, $\alpha_2^{(1)}$ и $\alpha_2^{(2)}$. Ниже представлены числовые значения динамических параметров спектров $\Omega(\alpha_1^{(1)})$ и $\Omega(\alpha_1^{(2)})$.

$$\Omega_0(\alpha_1^{(1)}) = 5;$$

$$\Omega_1(\alpha_1^{(1)}) = \langle 3, 6, 12, 34, 50 \rangle;$$

$$\Omega_2(\alpha_1^{(1)}) = \langle 19, 9, 5, 1, 0 \rangle;$$

$$\Omega_3(\alpha_1^{(1)}) = \langle \Omega_3^1(\alpha_1^{(1)}), \Omega_3^2(\alpha_1^{(1)}), \dots, \Omega_3^5(\alpha_1^{(1)}) \rangle;$$

$$\Omega_3^1(\alpha_1^{(1)}) = \langle 3, 3, 3, 4, 5, 4, 4, 2, 4, 4, 3, 3, 4, 2, 5, 3, 4, 3, 4, 2 \rangle;$$

$$\Omega_3^2(\alpha_1^{(1)}) = \langle 6, 7, 5, 5, 7, 4, 11, 13, 7, 3 \rangle;$$

$$\Omega_3^3(\alpha_1^{(1)}) = \langle 12, 5, 11, 14, 14, 9 \rangle;$$

$$\Omega_3^4(\alpha_1^{(1)}) = \langle 34, 20 \rangle;$$

$$\Omega_3^5(\alpha_1^{(1)}) = \langle 50 \rangle.$$

$$\Omega_0(\alpha_1^{(2)}) = 6;$$

$$\Omega_1(\alpha_1^{(2)}) = \langle 4, 9, 9, 9, 28, 50 \rangle;$$

$$\Omega_2(\alpha_1^{(2)}) = \langle 16, 6, 3, 3, 1, 0 \rangle;$$

$$\Omega_3(\alpha_1^{(2)}) = \langle \Omega_3^1(\alpha_1^{(2)}), \Omega_3^2(\alpha_1^{(2)}), \dots, \Omega_3^6(\alpha_1^{(2)}) \rangle;$$

$$\Omega_3^1(\alpha_1^{(2)}) = \langle 4, 6, 5, 3, 2, 3, 3, 5, 5, 4, 3, 3, 7, 2, 3, 4, 4 \rangle;$$

$$\Omega_3^2(\alpha_1^{(2)}) = \langle 9, 10, 13, 7, 4, 16, 3 \rangle;$$

$$\Omega_3^3(\alpha_1^{(2)}) = \langle 9, 11, 14, 25 \rangle;$$

$$\Omega_3^4(\alpha_1^{(2)}) = \langle 9, 22, 5, 26 \rangle;$$

$$\Omega_3^5(\alpha_1^{(2)}) = \langle 28, 27 \rangle;$$

$$\Omega_3^6(\alpha_1^{(2)}) = \langle 50 \rangle.$$

Сравнительный анализ уровней $\Omega_3(\alpha_1^{(1)})$ и $\Omega_3(\alpha_1^{(2)})$ показывает, что длины отрезков, определяемых рекуррентными формами 1-го и 2-го порядка в последовательностях $\alpha_1^{(1)}$ и $\alpha_1^{(2)}$, имеют достаточно близкие значения.

Большое количество (представленное на уровнях $\Omega_2(\alpha_1^{(1)})$ и $\Omega_2(\alpha_1^{(2)})$) смен форм этих порядков свидетельствует о том, что в последовательностях $\alpha_1^{(1)}$ и $\alpha_1^{(2)}$ на относительно малых промежутках встречаются одинаковые подпоследовательности, за которыми следуют различные символы. Интерпретируя последовательности $\alpha_1^{(1)}$ и $\alpha_1^{(2)}$ как составляющие кодов маршрутов M_1 и M_2 , можно сделать вывод, что при движении по этим маршрутам встречаются близко расположенные одинаковые (в смысле рассматриваемых свойств) группы участков такие, что значения свойств, характеризующих дви-

жение на следующем за группой участке, различаются, что усложняет работу оператора лунохода.

Так как для определения последовательности $\alpha_1^{(1)}$ требуется большее количество смен рекуррентных форм по сравнению с последовательностью $\alpha_1^{(2)}$, что позволяет охарактеризовать маршрут M_1 как более сложный для оператора, чем маршрут M_2 .

Анализ спектров $\Omega(\alpha_2^{(1)})$ и $\Omega(\alpha_2^{(2)})$ показывает, что для определения последовательности $\alpha_2^{(2)}$ требуется рекуррентная форма порядка 6, тогда как для определения последовательности $\alpha_2^{(1)}$ достаточно рекуррентной формы 3-го порядка. Это объясняется тем, что последовательность $\alpha_2^{(2)}$ содержит несколько подпоследовательностей (длина которых достигает 6), состоящих из одного кодового символа. Этим символом является 0, значит, на маршруте M_2 , в отличие от маршрута M_1 , присутствуют отрезки значительной протяженности, на которых отсутствует угол поперечного наклона. Движение по данным отрезкам является менее сложным, чем по имеющим поперечный наклон отрезкам. Следовательно, по свойству R_2 маршрут M_1 является более сложным, чем маршрут M_2 .

Таким образом, на основе анализа динамики свойств R_1 и R_2 по спектрам кодов маршрутов M_1 и M_2 , был получен вывод о том, что маршрут M_1 сложнее, чем маршрут M_2 .

Литература

1. Твердохлебов В.А. Методы интерполяции в техническом диагностировании / В.А. Твердохлебов // Проблемы управления. – 2007. – № 2. – С. 28-34.
2. Твердохлебов В.А. Рекуррентно-автоматные характеристики динамических систем / В.А. Твердохлебов // Материалы 9-й Междунар. конф. Интеллектуальные системы и компьютерные науки. – М., 2006. – Т.1, ч. 2. – С. 168-171.
3. Твердохлебов В.А. Интерполяция и рекуррентные модели в техническом диагностировании больших систем / В.А. Твердохлебов // В кн.: Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении. – Саратов, 2006. – С. 68-80.
4. Шумейко И. Пилотируемые полеты на Луну. Конструкция и характеристики – М.: Ракетостроение (Итоги науки и техники), 1973. – Т. 3. – 144 с.
5. Портал института The Lunar and Planetary Institute [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.lpi.usra.edu>.

Поступила в редакцию 12.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем Ф.В. Новиков, Харьковский национальный экономический университет, Харьков, Украина.

АНАЛІЗ СКЛАДНОСТІ МАРШРУТУ EVA-2 АСТРОНАВТІВ МІСЯЧНОГО КОРАБЛЯ APOLLO-16

В.С. Домніч

У статті пропонується спосіб порівняння по складності заданих маршрутів, який заснований на представленні маршруту у вигляді кінцевого числа ділянок, що не перетинаються, і аналізі властивостей руху по цих ділянках. Динаміка зміни значень показників даних властивостей при русі по маршруту представляється у вигляді послідовностей, які утворюють код маршруту. Як формальний апарат для аналізу складності маршрутів пропонується використовувати спектр динамічних характеристик послідовностей.

Ключові слова: код маршруту, спектр динамічних характеристик послідовності, аналіз складності руху.

ANALYSIS OF THE EVA -2 ROUTE COMPLEXITY OF THE LUNAR MODULE APOLLO-16 ASTRONAUTS

V.S. Domnich

The method of comparison of the specified routes by their complication is offered in the article, which is based on presentation of route as a finite set of no crossing areas and analysis of the properties of movement on these areas. The dynamics of change the values of indexes of the examined properties in route motion is displayed as sequences that form the code of the route. As a formal vehicle for the analysis of routes complication the spectrum of dynamic characteristics is offered.

Key words: routing code, spectrum of run-time descriptions of sequence, analysis of complication of motion.

Домніч Владимир Сергеевич – аспирант Института проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия.