

МЕТОДИКА ПРЕЦИЗИОННОЙ НАСТРОЙКИ АНТЕНН КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТАИ. С. Додорин^{1*}, Н. А. Смирнов²¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: ivans@iss-reshetnev.ru

Рассмотрена проблематика настройки антенн космического аппарата. Проводится анализ существующей методики позиционирования рефлектора и облучателя в пространстве для получения наилучших радиотехнических характеристик антенн. Блок-схемой показан процесс прецизионной настройки антенн космического аппарата. Для позиционирования рефлектора в пространстве применяется механизм с параллельной кинематикой. Кратко приводятся особенности этого механизма. Проводится анализ существующей методики и механизма с параллельной кинематикой. Предлагается новая методика прецизионной настройки антенн космического аппарата с использованием системы автоматизированного проектирования. Приведён анализ документации и программного обеспечения механизма с параллельной кинематикой, который показал, что один из вариантов перемещения этого механизма в пространстве – это использование матриц поворота. Для получения этих матриц в системе автоматизированного проектирования разработана кинематическая модель механизма с параллельной кинематикой, а так как этот механизм работает в совокупности со всем технологическим стендом, то и модель стенда также спроектирована в той же системе. Далее с применением системы автоматизированного проектирования осуществляются простейшие перемещения спроектированных кинематических моделей в пространстве, результатами которых являются матрицы поворота. Также при использовании кинематической модели стенда в системе автоматизированного проектирования наблюдается изменение положения механизма с параллельной кинематикой и рефлектора до переноса данных на реальный технологический стенд. Полученные данные перемещений проверены аналитически. Результаты анализа показали, что матрицы поворота, полученные в системе автоматизированного проектирования, полностью совпадают с матрицами поворота, полученными аналитическим способом и их можно использовать для управления механизмом с параллельной кинематикой на реальном технологическом стенде. Методика прецизионной настройки антенн космического аппарата, представленная в этой статье, позволяет не только осуществить перемещение рефлектора антенны, но также позволяет оценить изменение его положения в пространстве до перемещения на реальном стенде, что, в свою очередь, сводит к минимуму возможность ошибок на технологическом этапе настройки антенны космического аппарата.

Ключевые слова: антенна космического аппарата, рефлектор, прецизионная настройка, матрица поворота, механизм с параллельной кинематикой, система автоматизированного проектирования.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 46–51**METHODOLOGY OF PRECISION ADJUSTMENT OF SATELLITE ANTENNAS**I. S. Dodorin^{1*}, N. A. Smirnov²¹JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Jelesnogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

*E-mail: ivans@iss-reshetnev.ru

The article deals with the problems of adjustment of satellite antennas. The analysis of existing methods of positioning reflector and feed in the space to get the best performance of radio antennas is given. A block diagram illustrates the process of adjustment precision satellite antennas. For positioning reflector in the space the mechanism with parallel kinematics is used. The features of this mechanism are briefly outlined. The analysis of the existing methodology and mechanism with parallel kinematics is given. A new method of precision adjustment satellite antennas using CAD system is shown. The analysis of documentation and software mechanism with parallel kinematics, which showed that one of the ways to move this mechanism is the use of the space rotation matrices, is carried out. For these

matrices in CAD system kinematic model of the mechanism with parallel kinematics is developed, and this mechanism works in conjunction with all the technological stand, then stand as a model designed in the same system. Further, with the use of CAD system simple move designed kinematic models in space, which results in a rotation matrix are conducted. Also, when using a kinematic model of the stand in the CAD system the change in position of the mechanism with parallel kinematics and reflector, to transfer data to a real technological stand is observed. The obtained displacement data are verified analytically. The results showed that the rotation matrix obtained in CAD system, fully coincide with the rotation matrix obtained by analytical method and can be used to control the mechanism with parallel kinematics in the real technological stand. Precision adjustment technique satellite antennas presented in this paper can not only carry out the movement of reflector antenna, but also allows us to estimate the change in its position in space to move on a real stand, which in turn minimizes the possibility of errors on the technological stage antenna tuning space apparatus.

Keywords: satellite antenna, reflector, precision adjustment, rotation matrix, the mechanism with parallel kinematics.

Введение. Одной из важнейших характеристик космического аппарата (КА) являются радиотехнические характеристики (РТХ) его антенн. От этих характеристик напрямую зависит качество передаваемого сигнала спутником. Для получения наилучших параметров необходимо выбрать оптимальное взаимное положение антенны и облучателя. Для поиска наилучшего положения разработан технологический стенд для прецизионной настройки антенн КА (рис. 1), на котором отрабатываются варианты позиционирования и проводятся измерения РТХ. Найденное оптимальное положение элементов стенда затем воспроизводится на реальном космическом аппарате. Взаимное позиционирование рефлектора и излучателя на стенде реализуется с использованием механизма с параллельной кинематикой с шестью степенями свободы (гексапод) [1–4]. В их замкнутой кинематической цепи обеспечивается высокая жёсткость всей конструкции, соответственно повышается точность позиционирования. Также при заданной номинальной

грузоподъёмности звенья гексапода намного легче, чем звенья механизма с открытой кинематической цепью [5–7].

На данный момент времени оптимальное положение рефлектора и облучателя в пространстве находится при помощи итерационных перемещений гексапода в пространстве с промежуточными измерениями РТХ антенны. Перемещения производят до тех пор, пока координаты контрольных точек, расположенных на рефлекторе, не совпадут с их же координатами, указанными в КД. Для достижения этого положения необходимо совершить 5–10 шагов с последующим измерением РТХ. На выполнение всех шагов требуется до 3–5 часов (рис. 2). Длительность измерений РТХ составляет сутки. Основная же проблема заключается в том, что неизвестно, насколько необходимо изменить положение гексапода для того, чтобы контрольные точки, расположенные на рефлекторе, переместились в необходимое положение.

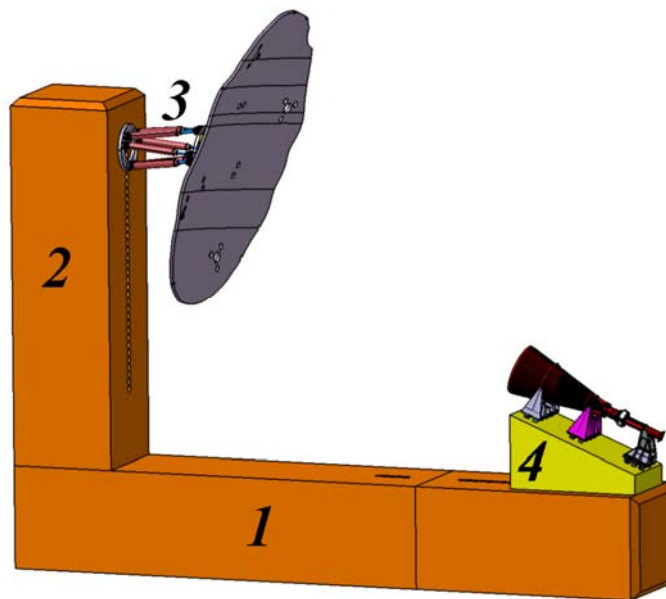


Рис. 1. Макет стенда: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – гексапод для рефлектора; 4 – крепёж для облучателя

Поиск решения. Для решения этой задачи потребовалось разработать методику для прецизионной настройки антенн космического аппарата с использованием стенда на основе механизмов параллельной структуры, в условиях применения интегрированных систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих снизить трудоёмкость и сократить длительность технологической операции производства и способствующих повышению качества проектных решений.

Первоначально был проведён анализ существующего программного обеспечения по управлению гексаподом. Результатом стало обнаружение возможности перемещения гексапода в пространстве из одной точки в другую при помощи матрицы поворота и смещения координат [8–11].

Анализ пользовательской документации гексапода позволил построить его модель со всеми кинематическими связями и ограничениями в составе модели технологического стенда для прецизионной настройки антенн КА (см. рис. 1) [12]. Используя эту модель, есть возможность визуального контроля до осуществления перемещения рефлектора в пространстве и, что

очень важно, нахождения наилучшего приближения исходных координат контрольных точек к их же координатам в КД.

Рассмотрим пример перемещения рефлектора в пространстве. Вместо группы контрольных точек и их координат по КД для наглядности выберем первую начальную точку, лежащую на поверхности рефлектора, и вторую конечную точку, расположенную таким образом, чтобы вращение осуществлялось только вокруг оси X (рис. 3). Затем перемещаем рефлектор и всю конструкцию, выполнив операцию совпадения этих точек. Так как рефлектор связан определёнными ограничениями с платформой гексапода, на которой лежит исходная система координат, то переместившись, он сдвигает эту платформу и тем самым образует новую систему координат, переход в которую и необходимо совершить гексаподу (рис. 4).

Обсуждение результатов. Используя инструменты САПР, выполняем измерение положения результирующей системы координат к исходной, получаем матрицу поворота и смещения её в пространстве (рис. 5) и проверяем аналитическими вычислениями.

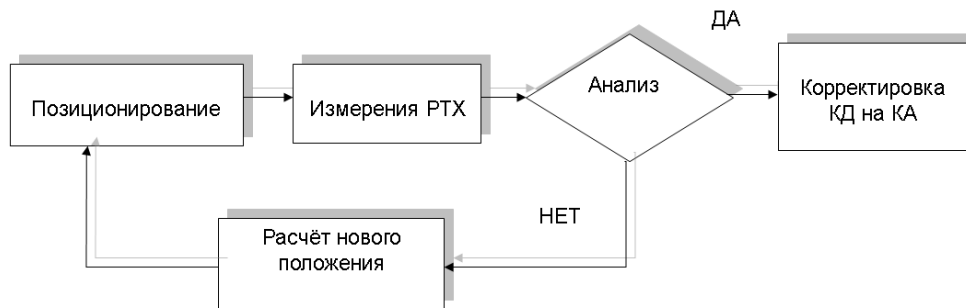


Рис. 2. Блок-схема процесса прецизионной настройки антенн космического аппарата

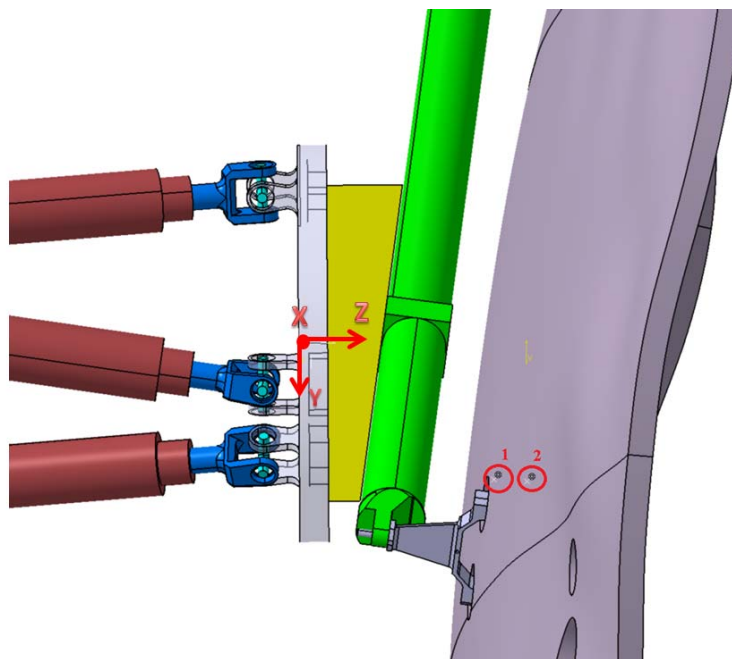


Рис. 3. Исходное положение системы координат гексапода:
1 – начальная точка, 2 – конечная точка

Любое вращение в трехмерном пространстве может быть представлено как совокупность поворотов вокруг трех ортогональных осей [13]. Этой композиции соответствует матрица, равная произведению соответствующих трех матриц поворота. Далее рассмотрим как поворот вокруг каждой из осей, так поворот вокруг нескольких осей системы координат [14].

Полученная матрица соответствует матрице поворота вокруг оси X (1).

При $\alpha = 9,8677^\circ$

$$M_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9852 & -0,1713 \\ 0 & 0,1713 & 0,9852 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ниже приведены результаты поворотов вокруг оси Y (рис. 6) и Z (рис. 7), а также соответствующие им матрицы поворота (2) и (3).

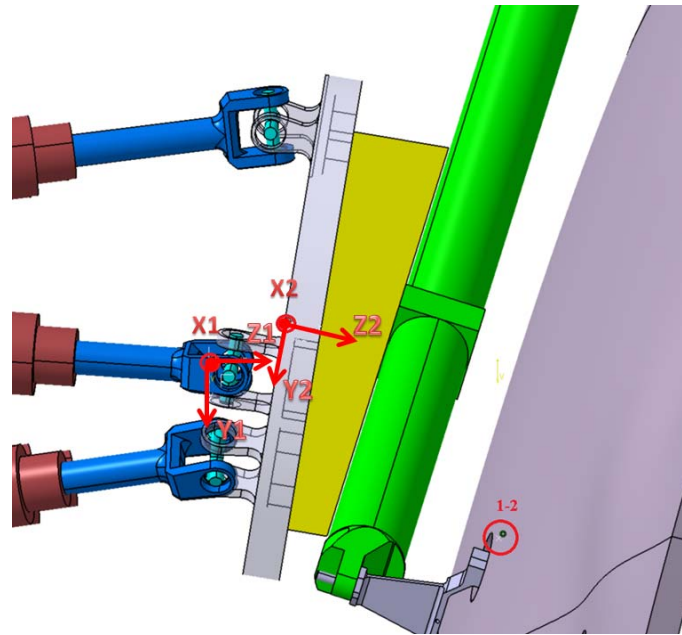


Рис. 4. Конечное положение системы координат гексапода:
1-2 – конечная точка

OxA	29,83mm	OyA	-23,085mm	OzA	47,236mm
UxA	1	UyA	0	UzA	0
VxA	0	VyA	0,985206	VzA	-0,171375
WxA	0	WyA	0,171375	WzA	0,985206

Рис. 5. Матрица поворота вокруг оси X от результирующей системы координат к исходной и смещения по осям

OxA	2,837mm	OyA	0mm	OzA	1,579mm
UxA	0,992362	UyA	0	UzA	0,123359
VxA	0	VyA	1	VzA	0
WxA	-0,123359	WyA	0	WzA	0,992362

Рис. 6. Матрица поворота вокруг оси Y от результирующей системы координат к исходной и смещения по осям

OxA	-3,258e-009mm	OyA	0mm	OzA	1,596mm
UxA	0,938522	UyA	-0,345219	UzA	0
VxA	0,345219	VyA	0,938522	VzA	0
WxA	0	WyA	0	WzA	1

Рис. 7. Матрица поворота вокруг оси Z от результирующей системы координат к исходной и смещения по осям

OxA	29,83mm	OyA	-23,085mm	OzA	47,236mm
UxA	0,952155	UyA	0,305616	UzA	0
VxA	-0,301095	VyA	0,938068	VzA	-0,171375
WxA	-0,052375	WyA	0,163175	WzA	0,985206

Рис. 8. Матрица поворота вокруг оси X и Z от результирующей системы координат к исходной и смещения по осям

При $\alpha = 7,0806^\circ$

$$M_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9923 & 0 & 0,1233 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0,1233 & 0 & 0,9923 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При $\alpha = 20,1988^\circ$

$$M_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9385 & -0,3452 & 0 \\ 0,3452 & 0,9385 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Если же поворот осуществляется вокруг нескольких осей, то матрица поворота будет иметь вид, представленный на рис. 8.

При $\alpha = 9,8677^\circ$, $\beta = -17,795^\circ$

$$M_{xz}(\alpha, \beta) = M_x(\alpha) \times M_z(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9521 & 0,3056 & 0 \\ -0,3010 & 0,9380 & -0,1713 \\ -0,0523 & 0,1631 & 0,9852 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Значения из полученных матриц переносим в программное обеспечение гексапода [15]. Гексапод, в свою очередь, совершает перемещение в результирующую систему координат.

Заключение. Близкое совпадение результатов аналитических расчетов и измерений, проведенных на стенде, показывают правильность технических решений, использованных при создании механической части стенда, корректность вычислительного алгоритма и программного обеспечения стенда, выбранных методик измерения и обработки результатов. Благодаря данной методике и использованию САПР появилась возможность при помощи гексапода добиться совпадения контрольных точек на рефлекторе с точками, указанными в КД, и существенно снизить

количество и трудоёмкость выполняемых операций прецизионной настройки антенн КА.

Библиографические ссылки

1. Fong Terrence W. Design and Testing of a Stewart Platform Augmented Manipulator for Space Applications / Massachusetts Institute of Technology. 1990, 260 p.
2. Huang Z., Li Q. C. Some Novel Minor-Mobility Parallel Mechanisms / Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics : Proceedings of the 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. Chemnitz, 2002. 905 p.
3. Merlet J.-P. Parallel Robots. Second Edition. Springer, 2006. 401 p.
4. Sandin P. E. Robot mechanisms and mechanical devices illustrated. 2003. 300 p.
5. Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms. Springer, 2006. 549 p.
6. Глазунов В. А. Разработка манипуляционных механизмов с параллельно-перекрестной структурой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 2. С. 90–100.
7. Nakamura M., Goto S., Kyura N. Mechatronic Servo System Control Problems in Industries. Springer, 2004. 196 p.
8. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. М. : Машиностроение, 2007. 256 с.
9. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М. : Наука, 1988. 640 с.
10. Глазунов В. А. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. № 1. С. 41–49.
11. Liu X-J., Wang J. Parallel Kinematics: Type, Kinematics, and Optimal Design. Springer, 2014. 309 p.
12. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
13. Кузьмин Д. В. Моделирование динамики мехатронных систем. Уравнения и алгоритмы : монография. Архангельск : Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. 120 с.
14. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами : учебник для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 400 с.
15. Осипов Д. Delphi. Профессиональное программирование. СПб. : Символ-Плюс, 2006. 1056 с.

References

1. Fong Terrence W. Design and Testing of a Stewart Platform Augmented Manipulator for Space Applications: Massachusetts Institute of Technology, 1990, 260 p.
2. Huang Z., Li Q. C. Some Novel Minor-Mobility Parallel Mechanisms. Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics: Proceedings of the 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. Chemnitz, 2002, 905 p.
3. Merlet J.-P. Parallel Robots Second Edition, Springer 2006, 401 p.
4. Sandin P. E. Robot mechanisms and mechanical devices illustrated, 2003, 300 p.
5. Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms, Springer, 2006, 549 p.
6. Glazunov V. A. [Develop manipulative mechanisms parallel-cross structure]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2008, no. 2, p. 90–100 (In Russ.).
7. Nakamura M., Goto S., Kyura N. Mechatronic Servo System Control Problems in Industries, Springer, 2004. 196 p.
8. Poduraev Yu. V. *Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye*. [Mechatronics: fundamentals, methods and application.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 256 p.
9. Artobolevskiy I. I. *Teoriya mekhanizmov i mashin*. [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 640 p.
10. Glazunov V. A. [Principles of classification and methods of analysis of spatial mechanisms with parallel structure]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 1990, no. 1, p. 41–49 (In Russ.).
11. Liu X.-J., Wang J. Parallel Kinematics: Type, Kinematics, and Optimal Design, Springer, 2014, 309 p.
12. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami*. [Management Basics robotic manipulator]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana Publ, 2004, 480 p.
13. Kuz'min D. V. *Modelirovanie dinamiki mekhatronnykh sistem. Uravneniya i algoritmy*. [Modeling the dynamics of mechatronic systems. Equations and algorithms]. Monograph. Arkhangelsk, Arkhang. gos. tekhn. un-t Publ., 2008, 120 p.
14. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Upravlenie robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami*. [Control of robots. Management Basics robotic manipulator]. Textbook for high schools. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2000, 400 p.
15. Osipov D. *Delphi. Professional'noye programmirovaniye*. [Delphi. Professional programming] Saint Petersburg, Simvol-Plyus Publ., 2006, 1056 p.