

УДК 621.396.677:629.7

С. Н. Лялюк, В. Л. Тихонов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ НАВЕДЕНИЯ КОРАБЕЛЬНОЙ АНТЕННОЙ УСТАНОВКИ ПРИЕМА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МАЛЫХ СУДОВ

Для контроля полета ракет и определения точности выведения на заданную орбиту космических аппаратов необходимо обеспечивать прием телеметрической информации с борта ракеты-носителя. Станции приема телеметрической информации могут находиться как на суше, так и на кораблях. При размещении антенной системы такой станции на борту корабля наиболее существенное влияние на точность наведения антенны оказывают качка и дрейф судна. Для обеспечения точного наведения антенной установки приема телеметрии, размещенной на борту корабля, разработан алгоритм управления. Для реализации заданных требований предложено использовать трехосное опорно-поворотное устройство с осью угла наклона зеркала. В статье определена связь кинематических параметров приводов опорно-поворотного устройства антенной установки и параметров движения ракеты космического назначения, определены углы поворота приводов антенной установки по трем осям, а также выбран закон изменения угловой скорости по азимутальной оси, учитывающий предельно возможную угловую скорость, обеспечиваемую приводом азимутальной оси. Численное моделирование алгоритмов наведения антенной установки, при которых обеспечивается устойчивый прием сигналов в условиях качки корабля, проводилось в визуальной среде разработки Embarcadero RAD Studio XE6. Для математического моделирования были выбраны несколько вариантов работы приводов опорно-поворотного устройства антенной установки, также были проанализированы и выбраны возмущающие условия качки и дрейфа судна, применимые к кораблям малого водоизмещения. Моделирование подтвердило правильность разработанного алгоритма управления антенной и показало, что в условиях качки корабля введение оси угла наклона зеркала позволяет снизить требования к кинематическим параметрам приводов антенны, а введение в состав антенны блока акселерометров или приемника аппаратуры потребителя информации от спутниковых навигационных систем позволит дополнительно увеличить точность определения целеуказаний для антенны и повысить точность ее наведения.

Ключевые слова: антенна, алгоритм наведения, качка судна, дрейф судна, моделирование.

Для контролю польоту ракет і визначення точності виведення на задану орбіту космічних апаратів необхідно забезпечити приймання телеметричної інформації з борту ракети-носія. Станції приймання телеметричної інформації можуть знаходитися як на суші, так і на кораблях. При розміщенні антенної системи такої станції на борту корабля найбільш істотно впливають на точність наведення антени качка та дрейф судна. Для забезпечення точного наведення антенної установки приймання телеметрії, розміщеної на борту корабля, розроблено алгоритм керування. Для реалізації заданих вимог запропоновано використовувати тривісний опорно-поворотний пристрій з віссю кута нахилу дзеркала. У статті визначено зв'язок кінематичних параметрів приводів опорно-поворотного пристрою антенної установки та параметрів руху ракети космічного призначення, визначено кути повороту приводів антенної установки по трьох осях, а також обрано закон зміни кутової швидкості по азимутальній осі, що враховує гранично можливу кутову швидкість, яку забезпечує привід азимутальної осі. Числове моделювання алгоритмів наведення антенної установки, за яких забезпечується стає приймання сигналів в умовах хитавиці корабля, проводилося у візуальному середовищі розроблення Embarcadero RAD Studio XE6. Для математичного моделювання було обрано кілька варіантів роботи приводів опорно-поворотного пристрою антенної установки, також було проаналізовано й обрано збурені умови хитавиці та дрейфу судна, застосовувані до кораблів малої водотоннажності. Моделювання підтвердило правильність розробленого алгоритму керування антеною і показало, що в умовах хитавиці корабля введення осі кута нахилу дзеркала дозволяє знизити вимоги до кінематичних параметрів приводів антени, а введення до складу антенної установки блока акселерометрів або приймача апаратури споживача інформації від спутникових навігаційних систем дозволить додатково збільшити точність визначення цільовказівок для антени та підвищити точність її наведення.

Ключові слова: антена, алгоритм наведення, хитавиця судна, дрейф судна, моделювання.

For monitoring rocket flight and determining accuracy of spacecraft injection into the planned orbit, it is necessary to ensure the reception of telemetry data from the launch vehicle. Telemetry data receiving stations may be located either on land or on shipboard. When the antenna system of such station is placed on shipboard, ship roll and ship drift have the most considerable impact on the antenna guidance accuracy. To ensure the guidance accuracy of the telemetry receiving antenna set, placed on shipboard, the control algorithm was designed. It was offered to use triaxial rotary support with axis of reflector inclination angle to meet the requirements specified. In the article, the connection between kinematic parameters of the antenna rotary support drives and parameters of the space launch vehicle motion were identified, rotation angles of the antenna drives along the three axes were determined, and the law of angular velocity variation along the azimuthal axis, including the maximum feasible angular velocity provided by the azimuthal axis drive, was chosen. Numerical simulation of antenna guidance algorithms that provide stable signal receiving under conditions of ship roll was carried out in the visual development environment of Embarcadero RAD Studio XE6. Several variants for operation of the rotary support drives of the antenna set were chosen for mathematical simulation; disturbing conditions of ship roll and ship drift were analyzed and chosen for ships with small displacement. The simulation validated the designed antenna control algorithm and showed that the requirements for the cinematic parameters of the antenna drives were reduced under conditions of ship roll when the axis of reflector inclination angle was introduced; and accelerometer unit or GPS receiver installed in the antenna structure additionally increased the accuracy of target designation of the antenna and improved its guidance accuracy.

Keywords: antenna, guidance algorithm, ship roll, ship drift, simulation.

Введение

Для контроля полета ракеты космического назначения (РКН) и определения точности выведения на заданную орбиту космических аппаратов (КА) необходимо обеспечить прием телеметрической информации (ТМИ) с борта РКН. Станции приема ТМИ могут быть расположены как на суше, так и на кораблях.

В настоящее время для передачи ТМИ используется S-диапазон. Приемные антенны для этого диапазона имеют достаточно узкую диаграмму направленности. Так, параболическая антенна S-диапазона диаметром 3 м имеет диаграмму направленности шириной 3° . В связи с этим для приемных антенн, расположенных на кораблях, большое значение имеет учет динамики корабля при наведении антенны.

При размещении антенной системы станции приема ТМИ на борту корабля наиболее существенное влияние на точность наведения антенны оказывают качка и рыскание корабля по курсу. Также возмущающим фактором, влияющим на точность наведения антенной системы, является дрейф судна.

Влияние качки, рыскания и дрейфа полностью или частично может быть устранено за счет разработки и использования алгоритмов управления приводами корабельных антенных систем.

Постановка задачи

В данной статье рассмотрен вопрос обеспечения точности наведения корабельной антенной установки (АУ) при приеме ТМИ с РКН для малых судов в условиях качки и дрейфа.

АУ представлена в виде зеркальной антенны и смонтирована на трехосном опорно-поворотном устройстве (ОПУ).

Для разработки алгоритма управления антенной установкой и ее наведения определена связь кинематических параметров приводов ОПУ АУ и параметров движения РКН. Использовались следующие системы координат:

– $OXYZ$ – топоцентрическая система координат (ТСК): ось OZ совпадает с нормалью к поверхности эллипсоида, проходящей через точку O , ось OX лежит в плоскости меридиана и направлена на Северный полюс, а ось OY направлена на восток;

– $Ox_0Y_0Z_0$ – корабельная система координат (КСК): ось Ox_0 совпадает с продольной осью корабля и направлена к носу корабля, ось Oy_0 параллельна мидельшпангоуту и направлена вправо, ось Oz_0 перпендикулярна плоскости палубы и направлена вверх;

– $O'X_1Y_1Z_1$ – антенная система координат (АСК), в которой ось $O'Z_1$ совпадает с электрической осью антенны, ось $O'Y_1$ перпендикулярна оси $O'Z_1$ и лежит в плоскости, образованной осями OZ_0 и $O'Z_1$, ось $O'X_1$ дополняет АСК до правой тройки.

Взаимное положение систем координат приведено на рис. 1.

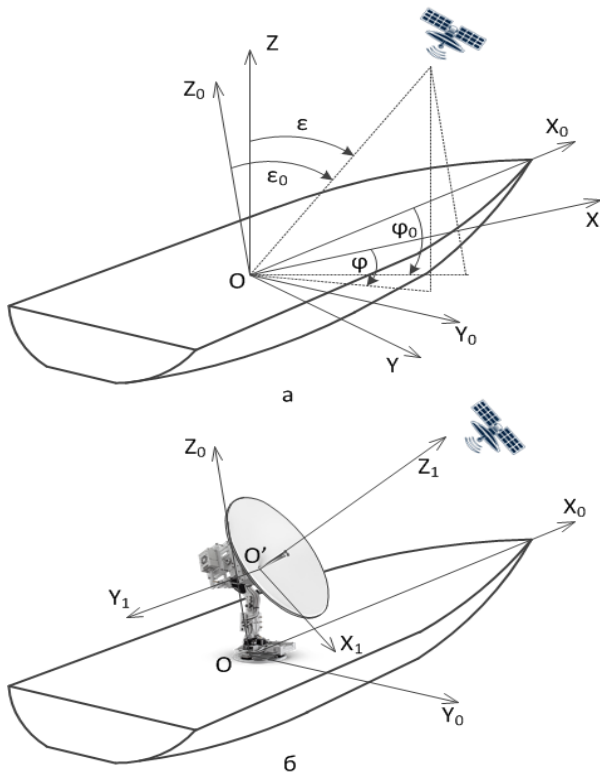


Рис. 1. Взаимное положение систем координат: *a* – топоцентрическая и корабельная системы координат; *б* – корабельная и антенная системы координат

Как показано на рис. 1, *a*, направление приема сигнала в ТСК задается функциями угла места $\varepsilon(t)$ и азимута $\varphi(t)$, в КСК – $\varepsilon_0(t)$ и $\varphi_0(t)$.

R и R_0 представляют собой векторы направления приема сигнала в ТСК и КСК соответственно.

Связь между векторами R и R_0 определяется следующим образом:

$$R_0 = M_{ТСК}^{КСК} \times R,$$

где $M_{ТСК}^{КСК}$ – матрица перехода от ТСК к КСК;

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) \cdot \cos(\varphi) \\ \cos(\varepsilon) \cdot \sin(\varphi) \\ \sin \varepsilon \end{bmatrix}.$$

Матрица $M_{ТСК}^{КСК}$ формируется тремя последовательными поворотами на углы бортовой качки $\beta(t)$, килевой качки $\alpha(t)$ и угла рыскания корабля по курсу $\gamma(t)$ [1], показанные на рис. 2, и имеет следующий вид:

$$M_{ТСК}^{КСК} = M_\gamma \cdot M_\alpha \cdot M_\beta,$$

$$\text{где } M_\gamma = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_\alpha = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix};$$

$$M_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ 0 & -\sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix}.$$

За положительные направления угловых поворотов принимали:

- бортовую качку на правый борт;
- килевую качку на корму;
- рыскание по курсу на правый борт.

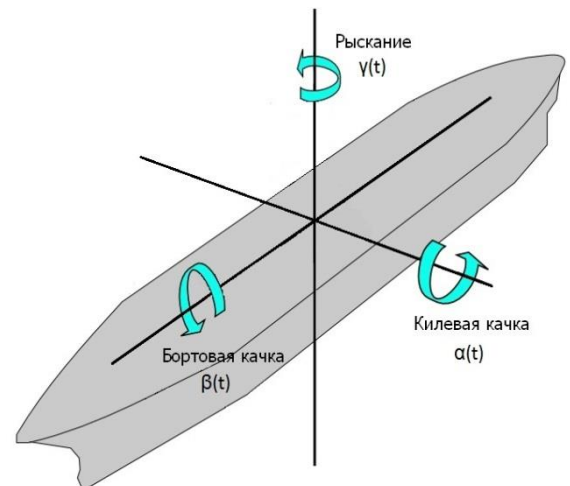


Рис. 2. Углы качки корабля

Наведение АУ выполняется поворотами относительно азимутальной оси на угол $\Phi(t)$, угломестной оси на угол $\Theta(t)$, оси наклона рефлектора на угол $\Omega(t)$. В начальном положении углы $\Phi(t)$, $\Theta(t)$ и $\Omega(t)$ равны нулю (направления осей АСК и КСК).

После выполнения поворотов направление на РКН в АСК определяется вектором R_1 , который находится с помощью матричного соотношения

$$R_1 = M_{КСК}^{АСК} \times R_0, \quad (1)$$

где $M_{КСК}^{АСК}$ – обратная матрица, которая описывает поворот АСК относительно

КСК, формируется поворотами азимутальной оси на угол $\Phi(t)$, угломестной оси на угол $\Theta(t)$ и оси наклона рефлектора на угол $\Omega(t)$ и имеет следующий вид:

$$M_{\text{КСК}}^{\text{АСК}} = (M_{\Phi} \cdot M_{\Theta} \cdot M_{\Omega})^{-1},$$

$$\text{где } M_{\Phi} = \begin{bmatrix} \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) & 0 \\ \sin(\Phi) & \cos(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{\Theta} = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & 0 & -\sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \end{bmatrix};$$

$$M_{\Omega} = \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & -\sin(\Omega) & 0 \\ \sin(\Omega) & \cos(\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Алгоритмы управления АУ должны обеспечивать точное совмещение электрической оси антенны с направлением на РКН. Углы поворота трех приводов АУ определяются решением матричного уравнения (1):

$$\Phi(t) = \int_0^t F(\tau) d\tau; \quad (2)$$

$$\Theta(t) = \arctg \left[\frac{\text{tg}(\varepsilon_0(t))}{\cos(\Phi(t) - \varphi_0(t))} \right]; \quad (3)$$

$$\Omega(t) = \arctg \left(\frac{A_1}{A_2} \right), \quad (4)$$

где $A_1 = \cos(\Theta(t)) \cdot \sin(\Phi(t) - \varphi_0(t))$;

$A_2 = \sin(\Theta(t)) \cdot \sin(\varepsilon_0(t)) +$

$+ \cos(\Theta(t)) \cdot \sin(\varepsilon_0(t)) \cdot \cos(\Phi(t) - \varphi_0(t))$;

$F(\tau)$ – закон изменения угловой скорости азимутальной оси.

Выбранный закон изменения угловой скорости азимутальной оси учитывает предельно возможную угловую скорость, обеспечиваемую приводом азимутальной оси, и имеет следующий вид:

$$F(\tau) = \begin{cases} \varphi'_0(\tau), & \text{если } \varphi'_0(\tau) \leq F_{\text{пред}} \\ F_{\text{пред}}, & \text{если } \varphi'_0(\tau) > F_{\text{пред}} \end{cases},$$

где $F_{\text{пред}}$ – предельно возможная угловая скорость азимутального привода.

Алгоритмы наведения АУ с учетом качки корабля реализуются следующим образом:

– по исходным данным о положении объекта наблюдения в ТСК $\varepsilon(t)$, $\varphi(t)$ в каждый момент времени с учетом данных навигационной системы корабля формируются данные о положении объекта в КСК $\varepsilon_0(t)$, $\varphi_0(t)$;

– определяется угол поворота азимутальной оси $\Phi(t)$ в соответствии с (2);

– в соответствии с вычисленным углом поворота азимутальной оси по формуле (2) и изменением азимута объекта в КСК $\varphi_0(t)$ определяется угол поворота угломестной оси АУ $\Theta(t)$ в соответствии с (3);

– на основе данных об угловом положении РКН в КСК $\varepsilon_0(t)$, $\varphi_0(t)$ и данных датчиков углов поворота азимутальной и угломестной осей $\Phi(t)$ и $\Theta(t)$ с использованием формулы (4) определяется угол поворота оси наклона рефлектора $\Omega(t)$.

Для работы описанного алгоритма наведения антенны достаточно иметь данные об углах качки корабля и курса в каждый момент времени и данные о направлении приема сигнала, что позволяет упростить управление АУ.



Рис. 3. Обобщенная структурная схема управления АУ

Численное моделирование приведенных алгоритмов наведения АУ, при которых обеспечивается устойчивый прием сигналов в условиях качки корабля, проводилось в визуальной среде разработки Embarcadero RAD Studio XE6.

Результаты исследований приведены на рис. 4, 5. Моделирование проводилось для двух значений допустимой скорости азимутального привода, которые составляют 5 и $10^\circ/\text{с}$. Максимальная амплитуда и период килевой качки составляют $1,8^\circ$ и 5 с, бортовой качки – $3,9^\circ$ и $8,5$ с, что соответствует интенсивности волнения 3 балла для судов водоизмещением $5000 - 6000$ т. Амплитуда смещения по курсу составляет 3° и $T_{\text{курс}} = 9$ с [1, 2].

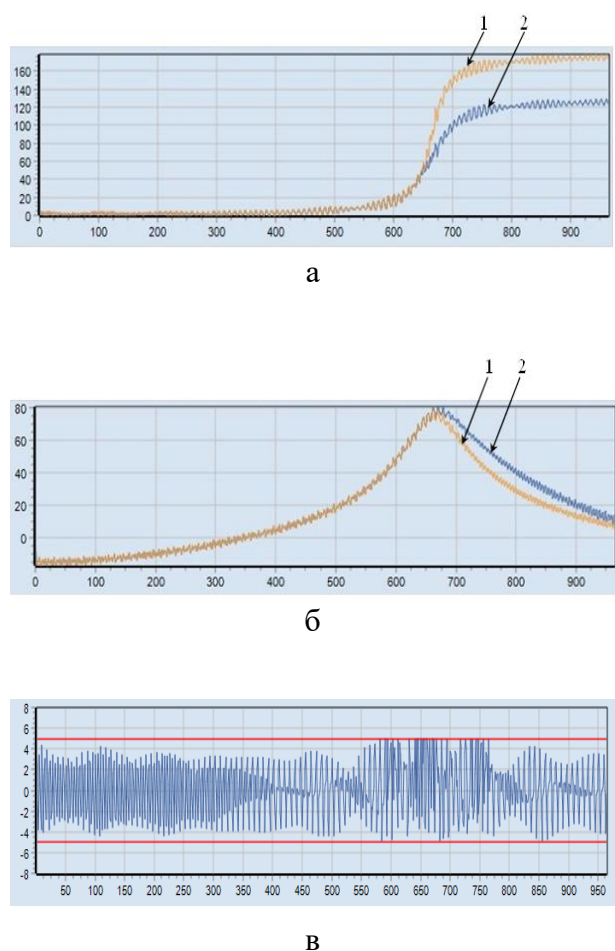


Рис. 4. Кинематические характеристики азимутальной и угломестной осей при предельном значении угловой скорости азимутальной оси $F_{\text{пред}} = 5^\circ/\text{с}$

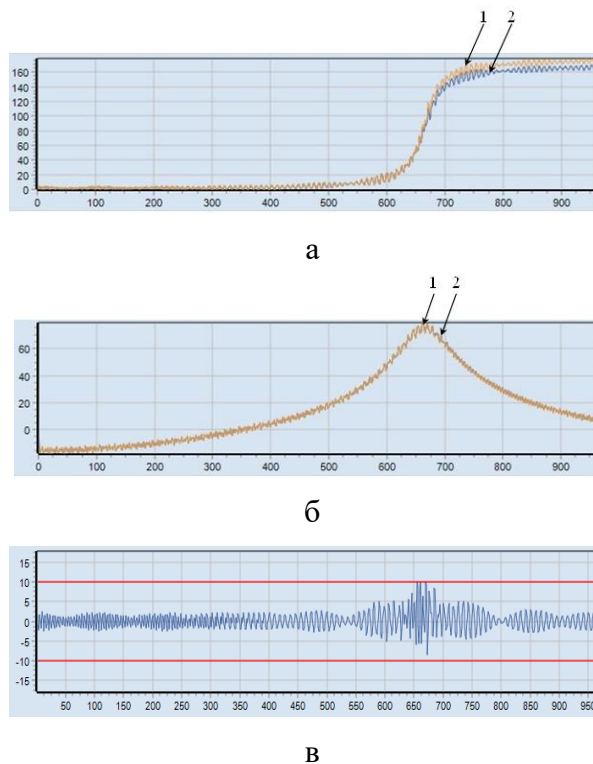


Рис. 5. Кинематические характеристики азимутальной и угломестной осей при предельном значении угловой скорости азимутальной оси $F_{\text{пред}} = 10^\circ/\text{с}$

На рис. 4, а, б цифрой 1 показаны углы азимута и места РКН в КСК, цифрой 2 – углы поворота азимутальной и угломестной осей. На рис. 4, в приведена угловая скорость азимутальной оси, предельно возможная угловая скорость привода $F_{\text{пред}}$ при наведении АУ в этом случае составляет $5^\circ/\text{с}$.

На рис. 5, а, б цифрой 1 показаны углы азимута и места РКН в КСК, цифрой 2 – углы поворота азимутальной и угломестной осей. На рис. 5, в приведена угловая скорость азимутальной оси, предельно возможная угловая скорость привода $F_{\text{пред}}$ при наведении АУ в этом случае составляет $10^\circ/\text{с}$.

Приведенные графики иллюстрируют работу приводов ОПУ в соответствии с описанным выше алгоритмом управления. Для рассматриваемого варианта алгоритма наведения АУ после превышения угловой скорости движения РКН относительно корабля возникает отставание угла поворота азимутальной оси от азимутального поло-

жения РКН по отношению к кораблю, показанное на рис. 4, а. Разница между истинным азимутальным углом и углом поворота азимутального привода при $F_{\text{пред}} = 5^\circ/\text{с}$ составляет $49,68^\circ$. Точное наведение антенны при этом обеспечивается поворотом оси угла наклона рефлектора и коррекцией угла поворота угломестной оси, показанной на рис. 4, б.

При предельном значении угловой скорости азимутальной оси $F_{\text{пред}}$, составляющей $10^\circ/\text{с}$, отставание угла поворота азимутальной оси от азимутального положения РКН составляет $8,74^\circ$. Точное наведение антенны при этом обеспечивается поворотом оси угла наклона рефлектора на угол $8,74^\circ$.

Уменьшение предельного значения угловой скорости азимутальной оси, как следует из результатов моделирования, обуславливает увеличение поворота оси угла наклона рефлектора и соответственно увеличение его угловой скорости и углового ускорения.

Таким образом, введение оси угла наклона рефлектора при использовании рассматриваемого алгоритма наведения АУ позволяет снизить требования к предельным значениям угловых скоростей и ускорений азимутального привода. Требования к кинематическим параметрам угломестного привода не претерпевают принципиальных изменений. В то же время следует учитывать ограничение минимальной угловой скорости азимутальной оси. Это связано с тем, что отставание азимутальной оси от азимутального направления на РКН на 90° и более приведет к невозможности поворота оси угла наклона рефлектора, при котором электрическая ось антенны будет направлена на РКН.

Еще одним из возмущающих факторов, влияющих на точность наведения АУ, является дрейф судна по курсу и в сторону в зависимости от силы течения в океане.

Для моделирования наведения АУ при дрейфе судна по курсу и в сторону взяли максимальное значение скорости течения при 3 баллах, составляющее $6,25 \text{ м/с}$ [2, 3].

Суммарный уход судна по курсу и в сторону при данной скорости составляет 6 км.

В результате моделирования были определены значения азимута $\varphi(t)$ и угла места $\varepsilon(t)$, которые отличаются от номинальных значений на δ , максимальное значение которой составляет $0,31^\circ$.

Для введения корректировки судна из-за смещения по дрейфу необходимо добавить в конструкцию АУ блок акселерометров или приемник аппаратуры потребителя информации от спутниковых навигационных систем, который при решении навигационной задачи будет регистрировать уход судна относительно его исходного положения (начало приема сигнала) и вносить корректировки в программу расчета целеуказаний для АУ.

Выводы

Математическое моделирование для значений допустимой скорости азимутального привода 5 и $10^\circ/\text{с}$ в условиях качки и дрейфа малого судна позволило выработать оптимальный алгоритм управления приводами ОПУ антенны наведения. Результаты моделирования показали, что при использовании трехосного ОПУ антенны наведения и разработанного алгоритма управления обеспечивается необходимая точность наведения антенны для приема ТМИ с различных трасс полета РКН.

Корректировка судна по дрейфу позволит дополнительно увеличить точность наведения антенны для приема телеметрии.

Список использованной литературы

1. Благовещенский С. Н., Холодильник А. Н. Справочник по статике и динамике корабля. Т. 2. Динамика корабля. – Л.: Судостроение, 1976. – 544 с.
2. Сакелари Н. Навигация. – М.: Воениздат, 1936. – С. 137.
3. Безруков Ю. Ф. Колебание уровня волны в Мировом океане. – Симферополь: Изд-во Таврического университета им. В. И. Вернадского, 2001. – 50 с.

Статья поступила 12.06.2018