УДК 681.51:621.396.946

О.В. Мнушка

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ АНТЕННОЙ УСТАНОВКИ МОБИЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ

Проанализированы способы построения управляемых антенных устройств (АУ) для мобильных систем спутниковой навигации и связи (МССНС). Проанализированы преимущества и недостатки применения АУ с антеннами типов «зеркальная антенна» (ЗА) и «фазированная антенная решетка» (ФАР) в таких системах. Синтезирована имитационная модель системы управления позиционированием АУ с ЗА для применения в МССНС и проведено моделирование ее параметров. Полученная система управления позволяет производить позиционирование АУ по углу азимута в диапазоне углов 0…2π.

Ключевые слова: *мобильная система цифровой спутниковой связи, зеркальная антенна, имитационное моделирование, система управления, позиционирование.*

Введение

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Системы мобильной спутниковой связи и навигации получают все большее распространение за счет улучшения покрытия, развития региональных (территориальных) и персональных систем связи и навигации. Антенные установки, используемые в МССНС, должны обеспечивать: а) высокую чувствительность при жестких ограничениях на массогабаритные размеры; б) высокую точность наведения на спутник; в) автоматическую регулировку положения и направления.

Анализ исследований и публикаций. Для построения управляемых АУ на основе ЗА находят применение электромашинные, гидравлические и электромеханические на основе тиристорных преобразователей [1] и АУ на основе активных и пассивных ФАР [2].

Применение ФАР позволяет получить практически безынерционную следящую АУ, в отличие от традиционных ЗА, практически нечувствительную в воздействию ветра, осадков и др. атмосферных воздействий. В настоящее время на основе ФАР разрабатываются АУ как бытового, так и военного применения [2, 6 – 8]. К недостаткам ФАР можно отнести: а) очень высокую стоимость АУ; б) ограниченный диапазон углов, на которые может быть отклонён луч АУ. Практически диапазон углов отклонения луча составляет 45...60 градусов от перпендикуляра к плоскости антенны. Его отклонение на большие углы значительно ухудшает основные характеристики АУ и уменьшает способность обнаружения цели на расстоянии. Выход за пределы или приближение к краям основного лепестка диаграммы направленности (ДН) элементов антенной решетки приводит к участию боковых лепестков ДН в формировании ДН ФАР и к уменьшению мощности излучения. Традиционные АУ на основе ЗА значительно проще и дешевле ФАР, не имеют ограничений на угол поворота АУ, но требуют сложной системы наведения на искусственный спутник Земли (ИСЗ) и стабилизации положения во время движения АУ [3-5]. Кроме того, АУ на традиционных ЗА не подходят (плохо подходят) для связи во время движения на большой скорости.

Для мобильных систем телекоммуникации и навигации фирмами Cobham SATCOM Marine Systems, RaySat, Inc., KVH Industries, Inc и др. [6 – 8] выпускается ряд АУ, пригодных для установки на корабли, яхты, ж.д. поезда, автобусы (рис. 1). Анализ основных характеристик таких АУ (табл. 1) позволяет сделать вывод, что АУ на ЗА остаются актуальными, но постепенно вытесняются системами на основе ФАР.

Как правило, АУ поставляются в виде полного комплекта оборудования: АУ, тюнер, GPS-навигатор и т.д., что обеспечивает подключение клиента к полному комплекту услуг, предоставляемому фирмой-производителем или фирмами-партнерами, обеспечивающими спутниковое вещание, связь, Internet. Использование таких систем с другими ИСЗ или для решения других задач затруднительно, а часто и невозможно.

Постановка задачи. Современные АУ МССНС выполняют управляемыми для обеспечения возможности слежения за спутником (системы со спутниками на средних (MEO), высоких и геостационарных орбитах (GEO)) и неуправляемыми (для низкоорбитальных систем (LEO)). Применение управляемых АУ предпочтительно в виду возможности построения эффективных систем управления положением АУ при движении МССНС, значительно большего времени видимости спутника, что исключает необходимость в частых переключениях

© О.В. Мнушка

между спутниками. Промышленные двигатели-позиционеры, например Technomate TM-2300, Hy-2120 и др., обеспечивают ограниченный диапазон улов азимута (±(60…65)°) и места (10...70°), что может оказаться недостаточным.

а б

Рис 1. Мобильные АУ на основе ЗА [3] (а) и ФАР с механическим приводом [4] (б)

Таблица 1

Параметры АУ МССНС

Модель	TracPhone V3 [7]	RaySat™ T5-R [8]	Sea Tel 3004 [6]
Тип	ЗА	ФАР	ЗА
Работа в движении	+	+	+
Размер (дл. х шир. х высота), см	82x79x 13.4	60x55x17	76
Азимут	720^0	неогранич.	$\pm 345^0$
Угол места	$7{,}5\text{-}75^0$	$15\text{-}80^0$	$-15\ldots +120^0$
Скорость поворота /слежения (град / с)	30^0	30^0	30^0
Диапазон отклонения (град / 10 с)	$\pm 90^0$	$\pm 90^0$	$\pm 90^0$
ЭИИМ , дБм	>75	> 53	> 45
Сила ветра (EME), км/ч	165	-	-
Скорость передачи данных	загрузка до 4 Мбит/с, передача до 512 Кбит/с	+	-
Цена	$18600 (комплект)	$2500 (антенна)	$19000 (комплект)

Цель исследования. Разработка имитационной модели системы управления и исследование характеристик перемещения АУ МССНС в одной плоскости для применения системах с использованием геостационарной орбиты.

Изложение материала и результатов

При расположении GEO ИСЗ предъявляются жесткие требования к характеристикам приемного тракта, которые напрямую зависят от параметров АУ и точности ее наведения на АУ ИСЗ. Для GEO систем МССНС решают задачи стабилизации положения АУ (на основе гироскопов) и систем наведения (на основе управляемых АУ). В задаче управления положением АУ объектом управления является система перемещения АУ, состоящая из двигателя и редуктора, при условии перемещения АУ в одной плоскости (рис. 2).

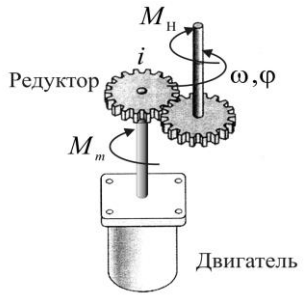


Рис. 2. Объект управления

Для управления перемещением АУ применим систему подчиненного регулирования, в которой система электропривода тиристорный преобразователь (ТП) – двигатель описывается системой дифференциальных уравнений (1) [1, 6]:

$$\frac{dE_д}{dt} = \left(K_{ТП}u - E_д\right)\frac{1}{T_\mu},$$

$$\frac{dI_д}{dt} = \left[\left(E_д - K\Phi_H\omega\right)\frac{1}{R_Э} - I_д\right]\frac{1}{T_Э}, \qquad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K\Phi_H I_д}{J}, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{i}\omega,$$

где $E_д$ – ЭДС в обмотках двигателя, В; $K_{ТП}$ – коэффициент усиления ТП; u – напряжение задания, В; T_μ – постоянная времени ТП, с; $I_д$ – ток в обмотках двигателя, А; $K\Phi_H$ – коэффициент двигателя, В·с; $R_Э$ – эквивалентное сопротивление силовой цепи, Ом; $T_Э$, T_M – электромагнитная и электромеханические постоянные времени, с; J – момент инерции, кг·м^2; i – передаточное число редуктора; ω – скорость вращения, рад/с; φ – угол положения, рад.

В векторно-матричном виде (1) будет:

$$\dot{X} = AX + BU, \qquad \dot{Y} = CX + DU, \qquad (2)$$

где коэффициенты системы (2) определяются на основе (1) в виде:

$$X = \begin{bmatrix} E_д & I_\partial & \omega & \varphi \end{bmatrix}; \; U = \begin{bmatrix} u \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_Э R_Э} & -\frac{1}{T_Э} & -\frac{K\Phi_H}{T_Э R_Э} & 0 \\ 0 & \frac{K\Phi_H I_д}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{i} & 0 \end{bmatrix}; \; B = \begin{bmatrix} \frac{K_{ТП}}{T_\mu} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}:$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Позиционные или программно-управляемые электроприводы обеспечивают перемещение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с заданной программой. Они строятся как системы подчиненного регулирования [3] или системы с нейроконтроллерами [4, 5]. Контроль положения осуществляется датчиком положения аналогового (например, сельсин) или дискретного (например, импульсный датчик) типа [4, 5]. Системы с нейроконтроллерами значительно сложнее и дороже, потому их применение должно бать обоснованным [5].

Рассмотрим систему подчиненного регулирования позиционирования АУ.

Исходные данные для моделирования: тип двигателя – НН-120; ТП типа ТНУ, регуляторы скорости и положения – П; напряжение задания

$$U_З = 10\ В;\ T_\mu = 0{,}003\ с;\ K_{ТП} = 27{,}27;$$

$$R_Э = 1{,}63\ Ом;\ T_Э = 0{,}0224\ с\ и\ T_М = 0{,}0323\ с,$$

соответственно; коэффициент двигателя $K\Phi_Н = 1{,}5787\ В\cdot с$; номинальный ток двигателя $I_Н = 1{,}46\ А$; номинальное напряжение двигателя $U_Н = 18\ В$; J=0,05 кг·м^2; скорость вращения двигателя $n_Н$, (об/мин) / $\omega_Н$, (рад/с) – 1180/123.5693; перегрузочная способность двигателя – 2,5. Для преобразования вращения в системе положения используется редуктор с передаточным числом i, передаточная функция позиционной части объекта будет иметь вид $W_{Ï\times} = 1/(ip)$.

С указанными параметрами двигателя и ТП получим следующие параметры системы управления: максимальный ток нагрузки $I_{max} = 36.5А$; коэффициенты обратных связей по току, скорости и положению – $K_{ОТ} = 0.274\ В\cdot А^{-1}$, $K_{ОС} = 0.0809\ В\cdot с$, $K_{ОП} = 1.5915\ В\cdot рад^{-1}$.

При настройке контура тока на модульный оптимум передаточная функция регулятора тока $W_{ÐÒ} = K_{ÐÒ}\cdot(T_{Ý}p+1)/(T_{Ý}p)$, где коэффициент усиления регулятора тока $K_{РТ} = T_Э\left(2T_\mu K_o\right)^{-1} = 4{,}584$ и $K_О = K_{ТП}R_Э^{-1}K_{ОТ} = 0{,}8144$.

Передаточная функция регулятора контура скорости представляет собой пропорциональный регулятор и имеет следующий вид $W_{РС} = K_{РС}$, где

$$K_{РС} = I\cdot\left(4T_\mu K_О\right)^{-1} = 0{,}4688\ и$$

$$K_О = K\Phi_Н K_{ОТ}^{-1}K_{ОС} = 8{,}8879.$$

Для компенсации влияния ЭДС двигателя на форму кривой тока, введем в обратную связь по току корректирующее звено с передаточной функцией $W_{КЗ} = K_1\dfrac{Tp+1}{T_Эp+1}$, где $K_1 = 1-2T_\mu T_М^{-1} = 0{,}8412$ и

$$T = \left(T_М T_Э - 0.5\left(2T_\mu\right)^2\right)\cdot\left(T_М - 2T_\mu\right)^{-1} = 0{,}0268.$$

Регулятор положения, как и регулятор скорости, является пропорциональным с передаточной функцией $W_{РП} = K_{РП}$, где

$$K_{РП} = i\cdot K_{ОС}\left(16T_\mu K_{ОП}\right)^{-1} = 104{,}1362.$$

На основе проведенных расчетов получена модель СУ АУ (рис. 3), проведено имитационное моделирование и получены параметры СУ (рис. 4).

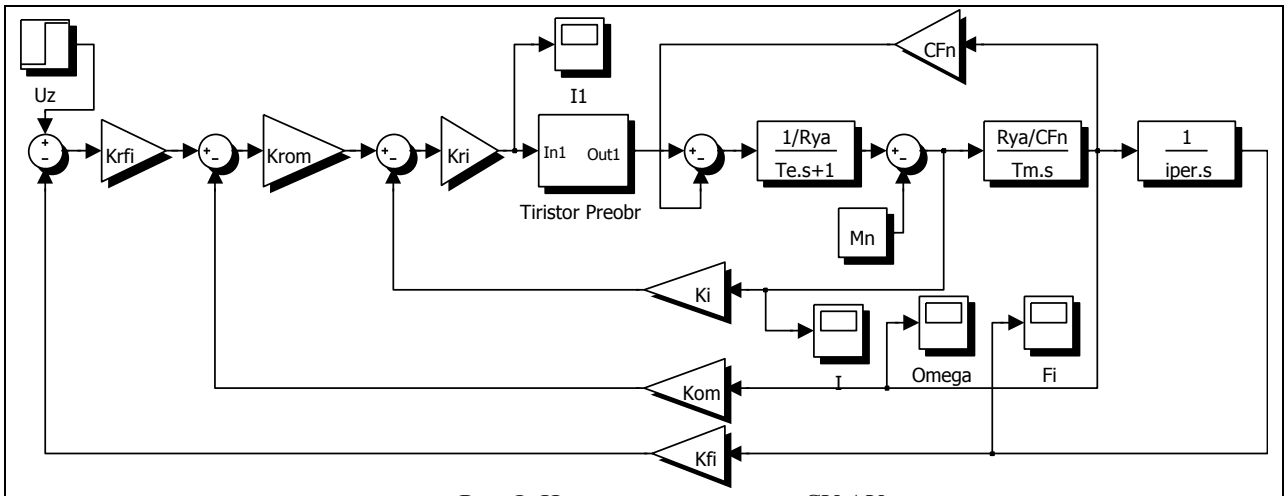
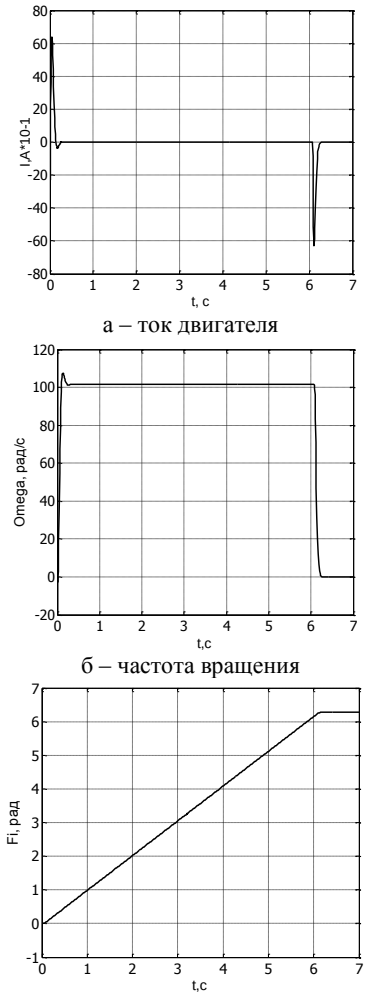


Рис. 3. Имитационная модель СУ АУ

Разработанная СУ обеспечивает поворот на 360° менее чем за 1,5 с. Недостатком полученной системы может быть форма тока (во время переходных процессов) в обмотках двигателя и сложность компенсации случайных помех, возникающих в контуре управления. Для минимизации устранения указанных недостатков возможно введение в СУ нейрорегулятора, полученного на основе методики генетических алгоритмов.

Выводы и направление дальнейших исследований

Проведен обзор систем управления положением (вращением) АУ современных систем спутниковой



а – ток двигателя

б – частота вращения

в – положение (угол положения)

Рис. 4. Результаты моделирования параметров

связи и вещания. Проанализированы преимущества и недостатки применения МССНС с АУ на основе традиционных ЗА и на основе ФАР. Показано, что применение АУ с ЗА позволяет построить более простые и менее затратные подвижные МССНС, способные поддерживать связь в процессе движения. В результате имитационного моделирования в системе Matlab| Simulink была синтезирована система подчиненного регулирования позиционирования АУ подвижной МССНС. СУ обеспечивает регулировку с заданными параметрами положения АУ в одной плоскости.

Перспективами дальнейших исследований является построение на основе имитационного моделирования СУ АУ подвижной МССНС в двух плоскостях без учета системы горизонтальной стабилизации АУ в процессе движения.

Список литературы

1. *Белянский П.В. Управление наземными антеннами и радиотелескопами / П.В. Белянский, Б.Г. Сергеев. – М.: Сов. радио, 1980. – 280 с.*
2. *Hansen R.C. Phased Array Antennas / R.C. Hansen. – Wiley, 2009. – 571 p.*
3. *Soltani M.N. Reliable Control of Ship-Mounted Satellite Tracking Antenna / M.N. Soltani, R. Izadi-Zamanabadi, R Wisniewski // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – Vol. 19, No. 1, January 2011. – P. 221-228.*
4. *Palamar M. Neurocontroller to Tracking Antenna Control of Information Reception from Earth Remote Sensing Satellites / M. Palamar // IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. – Sofia, Bulgaria, 2005. – P. 340-344.*
5. *Razi A. Intelligent Position Control of Earth Station Antennas with Model Independent Friction Compensation Based on MLP Neural Networks / A. Raz, M.B. Menchaj // Proceedings ofthe 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – Changchun, China, 2011. – P. 2695-2700.*
6. *Sea Tel Model 3011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.cobham.com/about-cobham/aerospace-and-security/about-us/satcom/concord/ products/satellite-communications/model-3011-antenna.aspx.*
7. *KVH Россия – мобильное спутниковое ТВ, Интернет и телефон | Купить ТВ антенну в Москве [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.kvh.ru/.*
8. *RaySat and RaySat Antenna Systems in-motion, low-profile, phased-array, Ku band mobile satellite antennas for SatCom on the move, mobile vsat (SOTM antenna) and mobile satellite TV in cars [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.raysat.com/.*

Поступила в редколлегию 1.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Сахацкий, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯМ АНТЕННОЮ УСТАНОВКОЮ МОБІЛЬНОЇ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

О.В. Мнушка

Проаналізовано способи побудови керованих антенних установок (АУ) для мобільних систем супутникової навігації та зв'язку (МССЗН). Проаналізовано переваги та недоліки застосування антенних пристроїв з антенами типів «дзеркальна антена» і «фазована антенна решітка» у МССЗН. Синтезовано імітаційну модель системи управління позиціонуванням АУ з дзеркальною антеною для застосування в МССНЗ та проведено моделювання її параметрів . Система управління, яку було отримано, дозволяє позиціонувати АУ за кутом азимуту в діапазоні кутів 0 ... 2π.

Ключові слова: *мобільна система цифрового супутникового зв'язку, дзеркальна антенна, імітаційне моделювання, система управління, позиціонування.*

A SIMULATION MODEL OF THE ANTENNA UNIT'S POSITIONING CONTROL FOR MOBILE SATELLITE NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEM

O.V. Mnushka

Methods of constructing controlled antenna unit for mobile satellite communication and navigation systems were analyzed. Advantages and disadvantages of the antenna module with antenna types "reflector antenna" and "phased array antenna" of such systems have been analyzed. A simulation model of the control positioning antenna unit with reflector antenna for use in mobile satellite communication and navigation was obtained. Simulation parameters of antenna unit's control system was carried out. The control system, which has been obtained, allows positioning of the antenna unit to the azimuth angle range 0 ... 2π.

Keywords: *mobile digital satellite system, reflector antenna, simulation, control system, positioning.*