



پایدارسازی گرادیان جاذبه وضعیت ماهواره با بوم طول متغیر در مدار دایره‌ای

سلیمان فارسی¹، مجید محمدی مقدم^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 143-14115، m.moghaddam@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 دی 1393

پذیرش: 19 اسفند 1393

ارائه در سایت: 19 فروردین 1394

کلید واژگان:

کنترل وضعیت

پایدارسازی گرادیان جاذبه

سیستم‌های پورت همیلتونی

سیستم‌های فروتحریک شده

چکیده

در این مقاله، روشی برای پایدارسازی گرادیان جاذبه سه‌محوره ماهواره در مدار دایره‌ای ارائه و بررسی شده است که در آن تنها از یک عملگر استفاده می‌شود. ماهواره‌ای با بوم طول متغیر، متشکل از دو جسم صلب شامل بدنه اصلی و جرم متصل به انتهای بوم در نظر گرفته می‌شود که در راستای بوم نسبت به هم امکان حرکت دارند. سیستم دارای 4 درجه آزادی است و تنها ورودی کنترلی، نیروی بین این دو جسم است و در نتیجه، سیستم فروتحریک شده است. گشتاور گرادیان جاذبه تنها گشتاور خارجی سیستم فرض شده است. به دلیل این که سیستم فروتحریک شده است و ساختار همیلتونی دارد، از رویکرد پورت همیلتونی بهره گرفته شده است. معادلات حرکت سیستم به فرم همیلتونی استخراج شده و نقاط تعادل و مقادیر ورودی لازم برای آن به دست آمده است. از دینامیک خطی سیستم حول نقاط تعادل می‌توان نتیجه گرفت که دینامیک خطی پیچش و تغییر طول بوم مستقل از دینامیک خطی گردش - غلتش است. بنابراین، دینامیک گردش - غلتش، به صورت خطی کنترل ناپذیر است. برای طراحی کنترل کننده، از روش شکل دهی انرژی و تزریق میرایی استفاده شده است. شرایط لازم برای این که قانون کنترلی شکل دهی انرژی، پایدار ساز باشد به دست آمده و دینامیک حلقه بسته بررسی شده است. سیستم حلقه بسته، دارای منیقول مرکزی است. در نهایت، به وسیله شبیه سازی، عملکرد سیستم حلقه بسته، میل کردن مسیر حالت به منیقول مرکزی و همگرایی غیرنمایی آن نمایش داده شده است.

Gravity gradient attitude stabilization of a satellite with varying-length boom in circular orbit

Salman Farsi, Majid Mohammadi Moghaddam*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, m.moghaddam@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 December 2014
Accepted 10 March 2015
Available Online 08 April 2015

Keywords:
Attitude control
Gravity gradient stabilization
port-Hamiltonian systems
Under-actuated systems

ABSTRACT

In this paper, a method of tri-axial gravity gradient stabilization of satellite in circular orbit is proposed and investigated. In this method, only one actuator is employed. A satellite with varying-length boom is considered, consisting of two rigid bodies having the freedom of moving in the boom direction. The only control input is the force between these two bodies to control the varying-length boom. The gravity gradient torque is considered as the only external torque acting on the satellite. The system is under-actuated and has Hamiltonian structure. So, the port-Hamiltonian approach is utilized. The equations of motion of the system are obtained in Hamiltonian formulation. The equilibrium points and their required control inputs are determined. The linearization around the equilibria is carried out and it can be seen that the linear dynamics of pitch-boom and roll-yaw are decoupled. Therefore, the roll-yaw dynamics is linearly uncontrollable. The method of energy shaping and damping injection is used for controller design. The conditions on the energy shaping control law to stabilize the system are determined. Further, the resulting closed-loop system is analyzed. The closed-loop system has center manifolds. Finally, the performance of the closed-loop system, convergence of state trajectory to the center manifold and its non-exponential convergence is shown by simulation.

1- مقدمه

صورت خرابی برخی عملگرها، سیستم فروتحریک شده باید مأموریت‌های کاهش یافته‌ای را انجام دهد. از طرف دیگر، ماهواره فروتحریک شده به عنوان نمونه‌ای مناسب در نظریه کنترل هندسی بررسی می‌شود. پایدارسازی گرادیان جاذبه از روش‌های مؤثری است که نشانه‌روی به زمین³ را به صورت غیرفعال و ذاتی تأمین می‌کند و معمولاً در کنار عملگرهای

پایدارسازی وضعیت ماهواره فروتحریک شده¹ از جنبه عملی و نظری اهمیت دارد. در ماهواره‌های کوچک برای کاهش جرم، هزینه، توان مصرفی و پیچیدگی سیستم، از پایدارسازی نیمه فعال² استفاده می‌شود. همچنین در

1- under-actuated
2- semi-active

3- earth-pointing

نشان داده است [15]. به همین جهت، در این پژوهش از رویکرد پورت همیلتونی بهره گرفته شده است.

در بخش 2، معادلات حرکت سیستم و فرم همیلتونی آن به دست آمده است. در بخش‌های 3 و 4 نقاط تعادل و خطی‌سازی حول آن‌ها ارائه شده است. در بخش 5 پایدارسازی با روش شکل‌دهی انرژی و تزریق میرایی، که یکی از روش‌های متداول و کارآمد در رویکرد پورت همیلتونی است، بررسی شده است و شبیه‌سازی، بحث درباره نتایج و نتیجه‌گیری بخش‌های پایانی مقاله است.

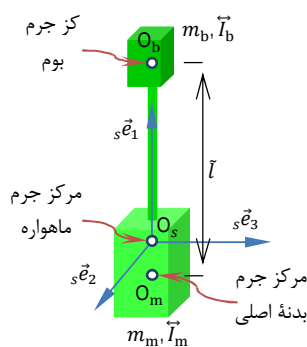
2- مدل‌سازی

2-1- توصیف سیستم

سیستم مورد نظر، ماهواره‌ای است با یک بوم طول متغیر تحت گشتاور گرادیان جاذبه جسم سنگین مرکزی کروی (زمین) که در مدار دایره‌ای حول آن جسم قرار دارد. اثر دینامیک وضعی و نیروهای خارجی دیگر روی دینامیک انتقالی نادیده گرفته می‌شود. تنها، عبارت اول گشتاور گرادیان جاذبه در نظر گرفته می‌شود. همچنین، از گشتاورهای خارجی دیگر، صرف نظر می‌شود. ماهواره با بوم طول متغیر متشکل از دو جسم صلب در نظر گرفته می‌شود که در یک راستا نسبت به هم امکان حرکت دارند؛ به عبارت دیگر، بین این دو جسم، قید لغزش برقرار است. بنابراین، سیستم، انعطاف‌ناپذیر فرض شده و اجزای متحرک دیگری برای ماهواره در نظر گرفته نشده است. جسم بزرگ‌تر، بدنه اصلی (اندیس m) و جسم کوچک‌تر، بوم (اندیس b) نام‌گذاری می‌شود (شکل 1). اولویت ذاتی در فرمول‌بندی برای یکی از این دو جسم وجود ندارد. ماهواره، نامتقارن فرض شده است؛ یعنی، مقادیر اینرسی اصلی ماهواره با یکدیگر برابر نیستند. دینامیک سیستم از دو بخش دینامیک وضعی و دینامیک تغییر طول بوم تشکیل شده است. نیروی داخلی بین بدنه اصلی و بوم که در دینامیک تغییر طول بوم ظاهر می‌شود به عنوان ورودی کنترلی در نظر گرفته می‌شود. در این بخش، فرم همیلتونی معادلات حرکت ماهواره با بوم طول متغیر به دست می‌آید.

2-2- چارچوب‌های مرجع

سه چارچوب مرجع و دستگاه مختصات مرتبط با هر کدام، در این مدل‌سازی ماهواره، اهمیت دارد. چارچوب مرجع اینرسی $(O_i, \{\vec{e}_\alpha\}_{\alpha=1}^3)$ با مبدأ O_i در مرکز جرم جسم مرکزی و پایه متعامد یک‌ه راست‌گرد $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ یک چارچوب مرجع نیوتنی را تعریف می‌کند. چارچوب مرجع مدار O_s با مبدأ O_s در مرکز جرم ماهواره، پایه متعامد یک‌ه راست‌گرد $(O_s, \{\vec{e}_\alpha\}_{\alpha=1}^3)$ را دارد که به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل 1 ماهواره با بوم طول متغیر

فعال مانند گشتاوردهنده مغناطیسی [1] یا اجزای غیرفعال مانند میراکننده حلقه لُج¹ [2] و میله هیستریزیس² [3] استفاده می‌شود. برای ایجاد گشتاور گرادیان جاذبه، معمولاً از بوم گرادیان جاذبه³ استفاده می‌شود که در مرحله‌ای از مأموریت باز می‌شود. بعضی از مکانیزم‌های بازشونده⁴ برای بوم گرادیان جاذبه، عملگر فعال دارد تا نحوه بازشدن آن قابل برنامه‌ریزی باشد. مکانیزم بازشونده می‌تواند پانتوگراف⁵ باشد [4]. همچنین در بسیاری از ماهواره‌های کوچک، سازه بازشونده به صورت نوار پیش‌تنیده‌ای⁶ است که به سر آن جرمی متصل است و برای بازشدن بوم، نوار به میزان لازم باز می‌شود [5].

در این پژوهش به این ایده توجه شده است که می‌توان با تغییر طول بوم به وسیله یک عملگر فعال به پایدارسازی وضعیت ماهواره پرداخت. می‌توان بوم طول متغیر را تنها عملگر ماهواره در نظر گرفت یا آن را در کنار عملگرهای دیگری فرض کرد که در صورت خرابی آن‌ها به تنهایی وظیفه پایدارسازی را انجام می‌دهد. یکی از مزایای بوم طول متغیر این است که در صورت خرابی آن در اواخر مأموریت، به علت پایداری ذاتی بوم، نوسانات وضعیت ماهواره محدود می‌ماند.

مکانیزم‌های بازشونده بوم گرادیان جاذبه، انعطاف‌پذیر هستند [4-6]. با این حال، به گونه‌ای می‌توانند طراحی شوند که انعطاف‌پذیری آن‌ها به اندازه کافی کم باشد. البته، همان و دیگران [6] براساس شبیه‌سازی نتیجه گرفتند که انعطاف‌پذیری بوم گرادیان جاذبه بررسی‌شده بر پایداری ماهواره تأثیر نمی‌گذارد. این مکانیزم‌ها اجزای متحرک نیز دارند. در این مقاله، از انعطاف‌پذیری و دینامیک اجزای مکانیزم بازشونده صرف نظر شده است.

تغییر طول بوم، باعث تغییر ممان اینرسی ماهواره می‌شود. کانل [7] کنترل ممان اینرسی ماهواره را به عنوان روشی برای نشانه‌روی به زمین در مدار بیضوی ارائه کرد. بررسی انجام شده محدود به دینامیک در صفحه مدار است. کوچیما [8] باز و بسته کردن بوم گرادیان جاذبه برای نشانه‌روی به زمین را در مدار دایره‌ای بررسی کرد. مدل سازه فضایی، یک بدنه اصلی صلب مجهز به بوم‌های بدون جرم با جرم نقطه‌ای در سر آن‌ها و ورودی کنترلی، نرخ تغییر طول بوم‌ها در نظر گرفته شد. بررسی انجام شده در [8] نیز محدود به دینامیک صفحه‌ای است و کنترل زمان‌بهره برای حذف زاویه پیش‌چسب در آن ارائه شده است.

پایدارسازی گرادیان جاذبه در ماهواره‌های کمندی⁷ نقش کلیدی دارد [9-12]. از طرف دیگر، تغییر طول کمند به عنوان روشی برای کنترل وضعیت (و شکل آرایش) استفاده می‌شود [10,13]. همچنین مدل جرم و فنر یکی از مدل‌های متداول ماهواره کمندی به شمار می‌آید [12]. ماهواره کمندی با طول کمند متغیر، با فرض بدون جرم بودن کمند و شل نشدن آن، می‌تواند به عنوان حالت خاصی از مسئله ماهواره با بوم طول متغیر به حساب آید.

دیدگاه انرژی در مسائل کنترل سیستم‌های فیزیکی بسیار کارآمد است. به طور خاص، مسائل مختلفی از کنترل وضعیت ماهواره فروتحریک‌شده با دیدگاه انرژی بررسی شده است [1,11,14]. رویکرد پورت همیلتونی⁸ یکی از رویکردهای غنی در دیدگاه انرژی است که روش پورت‌مبنا را به صورت هندسی گسترش داده است و کارایی خود را در مسائل مدل‌سازی و کنترل

- 1- viscous ring damper
- 2- hysteresis rod
- 3- gravity gradient boom
- 4- deployable
- 5- pantograph
- 6- prestressed tape
- 7- tethered satellites
- 8- port-Hamiltonian approach

2-3- خصوصیات اینرسی

بدنه اصلی ماهواره دارای جرم m_m و تانسور اینرسی $\vec{I}_m$ حول مرکز جرم خود O_m است. بوم ماهواره دارای جرم m_b و تانسور اینرسی $\vec{I}_b$ حول مرکز جرم خود O_b است. جرم کل ماهواره m برابر مجموع این دو جرم است: $m := m_m + m_b$.

فاصله بین مرکز جرم بدنه اصلی و مرکز جرم بوم $\vec{l} := \vec{O_m O_b} \cdot {}_s\vec{e}_1$ به عنوان «طول بوم» تعریف می‌شود. برای بردارهای مکان مرکز جرم بدنه اصلی و بوم نسبت به مرکز جرم ماهواره $\vec{\rho}_m := \vec{O_s O_m}$ و $\vec{\rho}_b := \vec{O_s O_b}$ روابط زیر برقرار است:

$$m_m \vec{\rho}_m + m_b \vec{\rho}_b = \vec{0} \quad (4)$$

$$\vec{\rho}_b - \vec{\rho}_m = \vec{l}_s \vec{e}_1 \quad (5)$$

بنابراین،

$$\vec{\rho}_m = -\frac{m_b}{m} \vec{l}_s \vec{e}_1 \quad (6)$$

$$\vec{\rho}_b = \frac{m_m}{m} \vec{l}_s \vec{e}_1 \quad (7)$$

تانسور اینرسی ماهواره حول مرکز جرم آن به این صورت است:

$$\vec{I} = \vec{I}_b + \vec{I}_m + m_m (\vec{\rho}_m^T \cdot \vec{\rho}_m) + m_b (\vec{\rho}_b^T \cdot \vec{\rho}_b) = \vec{I}_0 + m_r \vec{l}^2 ({}_s\vec{e}_1^T \cdot {}_s\vec{e}_1) \quad (8)$$

که $\vec{I}_0 := \vec{I}_b + \vec{I}_m$ بخش ثابت تانسور اینرسی ماهواره است. ${}_s\vec{e}_1$ تانسور ضرب خارجی بردار ${}_s\vec{e}_1$ است؛ یعنی، $\vec{a} = {}_s\vec{e}_1 \times \vec{a}$ ، همچنین این اتحاد برقرار است: $\vec{e} = {}_s\vec{e}_1 \cdot {}_s\vec{e}_1 = \vec{e}^T \cdot {}_s\vec{e}_1$. «جرم کاهش یافته» m_r به این صورت تعریف می‌شود:

$$m_r := \frac{m_m m_b}{m} \leq \frac{1}{4} m \quad (9)$$

جرم کاهش یافته در مسئله دو جسم ظاهر می‌شود [16,12].

تانسور $\vec{I}_0$ بردارهای ویژه‌ای دارد که نسبت به چارچوب ماهواره ثابت هستند. در صورتی که ${}_s\vec{e}_1$ بردار ویژه $\vec{I}_0$ نباشد، با تغییر طول بوم بردارهای ویژه تانسور اینرسی ماهواره ثابت نبوده و در نتیجه، چارچوب ماهواره چارچوب اصلی سیستم نخواهد بود. برای سادگی، فرض می‌شود چارچوب ماهواره چارچوب اصلی سیستم است و ${}_s\vec{e}_1$ ، ${}_s\vec{e}_2$ و ${}_s\vec{e}_3$ بردارهای ویژه تانسورهای اینرسی $\vec{I}_0$ و $\vec{I}$ هستند. مقادیر اصلی اینرسی به طور طبیعی در نامسای‌های مثلثی صدق می‌کنند: $\alpha\beta\gamma \in \{123, 231, 312\}$ ، $I_\alpha - I_\beta < I_\gamma$. مقادیر اصلی بخش ثابت تانسور اینرسی $\vec{I}_0$ به این ترتیب فرض شدند:

$$I_{01} < I_{02} < I_{03} \quad (10)$$

بیان تانسور اینرسی $\vec{I}$ در دستگاه مختصات ماهواره به این صورت است:

$${}_s\vec{I} = \text{diag}(I_1, I_2, I_3) = \text{diag}(I_{01}, I_{02} + m_r \vec{l}^2, I_{03} + m_r \vec{l}^2) \quad (11)$$

و بیان آن در دستگاه مختصات مدار به این صورت نمایش داده می‌شود:

$${}_o\vec{I} = {}_o\vec{e}_s^T {}_s\vec{I} {}_o\vec{e} = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_2^1 & I_3^1 \\ I_1^2 & I_2^2 & I_3^2 \\ I_1^3 & I_2^3 & I_3^3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2-4- فضای حالت

وضعیت ماهواره، جهت‌گیری یا دوران دستگاه مختصات مدار نسبت به فضای دستگاه مختصات بدنه ${}_o\vec{e} \in \text{SO}(3)$ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، فضای پیکربندی سیستم به صورت $Q := \text{SO}(3) \times \mathbb{R}$ است. فضای پیکربندی سیستم چهار بعدی است. به دلیل این که معادلات حرکت سیستم، بر حسب مومنوم و به فرم همیلتونی مورد نظر است، فضای حالت سیستم، کلاف هم‌ماسی

$${}_o\vec{e}_1 := \frac{\vec{r}}{\|\vec{r}\|}, {}_o\vec{e}_3 := \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{\|\vec{r} \times \vec{v}\|}, {}_o\vec{e}_2 := {}_o\vec{e}_3 \times {}_o\vec{e}_1 \quad (1)$$

که $\vec{r} := \vec{O_i O_s}$ بردار مکان مرکز جرم ماهواره نسبت به مرکز جرم جسم مرکزی، و $\vec{v} := d\vec{r}/dt$ بردار سرعت ماهواره نسبت به چارچوب اینرسی است. در مدار دایره‌ای، بردار یک ${}_o\vec{e}_1$ هم‌جهت بردار سرعت ماهواره است. چارچوب‌های مرجع اینرسی و مدار در شکل 2 نمایش داده شده‌اند. سرعت زاویه‌ای چارچوب مدار نسبت به چارچوب اینرسی $\vec{\omega}_o$ در جهت عمود بر صفحه مدار است و مقدار آن در مدار دایره‌ای، ثابت و برابر حرکت میانگین¹ است. برای سادگی، واحد اندازه‌گیری زمان به گونه‌ای انتخاب شده است که حرکت میانگین برابر واحد باشد. بنابراین، زمان، معادل زاویه دوران در مدار است و

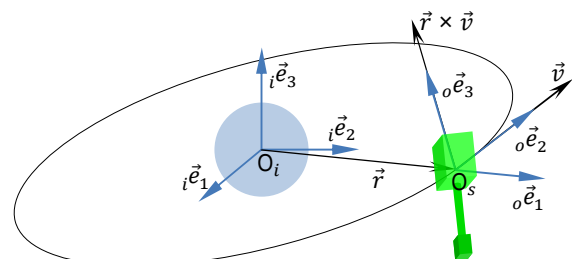
$$\vec{\omega}_o = {}_o\vec{e}_3 \quad (2)$$

چارچوب مرجع ماهواره $s := (O_s, \{{}_s\vec{e}_a\}_{a=1}^3)$ با مبدأ O_s روی مرکز جرم ماهواره دارای پایه متعامد یک ${}_s\vec{e}_3$ راست‌گرد است؛ به نحوی که بدنه اصلی و بوم نسبت به آن دوران نمی‌کنند. بردار یک ${}_s\vec{e}_1$ در جهت بردار مکان مرکز جرم بوم نسبت به مرکز جرم بدنه اصلی انتخاب شده است. چارچوب مرجع ماهواره در شکل 1 نشان داده شده است. رابطه بین سرعت زاویه‌ای (چارچوب) ماهواره نسبت به چارچوب اینرسی $\vec{\omega}$ و سرعت زاویه‌ای ماهواره نسبت به چارچوب مدار $\vec{\Omega}$ به این صورت است:

$$\vec{\omega} = \vec{\Omega} + \vec{\omega}_o \quad (3)$$

بردار دلخواه $\vec{a}$ را می‌توان در یک دستگاه مختصات بیان کرد: $\vec{a} = {}^i a^\alpha {}_i\vec{e}_\alpha$ ، که ${}^i a^\alpha$ ($\alpha = 1, 2, 3$) مؤلفه‌های بردار $\vec{a}$ در دستگاه مختصات i است. در ادامه، روی اندیس‌های تکراری جمع بسته می‌شود. رابطه بین بیان یک بردار در دو دستگاه مختصات به فرم ماتریسی ${}^i a = {}^i e^s {}_s a$ است که ${}^i a = [{}^i a^1, {}^i a^2, {}^i a^3]^T$ و ${}_s a = [{}_s a^1, {}_s a^2, {}_s a^3]^T$ ماتریس ستونی مؤلفه‌های بردار $\vec{a}$ در دستگاه مختصات i ، و ${}_s e^i$ ماتریس مربعی تبدیل بین دو دستگاه مختصات s و i با مؤلفه‌های ${}_s e^i_\alpha = {}_i\vec{e}_\alpha \cdot {}_s\vec{e}_i$ است. از آن‌جا که ${}_s e^i_\alpha = {}_s e^i_\beta = \delta^i_\alpha$ ، طبیعتاً $\vec{e}$ تانسور همانی و e ماتریس همانی است.

ضرب داخلی محیطی فضا یک یک‌ریختی² طبیعی بین فضای برداری و فضای دوگان آن ایجاد می‌کند. به دلیل متعامد یک بودن پایه دستگاه‌های مختصات، این یک‌ریختی بین بردار و هم‌بردار، متناظر با ترانزاده بیان ماتریسی آن‌ها می‌شود. همچنین، ماتریس تبدیل e بین دو دستگاه مختصات s و i برابر بیان ماتریسی تانسور دوران دستگاه مختصات s به دستگاه مختصات i در یکی از این دو دستگاه است. بنابراین، ماتریس‌های تبدیل بین دستگاه‌های متعامد یک ${}_s\vec{e}$ راست‌گرد، عضو گروه متعامد ویژه مرتبه سه هستند: ${}^i e^T = {}^i e \in \text{SO}(3) := \{B \in \mathbb{R}^{3 \times 3} : B^T B = e, \det B = 1\}$.



شکل 2 چارچوب‌های مرجع مدار و اینرسی

1- mean motion
2- isomorphism

3- reduced mass

$$Q_l = -\frac{\partial V}{\partial l} = l[3({}_o\vec{e}_1 \cdot {}_s\vec{e}_1)^2 - 1] \quad (22)$$

2-8- فرم پورت همیلتونی معادلات حرکت

همیلتونی سیستم H از مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل تشکیل شده است که انرژی پتانسیل ماهواره V همان انرژی پتانسیل گرانشی معادله (20) است و انرژی جنبشی ماهواره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T := \int \vec{\Omega} \cdot d\vec{l} + l dp_l = \frac{1}{2} \vec{l} \cdot \vec{l}^{-1} \cdot \vec{l} - {}_o\vec{e}_3 \cdot \vec{l} + \frac{1}{2} p_l^2 \quad (23)$$

انرژی جنبشی ماهواره به صورت ضمنی زیر نیز می‌تواند تعریف شود:

$$\vec{\nabla}_{\vec{l}} T = \vec{\Omega} = \vec{\Omega}(\vec{l}) = \vec{l}^{-1} \cdot \vec{l} - {}_o\vec{e}_3 \quad (24)$$

$$\frac{\partial T}{\partial p_l} = l = p_l \quad (25)$$

در این جا، مفهوم مومنوم قبل از مفهوم انرژی، ارائه و سپس انرژی جنبشی با کمک آن تعریف شد. می‌توان ابتدا هم‌انرژی³ جنبشی را تعریف و سپس مومنوم و انرژی جنبشی را با تبدیل لژاندر⁴ آن نسبت به سرعت زاویه‌ای ماهواره نسبت به مدار $\vec{\Omega}$ و نرخ تغییر طول بوم $\dot{l}$ تعریف کرد.

بنابراین، همیلتونی به صورت زیر قابل بیان است:

$$H = \frac{1}{2} \vec{l} \cdot \vec{l}^{-1} \cdot \vec{l} - {}_o\pi^3 + \frac{1}{2} p_l^2 + \frac{3}{2} I_1^1 - \frac{1}{2} \text{tr}(\vec{I}) \\ = \frac{1}{2} \vec{\Omega} \cdot \vec{l} \cdot \vec{\Omega} + \frac{1}{2} p_l^2 - \frac{1}{2} I_3^3 + \frac{3}{2} I_1^1 - \frac{1}{2} \text{tr}(\vec{I}) \quad (26)$$

فرم همیلتونی معادلات حرکت در دستگاه مختصات مدار به این صورت است:

$$\dot{\xi} = J(x)(\partial_{\xi} H)^T(x) + g(x)u \quad (27\text{-الف})$$

$$\begin{bmatrix} {}^o\dot{\Omega} \\ {}^o\dot{l} \\ \dot{l} \\ \dot{p}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e & 0 & 0 \\ -e & -{}^o\pi_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\partial H / \partial {}^o\theta)^T \\ (\partial H / \partial {}^o\pi)^T \\ \partial H / \partial l \\ \partial H / \partial p_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (27\text{-ب})$$

که e ماتریس همانی 3 در 3 است و تابع همیلتونی بر حسب مختصات $x = ({}_o\vec{e}_1, {}^o\pi, l, p_l)$ و مشتقات پاره‌ای آن به این صورت است:

$$H({}_o\vec{e}_1, {}^o\pi, l, p_l) = \frac{1}{2} {}^o\pi^T {}_o\vec{e}_1^T {}_s\vec{I}^{-1} {}_o\vec{e}_1 {}^o\pi - {}^o\pi^3 + \frac{1}{2} p_l^2 \\ + \frac{3}{2} {}_o\vec{e}_1^T {}_s\vec{I} {}_o\vec{e}_1 - \frac{1}{2} \text{tr}({}_s\vec{I}) \quad (28)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial {}^o\pi} \right)^T = {}^o\Omega \quad (29)$$

$$-\left(\frac{\partial H}{\partial {}^o\theta} \right)^T = -\left(\frac{\partial H}{\partial {}_o\vec{e}_\alpha} \frac{\partial {}_o\vec{e}_\alpha}{\partial {}^o\Omega} \right)^T = {}^o\pi \times {}^o\omega + 3e_1 \times {}_o\vec{I}e_1 \quad (30)$$

$$\frac{\partial H}{\partial l} = l({}_s\omega^2 + {}_s\omega^3 + 3{}_o\vec{e}_1^2 - 1), \quad \frac{\partial H}{\partial p_l} = p_l \quad (31)$$

که ${}^o\theta$ شبه‌مختصاتی است که ${}^o\theta := {}^o\Omega$ مختصات $SO(3)$ و $T_{\xi}X$ میدان‌های برداری متناظر با آن روی $SO(3)$ است. بنابراین، ξ مختصات $T_{\xi}X$ و $\partial/\partial \xi := \partial/\partial \xi$ میدان‌های برداری متناظر با آن روی فضای حالت X است.

3- نقاط تعادل

ماهواره تحت گرادیان جاذبه در مدار دایره‌ای دارای وضعیت‌های تعادل نسبت به چارچوب مدار است. دوران ماهواره نسبت به چارچوب مدار، به همین دلیل، به عنوان وضعیت ماهواره انتخاب شده است. حالت تعادل سیستم در نقاطی است که نرخ متغیرهای حالت صفر است؛ بنابراین، با توجه به معادلات دینامیک وضعیت (13) و (14) و مومنوم دورانی معادله (15) و معادلات دینامیک بوم (17) و (18)، روابط زیر، در حالت تعادل، برقرار است:

$$\frac{{}_o d_s \vec{e}_\alpha}{dt} = \vec{\Omega} \times {}_s \vec{e}_\alpha = \vec{0} \Rightarrow \vec{\Omega} = \vec{0} \Rightarrow \quad (32\text{-الف})$$

فضای پیکربندی¹ $X := T^*Q \cong SO(3) \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ است.

2-5- دینامیک وضعیت

بیان برداری دینامیک وضعیت ماهواره، که از سینماتیک دوران و اصل مومنوم دورانی تشکیل شده است، به این صورت است:

$$\frac{{}_o d_s \vec{e}_\alpha}{dt} = \vec{\Omega} \times {}_s \vec{e}_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, 3 \quad (13)$$

$$\dot{\vec{l}} = \frac{{}_o d \vec{l}}{dt} + {}_o \vec{e}_3 \times \vec{l} = \vec{M} \quad (14)$$

که

$$\vec{l} = \vec{l} \cdot \vec{\omega} = \vec{l} \cdot (\vec{\Omega} + {}_o \vec{e}_3) \quad (15)$$

بردار مومنوم زاویه‌ای ماهواره حول مرکز جرم آن است. $\vec{M}$ بردار گشتاور گرادیان جاذبه به عنوان تنها گشتاور خارجی وارد بر ماهواره است. (درواقع، مومنوم زاویه‌ای و گشتاور، هم‌بردار هستند که با بردار یکی گرفته می‌شوند.)

2-6- دینامیک تغییر طول بوم

دینامیک تغییر طول بوم از تصویر اصل مومنوم سیستم در جهت تغییرات مختصات تعمیم‌یافته طول بوم به دست می‌آید. برای ساده‌سازی معادلات حرکت تغییر طول بوم و حذف پارامتر جرم کاهش‌یافته m_r از آن، طول بوم نرمال شده l به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$l := \sqrt{m_r} \vec{l} \quad (16)$$

معادلات حرکت تغییر طول نرمال شده بوم به این صورت می‌شود:

$$\dot{l} = p_l \quad (17)$$

$$\dot{p}_l = l \vec{\omega} \cdot ({}_s \vec{e}_1^T \cdot {}_s \vec{e}_1)_x \cdot \vec{\omega} + Q_l + u \quad (18)$$

نحوه به دست آوردن معادلات (17) و (18) در پیوست ارائه شده است. ورودی کنترلی u ، نیروی نرمال شده بین بوم و جسم اصلی است (معادلات (90) و (100)). p_l مومنوم تعمیم‌یافته تغییر طول نرمال شده بوم است (معادلات (92)، (94) و (99)). Q_l نیروی تعمیم‌یافته جاذبه نرمال شده است (معادلات (89) و (99)).

تانسور اینرسی بر حسب طول بوم نرمال شده به این صورت می‌شود:

$$\vec{I} = \vec{I}_0 + l^2 ({}_s \vec{e}_1^T \cdot {}_s \vec{e}_1)_x = \vec{I}_0 + l^2 (\vec{e} - {}_s \vec{e}_1 {}_s \vec{e}_1) \quad (19)$$

2-7- میدان جاذبه

خط اثر نیروی جاذبه وارد بر ماهواره از جرم نقطه‌ای مرکزی می‌گذرد؛ اما به دلیل یکنواخت نبودن میدان جاذبه، لزوماً از مرکز جرم ماهواره نمی‌گذرد. این امر موجب می‌شود که به ماهواره، حول مرکز جرم آن، گشتاور گرانشی وارد شود. در صورت کوچک بودن ابعاد ماهواره نسبت به ابعاد مدار می‌توان از عبارت مرتبه اول گشتاور به عنوان تقریب مناسب استفاده کرد. مبحث نیرو، گشتاور و پتانسیل گرانشی در متون مرتبط، مانند [17-19]، یافت می‌شود. میدان جاذبه، یک میدان پایستار است و با یک تابع پتانسیل قابل بیان است. تابع انرژی پتانسیل گرانشی V به این صورت است:

$$V = \frac{3}{2} {}_o \vec{e}_1 \cdot \vec{l} \cdot {}_o \vec{e}_1 - \frac{1}{2} \text{tr}(\vec{I}) \quad (20)$$

که $\text{tr}(\vec{I}) = I_1 + I_2 + I_3 = 2l^2 + I_{01} + I_{02} + I_{03}$ تانسور اینرسی ماهواره است. بردار گشتاور گرادیان جاذبه $\vec{M}$ به صورت زیر است:

$$\vec{M} = -\vec{\nabla}_{{}_o \vec{e}_1} V \times {}_o \vec{e}_1 = 3 {}_o \vec{e}_1 \times \vec{l} \cdot {}_o \vec{e}_1 \quad (21)$$

نیروی تعمیم‌یافته جاذبه نرمال شده Q_l در معادله (18) به این صورت است:

مقدار ورودی کنترلی $\bar{u}$ که طول بوم را در مقدار تعادل $\bar{l}$ ثابت نگه می‌دارد با توجه به معادله (35) به‌صورت زیر است:

$$\bar{u} = \left[(\bar{s}\bar{e}_1 \cdot \bar{o}\bar{e}_3)^2 - 3(\bar{s}\bar{e}_1 \cdot \bar{o}\bar{e}_1)^2 \right] \bar{l} = \bar{d}_1 \bar{l} \quad (37)$$

که

$$\bar{d}_1 := {}^s\bar{e}_3^{12} - 3{}^s\bar{e}_1^{12} \quad (38)$$

مقادیر ورودی کنترلی در وضعیت‌های تعادل مختلف در جدول 1 آمده است.

4- مدل خطی سیستم

برای بررسی پایداری در همسایگی نقاط تعادل همچنین بررسی کنترل‌پذیری خطی، لازم است مدل خطی سیستم حول نقاط تعادل به‌دست آید. زوایای دوران بی‌نهایت‌کوچک حول وضعیت تعادل $\delta^\circ\theta$ را با خاصیت $\delta^\circ\theta_\alpha = \delta^\circ\theta$ رابطه مومنوم دورانی بی‌نهایت‌کوچک به‌این صورت است: $\delta^\circ\theta = {}^o\bar{l} \delta^\circ\Omega + \delta^\circ I e_3$. بنابراین، معادله سینماتیک خطی‌شده دوران به‌صورت زیر است:

$$\delta^\circ\dot{\theta} = \delta^\circ\Omega = {}^o\bar{l}^{-1}(\delta^\circ\Omega - \delta^\circ I e_3) \quad (39)$$

فرم خطی‌شده معادله سینتیک دوران به‌این صورت است:

$$\delta^\circ\dot{I} = \delta^\circ\Omega \times e_3 + 3e_1 \times \delta^\circ I e_1 \quad (40)$$

فرم خطی‌شده دینامیک بوم معادلات (17) و (18) به‌این صورت است:

$$\delta\dot{l} = \delta p_l \quad (41)$$

$$\delta\dot{p}_l = 2\bar{l}(1 - {}^s\bar{e}_3^{12})\delta^\circ\Omega^3 + (3{}^s\bar{e}_1^{12} - {}^s\bar{e}_3^{12})\delta l + \delta u \quad (42)$$

که $\delta u := \bar{u} - u$ و در به‌دست آوردن معادله (42) از این خاصیت وضعیت تعادل استفاده شده است: ${}^s\bar{e}_\alpha^{12} {}^o\bar{e}_\beta^1 = 0, \alpha \neq \beta$. توجه شود که در وضعیت‌های تعادل، ${}^o\bar{l}$ قطری است و حالت‌های مختلف آن در جدول 1 آمده است. تانسور اینرسی بی‌نهایت‌کوچک در دستگاه مختصات مدار $\delta^\circ I$ از خطی‌سازی معادله (12) به‌دست می‌آید:

$$\delta^\circ I = \delta^\circ\theta \times {}^o\bar{l} - {}^o\bar{l} \times \delta^\circ\theta + {}^s\bar{e}^T {}^s\bar{I} {}^s\bar{e} \quad (43)$$

با استفاده از معادلات (39) تا (43)، معادلات دینامیک خطی وضعیت تغییر طول بوم حاصل می‌شود.

دینامیک گردش¹ دوران حول بردار مکان و غلتش² دوران حول بردار سرعت به‌این صورت است:

$$\delta^\circ\dot{\theta}^1 = \frac{\delta^\circ\Omega^1}{\bar{l}_1^1} - \frac{(\bar{l}_3^3 - \bar{l}_1^1)}{\bar{l}_1^1} \delta^\circ\theta^2 \quad (44\text{-الف})$$

$$\delta^\circ\dot{\theta}^2 = \frac{\delta^\circ\Omega^2}{\bar{l}_2^2} - \frac{(\bar{l}_2^2 - \bar{l}_3^3)}{\bar{l}_2^2} \delta^\circ\theta^1 \quad (44\text{-ب})$$

$$\delta^\circ\dot{\theta}^3 = \delta^\circ\Omega^3 \quad (44\text{-پ})$$

$$\delta^\circ\dot{\theta}^2 = -\delta^\circ\Omega^1 - 3(\bar{l}_3^3 - \bar{l}_1^1)\delta^\circ\theta^2 \quad (44\text{-ت})$$

و دینامیک پیچش³ دوران حول بردار عمود بر صفحه مدار و بوم به‌این صورت است:

جدول 1 وضعیت‌های تعادل ماهواره نامتقارن

نام	$\bar{u}$	${}^o\bar{l}$	وضعیت ماهواره
123	$-3\bar{l}$	$\text{diag}(\bar{l}_1 \ \bar{l}_2 \ \bar{l}_3)$	${}^s\bar{e}_1 = \pm {}^o\bar{e}_1, \ {}^s\bar{e}_3 = \pm {}^o\bar{e}_3$
132	$-3\bar{l}$	$\text{diag}(\bar{l}_1 \ \bar{l}_3 \ \bar{l}_2)$	${}^s\bar{e}_1 = \pm {}^o\bar{e}_1, \ {}^s\bar{e}_2 = \pm {}^o\bar{e}_3$
312	0	$\text{diag}(\bar{l}_3 \ \bar{l}_1 \ \bar{l}_2)$	${}^s\bar{e}_3 = \pm {}^o\bar{e}_1, \ {}^s\bar{e}_2 = \pm {}^o\bar{e}_3$
213	0	$\text{diag}(\bar{l}_2 \ \bar{l}_1 \ \bar{l}_3)$	${}^s\bar{e}_2 = \pm {}^o\bar{e}_1, \ {}^s\bar{e}_3 = \pm {}^o\bar{e}_3$
231	$\bar{l}$	$\text{diag}(\bar{l}_2 \ \bar{l}_3 \ \bar{l}_1)$	${}^s\bar{e}_2 = \pm {}^o\bar{e}_1, \ {}^s\bar{e}_1 = \pm {}^o\bar{e}_3$
321	$\bar{l}$	$\text{diag}(\bar{l}_3 \ \bar{l}_2 \ \bar{l}_1)$	${}^s\bar{e}_3 = \pm {}^o\bar{e}_1, \ {}^s\bar{e}_1 = \pm {}^o\bar{e}_3$

1- yaw
2- roll
3- pitch

$$\bar{\omega} = {}^o\bar{e}_3, \quad \bar{l} = \bar{l} \cdot {}^o\bar{e}_3 \quad (32\text{-ب})$$

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{l}}{dt} &= \bar{l} \times {}^o\bar{e}_3 + 3{}^o\bar{e}_1 \times \bar{l} \cdot {}^o\bar{e}_1 \\ &= -{}^o\bar{e}_3 \times \bar{l} \cdot {}^o\bar{e}_3 + 3{}^o\bar{e}_1 \times \bar{l} \cdot {}^o\bar{e}_1 \\ &= \bar{0} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\dot{\bar{l}} = \bar{p}_l = 0 \quad (34)$$

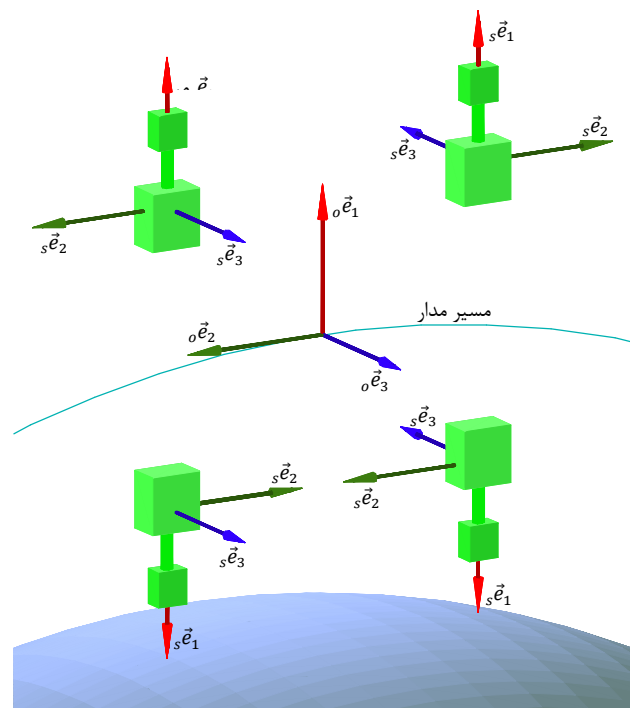
$$\begin{aligned} \bar{p}_l &= \bar{l} \left[\bar{\omega} \cdot ({}^s\bar{e}_1 \times {}^s\bar{e}_1) \cdot \bar{\omega} + 3({}^o\bar{e}_1 \cdot {}^s\bar{e}_1)^2 - 1 \right] + \bar{u} \\ &= \bar{l} \left[-({}^s\bar{e}_1 \cdot {}^o\bar{e}_3)^2 \right. \\ &\quad \left. + 3({}^o\bar{e}_1 \cdot {}^s\bar{e}_1)^2 \right] + \bar{u} = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

که نماد میله روی متغیرهای در حالت تعادل قرار داده شده است. از معادله (32-الف) واضح است که در حالت تعادل، ماهواره نسبت به مدار ثابت است، و از معادله (34) روشن است که در حالت تعادل، طول بوم ثابت است. جهت‌گیری ماهواره در حالت تعادل از معادله (33) به‌دست می‌آید و ورودی کنترلی که طول بوم را ثابت نگه می‌دارد از معادله (35) مشخص می‌شود.

بیان معادله (33) در دستگاه مختصات مدار به‌این صورت است:

$$-e_3 \times {}^o\bar{l}e_3 + 3e_1 \times {}^o\bar{l}e_1 = [\bar{l}_3^3, -4\bar{l}_1^3, 3\bar{l}_2^3]^T = 0 \quad (36)$$

از معادله (36) نتیجه می‌شود که مقادیر غیر قطری بیان ماتریسی تانسور اینرسی در دستگاه مختصات مدار در وضعیت تعادل صفر هستند. بنابراین، وضعیت تعادل، وضعیتی است که دستگاه مختصات مدار، دستگاه مختصات اصلی تانسور اینرسی باشد؛ به‌عبارت دیگر، بردارهای یک دستگاه مختصات مدار بردارهای ویژه تانسور اینرسی باشند. با فرض عدم تقارن ماهواره، بردارهای ویژه تانسور اینرسی سه راستای متعامد را در فضا تشکیل می‌دهند. در این صورت، قرار گرفتن بردارهای یک دستگاه مختصات ماهواره در راستای بردارهای یک دستگاه مختصات مدار، وضعیت‌های تعادل را تشکیل می‌دهند. تعداد این وضعیت‌های تعادل برای ماهواره نامتقارن 24 است. در جدول 1 وضعیت‌های تعادل نمایش داده شده‌اند. هر سطر از این جدول، چهار وضعیت تعادل را نشان می‌دهد. در شکل 3 وضعیت‌های تعادل 123 مشخص شده در سطر اول جدول 1 نمایش داده شده است.



شکل 3 چهار وضعیت تعادل 123 (سطر اول جدول 1)

دینامیک خطی گردش-غلتش ناپایدار باشد (قطب سمت راست داشته باشد)، هیچ قانون کنترلی C^1 (یکبار به‌طور پیوسته مشتق‌پذیر) وجود ندارد که سیستم غیرخطی را پایدار کند ([20] قضیه 10.5، [21] قضیه 10.5). اگر دینامیک خطی گردش-غلتش پایدار باشد، که در آن صورت به دلیل همیلتونی بودن، لزوماً قطب‌های آن روی محور موهومی است، قانون کنترلی C^1 وجود ندارد که سیستم غیرخطی را پایدار مجانبی نمایی¹ کند ([22] قضیه 7.15).

5- پایدارسازی

در این بخش پایداری و شرایط آن و پایدارسازی لیاپانوف و مجانبی از طریق شکل‌دهی انرژی و تزریق میرایی بررسی می‌شود. ورودی کنترل از دو بخش قانون کنترلی برای شکل‌دهی انرژی $u_{es}(x)$ و قانون کنترلی برای تزریق میرایی $u_{di}(x)$ در نظر گرفته می‌شود:

$$u = u_{es}(x) + u_{di}(x) \quad (52)$$

5-1- شکل‌دهی انرژی

سیستم‌های پورت‌همیلتونی این خاصیت را دارند که نقاط کمینه تابع همیلتونی آن‌ها پایداری لیاپانوف دارد. بنابراین، قانون کنترلی می‌تواند به گونه‌ای معرفی شود که سیستم حلقه‌بسته، فرم پورت‌همیلتونی داشته باشد و دارای تابع همیلتونی تغییر شکل یافته با مقدار کمینه در نقطه مطلوب باشد. این تکنیک، کنترل «شکل‌دهی انرژی»² نامیده می‌شود. یک انتخاب طبیعی برای تابع همیلتونی تغییر شکل یافته در مورد سیستم‌های فیزیکی، تفاضل انرژی ذخیره شده (همیلتونی) و انرژی تأمین شده (توسط کنترل‌کننده) است که منجر به «کنترل موازنه انرژی»³ می‌شود [15].

تابع همیلتونی سیستم حلقه‌بسته برابر مجموع تابع همیلتونی سیستم حلقه‌باز و تابع انرژی است که توسط قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی معرفی می‌شود:

$$H_{cl}(x) := H(x) + H_{es}(x) \quad (53)$$

دینامیک سیستم حلقه‌بسته با جایگذاری معادله (52) در معادله (27-ب) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\xi} = J(x)(\partial_{\xi} H)^T(x) + g(x)(u_{es}(x) + u_{di}(x)) \quad (54)$$

مطلوب است که سیستم حلقه‌بسته به فرم زیر باشد:

$$\dot{\xi} = J(x)(\partial_{\xi} H_{cl})^T(x) + g(x)u_{di}(x) \quad (55)$$

از برابر قرار دادن طرف راست معادلات (54) و (55)، و استفاده از معادله (53) رابطه زیر برای قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی u_{es} و تابع انرژی H_{es} به دست می‌آید:

$$g(x)u_{es}(x) = J(x)(\partial_{\xi} H_{es})^T(x) \quad (56)$$

$$\frac{\partial H_{es}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial H_{es}}{\partial \Pi} = 0, \quad \frac{\partial H_{es}}{\partial p_l} = 0 \quad (\text{الف-56})$$

$$u_{es} = -\frac{\partial H_{es}}{\partial l} \quad (\text{ب-56})$$

بنابر معادله (56-الف) تابع انرژی H_{es} ، تنها، تابعی از طول بوم است: $H_{es} = H_{es}(l)$ ، یعنی، به صورت تابع پتانسیل یک فنر (غیرخطی) بین بدنه

اصلی و بوم است. بنابراین، معادله (56-ب) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$u_{es}(l) = -H'_{es}(l) \quad (57)$$

بر اساس معادله (37) و این که در نقاط تعادل، قانون کنترلی تزریق میرایی

$$\delta^o \dot{\theta}^3 = \frac{\delta^o \Pi^3}{\bar{I}_3^3} + \frac{\bar{d}_2}{\bar{I}_3^3} \delta l \quad (\text{الف-45})$$

$$\delta^o \dot{\Pi}^3 = 3(\bar{I}_1^1 - \bar{I}_2^2) \delta^o \theta^3 \quad (\text{ب-45})$$

$$\delta l = \delta p_l \quad (\text{پ-45})$$

$$\delta \dot{p}_l = -\frac{\bar{d}_2}{\bar{I}_3^3} \delta^o \Pi^3 - \left(\bar{d}_1 + \frac{\bar{d}_2^2}{\bar{I}_3^3} \right) \delta l + \delta u \quad (\text{ت-45})$$

که $\bar{d}_1$ در معادله (38) تعریف شده است و

$$\bar{d}_2 := -2\bar{l}(1 - \delta \bar{e}_3^{12}) \quad (46)$$

از معادلات (44) و (45) مشاهده می‌شود که دینامیک گردش-غلتش و دینامیک پیچش-بوم از یکدیگر مستقل هستند.

معادله مشخصه دینامیک گردش-غلتش به صورت زیر است:

$$s^4 + (1 + 3\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2) s^2 - 4\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2 = 0 \quad (47)$$

که

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{\bar{I}_2^2 - \bar{I}_3^3}{\bar{I}_1^1}, \quad \bar{\sigma}_2 = \frac{\bar{I}_3^3 - \bar{I}_1^1}{\bar{I}_2^2}, \quad \bar{\sigma}_3 = \frac{\bar{I}_1^1 - \bar{I}_2^2}{\bar{I}_3^3} \quad (48)$$

فرم همیلتونی دینامیک خطی سیستم از خطی‌سازی معادلات همیلتونی (27-ب) و یا تبدیل معادلات خطی به فرم همیلتونی به دست می‌آید. معادلات همیلتونی خطی دینامیک گردش-غلتش به این صورت است:

$$\delta \dot{\xi}_{yr} = J_{yr} P_{yr} \delta \xi_{yr} \quad (49)$$

$$\delta \xi_{yr} := \begin{bmatrix} \delta^o \theta^1 \\ \delta^o \Pi^2 \\ \delta^o \theta^2 \\ \delta^o \Pi^1 \end{bmatrix}, \quad J_{yr} := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -\bar{I}_3^3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & \bar{I}_3^3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{الف-49})$$

$$P_{yr} := \begin{bmatrix} -\bar{I}_3^3 \frac{\bar{D}_1}{\bar{I}_2^2} & -\frac{\bar{D}_1}{\bar{I}_2^2} & 0 & 0 \\ -\frac{\bar{D}_1}{\bar{I}_2^2} & \frac{1}{\bar{I}_2^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (3\bar{I}_1^1 + \bar{I}_3^3) \frac{\bar{D}_2}{\bar{I}_1^1} & -\frac{\bar{D}_2}{\bar{I}_1^1} \\ 0 & 0 & -\frac{\bar{D}_2}{\bar{I}_1^1} & \frac{1}{\bar{I}_1^1} \end{bmatrix} \quad (\text{ب-49})$$

که $\bar{D}_1 := \bar{I}_2^2 - \bar{I}_1^1$ و $\bar{D}_2 := \bar{I}_3^3 - \bar{I}_1^1$. ترتیب متغیرها در معادله (49) به گونه‌ای انتخاب شده است که ماتریس P_{yr} معادله (49-ب) قطری بلوکی شود.

معادلات همیلتونی خطی دینامیک پیچش-بوم به این صورت است:

$$\delta \dot{\xi}_{pb} = J_{pb} P_{pb} \delta \xi_{pb} + g_{pb} \delta u \quad (50)$$

$$\delta \xi_{pb} := \begin{bmatrix} \delta^o \theta^3 \\ \delta^o \Pi^3 \\ \delta l \\ \delta p_l \end{bmatrix}, \quad J_{pb} := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{الف-50})$$

$$P_{pb} := \begin{bmatrix} -3(\bar{I}_1^1 - \bar{I}_2^2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{I}_3^3} & \frac{\bar{d}_2}{\bar{I}_3^3} & 0 \\ 0 & \frac{\bar{d}_2}{\bar{I}_3^3} & \bar{d}_1 + \frac{\bar{d}_2^2}{\bar{I}_3^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad g_{pb} := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ب-50})$$

همیلتونی سیستم خطی به صورت درجه دوم است:

$$\delta^2 H = \frac{1}{2} \delta \xi_{pb}^T P_{pb} \delta \xi_{pb} + \frac{1}{2} \delta \xi_{yr}^T P_{yr} \delta \xi_{yr} \quad (51)$$

مدل خطی سیستم، اطلاعات مهمی درباره رفتار سیستم غیرخطی دربر دارد.

از آنجا که دینامیک گردش-غلتش و دینامیک پیچش-بوم به صورت خطی از یکدیگر مستقل هستند و ورودی کنترلی در دینامیک خطی پیچش-بوم ظاهر می‌شود، دینامیک گردش-غلتش کنترل‌ناپذیر خطی است. بنابراین، اگر

1- exponentially asymptotically stable

2- energy shaping

3- energy-balancing control

داشته و همچنین پایدار باشند باید شرایط زیر برای قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی ارضا شود:

$$u_{es}(\bar{l}_{123}) = -3\bar{l}_{123} \quad (63\text{-الف})$$

$$u'_{es}(\bar{l}_{123}) < -3 \quad (63\text{-ب})$$

یعنی تابع $u_{es}(l) = -3l$ را با شیبی کم‌تر از آن در طول طراحی شده $\bar{l}_{123}$ قطع کند (شکل 4). طول تعادل بوم $\bar{l}_{123}$ و شیب قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی در آن طول $u'_{es}(\bar{l}_{123})$ بر اساس عملکرد مورد نظر طراح تعیین می‌شود.

سیستم حلقه‌بسته معادله (55) بدون ورودی، $u_{di} = 0$ ، یک سیستم بدون اتلاف است؛ بنابراین، تابع همیلتونی یک انتگرال حرکت آن سیستم است:

$$\dot{\xi}(t) = J(x(t))(\partial_{\xi} H_{cl})^T(x(t)) \quad (64)$$

$$H_{cl0} = H_{cl}(x(0)) = H_{cl}(x(t)), \quad \forall t \quad (65)$$

مجموعه نقاطی که همیلتونی سیستم حلقه‌بسته آن‌ها H_{cl0} است به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_{cl}^{-1}(H_{cl0}) := \{x \in \mathcal{X} : H_{cl}(x) = H_{cl0}\} \quad (66)$$

و $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0), x_0)$ قسمت همبند² مجموعه $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0))$ است که x_0 را دربر دارد؛ یعنی، متشکل از تمام نقاط $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0))$ است که به x_0 متصل هستند. بنابراین، مسیر حالت $x(0) = x_0$ ، $x(t)$ روی سطح همیلتونی ثابت $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0), x_0)$ قرار دارد. در همسایگی نقاط تعادل پایدار، $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0), x_0)$ به شکل یک بیضی‌گون است؛ زیرا در آن نقاط، هسین تابع همیلتونی حلقه‌بسته، مثبت‌معین است. می‌توان از این سطوح انتگرال کرانی برای مسیرهای حالت مشخص کرد. (برای این منظور نیاز است که بین نقاط فضای حالت، فاصله تعریف شود). اگر به‌ازای هر $x_0 \in \mathcal{X}$ مجموعه $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0), x_0)$ کران‌دار باشد، آن‌گاه تمام مسیرهای حالت فضای حالت کران‌دار هستند. در آن صورت، برخلاف پایداری لیاپانوف که یک خاصیت محلی برای نقاط تعادل پایدار است، یک خاصیت فراگیر برای سیستم، یعنی کران‌دار بودن مسیرهای حالت، نتیجه می‌شود. توجه شود که به دلیل پیوستگی H_{cl} ، در صورت کران‌دار بودن مجموعه $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0), x_0)$ ، این مجموعه، بسته و در نتیجه فشرده است.

فضای حالت سیستم $\mathcal{X} = \text{SO}(3) \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ (پس از بدیهی‌سازی) به‌صورت ضرب دکارتی چند فضا است، و $\text{SO}(3)$ یک مجموعه فشرده است. همچنین به‌ازای افزایش بی‌کران $\|p_l\|$ و $\|\theta_l\|$ ، همیلتونی به‌صورت بی‌کران افزایش می‌یابد. بنابراین، برای بررسی کران‌دار بودن مجموعه $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0), x_0)$ کافی است به بررسی نحوه تابعت H_{cl} به l بپردازیم.

در عمل، طول بوم در یک بازه مشخص می‌تواند تغییر کند: $l \in [l_{\min}, l_{\max}]$. در این صورت، فضای پیکربندی سیستم، $\text{SO}(3) \times [l_{\min}, l_{\max}]$ است. می‌توان تابع انرژی شکل‌دهی انرژی را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که طول بوم ماهواره همواره در این بازه باقی بماند. (البته در صورتی که در شروع اعمال قانون کنترلی، طول بوم در این بازه باشد). شرط زیر روی تابع همیلتونی شکل‌دهی انرژی، برای کران‌دار بودن مجموعه $H_{cl}^{-1}(H_{cl}(x_0), x_0)$ کافی است:

$$\lim_{l \rightarrow l_{\min}^+} H_{es}(l) = \lim_{l \rightarrow l_{\max}} H_{es}(l) = +\infty \quad (67)$$

نامساوی‌های (63) به‌همراه نامساوی (67) شرایطی بر روی قانون کنترلی و همیلتونی شکل‌دهی انرژی است که پایداری نقاط تعادل 123 و کران‌دار

صفر است ($u_{di}(\bar{x}) = 0$)، برای طول بوم در حالت تعادل رابطه زیر برقرار است:

$$-H'_{es}(\bar{l}) = u_{es}(\bar{l}) = \bar{d}_1 \bar{l} \quad (58)$$

بنابر جدول 1 و معادله (58)، محل‌های تقاطع منحنی $u = u_{es}(l)$ و خط $u = -3l$ طول تعادل بوم در وضعیت‌های تعادل 123 و 132 را مشخص می‌کند. محل‌های تقاطع منحنی $u = u_{es}(l)$ و خط $u = 0$ طول تعادل بوم در وضعیت‌های تعادل 312 و 213 را معین می‌کند. محل‌های تقاطع منحنی $u = u_{es}(l)$ و خط $u = l$ طول تعادل بوم در وضعیت‌های تعادل 231 و 321 را معلوم می‌کند. در صورت عدم تقاطع منحنی $u_{es}(l)$ با یکی از این سه خط، وضعیت تعادل مربوط به آن برای سیستم وجود ندارد. در شکل 4 یک نمونه منحنی $u_{es}(l)$ و طول‌های تعادل بوم متناظر با آن نشان داده شده است. طول تعادل بوم در چهار نقطه تعادل 123 با $\bar{l}_{123}$ نمایش داده شده است. توجه شود که هر طول تعادل بوم برای هشت نقطه تعادل است؛ یعنی، $\bar{l}_{123} = \bar{l}_{132}$ ، $\bar{l}_{231} = \bar{l}_{321}$ و $\bar{l}_{312} = \bar{l}_{213}$.

در سیستم‌های همیلتونی، یک نقطه تعادل اگر کمینه (یا بیشینه) محلی تابع همیلتونی باشد پایدار لیاپانوف است. (با اضافه شدن میرایی به سیستم، نقطه تعادلی که در آن تابع همیلتونی بیشینه است ناپایدار می‌شود. البته تابع همیلتونی سیستم‌های مکانیکی بیشینه ندارد). شرط کافی برای کمینه بودن یک تابع اسکالر دو بار مشتق‌پذیر در یک نقطه، مثبت معین بودن ماتریس هسین¹ آن در آن نقطه است.

بر اساس معادلات (49-51)، و قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی خطی شده $\delta u_{es} = u'_{es}(\bar{l})\delta l = -H'_{es}(\bar{l})\delta l$ ، تابع همیلتونی سیستم حلقه‌بسته خطی‌شده به‌صورت زیر است:

$$\delta^2 H_{cl} = \frac{1}{2} \delta \xi_{pb}^T P_{cl,pb} \delta \xi_{pb} + \frac{1}{2} \delta \xi_{yr}^T P_{yr} \delta \xi_{yr} \quad (59)$$

که در معادله (49-ب) تعریف شده است و

$$P_{cl,pb} := \begin{bmatrix} -3(\bar{l}_1^2 - \bar{l}_2^2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{l}_3^3} & \frac{\bar{d}_2}{\bar{l}_3^3} & 0 \\ 0 & \frac{\bar{d}_2}{\bar{l}_3^3} & \bar{d}_1 + \frac{\bar{d}_2^2}{\bar{l}_3^3} + H''_{es}(\bar{l}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (60)$$

برای این که $0 < P_{yr}$ باید $0 < \bar{l}_3^2 - \bar{l}_1^2$ و $0 < \bar{l}_3^2 - \bar{l}_2^2$ و برای این که $0 < P_{cl,pb}$ باید $0 < \bar{l}_1^2 - \bar{l}_2^2$ و $0 < \bar{d}_1 + H''_{es}(\bar{l})$. بنابراین، شرط کافی پایداری لیاپانوف یک نقطه تعادل سیستم به‌صورت زیر است:

$$\bar{l}_1^2 < \bar{l}_2^2 < \bar{l}_3^2 \quad (61\text{-الف})$$

$$-H''_{es}(\bar{l}) = u'_{es}(\bar{l}) < \bar{d}_1 \quad (61\text{-ب})$$

برای این که یک نقطه تعادل، ناپایدار باشد کافی است یکی از نامساوی‌های (61) برای آن نقطه به‌صورت برعکس برقرار باشد.

با توجه به فرضی که در نامساوی (10) برای مقادیر ثابت اینرسی سیستم شد، همواره مقادیر اینرسی سیستم به‌این ترتیب هستند: $I_1 < I_2 < I_3$ ، و به‌طور خاص، در نقاط تعادل همین ترتیب برقرار است:

$$\bar{l}_1 < \bar{l}_2 < \bar{l}_3 \quad (62)$$

از شرط (61-الف) و نامساوی (62) نتیجه می‌شود که تمام نقاط تعادل به‌جز نقاط تعادل 123 لزوماً ناپایدار هستند. اگر نامساوی (61-ب) برای چهار نقطه تعادل 123 برقرار باشد، این نقاط پایدار لیاپانوف خواهند بود. بنابراین، بر اساس معادله (58) و نامساوی (61-ب)، برای این که نقاط تعادل 123 وجود

$$u_{di}(x) = -k_{di}y = -k_{di}p_l \quad (75)$$

معادله بقای توان برای سیستم حلقه‌بسته به صورت زیر است:

$$\dot{H}_{cl} = y u_{di} = -\partial_{\xi} H_{cl} R_{cl} (\partial_{\xi} H_{cl})^T = -k_{di} y^2 \leq 0 \quad (76)$$

$$0 < k_{di} \quad (77)$$

که $\dot{H}_{cl} := L_{f_{cl}} H_{cl} = \partial_{\xi} H_{cl} f_{cl}$ معادله (76) نشان می‌دهد که $\dot{H}_{cl}$ در کل فضای حالت منفی نیمه‌معین است.

3-5- دینامیک سیستم حلقه‌بسته

برای شناسایی رفتار سیستم حلقه‌بسته در فضای حالت ابتدا دینامیک خطی حول نقاط تعادل بررسی می‌شود. دینامیک خطی سیستم حلقه‌بسته حول نقاط تعادل پایدار 123 همانند دینامیک سیستم حلقه‌باز متشکل از دو دینامیک مستقل گردش-غلش و پیچش-بوم است. دینامیک خطی گردش-غلش حلقه‌بسته حول نقاط تعادل پایدار 123 همان دینامیک خطی گردش-غلش حلقه‌باز معادله (44) به‌ازای جایگذاری مقادیر اینرسی مربوط به آن‌ها است. قطب‌های دینامیک خطی گردش-غلش حول نقاط تعادل پایدار روی محور موهومی قرار دارند که از معادله مشخصه (47) قابل محاسبه است.

با توجه به معادله (76) برای قانون کنترلی تزریق میرایی و معادله (68) برای قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی، قانون کنترلی خطی شده حول این نقاط، به‌این صورت است:

$$\delta u(\delta l, \delta p_l) = \delta u_{es}(\delta l) + \delta u_{di}(\delta p_l) = -(3 + k_{es1})\delta l - k_{di}\delta p_l \quad (78)$$

دینامیک خطی پیچش-بوم حلقه‌بسته حول نقاط تعادل پایدار 123 با جایگذاری معادله (78) در معادله (45) به‌دست می‌آید. با شروط (69) و (77) ($0 < k_{di}$ و $0 < k_{es1}$) قطب‌های دینامیک خطی پیچش-بوم حلقه‌بسته حول نقاط تعادل پایدار 123 در نیم‌صفحه سمت راست قرار دارند و معادله مشخصه آن به‌صورت زیر است:

$$\left\{ s^4 + \left(k_{es1} - 3\bar{\sigma}_3 + \frac{(2\bar{l}_{123})^2}{I_{03} + \bar{l}_{123}} \right) s^2 - 3\bar{\sigma}_3 k_{es1} \right\} + k_{di} \{ s^3 - 3\bar{\sigma}_3 s \} = 0 \quad (79)$$

که $\bar{\sigma}_3$ در معادله (48) تعریف شده است و برای نقاط تعادل پایدار 123 $\bar{\sigma}_3 = (I_{01} - I_{02} - \bar{l}_{123}^2) / (I_{03} + \bar{l}_{123}^2) < 0$ عبارت سمت چپ معادله (79) چندجمله‌ای مشخصه دینامیک خطی پیچش-بوم سیستم (55) بدون ورودی (بدون میرایی، $k_{di} = 0$) است، و ضریب k_{di} در معادله (79) چندجمله‌ای مشخص‌کننده صفرهای متناهی آن است.

از مهم‌ترین خصوصیات یک سیستم دینامیکی، مجموعه‌های ناوردا و مجموعه‌های حد در فضای حالت است. شناسایی این مجموعه‌ها به درک رفتار سیستم و بررسی رفتار مجانبی سیستم کمک می‌کند.

براساس قضیه منی‌فولد مرکزی¹، در یک همسایگی یک نقطه تعادل یک سیستم غیرخطی (مدل خطی آن) دارای تعدادی قطب سمت چپ و تعدادی قطب روی محور موهومی است، مسیرهای حالت به سمت یک منی‌فولد ناوردا (ناوردا به‌این معنی که میدان برداری سیستم بر آن مماس است) در این همسایگی میل می‌کنند که بعد آن برابر تعداد قطب‌های روی محور موهومی است و در نقطه تعادل مماس بر زیرفضای متناظر با قطب‌های روی محور موهومی است. همچنین خواص پایداری (پایداری لیاپانوف و مجانبی، و ناپایداری) آن نقطه تعادل در فضای حالت، معادل خواص پایداری آن در سیستم محدود شده به منی‌فولد مرکزی است [20-23].

بودن مسیرهای حالت در کل فضای حالت را تضمین می‌کند؛ به‌عنوان نمونه، قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی با شرایط نامساوی‌های (63) و به‌طوری که معادله (67) برای تابع انرژی آن صدق کند، می‌تواند به‌صورت زیر باشد (شکل 4):

$$u_{es}(l) = -3l - k_{es1}\delta l - 3\left(\frac{\Delta_l}{\pi}\right)^3 k_{es3} \left\{ \tan\left(\pi \frac{\delta l}{\Delta_l}\right) - \left(\pi \frac{\delta l}{\Delta_l}\right) \right\} \quad (68)$$

$$0 < k_{es1}, \quad 0 < k_{es3} \quad (69)$$

که $\bar{l}_{123} = (l_{\max} + l_{\min})/2$ و $\Delta_l = l_{\max} - l_{\min}$ ، $\delta l = l - \bar{l}_{123}$ معادله (68) به‌ازای $k_{es3} = 0$ معادل با یک فنر خطی است.

5-2- تزریق میرایی

به‌منظور کاهش انرژی سیستم و پایداری مجانبی آن، از طریق قانون کنترلی مناسب، به سیستم، میرایی افزوده (یا تزریق) می‌شود. معادله (55) را در نظر بگیرید. قانون کنترلی تزریق میرایی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که با اعمال آن سیستم حلقه‌بسته به‌صورت زیر باشد:

$$\dot{\xi} = f_{cl}(x) := (J(x) - R_{cl}(x))(\partial_{\xi} H_{cl})^T(x) \quad (70)$$

که ماتریس میرایی $R_{cl}(x)$ یک ماتریس متقارن مثبت نیمه‌معین است؛ $R_{cl} = R_{cl}^T \geq 0$ ، با توجه به معادلات (55) و (70) رابطه زیر برای قانون کنترلی تزریق میرایی $u_{di}(x)$ و ماتریس R_{cl} برقرار است:

$$g(x)u_{di}(x) = -R_{cl}(x)(\partial_{\xi} H_{cl})^T(x) \quad (71)$$

از آن‌جا که معادله (71) برای تمام فضای حالت برقرار است می‌توان نتیجه گرفت که ماتریس میرایی و قانون کنترلی تزریق میرایی، به‌ترتیب، به فرم زیر هستند:

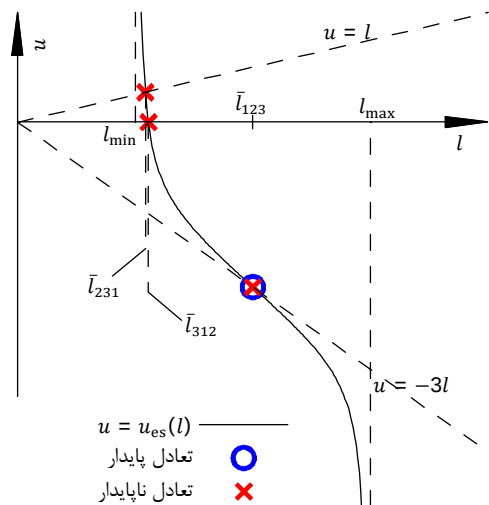
$$R_{cl}(x) = k_{di}g(x)g^T(x) \quad (72)$$

$$u_{di}(x) = -k_{di}(\partial_{\xi} H_{cl}g)^T(x) \quad (73)$$

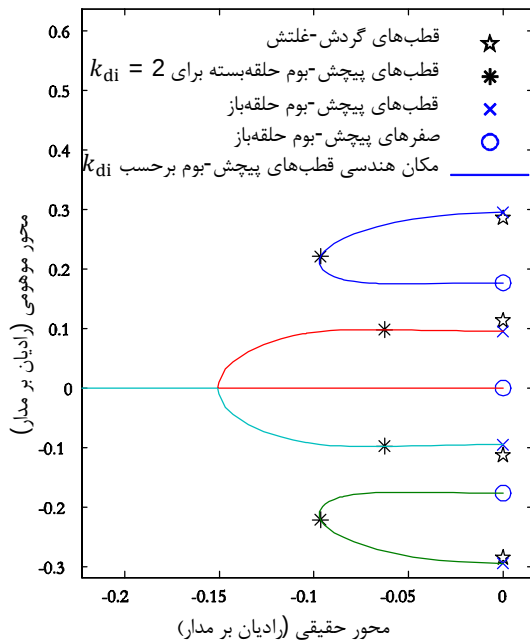
که k_{di} ضریب میرایی تزریق‌شده است. می‌توان مشاهده کرد که خروجی سیستم شکل‌دهی انرژی شده، با خروجی سیستم حلقه‌باز برابر است:

$$y_{cl} := \partial_{\xi} H_{cl}(x)g(x) = \partial_{p_l} H(x) = \dot{l} = p_l = y \quad (74)$$

بنابراین، از معادلات (73) و (74) نتیجه می‌شود که قانون کنترلی تزریق میرایی ضریبی از خروجی دوگان آن است:



شکل 4 قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی معادله (68) برای این که طول بوم همواره در بازه $[l_{\min}, l_{\max}]$ باقی بماند



شکل 5 قطب‌های سیستم حلقه‌بسته حول نقاط تعادل پایدار 123 و مکان هندسی آن برحسب k_{di} برای $k_{es1} = 1$

به‌ازای $k_{es1} = 1$ برحسب ضریب میرایی k_{di} نشان داده شده است. مقدار ضریب k_{es1} به‌گونه‌ای انتخاب شده است که فرکانس طبیعی دینامیک گردش-غلتش و دینامیک پیچش-بوم به هم نزدیک باشند و با وجود مستقل بودن دینامیک خطی آن‌ها، به‌صورت غیرخطی درگیری بیشتری داشته باشند؛ تا انرژی دینامیک گردش-غلتش در نزدیکی نقطه تعادل پایدار بهتر به دینامیک پیچش-بوم منتقل و میرا شود. مقدار ضریب k_{es3} که عامل غیرخطی قانون کنترلی است، به‌گونه‌ای انتخاب شده است که حداکثر نیروی کنترلی بیش از اندازه بزرگ نباشد.

شبیه‌سازی با حالت اولیه زیر انجام شده است:

$${}^0e(0) = e, \quad {}^s\Omega(0) = [3 \ 2 \ -1]^T \text{ (rev/orb)} \quad (84\text{-الف})$$

$$\tilde{l}(0) = \tilde{l}_{123} = 1 \text{ (m)}, \quad p_l(0) = 0 \quad (84\text{-ب})$$

که $e = \text{diag}(1,1,1)$ ماتریس همانی است و واحد سرعت زاویه‌ای، دور بر مدار¹ است.

معادلات حرکت سیستم به‌ازای شرط اولیه² (84) با حل‌کننده صریح، حل عددی شد. معادله سینماتیک دوران دارای قید است. به منظور حفظ قیدها در محدوده تیرانس حل عددی، می‌توان از تکنیک‌هایی استفاده کرد که پایداری مجانبی خطا از قیدها را تضمین کند. در این‌جا، از روشی استفاده شد که در [25] برای معادلات دیفرانسیل معمولی با ناوردها² بیان شده است. همچنین، از این روش برای تضمین دقت لازم برای معادله بقای توان (76)، با افزودن انرژی به‌عنوان متغیر حالت، استفاده شد.

شکل‌های 6 تا 11 نتایج شبیه‌سازی زمانی سیستم حلقه‌بسته را نشان می‌دهد. شکل 6-الف نشان می‌دهد که سیستم با حالت اولیه² (84) به نقطه تعادل پایدار با همیلتونی کمینه، همگرا شده است. نرخ همگرایی، به‌صورت غیرنمایی است. شکل‌های 7 و 8 نشان می‌دهد که ماهواره به وضعیت تعادل $e = e$ همگرا شده است (وضعیت بالا چپ در شکل 3). سیستم با حالت‌های اولیه² دیگر می‌تواند به دیگر وضعیت‌های تعادل 123 همگرا شود.

بنابراین، در یک همسایگی هر یک از نقاط تعادل پایدار 123 سیستم حلقه‌بسته (70) یک منیقول مرکزی با بُعد 4 وجود دارد که در نقطه تعادل، مماس بر زیرفضای گردش-غلتش است و مسیرهای حالت سیستم در آن همسایگی به آن میل می‌کنند. از آن‌جا که سیستم حلقه‌بسته در نقاط تعادل 123 پایدار است، سیستم محدودشده به‌این منیقول مرکزی نیز پایدار است، اما پایداری مجانبی سیستم به بررسی بیشتر نیاز دارد. از وجود منیقول مرکزی تنها می‌توان نتیجه گرفت که نقاط تعادل 123 پایداری مجانبی نمی‌نمایند. برای بررسی امکان پایداری مجانبی آن‌ها، می‌توان از اصل ناوردایی بهره گرفت [23,21] که معادل بررسی مشاهده‌پذیری حالت-صفر سیستم است [24]. این کار به استفاده از ابزارهای هندسی یا به‌دست آوردن منیقول مرکزی نیاز دارد که خارج از حوصله این مقاله است. در عوض، با شبیه‌سازی عددی رفتار نقاط تعادل پایدار را نشان می‌دهیم.

نقاط تعادل پایدار درون دو منیقول ناوردا قرار دارند. این دو منیقول به‌ازای هر قانون کنترلی نسبت به سیستم حلقه‌بسته، ناوردا هستند. این دو منیقول ناوردا را در دستگاه مختصات بدنه به‌این صورت می‌توان بیان کرد: $\{({}^0e, {}^s\Pi, l, p_l): {}^0e_3 = \pm e_3, {}^s\Pi^1 = {}^s\Pi^2 = 0\}$. این دو منیقول ناوردا هر کدام دو نقطه تعادل پایدار و دو نقطه تعادل ناپایدار را دربر دارند. در واقع، منیقول پایدار 4 بُعدی نقاط تعادل، که مماس بر زیرفضای پیچش-بوم با دینامیک خطی معادله (45) است، مربوط به همین منیقول‌های ناوردا دور در صفحه مدار است. نقاط روی منیقول پایدار به‌صورت نمایی به نقطه تعادل پایدار همگرا می‌شوند.

5-4- اصلاح وضعیت بوم وارونه

معمولاً برای ماهواره‌های دارای بوم، مطلوب است که در وضعیت نشانه‌روی به زمین، بوم رو به بالا باشد. از چهار وضعیت تعادل پایدار 123، در دو وضعیت، بوم رو به بالا و در دو وضعیت، بوم رو به پایین است (شکل 3). در صورت همگرایی به وضعیت بوم رو به پایین، می‌توان با یک مانور به وضعیت بوم رو به بالا رسید؛ به‌این صورت که طول بوم، کاهش و سپس افزایش داده شود. در وضعیت تعادل، ماهواره دارای سرعت زاویه‌ای برابر سرعت زاویه‌ای مدار، حول محور عمود بر مدار $\vec{e}_3$ است. با کاهش طول بوم، ماهواره حول $\vec{e}_3$ شروع به چرخیدن می‌کند و با افزایش طول بوم سرعت زاویه‌ای ماهواره حول $\vec{e}_3$ کم می‌شود. می‌توان زمان و مقدار کم و زیاد شدن طول بوم را به‌گونه‌ای تنظیم کرد که ماهواره از وضعیت تعادل بوم رو به پایین به وضعیت تعادل بوم رو به بالا برسد. در [5] این مانور بررسی و شبیه‌سازی شده است.

6- شبیه‌سازی

ماهواره‌ای که برای شبیه‌سازی درنظر گرفته شده است در مدار دایره‌ای با ارتفاع 600 کیلومتر است. بنابراین، حرکت میانگین 0/00108 رادیان بر ثانیه، معادل 15 مدار بر روز است. پارامترهای جرم، اینرسی و طول بوم به‌صورت زیر انتخاب شده است:

$$m = 50 \text{ (kg)}, \quad m_b = 2 \text{ (kg)} \quad (80)$$

$$I_0 = \text{diag}(1.9, 2, 3) \text{ (kgm}^2\text{)} \quad (81)$$

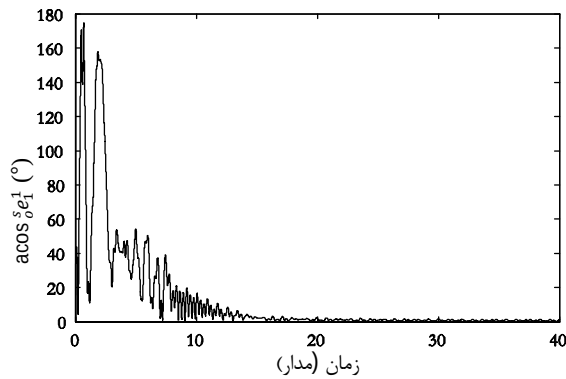
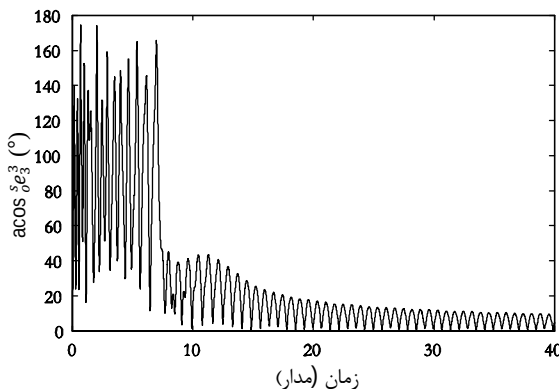
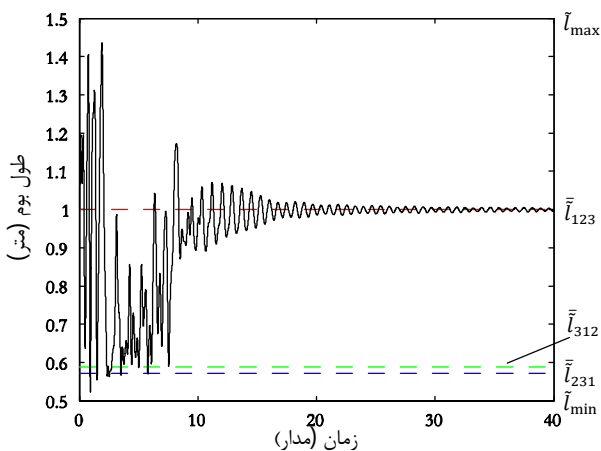
$$\tilde{l}_{123} = 1 \text{ (m)}, \quad \tilde{l}_{\min} = 0.5 \text{ (m)}, \quad \tilde{l}_{\max} = 1.5 \text{ (m)} \quad (82)$$

قانون‌های کنترلی شکل‌دهی انرژی (68) و تزریق میرایی (75) با ضرایب زیر برای شبیه‌سازی درنظر گرفته می‌شود:

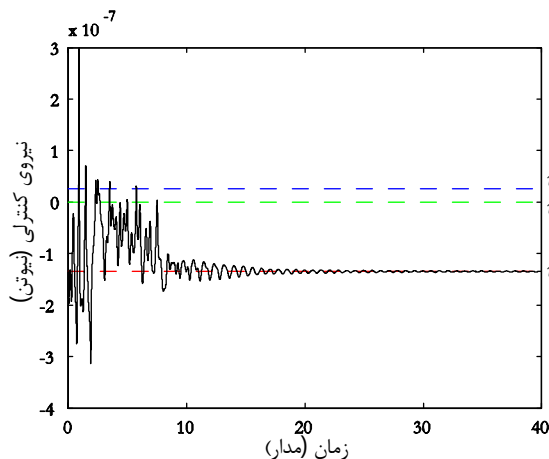
$$k_{es1} = 1, \quad k_{es3} = 10, \quad k_{di} = 2 \quad (83)$$

در شکل 5 قطب‌های گردش-غلتش و مکان هندسی قطب‌های پیچش-بوم

1- revolutions per orbit (rpo)
2- ODEs with invariants


 شکل 7 زاویه محور بوم e_1 نسبت به جهت سمت e_1 ، برحسب زمان

 شکل 8 زاویه محور e_3 نسبت به جهت عمود بر صفحه مدار e_3 ، برحسب زمان


شکل 9 طول بوم برحسب زمان

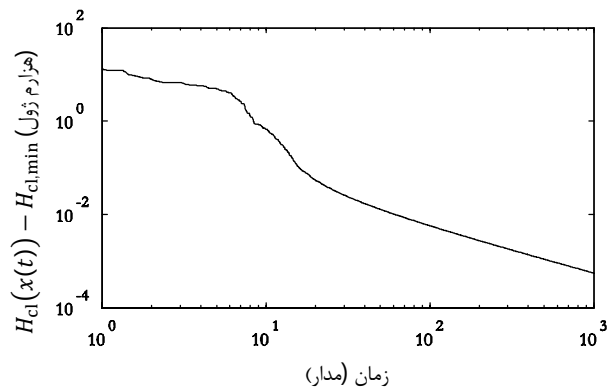


شکل 10 نیروی کنترلی برحسب زمان

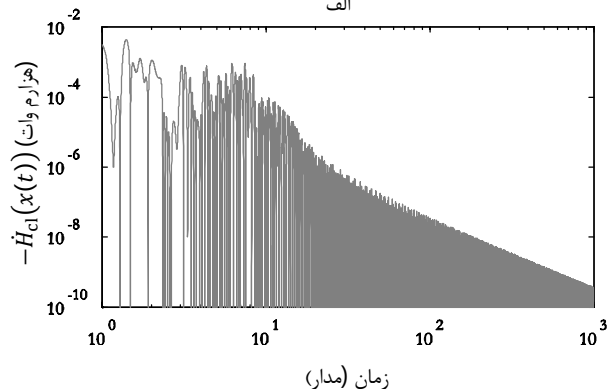
از شکل 7 مشاهده می‌شود که محور بوم، e_1 ، پس از 3 مدار از حالت غلتیدن¹ به حالت نوسان² در می‌آید و پس از 15 مدار (یک روز) به دقت 3 درجه نشانه‌روی به زمین می‌رسد. از شکل 8 مشاهده می‌شود که محور e_3 پس از 8 مدار از حالت غلتیدن به حالت نوسان در می‌آید و پس از 30 مدار به زاویه 12 درجه نسبت به e_3 می‌رسد. دیرتر میرا شدن حرکت محور e_3 (و e_2) در مقایسه با e_1 ، به علت ضعف گشتاور حول بوم است که از مهمترین مشکلات بوم گرادیان جاذبه محسوب می‌شود.

شکل 9 همگرایی طول بوم به مقدار تعادل $\bar{l}_{123}$ را نشان می‌دهد. قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی (68) موجب شده است که طول بوم در بازه $[\bar{l}_{min}, \bar{l}_{max}]$ باشد. شکل 10 نیروی کنترلی مربوط به قانون کنترلی شکل‌دهی انرژی و تزریق میرایی را برحسب زمان نشان می‌دهد. مقدار این نیرو بسیار ناچیز است. در زمان‌هایی که طول بوم به حد پایین و بالای خود نزدیک می‌شود (شکل 9)، قله‌ها و چاه‌های نیروی کنترلی را به وجود می‌آورد (شکل 10). این قله‌ها و چاه‌ها در حالت حدی به ضربه میل می‌کنند.

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، (تقریباً همه) مسیرهای حالت سیستم به منی‌فولد مرکزی میل می‌کنند. در شکل 11، تصویر مسیر حالت پس از همگرایی به منی‌فولد مرکزی حول نقطه تعادل پایدار در زیرفضای مومنوم زاویه‌ای قابل مشاهده است.



الف



ب

شکل 6 الف: انرژی (همیلتونی) سیستم حلقه‌بسته نسبت به وضعیت تعادل پایدار برحسب زمان، ب: نرخ کاهش انرژی سیستم حلقه‌بسته برحسب زمان

1- tumbling
2- oscillation, libration

$\dot{\vec{r}}_b = \dot{\vec{r}} + \dot{\vec{\rho}}_b$ و $\dot{\vec{r}}_m = \dot{\vec{r}} + \dot{\vec{\rho}}_m$ به ترتیب بردارهای سرعت بدنه اصلی و بوم نسبت به چارچوب اینرسی، و بردارهای مکان مرکز جرم بدنه اصلی و بوم نسبت به جرم مرکزی به ترتیب $\vec{r}_b = \vec{r} + \vec{\rho}_b$ و $\vec{r}_m = \vec{r} + \vec{\rho}_m$ و $\vec{r}_b := \vec{O}_i \vec{O}_b$ و $\vec{r}_m := \vec{O}_i \vec{O}_m = \vec{r} + \vec{\rho}_m$ هستند. تصویر اصل مومنوم سیستم در جهت تغییر طول بوم به این صورت است:

$$\dot{\vec{L}}_m \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + \dot{\vec{L}}_b \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} = (\vec{F}_{mg} + \vec{F}_{mb}) \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + (\vec{F}_{bg} + \vec{F}_{bm}) \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} \quad (87)$$

بردارهای سرعت پاره‌ای جهت تغییر طول بوم برای بدنه اصلی و بوم به این صورت هستند:

$$\frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} = \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial \vec{l}} = -\frac{m_b}{m} s \vec{e}_1 \quad (88\text{-الف})$$

$$\frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} = \frac{\partial \vec{v}_b}{\partial \vec{l}} = \frac{m_m}{m} s \vec{e}_1 \quad (88\text{-ب})$$

عبارت سمت راست تساوی معادله (87) نیروی تعمیم‌یافته متناظر با مختصات تعمیم‌یافته تغییر طول بوم است که از دو بخش اثر نیروی جاذبه Q_l و نیروی کنترلی بین بوم و بدنه اصلی ماهواره $\tilde{u}$ تشکیل شده است:

$$Q_l := \vec{F}_{mg} \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + \vec{F}_{bg} \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} = m_r \left(\frac{\vec{F}_{bg}}{m_b} - \frac{\vec{F}_{mg}}{m_m} \right) \cdot s \vec{e}_1 \quad (89)$$

$$\tilde{u} := \vec{F}_{mb} \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + \vec{F}_{bm} \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} = \vec{F}_{bm} \cdot s \vec{e}_1 \quad (90)$$

عبارت سمت چپ تساوی معادله (87) بر اساس قاعده لایب‌نیتس به این صورت قابل بیان است:

$$\dot{\vec{L}}_m \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + \dot{\vec{L}}_b \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} = \dot{p}_l - \left[\vec{L}_m \cdot \frac{d}{dt} \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + \vec{L}_b \cdot \frac{d}{dt} \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} \right] \quad (91)$$

که p_l مومنوم تعمیم‌یافته متناظر با مختصات تعمیم‌یافته تغییر طول بوم است:

$$p_l := \vec{L}_m \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + \vec{L}_b \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} = m_r \left(\frac{\vec{L}_b}{m_b} - \frac{\vec{L}_m}{m_m} \right) \cdot s \vec{e}_1 \quad (92)$$

برای عبارت داخل پرانتز معادله (92) رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{\vec{L}_b}{m_b} - \frac{\vec{L}_m}{m_m} = \dot{\vec{\rho}}_b - \dot{\vec{\rho}}_m = \dot{\vec{l}}_s \vec{e}_1 + \vec{l} \vec{\omega} \times s \vec{e}_1 \quad (93)$$

که در به‌دست آوردن تساوی‌های معادله (93) به ترتیب از معادلات (88)، تعریف مومنوم خطی بدنه اصلی و بوم و مشتق زمانی معادله (5) استفاده شده است. در نهایت، از معادله (92) و (93) مومنوم تعمیم‌یافته تغییر طول بوم به این صورت به‌دست می‌آید:

$$p_l = m_r \dot{\vec{l}} \quad (94)$$

عبارت داخل کروشه معادله (91) به این صورت به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \vec{L}_m \cdot \frac{d}{dt} \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + \vec{L}_b \cdot \frac{d}{dt} \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} &= m_r \left(\frac{\vec{L}_b}{m_b} - \frac{\vec{L}_m}{m_m} \right) \cdot (\vec{\omega} \times s \vec{e}_1) \\ &= m_r \vec{l} \vec{\omega} \cdot (s \vec{e}_1^T \times s \vec{e}_1) \cdot \vec{\omega} \end{aligned} \quad (95)$$

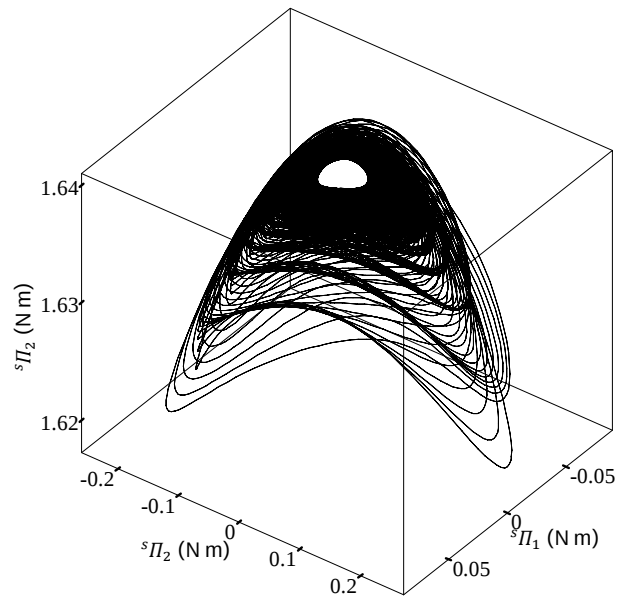
با توجه به معادلات بالا، معادلات حرکت تغییر طول بوم به این صورت می‌شود:

$$\dot{\vec{l}} = \frac{p_l}{m_r} \quad (96)$$

$$\dot{p}_l = m_r \vec{l} \vec{\omega} \cdot (s \vec{e}_1^T \times s \vec{e}_1) \cdot \vec{\omega} + Q_l + \tilde{u} \quad (97)$$

با تعریف طول بوم نرمال شده l به صورت معادله (16)، متغیرهای نرمال شده q_l و u به این صورت تعریف می‌شوند:

$$p_l := \vec{L}_m \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial \vec{l}} + \vec{L}_b \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial \vec{l}} = \frac{p_l}{\sqrt{m_r}} = \dot{l} \quad (98)$$



شکل 11 مسیر بردار مومنوم زاویه‌ای ماهواره بیان شده در دستگاه مختصات ماهواره پس از هم‌گرایی به منیفولد مرکزی (از 40 تا 1000 مدار)

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بوم گرادین جاذبه طول متغیر به عنوان ابزاری برای پایداری سازی سه‌محوره ماهواره در مدار دایره‌ای ارائه و بررسی شد. ماهواره با بوم طول متغیر، متشکل از دو جسم صلب در نظر گرفته شد که در راستای بوم نسبت به هم امکان حرکت دارند و ورودی کنترلی، نیروی بین این دو جسم است. قانون کنترلی طراحی شده مانند فنر غیرخطی و میراکننده عمل می‌کند. از بررسی سیستم حلقه بسته مشاهده شد که وضعیت‌های تعادل، پایداری مجانبی غیرنمایی دارد. مصرف کم توان و پایداری ذاتی از مزایای این روش است. در نتیجه، این روش می‌تواند در ماهواره‌های کوچکی که برای نشانه‌روی به زمین دقت بالایی نیاز ندارند، استفاده شود.

یکی از مشکلات پایداری سازی گرادین جاذبه این است که در مدار بیضوی، ماهواره صلب تحت گرادین جاذبه، وضعیت تعادل ندارد. ایده پایداری سازی ماهواره در مدار دایره‌ای تنها با تغییر طول بوم، می‌تواند به مدار بیضوی تعمیم داده شود. در این صورت، می‌توان با تغییر طول بوم، وضعیت‌های تعادل پایداری که در مدار دایره‌ای وجود دارد را در مدار بیضوی ایجاد کرد. امکان پایداری سازی سه‌محوره این وضعیت‌های تعادل، تنها با تغییر طول بوم، نیاز به بررسی دارد که موضوع پیشنهادی برای ادامه کار است.

8- پیوست: استخراج معادلات حرکت تغییر طول بوم

دینامیک تغییر طول بوم از تصویر اصل مومنوم سیستم در جهت تغییرات مختصات تعمیم‌یافته طول بوم به‌دست می‌آید. اصل مومنوم خطی به ترتیب برای بدنه اصلی و بوم عبارت‌اند از:

$$\dot{\vec{L}}_m = \vec{F}_{mg} + \vec{F}_{mb} \quad (85)$$

$$\dot{\vec{L}}_b = \vec{F}_{bg} + \vec{F}_{bm} \quad (86)$$

که در آن $\vec{F}_{mg}$ و $\vec{F}_{bg}$ به ترتیب نیروی جاذبه وارد بر بدنه اصلی و بوم هستند. $\vec{F}_{mb}$ نیروی وارد بر بدنه اصلی از طرف بوم و $\vec{F}_{bm}$ نیروی وارد بر بوم از طرف بدنه اصلی است و بنابر قانون سوم نیوتن $\vec{F}_{mb} = -\vec{F}_{bm}$ و $\vec{L}_m := m_m \vec{v}_m$ و $\vec{L}_b := m_b \vec{v}_b$ به ترتیب مومنوم‌های خطی بدنه اصلی و بوم است.

- [10] K. Kumar, A. Khosla, K. Chaudhary, Tether as a satellite attitude stabilizer in elliptic orbits: a new concept, in *Advances in the Astronautical Sciences*, Victoria, BC, Can, 1993, pp. 859-875.
- [11] M. B. Larsen, M. Blanke, Passivity-based control of a rigid electrodynamic tether, Vol. 34, No. 1, pp. 118-127, 2011.
- [12] V. V. Sidorenko, A. Celletti, A "Spring-mass" model of tethered satellite systems: Properties of planar periodic motions, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, Vol. 107, No. 1, pp. 209-231, 2010.
- [13] H. Makarem, H. Salarieh, G. R. Vossoughi, A. Alasty, Kinematic attitude control of three pairwise connected in-plane masses by varying the lengths of the links, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 127-141, 2013. (In Persian)
- [14] Y. Yao, Y. Jiang, Attitude stabilization of spacecraft with two moving-mass via interconnection and damping assignment, in *CCDC 2008 - Chinese Control and Decision Conference*, Yantai, Shandong, 2008, pp. 5115-5118.
- [15] V. Duindam, A. Macchelli, S. Stramigioli, H. Bruyninckx, *Modeling and Control of Complex Physical Systems: The Port-Hamiltonian Approach*: Springer, 2009.
- [16] J. Forshaw, G. Smith, *Dynamics and Relativity*: Wiley, 2009.
- [17] V. V. Beletskii, *Motion of an Artificial Satellite about its Center of Mass*: Israel Program for Scientific Translations, 1966.
- [18] P. C. Hughes, *Spacecraft Attitude Dynamics*: Dover Publications, 2012.
- [19] T. R. Kane, P. W. Likins, D. A. Levinson, *Spacecraft dynamics*: McGraw-Hill, 1983.
- [20] H. Nijmeijer, A. van der Schaft, *Nonlinear Dynamical Control Systems*: U.S. Government Printing Office, 1990.
- [21] F. Bullo, A. D. Lewis, *Geometric Control of Mechanical Systems*: Springer, 2005.
- [22] D. Cheng, X. Hu, T. Shen, *Analysis and Design of Nonlinear Control Systems*: Springer, 2010.
- [23] S. Sastry, *Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control*: Springer New York, 1999.
- [24] A. van der Schaft, *L2 - Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*: Springer London, 1999.
- [25] U. M. Ascher, L. R. Petzold, *Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations*: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM, 3600 Market Street, Floor 6, Philadelphia, PA 19104), 1998.

$$Q_l := \vec{F}_{mg} \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial l} + \vec{F}_{bg} \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial l} = \sqrt{m_r} \left(\frac{\vec{F}_{bg}}{m_b} - \frac{\vec{F}_{mg}}{m_m} \right) \cdot {}_s \vec{e}_1 \quad (99)$$

$$= \frac{Q_l}{\sqrt{m_r}}$$

$$u := \vec{F}_{mb} \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial l} + \vec{F}_{bm} \cdot \frac{\partial \vec{r}_b}{\partial l} = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \vec{F}_{bm} \cdot {}_s \vec{e}_1 = \frac{\tilde{u}}{\sqrt{m_r}} \quad (100)$$

بنابراین، با استفاده از معادلات (96) تا (100) معادلات حرکت تغییر طول نرمال شده بوم (17) و (18) به دست می‌آید.

9- مراجع

- [1] R. Wiśniewski, M. Blanke, Fully magnetic attitude control for spacecraft subject to gravity gradient, *Automatica*, Vol. 35, No. 7, pp. 1201-1214, 1999.
- [2] M. I. Martinelli, R. S. Sánchez Peña, Passive 3 axis attitude control of MSU-1 pico-satellite, *Acta Astronautica*, Vol. 56, No. 5, pp. 507-517, 2005.
- [3] M. Ovchinnikov, Attitude dynamics of a small-sized satellite equipped with hysteresis damper, in *Advances in the Astronautical Sciences*, Porto, 2012, pp. 311-330.
- [4] A. E. a. Zakrzhevskii, V. S. b. Khoroshilov, Dynamics of an unstabilized spacecraft during the deployment of an elastic pantograph structure, *International Applied Mechanics*, Vol. 50, No. 3, pp. 341-351, 2014.
- [5] V. I. Dranovskii, V. S. Khoroshylov, A. E. Zakrzhevskii, Spacecraft dynamics with regard to elastic gravitational stabilizer deployment, *Acta Astronautica*, Vol. 64, No. 5-6, pp. 501-513, 2009.
- [6] J. B. Han, H. Huang, X. S. Wang, Rigid-flexible coupling dynamic modeling and attitude simulation of gravity-gradient satellite, in *ISSCAA2010 - 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics*, Harbin, 2010, pp. 1325-1328.
- [7] G. M. Connell, A Method of Earth-Pointing Attitude Control for Elliptic Orbits, *AIAA Journal*, Vol. 10, No. 3, pp. 258-263, 1972.
- [8] H. Kojima, Minimum time deployment control for gravity-gradient stabilized space structure, *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 68, No. 5, pp. 1435-1440, 2002.
- [9] J. Ashenberg, E. C. Lorenzini, Active gravity-gradient stabilization of a satellite in elliptic orbits, *Acta Astronautica*, Vol. 45, No. 10, pp. 619-627, 1999.