

Research Paper

The Magnetic Cleanliness of a Satellite Based on the Optimum Placement of Equipment using PSO

Bahman Ghorbani Vaghei^{1*}, Alireza Shahri Razlighi²

1. Department of Railway Track & Structures Engineering, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2.School of Advanced Technologies, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

* bahman_gh@iust.ac.ir

The magnetic sensor is one of the most widely used sensors due to its low and low power consumption. One of the major disadvantages of these sensors is that the output data under the influence of magnetic fields resulting from destroyed and unreliable equipment is unreliable. Therefore, the size of the magnetic field at the location of the magnetic sensor layout should be measured following the satellite's mission. This paper defines a cost function based on the size of the magnetic field obtained from the equipment at the magnetic sensor location. Using the particle swarm optimization (PSO) algorithm, the cost function is minimized with the optimal layout of the equipment. In this regard, with the help of the algorithm, the state of the equipment is determined according to the amount of freedom they have at the location of the layout. Finally, the algorithm's correct performance to achieve magnetic cleaning is demonstrated by simulating a satellite's equipment.

Keywords: Magnetic cleanliness, Self-compensate technique, Intelligent Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm, Dipole Magnetic Modeling

1. Assistant Professor(Corresponding Author)
2. M.Sc. Student

مقاله علمی - پژوهشی

دستیابی به پاکیزگی مغناطیسی یک ماهواره با استفاده از جانمایی بهینه تجهیزات برپایه PSO

بهمن قربانی واقعی^{۱*} و علیرضا شهری رازلیقی^۲

۱- دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

* bahman_gh@iust.ac.ir

حسگر مغناطیسی یکی از پرکاربردترین حسگرها به دلیل سبکی و مصرف توان پایین در میکرو ماهواره‌ها می‌باشد. یکی از معایب بزرگ این حسگرها این است که داده‌های خروجی تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی حاصل از تجهیزات خراب شده و غیرقابل اعتماد می‌گردد. بنابراین باید اندازه میدان مغناطیسی در محل جانمایی حسگر مغناطیسی به کمتر از مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی تعریف شده متناسب با مأموریت ماهواره برسد. در این مقاله ابتدا یک تابع هزینه براساس اندازه میدان مغناطیسی حاصل از تجهیزات در محل حسگر مغناطیسی تعریف شده و با استفاده از الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) سعی می‌شود تابع هزینه با جانمایی بهینه تجهیزات به حداقل ممکن برسد. در این راستا به کمک الگوریتم، وضعیت تجهیزات متناسب با مقدار آزادی که دارند در محل جانمایی چنان تعیین می‌شود که میدان مغناطیسی تجهیزات در محل حسگر مغناطیسی به حداقل ممکن برسد. در انتها با شبیه‌سازی تجهیزات یک ماهواره، عملکرد صحیح الگوریتم در رسیدن به پاکیزگی مغناطیسی نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پاکیزگی مغناطیسی، تکنیک خودجبران، الگوریتم هوشمند ازدحام ذرات (PSO)، مدل‌سازی دوقطبی مغناطیسی، مدل‌سازی میدان مغناطیسی

علائم و اختصارات

مقدمه

حسگر مغناطیسی یکی از پرکاربردترین حسگرها می‌باشد و خروجی آن جهت و اندازه میدان مغناطیسی است که از آن برای تعیین وضعیت و موقعیت در مدارات ارتفاع کم (LEO) و اندازه‌گیری میدان مغناطیسی برای تحقیقات علمی در فضای اطراف زمین و همچنین فضای حساس بین سیاره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۷]. استفاده از حسگرهای مغناطیسی به تنهایی و یا در ترکیب با دیگر سنسورهای وضعیتی برای تعیین وضعیت یک ماهواره با استفاده از مدل مرجع میدان مغناطیسی زمین مانند IGRF-12^۴

DSM	ماتریس ساختار طراحی
CEC	کد ارزیابی تغییرات مهندسی
Components Activity- Design Structure Matrix(CA-DSM)	ماتریس فعالیت‌های اجزای
PE	عدد احتمال اثر
CT	عدد اثر منابع مصرفی
Originating change component (OCC)	جزء آغازکننده تغییر
Change Propagation Path (CPP)	مسیرهای رشد تغییرات
Change Requirement (CR)	درخواست تغییر
Dependency Model (DM)	مدل وابستگی

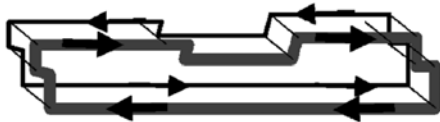
3. Low Earth Orbit

4. International Geomagnetic Reference Field

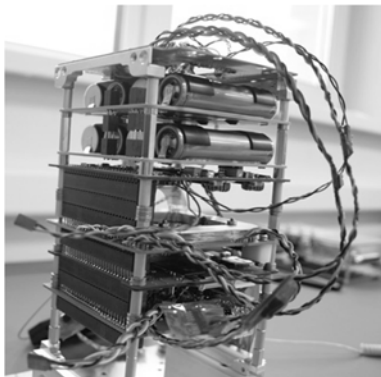
۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد

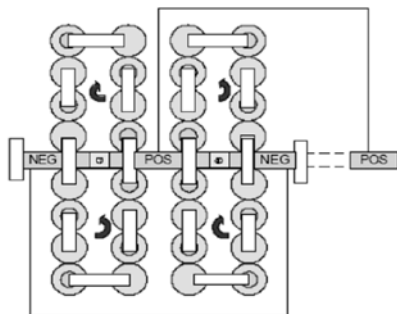
محل تجهیز حساس، استفاده از روش خودجبران است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است برای مقابله با میدان مغناطیسی متغیر با زمان حاصل از پانل‌های خورشیدی مسیر عبور جریان را به صورت رفت و برگشت طراحی می‌کنند، برای مقابله با جریان متغیر با زمان حاصل از سیم‌ها حامل جریان همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است آن‌ها را به صورت جفت‌های در هم پیچیده طراحی می‌کنند، برای مقابله با میدان مغناطیسی حاصل از جریان متغیر سلول‌های باتری، مطابق شکل ۳ آن‌ها به صورت نعل اسبی در طراحی می‌کنند. در تکنیک جانمایی صحیح تجهیزات که بخشی از روش خود جبران است، هدف کاهش میدان مغناطیسی ثابت حاصل از تجهیزات ماهواره در محل تجهیزات حساس می‌باشد، به طوری که تجهیزات ماهواره همان‌های مغناطیسی یک‌دیگر را تا حد امکان خنثی و جبران کنند [۸-۱۶].



شکل ۱- جبران‌سازی حلقه‌های جریان به صورت رفت و برگشت [۱۶]



شکل ۲- استفاده از جفت‌های به هم پیچیده سیم‌ها برای جبران میدان مغناطیسی حاصل از جریان متغیر با زمان [۱۶]



شکل ۳- نحوه اتصال سلول باتری برای جبران میدان مغناطیسی حاصل از جریان تولید شده [۱۶]

کافی است. در مأموریت‌های خاصی که از گشتاور دهنده مغناطیسی برای کنترل وضعیت استفاده می‌کنند، استفاده از حسگرهای مغناطیسی برای تأمین اطلاعات میدان مغناطیسی ضروری است. نسبت به دیگر سنسورهای وضعیتی، از حسگر مغناطیسی می‌توان برای تخمین پسماند ممان^۵ مغناطیسی ماهواره استفاده کرد. این حسگرها سبک وزن، اندازه کوچک، نصب آسان و مصرف پایین توان دارد [۱]. به همین دلیل اکثر ماهواره‌هایی که در مدارهای پایین‌تر از ۱۰۰۰ کیلومتر قرار می‌گیرند، حسگر مغناطیسی بخشی از مجموعه سنسورهای اصلی ماهواره است [۱].

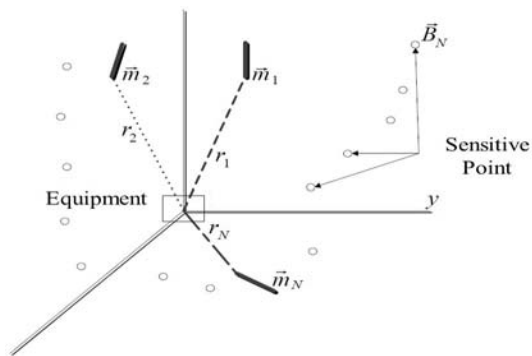
از آن‌جاکه ماهواره حاوی تعدادی از قطعات و تجهیزات مغناطیسی است، می‌تواند اندازه‌گیری‌های مغناطیسی را مختل کند و حتی باعث افزایش توان مصرفی ماهواره یا مصرف سوخت به دلیل جبران گشتاور ایجاد شده حاصل از تعامل کل ممان دوقطبی مغناطیسی ماهواره با میدان مغناطیسی زمین به‌خصوص در مدارات ارتفاع کم شود. بنابراین باید الزامات دقیق پاکیزگی مغناطیسی بر روی فضایما اعمال شود [۸، ۹]. همچنین میدان مغناطیسی ثابت حاصل از تجهیزات و خود ماهواره برای دستیابی به پاکیزگی مغناطیسی که بخشی از سازگاری الکترومغناطیسی^۶ (EMC) است، باید مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. در این مورد مدل‌سازی دوقطبی مغناطیسی به روش‌های مختلف بهینه‌سازی، هارمونیک کروی و ... توسعه یافته است که مسئله کلیدی برای تایید مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی است و این امکان را فراهم می‌کند که یک مدل مغناطیسی از تجهیزات ماهواره در طی مراحل طراحی و توسعه آماده شود. علاوه بر این امکان دستیابی به پاکیزگی مغناطیسی و پیش‌بینی میدان مغناطیسی در محل تجهیزات حساس به میدان مغناطیسی برای مأموریت‌های فضایی که از تجهیزات حساس به میدان مغناطیسی استفاده می‌کنند، فراهم می‌کند. در نهایت، به دلیل افزایش مأموریت‌هایی که نیازمند پاکیزگی مغناطیسی است، چنین ویژگی‌هایی به طور فزاینده‌ای مهم می‌شود. همچنین در سال‌های اخیر، توجه و علاقه طراحان برای دستیابی به مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی به میزان قابل توجهی برای صرفه جویی در وقت و هزینه در طول فاز طراحی و توسعه فضایماها افزایش یافته است [۲-۷].

برای رسیدن به مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی یک ماهواره راه‌کارها و تکنیک‌های مختلفی در [۸-۱۶] ارائه شده است که یکی از بهترین راه‌کارها برای کاهش میدان مغناطیسی ثابت حاصل از تجهیزات ماهواره و مقابله با میدان‌های مغناطیسی متغیر با زمان حاصل از جریان سیم‌ها، باتری‌ها و پانل‌های خورشیدی در

5. moment
6. Electromagnetic Compatibility

در نهایت مجموع میدان مغناطیسی حاصل از تمامی دوقطبی‌های مغناطیسی مدل شده تجهیزات ماهواره در محل تجهیز حساس نقطه j با استفاده از معادله ۸ محاسبه می‌شود [۴]:

$$\vec{B}_j = \sum_{i=1}^N Bx_{ij} \cdot \hat{x} + \sum_{i=1}^N By_{ij} \cdot \hat{y} + \sum_{i=1}^N Bz_{ij} \cdot \hat{z} \quad (۸)$$



شکل ۴- میدان مغناطیسی حاصل از دوقطبی مغناطیسی در محل تجهیزات حساس [۴]

الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم PSO جز الگوریتم‌های فراکتشافی (تکاملی) است که یک مکانیزم بهبود یابنده یا تکاملی دارد که هر بار تکرار می‌شود. این الگوریتم در شاخه هوش ازدحامی یا هوش جمعی قرار می‌گیرد، که اصل و اساس عملکرد الگوریتم به اشتراک گذاری اطلاعات و تجربیات بین ذرات است. الگوریتم بهینه‌سازی PSO در سال ۱۹۹۵ توسط جیمز کندی^۸ و راسل ابرهارت^۹ توسعه داده شد. ایده این روش از عملکرد دسته جمعی گروه‌های حیوانات و حشرات مانند پرندگان، ماهی‌ها، زنبور عسل و ... در یک فضا برگرفته شده است. علی‌رغم سادگی الگوریتم PSO قدرت زیادی در حل مسائل بهینه‌سازی در حوزه پیوسته دارد و ظاهراً یک الگوریتم پیوسته است اما با اعمال تمهیداتی در الگوریتم PSO در حل مسائل گسسته نیز قدرت زیادی پیدا می‌کند [۱۷]. الگوریتم PSO دارای اصطلاحاتی است که در ادامه تعریف می‌شود: [۴، ۷، ۱۷]

۱- ذرات یا نماینده: به هر ذره در جمعیت مشخص گفته می‌شود. هر کدام از ذرات در جمعیت مقادیر مجهول مسئله را به طور تصادفی در موقعیت خود و در محدوده فضای جستجو تولید و مقدار تابع هزینه حاصل از این مقادیر تصادفی بین اعضاء جمعیت به

در این مقاله، استفاده از تکنیک جانمایی صحیح تجهیزات برای کاهش اندازه میدان مغناطیسی حاصل از تجهیزات یک میکرو ماهواره در محل حسگر مغناطیسی با توجه به محدودیت‌های موجود با تعریف یک تابع هزینه و رساندن این تابع هزینه به حداقل ممکن با استفاده از الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) ارائه شده است. در این راستا، ابتدا در بخش ۲ روابط ریاضی بین دوقطبی مغناطیسی و میدان مغناطیسی حاصل از دوقطبی اشاره شده، سپس در بخش ۳ به معرفی الگوریتم ازدحام ذرات و نحوه عملکرد آن اشاره شده، در بخش ۴ به چگونگی استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات برای حل مشکل جانمایی بهینه تجهیزات اشاره شده و در بخش ۵ شبیه‌سازی و در آخر نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفته است.

میدان مغناطیسی ناشی از دوقطبی مغناطیسی

همان‌طور که در [۷] اشاره شده برای تحلیل و بررسی اندازه میدان مغناطیسی حاصل از تجهیزات ماهواره در محل تجهیزات حساس باید هر یک از تجهیزات را مانند شکل ۴ با یک یا چندین دوقطبی مغناطیسی مدل کرد تا در نهایت با استفاده از دوقطبی‌های مغناطیسی مدل شده تجهیزات اندازه میدان مغناطیسی را در محل تجهیزات حساس محاسبه و مدل کرد، همچنین می‌توان یک مدل مغناطیسی از ماهواره یکپارچه به دست آورد. هر یک از این دوقطبی‌های مغناطیسی مدل شده شامل بردار ممان \vec{m}_i که در معادله ۱ نشان داده شده و بردار موقعیت (x_i, y_i, z_i) ، $i = 1, 2, \dots, N$ از مرکز تجهیز می‌باشد [۴].

$$\vec{m}_i = mx_i \cdot \hat{x} + my_i \cdot \hat{y} + mz_i \cdot \hat{z} \quad (۱)$$

میدان مغناطیسی B_x ، B_y و B_z حاصل از دوقطبی i هر تجهیز در محل تجهیزات حساس (x_j, y_j, z_j) ، $j=1, 2, \dots, M$ ، به صورت معادلات ۲ الی ۷ نشان داده شده است [۴]:

$$\vec{B}_{ij} = Bx_{ij} \cdot \hat{x} + By_{ij} \cdot \hat{y} + Bz_{ij} \cdot \hat{z} \quad (۲)$$

که

$$Bx_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3(x_j - x_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{mx_i}{\rho_{ij}^3} \quad (۳)$$

$$By_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3(y_j - y_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{my_i}{\rho_{ij}^3} \quad (۴)$$

$$Bz_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3(z_j - z_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{mz_i}{\rho_{ij}^3} \quad (۵)$$

که

$$L_{ij} = mx_i \cdot (x_j - x_i) + my_i \cdot (y_j - y_i) + \dots + mz_i \cdot (z_j - z_i) \quad (۶)$$

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (۷)$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلأ می‌باشد.

8. James Kennedy

9. Russell Eberhart

10. Particle or agent

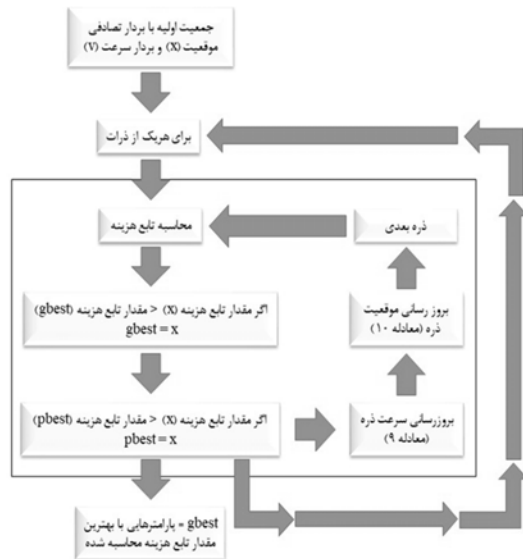
7. Particle Swarm Optimization

مقادیر مجهول مسئله و در موقعیتی از فضا که در آن قرار دارد محاسبه می‌کند، سپس با استفاده از ترکیب اطلاعاتی محل فعلی ذره $(x_{i,t})$ و بهترین محلی که قبلا در آن بوده $(x_{i-pbest,t})$ و همچنین بهترین محل ذره موجود در جمع (x_{gbest}) جهت را برای حرکت انتخاب می‌کند. سرعت هر ذره در هر تکرار با توجه به ۱- بهترین خاطره شخصی $(x_{i-pbest,t})$ و ۲- بهترین خاطره جمعی (x_{gbest}) محاسبه می‌شود. این مراحل همانند شکل ۵ چندین بار تکرار می‌شود تا تابع هدف به مقدار مطلوب برسد. معادلات و شکل هندسی توصیف کننده رفتار ذرات مطابق شکل ۶ بصورت زیر است:

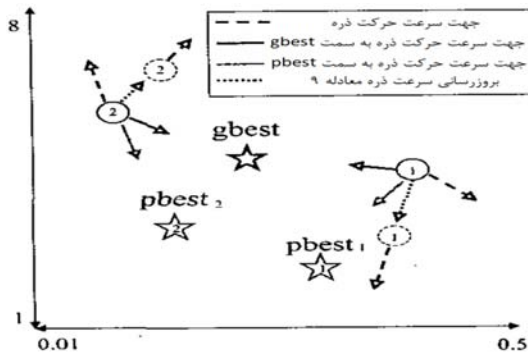
$$v_{i,t+1} = \omega v_{i,t} + c_1 r_1 (x_{i-pbest,t} - x_{i,t}) + \dots \quad (9)$$

$$C_2 r_2 (x_{gbest} - x_{i,t})$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t+1} \quad (10)$$



شکل ۵- مراحل انجام بهینه‌سازی الگوریتم PSO [۱۹]



شکل ۶- توصیف هندسی رفتار ذرات در الگوریتم PSO [۱۹]

اشتراک گذاشته می‌شود، در نهایت ذرات از مکان‌های تصادفی به سمت ۱- بهینه شخصی و ۲- بهینه سراسری شروع به حرکت می‌کنند.

۲- **موقعیت:** موقعیت به مکان ذره در فضای جستجو اشاره دارد که در اینجا توسط یک بردار (1×3) با D نشان داده شده است. عناصر D_i ، (I_i, J_i, K_i) و $i=1,2,\dots,N$ می‌باشد، که مقدار دوران یک تجهیز حول هریک از محورها را نشان می‌دهد. این فضای ۳ بعدی فضای حلی برای حل مشکل بهینه‌سازی است، که هریک از N بردار نشان دهنده یک راه حل برای حل مشکل است. همچنین مقادیر متغیرهایی که تابع هدف را بهینه می‌کنند، باید تعریف شود [۱۷، ۷، ۴].

۳- **تابع هزینه:** در PSO، یک تابع باید برای نشان دادن شایستگی و کیفیت موقعیت ذره تعریف شود. تابع هزینه تمام موقعیت دوقطبی‌ها را در فضای حل در بر می‌گیرد و ارزیابی می‌کند. در اینجا، تابع هزینه در معادله ۱۵ نشان داده شده است بدیهی است که باید تابع هزینه حداقل شود [۱۷، ۷، ۴].

۴- **بهترین خاطره شخصی (pbest):** موقعیت (D_i) هر ذره که با کمترین مقدار تابع هزینه‌اش که تاکنون مواجه می‌شود، به عنوان بهترین بهینه شخصی هر ذره شناخته می‌شود. در هر تکرار، ذره در فضای جستجو حرکت می‌کند، مقدار تابع هزینه مکان فعلی ذره با بهترین خاطره شخصی (pbest) مقایسه می‌شود، اگر مکان pbest ذره دارای مقدار تابع هزینه کمتری باشد، مکان فعلی آن با pbest جایگزین می‌شود [۱۷، ۷، ۴].

۵- **بهترین خاطره جمعی (gbest):** موقعیت (D_i) همه ذرات با کمترین مقدار تابع هزینه که تاکنون مواجه می‌شود، به عنوان بهترین بهینه سراسری شناخته می‌شود. در هر تکرار، ذرات در فضای جستجو حرکت می‌کنند، همچنین مقادیر تابع هزینه مکان فعلی ذرات با بهترین خاطره جمعی (gbest) مقایسه می‌شود، اگر مکان فعلی هر کدام از ذرات دارای مقدار تابع هزینه کمتری باشد، مکان فعلی آن جایگزین gbest می‌شود. بدیهی است، در هر تکرار فقط یک gbest وجود دارد [۱۷، ۷، ۴].

در الگوریتم PSO فرض بر این است که تعدادی از موجودات زنده وجود دارد، که آن‌ها را ذره می‌نامند و در فضای جستجو به صورت تصادفی پخش شده‌اند. هدف ذرات، یافتن مکان مطلوب در یک فضای جستجو معین است. هر ذره مقدار تابع هدف را با توجه به

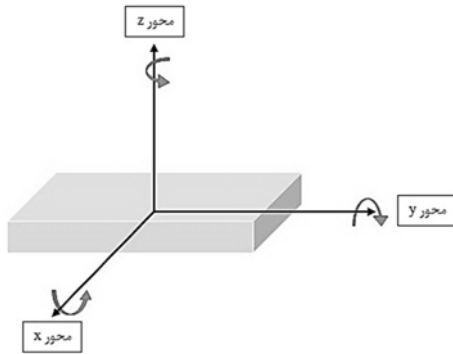
17. personal best
18. global best

11. Position
12. Cost function
13. Personal best (pbest)
14. Global best (gbest)
15. Search Space
16. Objective Function

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos K & \sin K & 0 \\ -\sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

$$\begin{bmatrix} M_{x_i} & X_i \\ M_{y_i} & Y_i \\ M_{z_i} & Z_i \end{bmatrix} = R_x \times R_y \times R_z \times \begin{bmatrix} m_{x_i} & x_i \\ m_{y_i} & y_i \\ m_{z_i} & z_i \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

در معادله ۱۱، R_x ماتریس دوران تجهیز حول محور X و I اندازه دوران تجهیز حول محور X است که 0 یا ۱۸۰ می‌باشد. در معادله ۱۲، R_y ماتریس دوران تجهیز حول محور Y و J اندازه دوران تجهیز حول محور Y است که 0 یا ۱۸۰ می‌باشد. در معادله ۱۳، R_z ماتریس دوران تجهیز حول محور Z و K اندازه دوران تجهیز حول محور Z است که 0 یا ۱۸۰ می‌باشد. در معادله ۱۴، (x_i, y_i, z_i) بردار موقعیت و $(m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i})$ بردار ممان دوقطبی مغناطیسی معادل هر تجهیز و (X_i, Y_i, Z_i) بردار موقعیت و $(M_{x_i}, M_{y_i}, M_{z_i})$ بردار ممان دوقطبی محاسبه شده حاصل از دوران هر تجهیز است.



شکل ۷- نمایش چرخاندن تجهیز جهت استفاده از تکنیک خود جبران

وجود حالت‌های مختلف نصب در محل جانمایی هر تجهیز و بررسی اندازه میدان مغناطیسی حاصل از تجهیزات در محل تجهیز حساس برای تک تک حالت‌ها بسیار زمان بر بوده و تا حدودی غیر ممکن است. بنابراین نیاز است از الگوریتمی استفاده شود که تمام حالت‌های موجود را مورد بررسی و نتایج را به اشتراک گذارد تا بتواند بهترین حالت برای نصب هر تجهیز در محل جانمایی خود را طوری محاسبه کند تا مجموع اندازه میدان مغناطیسی حاصل از تجهیزات در محل تجهیز حساس به کمترین مقدار ممکن برسد. در نتیجه برای حل این مشکل، الگوریتم PSO مطابق نمودار شکل ۸ مورد استفاده قرار گرفت. به این صورت که ذرات با مقادیر تصادفی (I, J, K) تجهیزات را حول محورهای X ، Y و Z به اندازه 0 یا ۱۸۰ درجه می‌چرخاندند و ممان $(M_{x_i}, M_{y_i}, M_{z_i})$ و موقعیت (X_i, Y_i, Z_i) جدید دوقطبی مغناطیسی حاصل از چرخش مطابق معادلات ۱۱ تا ۱۴ برای هر تجهیز محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از ممان و موقعیت جدید دوقطبی‌های مغناطیسی معادل همه تجهیزات اندازه میدان مغناطیسی در محل حسگر مغناطیسی توسط معادلات ۳ الی ۸

در معادله ۹، v سرعت ذره، ω ضریب اینرسی (ضریب سرعت تکرار قبلی) می‌باشد، غالباً کمتر از یک و بهترین حالت بین $۰/۴$ تا $۰/۹$ است، مقدار ضریب اینرسی اگر کمتر باشد سریع‌تر همگرا می‌شود و اگر بیشتر باشد دیرتر همگرا می‌شود. r_1 و r_2 هردو اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت $u(0,1)$ می‌باشند. c_1 ضریب تجربه شخصی و c_2 ضریب تجربه جمعی می‌باشد که معمولاً $c_1 \leq ۲$ و $c_2 \leq ۲$ است و در معادله ۱۰، x موقعیت ذره در فضای جستجو می‌باشد [۴، ۷، ۱۷]. مقادیر ضرایب ω ، c_1 و c_2 را می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی‌های مکرر تعیین کرد و یا از مقادیر محاسبه شده در [۱۸] استفاده کرد که در این مقاله بعد از شبیه‌سازی‌های مکرر با توجه سرعت همگرایی و مقادیر گفته شده در [۴] مقدار $c_1 = ۲$ ، $c_2 = ۲$ و $\omega = ۰/۵$ تعیین شد.

همان‌طور که الگوریتم PSO اجرا می‌شود ذرات شروع به اکتشاف در فضای جستجو می‌کنند، در هر تکرار بهترین خاطره شخصی و جمعی محاسبه و در نتیجه سرعت و موقعیت ذرات با استفاده از معادله ۹ و ۱۰ به روز می‌شود این تکرار تا زمانی ادامه می‌یابد تا نهایتاً همه ذرات به یک بهینه سراسری همگرا می‌شوند. [۴، ۷، ۱۷]

جانمایی بهینه تجهیزات ماهواره با PSO

همان‌طور که در بخش ۱ اشاره شد یکی از بهترین راه‌ها برای دستیابی به مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی استفاده از تکنیک جانمایی بهینه تجهیزات است. به این صورت که باید تجهیزات را متناسب با آزادی که در روند طراحی در اختیار طراح ماهواره قرار می‌گیرد طوری در بدنه ماهواره جانمایی کرد تا اندازه میدان مغناطیسی در محل تجهیزات حساس به کمترین مقدار ممکن برسد. در اینجا یک میکرو ماهواره مطابق جدول ۱ فرض شده که شامل ۲۳ تجهیز است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌کنید مرکز دستگاه مختصات در مرکز تجهیز و یا بدنه ماهواره در نظر گرفته شده است بنابراین مقادیر منفی موقعیت دوقطبی مغناطیسی تجهیزات و محل جانمایی تجهیزات به دلیل این است که در قسمت منفی هریک از محورهای دستگاه مختصات بدنه قرار گرفته شده است. در ماهواره مورد نظر تجهیزات امکان جابجایی از محل جانمایی خود را ندارند و فقط امکان چرخش حول محور X ، Y و Z تنها به اندازه 0 یا ۱۸۰ درجه را در محل جانمایی خود مطابق شکل ۷ دارند. در نهایت ممان $(M_{x_i}, M_{y_i}, M_{z_i})$ و موقعیت (X_i, Y_i, Z_i) جدید دوقطبی مغناطیسی حاصل از چرخش هر تجهیز مطابق معادلات ۱۱ تا ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos I & \sin I \\ 0 & -\sin I & \cos I \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos J & 0 & -\sin J \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin J & 0 & \cos J \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

محاسبه و مقدار تابع هزینه معادله ۱۵ به دست می‌آید. در این مقاله بهترین حالت کمترین اندازه میدان مغناطیسی حاصل از تجهیزات در محل حسگر مغناطیسی برای تمامی حالت‌های موجود در نظر گرفته شده‌است.

جدول ۱- محل جانمایی و دوقطبی مغناطیسی تجهیزات ماهواره

تجهیزات		محل جانمایی تجهیزات (cm)			دوقطبی مغناطیسی معادل تجهیزات					
					ممان (mAm^2)			موقعیت (cm)		
		x	y	z	m_x	m_y	m_z	x	y	z
Receivers	2RE1-01	۲۴	-۷	-۲۴	۳۲	۱۶۰	۰	-۱	۰	۰
	2RE1-02	۸	-۱۵	۳	۳۲	۱۶۰	۰	-۱	۰	۰
	2RE1-08	۱۵	-۱	۱۹	۳۲	۱۶۰	۰	-۱	۰	۰
IMUXs	2ME2-01	-۲	-۸	۹	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱	۰	-۱
	2ME1-01	-۳	۲۳	-۱۶	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱	۰	-۱
	2ME4-01	۱۷	۲۱	-۷	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱	۰	-۱
R-Switches	1SR14-01	-۲۱	-۲۳	-۲	-۹۳	۳۷	۰	-۱	۲	۰
	1SR12-01	-۱۹	۱۲	۲۳	-۹۳	۳۷	۰	-۱	۲	۰
	1SR12-02	-۱۷	-۱۲	-۱۸	-۹۳	۳۷	۰	-۱	۲	۰
SSPAs	2SA1-01	-۶	-۴	۱۸	۰	۲۰۰	۰	۱	-۱	۱
	2SA1-02	۱۷	۲	۷	۰	۲۰۰	۰	۱	-۱	۱
CAMPs	2CA1-01	۱۵	۲۳	-۶	۴۵	۰	۶۳	۰	۲	۰
	2CA1-02	-۲۲	-۴	-۱۶	۴۵	۰	۶۳	۰	۲	۰
	2CA1-21	-۵	۲۲	-۴	۴۵	۰	۶۳	۰	۲	۰
TWTs	2TW1-01	۱	-۱۰	-۱	۰	۰	۱۱۲۰	۲	-۱	۱
	2TW1-02	-۴	۱۰	-۱۹	۰	۰	۱۱۲۰	۲	-۱	۱
	1TW2-06	۸	۸	۵	۰	۰	۱۱۲۰	۲	-۱	۱
HPIs	2HP1-01	۷	۲	-۱۴	۰	-۵۶۰	۰	۰	۰	۰
	2HP1-02	-۱۱	۱۰	-۶	۰	-۵۶۰	۰	۰	۰	۰
	2HP1-19	-۳	۸	۴	۰	-۵۶۰	۰	۰	۰	۰
T-Switches	7ST1-01	-۲۰	-۱۶	-۱۳	۵۶	۱۵	-۴	۰	-۱	-۱
	7ST1-02	۱۴	-۱۹	-۱۱	۵۶	۱۵	-۴	۰	-۱	-۱
	7ST1-65	-۱۷	۲۲	۶	۵۶	۱۵	-۴	۰	-۱	-۱

همان‌طور که در بخش ۳ اشاره شد الگوریتم PSO ذاتاً پیوسته و مسئله موجود یک مسئله گسسته است. بنابراین باید تمهیداتی در نظر گرفت تا از این الگوریتم برای حل مشکل موجود استفاده کرد. برای این کار محدوده پایین و بالای فضای جستجو (D_i) را $[0, 2]$ در نظر گرفته و متغیرهای J و K توسط معادله ۱۶ در موقعیت D_i هر ذره محاسبه می‌شود.

$$[I_i \quad J_i \quad K_i] = \min([D_i], 1) \times 180 \quad (16)$$

همان‌طور که در معادله ۱۶ مشاهده می‌کنید احتمال ۰ یا ۱ شدن مقدار $[D_i]$ به یک اندازه می‌باشد به غیر از زمانی که مقدار $[D_i]$ برابر ۲ شود که در این صورت با استفاده از بخش $(\min([D_i], 1))$ در معادله ۱۶ حاصل برابر ۱ خواهد شد.

شبیه‌سازی

در این بخش یک میکرو ماهواره با بدنه‌ای به ابعاد $50 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر که شامل ۲۳ تجهیز و یک حسگر مغناطیسی در داخل بدنه ماهواره در موقعیت $(4, -10, 12)$ سانتی‌متر فرض شده‌است.

$$F = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} \quad (15)$$

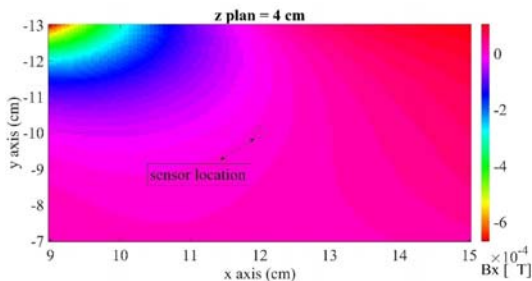


شکل ۸- نمودار کاربرد PSO در روش خود جبران

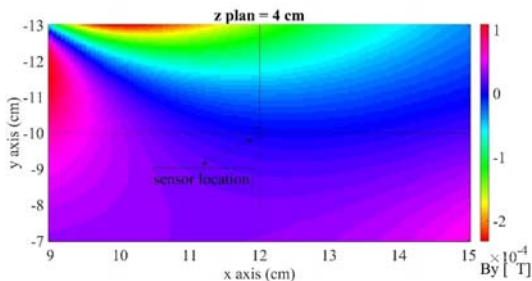
جدول ۲- مجموع اندازه میدان مغناطیسی تجهیزات در محل حسگر مغناطیسی

اندازه میدان مغناطیسی (nT)		
b_x	b_y	b_z
۲۱۹۵۷۱/۲	۴۵۴۵۱/۶	-۵۶۷۴۴/۹

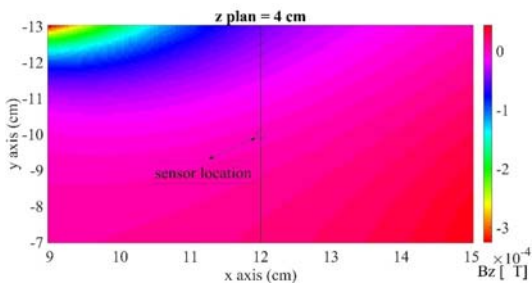
بعد از شبیه‌سازی‌های مکرر با استفاده از نرم افزار متلب بهترین حالت نصب هر تجهیز در محل جانمایی خود همانطور که در بخش ۴ اشاره شد محاسبه شد. ممان و موقعیت جدید دوقطبی مغناطیسی محاسبه شده برای هر تجهیز در جدول ۳ نشان داده شده است. اندازه میدان مغناطیسی حاصل از ممان و موقعیت دوقطبی مغناطیسی تجهیزات مطابق جدول ۱ و پس از دوران مطابق جدول ۳ در محل حسگر مغناطیسی محاسبه و در جدول ۴ و شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ نشان داده شده است. اندازه میدان مغناطیسی در محل جانمایی حسگر مغناطیسی نسبت به حالت اولیه جانمایی تجهیزات کاهش بسیار زیادی تقریباً به اندازه $\frac{1}{160000}$ در محور x، $\frac{1}{33000}$ در محور y و $\frac{1}{33000}$ در محور z داشته و مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی تعریف شده برای ماهواره (کمتر از ۲۰ نانوتسلا) تأمین شده است.



شکل ۹- اندازه Bx در صفحه z = ۴ cm بعد از جبران

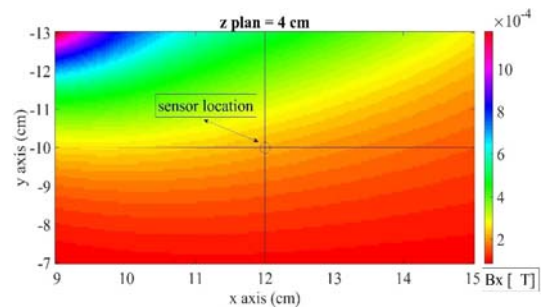


شکل ۱۰- اندازه By در صفحه z = ۴ cm بعد از جبران

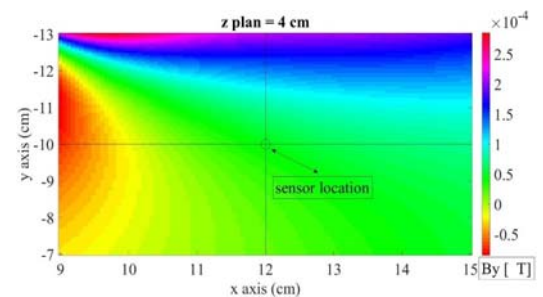


شکل ۱۱- اندازه Bz در صفحه z = ۴ cm بعد از جبران

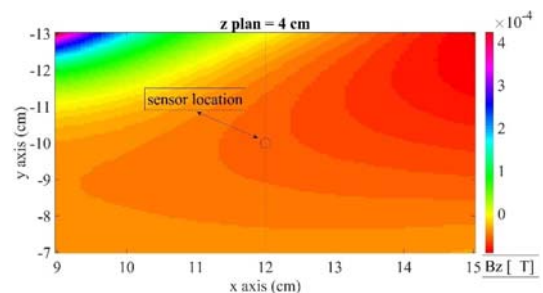
مشخصه پاکیزگی مغناطیسی تعریف شده برای این ماهواره رساندن میدان مغناطیسی حاصل از تجهیزات در محل حسگر مغناطیسی به کمتر از ۲۰ نانوتسلا تعریف شده است. جدول ۱ محل جانمایی و دوقطبی مغناطیسی معادل هر تجهیز را نشان می‌دهد. با فرض اینکه سیستم مختصات هریک از تجهیزات هم راستا با سیستم مختصات بدنه ماهواره در محل جانمایی خود نصب شده باشد، اندازه میدان مغناطیسی حاصل از این ۲۳ تجهیز در محل جانمایی حسگر مغناطیسی همان‌طور که در جدول ۲ و شکل‌های ۹ الی ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید اندازه میدان مغناطیسی در محل حسگر مغناطیسی بسیار زیادتر از مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی تعریف شده برای ماهواره می‌باشد و باید این مقدار به کمتر از مشخصه‌های تعریف شده برای ماهواره کاهش پیدا کند. در این راستا راهکار ارائه شده برای کاهش میدان مغناطیسی در محل حسگر مغناطیسی جانمایی بهینه تجهیزات می‌باشد.



شکل ۱۲- اندازه Bx در صفحه z = ۴ cm قبل از جبران



شکل ۱۳- اندازه By در صفحه z = ۴ cm قبل از جبران



شکل ۱۴- اندازه Bz در صفحه z = ۴ cm قبل از جبران

جدول ۳- مقدار ممان و موقعیت دوقطبی مغناطیسی حاصل از دوران

تجهیزات	مقدار دوران تجهیز حول محور (درجه)	دوقطبی مغناطیسی معادل تجهیزات								
		ممان (mAm^2)			موقعیت (cm)					
		x	y	z	α_x	α_y	α_z	β_x	β_y	β_z
Receivers	2RE1-01	۰	۱۸۰	۱۸۰	۳۲	-۱۶۰	۰	-۱	۰	۰
	2RE1-02	۰	۱۸۰	۱۸۰	۳۲	-۱۶۰	۰	-۱	۰	۰
	2RE1-08	۰	۱۸۰	۰	-۳۲	۱۶۰	۰	۱	۰	۰
IMUXs	2ME2-01	۰	۱۸۰	۰	-۲۰۰	۲۰۰	-۲۰۰	-۱	۰	۱
	2ME1-01	۱۸۰	۰	۱۸۰	-۲۰۰	۲۰۰	-۲۰۰	-۱	۰	۱
	2ME4-01	۱۸۰	۰	۰	۲۰۰	-۲۰۰	-۲۰۰	۱	۰	۱
R-Switches	1SR14-01	۱۸۰	۱۸۰	۰	۹۳	-۳۷	۰	۱	-۲	۰
	1SR12-01	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	-۹۳	۳۷	۰	-۱	۲	۰
	1SR12-02	۱۸۰	۰	۱۸۰	۹۳	۳۷	۰	۱	۲	۰
SSPAs	2SA1-01	۱۸۰	۰	۰	۰	-۲۰۰	۰	۱	۱	-۱
	2SA1-02	۰	۱۸۰	۰	۰	۲۰۰	۰	-۱	-۱	-۱
CAMPs	2CA1-01	۰	۱۸۰	۰	-۴۵	۰	-۶۳	۰	۲	۰
	2CA1-02	۱۸۰	۰	۱۸۰	-۴۵	۰	-۶۳	۰	۲	۰
	2CA1-21	۰	۱۸۰	۱۸۰	۴۵	۰	-۶۳	۰	-۲	۰
TWTs	2TW1-01	۰	۰	۱۸۰	۰	۰	۱۱۲۰	-۲	۱	۱
	2TW1-02	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۲۰	۲	-۱	۱
	1TW2-06	۰	۱۸۰	۱۸۰	۰	۰	-۱۱۲۰	۲	۱	-۱
HPIs	2HP1-01	۰	۱۸۰	۰	۰	-۵۶۰	۰	۰	۰	۰
	2HP1-02	۱۸۰	۰	۱۸۰	۰	-۵۶۰	۰	۰	۰	۰
	2HP1-19	۰	۰	۰	۰	-۵۶۰	۰	۰	۰	۰
T- Switches	7ST1-01	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۵۶	۱۵	-۴	۰	-۱	-۱
	7ST1-02	۰	۱۸۰	۰	-۵۶	۱۵	۴	۰	-۱	۱
	7ST1-65	۱۸۰	۰	۰	۵۶	-۱۵	۴	۰	۱	۱

کار کمک زیادی برای استفاده حداقلی از مگنت جبران کننده و یا محافظ مغناطیسی در روند طراحی و رسیدن به مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی تعریف شده برای ماهواره خواهد کرد. همچنین امکان نصب حسگر مغناطیسی در داخل بدنه ماهواره فراهم شده و باعث حذف بوم حسگر مغناطیسی می‌شود. به دلیل وجود کنترل حرارتی در داخل بدنه ماهواره در صورت نصب حسگر مغناطیسی در داخل بدنه ماهواره دیگر نیازی به کالیبراسیون با رنج گسترده حرارتی نیست و باعث می‌شود کالیبراسیون حسگر مغناطیسی بطور دقیق انجام شده و داده‌های خروجی حسگر قابل اعتمادتر باشد. همچنین حذف بوم حسگر مغناطیسی باعث ساده‌تر شدن مدل دینامیکی ماهواره خواهد شد. نهایتاً استفاده از جانمایی بهینه تجهیزات تا حد زیادی بدون نیاز به صرف هزینه و زمان برای رسیدن به مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی یک ماهواره کمک بسیار زیادی خواهد کرد.

همچنین شایان ذکر است که برخی از تجهیزات ماهواره به دلیل شرایط ورودی و خروجی مشخص که دارند امکان جابجایی در محل نصب خود ندارند که برای حل این مشکل نیاز به استفاده از جبران کننده فعال یا غیرفعال است که در تحقیقات آتی می‌تواند مدنظر قرار گیرد.

جدول ۴- اندازه میدان مغناطیسی حاصل از جانمایی بهینه تجهیزات در محل حسگر مغناطیسی

	b_x (nT)	b_y (nT)	b_z (nT)
اندازه میدان مغناطیسی در محل حسگر مغناطیسی	۱۳/۵	-۱۱/۸	-۱۶/۲
میزان کاهش میدان مغناطیسی در محل حسگر مغناطیسی	۲۱۹۵۵۷/۷	۴۵۴۶۳/۴	-۵۶۷۲۸/۷

نتیجه‌گیری

همان‌طور که از نتایج حاصل مشخص است، اندازه میدان مغناطیسی در محل حسگر مغناطیسی با استفاده از جانمایی بهینه تجهیزات با استفاده از الگوریتم PSO متناسب با آزادی که در روند طراحی ماهواره داشتند کاهش ۱۵۰۰۰ برابری در محور x (از ۲۱۹۵۵۷/۷ نانوتسلا به ۱۳/۵ نانوتسلا)، کاهش ۳۸۰۰ برابری در محور y (از ۴۵۴۶۳/۴ نانوتسلا به ۱۱/۸ نانوتسلا) و کاهش ۳۵۰۰ برابری در محور z (از ۵۶۷۲۸/۷ نانوتسلا به ۱۶/۲ نانوتسلا) نسبت به حالت نصب اولیه تجهیزات داشته و تا حد زیادی به مشخصه‌های پاکیزگی مغناطیسی تعریف شده برای ماهواره مورد نظر نزدیک شده‌است. علاوه بر این به دلیل وجود محدودیت جرمی میکروماهواره‌ها این

مراجع

- [11] MIL-STD-2142A Department Of Defense Test Method Standard: Magnetic Silencing Characteristics, Measurement of (06 AUG 1990) [Superseding Dod-Std-2142]
- [12] MIL-STD-45662A, Military Standard: Calibration System Requirements (01 AUG 1988) [S/S BY ISO-10012-1 & ANSI-Z540-1].
- [13] Acuña, Mario H. "The Design, Construction and Test of Magnetically Clean Spacecraft—A Practical Guide." *NASA/GSFC internal report* (2004).
- [14] Junge, Axel, and Filippo Marliani. "Prediction of DC magnetic fields for magnetic cleanliness on spacecraft." *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2011 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2011.
- [15] Matsushima, M. and et al. "Magnetic cleanliness program under control of electromagnetic compatibility for the SELENE (Kaguya) spacecraft." *Space science reviews* vol. 154. no.1 2010, pp.253-264.
- [16] Stern, Th.G. and S. DeLapp., "Techniques for magnetic cleanliness on spacecraft solar arrays." *2nd International Energy Conversion Engineering Conference*. 2004.
- [17] Kennedy, J. and R. Eberhart. "Particle swarm optimization (PSO)." *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*. 1995.
- [18] Clerc, Maurice, and James Kennedy. "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space." *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, 2002, pp. 58-73.
- [19] Rahmat-Samii, Yahya. "Genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) in engineering electromagnetics." *17th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, 2003. ICECom 2003.*. IEEE, 2003.
- [1] Zhang, Zh., Xi. Jianping, and J.Jin, "On-orbit real-time magnetometer bias determination for micro-satellites without attitude information." *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 28, no. 5 2015, pp. 1503-1509.
- [2] Mehlem, K. "Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites." *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 14, no. 5, 1978, pp. 1064-1071.
- [3] Mehlem, K., and A. Wiegand. "Magnetostatic cleanliness of spacecraft." *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, 2010.
- [4] Kapsalis, N.C., Sarantis-Dimitrios J. Kakarakis, and Christos N. Capsalis. "Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms." *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 34, 2012, pp. 111-122.
- [5] Dumond, O., and R. Berge. "Determination of the magnetic moment with spherical measurements and spherical harmonics modelling." *2012 ESA Workshop on Aerospace EMC*. IEEE, 2012.
- [6] Fasano, G. and J. Pinter, *Modeling and optimization in space engineering*. New York, Springer, 2013.
- [7] Carrubba, E. and et al. "Particle swarm optimization for multiple dipole modeling of space equipment." *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 12, 2014, pp. 1-10.
- [8] ECSS-E-HB-20-07A -Electromagnetic compatibility handbook (5 September 2021)
- [9] (ECSS-E-ST-20-07C_REV-1_07FEB2012, ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands, 7 February 2012.
- [10] West, W. S., J. M. Holman and H. Bilsky. "Techniques for achieving magnetic cleanliness on deep-space missions." NASA TR R-373, Report, 1971.