

Mitigación del “Radio Blackout” durante la Reentrada de Naves Espaciales

David García-Sánchez⁽¹⁾, Diana Luis⁽²⁾, Adriano Camps^(1,3,4)

david.garcia.s@estudiantat.upc.edu, diana.luis@vki.ac.be, adriano.jose.camps@upc.edu.

⁽¹⁾ CommSensLab-UPC, Dpt. de Teoria del Senyal i Comunicacions, Universitat Politècnica de Catalunya. UPC Campus Nord, edifici D4, 08034 Barcelona, España

⁽²⁾ Von Karman Institute, 72, Chaussée de Waterloo, 1640 Rhode-St-Genèse, Belgium

⁽³⁾ Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), C/Esteve Terradas, 1, Edifici RDIT, Campus PMT-UPC, 08860 Castelldefels (Barcelona), Spain.

⁽⁴⁾ ASPIRE Visiting International Professor, UAE University CoE, PO Box 15551, Al Ain, United Arab Emirates

Abstract- The “radio blackout” phenomenon is the communications loss between a spacecraft and the Earth during the re-entry in the atmosphere. The intense heating of the air around the spacecraft ionizes it creating a plasma layer that prevents the propagation of electromagnetic waves. Several techniques have been proposed to mitigate this phenomenon, such as the use of higher frequencies, the aerodynamic shape of the reentry capsule, the cooling of the thermal shield itself, or the creation of an intense magnetic field. However, none of them is completely effective. This paper describes the underlying Physics, presents the simulation results of the plasma properties around an ARD-like reentry capsule in terms of electron density, temperature, and pressure, and the attenuation in [dB/m] at three different heights. It is shown that the presence of an intense magnetic field significantly reduces the cut-off frequency and the attenuation above it favoring the propagation of radio waves.

I. INTRODUCCIÓN

El “radio blackout” es la pérdida de comunicaciones entre una nave espacial y la Tierra durante la reentrada de la nave en la atmósfera. Al viajar a velocidades hipersónicas se genera un gran calentamiento aerodinámico, que ioniza el aire alrededor de la nave, lo que produce una capa de plasma que impide la propagación de las ondas electromagnéticas en las bandas de frecuencia que se utilizan comúnmente para las comunicaciones espaciales [1], [2]. La Fig. 1 muestra un fotograma de la reentrada del Starship el 14 de marzo de 2024, dónde se aprecia la formación del plasma.



Fig. 1. Reentrada del Starship el 14 de Marzo de 2024 dónde se aprecia la formación del plasma. El “radio blackout” comienza a 75 km de altura, cuando reentra a una velocidad de 26623 km/h [https://www.youtube.com/watch?v=JX1LTw48ymQ].

Este fenómeno de interrupción de las comunicaciones puede durar desde unos pocos segundos hasta varios minutos y se produce en altitudes típicamente entre 30 y 80 km, dependiendo de la velocidad de la nave espacial, la forma y el ángulo de reentrada, la temperatura y la presión del aire y la frecuencia utilizada para la comunicación. entre otros factores [2], [3], [4]. La Fig. 2 muestra la potencia de señal transmitida a la Tierra por la nave RAM-C durante una prueba de NASA [4]. Como se puede observar, por encima de 25 km, la intensidad de la señal es mucho menor (~40 dB) de la esperada. Este fenómeno es el que se conoce como “radio blackout.” También se observa cómo, por debajo de los 25 km de altitud, la señal comienza a recuperarse debido a la desaceleración de la nave y la consiguiente disminución de la fricción del aire, aunque la señal exhibe grandes fluctuaciones de intensidad.

Esta pérdida de comunicación es crítica porque coincide parcial o totalmente con la fase de maniobra de la reentrada, por lo que si ocurriera alguna situación inesperada y se tuviera que recalcular la trayectoria, lo debería realizar la propia nave, ya que no se podrían transmitir datos a/desde la Tierra. Asimismo, si se produjera algún accidente que provocara la destrucción de una nave, no se dispondría de la telemetría que permitiera determinar las causas del mismo.

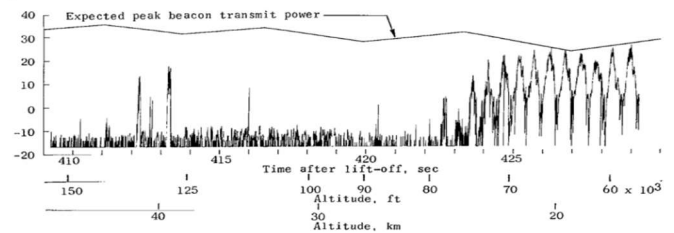


Fig. 2. Potencia transmitida por la misión RAM-C [dBW] [4].

La Fig. 3 muestra el inicio y final del “radio blackout” para tres naves espaciales: el Space Shuttle y el RAM-C de NASA, y el ARD (Atmospheric Reentry Demonstrator) de la ESA [5]. Si bien el ARD tiene un comportamiento similar al del Space Shuttle, al ser más pequeño y tener su parte inferior más redondeada, tiene un “radio blackout” más corto. El RAM-C es más redondeado y delgado en su punta, lo que le permite mantener altas velocidades durante el reingreso, lo que conduce a un “radio blackout” más corto, aunque su capacidad de almacenamiento es mucho más limitada.

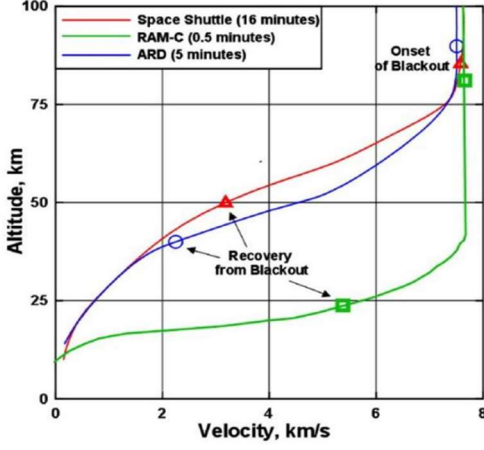


Fig. 3. Trayectoria de reentrada y rango de "radio blackout" para el Space Shuttle, RAM-C y el ARD [5].

Aunque el fenómeno del "radio blackout" se conoce desde el inicio de la exploración espacial, aún no se han desarrollado mecanismos para mitigarlo de manera efectiva. En los últimos años ha resurgido el interés por las misiones espaciales tripuladas, en concreto aquellas que llevarían humanos a la Luna o a Marte. En este último, a pesar de su tenue atmósfera, también se produce este fenómeno.

II. METODOLOGÍA

A. Propagación Electromagnética en Medios Ionizados

La capa de plasma generada alrededor de la nave viene caracterizada por la concentración de iones, electrones, la temperatura, o la presión. Sin embargo, la densidad electrónica es la característica más importante a tener en cuenta a la hora de estudiar el comportamiento de la propagación de ondas electromagnéticas a través del plasma. La densidad de electrones oscila entre 10^{15} y 10^{23} m^{-3} [3]. En el plasma cada partícula tiene una posición tal, que la fuerza total resultante de todas las partículas es cero, produciendo así un estado uniforme con una carga neta de cero. Sin embargo, el movimiento de un electrón respecto su posición de equilibrio produce una carga neta positiva que ejerce una atracción electrostática sobre el mismo, lo que hace que éste oscile alrededor de su posición de equilibrio. Como la interacción entre los electrones es intensa, todos oscilan a una frecuencia característica que depende de la naturaleza del plasma en particular. Esta frecuencia se llama frecuencia de plasma (f_p [Hz]) o de Langmuir [1], [2], [3] y viene dada por:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q_e^2 \cdot N_e}{m_e \cdot \epsilon_0}}, \quad (1)$$

dónde q_e es la carga del electrón [C], N_e es la densidad de electrones [m^{-3}], m_e es la masa del electrón [kg], y $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ [F/m] es la constante dieléctrica del vacío. La frecuencia del plasma para los iones se puede determinar de manera similar, pero como los iones son mucho más masivos que los electrones, su frecuencia de plasma es mucho menor, y puede ignorarse.

Por otra parte, cuando una onda electromagnética incide sobre un plasma, los electrones libres del plasma se aceleran a lo largo del campo eléctrico de la onda, provocando colisiones entre electrones y moléculas neutras, y la onda

electromagnética se atenúa [1]. La frecuencia de las colisiones (f_c [Hz]) viene determinada por [6]:

$$f_c = 2.91 \cdot 10^{-12} \cdot N_e \cdot \ln \Lambda \cdot T^{-3/2}, \quad (2)$$

dónde $\ln \Lambda$ es el logaritmo de Coulomb, cuyo valor oscila típicamente entre 10 y 20 [6], y T es la temperatura del plasma en [eV] (1 eV = 11604.525 K).

Por debajo de la frecuencia del plasma las ondas electromagnéticas son reflejadas. Por encima de la frecuencia de plasma la frecuencia de colisión puede expresarse como [1], [7]:

$$f_c = 5.82 \cdot 10^{12} \cdot \frac{p}{\sqrt{T}}, \quad (3)$$

dónde p [atm] y T [K] son la presión y la temperatura del plasma, y las ondas electromagnéticas se pueden propagar a través del plasma, aunque con una atenuación que decrece con la frecuencia. Esta atenuación puede calcularse a partir de la ecuación de Appleton-Hartree [8]:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{\frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta}{1 - X - j} \pm Y \sqrt{\frac{Y^2 \sin^4 \theta}{4(1 - X - jZ)^2 + \cos^2 \theta}}}, \quad (4)$$

dónde $X = (f_p/f)^2$, $Y = f_b/f$, $Z = f_c/f$, f es la frecuencia de la onda de electromagnética, f_b es la frecuencia ciclotrón de los electrones [1, 2]:

$$f_b = \frac{q_e B}{2\pi m_e}, \quad (5)$$

es decir, la frecuencia del movimiento circular de una partícula cargada que se mueve perpendicular a la dirección de un campo magnético uniforme B [T], y θ es el ángulo entre el vector del campo magnético y el vector de onda incidente. Según la orientación del campo eléctrico con respecto al campo magnético (paralelo o perpendicular), existen dos constantes de propagación separadas (modos ordinario y extraordinario, signos \pm en el denominador de la ec. 4). Al entrar en el plasma la onda se dividirá en dos caminos con diferentes constantes de propagación, diferente polarización, diferentes amplitudes, cambios de fase y retardos, y cuando ambos modos salgan del plasma se recombinarán en una única onda, pudiendo interferir constructiva o destructivamente.

A partir del índice de refracción (ec. 4) se puede calcular el número de onda (k) de la onda electromagnética incidente en el plasma, así como la constante de propagación de fase β [rad/m], y la atenuación α [Nep/m]:

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \cdot n \triangleq \beta - j \alpha, \quad (6)$$

dónde $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular [rad/s], y $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] es la permeabilidad magnética del vacío.

B. Mitigación del "Radio Blackout"

Las principales técnicas de mitigación del "radio blackout" que se han investigado hasta la fecha son: el uso de frecuencias más altas, la creación de un campo magnético alrededor de la antena [9, 10, 11], la inyección de refrigerantes en el plasma, o la modificación de la forma aerodinámica de la nave, aunque ésta va ligada a su capacidad de carga. Sin embargo, no se

conoce ninguna técnica de mitigación que sea completamente eficaz.

En este estudio se presentan los resultados de la mitigación usando campos magnéticos intensos en el frontal de la cápsula de reentrada. Para ello se ha modificado un propagador ionosférico (“ray tracer”) [12] desarrollado por los autores para la ESA en el marco del proyecto SIMIONO [ESA Contract Number 4000132762/20/NL/AS/hh] [13]. Las principales modificaciones introducidas han sido:

- cambio de la geometría: de la esfera terrestre a una esfera tangente a la cápsula (coordenada (0,0), ver fig. 4), donde se ha supuesto que estará la antena de comunicaciones. Nota: en realidad, en la actualidad la antena de comunicaciones se coloca en la parte posterior, donde la concentración de electrones es menor, y la comunicación con tierra se realiza a través de un satélite repetidor.
- cambio del modelo de campo magnético terrestre [14] por el de un dipolo magnético de intensidad 0, 0.5 ó 1 T en la superficie de la cápsula de reentrada (coordenada (0,0), ver fig. 4). Nota: este campo magnético es muy superior al terrestre y por tanto campo magnético terrestre puede despreciarse frente al del imán. Los valores de campo magnético son los utilizados experimentalmente en el proyecto H2020 MEESST (grant agreement No 899298).
- cambio del modelo de concentración de electrones en la ionosfera [15], y concentración, presión y temperatura de los gases en la atmósfera [16] por los resultados calculados alrededor de la cápsula durante la reentrada con un software propietario del VKI (ver fig. 4).

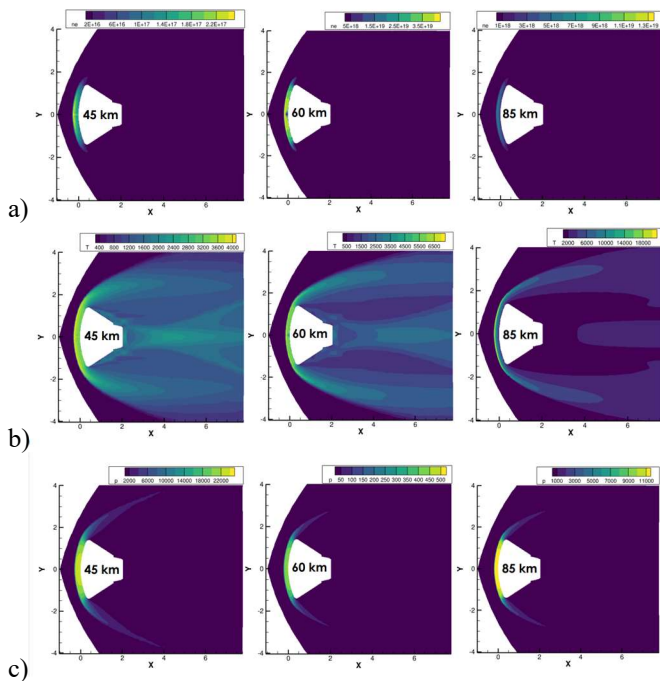


Fig. 4. a) Densidad de electrones, b) temperatura, y c) presión alrededor de una cápsula ARD durante la reentrada a tres alturas: 85, 60 y 45 km.

III. RESULTADOS

La fig. 5 muestra los resultados obtenidos entre 1 y 100 GHz en pasos de 100 MHz, a tres alturas 85, 60 y 45 km, con tres intensidades de campo magnético $B = 0, 0.5$ y 1 T, y tres valores del parámetro $\alpha = f_c/f_p$, $0.5, 0.05$ y 0.005 . El parámetro α que produce el comportamiento más similar a las

simulaciones del “ray tracer” [12], [13] es $\alpha = 0.05$ (línea discontinua).

A 60 km de altura el plasma tiene la mayor densidad de electrones, por lo que la frecuencia de corte y la atenuación son mayores que a 45 km. Asimismo, se puede observar que la presencia de un campo magnético produce una disminución de la frecuencia de corte y una reducción en la atenuación de la onda electromagnética, especialmente cerca de la frecuencia de corte. Finalmente, la fig. 6 muestra el semi-ángulo en el vértice del cono que determina las ondas que pueden atravesar el plasma a una frecuencia dada. Como se puede observar, éste no depende del campo magnético, aunque sí de la altura, es decir, de la concentración de electrones.

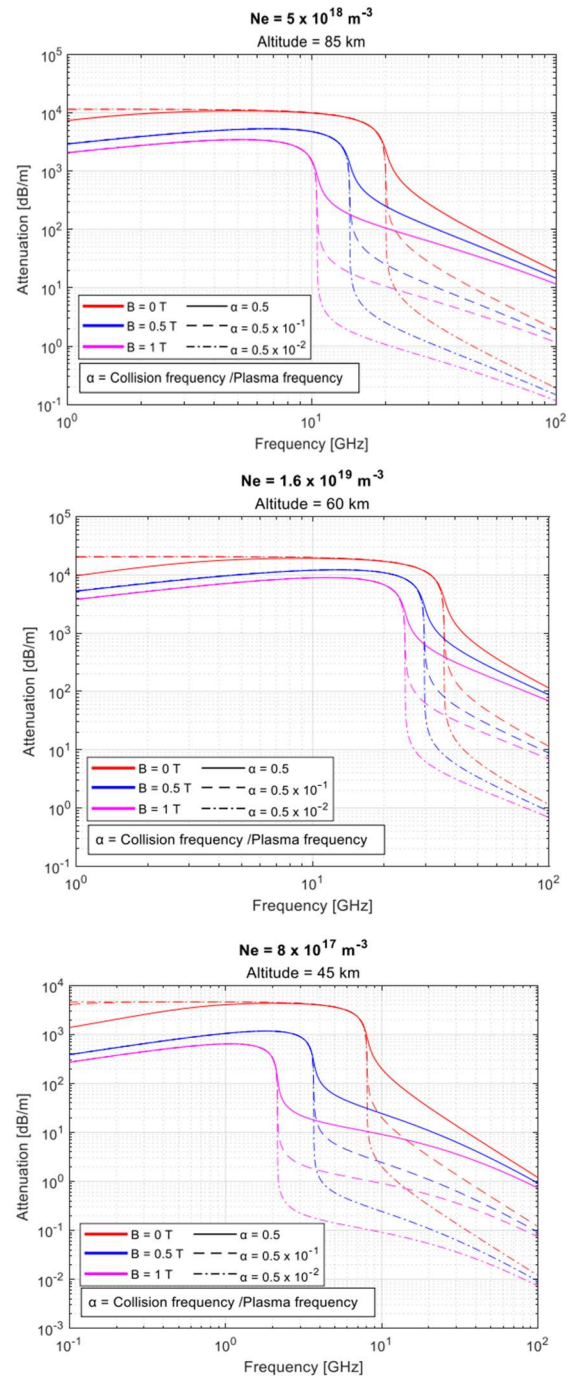


Fig. 5. Atenuación durante la reentrada en función de la frecuencia para intensidades de campo magnético 0, 0.5 y 1 T, y tres valores de $\alpha = f_c/f_p = 0.5, 0.05$ y 0.005 , y para alturas: 85, 60 y 45 km.

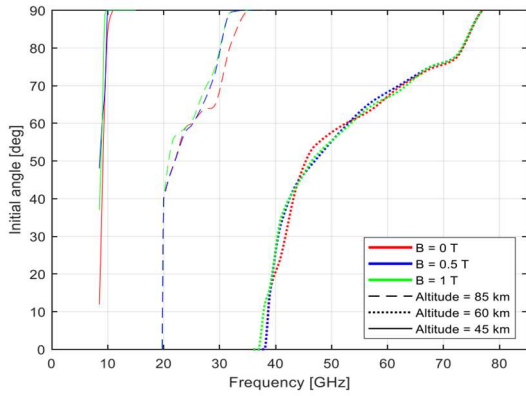


Fig. 6. Semi-ángulo en el vértice del cono de transmisión.

IV. DISCUSIÓN

Como se ha podido observar, en ausencia de campo magnético, las frecuencias de corte para tener propagación de las ondas electromagnéticas son sensiblemente superiores a las que se obtienen cuando se aplica un campo magnético intenso: $f_{\text{blackout}, 85 \text{ km}} \approx 20 \text{ GHz}$, $f_{\text{blackout}, 60 \text{ km}} \approx 36 \text{ GHz}$, y $f_{\text{blackout}, 45 \text{ km}} \approx 8.5 \text{ GHz}$, frente a $f_{\text{blackout}, 85 \text{ km}} \approx 10 \text{ GHz}$, $f_{\text{blackout}, 60 \text{ km}} \approx 26 \text{ GHz}$, y $f_{\text{blackout}, 45 \text{ km}} \approx 2 \text{ GHz}$. Asimismo, no todo el frente de onda radiado por una antena en una cápsula de reentrada es capaz de atravesar el plasma, ya que para un ángulo dado respecto del boresight la frecuencia ha de ser mayor, cuanto mayor es la densidad de electrones.

A la hora de presentar esta versión revisada de este trabajo se ha tenido conocimiento del trabajo, realizado también en el marco del mismo proyecto MEEEST y que se publicará en Junio 2024 [11]. Las principales diferencias radican en la frecuencia utilizada (71 GHz) la cuál es muy superior a las utilizadas experimentalmente en [2], la disposición de la antena (similar a la del experimento en [2], o extrapolando al caso de la nave espacial que reentra en nuestro caso), y la intensidad del campo magnético. A pesar de que la metodología es similar, los resultados no son directamente comparables, ya que en nuestro trabajo se exploran otras configuraciones y se intenta cuantificar la reducción de la frecuencia de corte con aplicación a las comunicaciones durante la reentrada.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado algunos resultados sobre la mitigación mediante campos magnéticos del fenómeno del “radio blackout” que ocurre durante la reentrada de cápsulas espaciales en la atmósfera planetaria. Se ha demostrado que para campos magnéticos de $\sim 1 \text{ T}$ en la posición de la antena radiante, la frecuencia de corte se reduce entre un factor 1.4 y 4, de 36 a 26 GHz a 60 km, y de 8.5 a 2 GHz a 45 km, reduciendo significativamente la duración del “radio blackout,” aunque el semi-ángulo en el vértice del cono de transmisión casi no se ve afectado.

Futuros estudios incluirán el cálculo de la distribución de la densidad de electrones, presión y temperatura del plasma bajo la presencia del propio campo magnético (ahora se ha supuesto que éste no perturba la concentración de electrones), así como la evolución temporal de dicha distribución que puede dar lugar a centelleo o fluctuaciones de intensidad y fase, también de gran importancia en las comunicaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el proyecto “GENESIS: GNSS Environmental and Societal Missions-Subproject UPC”, PID2021-126436OB-C21, del MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y EU FEDER “Otra manera de hacer Europa,” y por el proyecto MEEEST de la Unión Europea Horizon 2020 grant agreement No 899298. Diana Luís ha sido financiada con una beca doctoral (2021.04930.BD) de la Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT Portugal). Los autores agradecen a Vincent Giangaspero la realización de las simulaciones numéricas de la cápsula ARD.

REFERENCIAS

- [1] N. Mehra, Rajesh K. Singh, and Subhash C. Bera “Mitigation of communication blackout during Re-entry using Static Magnetic Field”, Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 63, 161–172, 2015
- [2] D. Luís, V. Giangaspero, A. Viladegut, A. Camps, O. Chazot “Effect of electron number densities on the radio signal propagation in an inductively coupled plasma facility”, Acta Astronautica, Volume 212, November 2023, Pages 408-423
- [3] Eric D. Gillman, John E. Foster and Isaiah M. Blankson “Review of Leading Approaches for Mitigating Hypersonic Vehicle Communications Blackout and a Method of Ceramic Particulate Injection Via Cathode Spot Arcs for Blackout Mitigation”, NASA, February 2010
- [4] N. D. Akey, A. E. Gross, “Radio blackout alleviation and plasma diagnostic results from a 25000 foot per second blunt-body reentry”, NASA Technical Note, February 1970
- [5] R. Savino, M. Diego, and M. D’Elia, “Plasma-radiofrequency interactions around atmospheric re-entry vehicles: modelling and arc-jet simulation”. The Open Aerospace Engineering Journal. 3. 76-85, 2010 doi: 10.2174/1874146001003010076.
- [6] A.S. Richardsdon, 2019 NRL PLASMA FORMULARY, https://www.nrl.navy.mil/Portals/38/PDF%20Files/NRL_Formulary_2019.pdf?ver=p9F4Uq9wAtB0MPBwKYL9lw%3d%3d
- [7] Sidi A. Bendoukha, K. Okuyama, and B. Szasz, “A study of radio frequency blackout for space probe during atmospheric reentry phase.” International Journal of Research - Granthaalayah, 5(3), 1-15, 2015. <https://doi.org/10.5281/zenodo.439549>.
- [8] Appleton-Hartree equation, Wikipedia, 19 August 2020 Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Appleton%E2%80%93Hartree_equation
- [9] Hui Zhou, Xiaoping Li, Kai Xie, Yanming Liu, Yuan Yuan Yu; Mitigating reentry radio blackout by using a traveling magnetic field. *AIP Advances* 1 October 2017; 7 (10): 105314. <https://doi.org/10.1063/1.4999039>
- [10] Shaoshuai GUO *et al* 2020 *Plasma Sci. Technol.* **22** 125301 DOI 10.1088/2058-6272/abb455
- [11] J. S. Laur, et al., Radio Communication Blackout Mitigation: Analyzing Magnetic Field Effects via Ray-Tracing Analysis, *AIAA Journal* 2024 62:6, 2024-2035
- [12] C. Molina, E. Fernández-Nino, A. Camps, “Modern ionospheric ray tracer for Earth Observation satellite missions,” *IEEE Journal of Selected Topics in Remote Sensing* (under review).
- [13] Ionosphere Modular Software Package (IMSP+MGS), European Space Software Repository, October 2023. Available at: <https://essr.esa.int/project/ionosphere-modular-software-package-imps-mgs> (last accessed December 2, 2023)
- [14] IGRF, “International Geomagnetic Reference Field,” Available: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/igrf_vitmo.php
- [15] IRI, “International Reference Ionosphere,” Available: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php,
- [16] NRLMSISE-00, “NRLMSISE-00 Atmosphere Model,” Available: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>