En las telecomunicaciones

Relación viento solar, magnetosfera - ionosfera

Por: Jairo E. Márquez D. *

The importance of the transmission and reception in the wire and wireless communications depend of the environment on the in which the electromagnetic waves spread, particularly the signs that travel in an environment as the air, are susceptible to changes as the temperature, humidity and pressure, that are variable inherent to the terrestrial climate that depends at the same time on the behavior magnetohidrodynamic of the sun and the layers that conform the terrestrial atmosphere. Particularly the ionosphere that completes double function, a natural one, that is of protection before the lethal ionizing radiations; the other function is artificial, because it allows the radioelectric communications from all over the world among people. This layer this subjected one constantly to natural phenomena that make that their behavior is highly dynamic and in some unpredictable cases, influencing directly in the wireless telecommunications.

Key Words: *Winds and sunspots, magnetosphere, ionosphere and communications.*

La imagen en rayos X del Sol se obtuvo de la nave espacial SOHO, en la que se aprecia las fulguraciones en la corona solar, que envía partículas y radiación de alta velocidad en forma de viento solar al espacio exterior. Las lenguas de fuego generadas en la superficie solar son cientos de veces mayor que la Tierra, con una capacidad energética inimaginable, capaz de propagarse por varios millones de kilómetros fuera de la corona antes de diluirse en el espacio en forma de viento solar. Créditos de imagen SOHO NASA.gov

Introducción

El Sol es una estrella con una edad media de cinco mil millones de años; dista de la Tierra a unos $1{,}5x10^{8}$Km; produce alrededor de $4.0x10^{23}$kW de energía por segundo. La fuente básica de su energía es la fusión nuclear, que utiliza las altas temperaturas y las grandes densidades en el interior de su núcleo para fusionar átomos de hidrógeno, produciendo energía y creando de paso átomos de helio como un subproducto. La temperatura en su superficie es de 6.000^{0}K, aproximadamente. Su luz tarda en llegar a la Tierra 8, 33 minutos. Su período de rotación es de 27 días y su campo magnético cubre todo el sistema solar.

Las explosiones nucleares que son en la mayoría de veces mayores al tamaño de la Tierra ocasionan la expulsión de materia y energía al espacio exterior manifestándose por medio de los vientos solares y tormentas solares; estas últimas se presentan cuando en la superficie del Sol aparecen manchas cuyo período es de 11 años, donde su característica principal es de ser más frías que su entorno y más visibles y prominentes en el Sol. Las manchas solares se forman y desaparecen en períodos de días o semanas. Éstas ocurren cuando aparecen campos magnéticos fuertes a través de la superficie solar y permiten que esa área disminuya su temperatura a unos 4.200^{0}K. Estas fluctuaciones, generan cambios drásticos en las comunicaciones tanto en la Tierra como en el espacio.

Manchas solares

Las manchas solares ocasionan distorsiones de las líneas de campo magnético creando grandes explosiones y fulguraciones de materia, que son expulsadas al espacio exterior transportada por el viento solar, que al viajar por el espacio chocan contra los planetas, los cuales poseen sus propios campos magnéticos que en alguna medida los protegen y que responden de manera específica ante el influjo de partículas y energía que traen consigo el viento y tormentas solares. En el caso particular de la Tierra, estos vientos y tormentas crean serias anomalías climáticas conocidas como tormentas geomagnéticas, en el que la energía del viento solar incidente se transfiere a la magnetosfera, provocando cambios súbitos en la dirección e intensidad del campo magnético terrestre y energizando la población de partículas del mismo, de tal manera que son canalizadas a través de sus líneas de campo magnético que penetran por los polos magnéticos.

Esta energía puede en su momento hacer colapsar las comunicaciones en tierra y en algunos casos las comunicaciones en el espacio; inclusive, sacar de órbita a las naves y satélites. Este colapso puede generarse básicamente por tres factores.

- *Climático*. La alta radiación a la cual es sometida la Tierra, hace que se presenten cambios drásticos en el clima, tales como el aumento de lluvias torrenciales, tormentas, huracanes, sequías, etc., que alteran las comunicaciones en general, creando señales de interferencia electromagnética destructiva, que se mezclan con las señales puras, anulándolas o atenuándolas.
- *Radiación electromagnética de alta intensidad*. Las partículas de alta energía provenientes del sol, chocan contra el campo magnético terrestre, induciendo en sus líneas de campo más energía. Esta energía al ser canalizada por sus polos, genera oleadas de plasma manifiestas a través de las auroras boreales, cuyas frecuencias anulan cualquier sistema de comunicación. A mayor intensidad, aumenta el plasma atmosférico, y por ende, mayor interferencia radioeléctrica.
- *Campo geomagnético*. Que son variaciones en el campo magnético terrestre, debido a "reajustes magnetohidrodinámicas" en su núcleo, causando distorsiones en sus líneas de campo, e inclusive inversiones del mismo. El campo geomagnético tiene mucha relevancia en la dinámica ionosférica. Sin su protección estaría la superficie terrestre a un constante bombardeo de partículas cargadas, haciendo imposible la vida en el planeta.

En síntesis, las manchas solares generan los vientos solares, que fluctúan dependiendo de la actividad nuclear; estos a la vez energizan y distorsionan el campo magnético terrestre a medida que avanzan al exterior del sistema solar, haciendo que la ionosfera sufra cambios periódicos a medida que la tierra rota en sí misma y en torno al Sol. Anexo a este fenómeno, la ionosfera puede ser alterada por inyección de reactivos químicos, constituyentes fotoionizables, partículas energéticas y otros elementos que modifican la distribución natural y el carácter del medio,[1] que a posteriori modifican el comportamiento de las ondas radio eléctricas al incidir sobre esta capa.

MAGNETOSFERA

La magnetosfera cumple una función vital como es la de proteger la superficie del planeta Tierra de las partículas de alta energía arrastradas por el viento solar, es decir, actúa como un escudo que nos protege de las tormentas solares. Se ha demostrado hace poco, que a veces surgen grietas inmensas en la magnetosfera terrestre[2] y permanecen abiertas por horas, permitiendo que el viento solar penetre y produzca tormentas espaciales, donde la energía que se desliza a través de estas grietas, a veces ocasiona problemas con los satélites, la comunicación por radio y los sistemas de energía eléctrica.

La magnetosfera cumple una función vital como es la de proteger la superficie del planeta Tierra de las partículas de alta energía arrastradas por el viento solar, es decir, actúa como un escudo que nos protege de las tormentas solares.

Afortunadamente, estas grietas no exponen la superficie de la Tierra al viento solar, ya que la atmósfera nos protege aún cuando el campo magnético no lo hace. Los efectos de las tormentas solares se sienten principalmente en la alta atmósfera y en la región del espacio alrededor de la Tierra donde orbitan los satélites.

El límite exterior de la magnetosfera se llama magnetopausa cuya distancia promedio a la Tierra es de 6.400Km, con una cola que se extiende miles de kilómetros cruzándose con la órbita de Marte[3]. Delante de la magnetopausa la velocidad del viento solar es supersónica debido a la gran cantidad de energía cinética que trae éste. También el viento solar porta consigo una gran cantidad de energía eléctrica, que colisiona directamente con la magnetosfera, elevando su temperatura drásticamente, manifestándose a través de tormentas geomagnéticas[4], subtormentas[5] y las auroras boreales. Estas últimas son creadas por la energización de electrones y iones en la magnetosfera que al entrar en contacto con los átomos y moléculas de la parte alta de la atmósfera reaccionan fotoquímicamente creando un plasma tenue y brillante, que en ocasiones pueden ocasionar daños irreparables en equipos electrónicos y de telecomunicaciones, al igual que en electrodomésticos. También pueden ocasionar daños irreparables en satélites sobre todo los de órbita baja u órbita LEO.

Por ejemplo el 23 de octubre del 2003, tres manchas solares gigantes (más grandes que Júpiter) aparecieron en el sol, desencadenando once llamaradas de tipo X[6] en sólo catorce días, una de ellas llamada mancha 486, la más grande en 13 años, causó algunos efectos en la tierra tales como: Apagones de radio y comunicaciones interrumpidas. Los protones solares penetraron en las capas superiores de la atmósfera, exponiendo a los astronautas y a algunos viajeros aéreos a dosis de radiaciones iguales a una radiografía pectoral. Aparecieron auroras en todo el mundo, en Florida, Texas, Australia y muchos otros lugares donde son raramente observadas.[7]

De lo anterior se deduce, que la radiación proveniente del sol es altamente ionizante, capaz de ocasionar daños irreparables en tejidos y ADN en cualquier ser vivo, que en grandes dosis puede degenerar en cáncer o la muerte. De ahí la importancia de la exposición de los astronautas a este tipo de radiaciones cuando hacen caminatas o reparaciones en el espacio, y de los blindajes de sus trajes y fuselaje de la nave entre otros.

Ahora, el plasma en la magnetosfera rota con la Tierra, dando como consecuencia que el plasma ionosférico se extienda hacia arriba a lo largo de las líneas del campo magnéticos y la copa, hasta que la presión del gas de plasma se iguale a lo largo de la línea del campo entero. La región del plasma sobre la ionosfera confinado en las líneas del campo magnético se llama el *plasmafera*.[8] El límite exterior del plasma que cubre la Tierra se llama plasmapausa (Carpenter, 1963), su extensión oscila entre 3 y 6 radios terrestres aproximadamente. Su variación depende básicamente de la intensidad del viento solar que incide sobre la magnetosfera[9].

La densidad de energía que la magnetosfera recibe constantemente varía según la distancia; igual ocurre para el caso del cinturón de Van Allen que está entre los 13.000Km y los 7.600Km de la Tierra, el cual es nutrido por la magnetosfera hablando en términos energéticos. Un poco más abajo se encuentra la Ionosfera entre

los 100 y 400Km; forma una de las capas de la atmósfera. Allí se lleva a cabo la fotoionización entre los rayos X y la radiación ultravioleta solares, al igual que la incidencia de protones y electrones solares y galácticos.

Ionosfera

La ionosfera controla las comunicaciones por medio de las ondas electromagnéticas, y establece el límite superior e inferior, donde las ondas deben tener longitudes de onda relativamente pequeñas (entre 1 y 10 m). Estas comunicaciones ocurren en la llamada banda de onda corta. Así, la ionosfera no es un medio estratificado, sino que presenta variaciones continuas de su densidad de ionización dependiendo de la altura, dividiéndose en secciones o capas, D, E y F, donde esta última se subdivide en F_1 y F_2, e inclusive F_3.

La razón por la cual las ondas de radio son reflejadas por la ionosfera tiene que ver con las oscilaciones propias del plasma. El plasma tiene una frecuencia natural de oscilación que depende de su densidad de electrones; a una mayor densidad electrónica le corresponde una frecuencia más alta. Cuando una onda electromagnética atraviesa un plasma, las cargas libres en él, en particular los electrones, tienden a responder a esta oscilación. Pero las atracciones electrostáticas hacia los iones, que son en sí las fuerzas que generan la oscilación del plasma, tienden a impedir este acoplamiento entre los electrones y la onda electromagnética OEM. Entonces si la frecuencia de la OEM es mayor que la del plasma, esta onda atravesará el plasma, pero si la frecuencia es menor o igual que la del plasma, parte de la onda será reflejada y parte será transmitida. Las ondas con frecuencias menores que la del plasma sólo podrán penetrar una capa delgada de éste, ya que son rápidamente amortiguadas.

Cabe anotar, que entre la Tierra y su atmósfera forman un circuito eléctrico gigantesco. Con buen tiempo, la diferencia de carga entre la ionosfera y el suelo mantiene un flujo constante de corriente desde la atmósfera hasta el suelo, a pesar de que el aire es un mal conductor de la electricidad. Por lo tanto, surge la pregunta sobre qué transporta la corriente de vuelta desde la tierra a la atmósfera para completar el ciclo y mantener el circuito fluyendo - concretamente, las tormentas eléctricas. Los dos flujos deben ser iguales, pero hasta el momento no se sabe el por qué de este fenómeno, y por qué la diferencia tan marcada en el potencial de carga en equilibrio que debería existir. Aunque presenta variaciones debido a que la densidad de los electrones que hay en ella. Estas variaciones dependen de diversas circunstancias, como son: lugar, momento del día, actividad solar, etc., lo que en ocasiones hace colapsar las comunicaciones.

La ionosfera puede influir (principalmente mediante los efectos debidos a la ionización de la capa E esporádica) sobre la propagación en la parte inferior de la banda de ondas métricas, en particular para las frecuencias por debajo de 90MHz aproximadamente. En algunas circunstancias, este modo de propagación puede influir en la intensidad de campo, excedida durante pequeños porcentajes de tiempo, a distancias de más de unos 500Km, e incluso durante porcentajes de tiempo más altos en las proximidades del Ecuador magnético. Sin embargo, generalmente pueden ignorarse estos efectos ionosféricos en la mayor parte de las aplicaciones a que se refiere la recomendación UIT-R P. 370-7 (ondas métricas VHF). Basándose en este supuesto se han preparado las curvas de propagación, que se pueden observar en la recomendación UIT -R P. 534.

La capa D oscila entre los 50 y 90Km de altura, se halla en la mesosfera y la capa inicial de la termosfera. Su densidad de ionización ρ aumenta con la altitud mientras que su índice de refracción disminuye; esta capa presenta variaciones radicales entre el día y la noche, desapareciendo prácticamente en esta última por la fluctuación de la temperatura. Es fácilmente penetrada por ondas cortas (1,5MHZ a 30MHz) atenuándolas con una ligera adsorción, adsorbe las ondas medias (550KHz a 1,5MHz) limitando su alcance durante las horas diurnas. Actúa como reflector para frecuencias más bajas.

La capa E oscila entre 90 y 130Km de altitud, varía con los ciclos solares (cada 11 años), se mantiene estable en las horas de la noche, alcanza su máximo de ionización en los meses de verano. La densidad ionosférica en esta capa es inconstante, debido a la estructura espacio temporal en la precipitación de las partículas ionizadas, ya que depende de la temperatura. Durante el día esta región se ioniza por los rayos X suaves del Sol hasta una concentración de 105 electrones (y iones) por centímetro cúbico. Esta capa es responsable de la propagación de las ondas medias, actúa como reflector para señales comprendidas entre los 3 y 9MHz aproximadamente y adsorbe parcialmente las señales de radio de alta frecuencia RF. En frecuencias superiores a los 30MHz se pueden cubrir distancias comprendidas entre 900 y 2.200 Km., y por doble salto de 4.000Km. Por saltos múltiples, poco habituales, se alcanzan distancias mayores a los 10.000Km en 50Mhz y mayores a 3.000Km en 144Mhz.

En las regiones D y E el fenómeno de propagación de ondas moduladas de gran potencia, producen perturbaciones que modifican la temperatura de los electrones, que afectan las frecuencias de colisión, los caracteres químicos de los iones, la densidad electrónica, la conductividad y la permitividad eléctrica del medio. El resultado de estas modificaciones del medio por una onda modulada intensa es la superposición de la modulación de ésta en la portadora de otra onda que se propaga por la misma región. A causa del gran número de transmisiones en ondas decamétricas, hectométricas y kilométricas que utilizan las regiones D y E para la propagación, esta interacción de las ondas, o *transmodulación ionosférica*, es difícil de distinguir de la interferencia cocanal y aún más difícil de medir,[10] a parte de la consecuencia en la recepción de señales afectadas por la transmodulación, que dependen de las características de polarización de las antenas transmisora y receptora, y de la hora del día.

La capa F se extiende desde los 130 a los 400Km de altitud aproximadamente, la subcapa F_1 está entre los 130 y 210Km manteniéndose estable durante las horas diurnas, y desapareciendo en la noche. La subcapa F_1 cumple casi la misma función que la capa E. Por encima de los 200km, altura en la que los electrones chocan con los iones, la frecuencia de colisión disminuye con la temperatura y las ondas fuertes sufren menos absorción que las ondas débiles, produciéndose de paso grandes irregularidades en la densidad de los electrones a lo largo del campo geomagnético.

La subcapa F_2 va desde los 210Km hasta unos 400Km, se caracteriza por ser relativamente estable de día y de noche, y reflejar las señales de alta frecuencia hacia la Tierra. Está presente las 24 horas del día, su altitud permite comunicaciones más lejanas. Estas capas se ionizan con radiación ultravioleta, donde la región F_2 alcan-

za valores del orden de 5×10^5 electrones/cm^3. Este valor, sin embargo, depende de la latitud sobre la Tierra que oscila entre 30 y 40 grados, y del nivel de actividad solar. Cuando hay un máximo solar; la densidad de electrones en el pico de la capa F_2 puede alcanzar el orden de 2×10^6 electrones/cm^3.

La modificación ionosférica en la capa F se produce por la elevada densidad de flujo de potencia en la gama de frecuencias que oscilan entre 2Mhz y 12Mhz aproximadamente, con ángulos de radiación elevados para frecuencias por debajo de las MUF básicas de las capas interesadas, con incidencia cuasivertical; y que tales modificaciones de la ionosfera pueden permitir la propagación a frecuencias de hasta 400Mhz y distancias de 4.000Km aproximadamente.[11]

Otro fenómeno físico importante en esta región, son las "irregularidades" repartidas a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético y tienen propiedades de dispersión, que está asociada a la directividad. Por eso, los puntos de la Tierra en los que se reciben las señales mediante este mecanismo de dispersión dependen en parte de la posición geomagnética y de la altitud de la región ionosférica modificada. En esta capa es importante el calentamiento ionosférico por disipación óhmica,[12] que produce cambios considerables en la temperatura electrónica y como consecuencia en la densidad electrónica, entre otros parámetros.- Muchos fenómenos no lineales se deben a que la frecuencia de las colisiones depende de la temperatura de los electrones, en donde el período de vida de éstos es mayor en la capa F_2, razón por la cual refleja mejor las ondas por la noche. Los períodos de vida de los electrones en las regiones E, F1 y F2 son de 20 segundos, 1 minuto y 20 minutos respectivamente.

Transmisión Ionosférica

Los campos eléctricos ionosféricos son el resultado principal del acoplamiento entre la magnetosfera y la ionosfera, donde a bajas latitudes el plasma ionosférico gira con la Tierra. A latitudes altas el plasma está en convección directa, e independiente de la rotación terrestre (velocidad menor) bajo la influencia de la magnetosfera. En esta zona se crean corrientes eléctricas de alta intensidad que pueden alterar de manera significativa las transmisiones radioeléctricas.

Inicialmente las corrientes ionosféricas fueron estudiadas tradicionalmente con magnetómetros. Actualmente uno de los instrumentos para el estudio de la ionosfera es el radar EISCAT. Que permite medir las inestabilidades del plasma, como soporte de ayuda se usan continuamente ionosondas para medir los procesos ionosféricos, que dependen de la altitud y de la densidad de electrones por centímetro cúbico en cada capa.

Para que las señales traspasen las capas D, E o F, deben superar una frecuencia crítica, que puede ser inferior (capa E) o superior (capa F), entonces esta frecuencia da una medida de la densidad de ionización, puesto que entre más alta sea la frecuencia, mayor será la densidad de los iones que ocasionan la reflexión de las señales, luego se tiene:

$$f_c = 9\sqrt{N} \qquad \textit{Ecuación - 1}$$

Donde N es el número de electrones por metro cúbico que oscila entre 10^{11} y $2x10^{12}$ aproximadamente. f_c es la frecuencia crítica para la capa en cuestión. Por ejemplo, para la capa F_1 tenemos una densidad de ionización de $2x10^{11}$ iones/m^3, por lo tanto la frecuencia crítica tiene un valor de 4.03MHz. Algo que se debe recalcar, es la presencia de inestabilidades paramétricas en la ionosfera,[13] debido a la fuerza de presión térmica, ocasionada por los electrones al oscilar a otras frecuencias, provocando una fuerza de presión adicional, generando irregularidades ionosféricas alineadas con el campo magnético.

La densidad de iones y de electrones en la ionosfera no es homogénea, ya que depende de la altura. Es decir, a mayor altura, la densidad de iones es baja, debido al enrarecimiento de la atmósfera. Pero se debe tener en cuenta, que a bajas alturas existen pocos iones, porque la mayor parte de la radiación solar ionizante ya ha sido absorbida. Esto implica, que a diferentes frecuencias de radio, serán reflejadas (y refractadas) a distintas alturas hasta una frecuencia crítica o límite. Cuando la frecuencia es mayor que la crítica, atraviesa la ionosfera como es el caso de las microondas para comunicaciones satelitales. Cabe anotar, que los fenómenos de reflexión (y refracción) se presentan para ondas de radio que provienen del espacio exterior limitando la detección y observación de señales provenientes de éste. Por ello, la ventana de ondas de radio que penetran la ionosfera es limitada.

Lo anteriormente citado, obedece a condiciones normales. Así, se habla de índices para las predicciones a largo plazo,[14] que se basan en el supuesto de las características más relevantes de la ionosfera, como son las frecuencias críticas y el factor de MUF, que dependen sistemáticamente de ciertas magnitudes mensurables en relación directa con la radiación solar, que a la vez contiene tres componentes a señalar:

- Un componente periódico conocido como actividad solar, cuyo tiempo regular es de 11 años.
- Un componente cuasiperiódico de un año aproximadamente.
- Fluctuaciones erráticas con períodos inferiores a un mes.

Se cuenta con dos índices, el índice R^{12} que identifica el número de manchas solares y el índice de media mensual Φ de los valores diarios observados expresados en unidades de $10^{-12}W/m^2Hz$. Φ guarda una correlación más estrecha con la f_c de la capa E que los valores de ruido en otras longitudes de onda. Por lo tanto, la UIT los recomienda para predicciones ionosféricas.

Para calcular los índices se procede a usar las siguientes ecuaciones:

$$R_{12} = \frac{1}{12}\left[\sum_{n-5}^{n+5} R_k + \frac{1}{2}\left(R_n + 6 + R_{n-6}\right)\right]$$

Ecuación - 2

Donde R_k es la media de los números diarios de manchas solares para el mes k, y R_{12} es el índice redondeado para el mes representado por k = n.

$$\phi_{12} = 63{,}7 + 0{,}728R_{12} + 8{,}9\times 10^{-4}R_{12}^2$$

Ecuación - 3

Se aclara que los valores obtenidos son valores aproximados, extrapolados de observaciones de los ciclos de manchas solares. Ahora, existe una frecuencia de señal que es la que se puede usar para comunicar dos puntos en la Tierra, llamada frecuencia máxima utilizable básica (f_m) conocida como MUF. También va combinada con el ángulo de incidencia i el cual es relativamente pequeño para que su alcance sea máximo, o en términos de la distancia entre transmisor - receptor (d) y la altura (h) en la que se produce la reflexión virtual, es decir, en la capa reflectante. Así:

$$f_m = f_c \sec i \quad o \quad f_m = f_c \sqrt{1+\left(\frac{d}{4h}\right)^2}$$

Ecuación - 4

Tomando la f_c del ejemplo anterior, suponiendo una altura aproximada de 240Km y una distancia Transmisor - Receptor de 800Km, tenemos una frecuencia máxima utilizable básica de 14.03Mhz. Es importante tener en cuenta al efectuar mediciones experimentales, las antenas deben estar en un soporte fijo, que permita a la vez rotarla para hallar el ángulo idóneo para la recepción de la señal.

Un valor aproximado del índice de refracción n dependiendo de la capa ionosférica, se obtiene relacionando la frecuencia crítica y la frecuencia de la señal a trasmitir.

$$n = \sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}$$

Ecuación - 5

Donde $n < 1$, que implica que la señal incidente se refracta en la ionosfera y por lo tanto puede curvase la señal retornando a la Tierra.[15] Como el valor de n es cercano a la unidad se prefiere definir el coíndice de refracción N, como: $N = (n-1).10^6$, es decir, para n= 1,000315 el N=315, que resulta en una valor más cómodo. El valor de N y n es una función climática, expresada mediante la relación:

$$N = \frac{77.6}{T}\left(P + 4810\frac{p}{T}\right)$$

Ecuación 6

Donde P = 216,7 p/T, es la presión atmosférica en milibares (mb), p es la presión del valor de agua en mb y T la temperatura en grados Kelvin. La relación p/T da lugar a la concentración del vapor de agua en gr/m^3.

Cuando hay tormentas geomagnéticas, estas influyen en forma negativa en la ionosfera ocasionando daños en equipos y hacen colapsar en algunos casos las comunicaciones en todas las latitudes. Este fenómeno se presenta, cuando las frecuencias de radio son reflejadas y otras absorbidas, haciendo que las señales fluctúen y cambien de dirección, que dependen de variables como la hora del día, temperatura, altitud, latitud y posición del sol. Es decir, del ciclo de rotación de la Tierra alrededor del Sol, ya que ésta recibe diferente radiación según la época del año, por ello las estaciones.

Las señales de radio y TV no se ven tan afectadas por la actividad solar. En cambio otros sistemas de comunicación son afectados frecuentemente, como son: las comunicaciones aéreas, terrestres, marítimas, espaciales, estaciones de radio de largo alcance y de radio aficionado, radares civiles y militares, sistemas de detección de misiles y aviones como el ROTHR (Relocatable Over The Horizon Radar), sistemas subacuáticos, sistemas de posicionamiento global GPS y algunos sistemas de telemetría.

La ionosfera permite las comunicaciones a grandes distancias, pero su efecto varía conforme la banda de frecuencia, esto se debe a que entre la tierra y la capa ionosférica se crea una especie de guía de onda conductora de señales. A frecuencias bajas LF y muy bajas VLF la ionosfera presenta cambios abruptos respecto a la frecuencia del índice de refracción atmosférico, ocasionando en la señal una reflexión en la parte baja de la ionosfera. A frecuencias más elevadas mayores a los 30MHz las señales penetran la capa sin ningún problema hacia el espacio exterior.

Para el caso de un emisor de radio, éste produce dos tipos de señales u ondas: señales de superficie y señales ionosféricas, que dependiendo de su frecuencia una emisión tendrá mayor cantidad de una señal o de la otra. Lo que implica que a frecuencias bajas predominan las señales de superficie y a frecuencias mayores las ionosféricas, que como es sabido son influenciadas por el Sol, el campo magnético terrestre, la atmósfera y la propia Tierra.

Las características de propagación de las ondas radioeléctricas varían según su alcance, es decir, si éste es visual o de línea vista, o si es mundial o de largo alcance (frecuencias ionosféricas). Los factores físicos que limitan la propagación de las señales radioeléctricas de largo alcance son: la curvatura terrestre, la resistividad, constante dieléctrica de la tierra y el mar, y la adsorción troposférica. Esta última es la región de la atmósfera en contacto directo con la Tierra, extendiéndose hasta unos 10Km de altura, y es allí donde se forman las nubes y la temperatura disminuye con la altura a razón de 6,5°/Km.

Cuando la propagación de la señal no es pura, es decir, está influenciada por factores climáticos entre la ionosfera y la troposfera, se utiliza la propagación dispersiva o de dispersión. Esta dispersión se debe a las corrientes de EDDY o burbujas de masas de aire en la troposfera originadas por las turbulencias en el interior del volumen que barren los haces de las antenas transmisora y receptora. Para el caso de la ionosfera se crean estas burbujas por altas concentraciones de iones atribuibles a los fragmentos y micropartículas dejadas por los meteoros al rozar las capas bajas de la atmósfera. Por lo anterior se clasifica la propagación dispersiva en cuatro clases o modos, que son:

- Dispersión Troposférica
- Dispersión Ionosférica
- Dispersión Transecuatorial
- Trayectorias de Meteoros

Los anteriores modos son aprovechados para efectuar transmisiones de radio en las frecuencias de VHF y UHF de largo alcance. Para el caso de la dispersión ionosférica, que es el caso que interesa en este apartado, tiene lugar según la densidad iónica de las señales incidentes que se dispersan o refractan en todas direcciones. La intensidad de las señales se debilita por el rebote en las capas de esta alta atmósfera, por lo cual requiere transmisores de alta potencia y buenos receptores.

Dentro de este tipo de dispersión existen dos subclases, la dispersión corta y dispersión larga: en la primera, la señal no llega a rebotar en la capa F ya que se refleja en la zona de dispersión y vuelve a la tierra muy atenuada y deformada. La segunda, rebota en la capa F y luego se refleja hacia la tierra en la zona de dispersión, otorgando una señal débil pero no deformada (para este tipo de dispersión la frecuencia máxima difícilmente supera los 100MHz).

Existe otro tipo de dispersión, generado por irregularidades inducidas artificialmente, que se reparten a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre en altitudes de 250 y 300Km, y se manifiestan segundos después de haberse conectado un transmisor de alta potencia, como resultado del calentamiento óhmico y de la aparición de ines-

tabilidades paramétricas y de ondas de plasma. Para las señales radioeléctricas que atraviesen la región perturbada, se genera un aumento de la profundidad y la velocidad de los desvanecimientos, tanto en trayectos que tienen ambos terminales en el suelo, como sobre Tierra-espacio.

Sumado a lo anterior, se deben tener en cuenta los diferentes tipos de propagación, al efectuar un análisis de las señales ionosféricas. Tenemos la *propagación de Aurora*: cuya señal reconocible es de 27Mhz, ya que se nota un burbujeo y distorsión en la modulación. *Backscatter (Propagación trasera)*: Se presenta cuando la frecuencia máxima utilizable (MUF) llega por encima de 27Mhz.

Propagación por F2: Es la propagación que se da a través de la capa F2 de la ionosfera. *Propagación Esporádica-E*: Es el tipo de propagación que se presenta durante el verano, con señales extremadamente fuertes y en distancias cortas.

Meteorscatter: Está relacionada con pequeños meteoritos que rozan la atmósfera terrestre y dejan un rastro de aire ionizado a unos 80-150km de altura, que pueden reflejar ondas de radio de frecuencias de 500MHz o más.

Transatlántica (TAP): Son aperturas que se dan en verano durante un período de actividad solar bajo, y justo después de la puesta del sol (Europea). No se ha explicado totalmente este fenómeno. *Transecuatorial (TEP)*: Durante otoño y primavera hay ocasiones que las estaciones de latitudes medias pueden efectuar comunicados con estaciones de una latitud casi igual pero en el otro lado del ecuador geomagnético. Al igual que la TAP, no hay explicación científica para la TEP.

Tropo: Está influenciado por las condiciones meteorológicas, en la que las inversiones térmicas se desarrollan bajo la influencia de sistemas de altas presiones (anticiclones), y de bajas presiones (borrascas). También se producen inversiones, al colisionar masas de aire frío con caliente generando sistemas frontales.

Línea gris (Greyline): La Greyline es la franja alrededor de la Tierra que separa el día de la noche. La propagación a través de la Greyline es muy eficaz para las comuniaciones, ya que la capa D, que absorbe las señales de HF, desaparece rápidamente al atardecer y durante el amanecer tarda un poco en formarse.

Las auroras boreales. Estas últimas son creadas por la energización de electrones y iones en la magnetosfera que al entrar en contacto con los átomos y moléculas de la parte alta de la atmósfera reaccionan fotoquímicamente creando un plasma tenue y brillante, que en ocasiones pueden ocasionar daños irreparables en equipos electrónicos y de telecomunicaciones, al igual que en electrodomésticos. También pueden ocasionar daños irreparables en satélites sobre todo los de órbita baja u órbita LEO.

Cada propagación atmosférica, trae in situ problemas de atenuación, por obstrucción, por refracción atmosférica, difracción por zonas de Fresnel, por reflexiones en el terreno y por dispersión de energía debido a precipitaciones y desacoplamiento de la polarización de la onda. También se presentan problemas de desvanecimiento por múltiple trayectoria, por absorción de vegetación y por gases o hidrometeoros cercanos a las antenas de comunicación.

Todos estos fenómenos presentan un alto comportamiento no lineal, haciendo que el grado de incertidumbre en el momento de predecirlas sea muy alto. Se requiere un mayor estudio al respecto, con el fin de buscar soluciones favorables, sin atentar contra el medio ambiente.

Actualmente estoy trabajando en el rediseño de algunas antenas empleadas para transmisiones en RF o Microondas, lo cual permite una mejora sustancial en la recepción de señales en entornos críticos. Aunque se requiere seguir experimentando, vamos por buen camino.

CONCLUSIONES

Marconi un hombre visionario, fue el primero en descubrir que las señales de radio rebotaban en la ionosfera y vio la oportunidad para aprovechar este fenómeno en la comunicación entre continentes. Desafortunadamente los sistemas masivos de telecomunicación no usan la capa ionosférica debido a sus constantes fluctuaciones, su uso es restringido, pero de gran importancia para sistemas de apoyo en navegación aeronáutica y marítima, al igual para sistemas de radio, y radio aficionados. Además existen sistemas de radar militares que usan la ionosfera como reflector de señales, que permiten detectar objetos de 10m de tamaño (ROTHR). Y un controvertido proyecto para alterar el clima y bloquear las comunicaciones mundiales cambiando las propiedades físicoquímicas de la ionosfera, conocido como Programa de investigación de la aurora activa de alta frecuencia o HAARP.

Como se puede apreciar los fenómenos físicos que ocurren en el Sol, influyen de manera directa o indirecta en las telecomunicaciones en la Tierra, haciendo indispensable el estudio del comportamiento de este astro diariamente. Pues las capas ionosféricas y los picos de densidad varían notoriamente dependiendo de variables como el tiempo, ciclos solares, estación del año, situación geográfica, los polos, si es día o noche, zonas aurorales, regiones de media latitud o ecuatoriales y perturbaciones solares.

Cabe anotar, que a parte de los fenómenos solares, existen otros que afectan también las comunicaciones, generando ruidos en las señales como son eventos extrasolares, tales como las explosiones de supernovas, la radiación de fondo cósmico, la radiación de fondo óptica e infrarroja entre otros.

EL AUTOR

Jairo E. Márquez D. Ingeniero Electrónico, Físico - Matemático, con especialización en docencia universitaria, bioética, telecomunicaciones y redes. Maestría en bioética (Sistemas Emergentes y Nanotecnología). Docente investigador en el área de telecomunicaciones en la Universidad de Cundinamarca UDEC (Fusagasugá), Facultad de Ingeniería Electrónica y de Sistemas. Trabaja en el diseño y desarrollo de antenas fractales e híbridas. Actualmente trabaja para la publicación de su libro sobre Nanotecnología.
E-Mail: vectorgamma@iespana.es

Referencias

- PHLLIPS Tony. Night Clouds. A series of upcoming rocket launches will create glowing-white nighttime clouds visible from the eastern seaboard of the United States. Science@NASA. June 20, 2003.
- BARRY Patrick L. La Vida Privada de las Tormentas. Science@NASA. Octubre 30, 2003.
- CARDAMA Aznar Angel. Cofre Roca Lluís. Rius Casals Juan Manuel. Romeo Robert Jordi. Blanch Boris Sebastián. Antenas. Ed. Alfaomega. Edicions UPC. Año 2000.
- Plasmasphere and plasmapause. Geomagnetic Phisics. spaceweb@oulu.fi - last update: 4 January 1999, 1630 UT (RR)
- SISCOE, G. L, and H. E. Petschek, On storm weakening during substorm expansion phase, Ann. Geophysicae, 15, 211-216, 1997.
- WAYNE Tomasi. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Ed. Pearson Educación. Segunda Edición. 1996.
- DAVIES K., 1990, Ionospheric Radio. Peter Peregrinus, London.
- GARRETT, H. B., and C. P. Pike, eds., 1980, Space Systems and Their Interactions with Earth's Space Environment. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- JOSELYN, J.A., 1992. The impact of solar flares and magnetic storms on humans. EOS, 73(7): 81, 84-85.
- LANZEROTTI, L. J., 1979, Impacts of ionospheric / magnetospheric process on terrestrial science and technology. In Solar System Plasma Physics, III, L. J. LANZEROTTI, C. F. Kennel, and E.N. Parker, eds. North Holland Publishing Co., New York.
- Ionosphere (Earth's). Geomagnetic Phisics. spaceweb@oulu.fi - last update: 6 November 2002 (RR)
- Geomagnetic activity. Geomagnetic Phisics. spaceweb@oulu.fi - last update: 27 November 1998, 1600 UT (RR).
- Ionospheric troughs. Geomagnetic Phisics. spaceweb@oulu.fi - last update: 19 November 1998, 2200 UT (RR)
- Magnetosphere (Earth's). Geomagnetic Phisics. spaceweb@oulu.fi - last update: 29 November 1998, 1450 UT (RR)
- Magnetic field models. Geomagnetic Phisics. spaceweb@oulu.fi - last update: 11 May 1998, 1840 UT (RR)
- Isotropic boundary, IB. Geomagnetic Phisics. spaceweb@oulu.fi - last update: 4 September 1996, 1015 UT (RR)
- NISHIDA, A., Formation of plasmapause, or magnetospheric plasma knee, by combined action of magnetospheric convections and plasma escape from the tail, J. Geophys. Res., 71, 5669, 1966.
- OBER, D. M., J. L. Horwitz, and D. L. Gallagher, Formation of density troughs embedded in the outer plasmasphere by subauroral ion drift events, J. Geophys. Res., 102, 14595-14602, 1997.
- GOLUB, L., and Pasachoff, J.M. 1997. The Solar Corona. Cambridge Univ. Press.
- MURSULA, K. and B. Zieger, Solar excursion phases during the last 14 solar cycles, Geophys. Res. Lett., 25, 1851-1854, 1998.
- Cliver, R. W., V. Boriakoff, and K. H. Boúnar, The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity, J. Geophys. Res., 101, 27091-17109, 1996.
- MURSULA, K. and B. Zieger, The 13.5-day periodicity in the Sun, solar wind, and geomagnetic activity: The last three solar cycles, J. Geophys. Res., 101, 27077-27090, 1996.
- PAULARENA, K. I., A. Szabo, and J. D. Richardson, Coincident 1.3-year periodicities in the ap geomagnetic index and the solar wind, Geophys. Res. Lett., 22, 3001, 1995.
- NOAA Satellite and Information Services. National Environmental Satellite, Data and information service. http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/ionostru.html
- EVANS, J. V., J. M. Holt, W. L. Oliver, and R. H. Wand, On the formation of daytime troughs in the F-region within the plasmasphere, Geophys. Res. Lett., 10, 405-408, 1983.
- HOLT, J. M., R. H. Wand, and J. V. Evans, Millstone Hill measurements of 26 February 1979 during the solar eclipse and formation of midday F-region trough, J. atmos. terr. Phys., 46, 251-264, 1984.
- HÄGGSTRÖM, I., and P. N. Collis, Ion composition changes during F-region density depletions in the presence of electric fields at auroral latitudes, J. atmos. terr. Phys., 50, 389-404, 1988.
- MOFFETT, R. J., and S. Quegan, The mid-latitude trough in the electron concentration of the ionospheric F layer: a review of observations and modelling, J. atmos. terr. Phys., 45, 315-343, 1983.
- PRYSE, S. E., L. Kersley, M. J. Williams, and I. K. Walker, The spatial structure of the dayside ionospheric trough, Ann. Geophysicae, 16, 1169-1179, 1998.
- ROGER, A. S., R. J. Moffett, and S. Quegan, The role of ion drift in the formation of the ionisation troughs in the mid- and high-latitude ionosphere - a review, J. atmos. terr. Phys., 54, 1-30, 1992.
- WHALEN, J. A., Daytime F layer trough observed on a macroscopic scale, J. Geophys. Res., 92, 2571-2576, 1987.
- WHALEN, J. A., The daytime F layer trough and its relation to ionospheric-magnetospheric convection, J. Geophys. Res., 94, 17169-17184, 1989.
- WINSER, K. J., G. O. L. Jones, and P. J. S. Williams, A quantitative study of the high latitude ionospheric trough using EISCAT's common programmes, J. atmos. terr. Phys., 48, 893-904, 1986.

1 *Recomendación 532-1. consideración e.*

2 *En 1961, Jim Dungey, del Imperial College del Reino Unido, predijo que las grietas podrían formarse en el escudo magnético cuando el viento solar contenía un campo magnético orientado en dirección opuesta a una porción del campo terrestre. En estas regiones, los dos campos magnéticos se interconectarían por medio de un proceso conocido como "reconexión magnética", formando una grieta en el escudo por medio de la cual las partículas cargadas eléctricamente del viento solar podrían filtrarse.*

3 *Esta variación se debe a que el viento solar trasporta cierta cantidad de movimiento que es trasmitido a las líneas de campo magnético, haciendo que éstas se distorsionen y compriman en la dirección de éste creando la Magnetosfera, cuya característica principal es que posee una estructura geométrica más o menos compleja, es decir, cerca de la tierra, tiene forma cuasiesférica, pero a medida que nos alejamos, las líneas de campo se distorsionan debido al arrastre del viento y tormentas solares, dando la apariencia de una gran lágrima cósmica.*

4 *La Variabilidad en la actividad geomagnética depende de varias fuentes, como son: La variabilidad en el Sol, que depende del ciclo solar (11 y 22 años) y de 1.3 a 1.4 años aproximadamente; de la órbita de la Tierra alrededor del Sol teniendo en cuenta las diferentes latitudes solares (variabilidad anual); la órbita de la Tierra alrededor del Sol que cambia la orientación de los sistemas coordenados pertinentes (variación semianual), y La rotación del Sol alrededor de su eje que puede oscilar de T = 27 días y T = 13-14 días.*

5 *Las subtormentas son creadas por las grandes tormentas geomagnéticas, que a la vez son creadas según se cree por la inyección de corriente inducida por la colisión de partículas en el plasma creado en la magnetosfera.*

6 *Los investigadores catalogan las llamaradas solares de acuerdo con la cantidad de rayos X que provocan. Las llamaradas tipo C son las más débiles. Las de clase M son medianamente fuertes. Las llamaradas de tipo X son las más potentes. Cada categoría tiene subdivisiones: Por ejemplo X1, X2, X3... Una llamarada de clase X se registra como X1 o X2. El 4 de noviembre, la mancha 486 liberó una llamarada de registro X28, la más potente nunca antes observada.*

7 *En 1989, una llamarada con sólo la mitad de esa potencia causó una caída de corriente generalizada en Quebec. La explosión de la mancha 486 apuntó lejos de la Tierra, por lo tanto sus efectos en nuestro planeta fueron ligeros, contando con un poco de buena suerte diría yo, por que de lo contrario hubiese causado un desastre, no en la telecomunicaciones sino a nivel climático.*

8 *De hecho, la plasmafera se considera como una extensión de la ionosfera, no hay una distinción clara entre ellos. Como sugirió Nishida (1966), la densidad del plasma dentro de la plasmafera es significativamente más alta que fuera de él, porque las líneas del campo a latitudes más altas se convierten en la magnetopausa (donde la ionosfera proporciona el plasma que se pierde en el espacio).*

9 *Cabe anotar que en un tiempo relativamente largo se crea un campo energético entre la magnetosfera y la ionosfera, cuya intensidad depende de la velocidad del viento solar.*

10 *Consultar Rc. 532-1 Anexo 2. Transmodulación ionosférica.*

11 *Consultar recomendación 532-1. consideración b.*

12 *Se considera que una onda con campo eléctrico y una frecuencia angular determinada, pasa a través de una capa de plasma ionosférico con una frecuencia de colisión efectiva, ?entre electrones y iones o partículas neutras. Este campo actúa sobre los electrones y los acelera. Sin embargo, las colisiones los retardan y la energía se extrae de la onda, lo que produce un aumento de la temperatura de los electrones. Aunque los electrones se calientan, durante las colisiones sólo transfieren a los iones una pequeña parte de su energía, debido a que su masa es más pequeña que la del ión o de la partícula neutra.*

13 *La inestabilidad paramétrica del plasma de una onda, generalmente entraña una interacción de tres ondas. En el contexto de la modificación ionosférica, una onda decamétrica electromagnética de alta potencia proporciona el campo inicial de excitación o bombeo cuya energía pasa a una onda de plasma de frecuencia más baja y a una onda acústica de iones de frecuencia también más baja.*

14 *Según recomendación UIT-R P.371-8 anexo 1. Elección de índices para las predicciones ionosféricas a largo plazo.*

15 *Algo muy importante respecto al índice de refracción, es que este depende de otras variables, tales como la conductividad y permitividad eléctrica, al igual que la densidad del medio; que dependiendo el tipo de polarización que posea la señal (horizontal o vertical), su comportamiento en el espacio cambia drásticamente.*