

Resumen

Las cargas útiles de los satélites de telecomunicación actuales operan en entornos multiportadora, bajo una demanda continua de mayores capacidades de transmisión. Esto ha originado un aumento en los niveles de potencia de RF, en las frecuencia de trabajo, y en el número de canales transmitidos, estimulando la aparición de efectos no lineales de alta potencia, como Multipactor, Corona, térmicos y la Intermodulación Pasiva (PIM).

De entre todos los efectos anteriores, la intermodulación pasiva es el menos estudiado, o, como mínimo, el menos comprendido. Esto se debe a su carácter ampliamente no lineal y su estrecha relación con la calidad del trabajo realizado por los operarios, lo que dificulta el desarrollo de modelos capaces de predecir y explicar fielmente las degradaciones asociadas al efecto del PIM. Los términos de PIM generados en el enlace descendente, de hecho, pueden interferir a la débil señal a detectar a través del canal de recepción, amenazando por tanto la capacidad de transmisión del enlace ascendente.

Los modelos tradicionales de PIM suelen basarse en una excitación formada por dos portadoras. Aunque se trata de un caso simple pero bastante representativo, presenta en cualquier caso diferencias importantes con el escenario real multiportadora. El trabajo realizado en esta Tesis Doctoral intenta reducir estas diferencias. Para lograrlo, se realizan dos nuevas contribuciones de relevancia para las condiciones reales de operación de los satélites. En primer lugar, se ha investigado de forma teórica el papel de las fases de las portadoras en el PIM (que se desprecia para una excitación mediante dos portadoras). En segundo lugar, se ha propuesto un nuevo modelo capaz de tener en cuenta el efecto de las portadoras no contribuyentes en un cierto término de PIM, aplicando un nuevo principio de conservación de energía. Los resultados obtenidos con los dos nuevos modelos teóricos desarrollados se ajustan perfectamente a los datos experimentales.

Debido a la compleja naturaleza del PIM, la validación de los componentes de RF de las cargas útiles de los satélites se realiza exclusivamente mediante tests experimentales. Por lo tanto, la disponibilidad de bancos de medida de PIM es un tema de gran interés para la industria y las agencias espaciales. Sin embargo, el diseño de bancos de altas prestaciones es un desafío, ya que su nivel de PIM

residual debe ser bastante inferior al requerido para validar los dispositivos de RF. Para hardware embarcado en satélites, la diferencia entre el nivel de las portadoras a transmitir (enlace descendente) y la señal de RF a detectar (enlace ascendente) puede llegar a ser del orden de los 185 dBc.

En esta Tesis Doctoral se proponen unas nuevas arquitecturas integradas de bancos de medida de PIM, implementables mediante tecnología en guía de ondas. Se han desarrollado arquitecturas tanto para PIM conducido (en dirección progresiva y regresiva) como radiado. Dichas arquitecturas permiten una reducción importante del nivel de PIM residual del sistema de medida, siendo además flexibles, capaces de manejar elevados niveles de potencia, y libres de resonancias e interacciones indeseadas. Los elementos claves de estos bancos de medidas son unos multiplexores de bajo PIM, que pueden incorporar dos familias de filtros de alta potencia que admiten un elevado número de ceros de transmisión, y por tanto, capaces de proporcionar un elevado rechazo en la banda de recepción del PIM.

Los bancos de medida de PIM conducido por onda reflejada, sin embargo, están expuestos al PIM generado por la carga empleada para absorber las portadoras de alta potencia. Para resolver esta situación, se han propuesto unas nuevas cargas de bajo PIM en tecnología guiada, que han proporcionado en tests experimentales una importante reducción en el nivel de PIM residual de estos sistemas de medida. Así mismo, se ha elaborado un nuevo tipo de transiciones para mitigar el nivel de PIM generado en interconexiones que involucren a flanges estándar. Finalmente, para escenarios radiados, se ha desarrollado una nueva formulación capaz de relacionar densidades de potencia en el dispositivo bajo test con los niveles detectados en el banco de medida, y que por tanto permiten trasladar especificaciones de PIM de la carga útil al sistema de medida de PIM.

Por último, pero no por ello menos importante, se han mostrado varias campañas de medida de PIM realizadas con bancos de medida implementados acorde a la nueva arquitectura propuesta en esta Tesis Doctoral. Estas medidas cubren varios rangos de frecuencia (bandas C, Ku, K y Ka) y diferentes escenarios de medida de PIM, tanto conducido (en dirección progresiva y regresiva) como radiado. Se ha determinado, en primer lugar, el excepcional nivel de fondo de ruido de PIM logrado en cada banco de medida. Además, se han mostrado los resultados obtenidos para medidas de PIM realizadas sobre una cámara anecoica, capas aislantes multicapa (MLIs) y mallas reflectoras, obteniendo interesantes conclusiones en cuanto a la geometría de las estructuras y el impacto que tienen a nivel de PIM elementos tan típicos como los bordes serrados y los remaches. Finalmente, se muestra un estudio de PIM asociado a una anomalía observada durante el enganche del vehículo ATV-3 a la Estación Espacial Internacional (ISS). Dicho estudio ha permitido localizar una fuente de PIM significativa en la capa aislante térmica del ATV-3, que ha dado lugar a una serie de recomendaciones para mitigar el PIM en las próximas generaciones de vehículos ATV.