

ESTUDIO DEL MERCADO DE COMPONENTES PASIVOS DE COMUNICACIONES EN EL SECTOR ESPACIO EN EUROPA

Laura Esteve Moreno

Tutor: Ana Vidal Pantaleoni

Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela
Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de
la Universitat Politècnica de València, para la obtención
del Título de Máster en Ingeniería de Telecomunicación

Curso 2015-16

Valencia, 13 de septiembre de 2016

RESUMEN

En este proyecto se ha llevado a cabo un modelo para realizar una estimación del número de componentes pasivos que se encuentran en la carga útil de un satélite de comunicaciones. Para lograr este objetivo, ha sido necesario diseñar el diagrama de bloques de la carga útil de comunicaciones de diferentes tipos de satélites. En primer lugar, se ha estudiado la configuración de los diferentes componentes del sistema para luego aplicar sus características a este caso particular y generar así la estructura interna de la carga útil (*payload*) de los satélites. A continuación, se ha investigado sobre el funcionamiento de los distintos tipos de satélites, tradicionales y los de alta capacidad HTS (*High Throughput Satellite*). Finalmente, se ha creado el modelo para realizar la estimación del número de componentes pasivos que conforman la carga útil del satélite. Con ello, se ha conseguido el objetivo de estimar el número de componentes pasivos para los satélites lanzados en el periodo de 2010 a 2014 en Europa.

RESUM

En aquest projecte s'ha dut a terme un model per realitzar l'estimació del nombre de components passius que es troben en la càrrega útil d'un satèl·lit de comunicacions. Per aconseguir aquest objectiu, ha sigut necessari dissenyar el diagrama de blocs de la càrrega útil de comunicacions de diferents tipus de satèl·lits. En primer lloc, s'ha estudiat la configuració dels diferents components del sistema per després aplicar les seues característiques a aquest cas particular i generar així l'estructura interna de la càrrega útil (*payload*) dels satèl·lits. A continuació, s'ha investigat sobre el funcionament dels diferents tipus de satèl·lits, tradicionals i els d'alta capacitat HTS (*High Throughput Satellite*). Finalment, s'ha creat el model per fer l'estimació del nombre de components passius que formen la càrrega útil del satèl·lit. Amb això, s'ha aconseguit el objectiu d'estimar el nombre de components passius dels satèl·lits llançats en el període de 2010 a 2014 a Europa.

ABSTRACT

This project has carried out a model to estimate the number of passive components found in the payload of a communications satellite. To achieve this goal, it has been necessary to design the block diagram of the payload of different types of satellites. First, we studied the configuration of the different system components and then, apply the characteristics to this particular case and generate the internal structure of the satellites payload. First, the operation of different types of satellites and traditional high capacity HTS (*High Throughput Satellite*) has been investigated. Finally, the model for estimating the number of passive components that make up the satellite payload has been created. This has been achieved in order to estimate the number of passive components for satellites launched in the 2010-2014 period in Europe.

ÍNDICE

ÍNDICE	3
1 INTRODUCCIÓN	5
1.1 MOTIVACIÓN	5
1.2 ESTADO DEL ARTE	6
1.3 OBJETIVOS	7
1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	7
2 METODOLOGÍA DE TRABAJO	9
2.1 GESTIÓN DEL PROYECTO	9
2.2 DISTRIBUCIÓN EN TAREAS	10
2.3 DIAGRAMA TEMPORAL	11
3 ENTORNO DE DESARROLLO	12
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SATÉLITES DE COMUNICACIÓN	12
3.1.1 Evolución del mercado	12
3.1.2 Tipos de satélites	18
3.1.2.1 Satélite tradicional	18
3.1.2.2 High Throughput Satellite.....	21
3.1.3 Satélites lanzados 2010-2014	24
3.2 COMPONENTES HARDWARE	28
3.2.1 Antena	28
3.2.1.1 Cobertura.....	29
3.2.1.2 Tipos de antenas.....	30
3.2.1.2.1 Bocinas.....	30
3.2.1.2.2 Antenas reflectoras.....	31
3.2.1.2.3 Lentes.....	33
3.2.1.2.4 Arrays de antenas	34
3.2.2 Amplificación de bajo ruido y conversión en frecuencia	34
3.2.3 Filtros	35
3.2.3.1 Filtros de entrada y salida	37
3.2.4 Multiplexores	37
3.2.4.1 Multiplexores de entrada.....	38
3.2.4.2 Multiplexores de salida.....	39

3.2.4.3	Configuración de los multiplexores	39
3.2.5	Canalización del repetidor.....	41
3.2.6	Cadena de amplificación.....	43
3.2.6.1	Amplificador de canal (CAMP).....	43
3.2.6.2	Amplificador de alta potencia (HPA)	44
3.2.6.2.1	TWTA.....	45
3.2.6.2.2	SSPA.....	47
3.2.7	Redundancia	49
4	DESARROLLO.....	51
4.1	Satélite tradicional.....	51
4.2	High Througput Satellite	55
4.2.1	KA-SAT.....	55
4.2.2	Antena HTS	58
4.2.2.1	Antena multihaz.....	58
4.2.2.2	Antena Single feed per beam (SFB)	59
4.2.2.3	Antena para satélite HTS	61
4.2.3	Carga útil	64
4.2.4	Enlaces Forward y Return.....	68
4.2.5	Payload Forward.....	73
4.2.6	Payload Return.....	75
4.3	Estimación de los componentes pasivos.....	78
4.3.1	Estimación satélite tradicional	78
4.3.2	Estimación HTS.....	79
4.3.3	Estimación de la lista de satélites	84
5	CONCLUSIONES.....	86
	Índice de figuras	88
	Índice de tablas	90
6	Bibliografía	91

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En el presente proyecto se establece un modelo para calcular el número de componentes pasivos que hay en la carga útil de un satélite. Se estimará el número de componentes pasivos para los satélites de comunicaciones lanzados en Europa en el periodo de 2010 a 2014.

Las principales consultoras del sector espacial, como por ejemplo Eurospace, son las únicas empresas que realizan estudios de mercado en este ámbito. Estos informes generalmente recopilan información investigando sobre los diferentes aspectos espaciales tales como el número de satélites lanzados, la masa de los mismos, entre otros.

También existen publicaciones científicas sobre la industria espacial, como por ejemplo de IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) o las publicaciones del iTEAM (Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia) de la Universidad Politécnica de Valencia, pero en estos casos suelen ser publicaciones específicas sobre un ámbito espacial muy particular, sin generalizar a una visión más completa.

Sin embargo, nunca se ha realizado un estudio técnico donde se incluyan conocimientos de comunicaciones y además se haga una visión global espacial como se ha dispuesto en este proyecto. Por ello surge la necesidad de realizar este estudio que además es aplicable a otros ámbitos espaciales. En este caso, se ha propuesto un estudio de mercado para estimar el número de componentes pasivos, pero siguiendo este modelo, se podría realizar otro para estimar el número de componentes activos o cualquier otro estudio similar.

En este proyecto se realizará un modelo para calcular el número de componentes pasivos incluidos en la carga útil de un satélite. Para ello, se necesitará desarrollar el diagrama de bloques de la carga útil de comunicaciones de los diferentes tipos de satélites.

Las agencias espaciales realizan estudios para saber cómo es la configuración de la carga útil de los satélites. De hecho, esta información es imprescindible si se requiere construir un satélite para lanzarlo al espacio. Sin embargo, debido a la competencia existente en este sector, esta información es estrictamente confidencial y ninguna empresa comparte este tipo de estudios. Es por ello, que esta tarea ha sido especialmente complicada.

A lo largo del proyecto se explicarán los distintos tipos de satélites que existen en la actualidad además de los diferentes componentes que forman parte de la carga útil de los mismos. También se presentarán los diagramas de bloques de las cargas útiles para después poder realizar un modelo para estimar los componentes pasivos. Por último, se presentará una lista con los satélites lanzados entre 2010 y 2014 en Europa y el número de componentes pasivos que están incluidos en su carga útil.

En definitiva, se realizará un estudio muy completo explicando muchos aspectos técnicos de los satélites de comunicaciones, incluyendo diagramas de bloques y un modelo para estimar el número de componentes pasivos. Cabe recalcar la utilidad que representa este proyecto para la industria de fabricación de componentes así como para las empresas emergentes de ámbito espacial. Con este proyecto se pretende dar una visión más clara de la estructura de comunicaciones del satélite y resolver las cuestiones complejas que este sector alberga.

1.2 ESTADO DEL ARTE

La carrera espacial empezó con el lanzamiento del Sputnik 1 en 1957 por parte de la Unión Soviética. Estados Unidos y Rusia fueron los pioneros en el desarrollo y lanzamiento de satélites, llevando mucha ventaja a Europa en el ámbito espacial. Sin embargo, actualmente Europa es una gran potencia en este sector, poco a poco ha conseguido hacerse un hueco en este mercado hasta la posición actual que ostenta. De hecho, en los últimos años, se ha colocado en segunda posición en términos de masa y número de satélites comerciales lanzados, únicamente por detrás de Rusia. Superando a China y Estados Unidos en este sector.

La mayoría de los satélites comerciales son operados y construidos por entidades privadas. En Europa existen muchas empresas que se dedican a ello como son: *SES Astra*, *Eutelsat SA*, *Inmarsat PLC*... Por otro lado, también se pueden encontrar otras empresas que realizan la fabricación de componentes de satélites como son *Astrium* y *Airbus DS*, entre otros. Sin embargo, la elevada competencia en el ámbito espacial provoca que las empresas privadas y las agencias públicas se reserven sus investigaciones y no existan documentos oficiales sobre datos concretos de la estructura interna de la carga útil de un satélite. No obstante, existen empresas como *Eurospace* que se dedican a fomentar el desarrollo de las actividades espaciales en Europa y promover la comprensión de las cuestiones relacionadas con la industria espacial y sus problemas. [20]

Por otro lado, también existen publicaciones científicas de IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) así como algunas conferencias de la Agencia Espacial Europea donde se explican aspectos espaciales. En IEEE por ejemplo se pueden encontrar publicaciones sobre la nueva tendencia de los tipos de satélites o aspectos más técnicos como la fabricación de algunos componentes. A pesar de todo esto, ninguna entidad ha realizado ningún estudio científico sobre la carga útil de los satélites de comunicaciones y sus diferentes componentes.

En lo que se refiere a componentes pasivos, existen también muchas publicaciones sobre la fabricación de los mismos en el ámbito espacial muy genéricos. Con todo, no hay referencias de ningún estudio donde se especifique una estimación de los componentes pasivos que hay en la carga útil de un satélite. De hecho, no existe ningún estudio sobre una estimación del número de componentes de cualquier tipo en la carga útil de un satélite de comunicaciones.

El sector espacial es muy complejo y posee mucha competencia, razón por la cual tiene sentido que este tipo de estudios no se hayan realizado. Este proyecto se ha desarrollado con el objetivo de aclarar estos aspectos y como una propuesta muy novedosa en el ámbito espacial, ya que nunca se ha llevado a cabo un proyecto con estas características.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es diseñar un modelo para estimar el número de componentes pasivos de la carga útil de un satélite de comunicaciones. Para realizarlo, se deberá desarrollar del diagrama de bloques de la carga útil de los diferentes tipos existentes de satélites. Por último se generará una lista con los satélites lanzados entre 2010 y 2014 en Europa donde se calculará el número de componentes pasivos mediante el modelo que se diseñará.

Así pues, los objetivos técnicos serán:

- Analizar y estudiar el mercado de los componentes pasivos en Europa.
- Crear una lista de los satélites lanzados entre 2010 y 2014 con la finalidad de la misión, el número de transpondedores y la capacidad total del sistema.
- Estudiar los componentes de la carga útil de un satélite así como su estructura interna.
- Investigar sobre el funcionamiento de los satélites tradicionales y de tipo *High Throughput Satellite*.
- Crear los diagramas de bloques de la carga útil de los satélites tradicionales y HTS.
- Estimar un modelo para calcular el número de componentes pasivos en los diferentes tipos de satélites.
- Generar una lista con el número de componentes pasivos de los satélites lanzados entre 2010 y 2014 en Europa.

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria que se expone en el presente proyecto ofrece la siguiente estructura. En primer lugar se realiza una explicación de los aspectos generales que son esenciales para ser capaces posteriormente de asimilar los conceptos más concretos del trabajo que se ha ido elaborando exponiendo en cada capítulo los objetivos y al final de ellos la conclusión a la que se ha llegado.

En el **capítulo 1** se realiza una introducción donde se explica en líneas generales cuál es la motivación que ha llevado al desarrollo de este proyecto, cuáles son las expectativas y los aspectos que se tratarán de solucionar. Además, en el Estado del Arte se explica cuál es la posición de Europa en el ámbito espacial actualmente, así como las empresas dedicadas a este sector y las publicaciones científicas sobre aspectos espaciales. Por otro lado, en este capítulo también se esclarecen los objetivos que se pretenden satisfacer en el presente proyecto.

El **capítulo 2** aborda aspectos relativos a la planificación y la estructura de la memoria donde se especifica cuál ha sido la metodología empleada para llegar al objetivo final. Se incluye aquí la gestión del proyecto, la distribución en tareas y el diagrama temporal.

En el **capítulo 3** se introduce el entorno en el que se va a desarrollar el proyecto. En primer lugar, se realiza una descripción de los satélites de comunicación. En esta parte se incluirá una descripción de la evolución del mercado donde se detallarán aspectos relativos al número de lanzamientos, la masa de los satélites, y otros detalles. Seguidamente se pasará a describir los diferentes tipos de satélites que existen actualmente, entre los que se encuentran los satélites tradicionales y los de tipo HTS. Después, se representará la tabla donde se listan los satélites

lanzados desde 2010 hasta 2014 en Europa con su misión, número de transpondedores, banda de frecuencia y capacidad total del sistema.

En este capítulo también se describirán los componentes hardware que están incluidos en la carga útil de un satélite de comunicaciones. Así pues, se empezarán describiendo las antenas y se verán aspectos relativos a la cobertura y los tipos de antenas que se pueden utilizar en un satélite. Se explicará también la amplificación de bajo ruido y la conversión en frecuencia. Además, se requerirá una descripción de los componentes pasivos del sistema entre los que están los filtros de entrada y salida y los multiplexores. Respecto a estos últimos se detallará la teoría de los multiplexores de entrada y salida así como las diferentes configuraciones que existen para estos dispositivos.

A continuación, se verán los diferentes componentes que habrá en la cadena de amplificación tales como el amplificador de canal y el amplificador de alta potencia. También se dedicará una sección para explicar los elementos redundantes.

Por último, en el **capítulo 4** se dedicará a explicar las características del diseño realizado. Se representará la carga útil del satélite tradicional y se expondrá cómo se ha llegado a ese resultado. Para el caso del satélite HTS se deberán explicar algunos aspectos previos referentes al funcionamiento de este tipo de sistemas y al final se presentarán los diagramas de bloques de la carga útil de este tipo de satélites. En la última sección se realizará un modelo para estimar los componentes pasivos tanto de los satélites tradicionales como los de tipo HTS. Y para finalizar, se expondrá una lista de los satélites lanzados desde el 2010 hasta el 2014 en Europa incluyendo la estimación del número de componentes pasivos que habrá en la carga útil de comunicaciones.

2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

En este capítulo se explica la estructura del trabajo desde su inicio hasta su fin incluyendo los cambios que se han producido a lo largo del desarrollo del mismo. En el primer apartado, *Gestión del Proyecto* se abordarán las distintas tareas del proyecto de manera genérica. En el apartado *Distribución en Tareas* se explicará cómo han sido distribuidas las tareas para realizar el proyecto. Finalmente, en el apartado *Diagrama Temporal* se incluirá un diagrama de Gantt para observar la distribución de las tareas del presente proyecto.

2.1 GESTIÓN DEL PROYECTO

En esta sección de la metodología empleada para la realización de este trabajo final de máster se presentará el planteamiento inicial así como la organización del mismo.

La iniciativa de este proyecto fue originalmente de un investigador senior del iTEAM, el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia de la Universidad Politécnica de Valencia que había trabajado para la Agencia Espacial Europea.

Tuvimos una reunión el 5 de Junio de 2015 con la tutora en el iTEAM y se nos informó de la necesidad imperativa de crear un modelo para la carga útil de comunicaciones de los satélites. Esta necesidad se había generado principalmente debido a la competitividad de las empresas en el sector espacial, lo que hacía que ninguna de ellas quisiera dar a conocer cómo estaba diseñada la *payload*.

En esta primera reunión se realizó una toma de contacto para explicar los objetivos del trabajo y entregar la documentación necesaria para comprender el proyecto. Sin embargo, debido a motivos laborales y académicos, el trabajo no se pudo comenzar hasta el mes de marzo del 2016. La finalización del proyecto se extendió al mes de septiembre para su presentación como fecha límite impuesta por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la UPV el día 14 del mismo mes.

Inicialmente, el planteamiento era el siguiente:

- *Diciembre y Enero*: creación de una lista de los satélites lanzados entre 2010 y 2014 en Europa.
- *Febrero y Marzo*: trabajo de investigación sobre los diferentes tipos de satélites, su estructura interna, los distintos componentes, teoría de componentes pasivos y otros elementos de la carga útil.
- *Abril*: creación de los diagramas de bloques de los diversos tipos de satélites existentes.
- *Mayo*: estimación de los componentes pasivos y elaboración de la lista de los satélites con la cantidad de componentes pasivos que alberga cada uno de ellos.
- *Junio y Julio*: redacción del proyecto y revisión.

No obstante, como se ha explicado anteriormente, el inicio se tuvo que posponer hasta el mes de marzo. Por lo tanto, el nuevo planteamiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

- *Marzo*: creación de una lista de los satélites lanzados entre 2010 y 2014 en Europa.

- *Abril y Mayo*: trabajo de investigación sobre los diferentes tipos de satélites, su estructura interna, los distintos componentes, teoría de componentes pasivos y otros elementos de la carga útil.
- *Mayo, Junio y Julio*: creación de los diagramas de bloques de los diversos tipos de satélites existentes.
- *Julio y Agosto*: estimación de los componentes pasivos y elaboración de la lista de los satélites con la cantidad de componentes pasivos que alberga cada uno de ellos
- *Junio, Julio, Agosto y Septiembre*: redacción del proyecto y revisión.

Cabe destacar que se realizó un trabajo de investigación muy importante debido a la escasa información a este respecto; de hecho, fue mediante el conocimiento de la teoría de las comunicaciones y los satélites además del uso de las capacidades técnicas, como se pudo llegar al resultado final del proyecto.

Mediante este último planteamiento se consiguió completar de manera satisfactoria todas las tareas necesarias para la correcta finalización del proyecto.

2.2 DISTRIBUCIÓN EN TAREAS

En este apartado se enumerarán las tareas específicas realizadas para llevar a cabo este proyecto final de máster. No se explicará en detalle el desarrollo de las mismas dado que se hará a lo largo de los siguientes capítulos de la memoria.

1. Lectura y comprensión de la información previa sobre el sector espacial en Europa.
2. Búsqueda de información acerca del mercado de los componentes pasivos en Europa.
3. Trabajo de investigación sobre el mercado de los satélites en Europa en los últimos cinco años.
4. Búsqueda de información sobre los satélites enviados en los últimos cinco años en Europa: bandas de frecuencia, número de transpondedores, tipo de satélite, objetivo de la misión.
5. Elaboración de la lista de satélites enviados en los últimos cinco años en Europa con sus diferentes características.
6. Trabajo de investigación sobre los componentes que integran la carga útil de un satélite de comunicaciones.
7. Estudio de la teoría y funciones de los componentes de la carga útil de comunicaciones de los satélites.
8. Búsqueda y análisis de la información disponible sobre los satélites de tipo *High Throughput Satellite* y tradicional.
9. Creación de los diagramas de bloques a nivel de sistema de la carga útil de comunicaciones de los diferentes tipos de satélites.
10. Realización de la cuenta de los componentes pasivos para los diferentes tipos de satélites.
11. Elaboración de la lista de satélites donde se incluye el número de componentes pasivos existente en cada carga útil de comunicaciones de los diferentes satélites.

2.3 DIAGRAMA TEMPORAL

En este apartado se realiza un diagrama de Gantt para observar más fácilmente la distribución de las tareas desarrolladas en función del tiempo.

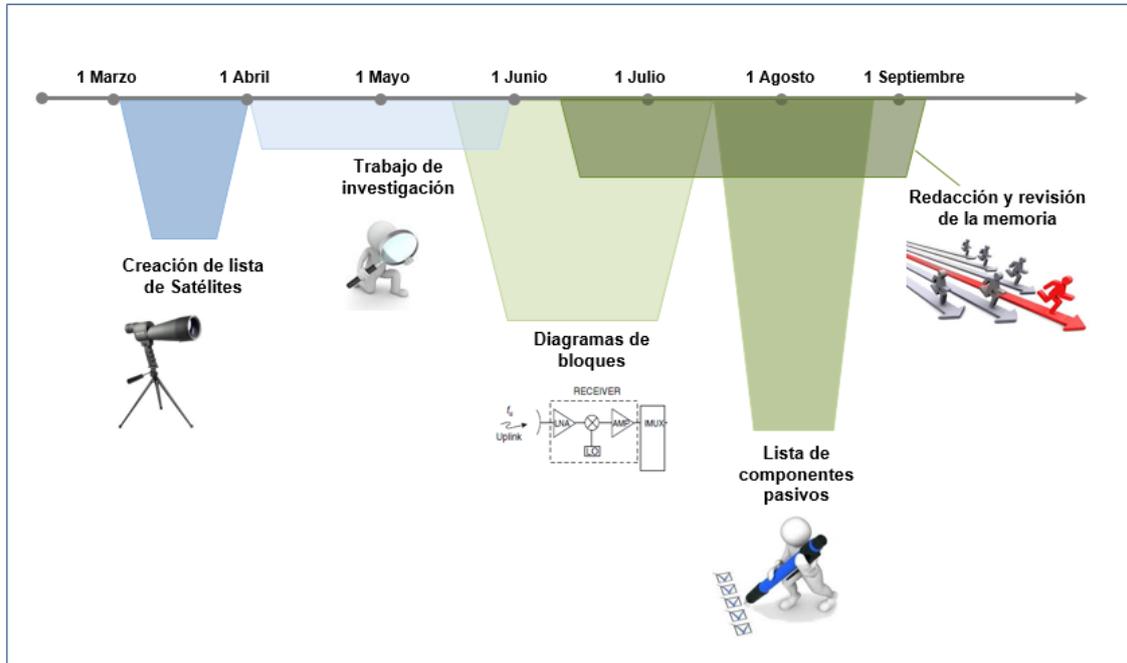


Fig. 2.1. Diagrama de Gantt

Cabe destacar que hay muchas tareas que se han podido realizar en paralelo como se puede observar en el diagrama de Gantt de la figura anterior. La tarea que más tiempo ha ocupado, ha sido la redacción y revisión de la memoria, no por su complejidad si no porque esta tarea se ha ido haciendo de manera transversal para no acumular el trabajo ya que habían muchos conceptos que explicar.

3 ENTORNO DE DESARROLLO

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SATÉLITES DE COMUNICACIÓN

Desde el lanzamiento del primer satélite en 1957, el Sputnik, se ha producido una evolución del sector espacial a gran escala. Desde la Guerra Fría hasta la actualidad ha variado tanto el concepto de satélites hasta la finalidad de los mismos.

En este apartado, se describirá la evolución del mercado de los satélites a lo largo de la historia para ser conscientes de la tendencia que sigue este sector. También se especificarán las características de los dos grandes tipos de satélites actuales, los satélites tradicionales y los HTS (una tecnología en auge que explicaremos más detalladamente a lo largo del capítulo). Finalmente, se presentará un estudio del número de satélites enviados desde el 2010 hasta la actualidad en Europa con el objetivo final de estimar el número de componentes pasivos necesarios para cada uno de ellos.

3.1.1 EVOLUCIÓN DEL MERCADO

La evolución del mercado de los satélites se puede enfocar desde varios ángulos. Por ello, en este análisis se utilizarán indicadores fiables y verificables tales como el número de satélites lanzados o la masa de los mismos. En el caso de los satélites de comunicaciones se utilizarán indicadores más específicos tales como el número de transpondedores o el ancho de banda.

Estimulada por la confrontación política entre USA y la Unión Soviética, la carrera espacial condujo rápidamente a excelentes resultados: el primer satélite artificial (Sputnik – 1957), primer hombre en el espacio (Yuri Gagarin – 1969), el primer paseo espacial (Alexey Leonov – 1965) y el primer paso en la luna (Neil Armstrong – 1969). Durante los diez primeros años la actividad espacial experimentó un aumento, sobre todo en 1964 donde se alcanzó un pico con un total de cien intentos de lanzamientos en todo el mundo, solo siete años después del primero. Sólo tres años después, en 1967, se alcanzó el mayor número de lanzamientos, 139.

Mientras el número de lanzamientos se mantenía entre 120 por año, la masa lanzada continuaba incrementando hasta llegar a un máximo de 590 toneladas en 1985. Finalmente, en 2004 y 2005 se consiguió un record mínimo con solo 187 toneladas lanzadas en 2004 y solo 54 intentos de lanzamiento en 2005.

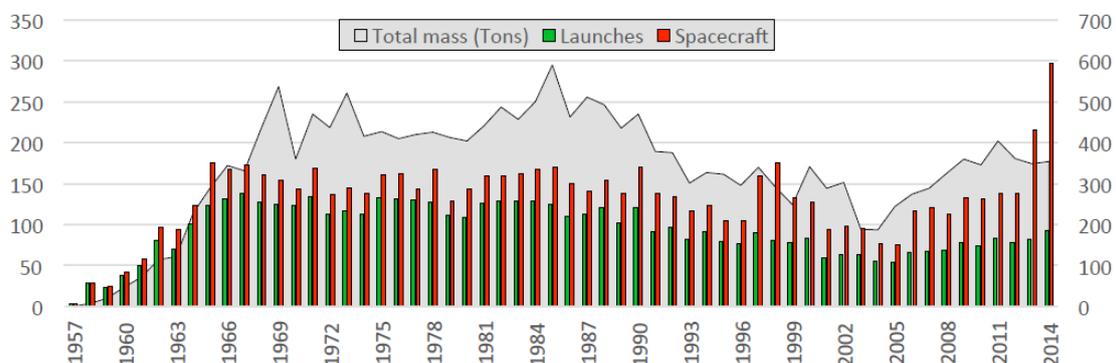


Fig. 3.1. Número de lanzamientos, satélites y masa total lanzada por año (1957-2014) [2]

Después de este periodo, el número de lanzamientos ha crecido lentamente hasta 2012 apoyado mayormente por la creciente actividad espacial china. En la siguiente figura se puede observar el aumento de los lanzamientos de satélites en 2013 y 2014. Este fenómeno se explica por la llegada de pequeñas plataformas de satélites (menores de 10 kg) permitiendo un aumento de los satélites lanzados. Una consecuencia paralela es la estabilización de la masa total lanzada en estos dos años, parando el crecimiento existente desde 2003.

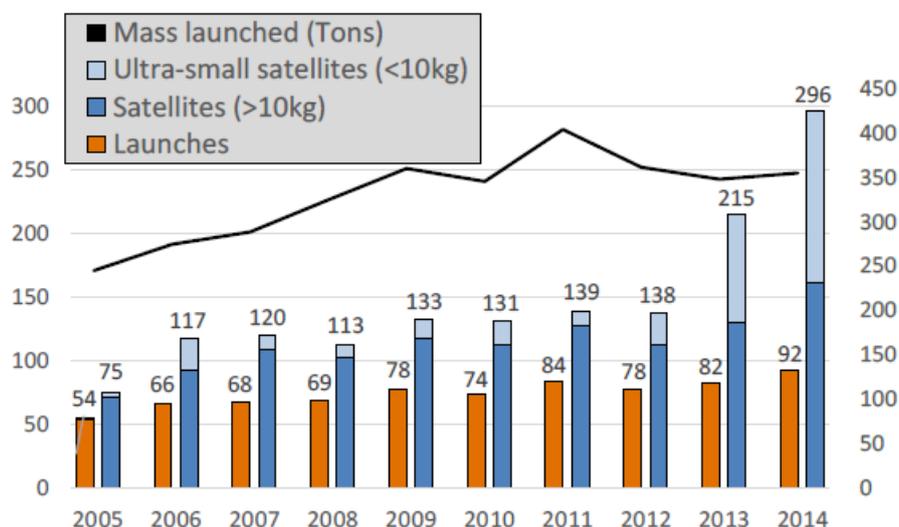


Fig. 3.2. Número de lanzamientos y satélites lanzados por año [2]

Entre 2005 y 2014, el número de lanzamientos se ha incrementado un 70% y la masa lanzada un 45%. En 2014, 92 lanzamientos pusieron en órbita 296 satélites. Este año se estableció como un nuevo récord en satélites lanzados (296) debido al incremento de satélites ultra pequeños (menores de 10 kg) entregados a órbita (135, un 45% de los satélites lanzados en un año). En términos de masa, la actividad se mantiene estable desde 2012 sobre unas 350 toneladas.

Con menos visibilidad que el famoso vuelo espacial tripulado y los logros científicos, las agencias espaciales y la industria estudiaron las posibilidades de utilizar el espacio para los servicios operacionales. Rápidamente, un amplio rango de sistemas se desarrolló con el objetivo de proporcionar nuevos servicios a los gobiernos, los militares, el sector privado y los ciudadanos. Hoy en día, el público utiliza diariamente los sistemas de telecomunicaciones, observación, meteorología y navegación. Además, también se utilizan los satélites para misiones más discretas o menos conocidas como el calentamiento global, la inteligencia electrónica, la retransmisión de datos, los radioaficionados, el estudio del entorno espacial, pruebas de lanzamientos o demostración de la tecnología entre otros.

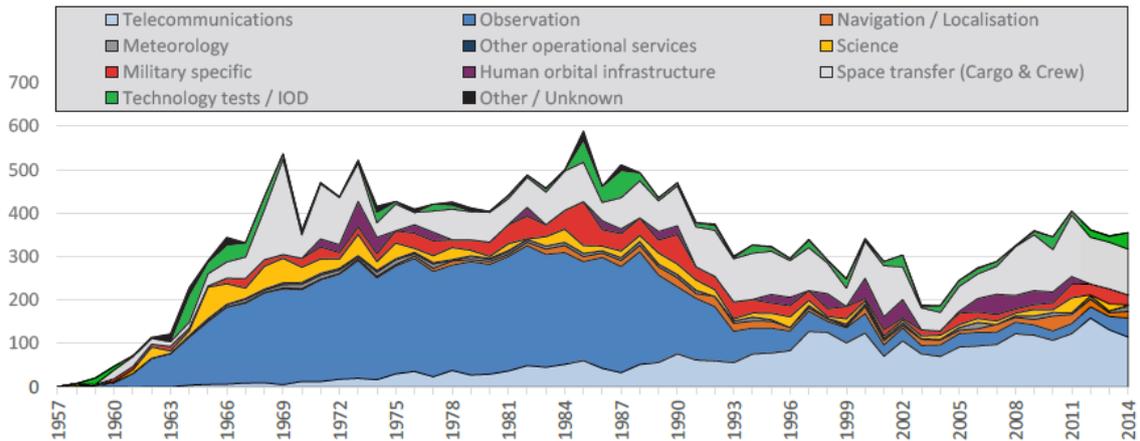


Fig. 3.3. Masa de los satélites lanzados (en toneladas) por categoría de misión (1957-2014) [2]

En la siguiente gráfica se puede observar el panorama europeo en los últimos años y cómo el sector de las telecomunicaciones es el más destacado. Concretamente, en 2014 los satélites de comunicaciones representaron en Europa un 71% de las 79 toneladas totales entregadas a lanzamientos. Considerando su proporción del total de masa lanzada, los satélites de comunicaciones son el núcleo de negocio de la industria satelital en Europa. Programas europeos como el Galileo o Copernicus son actualmente los principales impulsores de la demanda pública europea.

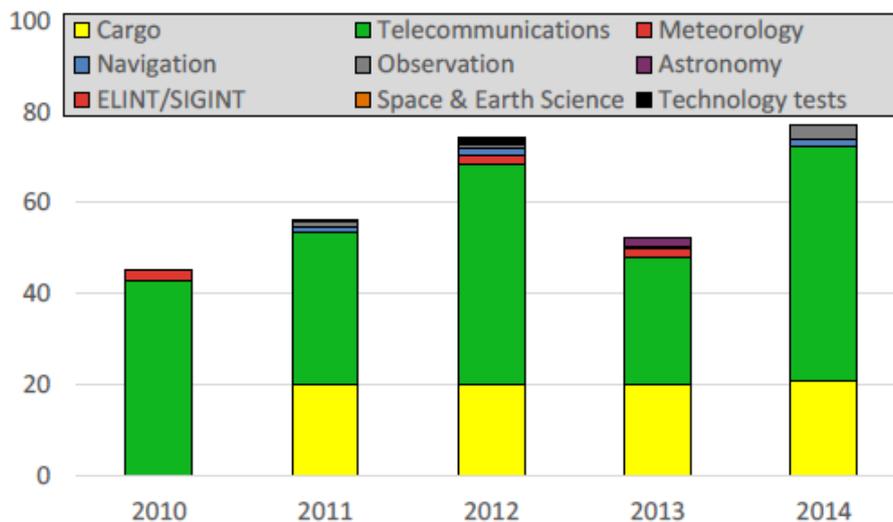


Fig. 3.4. Masa entrega por misión en Europa (en toneladas) [2]

Si nos centramos los últimos años (desde el 2010 hasta el 2014) podemos dividir la actividad espacial global en cuatro segmentos característicos de importancia comparable.

- *Satélites institucionales civiles*: este segmento incluye todos los satélites (excluyendo las naves espaciales tripuladas) adquiridos directa o indirectamente por entidades públicas civiles para proporcionar un servicio público.
- *Naves tripuladas y actividad relacionada*: todos los vuelos tripulados espaciales.
- *Satélites militares*: sistemas que proporcionan servicio específico militar.

- *Mercado comercial*: los satélites de esta categoría ofrecen servicios comerciales y/o son adquiridos con ofertas abiertas de competencia internacional. Estos representan el núcleo del mercado abierto.

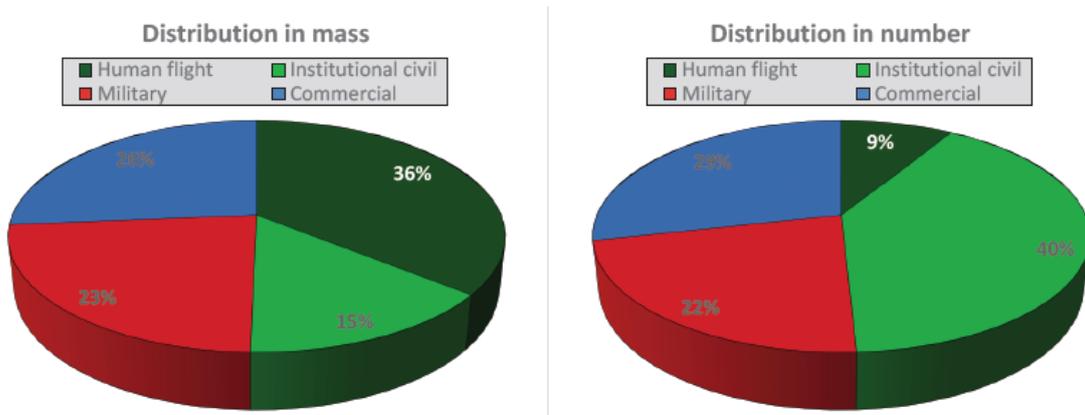


Fig. 3.5. Distribución de los satélites por segmento en masa (toneladas) y número (2010-2014) [2]

Las naves tripuladas y actividades relacionadas representan un 36% de la masa lanzada por programas institucionales durante los últimos cinco años. Las naves tripuladas necesitan de una nave muy pesada, esto explica el gran porcentaje en términos de masa (36%) en comparación al 9% del número de satélites lanzados.

También es interesante observar que los satélites militares exceden los civiles en términos de masa lanzada (23% para militares y 15% para el público civil).

Finalmente, los satélites comerciales, que son adquiridos por entidades privadas en su mayoría, representan actualmente más de una cuarta parte de la actividad espacial, en términos de masa y de número de satélites lanzados.

La figura anterior representa la distribución global de los satélites por segmento en masa en número. Teniendo estos datos, sería interesante observar cómo es la distribución en función de los diferentes países. No obstante, sólo algunos países tienen los medios necesarios para lanzar un satélite, en los últimos cinco años estos países han sido: Rusia, USA, Europa, China, Japón y la India, principalmente.

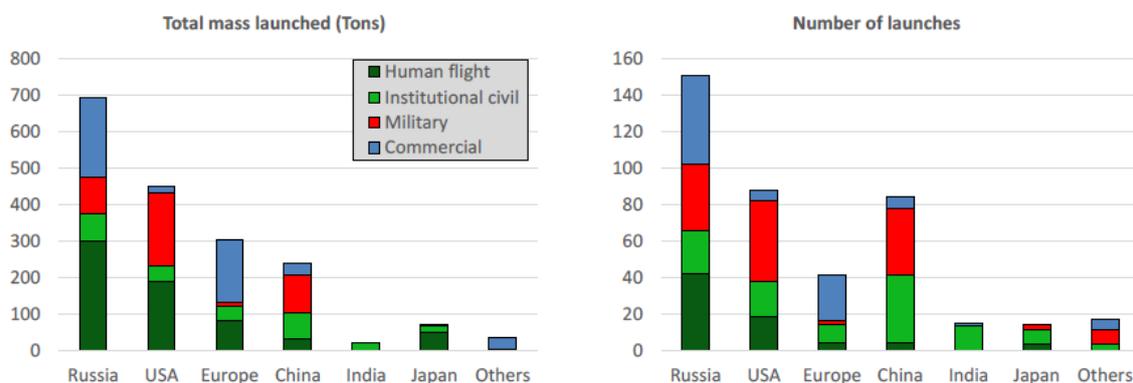


Fig. 3.6. Distribución de los satélites por segmento y región en masa y número (2010-2014) [2]

Estados Unidos, y en menor medida Rusia y China, mantuvieron una actividad militar significativa lo cual, combinado con su respectiva demanda civil institucional, moviliza una parte importante de sus capacidades de lanzamiento. Mientras el nivel de demanda pública civil es similar en Europa, la demanda miliar es mucho menor.

Destaca también en la figura que hay mucha más demanda en el sector de naves tripuladas en Estados Unidos y Rusia mientras que en Europa representa una cantidad mucho menor en comparación. La demanda de este sector en Europa es comparable a la de China o Japón, mientras que en el sector comercial Europa se distingue bastante de las demás, por encima de Estados Unidos incluso y a un nivel similar al de Rusia.

Otro aspecto interesante a tener en cuenta es la órbita de los satélites. Siendo las principales órbitas las que a continuación se describen:

- *LEO (Low Earth Orbit)*: órbita baja, entre 160 km y 2000 km sobre la superficie terrestre.
- *MEO (Medium Earth Orbit)*: órbita media, entre la órbita baja y la geoestacionaria.
- *GEO (Geostationary Earth Orbit)*: órbita geoestacionaria, a unos 35786 km sobre la superficie terrestre.

En la siguiente gráfica se puede observar la masa lanzada y el número de lanzamientos de satélites en función de la zona geográfica y la órbita del satélite.

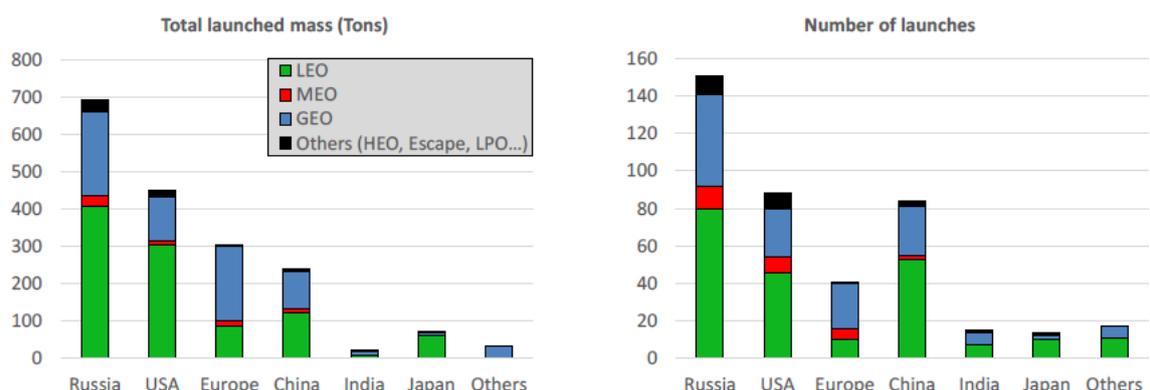


Fig. 3.7. Masa lanzada (toneladas) y número de lanzamientos por órbita (2010-2014) [2]

Como se puede apreciar las principales potencias espaciales son Rusia y USA y por detrás están China y Europa, en cuanto a número de lanzamientos. En cuanto a masa lanzada, Rusia y USA siguen en las primeras posiciones mientras que Europa adelanta a China. En lo que se refiere a las órbitas de los satélites la LEO y GEO están muy por encima de la MEO y de otras como la HEO ó LEO. En general, la órbita LEO es la más utilizada en Rusia, USA y China; sin embargo, en Europa la GEO supera significativamente a la órbita baja.

Centrándonos ahora en los satélites comerciales, especialmente en los posicionados en órbitas geoestacionarias, se obtienen los siguientes resultados:

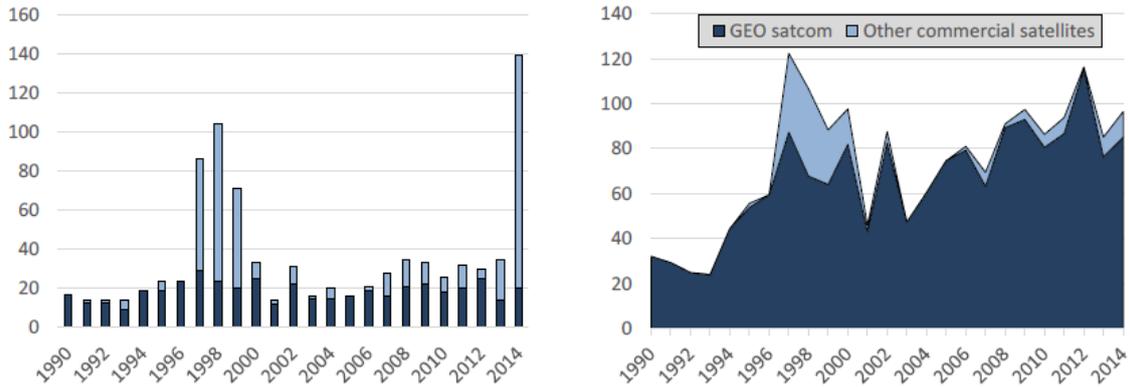


Fig. 3.8. Número y masa (toneladas) de los satélites comerciales por tipo (GEO satcoms vs otros) [2]

La masa lanzada de los satélites comerciales en órbita GEO para servicios telecomunicación creció continuamente desde 1993. Se multiplicó por cinco en veinte años pasando de 23 toneladas en 1993 a 112 toneladas en 2012, pero el número de satélites GEO no cambió significativamente y se mantiene sobre unos veinte por año.

Después de alcanzar un pico en 2012, la masa total disminuyó en 2013 y 2014 debido al alto número de satélites lanzados en 2013 y a la baja media de masa en 2014. En 2014 los GEO satcom representaban el 88% del mercado comercial total en términos de masa, pero también representaban el 24% de la masa total lanzada en 2014. En términos de número, sin embargo, los satélites GEO de telecomunicaciones (GEO satcoms) solo representaban un 12% de los satélites lanzados con una masa de más de 10 kg.

En 2014, el 67% de los lanzamientos GEO fueron satélites comerciales de telecomunicaciones. En el restante 23% se incluían satélites de telecomunicaciones institucionales (10%) y otras cargas útiles institucionales (13%).

El número de transpondedores operacionales a bordo de los satélites GEO de telecomunicaciones han crecido constantemente desde el año 2000. Las figuras siguientes muestran la evolución del ancho de banda GEO disponible por banda.

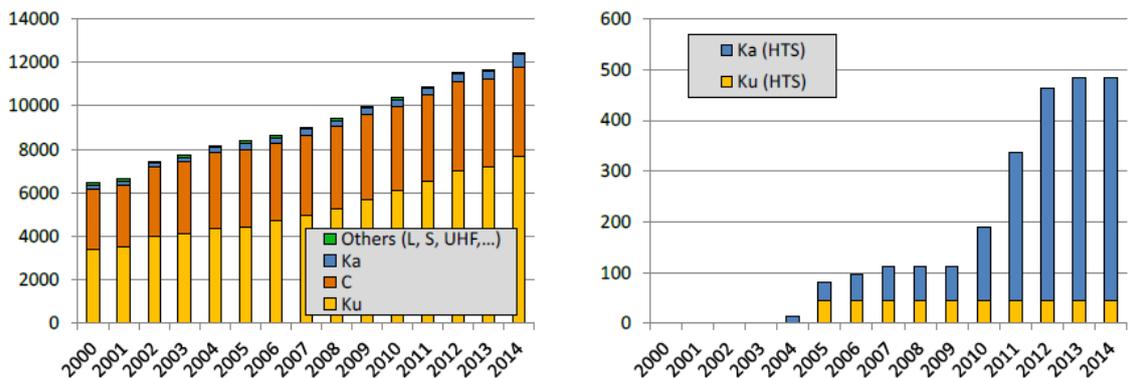


Fig. 3.9. Número de transpondedores operacionales por banda (izquierda) y *throughput* total disponible por HTS en Gbps (derecha) [2]

En la parte izquierda se representa el número de transpondedores operacionales a bordo de un satélite tradicional (en anchos equivalentes de 36 MHz). En la parte derecha el ancho de banda disponible por los nuevos satélites de alto rendimiento; (*High Throughput Satellites*, HTS) que se

explicaran con más detalle en los capítulos siguientes. Estos sistemas HTS usan principalmente la banda Ka para implementar tecnologías de reuso de frecuencia que permiten proporcionar un gran ancho de banda. El ancho de banda relativo Ku se mantiene estable: sólo un satélite HTS estaba usando la banda Ku para el servicio HTS.

Según la figura anterior, el crecimiento del número de transpondedores en GEO satcoms no se distribuye por igual entre la bandas de frecuencia. De hecho, mientras el número de transpondedores de banda C parece haber alcanzado su límite, la utilización de la banda Ku se disparó con la expansión de la demanda de los servicios de difusión. Recientemente, un nuevo servicio surgió con la introducción de los *High Throughput Satellites*. La tecnología utilizada en estos satélites permite el reuso del ancho de banda en múltiples haces y por lo tanto, incrementa drásticamente el rendimiento disponible. El principal servicio que propone HTS es el Internet por satélite. Sin embargo, también se pueden usar para proporcionar servicios de difusión. [2]

3.1.2 TIPOS DE SATÉLITES

Como se ha comprobado en el apartado anterior, los satélites se pueden clasificar según diversas cualidades. En función de la órbita en la que se encuentren podrían ser satélites en órbita GEO, LEO, MEO u otros. También se pueden catalogar dependiendo de la finalidad: satélites de telecomunicaciones, meteorológicos, de navegación, militares, de observación, científicos y de radioaficionado.

Sin embargo, en este capítulo se va a diferenciar entre los satélites tradicionales, es decir, los satélites de comunicaciones tradicionales con transpondedores de ancho de banda equivalente de 36 MHz y huellas extensas, y los satélites *High Throughput Satellite* con anchos de banda UWB (*Ultra Wide Band*) y tamaño de huella menor.

3.1.2.1 Satélite tradicional

En los satélites el objetivo final es realizar un enlace entre los usuarios que se encuentran en tierra y el satélite para poder cubrir una cobertura mayor. En la siguiente figura se muestra el enlace donde se puede apreciar que existe un enlace ascendente (desde tierra hasta el satélite) y otro descendente (desde el satélite hasta tierra).

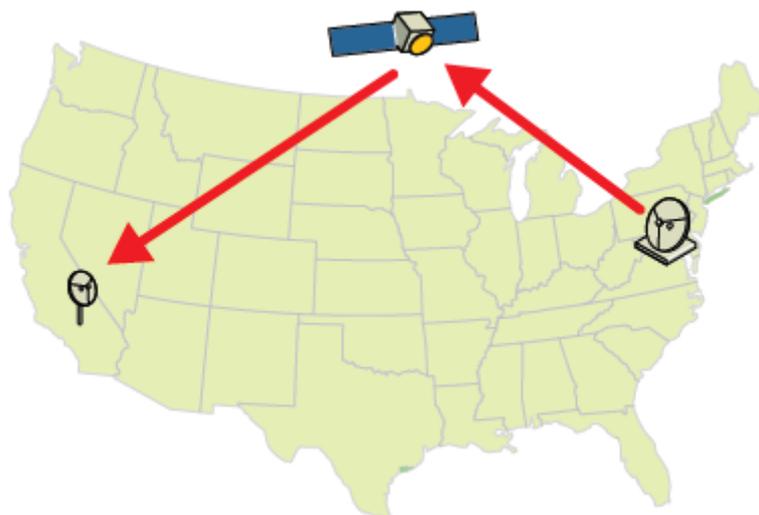


Fig. 3.10. Enlace satélite tradicional [4]

En general, un sistema de comunicación espacial está comprendido por dos segmentos principales: segmento espacial (satélite) y segmento terrestre (usuarios). A su vez, el segmento espacial se compone de:

- *Plataforma o bus*: subsistema estructural, subsistema de control térmico, subsistema de generación de potencia, subsistema de control de órbita y estabilización, subsistema de propulsión y el subsistema de posicionamiento, telemetría y comando (TT&C).
- *Carga útil o payload*: repetidor RF estructurado en transpondedores (amplifican y convierten en frecuencia).

La carga útil de los satélites de comunicaciones consiste en un equipo de radiofrecuencia que tiene las tareas de un repetidor que se llamará transpondedor. Existen dos tipos de transpondedores:

- *Transpondedor transparente o bent-pipe*
 - Amplifica con bajo ruido.
 - Convierte en frecuencia (al menos una vez por compatibilidad electromagnética).
 - Demultiplexa de entrada (IMUX) en canales.
 - Puede conmutar entre coberturas.
 - Amplifica en potencia.
 - Multiplexa de salida (OMUX).
- *Transpondedor regenerativo*: además de realizar todas las tareas anteriores
 - Pasa la señal digital a banda base, demodula y regenera.
 - En algunos casos enruta entre distintos caminos.

Uno de los principales problemas relacionados con los satélites es el balance de potencias, ya que debido a la gran distancia, las pérdidas son muy grandes. Por ello, se requiere una elevada ganancia de amplificador, elevada potencia de salida y gran número de portadoras. Esto supone que el amplificador trabaje en su zona no lineal, obteniendo así un elevado número de productos de intermodulación. Debido a esto, uno de los objetivos principales de los transpondedores es dividir el espectro en canales.

Estrictamente, un transpondedor es un camino de amplificación asociado a un canal de frecuencia, es decir, físicamente se asocia al amplificador de potencia (*Power Amplifier*, PA). El número de transpondedores define la capacidad del satélite en potencia y ancho de banda disponible. El plan de frecuencias indica los canales empleados, que dependen de la frecuencia reservada para su uso por parte de la ITU.

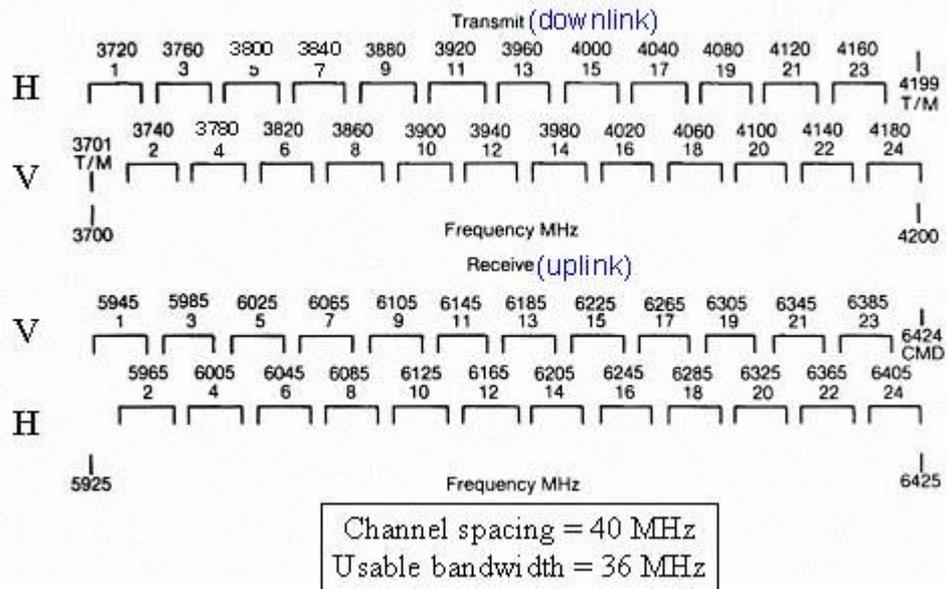


Fig. 3.11. Ejemplo de plan de frecuencias

[Imagen obtenida de Google images]

En la figura anterior se observa un ejemplo de plan de frecuencias donde el espectro está dividido en el enlace *uplink* y *downlink* y en cada enlace se tienen dos polarizaciones, vertical y horizontal. También se puede apreciar que el ancho de banda de los canales es de 36 MHz. Hoy en día, los transpondedores de 36 MHz son estándar para los satélites *bent-pipe*. Generalmente, los satélites transparentes son más utilizados que los regenerativos dado que tienen menos complejidad. [1]

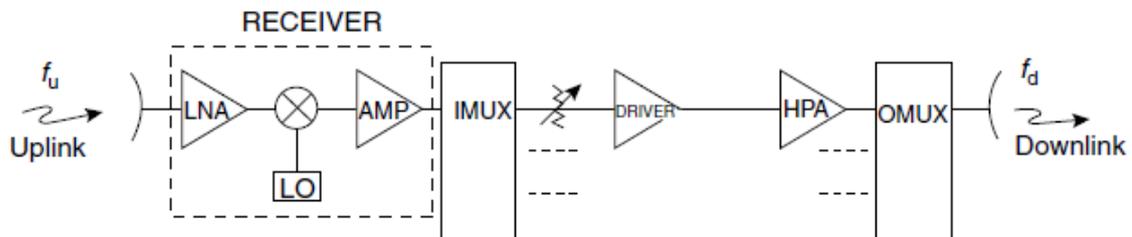


Fig. 3.12. Diagrama de bloques de un repetidor *bent-pipe* [1]

Los satélites transmiten la información dentro de bandas de frecuencia. Actualmente, las principales bandas de frecuencia en uso son banda C y banda Ku. En los últimos años, se ha incrementado el uso de una nueva banda de frecuencia, la banda Ka. En general, la banda C opera en el rango entre 4 y 6 GHz y se usa mayormente en servicios fijos como PSN, red troncal de Internet (*Internet Trunking*) y enlaces móviles. La banda Ku opera en el rango entre 11 y 14 GHz y generalmente se usa para servicios fijos como VSAT (Very Small Aperture Terminal), también Internet troncal y aplicaciones de distribución de vídeo. La banda Ka por otro lado, opera entre 18 y 30 GHz y se usa para aplicaciones de banda ancha. [3]

En el caso del satélite Intelsat por ejemplo, se usan la banda C y la banda Ku.

Por otro lado, cabe destacar también que el reuso por canal se obtiene del diseño hardware (se cuentan los PA activos por canal). Para aumentar el reuso de un canal se pueden emplear polarizaciones cruzadas y/o emplear distintas coberturas.

Así pues, por ejemplo en el caso concreto del Intelsat no sólo se tienen los dos spots propios de cada banda si no otros por emplear polarizaciones cruzadas y distintas coberturas (C-Band Global, C-Band Hemi, C-Band Zone, Ku-Band Spot).

3.1.2.2 High Throughput Satellite

Los satélites de tipo HTS representan una nueva generación de sistemas de comunicación por satélite, capaces de entregar una capacidad elevada en comparación con los satélites tradicionales. De hecho, estos satélites pueden ofrecer capacidades por encima de los 100 Gigabits por segundo (Gbps). [4]

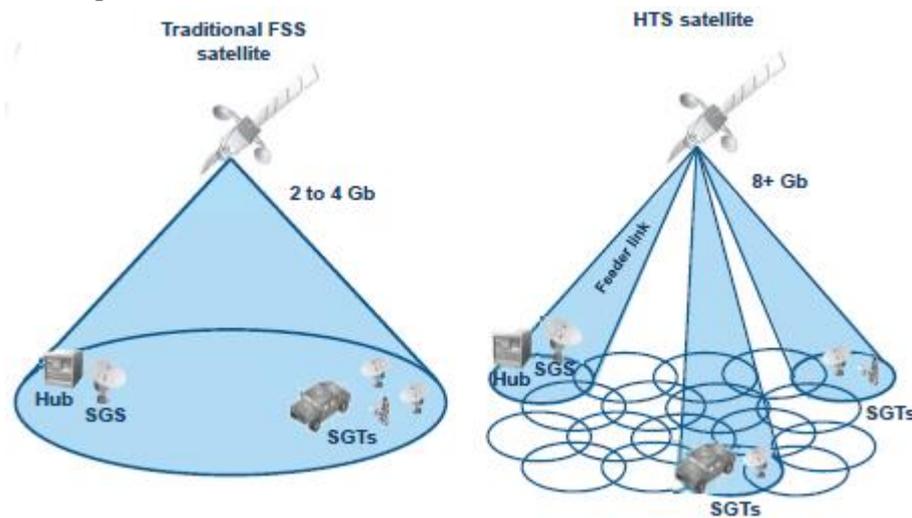


Fig. 3.13. Satélite tradicional vs. Satélite HTS [5]

Para conseguir esta capacidad tan elevada se requieren técnicas para mejorar la eficiencia espectral del sistema del satélite. Así pues, la principal diferencia con los satélites tradicionales es el uso de múltiples huellas para cubrir el área de servicio. De hecho, en los satélites tradicionales la huella es mucho mayor como se puede observar en la Figura 3.13, mientras que en el caso de los satélites HTS se tienen múltiples huellas de pequeño tamaño.

Estos haces pequeños ofrecen doble beneficio:

- *Elevada ganancia en transmisión y recepción*: la ganancia de una antena es inversamente proporcional a su ancho de haz, por lo tanto, cuanto más confinado esté el haz mayor potencia se tendrá (tanto en transmisión como en recepción). Por lo tanto, esto permite utilizar antenas de terminal de usuario más pequeñas. Además, si la potencia disponible es elevada se pueden usar esquemas de modulación y codificación de mayor orden (MODCODs). Estos altos MODCODs ofrecen una alta eficiencia espectral, definida como la tasa de bit transmitida por unidad utilizada de banda de frecuencia. Cuanto más elevada es la eficiencia espectral, más alta será la tasa de transmisión de datos por unidad de espectro orbital utilizado. Esta característica es muy importante debido a la saturación de posiciones orbitales así como las limitaciones de espectro disponible.

- *Frequency reuse*: las antenas de los satélites HTS tienen una alta directividad en cada una de las huellas, permitiendo que varios haces reusen la misma frecuencia. El factor de reuso de frecuencia usando haces estrechos separados es, en teoría, igual al número de haces si están lo suficientemente separados. Sin embargo, para cubrir continuamente una determinada zona se necesitan haces solapados, lo que implica el uso de diferentes frecuencias y polarizaciones en haces adyacentes para evitar las interferencias. [6]

En los sistemas HTS se define un esquema de reuso de frecuencia de cuatro colores con el objetivo de mejorar la eficiencia espectral del satélite. De esta manera se permite reusar las frecuencias con la mínima interferencia entre celdas adyacentes.

Los esquemas con mayor número de colores mejoran el aislamiento pero se reduce el ancho de banda por haz. Podría parecer que el reuso de frecuencia es ilimitado, aumentando el número de haces y reduciendo el tamaño de los haces. Sin embargo, existen limitaciones prácticas, incluyendo el número de antenas que se pueden montar en un satélite, la precisión del apuntamiento de la antena, la reducción del aislamiento entre haces creados por los lóbulos secundarios de la antena, las no linealidades en los amplificadores y convertidores de frecuencia, todo ello reducirá el rendimiento global del sistema. Por tanto, el diseño del sistema debe optimizar la reutilización de frecuencias así como el número de spot beams para conseguir el rendimiento más alto del sistema a un precio total más bajo. [4]

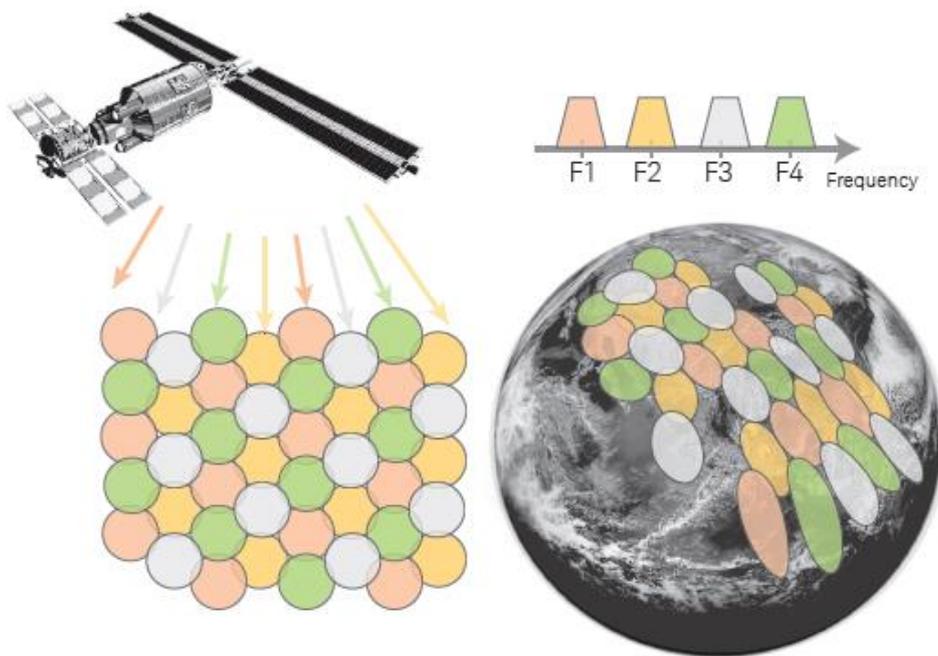


Fig. 3.14. Canal de frecuencias y distribución de haces en una zona geográfica con un sistema HTS [4]

En el esquema de cuatro colores, a cada haz se le asigna la mitad del ancho de banda disponible, y opera en una de las dos polarizaciones (RHCP y LHCP). En la figura siguiente se puede observar un ejemplo de cómo se realiza dicha asignación.

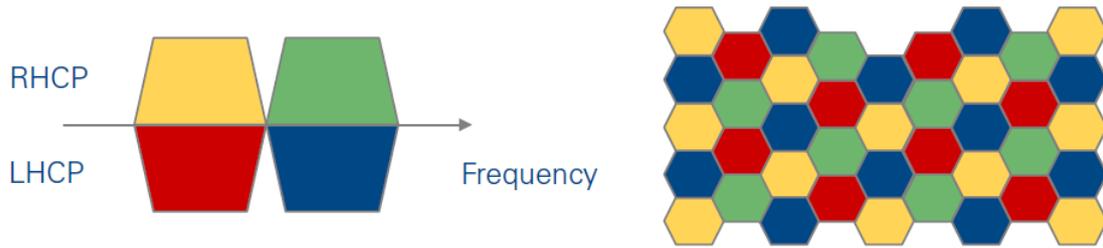


Fig. 3.15. Ejemplo del esquema de cuatro colores y la distribución de los haces proporcionando cobertura continua [6]

El beneficio principal del esquema de cuatro colores es que se consigue un ancho de banda equivalente igual al doble del ancho de banda asignado al satélite, debido a la reutilización de las frecuencias por polarizaciones ortogonales. [6]

Los sistemas HTS incluyen dos enlaces, el enlace forward y el return. El forward es el enlace entre las comunicaciones desde una pasarela (gateway) hasta los usuarios; mientras que el return es el enlace desde los usuarios hasta el gateway. En la figura siguiente se puede observar un ejemplo. [7]

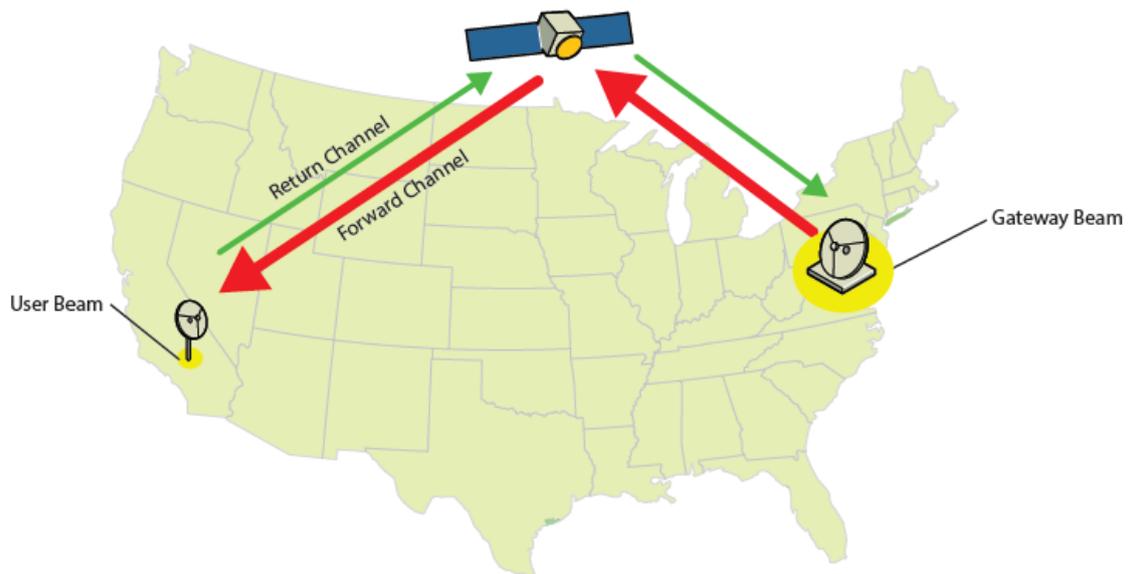


Fig. 3.16. Concepto enlaces forward y return de los sistemas HTS [7]

Los satélites HTS pueden ser desarrollados en diversas bandas del espectro de frecuencias, pero las principales son la banda Ku (más baja) y la banda Ka (más alta) [6]. Sin embargo, la más utilizada en los nuevos sistemas HTS es la banda Ka de frecuencias debido a que la asignación de las posiciones orbitales para otras bandas se ha agotado. Hoy en día, es extremadamente complicado encontrar slots orbitales viables comerciales de banda Ku por la ITU. Por esta razón, satélites con tecnología HTS como Eutelsat o Ka-Sat utilizan la banda Ka. [7]

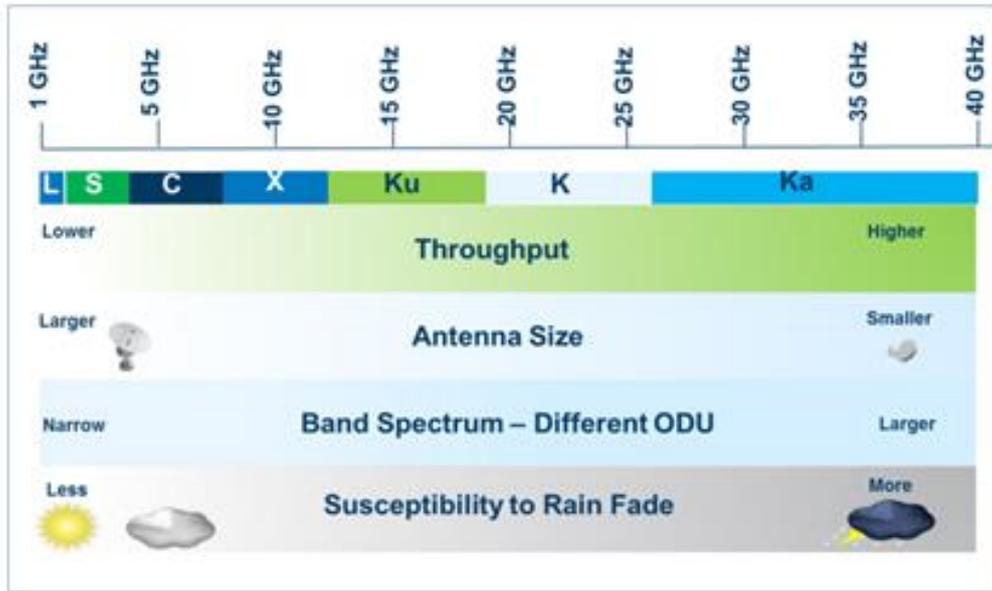


Fig. 3.17. Bandas de frecuencias

[Imagen obtenida de Google images]

En la figura anterior se representa la banda de frecuencias y se puede observar que la banda Ka es la más alta, como se ha comentado anteriormente, además de ser la que más rendimiento ofrece.

Los sistemas HTS combinan la eficiencia espectral y la capacidad de los spot beams con transpondedores de ultra ancho de banda (Ultra-Wideband, UWB) para ser capaces de entregar niveles sin precedentes de ancho de banda y rendimiento. Un HTS típico tiene un número significativo de transpondedores *ultra-wideband* distribuidos a lo largo de los haces, cada uno con un ancho de banda de más de 100 MHz. [8]

Por último, la mayoría de los satélites HTS usan arquitecturas de tipo *bent-pipe*, al ser más sencillas y deducir así la complejidad del sistema. En resumen, los sistemas HTS usan transpondedores *ultra-wideband* y transpondedores transparentes.

3.1.3 SATÉLITES LANZADOS 2010-2014

En este apartado se presenta una tabla con los satélites GEO de telecomunicaciones lanzados en Europa en el periodo 2010-2014. De cada uno de los 68 satélites presentados, se ha investigado acerca del tipo de servicio que realizan así como el número de transpondedores utilizados, el ancho de banda de los mismos y la banda de frecuencias en la que operan.

Satélite	Aplicación	Transpondedores comerciales y banda de frecuencia	Ancho de Banda total o GB para HTS
Astra 3B	Servicio de banda ancha (DTH TV) y servicio de difusión	60 Ku x 36 MHz 4 Ka x 33 MHz	2160 132
Arabsat 5B(Badr 5)	Servicio de banda ancha (DTH TV)	56 Ku + 4 Ka	

	(FSS y BSS)	Ku: 12x36MHz + 6x72MHz + 6x72MHz + 16x34MHz + 8x34MHz + 8x34MHz Ka: 4x36 MHz	2384 144
Arabsat 5A	Difusión, telefonía, Red troncal de Internet (FSS)	26 C + 24 Ku (FSS) 8 Ku: 2x72MHz + 2x36MHz 2x72MHz + 2x36MHz 16 C: 8x72MHz + 8x36MHz	288 864
COMS 1	Monitorización del océano, observación meteorológica y comunicaciones experimentales	1 Ka	100 (36)
Nilesat 201	DTH, radio y servicios de internet de banda ancha	24 Ku + 4 Ka Ku:33MHz(BSS),54MHz(FSS) Ka:33MHz (HTS)	792 132
Rascom QAF 1,1R	Televisión, teléfono y servicios de internet	8 Ku x 36MHz 12 C x 36MHz	288 432
Eutelsat W3B	DTH, servicios de internet	53 Ku x 36MHz 3 Ka	1908 -
Hylas I	Internet de banda ancha (Ka) y Difusión HD de TV (Ku)	2 Ku x 33MHz 8 Ka x 250MHz (flexible,HTS)	66 5
Ka-sat	Servicios de alto ancho de banda	82 Ka (HTS)	70
Koreasat 6	DTH TV	30 Ku x 36MHz	1080
COMSATBw 2	Comunicaciones militares	-	
YahSat 1A	Servicio de difusión y militar	C: 8x36MHz + 6x54MHz Ku: 25x33MHz	612 825
Astra 1N	Difusión DTH y HD TV	52 Ku FSS: 26 MHz BSS: 33 MHz	1576
Ekspress-AM 04	Servicio de difusión	C: 30 x 40 MHz Ku: 28 x 36 MHz Ka: 2 x 112 MHz 3 L x 36 MHz	1200 1008 224 108
ArabSat 5C	Servicio de difusión	C: 26 x 36MHz 12 Ka (HTS)	236 9
Atlantic Bird 7	Difusión DTH y servicios de internet	56 Ku (33,36,50,54 y 72 MHz)	3000
Eutelsat W3C	Difusión, telecomunicación y servicio de banda ancha	Ku:53 x 36 MHz 3 Ka	1908 --
Amos 5	Difusión y servicios de internet	C: 14x72MHz, 4x36MHz Ku: 16x72MHz	1152 1152
APStar 7	Difusión DTH y VSAT transcontinental y servicios de comunicación	C: 28 x 36 MHz Ku: 28 x 36 MHz	1008 1008
YahSat 1B	Servicio de difusión y militar	Ka: 25x110MHz (HTS)	15
Ekspress-MD2	Servicio de difusión	8 C	40

		1 L	1 (40)
Astra 2F	Difusión DTH, VSAT y servicio de banda ancha	60 Ku x 36 MHz 3 Ka x 500 & 600 MHz (HTS)	2160 1.5
Eutelsat 21B	Banda ancha y servicios de vídeo profesional	Ku: 40 x 36 MHz	1440
Star One C3	Difusión y Servicio de banda ancha	C: 28 x 36 MHz Ku: 16 x 72 MHz	1008 1152
Zhongxing 12	Difusión (DTH), transmisión de datos, banda ancha y servicios en streaming	C: 24 x 36 MHz Ku: 23 x 36 MHz	864 828
Eutelsat 70B	Banda ancha, difusión DTH, servicios gubernamentales	Ku: 48 x 36 MHz	1728
Yamal 402	Comunicaciones fijas y servicio de difusión	Ku: 12x72MHz, 18x36MHz, 16x54MHz	2376
Skynet 5D	Comunicaciones militares	X: 8 x 20MHz, 3x22MHz, 4x40MHz UHF	386
Eutelsat 3D	Servicio de banda anchas	Ku: 53 x 36 MHz 3 Ka	1908 --
SES 6	Servicio de difusión (distribución de vídeo HD y servicio móvil)	C: 38 x 36 MHz Ku: 36 x 36 MHz	1368 1296
Inmarsat-4 F4	Servicio de banda ancha	L band	-
Astra 2E	Difusión DTH, VSAT y servicio de banda ancha	Ku: 60 x 36 MHz Ka (HTS): 4 x 600 MHz	2160 2.4
Ekspress-AT 1	Servicio de difusión (DTH)	Ku: 32 x 36 MHz	1152
Ekspress-AT 2	Servicio de difusión (DTH)	16 Ku	--
Astra 5B	Servicio de difusión (DTH), BSS, DTTV y una carga en banda L para EGNOS	Ku: 40 x 36 MHz Ka: 6 x (500&600MHz) L band for EGNOS	1440 2000
Ekspress-AM 4R	Banda ancha y servicio de difusión	C: 30 x 36 MHz Ku: 28 x 36 MHz 2 Ka L: 3 x 33 MHz	1080 1008 -- 99
Eutelsat 3B	Servicio de banda ancha	30 Ku 9 Ka C: 12 x 68 MHz	-- -- 816
Measat 3B	DTH servicio de difusión	Ku: 48 x 36 MHz (44)	1728
ARSAT 1	Banda ancha y servicio de difusión	Ku: 12x36MHz, 8x54MHz, 4x72MHz	1152
Athena-Fidus	Comunicación militar	-	

Tabla 3.1. Satélites Europeos lanzados entre 2010 y 2014.

En la tabla anterior hay básicamente tres tipos distintos de satélites dependiendo de la carga útil.

Por un lado están los satélites completamente tradicionales como por ejemplo el Astra 3B que tiene 60 transpondedores en banda Ku de 36 MHz cada uno lo que supone un ancho de banda total de 2160 MHz y 4 transpondedores en banda Ka con un ancho de banda de 33 MHz cada uno, 132 MHz en total.

Por otro lado están los satélites híbridos entre tradicionales y HTS como el caso del Astra 2F. Tiene una carga útil tradicional con 60 transpondedores en banda Ku de 36 MHz de ancho de banda lo que hace un total de 2160 MHz. Sin embargo, también tiene una carga útil que utiliza el sistema HTS, donde hay 3 transpondedores en banda Ka con un ancho de banda de entre 500 y 600 MHz, lo que da una capacidad total del sistema de 1.5 GHz. Como se comentó previamente, los satélites HTS utilizan transpondedores de ancho de banda ultra ancho (*Ultra-Wideband*, UWB) con lo que es posible conseguir capacidades mucho mayores que en el caso del satélite tradicional.

El último tipo de satélites a destacar, es el que es totalmente HTS, como ocurre con el Ka-Sat. Este satélite se utiliza para servicios de alto ancho de banda debido a sus características. El Ka-Sat tiene 82 transpondedores en banda Ka que en total dan una capacidad al sistema de 70 GHz. Debido a su elevada capacidad, este tipo de satélites son usados para servicios que necesiten mucho ancho de banda, tales como los servicios de difusión y de Internet.

Es interesante también hablar de los satélites con propósito militar. Existen satélites que además de su carga útil comercial tienen otra dedicada a este fin, como son: YahSat 1A y YahSat 1B. En ambos casos la carga militar consta de 21 transpondedores en banda Ka con un ancho de banda cada uno de 54 MHz. Otros como el COMSATBw 2 y Athena-Fidus son únicamente militares. Debido al propósito que sirven, es muy difícil encontrar características específicas de este tipo de satélites, por lo que no existe apenas información acerca del ancho de banda o la banda de frecuencias que usan estos satélites.

3.2 COMPONENTES HARDWARE

Los componentes hardware que se pueden encontrar en la carga útil de un satélite son muchos y con diferentes características. Por ello, es necesario explicar con detalle cada uno de ellos para ser capaces de entender la función que desempeñan.

En la siguiente figura se representa el diagrama de bloques de un repetidor transparente con una única conversión en frecuencia. El equipo que opera en todo el ancho de banda del sistema constituye el receptor, que está formado por un amplificador de bajo ruido, un convertor de frecuencia y un amplificador. A continuación, se tiene un multiplexor de entrada que define el inicio de la sección de canalización, el canal y los amplificadores de alta potencia y finalmente, los multiplexores de salida.

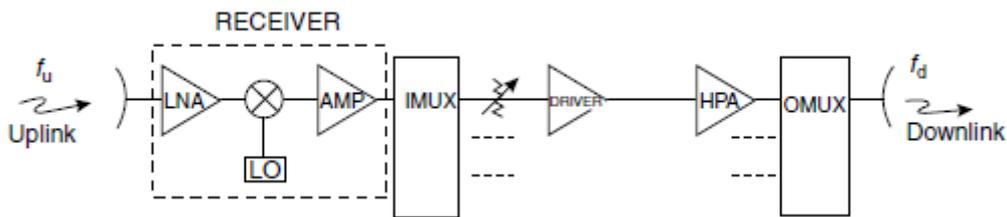


Fig. 3.18. Diagrama de bloques de un repetidor transparente con una conversión en frecuencia [1]

Es imprescindible para cualquier repetidor de satélite que se proporcione una elevada potencia de ganancia junto con una temperatura de ruido a la entrada baja y una salida de alta potencia sobre la banda ancha de frecuencias.

Cabe destacar que la estructura interna del repetidor se determina por la especificación de la misión y las restricciones tecnológicas. Además, en función del tipo de satélite el repetidor tendrá unas características u otras. Sin embargo, existen diversos componentes que estarán presentes en casi todos los satélites y por ello, en esta sección se procederá a explicar cada uno de ellos y sus funciones.

3.2.1 ANTENA

Las antenas que van embarcadas en el satélite tienen diferentes funciones. Una de ellas es recibir las ondas de radio transmitidas en una determinada banda de frecuencia y con una polarización dada por las estaciones de tierra, así como capturar el menor número de señales no deseadas como sea posible. Otro de sus objetivos es transmitir ondas de radio, en una banda de frecuencia y polarización determinada, a una región de la superficie de la tierra; por consiguiente, se debe transmitir la mínima potencia fuera de la región de interés.

El balance de potencia entre el satélite y la tierra depende de la PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente). En transmisión, la PIRE se incrementa con la ganancia de la antena transmisora. En la recepción, un elevado G/T para el satélite requiere un valor elevado de ganancia en la antena receptora. Un valor elevado de ganancia de antena se obtiene con una antena direccional. La directividad requerida depende de la cobertura que se pretenda dar en tierra. La alta directividad se asocia con un buen ajuste del haz a la zona que se desea cubrir, lo que permite el reuso de frecuencia por diversidad espacial y por lo tanto, hace más eficiente el uso del espectro. Este reuso de frecuencias requiere de antenas con lóbulos secundarios reducidos para limitar la

interferencia. El reuso de frecuencia también se puede conseguir usando polarización ortogonal. Se requiere un elevado valor de aislamiento de polarización para limitar la interferencia.

En resumen, las características más importantes de la antena son:

- Ajuste del haz a la región cubierta.
- Patrón de radiación de la antena con lóbulos secundarios reducidos.
- Alto aislamiento entre polarizaciones ortogonales.
- Apuntamiento preciso del haz. [1]

3.2.1.1 Cobertura

Es necesario definir el haz de la antena embarcada en el satélite ya que será el encargado de cubrir la zona de cobertura que se precise.

Esto depende de la naturaleza del objetivo especificado: generalmente esto significa lograr al menos una PIRE para la cobertura de transmisión y G/T para la cobertura de recepción especificada. Se debe hallar el haz que maximiza la ganancia en los puntos específicos al borde de la cobertura. En este caso, hay que señalar que, incluso si la ganancia de la antena es la misma para los puntos especificados al borde de la cobertura, la potencia recibida por las estaciones situadas en estos puntos difiere de una a otra. La distancia al satélite y el ángulo de elevación varía con la estación considerada; esto conduce a variaciones de las pérdidas en espacio libre y la atenuación atmosférica, respectivamente.

Existen diversos tipos de haces de antena que se usan para iluminar la región de la tierra dentro de la zona de cobertura:

- Haz de sección transversal circular.
- Haz de sección transversal elíptica.
- Haz conformado.
- Multihaz.

El haz de la antena no siempre abarca perfectamente la zona geométrica de cobertura. El haz de antena se caracteriza en diferentes planos por su anchura de haz de N dB, que se define por el ángulo sólido al borde del cual la ganancia ha disminuido en N dB con respecto a la ganancia máxima. Su representación en el mapa viene dada por la cobertura de radiofrecuencia o huella del haz.

La forma de la huella obtenida depende de la representación escogida. Por lo tanto, un haz de sección transversal circular aparece como una elipse cuando se representa en un plano si el eje del haz no es perpendicular al plano. En particular, con la representación en un plano tangencial a la tierra en el punto de proyección del satélite, un haz de antena de sección transversal circular está representado por un círculo si el eje de puntería coincide con la dirección del centro de la tierra. Para un satélite geostacionario, el ángulo entre el eje de puntería y la dirección normal del plano es al menos 8.7° y la distorsión es pequeña, del orden del 1%. [1]

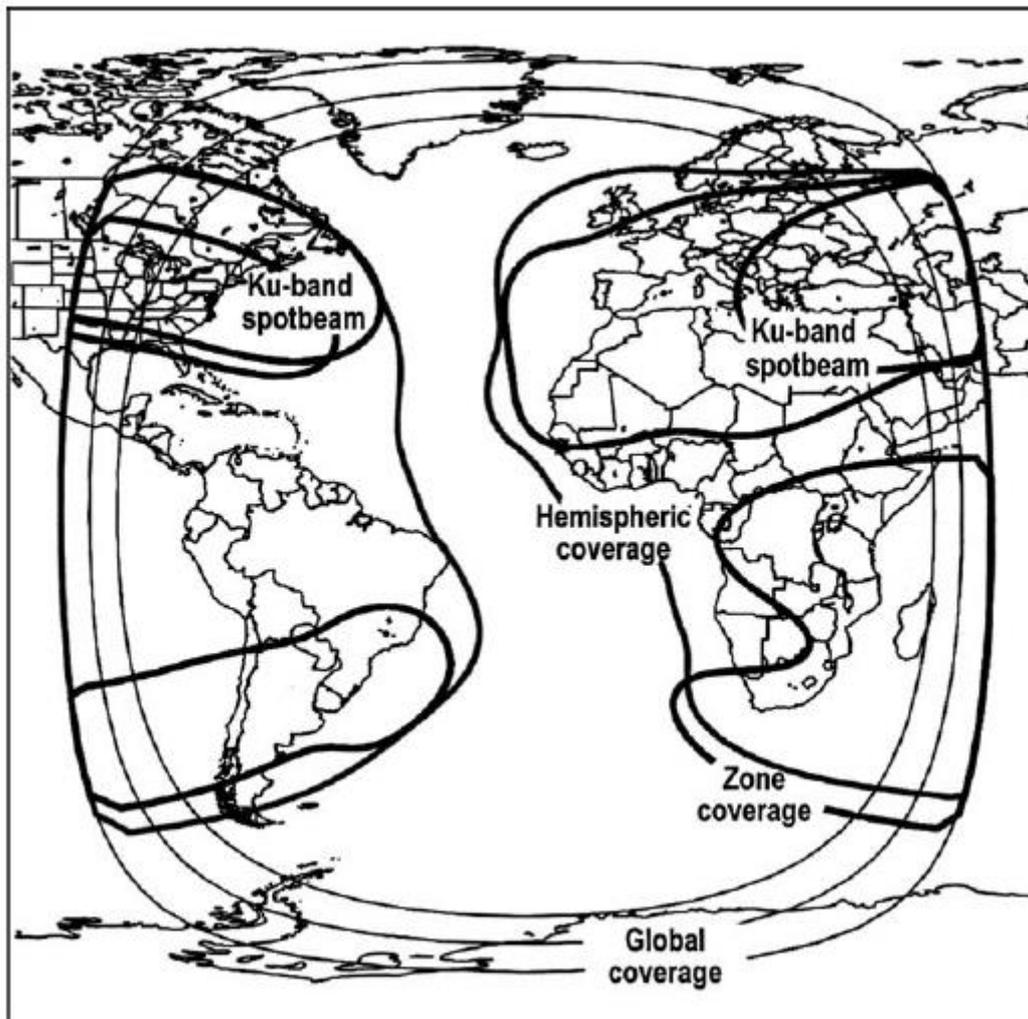


Fig. 3.19. Cobertura típica del satélite Intelsat [1]

3.2.1.2 Tipos de antenas

Las bandas de frecuencia utilizadas en los satélites de comunicaciones son tales que la longitud de onda es pequeña en comparación con el tamaño mecánico de la antena. Las antenas utilizadas son las de tipo apertura radiante: bocinas, reflectores, lentes y antenas de array.

3.2.1.2.1 Bocinas

Uno de los tipos más simples de antena direccional es la bocina. Es por ello que se utiliza mucho para dar cobertura global a la Tierra. A una frecuencia de 4 GHz, se obtiene un ancho de haz a 3 dB de 17.5 para una bocina cuyo diámetro de apertura es 30 cm. Un haz de anchura mayor requeriría una bocina con una apertura mayor y proporcionalmente mayor longitud con lo que sería difícil instalarlo en el satélite. Además, las bocinas tienen características muy pobres en los lóbulos laterales. Estas características se pueden mejorar mediante la corrugación (discontinuidades anulares) del interior de la bocina. La longitud de la bocina se puede reducir mediante el uso de un sistema de excitación, empleado por las antenas microstrip. Las bocinas, sin embargo, se usan actualmente como la alimentación primaria de las antenas reflectoras.

3.2.1.2.2 Antenas reflectoras

Este tipo de antenas es el más común usado para obtener haces directivos (*spot beams*) o haces conformados. La antena consiste en un reflector parabólico iluminado por uno o más elementos radiantes situados en el punto focal.

La técnica de fabricación de los reflectores normalmente consiste en unir dos capas de fibra de carbono impregnadas con resina en cada lado del núcleo de aluminio. Esta técnica permite obtener excelentes resultados en términos de precisión de realización del perfil, estabilidad dimensional y la rigidez, a pesar de las limitaciones mecánicas y térmicas. Las pérdidas de reflexión son bajas, menores a 0.1 dB en banda Ku.

Es posible modificar la dirección de apuntamiento del haz en órbita por telecomando, proporcionando a la antena de un dispositivo de control para la orientación mecánica del reflector. Con una antena de múltiples alimentaciones, el apuntamiento también se puede conseguir modificando la distribución de fase de la alimentación del elemento radiante.

- *Montaje de dos reflectores*: en un montaje de dos reflectores, el reflector principal es iluminado por un reflector auxiliar, el cual es iluminado por un elemento o elementos radiantes (montaje Cassegrain o Gregoriano, en función de si el reflector auxiliar es hiperbólico o parabólico). Un montaje de dos reflectores, debido a la compactibilidad de la antena obtenida, tiene una ventaja con respecto al montaje mecánico en una antena de satélite. En ciertos casos, también facilita el diseño de la antena (por ejemplo, para haces conformados).
- *Montaje offset*: los montajes simétricos sufren de bloqueo de la apertura por los elementos radiantes o el reflector auxiliar y sus soportes; esto conduce a una degradación de la eficiencia y un incremento del nivel de los lóbulos secundarios. El uso de una parte del reflector que está desplazado con respecto al eje principal de la parábola evita el bloqueo de apertura de la parábola (un montaje offset). La iluminación desplazada se puede usar con un montaje de uno o dos reflectores, esto se puede observar en la siguiente figura. El montaje offset también permite una integración más fácil de la antena en el satélite, en particular con grandes reflectores que requieren de plegado de la antena para la fase de lanzamiento.

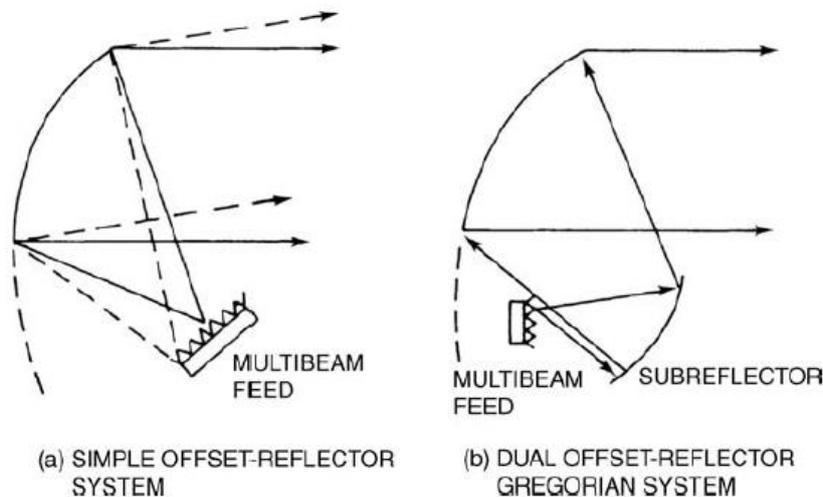


Fig. 3.20. Reflector de antena con montaje offset: (a) reflector simple y (b) reflector dual (Gregoriano) [1]

- *Reflector conformado (reflector contour shaping)*: un reflector de antena circular genera un haz de sección transversal circular. Un haz simple conformado se consigue modificando la forma del contorno del reflector. Por lo tanto, un reflector elíptico genera un haz de sección transversal elíptico. En la práctica, las aplicaciones se limitan a este caso. De hecho, un reflector de forma excesivamente complicada daría lugar a dificultades en la coincidencia del patrón de iluminación de la alimentación primaria ya que esto implicaría una baja eficiencia de iluminación y un alto nivel de los lóbulos secundarios.
- *Antenas multihaz*: mediante la colocación de un conjunto de elementos radiantes en el foco de la antena, es posible obtener un haz conformado o múltiples haces. Si el conjunto de elementos radiantes se alimenta desde la misma señal con una amplitud y distribución de fase particular, se obtiene un haz conformado. Esta distribución se obtiene por medio de un conjunto de desfasadores, acopladores y divisores (la red de conformación de haz, BFN, *Beam Forming Network*). Alimentar a las fuentes independientemente permite la generación de haces separados que son caracterizados por su frecuencia y polarización. En la próxima figura se puede observar la cobertura multihaz que se puede obtener. El tamaño del *array* en el foco se incrementa con el número de haces y eso hace que los alimentadores situados en el borde del *array* se sitúen lejos del punto focal; esto conduce a la degradación del diagrama de radiación correspondiente. Cuando el número de haces se hace grande, se puede obtener una reducción del número de alimentadores mediante la compartición de los alimentadores entre varios haces; un haz en una dirección dada se obtiene con la apropiada amplitud y distribución de fase de varios alimentadores.

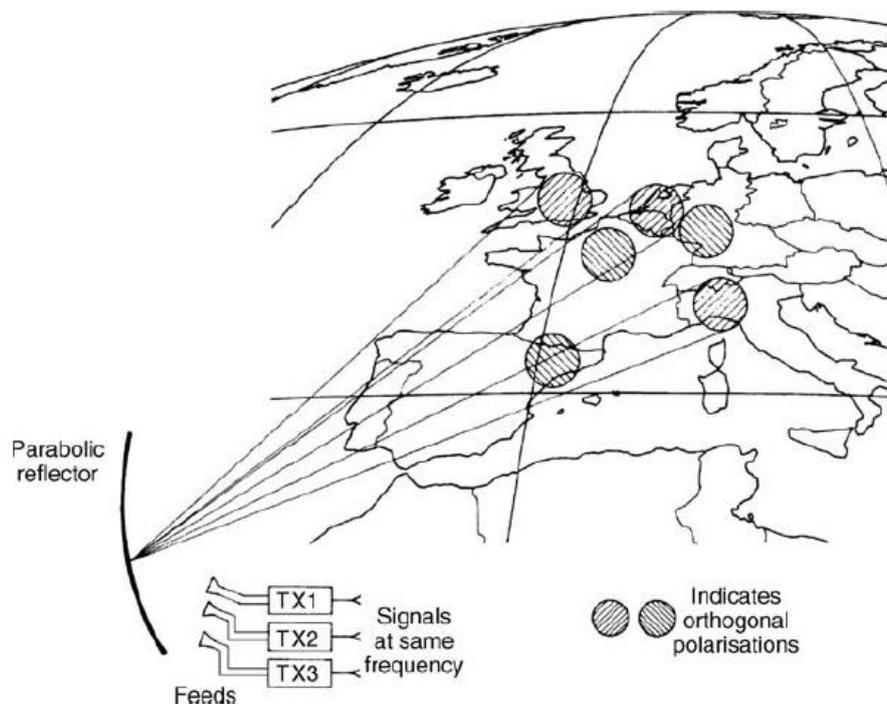


Fig. 3.21. Múltiples haces separados [1]

- *Reflector de superficie conformada*: la forma del haz se puede ajustar por la configuración de superficie del reflector, partiendo de un estricto perfil parabólico. Por ejemplo, es posible usar un reflector de forma circular cuyo perfil es parabólico en un plano y uno cilíndrico en el otro. El haz obtenido en este sentido ya no es de sección transversal circular pero es aproximadamente elíptico. La apertura sigue siendo circular y esto facilita la optimización de la iluminación.
- *Antena de doble rejilla*: para obtener un diagrama de radiación de la antena con alto aislamiento de la polarización, un enfoque consiste en usar un reflector que consta de una rejilla, es decir, un *array* de conductores paralelos a la polarización lineal requerida. Cuando la rejilla es iluminada por una onda radio, sólo el componente de campo eléctrico paralelo a la rejilla es reflejado. La corriente puede fluir solo a lo largo de los conductores y la componente ortogonal al campo no puede existir. La antena muestra una discriminación de polarización cruzada alta (típicamente 40 dB). Se pueden utilizar dos antenas separadas cuyas rejillas son perpendiculares para generar dos haces con polarización lineal ortogonal.
- *Reflectores dicroicos*: una superficie dicroica refleja las ondas radio dentro de una determinada banda de frecuencias y transparente fuera de esta banda. Para obtener una superficie, un *array* de dipolos cuyas dimensiones son características de la frecuencia a reflejar está dispuesta sobre un sustrato que es transparente a ondas electromagnéticas. Utilizando esta técnica, la antena tiene dos puntos focales que dependen de la frecuencia de operación. Esto permite que el mismo reflector se pueda usar en dos bandas diferentes de frecuencia.

3.2.1.2.3 Lentes

Las antenas de este tipo asocian uno o más elementos radiantes con una “lente” que enfoca la energía electromagnética radiada. Las antenas de lente tienen la ventaja fundamental con respecto a las antenas reflectoras simétricas de tener un array de alimentación situado detrás de la apertura radiante y esto elimina el bloqueo del haz. Esta característica es especialmente útil cuando se requiere un gran conjunto de alimentaciones de una red conformadora de haz con un elevado rendimiento para la creación de un elevado número de haces o un haz conformado de alto rendimiento, por ejemplo.

El principio de las lentes es producir un retardo de propagación que es máximo a lo largo del eje y se reduce hacia la periferia donde se convierte en cero. La onda esférica generada por la alimentación se transforma entonces en una onda plana.

Las lentes tienen una gran masa y volumen. Actualmente, su aplicación parece estar reservada a los satélites militares donde la capacidad de reconfiguración dinámica permite que se obtenga un patrón de radiación con una ganancia igual a cero en cualquier dirección particular con el objetivo de proteger contra la interferencia.

3.2.1.2.4 Arrays de antenas

Los *arrays* de antenas utilizan un gran número de elementos radiantes distribuidos sobre el área que constituye la apertura radiante. El patrón de radiación general resulta de una combinación en amplitud y fase de las ondas radiadas por el conjunto (*array*) de elementos. En principio, el funcionamiento del *array* es similar al de BFN (*Beam Forming Network*) situado en el foco de la antena reflectora. La diferencia reside principalmente en el número de elementos radiantes y el área de superficie; éstos están determinados por la ganancia requerida y el ancho del haz de antena que es radiada directamente por el *array*. Los elementos radiantes pueden ser bocinas, dipolos, cavidades resonantes, etc.

Típicamente, la distancia entre los elementos radiantes es del orden de 0.6λ . El patrón de radiación se ajusta modificando la fase y la amplitud de la señal de alimentación para los elementos radiantes mediante divisores de potencia controlables y desfasadores.

Con un *array* de antenas convencional, la potencia de entrada de la antena se divide con un típico amplificador de potencia. Obviamente, debido a la ley de reciprocidad, la antena funciona de una manera similar en recepción y se conecta un amplificador de bajo ruido a la salida del *array* del haz de conformación.

La eficiencia de la antena se determina por la ponderación de la amplitud en el borde del *array* y las pérdidas óhmicas en los divisores de potencia y desfasadores (desde uno hasta varios dB dependiendo de la complejidad). Las pérdidas óhmicas en la distribución de potencia constituyen un parámetro crítico.

Un haz conformado se obtiene mediante la alimentación de elementos radiantes con una particular amplitud y distribución de fase de la potencia disponible en la entrada de la antena. El control dinámico del haz se obtiene usando divisores de potencia controlables y desfasadores. [1]

3.2.2 AMPLIFICACIÓN DE BAJO RUIDO Y CONVERSIÓN EN FRECUENCIA

La conversión en frecuencia entre el enlace de subida y de bajada permite el desacoplamiento entre la entrada y la salida del repetidor. La reinyección de las señales radiadas por la salida en la entrada del transpondedor se puede evitar mediante filtrado.

La conversión en frecuencia es una de las primeras operaciones que se debe realizar sobre las portadoras de la antena (mediante un mezclador). Sin embargo, excepto en casos especiales, esta disposición no permite la especificación de la temperatura de ruido del sistema requerida para estar satisfecho debido a las altas figuras de ruido de los mezcladores. Además, es preferible dividir la ganancia de potencia entre dos conjuntos de unidades amplificadoras que operan con diferentes frecuencias de entrada y de salida. Esto permite que el peligro de inestabilidad, que es inherente a un amplificador de alta ganancia donde todas las etapas operan a la misma frecuencia, sea limitado.

Por lo tanto, el repetidor se compone en primer lugar de un amplificador de bajo ruido que proporciona el valor requerido de temperatura efectiva de ruido de entrada en la frecuencia del enlace de subida (*uplink*). Una elevada ganancia (de 20 a 40 dB) minimiza la contribución del ruido al mezclador que es seguido de un amplificado.

Un mezclador tiene asociado un oscilador local que proporciona la conversión en frecuencia (Figura 3.20a). La posición del mezclador en la cadena se determina por el nivel de la señal que se debe transformar para hacer frente a los efectos no lineales.

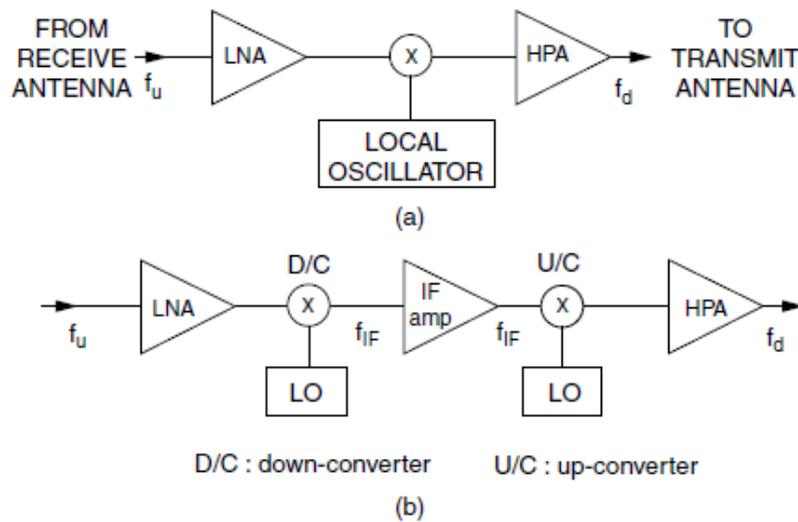


Fig. 3.22. Arquitectura del repetidor: (a) conversión única en frecuencia y (b) conversión doble en frecuencia [1]

Después de la conversión en frecuencia y teniendo en cuenta la ganancia del amplificador de bajo ruido y las pérdidas de conversión del mezclador, hay una cantidad de ganancia que no se entrega para obtener la ganancia total requerida. Dependiendo de las bandas de frecuencia, las consideraciones tecnológicas pueden hacer difícil obtener un elevado nivel de ganancia en la frecuencia del enlace descendente. En la conversión doble en frecuencia, se utiliza una frecuencia intermedia del valor inferior de la frecuencia del enlace descendente (Figura 3.20b). Las señales del enlace ascendente son las primeras en hacer la conversión en baja frecuencia a la frecuencia intermedia (unos pocos gigahercios) donde se realiza la amplificación. Un conversor a alta frecuencia entonces, traduce la frecuencia a la frecuencia del enlace descendente.

La conversión doble en frecuencia fue usada por los primeros satélites que operaban en banda Ku (14/12 GHz). Pueden continuar siendo apropiados para satélites que operan en banda Ka (30/20 GHz) y superior.

Los satélites multibanda prestan servicios internacionales de comunicaciones, como Intelsat, pueden tener una carga útil en banda Ku con conversión de doble frecuencia y una frecuencia intermedia de 4 GHz. Esta arquitectura es conveniente para la interconexión de la carga útil en banda Ku y la carga útil que opera en banda C (6/4 GHz) [1].

3.2.3 FILTROS

En el satélite, la función de los filtros es primordial dado que son los encargados de limitar el ruido en el ancho de banda y rechazar las señales que no se corresponden con las deseadas. Existen cinco tipos de filtros dependiendo de la banda de frecuencias que el filtro deja pasar.

- *Filtro paso bajo (LPF)*: este tipo de filtro permite pasar las bandas bajas de frecuencias, incluyendo DC y atenúa las frecuencias más altas.

- *Filtro paso alto (HPF)*: en este caso, el filtro atenúa las componentes de baja frecuencia mientras que deja pasar e incluso, en el caso de los filtros activos, amplifica las bandas de frecuencia más elevadas.
- *Filtro paso banda (BPF)*: estos filtros dejan pasar un rango de frecuencias de una señal (sin incluir DC) y rechaza las otras. Es el tipo de filtro más común en la carga útil del satélite. Un filtro paso banda se puede realizar mediante una combinación de un LPF y un HPF en cascada, aunque no es lo más común.
- *Filtro elimina banda*: deja pasar todas las frecuencias excepto las señales cuyas frecuencias se encuentran comprendidas entre las frecuencias de corte inferior y superior.
- *Filtro paso todo*: este tipo de filtros dejan pasar todas las frecuencias sin atenuación, es decir, con ganancia unidad [15].

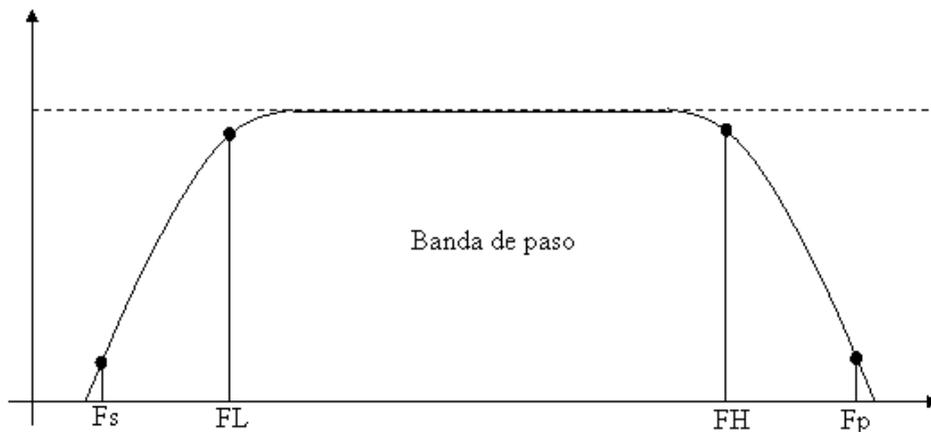


Fig. 3.23. Ejemplo de filtro paso banda (BPF) [15]

Las respuestas de los filtros más usadas en la carga útil son las Chebyshev, elípticas o cuasi elípticas. Probablemente, la Chebyshev es la más utilizada de estas tres puesto que es la más sencilla de implementar.

Un resonador en la carga útil del filtro puede tener forma rectangular o cilíndrica. El límite resonador contiene todos o casi todos los campos electromagnéticos en él. En teoría, el resonador tiene un número infinito de modos electromagnéticos resonantes, y cada modo se corresponde con una frecuencia de resonancia particular. Están determinados por la forma, las dimensiones, y la constante dieléctrica del material del resonador. Si se introduce una señal en el resonador, la porción de señal a estas frecuencias excitará el resonador, formando una onda estacionaria. El modo con la frecuencia más baja es el modo fundamental. Debido a que el resonador siempre tiene algunas pérdidas de RF, cada frecuencia de resonancia es en realidad una banda estrecha de frecuencias.

En general, un filtro se construye a partir de al menos un resonador, el número depende del número de polos deseado en el filtro y del número de modos de resonancia en cada resonador. Los resonadores están acoplados entre sí por un mecanismo que difiere con el tipo de filtro.

La disposición más simple de los resonadores es en una línea (en la literatura se conoce como configuración “en línea”, “longitudinal”, “coaxial” o “axial”) como se muestra en la figura siguiente para un filtro de guía de ondas, donde se observa que los filtros tienen un puerto de entrada y un puerto de salida. Los resonadores secuenciales están acoplados por el iris entre las cavidades.

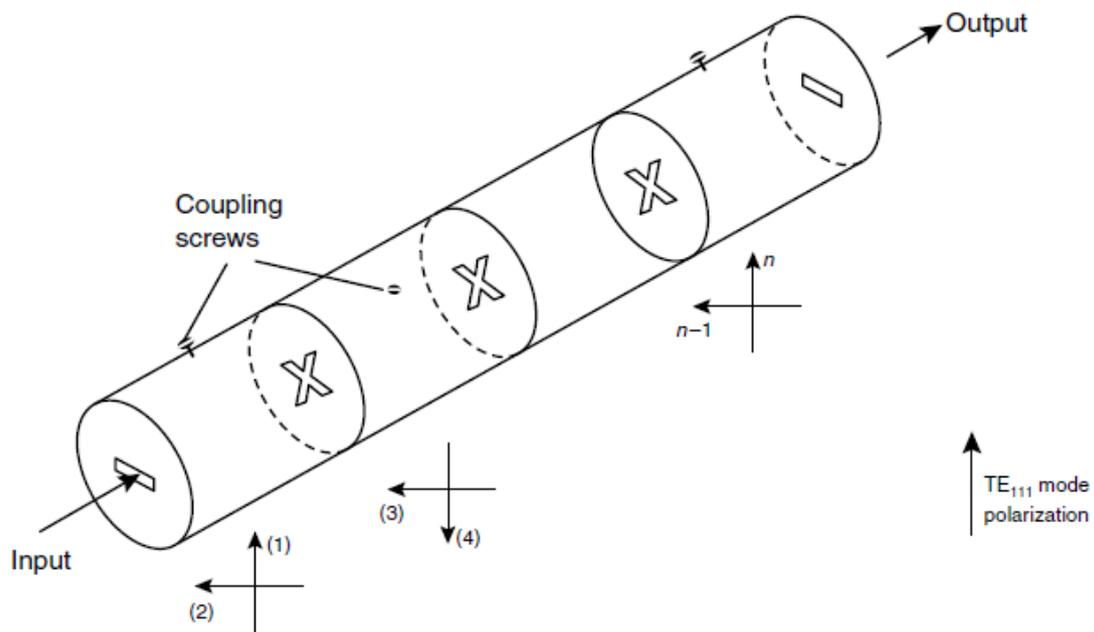


Fig. 3.24. Filtro de guía de ondas circular en configuración coaxial [1]

3.2.3.1 Filtros de entrada y salida

A la entrada del repetidor, lo primero que la señal se encuentra es el filtro preselector, el filtro de entrada, que está ubicado después de la antena y antes del amplificador de bajo ruido (LNA). Si la antena tuviese un diplexor, este filtro podría estar incluido dentro del diplexor.

El filtro de entrada, es un filtro paso banda que tiene dos objetivos fundamentales para proteger al LNA y al resto de la carga útil. Uno es atenuar las señales interferentes que pueden saturar el ancho de banda del amplificador de bajo ruido y llevarlo al punto de compresión. Otro es atenuar las señales interferentes que pueden tener más potencia que la señal de interés, para asegurarse de que las interferencias no pasan por los filtros de canal IMUX [15].

El filtro a la salida del repetidor, es un filtro paso banda que elimina los armónicos generados por las no-linealidades de los elementos y proporciona un aislamiento adicional al repetidor de entrada-salida.

Los filtros de entrada y salida deben introducir unas pérdidas de inserción lo más bajas posibles para las señales útiles. Unas pérdidas de inserción altas en la entrada del repetidor pueden degradar la figura de mérito del repetidor G/T; mientras que unas pérdidas de inserción altas a la salida pueden causar una reducción de la potencia isotrópica radiada, PIRE [1]. En cualquier caso, unas pérdidas de inserción elevadas hacen que se reduzca el rendimiento del sistema.

3.2.4 MULTIPLEXORES

En la carga útil del satélite se debe realizar la división de la banda de frecuencia en un número de canales. Es necesaria esta división en canales debido a las limitaciones prácticas de las no linealidades y los efectos de ruido en amplificadores de alta potencia, lo que permite obtener el nivel requerido para las señales transmitidas. La división en canales, y por tanto la recombinación llevada a cabo se realiza mediante multiplexores de entrada y de salida [16].

Un multiplexor es un elemento pasivo que se usa para combinar señales a diferentes frecuencias a partir de diferentes fuentes en una sola salida (OMUX) o para enrutar señales de una sola fuente a diferentes salidas de acuerdo con la frecuencia de la señal (IMUX). Los multiplexores se configuran como filtros paso banda de alta selectividad interconectados. Existen diferentes arquitecturas dependiendo de la técnica de interconexión utilizada [1].

Estos multiplexores están compuestos esencialmente de filtros estrechos paso banda de microondas (con anchos de banda relativos entre 0,2% y 2%). Además, para seleccionar la banda de frecuencia de interés, así como evitar interferencias entre los diferentes equipos, se incluyen filtros de entrada y salida con anchos de banda moderados (más del 10%) [16].

3.2.4.1 Multiplexores de entrada

El multiplexor de entrada (IMUX) es el encargado de dividir el ancho de banda total del sistema en diferentes sub-bandas. Los filtros paso banda del mismo definen el ancho de banda en varios canales. La configuración típica de un IMUX incluye un conjunto de filtros paso banda alimentados mediante circuladores.

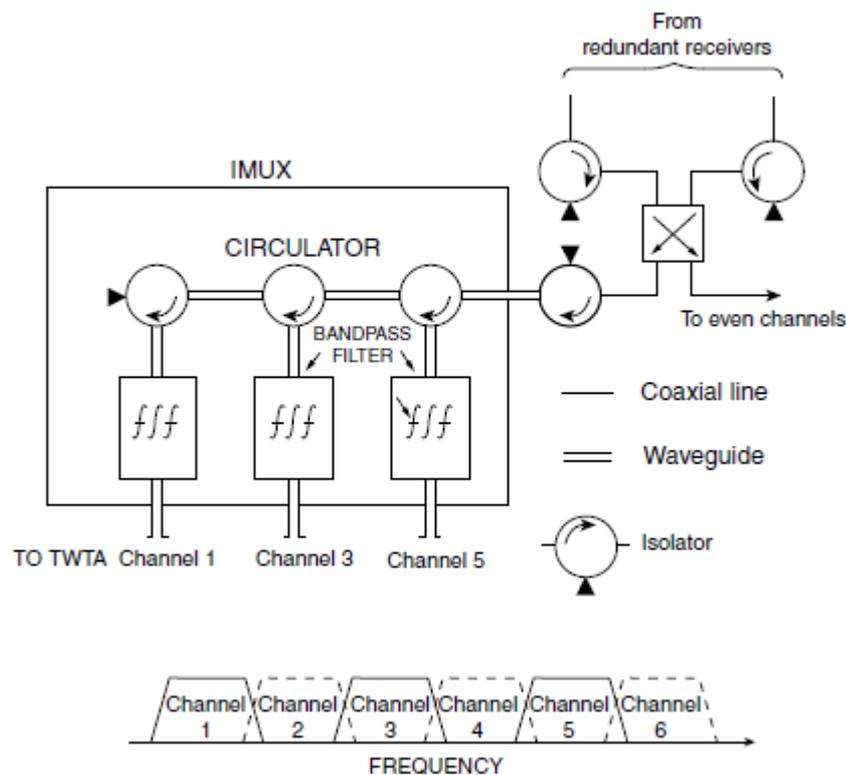


Fig. 3.25. Organización de un multiplexor de entrada (IMUX) [1]

En la Figura 3.25 se muestra un ejemplo de la estructura interna de un multiplexor de entrada. Como puede observarse, los canales están organizados en dos grupos, canales pares e impares. Por tanto, el IMUX está dividido en dos partes que comparten la potencia disponible en la salida del receptor a través de un híbrido. Así mismo, el híbrido también permite que las señales entregadas al IMUX provengan del receptor redundante, evitando así la selección mediante un interruptor.

Las pérdidas en un multiplexor dependen del número de veces que la señal pasa a través del circulator y del número reflexiones en los filtros paso banda de entrada (las pérdidas por

elemento son del orden de 0.1 dB). Así pues, las pérdidas difieren de un canal a otro y son máximas para el canal más alejado del IMUX. La división del IMUX en varias partes permite que la diferencia en las pérdidas entre canales se reduzca. Estas pérdidas además no son críticas dado que el amplificador de canal las compensa [1].

3.2.4.2 *Multiplexores de salida*

Los multiplexores de salida (OMUX) recombinan los canales después de la amplificación de potencia. A diferencia del multiplexor de entrada, las pérdidas en los OMUX son críticas ya que implican directamente la reducción de la potencia radiada. En lugar de utilizar circuladores, que introduce pérdidas, la salida acoplada de los filtros paso banda se consigue montando los filtros en una guía de onda común (un conector) uno de cuyos extremos es cortocircuitado. La salida de cada filtro, acoplado a la guía de onda común a través de un iris, origina un cortocircuito para las señales fuera de banda que se originan de otros canales. Las características de cada filtro por lo tanto influyen en el funcionamiento de todo el sistema debido a las interacciones.

El diseño y optimización de los OMUX es difícil, sobre todo si se tiene una banda de guardia muy estrecha entre canales. Anteriormente, se organizó la canalización en canales pares e impares dejando una banda de guardia entre cada canal con un ancho igual para cada canal de cada grupo, esto implica restricciones menos severas en la especificación de los OMUX asociados con cada grupo de canales. Las últimas investigaciones han hecho posible el diseño de multiplexores de canal adyacente, que son actualmente utilizados en los satélites.

Para diversas aplicaciones se han propuesto multiplexores con filtros sintonizables. La frecuencia de cada canal se cambia por telecomando ajustando la frecuencia de resonancia de los filtros paso banda que utilizan un dispositivo de sintonización [1].

3.2.4.3 *Configuración de los multiplexores*

El diseño de los multiplexores se puede llevar a cabo mediante diversas técnicas: multiplexores híbridos acoplados, multiplexores circuladores acoplados y multiplexores *manifold* acoplados [19].

Multiplexores híbridos acoplados. En esta configuración, la señal compuesta de banda ancha se divide en dos caminos iguales por medio de un híbrido de 3 dB hasta que el número de caminos sea igual al número de canales.

Los filtros de canal se colocan al final de cada camino con un aislador en su entrada. En la siguiente figura se muestra un típico multiplexor de entrada de 5 canales basado en esta configuración. La ventaja de esta topología es que el diseño de los filtros es sencillo y la interacción con los canales es muy pequeña. La desventaja principal es que tiene unas pérdidas de inserción muy altas. Un híbrido típico suele tener unos 3.5 dB de pérdidas de inserción. [19]

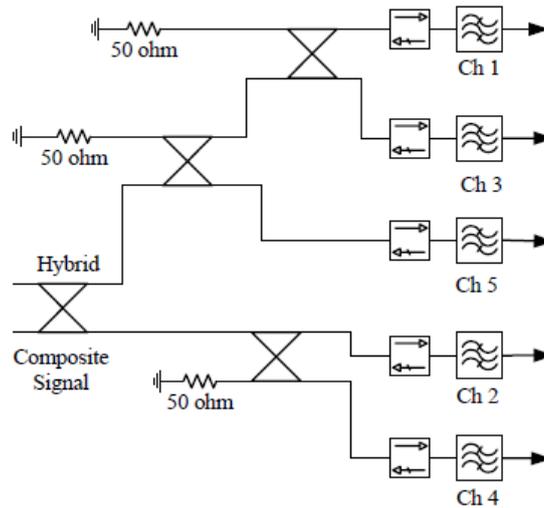


Fig. 3.26. Diagrama de un multiplexor híbrido acoplado de 5 canales [19]

Multiplexor de circulator acoplado. A la entrada, el híbrido divide la señal en dos ramas. El circulator situado al principio de cada rama, dirige la señal compuesta a la entrada del primer filtro de la rama. Este filtro permite que la señal correspondiente a su banda de paso y los canales restantes que son reflejados en la región de banda de parada (*stopband*) de los filtros. La señal reflejada se dirige hacia el siguiente circulator/canal y así sucesivamente, hasta que todos los canales restantes terminan en una carga al final de la cadena.

La configuración utiliza todas las ventajas de la topología del híbrido acoplado con unas pérdidas de inserción mucho más bajas. Debido a la gran diferencia de frecuencia entre los canales no adyacentes de cada rama, la degradación por las reflexiones de los canales es mínima [19].

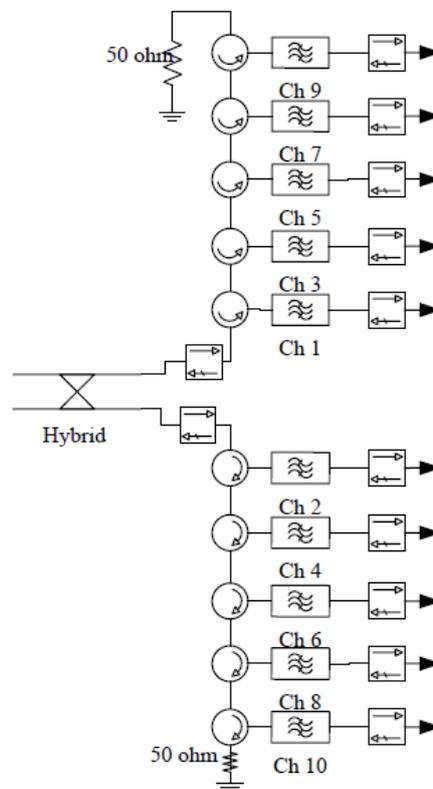


Fig. 3.27. Diagrama de un multiplexor de circulator acoplado de 10 canales [19]

Multiplexor manifold acoplado. Son utilizados donde los requisitos de tamaño y pérdidas de inserción absolutas son muy críticos. Los filtros de canal se colocan en un colector, que es una guía de onda larga, y las interacciones entre canales son compensadas durante el diseño del multiplexor, por lo general en la optimización. Esta aproximación no es susceptible al cambio en el plan de frecuencias y la implementación del multiplexor se vuelve más complicada conforme aumenta el número de canales. Cualquier cambio en las especificaciones del filtro requiere un nuevo diseño del multiplexor. El multiplexor basado en esta configuración se muestra en la siguiente figura [19].

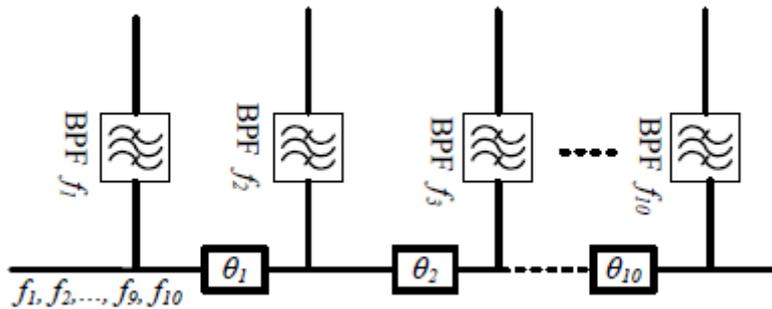


Fig. 3.28. Diagrama de multiplexor manifold acoplado de 10 canales [19]

3.2.5 CANALIZACIÓN DEL REPETIDOR

La propuesta de la canalización del repetidor consiste en crear canales (sub-bandas) de anchura reducida. Debido a que el número de portadoras en cada sub-banda es menor, el ruido de intermodulación generado por la etapa de amplificación de la sub-bandas es mucho menor que el ruido de intermodulación que se generaría si el estado de amplificación tuviera el ancho de banda total del sistema.

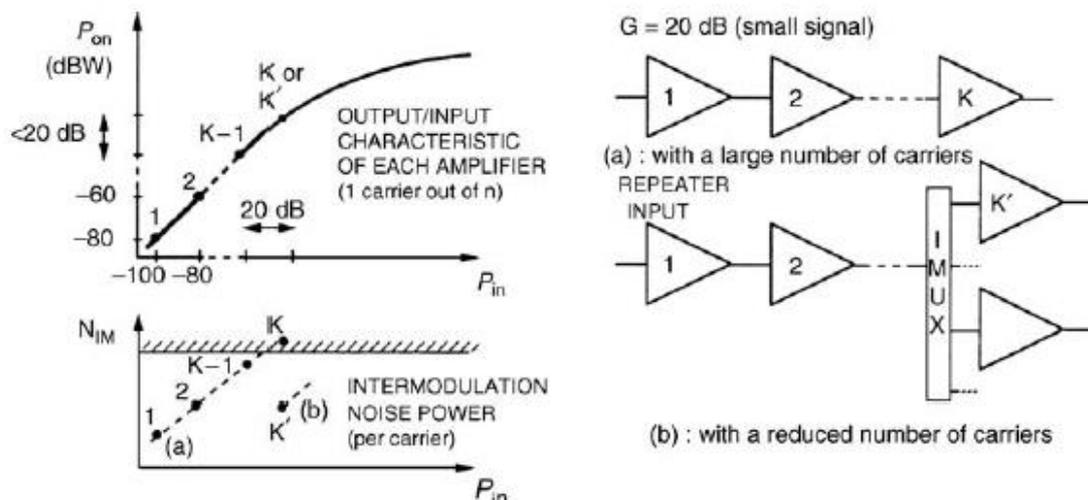


Fig. 3.29. Reducción del ruido de intermodulación por canalización de las bandas de frecuencia [1]

Las etapas de entrada del repetidor operan en todo el sistema de banda de frecuencia, varios cientos de MHz. Varias decenas de portadoras comparten esta banda y por lo tanto, aumentan el número de productos de intermodulación cuando estas portadoras pasan a través de un dispositivo

no lineal. Una reducción del número de productos de intermodulación, y por consiguiente el nivel de ruido de intermodulación, se puede conseguir limitando el número de portadoras que pasan por el mismo amplificador.

Cuando el nivel de ruido de intermodulación tiende a convertirse excesivo para la amplificación de banda ancha, la banda de frecuencia del sistema se divide en varias sub-bandas que son amplificadas separadamente como se puede observar en la Fig. 3.29b.

La amplificación de las portadoras continúa dentro del canal hasta que se obtiene el nivel de potencia requerido. La potencia de amplificación es compartida entre las diversas portadoras que ocupan el canal. La máxima potencia disponible con dispositivos desarrollados para aplicaciones espaciales es limitada. Sin la canalización, esta potencia máxima sería compartida entre todas las portadoras ocupando el ancho de banda del sistema. Con canalización, un número limitado de portadoras comparten esta potencia máxima. La potencia disponible por portadora, es por tanto más grande.

Las ventajas de la canalización por tanto, son dos. Por un lado, la amplificación de potencia tiene un ruido de intermodulación limitado debido al número reducido de portadoras por amplificador. Por otro lado, el incremento de la potencia total del repetidor teniendo varios canales, cada uno se beneficia de la potencia máxima disponible de un único amplificador.

A medida que la banda se divide en canales paralelos, la distorsión se produce cuando parte de la energía de una portadora se introduce en los canales adyacentes al nominal, en cuyo espectro de portadoras debería estar contenida. Estos efectos de interferencias de canal adyacente (*ACI*, *Adjacent Channel Interference*) se minimizan mediante una banda de guarda entre los canales y mediante el uso de filtros que restrinjan los anchos de canal lo más cercanos posible a los de los filtros paso banda ideales.

La separación entre canales se obtiene por medio de un conjunto de filtros paso banda, también llamados multiplexores de entrada (IMUX), explicados anteriormente. Los anchos de banda del rango de canales van desde pocas decenas de MHz hasta cientos de MHz (por ejemplo, 36, 40, 72 y 120 MHz). Las diversas sub-bandas son recombinadas en un multiplexor de salida (OMUX) después de la amplificación de cada canal. La palabra transpondedor a veces se utiliza en lugar de canal para designar el equipo que opera dentro de una determinada sub-banda. [1]

Canales adyacentes y alternativos. La salida del multiplexor puede o puede no ser un tipo de canal adyacente. Con canales no adyacentes, los diversos canales que se combinan por un multiplexor dado son separados por una banda de guarda ancha, igual, por ejemplo, al ancho de un canal. De este modo, se facilita la realización del multiplexor. Para evitar el desperdicio de las bandas de frecuencia correspondientes a las bandas de guarda y para garantizar el uso del espectro de manera eficiente, el repetidor se divide en canales pares e impares mediante la separación de los IMUXs al inicio de la sección canalizada (ver Figura 3.25). Los canales de cada grupo (pares e impares) son recombinados por diferentes OMUX en cada grupo. Las salidas de los multiplexores OMUX pueden estar conectadas a las dos diferentes antenas transmisoras o a las dos entradas de una antena modo dual. Esta solución era ampliamente utilizada en el pasado cuando el diseño de los filtros paso banda era cuasi-ideal.

Actualmente, los multiplexores de canales adyacentes permiten la recombinación de canales adyacentes. La obtención de un buen rendimiento (por ejemplo, anchos de banda estrechos, bajas pérdidas de inserción y elevado aislamiento entre canales) implica severas

restricciones en las características de los filtros paso banda y conlleva una complejidad sustancial en el diseño y optimización de los multiplexores de salida. [1]

3.2.6 CADENA DE AMPLIFICACIÓN

La amplificación dentro del canal del repetidor utiliza un preamplificador que ofrece la potencia requerida para conducir a la etapa de salida. Este preamplificador se llama amplificador de canal (CAMP) o *driver amplifier*, generalmente está asociado a una ganancia variable que se puede ajustar mediante telecomando. Esto permite la compensación de las variaciones de ganancia en la potencia del amplificador durante el tiempo de vida del satélite. Se pueden implementar también controles de nivel automáticos (ALC).

A continuación en la cadena se tendría el amplificador de alta potencia (HPA, *High Power Amplifier*) que entrega la potencia a las entradas del OMUX en las salidas de cada canal. Las no linealidades del canal se pueden reducir incluyendo un linealizador dentro del canal de amplificación. [1]

3.2.6.1 Amplificador de canal (CAMP)

La potencia a la salida de receptor debe mantener dentro de un límite condicionado por el nivel máximo aceptable de ruido de intermodulación, como resultado de las características no lineales del receptor. Las pérdidas a la entrada del multiplexor por tanto, determinan el nivel de la señal disponible a la entrada del canal. Este nivel es en general insuficiente para entregar al amplificador de alta potencia a la salida del canal.

El amplificador de canal (CAMP) o *driver amplifier* proporciona la potencia de ganancia requerida, generalmente del orden de 20 a 50 dB. Es necesaria una buena linealidad además de la reducción del número de portadoras en el canal con el fin de evitar una contribución excesiva del ruido de intermodulación al sistema. El uso de circuitos integrados de microondas monolíticos (MMIC, *Monolithic Microwave Integrated Circuits*) permite la realización compacta y ligera. [1]

El amplificador está asociado a un atenuador que permite que la ganancia pueda ser ajustada entre un rango de 0 a varios dB en pasos de décimas de decibelios. Este atenuador, que es controlable a través de los enlaces de TTC, se realiza típicamente con diodos PIN que se ajustan para variar la conductividad. Esto permite una compensación por la posterior variación de ganancia del amplificador de alta potencia (HPA) durante la vida útil del satélite o de ajuste del punto de trabajo (back-off) de este amplificador.

El amplificador puede estar asociado con un control de nivel automático (ALC) para mantener la potencia de salida del canal constante independientemente de las variaciones de la potencia de entrada. También puede estar asociado con un linealizador que compense las características no linealidades de amplitud y fase de la etapa de salida.

Se pueden emplear varias técnicas para la linealización. La técnica de la pre distorsión que consiste en pasar toda la señal a través de un circuito con una función de transferencia opuesta a la del dispositivo para ser linealizado.

En la siguiente figura se muestra la organización del amplificador de canal, que muestra las diferentes funciones que se pueden implementar. [1]

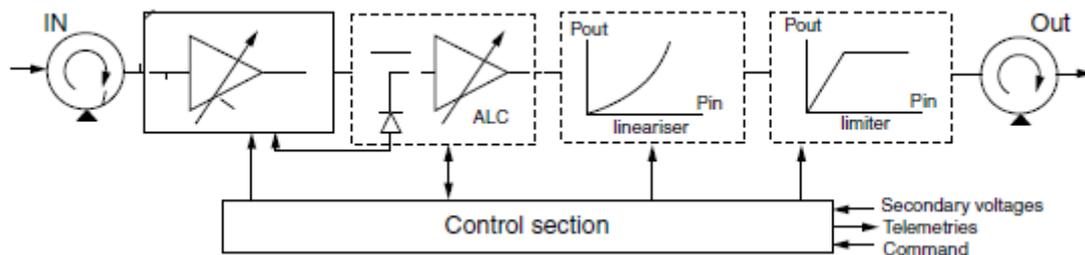


Fig. 3.30. Organización y funciones de un amplificador de canal (CAMP) [1]

3.2.6.2 Amplificador de alta potencia (HPA)

El siguiente elemento en la cadena de amplificación después del amplificador de canal es el amplificador de alta potencia. Un aspecto imprescindible es que el amplificador de canal aumente el nivel de la señal a entregar al amplificador de alta potencia (HPA). [15]

El amplificador de salida proporciona la potencia a la salida de cada canal y esto determina el valor de la PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) del canal. La potencia de salida del amplificador de referencia se define por la potencia de saturación de la portadora.

El punto de trabajo elegido, como se define por la correspondiente entrada back-off IBO (o salida back-off OBO), resulta de un compromiso entre la potencia disponible entregada a la salida a una portadora dada y el nivel de ruido de intermodulación:

- Un back-off (punto de trabajo cercano a la saturación) pequeño (absoluto) tiene la ventaja de una potencia más elevada pero el ruido de intermodulación es alto ya que el dispositivo opera en una región altamente no lineal.
- Un back-off elevado (absoluto) limita el ruido de intermodulación, pero la potencia de salida disponible se reduce.

El procedimiento usado para determinar el back-off generalmente consiste la optimización del back-off para que la relación señal de portadora al ruido $(C/N_0)_T$ del enlace total (estación a estación) se maximice.

Cabe destacar que, en funcionamiento multiportadora, la entrada cero de back-off corresponde a un punto de trabajo en la curva característica de transferencia más allá de la saturación con una portadora y por lo tanto, la máxima potencia por portadora se obtiene para una entrada no cero de back-off (se puede observar por ejemplo, la curva de una de las dos portadoras de la figura siguiente).

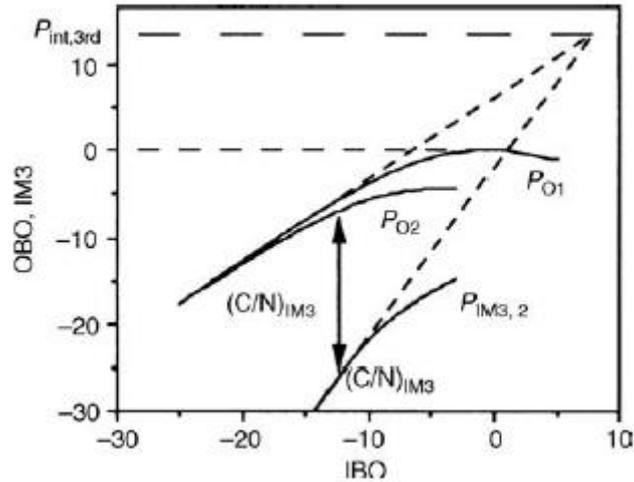


Fig. 3.31. Curva característica de transferencia con dos portadoras de igual amplitud

Un parámetro particularmente importante de la salida del amplificador de alta potencia es la eficiencia. La eficiencia se define como la relación de potencia de salida de radio frecuencia (RF) y energía eléctrica consumida de corriente continua (DC). Un valor alto de eficiencia por lo tanto, conduce a una reducción del consumo de electricidad y por lo tanto, el tamaño y la masa del sistema eléctrico del satélite; el rendimiento necesario del sistema de control térmico (como se especifica en términos de capacidad de extracción del calor) también se reduce.

Existen dos tipos de amplificadores de potencia en los satélites: amplificadores de tubo de guía de ondas (TWTA, *Travelling Wave Tube Amplifier*) y amplificadores de potencia de transistor en estado sólido (SSPA, *Transistor Solid State Power Amplifier*). [1]

3.2.6.2.1 TWTA

Los tubos de guías de ondas operan por interacción entre un haz de electrones y la onda de radio. El haz de electrones, generado por un cátodo a una elevada temperatura, está fijado y acelerado por un par de ánodos.

La onda se propaga a lo largo de una hélice; el haz de electrones, cuyo foco es mantenido por imanes situados concéntricamente, fluye dentro de la hélice. La velocidad axial de la onda se reduce artificialmente por la hélice a un valor cercano a la velocidad de los electrones. La interacción conduce a una disminución de los electrones que dan energía cinética. La interacción entre el haz de electrones y la onda electromagnética a amplificar hace que los electrones reduzcan la velocidad (en promedio) cerca del extremo de salida de la hélice. La onda por lo tanto, se mueve poco a poco cada vez más rápido comparado con los electrones y la condición de sincronismo necesaria para la amplificación ya no se cumple. Una manera de conseguir más potencia en el haz de electrones, y por consiguiente incrementar la eficiencia de los electrones, es reducir la velocidad de la onda en la hélice progresiva a medida que se acerca al extremo de salida, lo que refuerza las interacciones entre las ondas RF y el haz de electrones. Esto se obtiene al reducir el paso de hélice, a expensas de un aumento de la distorsión de fase.

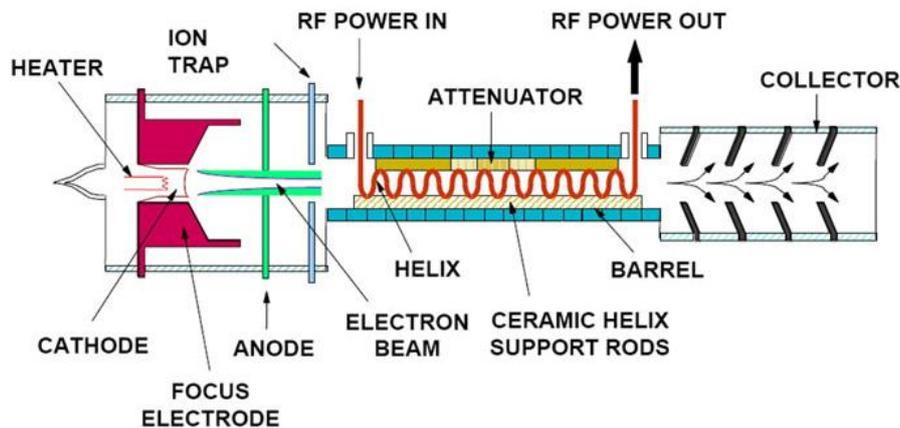


Fig. 3.32. Estructura de un TWT

[Imagen obtenida de Google images]

Un colector captura los electrones a la salida de la hélice. La división del colector en varias etapas a diferentes potenciales permite una mejor adaptación a la dispersión de la energía residual de los electrones y por lo tanto, un aumento de la eficiencia del tubo. La energía residual debe ser disipada en forma de calor. El colector conduce el calor a disipar ya sea por conducción hacia la superficie de radiación del satélite o directamente al espacio por parte del sistema auto radiante de TWT. Esta última permite reducir la carga térmica del satélite y disminuir la masa general de la plataforma para un rendimiento de RF dado.

Las últimas seis décadas del desarrollo de hélice TWT se ha traducido en un constante incremento de la corriente continua (DC) a la eficiencia de conversión de RF, hasta el 75% con la posibilidad de acercarse a un 80% para las aplicaciones comerciales de comunicación por satélite.

Los valores típicos de los parámetros de los tubos utilizados son:

- Potencia de saturación: entre 20-50 W
- Eficiencia en saturación: 60-75%
- Ganancia en saturación: sobre 55 dB
- $(C/I)_{IM}$ en saturación: 10-12 dB (dos portadoras de igual amplitud)
- Coeficiente K_p de conversión AM/PM: sobre $4.5^\circ / \text{dB}$ (cerca de la saturación)

Una fuente de energía eléctrica (EPC, Electric Power Conditioner) genera las diferentes tensiones (hasta 4000 V) necesarias para el funcionamiento del tubo. La eficiencia es del orden del 95% lo que conduce a una eficiencia global del 60-65%.

La combinación de un TWT y un EPC en un dispositivo integrado se denomina amplificador de tubo de guía de ondas (TWTA). Para aplicaciones de elevada potencia, como la radiodifusión por satélite, la fuente de alimentación DC de dos TWTs por un único EPC proporciona una solución efectiva en cuanto a coste y peso. Los dos TWTs pueden funcionar como un único TWTA de forma independiente o combinada con RF para proporcionar el doble de la potencia de cada TWT.

La integración de un amplificador de canal que incluye un linealizador con el TWT (TWT linealizado, LTWT) se puede conseguir para reducir la masa y la complejidad de la interfaz. Un

paso adicional consiste en la integración del amplificador de canal, el linealizador y el TWT en la misma caja que el EPC. Este módulo de potencia microondas (MPM, Microwave Power Module) ofrece muchas ventajas en cuanto al ahorro de la masa, área de montaje y la simplificación en la integración de la carga útil, así como la mejora de las características EMC y la reducción a una sola conexión al EPC para DC y todas las funciones TC/TM del MPM.

Se han investigado otros tipos de TWT. Se puede usar un cátodo frío en lugar de uno con calor. Los electrones son generados por un campo eléctrico intenso aplicado a una superficie provista de emisores. Esto permite la reducción del tamaño del dispositivo y un aumento de la eficiencia, ya que no es una necesidad calentar el cátodo con una corriente. También es posible utilizar hélices usando un voltaje más bajo. Estos tubos se conocen como mini-TWTs.

A altas frecuencias (banda Ka, 20 GHz), las condiciones de propagación pueden causar grandes variaciones (de 5 a 25 dB de atenuación) en el enlace. Sería interesante utilizar un amplificador de potencia con una potencia variable a la salida, con el fin de ser capaces de igualar la potencia del canal a las condiciones de propagación por telecomando. Se están desarrollando nuevas generaciones de tubos con una potencia de salida regulable en órbita. Estos TWT flexibles con línea de hélice optimizada requieren de un EPC con voltaje de ánodo ajustable. El ajuste del ánodo se lleva a cabo por telemetría desde tierra. Los tubos flexibles permiten variar la potencia de salida saturada con cambios relativamente pequeños en ahorro de energía. La gran ventaja que ofrecen los tubos flexibles es que ofrece un consumo de energía reducido respecto a los TWTAs. Por lo tanto, ofrecen flexibilidad en órbita para adaptarse al tráfico necesario para una aplicación específica y a nuevas aplicaciones dentro de su vida útil. [1]

3.2.6.2.2 SSPA

Los amplificadores de potencia de estado sólido (SSPA, *Solid State Power Amplifiers*) utilizan transistores de efecto de campo. La potencia requerida se obtiene mediante la conexión de transistores en paralelo en las etapas de salida, como se puede observar en la siguiente figura. Los SSPA se ha utilizado operacionalmente en banda C desde el inicio de la década de los 80 con potencias del orden de pocas decenas de vatios. Después, se anticipó que los TWTs tomarían el relevo a los SSPA, gracias a una relación potencia-masa y a una mayor linealidad. Sin embargo, su eficiencia en el modo lineal era típicamente baja (aproximadamente 30%) y se ha mantenido así mientras que la eficiencia TWT ha aumentado hasta el 70%. Además la demanda ha incrementado para potencias más elevadas (típicamente por encima de los 100 W por canal en la banda Ku). Todos estos hechos han supuesto una ventaja competitiva para los TWTs.

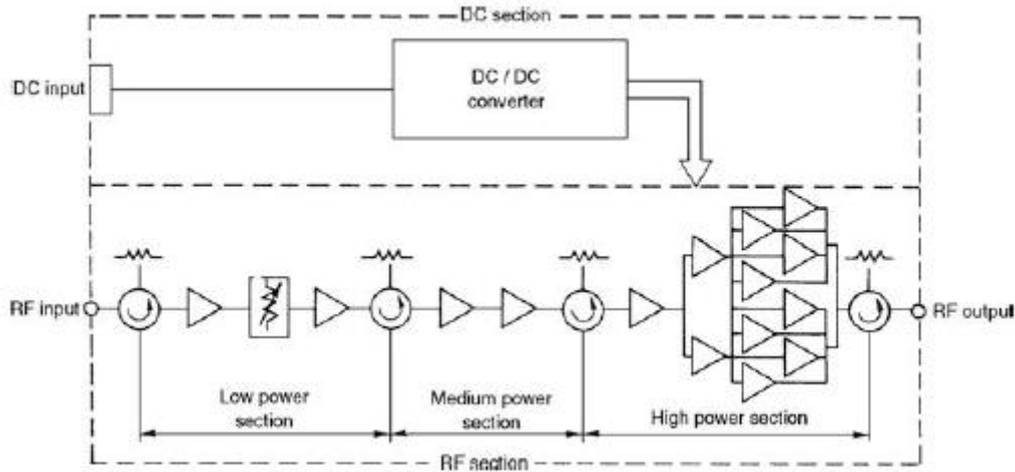


Fig. 3.33. Diagrama de bloques de un amplificador de potencia de estado sólido

[Imagen obtenida de Google images]

Los valores típicos de las características de los SSPAs son:

- Potencia: 20 - 40 W
- Eficiencia: 30 - 45 %
- Ganancia en saturación: 70 - 90 dB (dependiendo del número de estados)
- $(C/N)_{IM}$ en saturación: 14 - 18 dB (dos portadoras de igual amplitud)
- Coeficiente K_p de conversión AM/PM: sobre 2°/dB (cerca de la saturación)

La fuente de alimentación asociada con el amplificador transistor genera las tensiones de alimentación y polarización requeridas (unas pocas decenas de voltios). Es necesaria la compensación de temperaturas para evitar las derivas térmicas. La eficiencia es del orden de 85 a 90% y esto lleva una eficiencia total del 30 - 45% de acuerdo con la banda de frecuencia. La masa total varía entre 0.8 y 1.5 kg según la potencia. La tabla 3.1 resume los valores típicos de las características de TWTA y SSPA.

Característica	TWTA	SSPA
Banda de operación (GHz)	C, Ku, Ka	L, C
Potencia a la salida de saturación (W)	20-250	20-40
Ganancia en saturación (dB)	~55	70-90
Nivel relativo del producto de intermodulación de tercer orden $(C/N)_{IM3}$ (dB)	10-12	14-18
Coeficiente (cercano a la saturación) K_p de conversión AM/PM (°/dB)	4.5	2
Eficiencia de DC a RF incluyendo EPC (%)	50-65	30-45
Masa incluyendo EPC (kg)	1.5-2.2	0.8-1.5
Pérdida en 10^9 h (FIT)	<150	<150

Tabla 3.2. Resumen de las características TWTA y SSPA

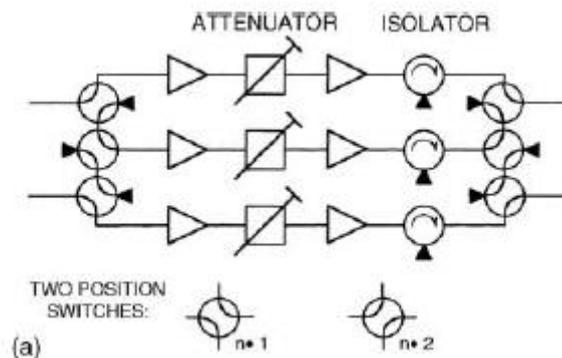
3.2.7 REDUNDANCIA

En la organización general del repetidor se debe incluir el equipo de redundancia (*back-up*). Con el objetivo de garantizar la fiabilidad requerida al final de la vida del satélite, se modifica la arquitectura para limitar el fallo tanto como sea posible.

Los componentes para realizar la redundancia son interruptores también llamados *switches*. Son componentes pasivos que encaminan la señal de entrada por diferentes puertos de salida. Existen diferentes tipos de *switches*: de dos posiciones y de cuatro posiciones, como se puede ver en las figuras siguientes. En el primer caso, la señal tiene dos posiciones en las que encaminar la señal; mientras que en el segundo, tiene cuatro.

Los multiplexores de entrada y salida no tienen elementos de back-up debido a que son elementos pasivos cuya tasa de fallo es muy baja y su replicación resulta muy difícil y costosa. El receptor en general se duplica con una unidad idéntica de back-up; esto es una redundancia de 1:2, una unidad activa de dos unidades instaladas. Un interruptor operado por telecomando envía la señal desde la antena hasta el receptor en uso; las salidas del receptor están conectadas al IMUX mediante un acoplador híbrido que proporciona un encaminamiento pasivo de la señal. Se pueden utilizar varias estrategias de redundancia (por ejemplo, 2:4) cuando el satélite tiene varias cargas útiles. [1]

El equipo de la cadena de amplificación tiene back-up. Convencionalmente, un pequeño número de canales de salida IMUX se comparte entre un mayor número de cadenas de amplificación. Por ejemplo, con redundancia 2:3, un interruptor de dos entradas y tres salidas envía la señal disponible en dos salidas del IMUX a dos de las tres cadenas instaladas. Un interruptor con tres entradas y dos salidas envía la señal desde las dos cadenas activas hasta las dos entradas del OMUX. En el caso de fallo de uno de los amplificadores activos, la unidad de reserva lo sustituye, pero un fallo adicional implica la pérdida de un canal. Por lo tanto, con el fin de aumentar la fiabilidad de la parte de canalización, se utiliza un sistema más complejo denominado anillo de redundancia. Con esta configuración, todos los canales comparten un gran número de cadenas instaladas. Por ejemplo, en la Figura 3.34b se muestra un anillo de redundancia de 8:12 donde 8 canales comparten las 12 cadenas de amplificación instaladas. Cada canal a la salida del IMUX puede ser dirigido a la entrada de varias cadenas mediante un conjunto de interruptores de varias posiciones interconectados. Esta disposición minimiza el número de interruptores. De esta manera, existe un gran número de posibilidades de sustituir a los equipos averiados; así pues, se obtiene una alta fiabilidad en el sistema y una gran robustez ante los posibles fallos que se produzcan a lo largo de la vida del satélite [1].



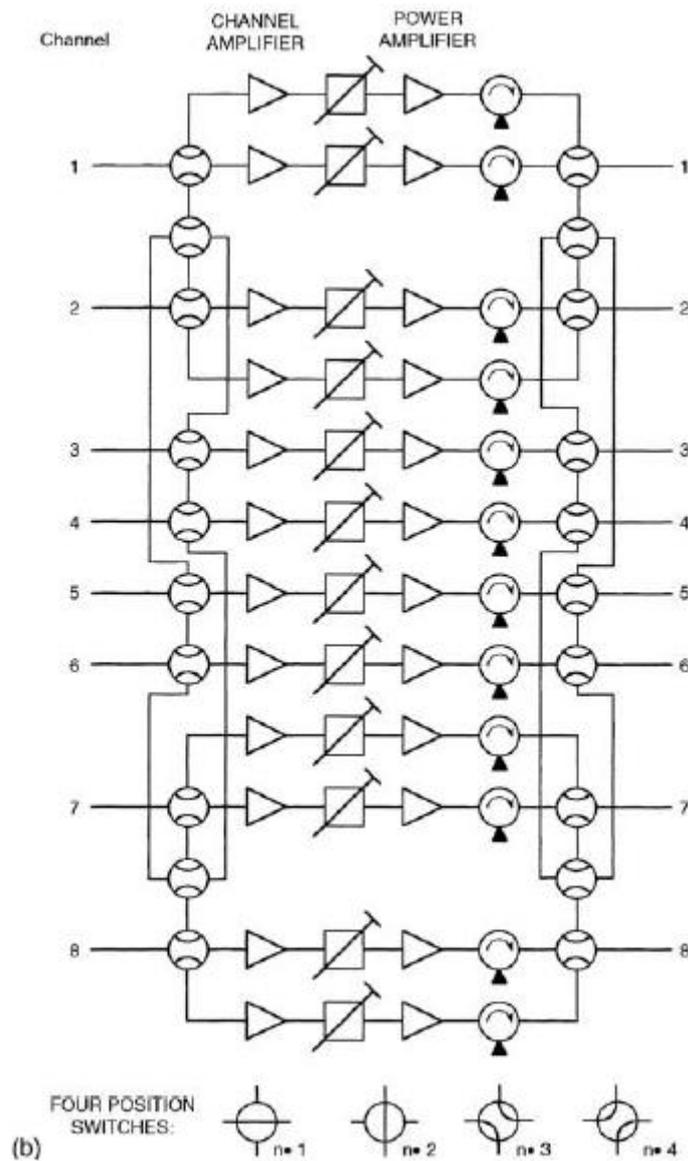


Fig. 3.34. Redundancia: (a) redundancia de canal 2/3 y (b) anillo de redundancia 8/12

En las figuras anteriores se puede observar también que existen dos tipos de interruptores. Pueden ser interruptores de dos posiciones como en el caso de la Figura 3.34a o de cuatro posiciones como en la Figura 3.34b. En general, cuando la complejidad del esquema de redundancia es mayor se utilizan interruptores de cuatro posiciones ya que tienen dos entradas y dos salidas.

4 DESARROLLO

4.1 SATÉLITE TRADICIONAL

En este capítulo se va a presentar la solución a la que se ha llegado del diagrama de bloques de la carga útil de lo que se ha definido anteriormente como satélite tradicional.

En la siguiente figura se muestra cuál es dicha solución y a continuación se explicará cada uno de los componentes y sus distintas funciones en la cadena de la carga útil de comunicaciones del satélite.

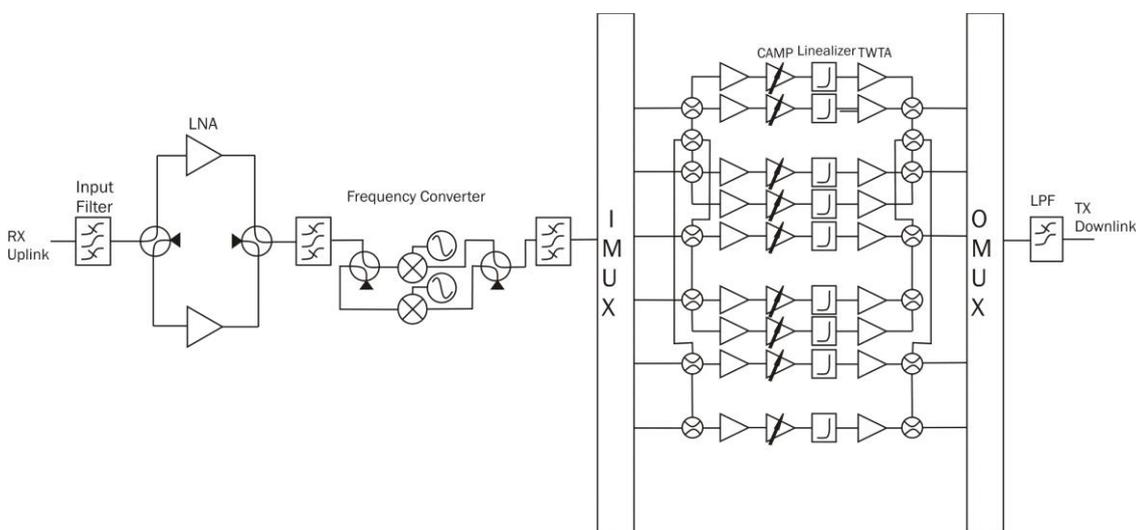


Fig. 4.1. Carga útil del satélite tradicional

En primer lugar, la señal es recibida por el satélite mediante una antena, que en general suele ser una antena reflectora aunque existen distintos tipos como se explicó con anterioridad. En función de las necesidades específicas de cada satélite se utilizarán antenas con diferentes características.

Para seleccionar la antena que se requiere se deberá atender a los requisitos de tamaño, banda de frecuencias, cobertura que se desea cubrir, ganancia, potencia deseada... entre otros muchos.

Cuando la antena ha recuperado la señal, se necesita un filtro de entrada, en concreto un filtro paso banda para evitar que las interferencias puedan dañar al sistema. Este componente pasivo debe proteger a la carga útil. Para ello, atenúa las señales interferentes para evitar la saturación del ancho de banda y también garantizar así que las interferencias no penetren en la carga útil.

El siguiente paso, será amplificar la señal mediante un amplificador de bajo ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*). De esta forma, se consigue aumentar la potencia de la señal minimizando el ruido. En este caso, se ha diseñado el sistema para que el LNA tenga una redundancia de 1:2 dado que es un elemento muy importante en la carga útil. Por consiguiente, el esquema de

redundancia es muy sencillo como se puede observar en la figura y por lo tanto, se pueden utilizar interruptores de dos posiciones.

En general, en todos los satélites la frecuencia de subida y la de bajada son diferentes para evitar las interferencias. Es por ello que se debe insertar un conversor de frecuencia en el satélite. Para realizar la conversión se necesitará un mezclador y un oscilador local que deberán además tener una determinada redundancia. Se ha determinado que un esquema 1:2 es suficiente para el caso del satélite tradicional, así pues, como en el caso anterior se utilizan interruptores de dos posiciones.

Sin embargo, el conversor de frecuencia necesita de unos componentes adicionales. Concretamente antes del mezclador se necesita colocar un filtro paso banda, un filtro *Image-Reject*. Este componente pasivo es necesario para suprimir la señal imagen generada por el mezclador y así evitar las interferencias que se pudieran producir. Después del mezclador también es necesario añadir otro filtro, específicamente un filtro selector de canal.

Una vez realizada la conversión en frecuencia, la señal debe dividirse en canales. Por lo tanto, se requiere de un multiplexor de entrada para dividir el ancho de banda total de la señal en diferentes sub-bandas. Existen distintos tipos de multiplexores pero a la entrada de la carga útil se suelen utilizar multiplexores circuladores acoplados. Este tipo de dispositivos están compuestos de filtros paso banda alimentados mediante circuladores que definen el ancho de banda en varios canales.

En la siguiente imagen se puede observar cómo es el diagrama de bloques para el caso del satélite tradicional que se ha presentado anteriormente. Como se puede apreciar, al principio se utiliza un acoplador de 3 dB, es decir, un híbrido para dividir la señal por igual en dos ramas con la misma potencia.

En este caso, se tienen 6 canales porque es lo que se ha decidido para este diseño; pero en el caso de ser mayor el número de canales la filosofía es exactamente la misma. Se dividen los canales en pares e impares y un filtro paso banda es el que define el ancho de banda de cada uno de los canales.

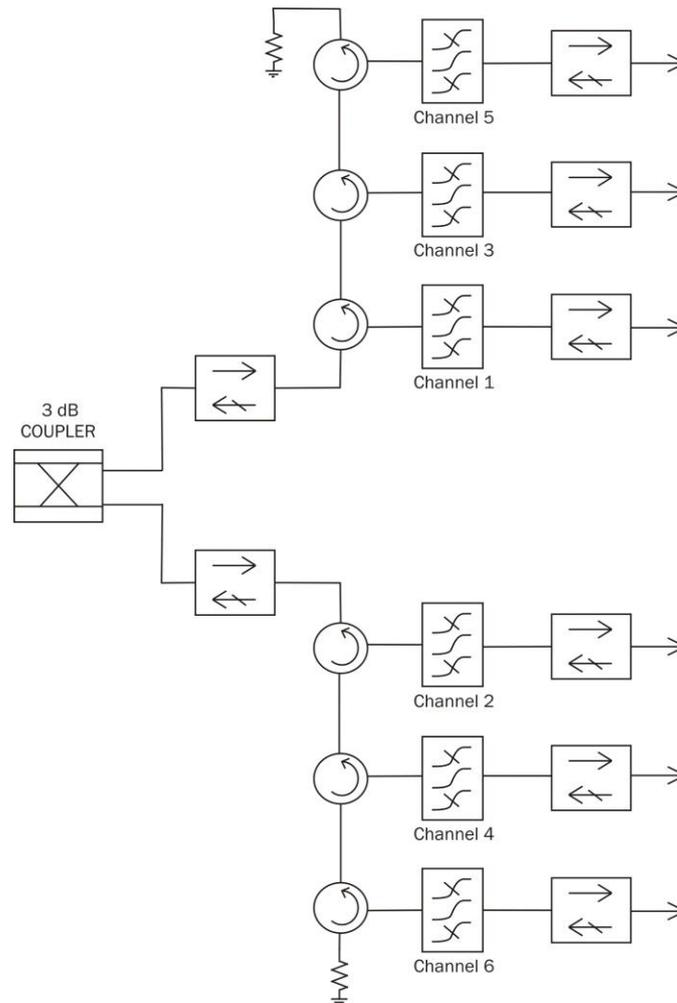


Fig. 4.2. Diagrama de bloques del IMUX

El siguiente paso en el diseño de la carga útil del satélite tradicional es la cadena de amplificación. Antes de esto, es preciso que haya un amplificador para dar más potencia a la señal ya que previamente se ha realizado el filtrado con el selector de canal. Seguidamente, se debe insertar un amplificador de canal (CAMP) que es el encargado de aumentar el nivel de la señal hasta la potencia requerida por el amplificador de alta potencia que deberá ir precedido de un linealizador para evitar la contribución excesiva del ruido de intermodulación.

El HPA (*High Power Amplifier*) situado justo después del linealizador es el que define la potencia de salida, así que es un elemento muy importante en la carga útil. Como explicé previamente, existen dos tipos de HPAs, los TWTA y los SSPA.

Actualmente, los TWTA son los más utilizados debido a que ofrecen mejores condiciones de potencia, entre otras ventajas. Sin embargo, en los satélites más antiguos de este tipo, es muy probable que en algunos casos se han utilizado amplificadores del tipo SSPA. No obstante, como se ha comentado, la tendencia es la utilización de los TWTA.

Como se aprecia en la figura, el esquema de redundancia utilizado en la cadena de amplificación es mucho más complejo que en cualquier otro caso de la carga útil. Se utiliza en este caso una redundancia 6:9 con el objetivo principal de dar mucha robustez al sistema dado que la sección de la amplificación es un punto clave en la carga útil del satélite. Puesto que se

trata de un esquema de redundancia complejo, se utilizan interruptores de cuatro posiciones para poder realizarlo.

A continuación, se utiliza un multiplexor de salida (OMUX) para recombinar los canales una vez realizada la amplificación de potencia. En estos dispositivos, las pérdidas son críticas ya que implican una reducción directa de la potencia radiada por el satélite. Esta es la razón de que se utilicen multiplexores *manifold*, que son los que tienen menores pérdidas de inserción.

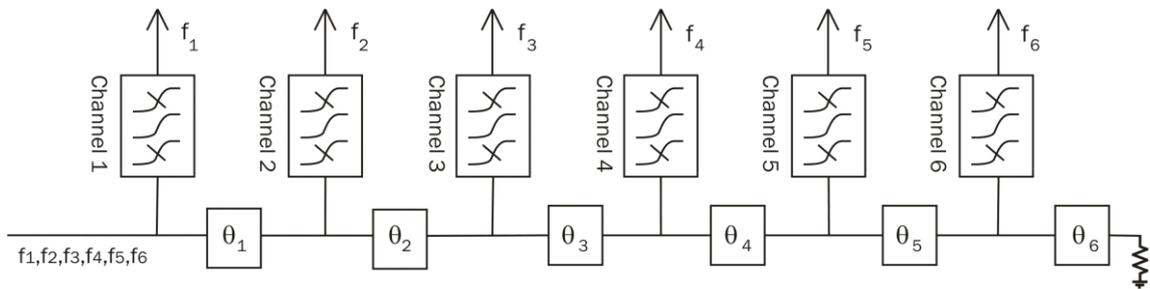


Fig. 4.3. Diagrama de bloques del OMUX

En la figura anterior se puede observar que este tipo de multiplexores están formados por filtros paso banda y desfases.

Por último, se requiere un filtro paso banda para poder suprimir los armónicos creados por las no-linealidades de los elementos y de además proporcionar un aislamiento adicional a la carga útil. Finalizado ya todo el recorrido a lo largo de la carga útil, la señal ahora puede ser transmitida correctamente.

4.2 HIGH THROUGHPUT SATELLITE

En este apartado se pretende encontrar un diagrama de bloques genérico para los satélites de tipo *High Throughput Satellite*, explicados anteriormente, ya que representan la nueva generación de satélites de alta capacidad.

Para encontrar un modelo coherente se ha investigado sobre un satélite concreto, el Ka-Sat y dado que es un satélite completamente HTS se ha generalizado para el resto de satélites de este tipo utilizando también la información disponible sobre los satélites HTS. Una vez explicadas las características concretas del satélite Ka-Sat se pasará a desarrollar cada una de las partes del diagrama de bloques genérico al que se ha llegado de los satélites de comunicaciones de tipo HTS.

4.2.1 KA-SAT

El satélite Ka-Sat es el primer satélite Europeo multihaz que opera exclusivamente en banda Ka y ofrece servicios de banda ancha y difusión en Europa además de ser el primero de la generación de satélites de tipo HTS. Fue lanzado en 2010 y se posicionó en una órbita geoestacionaria a 13° Este.

Basado en la plataforma de Astrium, Eurostar E3000, Ka-Sat opera con más de 80 haces (*spot beams*) simultáneamente. Además, está equipado con cuatro antenas multihaz desplegables con mucha precisión del haz. [9]

El Ka-Sat soporta la comunicación bidireccional mediante una red en estrella y por tanto, incluye dos cargas útiles: *Forward Payload* y *Return Payload*. La carga útil *Forward* es la que se corresponde con el enlace *Forward*, llevando el tráfico desde la pasarela (*gateway*) hasta los usuarios; mientras que la carga útil *Return* se corresponde con el enlace *Return* que transporta el tráfico desde los usuarios hasta la *gateway*. [10]

Efectivamente, el Ka-Sat tiene dos enlaces, el *Forward* y el *Return*, tal y como se explicó en el capítulo anterior acerca de los satélites de tipo HTS. Es decir, usando el modelo del Ka-Sat se podrá deducir el modelo genérico de los satélites *High Throughput Satellite*.

El plan de frecuencias del satélite Ka-Sat utiliza únicamente la banda Ka para ambos, las pasarelas y los terminales para los enlaces *Forward* y *Return* como se puede observar en la siguiente figura.

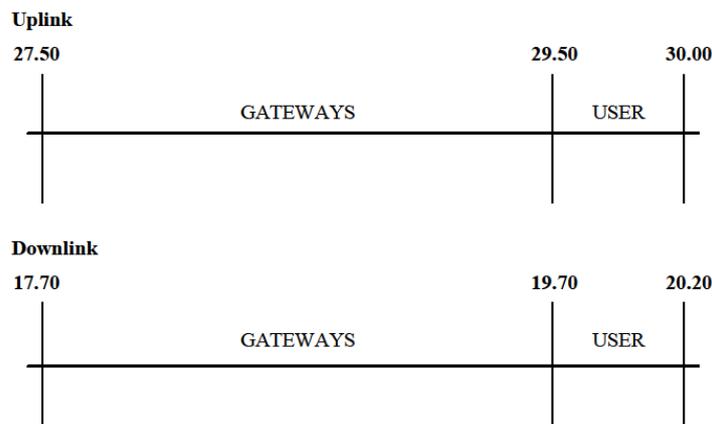


Fig. 4.4. Plan de frecuencias Ka-Sat

Para el enlace *Forward*, se tiene que para el *uplink* desde los *gateways* se utiliza la banda de 27.5 GHz a 29.5 GHz; mientras que para el *downlink* hacia los usuarios se usa la banda de 19.7 GHz a 20.2 GHz. Por otro lado, en el enlace *Return*, el *uplink* desde los usuarios utiliza las frecuencias desde 29.5 GHz hasta 30.0 GHz; para el *downlink* hacia los *gateways* se usa la banda de frecuencias comprendida entre 17.7 GHz y 19.7 GHz. [11]

En la figura anterior, se puede observar que el espectro total disponible para las *gateways* es de 2 GHz y dado que se utiliza un esquema de cuatro colores y se usan ambas polarizaciones, el ancho de banda disponible es de 1 GHz. En el caso de los usuarios, el espectro disponible es 500 MHz así que el espectro disponible para la implementación del sistema es de 250 MHz. [12]

El satélite Ka-Sat únicamente utiliza la banda Ka ya que ofrece oportunidades de diseño de la carga útil con mayor capacidad con respecto a la banda Ku. Por lo tanto, permite incrementar las tasas de datos, aumentar la calidad del servicio así como el número de terminales dentro del sistema.

En el caso del Ka-Sat, el área de servicio de los usuarios para ambas, la carga útil *Forward* y la *Return*, se compone de 82 celdas que emplean un esquema de cuatro colores con cuatro antenas desplegadas. Un esquema de cuatro colores generalmente implica un conjunto de cuatro aperturas del mismo tamaño. En general, se emplea *Single Feed per Beam (SFB)* por lo tanto, el número de alimentaciones de antena se corresponde con el número de spots. [10]

Dado que se utiliza un esquema de cuatro colores y se usan cuatro reflectores, cada color está asociado con un reflector. Si se utilizara un número más pequeño de reflectores, se necesitarían más colores por reflector, lo que disminuiría la capacidad de la antena. [9]

Típicamente, cada celda cubre unos pocos cientos de kilómetros de diámetro y ofrece una capacidad de 900 Mb/s. El espectro disponible para los terminales es 500 MHz para *uplink* y 500 MHz para *downlink*. El reuso eficiente de frecuencias es esencial para conseguir una capacidad de sistema de cómo máximo 70 Gb/s (900 Mb/s x 82 celdas que equivale aproximadamente a 70 Gb/s).

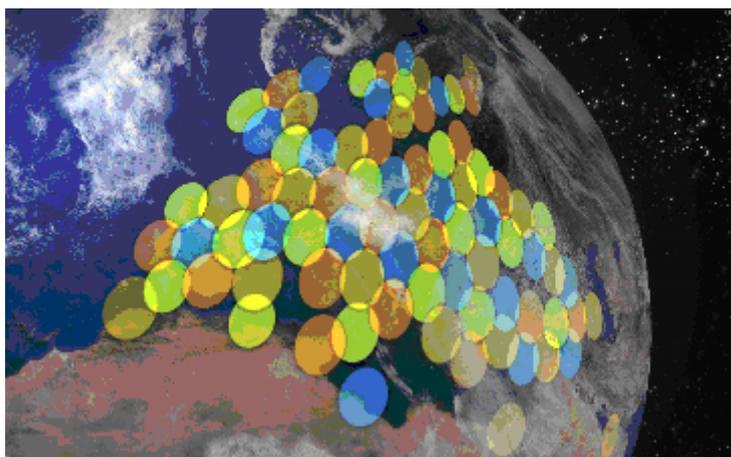


Fig. 4.5. Cobertura del Ka-Sat

Cada TWTA proporciona 10 veces la capacidad respecto a la de un transpondedor estándar en banda Ku, donde los terminales tendrían que ser cerca de dos veces su tamaño. Esto es crucial para obtener servicios rentables comparables a las redes terrestres. [10]

Es importante también señalar que el satélite Ka-Sat tiene una infraestructura de terrestre complementaria para dar servicio a los usuarios. Ocho *gateways* interactuarán entre el sistema del satélite e Internet para proporcionar una infraestructura integrada vía satélite para dar servicio de acceso de banda ancha a los usuarios. Por lo tanto, el sistema de comunicaciones Ka-Sat se puede describir como una red de ocho sub-redes en configuración estrella bidireccional. [17]

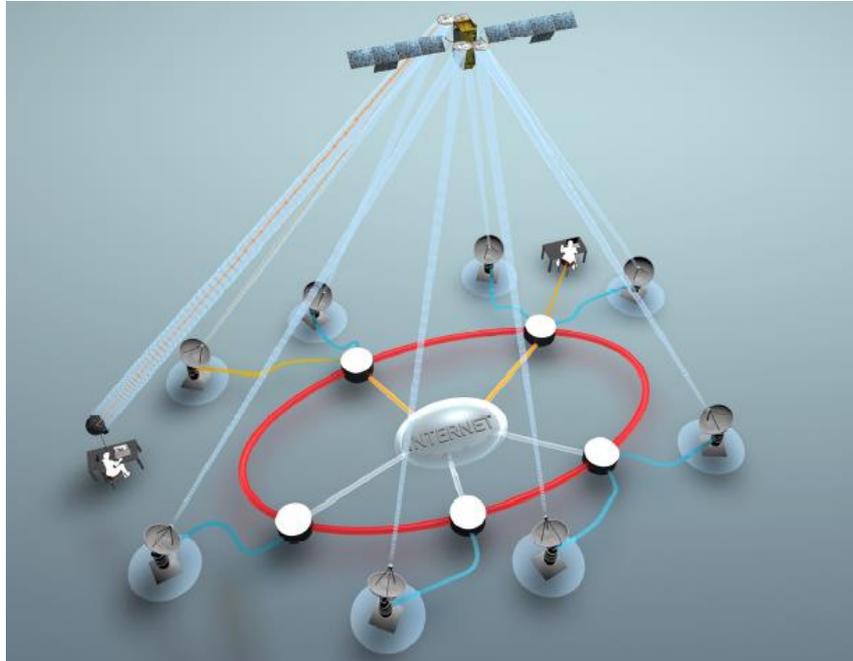


Fig. 4.6. Infraestructura del segmento terrestre del Ka-Sat [17]

Cabe destacar que la infraestructura de tierra, además de estar compuesta por la red de ocho *gateways* también consta de otras dos *gateways* de *backup*. De tal manera que si uno de los enlaces con una *gateway* dejara de estar operativo, se seguiría dando cobertura a esta zona geográfica mediante una de las *gateways* de apoyo. [18]

La siguiente figura muestra la localización de las *gateways* del Ka-Sat a lo largo de Europa. La elección de las localizaciones se basa en un detallado análisis sobre la disponibilidad de la rápida conexión a Internet, la disponibilidad de infraestructuras existentes, problemas de licencias y consideraciones relativas a la separación espacial (para garantizar el reuso de frecuencias incluso a nivel de *gateway*) y la optimización del plan de frecuencias. Las dos pasarelas (*gateways*) mejorarán la fiabilidad general del sistema así como la integridad. [18]



Fig. 4.7. Localización de los Gateway del Ka-Sat

4.2.2 ANTENA HTS

Las antenas que se suelen utilizar en los sistemas HTS son antenas multihaz que solo tienen una alimentación por haz SFB (*Single Feed per Beam*) por lo que en los siguientes apartados se explicarán estos conceptos. A continuación, se explicará cómo sería el diseño de la antena que se utilizará para este proyecto en el sistema *High Throughput Satellite*.

4.2.2.1 Antena multihaz

Una cobertura multihaz implica la generación de varios haces que pueden estar en diferentes bandas de frecuencias y tener diferentes polarizaciones.

Un satélite multihaz puede dar una cobertura más de diez veces de capacidad que un satélite clásico usando la misma potencia de entrada y dimensiones de antena parecidas.

Para la creación de un escenario multihaz con spots solapados existen dos principios posibles. Única alimentación por haz (*Single Feed per Beam*), sólo utiliza una bocina de alimentación por cada spot. Para conseguir spots solapados, en la mayoría de los casos de aperturas reflectoras se necesitan cuatro. Otro posible escenario sería múltiples alimentaciones por haz (*Multiple feeds per beam*), usa pequeños sub-arrays por cada *spot*.

Para conseguir un alto grado de reuso de frecuencia, la cobertura no debe ser cubierta por un único haz, si no por un alto número de haces de alta ganancia solapados. La Fig. 4.8 muestra este principio para la cobertura pan-Europea, donde se usa un esquema de reuso de frecuencia de cuatro colores. Esto significa que se usan dos sub-bandas de frecuencia diferentes y dos polarizaciones ortogonales. Los spots con colores distintos difieren en frecuencia o polarización. Por consiguiente, pueden transferir diferente información sin interferencia mutua. Los spots con

el mismo color usan la misma frecuencia y polarización, pero están aislados espacialmente de cada uno, ningún spot tiene uno adyacente del mismo color. Por lo tanto, las celdas con el mismo color pueden transferir diferente información. En muchos casos, un escenario de cuatro colores es el mejor compromiso entre capacidad y rendimiento. [13]

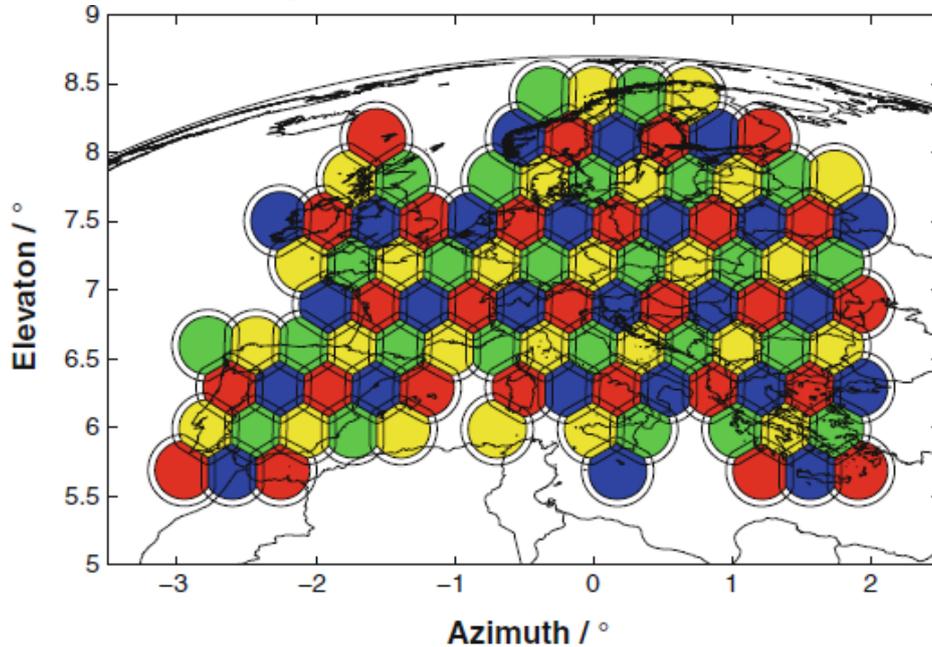


Fig. 4.8. Cobertura multihaz Pan-Europea [13]

En este proyecto, se ha escogido el principio de única alimentación por haz (*Single Feed per Beam*) siguiendo el ejemplo del satélite de tecnología HTS, Ka-Sat.

4.2.2.2 Antena Single feed per beam (SFB)

En este tipo de antenas, cada haz es creado por una única bocina. Para evitar los vacíos de iluminación en la cobertura, se requieren haces solapados. Para lograrlo, se usan cuatro antenas reflectoras, una por cada color como se puede observar en la Fig.4.9.

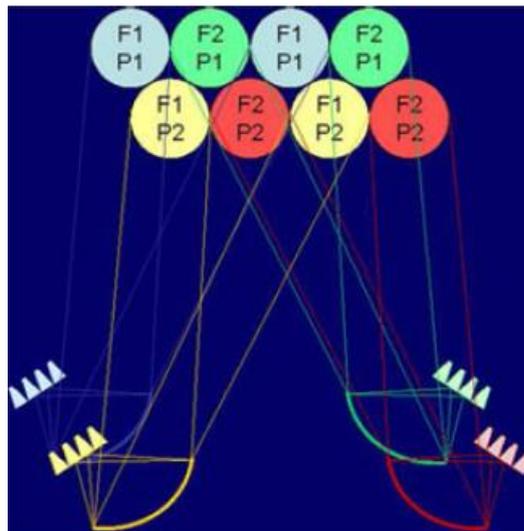


Fig. 4.9. Esquema de cuatro colores usando cuatro reflectores [13]

Este esquema de cuatro colores proporciona un alto grado de reutilización de las frecuencias disponibles, proporcionando así una alta capacidad del sistema. [13]

Cada antena reflectora crea spots de un solo color que no se solapan. Las cuatro antenas apuntan de tal manera que se crea un escenario de cuatro colores con solapamiento. Sin embargo, el solapamiento del esquema de cuatro colores lleva a un mayor número de aperturas. Estrictamente hablando, se necesitan ocho reflectores, cuatro para la transmisión y cuatro para la recepción. Esto se puede evitar si se utiliza una cadena de alimentación (*feed chains*) Tx/Rx.

El diámetro del reflector se elige por la frecuencia de transmisión, que es demasiado grande para las frecuencias de recepción. Los spots serían demasiado pequeños y no se solaparían. Por lo tanto, se necesita de una bocina de alimentación inteligente para proporcionar la iluminación adecuada del reflector en las frecuencias de transmisión y una específica iluminación en la banda de recepción. En la Fig. 4.10 se puede observar la cadena de alimentación. [14]

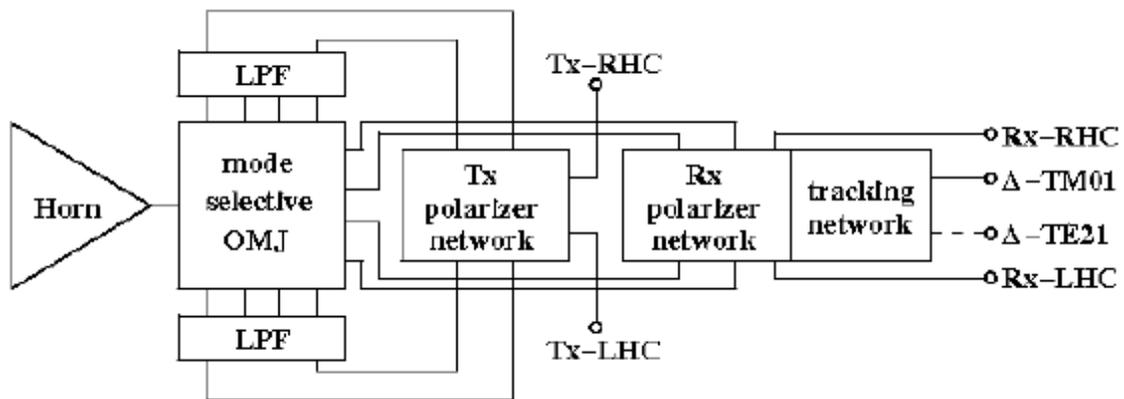


Fig. 4.10. Diagrama de bloques de la cadena de alimentación de la antena [14]

Más adelante se explicará con algo más de detalle cómo está formada esta cadena, ya que será necesario para realizar el dimensionado de los elementos pasivos del satélite. Cabe recalcar que mediante esta técnica se reduce el número de reflectores en la carga útil a la mitad. Con este esquema únicamente serán necesarias cuatro antenas reflectoras, una por cada color, que actuarán tanto para la transmisión como para la recepción.

En la Fig. 4.11 se muestra un modelo de antena con la combinación de un usuario en transmisión y recepción y la pasarela (*gateway*). [13]



Fig. 4.11. Antena SFB Feed Chain tx/rx [13]

4.2.2.3 Antena para satélite HTS

En este apartado se representa la solución de la antena de los satélites de tipo HTS a la que se ha llegado como resultado.

ANTENNA'S FOUR COLOUR SCHEME

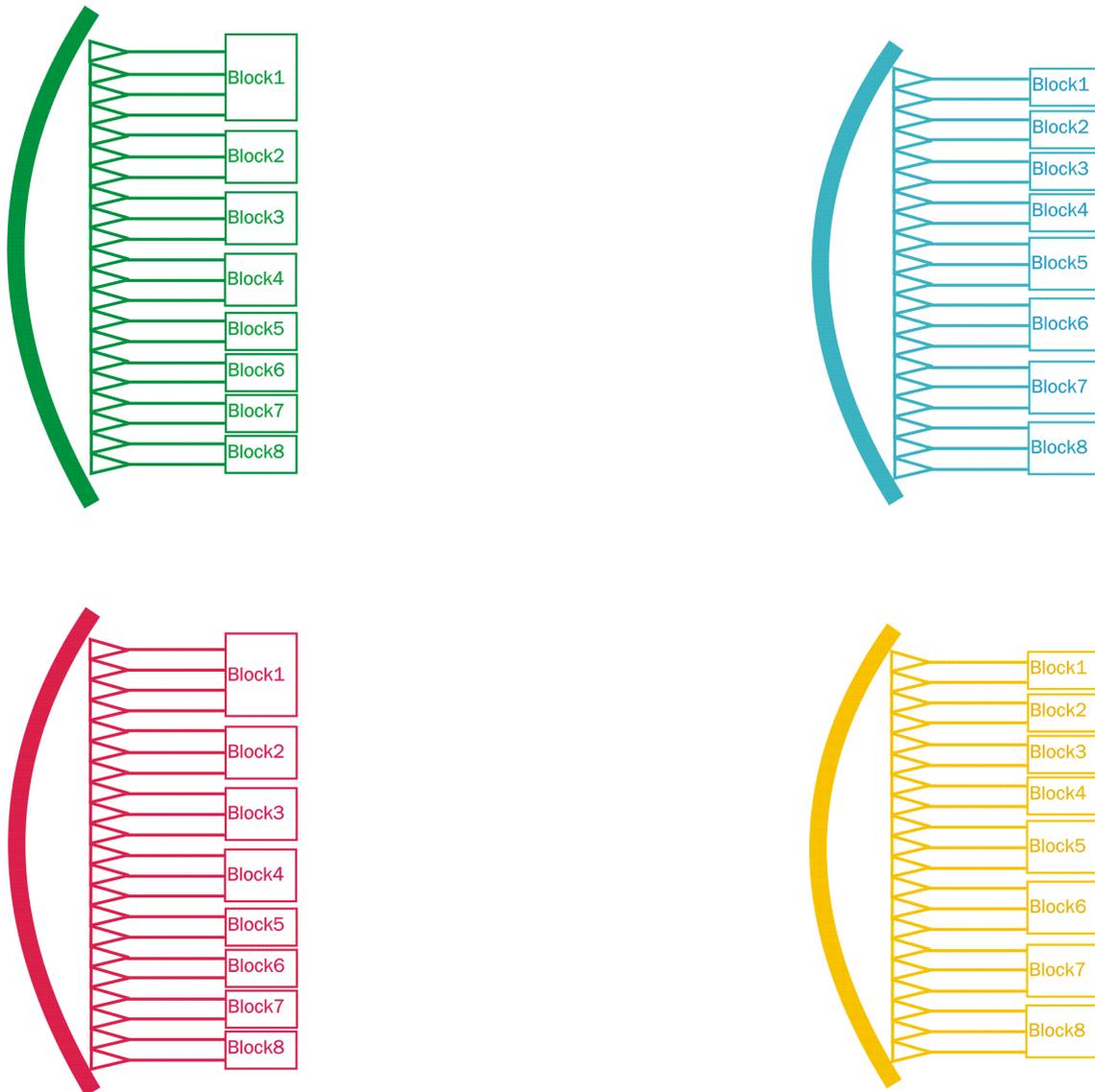


Fig. 4.12. Esquema de cuatro colores de las antenas

En el satélite de tipo HTS se tienen cuatro antenas, cada una asociada a un color del esquema de cuatro colores. Como se ha explicado anteriormente, los reflectores son del tipo SFB, lo que significa que por cada haz se tiene una alimentación. Esta es la razón de que en cada reflector haya varias bocinas.

Otro aspecto que se puede observar es que no se tienen el mismo número de alimentaciones por antena. Es decir, las antenas roja y verde tienen asociadas 21 bocinas, con sus consiguientes 21 haces. Mientras que las antenas azul y amarilla tienen un total de 20 bocinas. Esto es debido a que se ha realizado el análisis en base al satélite Ka-Sat que tiene un total de 82 haces. Sin

embargo, es aplicable para cualquier otro satélite únicamente cambiado la configuración para obtener el número de haces deseado.

Por otra parte, las bocinas están conectadas a un bloque pero con diferentes alimentaciones conectadas a cada bloque, no es igual para todas las antenas. Por ejemplo, en el Bloque 1 de las antenas roja y verde hay conectadas cuatro bocinas, mientras que para el caso de las antenas amarilla y azul sólo hay conectadas dos bocinas. Esto pasa para cada uno de los bloques porque es necesario balancear la carga. Es decir, por ahora cada Bloque es una caja negra que más adelante se explicará pero básicamente es el diagrama de bloques de la carga útil; así pues cada Bloque debe tener una contribución de la carga de cada una de las antenas y para que todos los Bloques tengan aproximadamente las mismas contribuciones es necesario realizar el proceso de balanceo de la carga. Así pues, en el Bloque 1 se tendrán un total de 12 haces y en el Bloque 8 se tendrán 10 haces. De esta manera, el balance de la carga es lo más simétrico posible teniendo en cuenta que para el caso del Ka-Sat, se tienen 82 haces a repartir entre cuatro antenas diferentes.

Cabe destacar que se tienen 8 bloques dado que existen físicamente ocho *gateways* en la infraestructura terrestre del Ka-Sat. Por consiguiente, cada uno de los bloques está asociado a un enlace entre uno de los *gateways* y el satélite. El caso de los *gateways* de *back-up* se explicará más adelante, pero es interesante resaltar que se realizará un esquema de redundancia específico en este caso.

Es importante analizar también como están diseñadas internamente las bocinas que se utilizarán en este tipo de satélites. Como se ha explicado previamente, para reducir el número de antenas necesarias y que solo se precisen cuatro reflectores, se deben utilizar bocinas que sean capaces de transmitir y recibir al mismo tiempo, esto se puede realizar mediante cadenas de alimentación (*feed chain*).

En la próxima figura se puede observar el diagrama de bloques de la cadena de alimentación que requiere la bocina de los satélites HTS. En primer lugar, es necesario un OMT (*Orthomode transducer*) para la transmisión.

Un OMT es un dispositivo que permite recibir o transmitir en polarización lineal dual en vez de una única polarización [15]. Estos dispositivos son capaces de combinar o separar dos señales microondas polarizadas ortogonalmente.

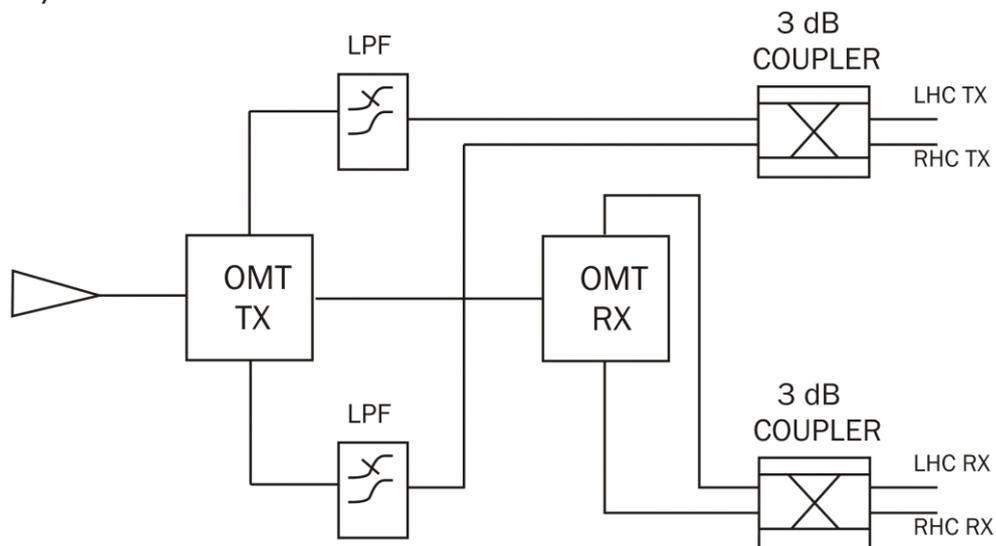
Así pues, se necesita en primer lugar en la cadena, un OMT para separar, en transmisión, la señal en dos polarizaciones ortogonales: LHC (*Left Hand Circular*) y RHC (*Right Hand Circular*). Se usa una polarización circular ya que es la más utilizada en enlaces de satélite debido a que así se consiguen enlaces más consistentes. De hecho, si utilizáramos polarización lineal, la capacidad de recepción de la señal se reduce debido a la atmósfera.

Una vez realizada la separación de la señal transmitida en las dos polarizaciones, es necesario realizar un filtrado. Concretamente se necesita un filtro paso bajo para asegurar que haya el mayor desacoplamiento posible entre las señales de transmisión y recepción así como rechazar los productos de intermodulación producidos por la red de polarización en transmisión [14].

A continuación se requiere de un híbrido, un acoplador direccional de 3 dB para dividir la señal en dos salidas de igual potencia. Una salida será la señal de transmisión LHC y la otra de transmisión en RHC.

El siguiente elemento en la cadena después del OMT de transmisión es otro OMT pero para realizar la recepción. El procedimiento es el mismo que para la transmisión pero en este caso se obtiene a la salida del híbrido la señal de recepción LHC y la RHC.

GW/User feed



- If the feed is GW and User, then there are the four outputs.
- If the feed is only of User, there are only two outputs. Two possible combinations:

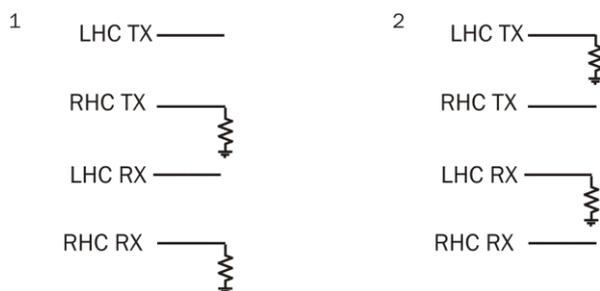


Fig. 4.13. Cadena de alimentación de la antena HTS

Se debe tener en cuenta que se necesitan bocinas para cubrir los haces de usuario y para cubrir los haces de *gateway*. Por lo tanto, se pueden dar dos casos diferentes, una para el supuesto de que la bocina cubra solo el haz de usuario, en cuyo caso solo se necesitarán dos salidas. Como se puede observar en la figura anterior, existen dos combinaciones, que las salidas sean transmisión LHC y recepción LHC o que se use para la transmisión y recepción la polarización a derechas, RHC. En este caso, un usuario concreto de una celda solo transmitirá o recibirá en una polarización, razón por la cual solo existen dos opciones (TX LHC+RX LHC ó TX RHC+RX RHC) en las que transmisión y recepción comparten la misma polarización.

El otro caso que puede ocurrir es que la bocina cubra un haz que sea a la vez haz de *gateway* y de usuario. En cuyo caso se requerirán las cuatro salidas de la figura anterior, se tendrá transmisión y recepción para Gateway y lo mismo para usuario.

4.2.3 CARGA ÚTIL

Una vez explicados todos los conceptos referentes a la antena que se utilizará en el satélite de tipo HTS, es necesario centrarse en cómo será la configuración de la carga útil del mismo. Este será el objetivo de este capítulo, desarrollar y explicar todos los conceptos referentes a la carga útil de un satélite de tipo HTS. Por último, se presentarán también los diagramas de bloques a los que se ha llegado sobre el funcionamiento interno de la carga útil de este tipo de satélites de comunicaciones.

La primera conclusión a la que se había llegado anteriormente era que tendríamos cuatro antenas, cada una de un color debido al esquema de cuatro colores. También se había visto que se tenían ocho bloques, cada uno de ellos asociados a diferentes números de bocinas para balancear la carga del sistema.

Partiendo de este punto, se debe tener presente que cada uno de los bloques está asociado a un enlace de *gateway* y que cada enlace de *gateway* debe estar formado por los cuatro colores del esquema (verde, azul, rojo y amarillo). Al haber diferente número de bocinas conectado a cada bloque, esto implica que se tendrá una configuración distinta en tamaño en cada caso. Tal y como se ha explicado anteriormente, se utilizan antenas multihaz de tipo SFB, por lo que cada haz está asociado a una bocina. Esto significa que, en el caso del Ka-Sat que tiene 82 haces, se operan 82 canales que conformarán la estructura interna de este satélite de tipo HTS basado en el Ka-Sat.

En las imágenes siguientes se puede observar la configuración de cada uno de los bloques funcionales, es decir, cada uno de los bloques que están asociados a un enlace entre el *gateway* y el satélite. Se tienen en total ocho bloques dado que se tienen ocho *gateways* funcionales, cada una con su estructura interna que se explicará y presentará más adelante.

En cada bloque se tiene además un haz que es al mismo tiempo haz de usuario y haz de *gateway*. Si se observa el dibujo se puede comprobar por ejemplo que, en el caso del primer bloque, uno de los haces (canales) de color azul está destinado a ser al mismo tiempo haz de *gateway* y de usuario. Esto implicará una complejidad añadida que habrá que tener en cuenta en el diseño de la carga útil.

Es importante observar para tener una imagen clara del diseño que por ejemplo en el caso del primer bloque se tienen cuatro haces para el color verde, otros cuatro para el rojo, dos para el azul y otros dos para el amarillo. Si se observa la Figura 4.12 donde se ha presentado el esquema de cuatro colores de las antenas, se puede comprobar como el número de haces para cada color y bloque tiene perfecta concordancia.

PROCESSORS Gw1 TO Gw4

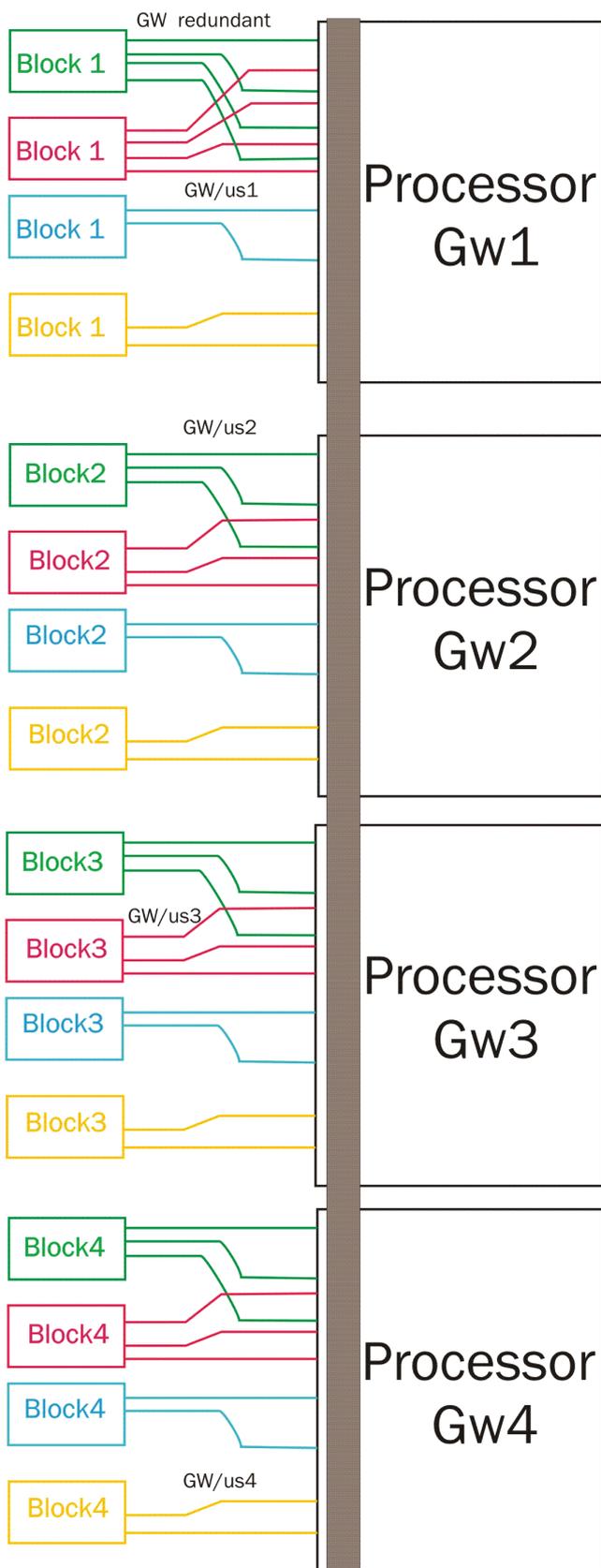


Fig. 4.14. Esquema TOP de los procesadores de los bloques 1-4

PROCESSORS Gw5 TO Gw8

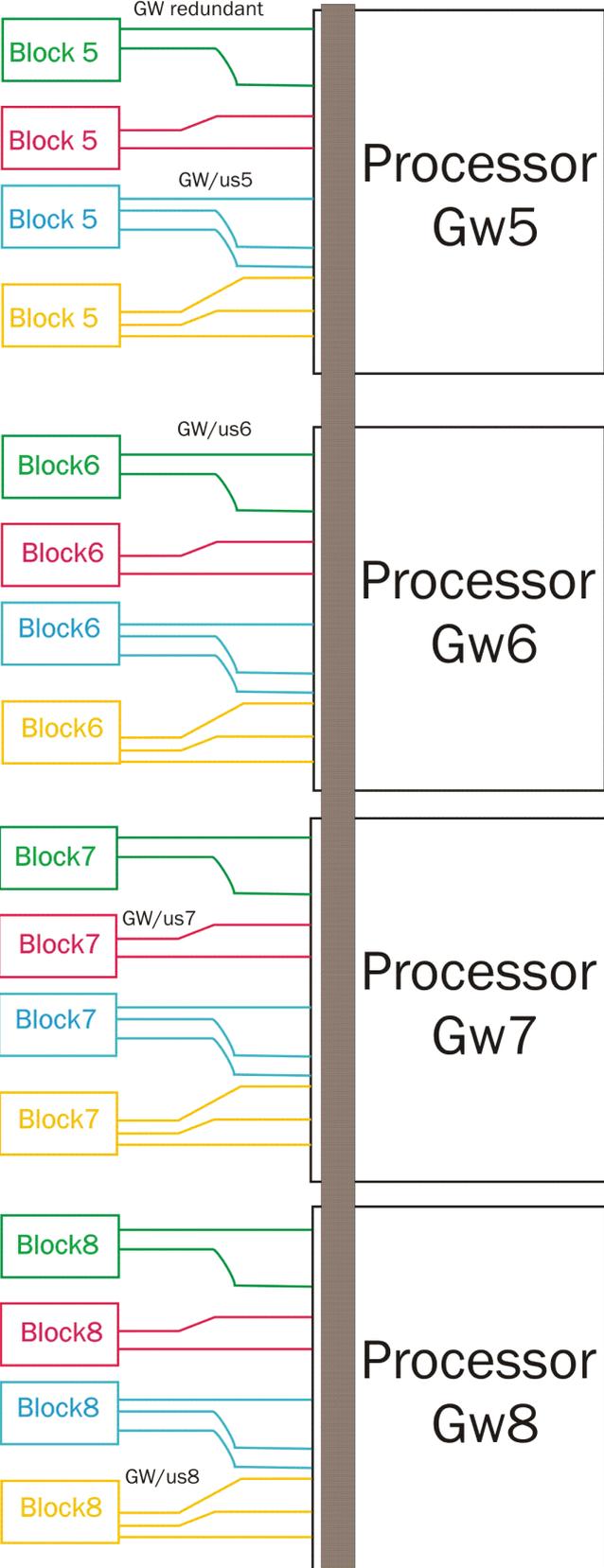


Fig. 4.15. Esquema TOP de los procesadores de los bloques 5-8

Así pues, ya están los 82 canales/haces divididos en cada uno de sus bloques funcionales. Sin embargo, de estos 82, dos de ellos son haces de *gateway* y usuario redundantes. Si se observan las figuras anteriores se puede comprobar que en cada una de ellas hay un haz redundante. El bloque gris que hay dentro de los bloques de los procesadores de *gateway* se ha realizado para evitar la complejidad de situar la redundancia en el mismo esquema.

En la figura siguiente se puede observar cómo estaría desarrollado el bloque gris que está presente en las dos figuras anteriores.

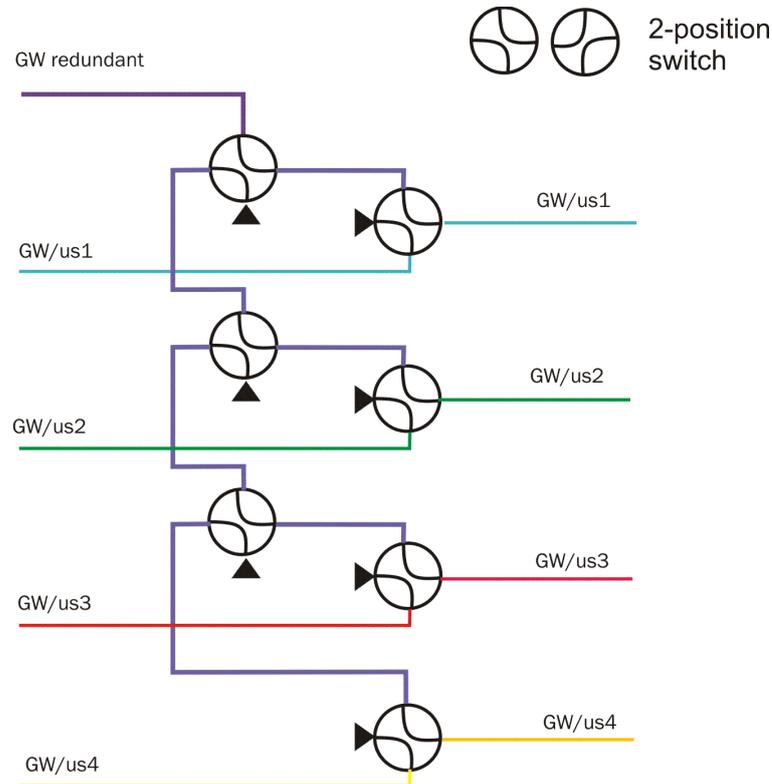


Fig. 4.16. Redundancia de Gateway

Los haces implicados para realizar la redundancia de *gateway* son aquellos que sirven para dar cobertura tanto al *gateway* como al usuario. Por consiguiente se tienen en total cuatro haces correspondientes a cada bloque y el haz de redundancia. En la figura se observa claramente que se tiene un camino redundante, el morado y los de los diferentes bloques que cada uno se corresponde a un color diferente (azul, verde, rojo y amarillo) con el objetivo de que cada uno de los *gateways* además de estar separado por diversidad espacial, esté separado por frecuencia.

En este caso, para la redundancia de *gateway* sólo se necesitan conmutadores de dos posiciones y usando una matriz de conmutadores con dos columnas se puede conseguir la redundancia. De esta manera, se consigue que si uno de los cuatro *gateways* operativos deja de dar servicio, el *gateway* redundante cubra la zona de cobertura y de este modo, el sistema no se vea comprometido.

La situación y el diseño de la redundancia son exactamente iguales para el caso de los bloques del 5 al 8 aunque por simplicidad se ha omitido el dibujo. De esta forma, se tendrían los enlaces de los ocho *gateways* operativos protegidos ante cualquier fallo de los mismos mediante los dos *gateways* de *back-up*, proporcionando así al sistema de una gran robustez.

4.2.4 ENLACES FORWARD Y RETURN

Anteriormente, se explicó que en los satélites de tipo HTS existían dos enlaces. Por un lado, está el enlace *Forward* que es el que va desde la *gateway* hasta los usuarios. Mientras que, en el lado opuesto, está el enlace *Return* que va desde los usuarios hasta la *gateway*.

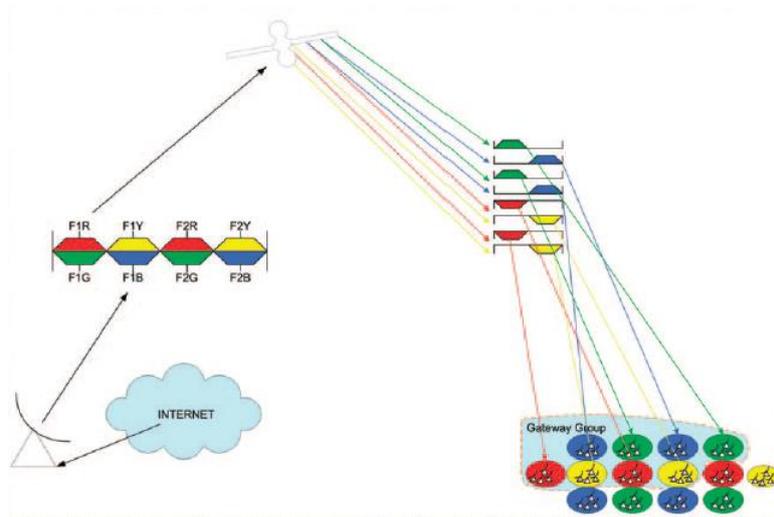


Fig. 4.17. Enlace Forward de un satélite HTS [11]

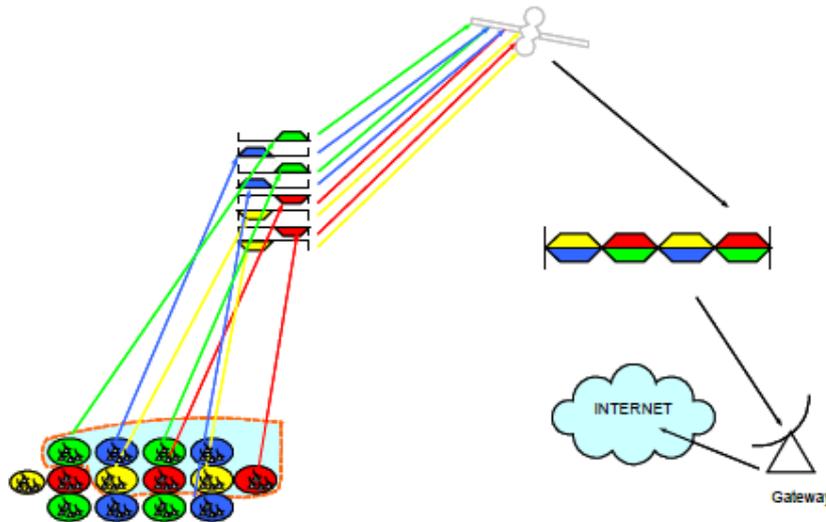


Fig. 4.18. Enlace Return de un satélite HTS [12]

En las figuras anteriores se puede observar cómo son los enlaces de *Forward* y *Return* más claramente. Como se puede ver, el ancho de banda que utiliza la *gateway* es mucho mayor que el que utilizan los usuarios, concretamente en el caso del Ka-Sat el enlace de *gateway* tiene un ancho de banda de 2 GHz; mientras que el enlace con los usuarios es de 500 MHz.

Se puede observar en las figuras como la misma frecuencia en una polarización dada se puede reusar varias veces. Esto es posible dado que las celdas deben estar lo suficientemente separadas para evitar interferencias [11].

En este caso, los 500 MHz del espectro de usuario en cada polarización están disponibles para el enlace de subida y de bajada para la comunicación con los usuarios. El esquema utilizado

de reuso de frecuencias es un esquema de cuatro colores donde se asignan 250 MHz a cada color. Por lo tanto, cada color utiliza un cuarto de la capacidad disponible de frecuencia.

Con el objetivo de reducir el número de *gateways*, varias celdas se asocian a cada *gateway* por lo tanto, el plan de frecuencias puede usar ambas polarizaciones. Esto implica un plan de frecuencias de una *gateway* que incluye varios canales en cada polarización [11].

En el enlace de *gateway* se tiene un espectro disponible de 2 GHz y cada uno de los canales de usuario consta de 250 MHz, por consiguiente, en cada polarización se pueden tener 8 canales de 250 MHz. Dado que se tienen dos polarizaciones se puede tener hasta un máximo de 16 canales de 250 MHz en ambas polarizaciones. Por lo tanto, dado que se tiene en el caso del Ka-Sat 82 haces, sólo serían necesarias 5 *gateways* si se trabajara a la máxima capacidad. Sin embargo, en el Ka-Sat se tienen 8 *gateways* y dos redundantes, así que habrá que realizar un sistema de *switching* antes de los bloques de carga útil para poder realizar la redundancia de *gateway*.

El plan de frecuencias resultante se especifica en la siguiente imagen donde se desglosa el plan de frecuencias del Ka-Sat. A continuación se tiene una tabla con las diferentes bandas de frecuencias del Ka-Sat.

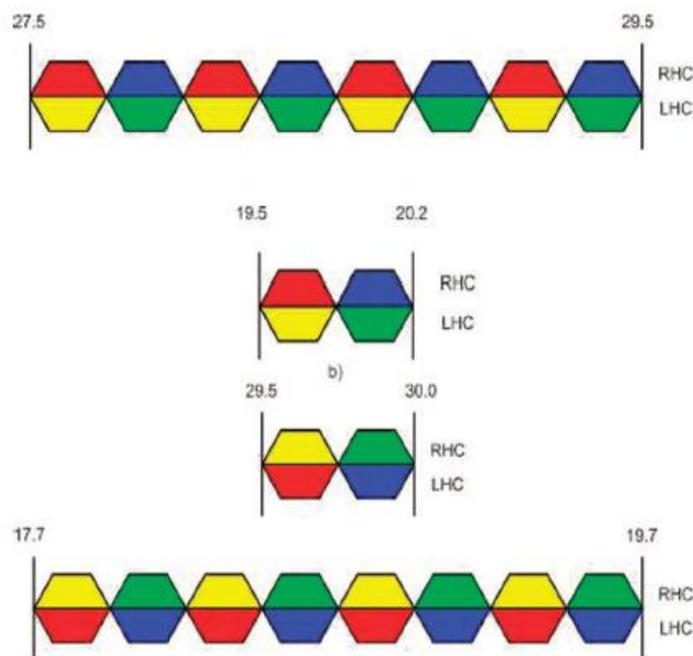


Fig. 4.19. Plan de frecuencias del Ka-Sat [11]

Enlace Forward	<i>Uplink desde Gateways</i>	27.5 GHz a 29.5 GHz
	<i>Downlink hacia Usuarios</i>	19.7 GHz a 20.2 GHz
Enlace Return	<i>Uplink desde Usuarios</i>	29.5 GHz a 30.0 GHz
	<i>Downlink hacia Gateways</i>	17.7 GHz a 19.7 GHz

Tabla 4.1. Bandas de frecuencia del Ka-Sat en ITU Región 1 [11]

Para los usuarios, en el enlace *Return* la polarización es ortogonal al enlace *Forward* [11]. De esta manera, al diferenciar por la polarización se está aumentando la capacidad del sistema.

Además, se utiliza polarización circular porque proporciona un procedimiento simplificado ya que no hay alineación en el plano de polarización [10].

En este ejemplo de la Figura 4.9 se ve que para los usuarios del enlace *Forward*, las celdas rojas y azules son asignadas a la polarización circular a derechas (RHC) mientras que las celdas amarillas y verdes se asignan a la polarización circular a izquierdas (LHC). Las celdas rojas y amarillas ocupan la mitad alta del espectro (pero en polarizaciones ortogonales) mientras que las celdas verdes y azules ocupan la mitad baja del espectro. Sin embargo, para los usuarios, las celdas azules y rojas emplean polarización LHC mientras que las celdas verdes y amarillas emplean polarización RHC para los usuarios [11].

El Ka-Sat permite la comunicación bidireccional (enlace *Forward* y *Return*) en una red en estrella y por lo tanto, incluye dos cargas útiles: carga útil *Forward* y *Return* [10].

En la siguiente imagen se puede observar cuál es el diagrama de bloques interno de lo que se ha llamado anteriormente *Processor Gwx* en las Figuras 4.14 y 4.15. Se tienen dos cargas útiles, la *Forward* y la *Return* y además está separado en las dos polarizaciones, RHC y LHC.

Para entender este dibujo habría que empezar observando las antenas que se encuentran en la parte central de la figura. Se tienen dos tipos de antenas diferentes debido a los diferentes haces que tiene el Ka-Sat. En primer lugar, se tiene en una de las polarizaciones, en este caso la RHC, una bocina que da cobertura a un haz de usuario y otro de *gateway*, es lo que está denominado como *GW/user feed*.

En este caso, se tiene esta bocina con cuatro salidas en la polarización a derechas pero para otro caso estaría en la otra polarización. Simplemente no se tendrá una para cada polarización porque el haz de una determinada *gateway* solo puede estar en una polarización concreta, no puede estar en ambas, lógicamente.

El resto de las bocinas dan cobertura únicamente a los usuarios, por lo tanto, solo se tienen dos salidas y se denominan *User feed*. Esta diferencia de los tipos de antenas que están incluidas en la carga útil se explicó anteriormente en el capítulo 4.2.2.3, concretamente en la Figura 4.13 donde se tenían las dos posibilidades para dos salidas (conectado a LHC o RHC y el otro conectado a tierra).

Por un lado, las antenas que solo dan cobertura a los usuarios, *User feed* siguen una estructura sencilla. La señal viene de la pasarela y entra en la carga útil *Forward* después es transmitida a los usuarios. Cuando los usuarios transmiten, la *User feed* recibe la señal de los usuarios y la entrega a la carga útil *Return* que posteriormente se transmitirá a la pasarela. En este tipo de antena, el proceso es el mismo para ambas polarizaciones.

Por otro lado, en el caso de la antena *GW/user feed* se tienen cuatro salidas diferentes (transmisión RHC, LHC y recepción RHC, LHC) y se sigue una estructura mucho más compleja que en el caso anterior. En este caso, la polarización RHC contempla tanto la cobertura de usuario como la de pasarela. Es por ello, que se necesitan dos diplexores. De esta manera, del primer diplexor se tiene una señal de recepción del *gateway* en RHC y otra señal de recepción a los usuarios en RHC. Del segundo diplexor, se tiene una señal de transmisión a los usuarios en polarización a derechas y otra de transmisión a la *gateway*. En el caso de la polarización LHC (las otras dos salidas de la antena), se tiene una señal para recibir desde el *gateway* y otra para transmitir desde el *gateway*.

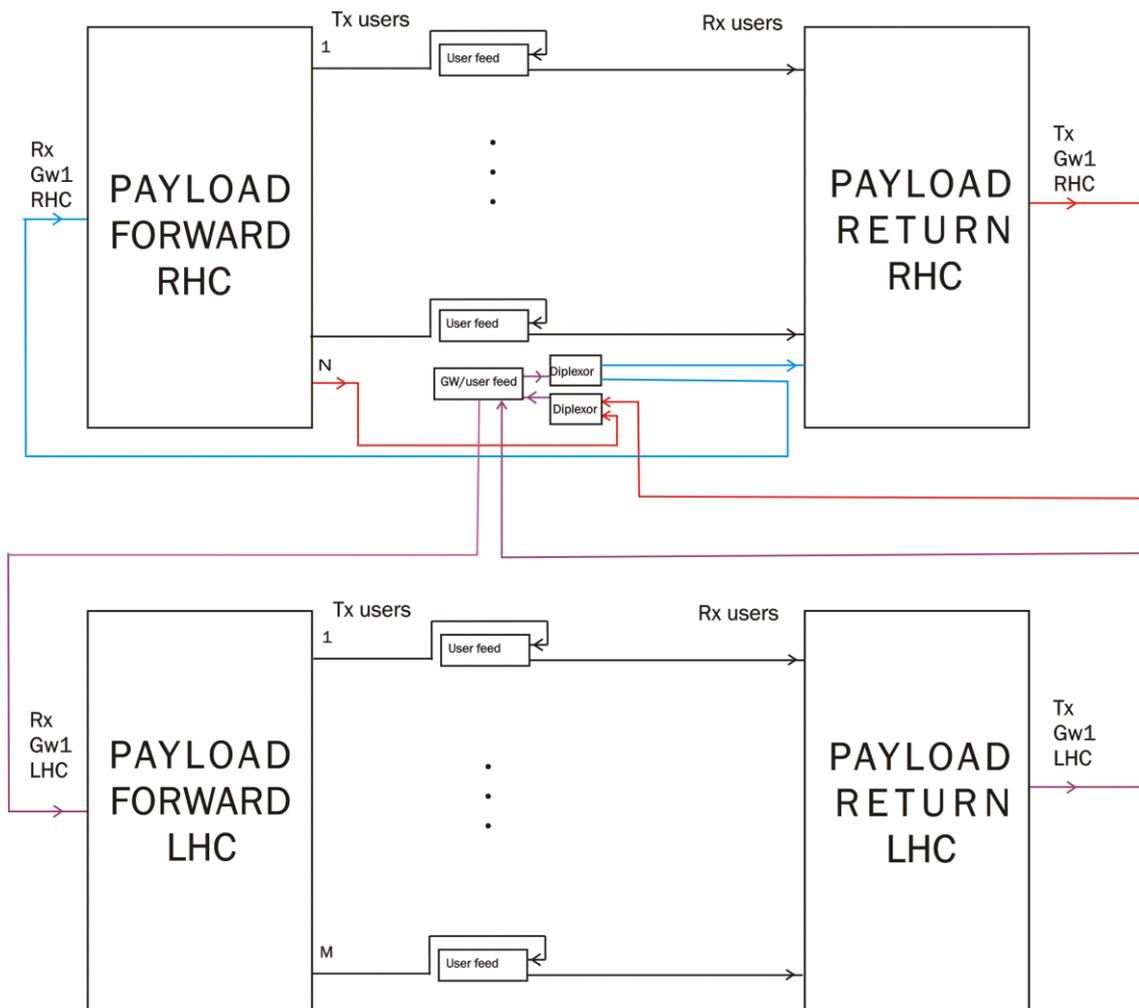


Fig. 4.20. Diagrama de bloques de la combinación de la carga útil forward y return

Este diagrama de bloques por ejemplo, está utilizando la *Gateway 1* por lo tanto, observando la Figura 4.14 se puede ver que este bloque tiene doce haces. Así pues, para que fuera simétrico, se tendría que la polarización a derechas, RHC, tendría seis haces así pues $N=6$. Mientras que, la polarización a izquierdas LHC, tendría otros seis haces, por lo tanto $M=6$. Sin embargo, esta consideración cambia en función de la estructura. Para este caso concreto, los bloques del 2 al 8 tienen un total de diez haces porque se ha realizado un balanceo de la carga para que así fuera, así pues se tiene en estos casos que $N=5$ y $M=5$.

Atendiendo a las Figuras 4.14 y 4.15 se observa que el esquema de redundancia de *gateway* está incluido en el bloque *Processor Gwx* cuyo diagrama de bloques interno es el de la Figura 4.20. Se ha optado por no insertar el esquema de redundancia en esta figura para restarle complejidad; sin embargo, realmente estaría comprendido aquí.

En la antena *GW/user feed* existen realmente cuatro salidas para la transmisión y recepción en ambas polarizaciones; aunque como se ha explicado antes, el resultado son seis salidas para dar cobertura a la *gateway* y a los usuarios. No obstante, para el caso de la redundancia de *gateway* serán necesarias las salidas de transmisión y recepción de la *gateway*. De esta manera se tendrá que por cada *Processor Gwx* existirán cuatro esquemas de redundancia. Es decir, por ejemplo, para el caso de la salida de la antena *GW/user feed* que se corresponde con la recepción de la *gateway* en polarización a izquierdas (Rx GW1 LHC, véase Figura 4.20) se tendrá el

esquema de redundancia de recepción de la Figura 4.16, siendo el resto de entradas las correspondientes de cada *Processor Gwx* de los primeros 4 bloques en este caso que se observan en la Figura 4.14.

En el caso de la entrada en la antena *GW/user feed* que se corresponde con la transmisión de la *gateway* en polarización a izquierdas (Tx GW1 LHC, véase Figura 4.20) se tiene el esquema de redundancia de transmisión, es decir, con un esquema de 4:5.

De manera similar ocurre para el caso de las salidas de *gateway* la antena correspondientes a la polarización a derechas, es decir, las señales Tx GW1 RHC y Rx GW1 LHC. Así pues, tendríamos los cuatro esquemas de redundancia en paralelo en este primer bloque de cuatro correspondientes a *Processor Gw1, 2, 3 y 4*.

Para el caso del siguiente bloque *Processor Gwx* correspondientes a los 4 últimos, del 5 al 8 (véase Figura 4.15) la filosofía es exactamente la misma. Tal y como se ha explicado, el resultado es que en todo el sistema se tiene en total 8 esquemas de redundancia como el que se ha visto en la Figura 4.16.

4.2.5 PAYLOAD FORWARD

En esta sección se explicará cuál es la configuración de la carga útil del enlace *Forward*, que se corresponde con la comunicación desde la *gateway* hasta los usuarios, pasando por el satélite.

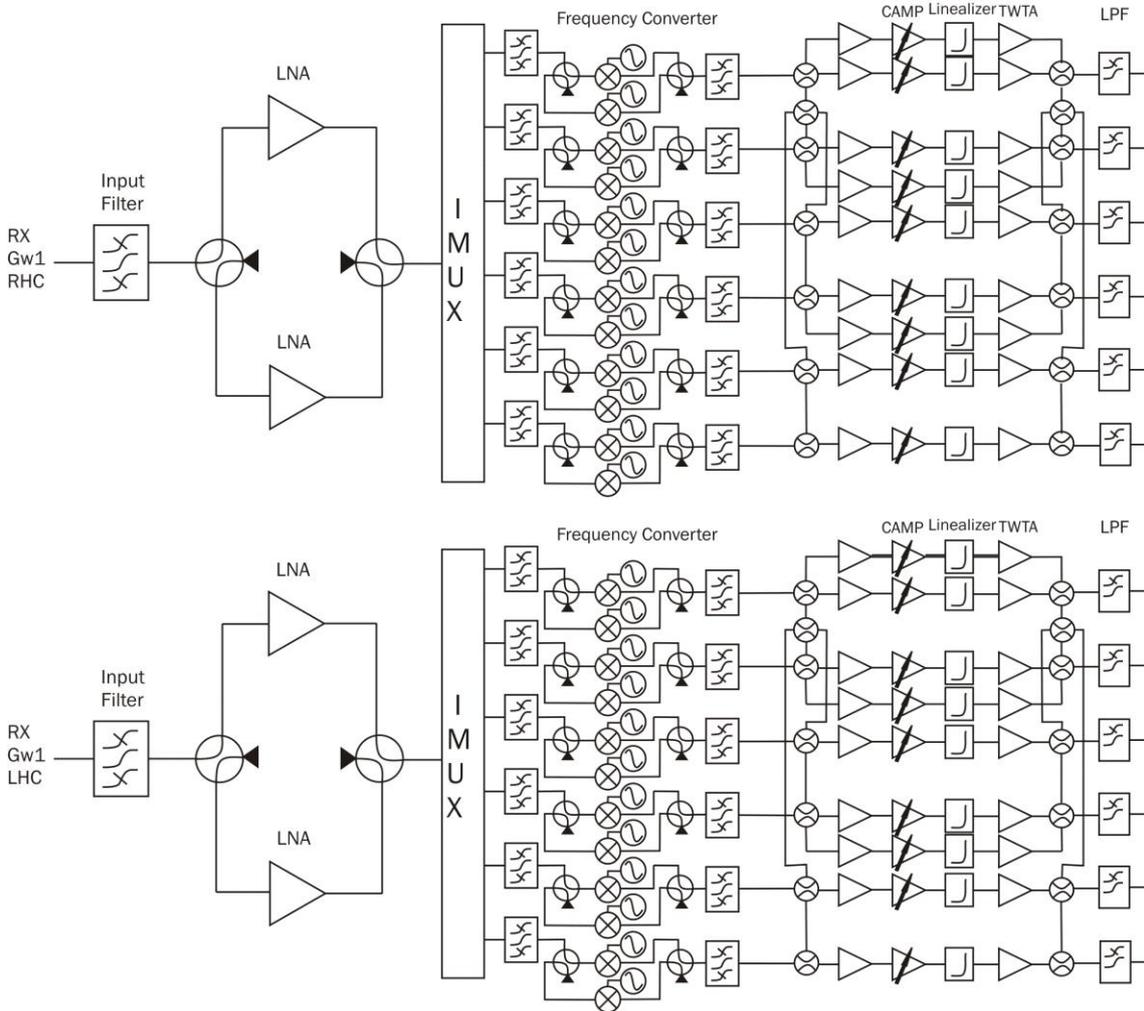


Fig. 4.21. Payload Forward para el Bloque 1

En la imagen anterior se presenta el diagrama de bloques de la carga útil del enlace *Forward* para el caso del primer bloque del satélite Ka-Sat. Como se había explicado anteriormente, se tienen 8 bloques correspondientes a las ocho *gateways* activas del sistema del satélite. En el caso del Bloque 1, le corresponden 12 canales que se dividen en seis para la polarización LHC y otros seis para la polarización RHC, como ha comentado anteriormente.

En la carga útil *Forward* se recibe la señal de 2 GHz enviada por la *gateway* y al final, se transmite hacia los usuarios los canales individuales de 250 MHz.

Al inicio, la señal que se recibe debe ser filtrada mediante un componente pasivo, concretamente un filtro paso banda que se encarga de proteger al LNA que hay a continuación y al resto de la carga útil. Una de las funciones principales de este filtro preselector es atenuar las señales interferentes ya que pueden saturar el ancho de banda del amplificador de bajo ruido. Otra

importante es atenuar las señales interferentes que tengan más potencia que la señal de interés para garantizar que las interferencias no entran en la carga útil del satélite.

Una vez se ha filtrado la señal, un amplificador de bajo ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*) se encarga de amplificar la señal de baja potencia sin degradar su relación señal al ruido. Este tipo de amplificadores están diseñados para aumentar la potencia de la señal minimizando el ruido adicional. En general, este tipo de amplificadores suele proporcionar una ganancia de 20 dB y disminuir la relación señal al ruido en menos de un factor dos. Aunque los LNA se ocupan de las señales débiles que están justo por encima del umbral de ruido, también deben tener en cuenta la presencia de señales más grandes que causan la distorsión de intermodulación.

El LNA tiene unas funciones imprescindibles en la carga útil, por ello se utiliza una redundancia 1:2. En este caso, dado que el esquema de redundancia es sencillo, es suficiente utilizar interruptores de dos posiciones.

En este punto la señal está preparada para dividirse en canales. Así pues, el primer elemento después del amplificador de bajo de ruido es un multiplexor de entrada. Este elemento es el encargado de dividir el ancho de banda total de la señal en diferentes sub-bandas. Está compuesto por un conjunto de filtros paso banda alimentados mediante circuladores que definen el ancho de banda en varios canales. La configuración típica de los IMUX es la que está basada en circuladores como en el caso del satélite satcom tradicional.

Una vez dividido el ancho de banda total en canales, es necesario realizar la conversión en frecuencia. Como se explicó previamente, la señal enviada por la *gateway* en el enlace *Forward* está en un rango de frecuencias comprendido entre 27.5 GHz y 29.5 GHz, mientras que la bajada hacia los usuarios está en la banda de frecuencias de 19.7 GHz a 29.5 GHz; por lo tanto es inevitable realizar la conversión en frecuencia (véase Tabla 4.1).

Para cambiar la frecuencia de la señal se precisa de un mezclador con su correspondiente oscilador local. Sin embargo, antes del mezclador se debe colocar un filtro paso banda, un filtro *Image-Reject* para eliminar la señal imagen. La frecuencia del oscilador local se debe seleccionar adecuadamente para evitar que las frecuencias imagen que estén cerca de la frecuencia RF deseada sean filtradas con seguridad. Después del mezclador, se inserta otro filtro paso banda, concretamente es un filtro selector de canal.

Es importante señalar que la redundancia en esta sección solo se ha realizado en el mezclador y el oscilador local dado que los dos filtros (anterior y posterior al mezclador) son componentes pasivos. Estos componentes tienen una tasa de fallo ínfima y su replicación es muy difícil y costosa, razón por la cual no se aplica la redundancia (ocurre lo mismo con el IMUX).

Se puede apreciar también que la redundancia se ha realizado de 1:2 en cada canal debido a que cada una de las sub-bandas tiene una frecuencia distinta por lo que el oscilador local no puede ser compartido por todos los canales. El tipo de interruptores es el mismo que en el caso del LNA puesto que el esquema de redundancia es el mismo; es decir, se utilizan interruptores de dos posiciones.

El siguiente paso en el diseño de la carga útil *Forward* es la cadena de amplificación del sistema. Es importante que después del filtro selector de canal haya un amplificador que se encargue de dar más potencia a la señal. A continuación, se coloca un amplificador de canal (CAMP) que generalmente está asociado a una ganancia variable que se ajusta mediante

telecomando. Este dispositivo proporciona la ganancia requerida a la salida del receptor, generalmente de 20 a 50 dB. Además es necesario que se tenga una buena linealidad para evitar la contribución excesiva del ruido de intermodulación a la carga útil por lo que se introduce un linealizador.

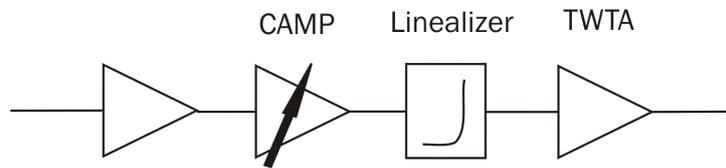


Fig. 4.22. Cadena de amplificación

El siguiente elemento en la cadena de amplificación es el amplificador de alta potencia (HPA, *High Power Amplifier*). Es imprescindible para este elemento que el amplificador de canal previo aumente el nivel de la señal hasta la potencia requerida por el amplificador de alta potencia.

El HPA es el que proporciona la potencia de salida de cada canal por lo que, determina la PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente). Como se explicó anteriormente, hay dos tipos de amplificadores de alta potencia, los TWTA y los SSPA.

En general, la eficiencia de los TWTA es mayor que la de los SSPA y también trabaja con mayores potencias. Además, si analizamos la Tabla 3.2 comprobamos que para la banda de frecuencias del Ka-Sat, banda Ka, el TWTA es el amplificador que se utiliza.

En la cadena de amplificación se utiliza un esquema de redundancia más complejo que en el resto de la carga útil. Esta parte es fundamental para el sistema por lo que se utiliza una redundancia 6:9 para dar mayor consistencia al sistema frente a fallos. Dada la complejidad del sistema redundante, se utilizan interruptores de cuatro posiciones como se puede comprobar en la figura anterior.

Finalmente, a la salida del repetidor es necesario situar un filtro paso banda para eliminar los armónicos generados por las no-linealidades de los elementos y proporcionar un aislamiento adicional al repetidor. Dado que se trata de un elemento pasivo, no es necesario que tenga redundancia. La señal de cada canal ahora, puede ser entregada a cada uno de los usuarios correctamente.

4.2.6 PAYLOAD RETURN

Este apartado se verá cuál es el diagrama de bloques de la carga útil *Return* del satélite, basado en el enlace desde los diferentes usuarios a los que da cobertura el satélite hasta la *gateway*, a través del satélite de tipo HTS.

En la siguiente figura está representado el diagrama de bloques de la carga útil del enlace *Return* para el Bloque 1 del satélite Ka-Sat. Simétricamente al caso del enlace *Forward*, el Bloque 1 tiene doce canales divididos en seis para la polarización LHC y otros seis para la polarización RHC.

En esta carga útil del satélite, se reciben las contribuciones de los usuarios de diferentes canales cada uno de 250 MHz de ancho de banda y al final, estos canales se multiplexan en una única señal de 2 GHz que es enviada al *gateway* correspondiente.

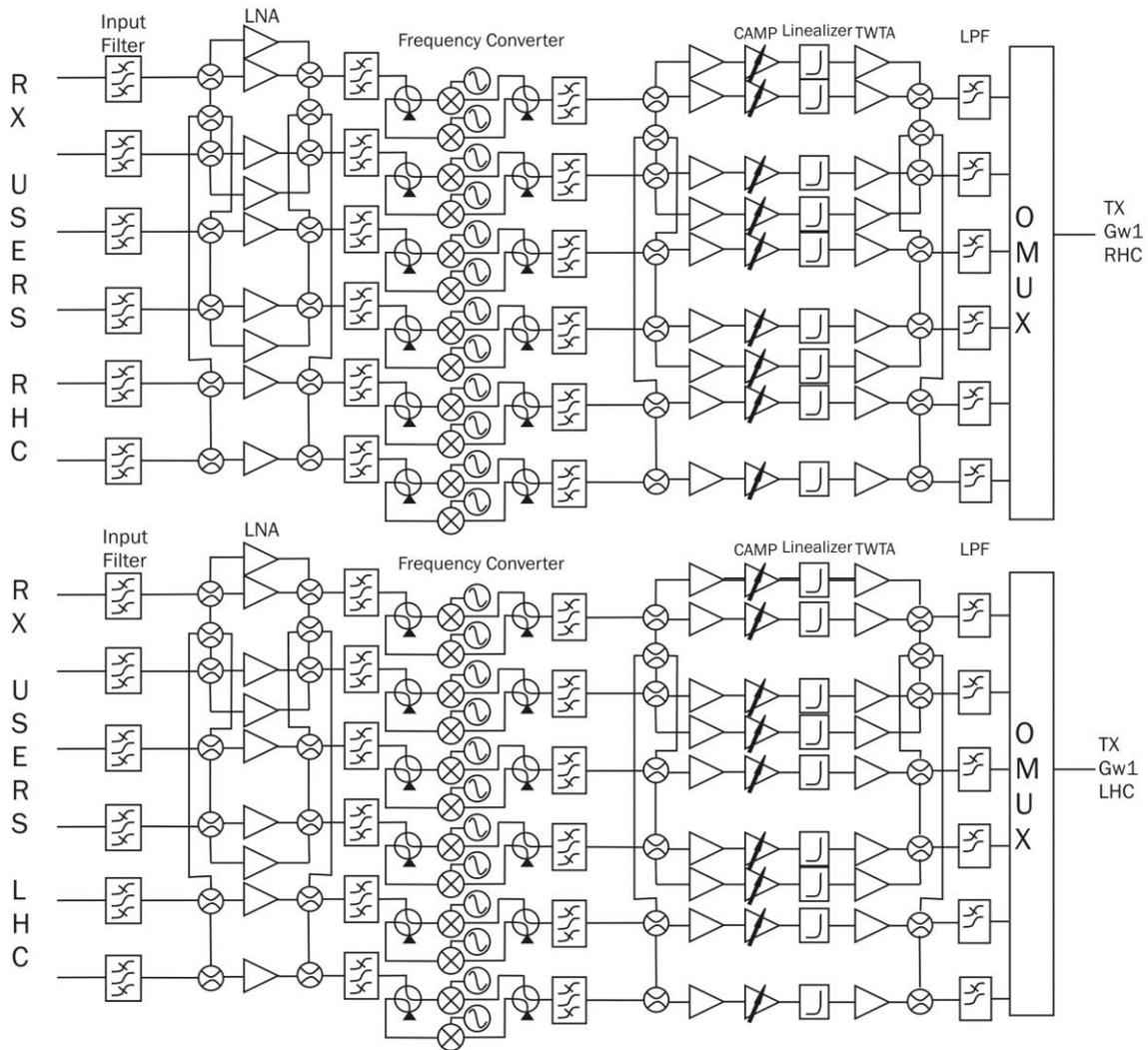


Fig. 4.23. Payload Return para el Bloque 1

La configuración que se tiene para la carga útil *Return* es muy parecida a la del *Forward* pero en sentido inverso. En este caso, se reciben varias señales que provienen de los usuarios y la primera medida que se debe tomar es filtrar cada uno de estos canales. Es por ello que al principio se utiliza un filtro paso banda con el objetivo de proteger al sistema de las señales interferentes.

A continuación, es necesario insertar un LNA por cada canal más la redundancia correspondiente. El amplificador de bajo ruido se encargará de aumentar la potencia de cada una de las sub-bandas pero minimizando el ruido adicional. En este caso, se ha utilizado un esquema de redundancia más complejo que en la carga útil *Forward*. La razón es que tenemos varios canales por lo que se puede minimizar el número de elementos redundantes y no es necesario que por cada sub-banda la relación de redundancia sea 1:2. Es por ello que se ha elegido un sistema redundante de 6:9 con interruptores de cuatro posiciones.

El siguiente paso en el diagrama de bloques es la conversión en frecuencia. Las señales enviadas en el enlace de subida *Return* desde los usuarios están en un rango de frecuencias comprendido entre 29.5 GHz y 30.0 GHz, mientras que el enlace de bajada hacia la pasarela está en la banda de frecuencias de 17.7 GHz a 19.7 GHz; así pues, es estrictamente necesario realizar la conversión en frecuencia (véase Tabla 4.1).

La estructura del conversor de frecuencia es la misma que en la carga útil *Forward*, se precisa de un mezclador y su adecuado oscilador local. También es necesario el filtro anterior al mezclador, filtro *Image-Reject* para suprimir la señal imagen y posteriormente al mezclador otro filtro paso banda, el filtro selector de canal. La redundancia es la misma que para el caso anterior, realizada sobre el mezclador y el oscilador local para cada canal con un esquema de redundancia 1:2 y con interruptores de dos posiciones.

En este punto, es preciso amplificar los diferentes canales por lo que es necesario situar la cadena de amplificación. Después del filtro posterior al mezclador se coloca un amplificador que debe dar más potencia a la señal. Luego, un amplificador de canal (CAMP) proporcionará la potencia requerida a la salida del receptor. Es necesario asegurar que haya una buena linealidad para evitar el ruido de intermodulación por lo que se utiliza un linealizador.

El último elemento en la cadena de amplificación es un HPA, amplificador de alta potencia que será el que determinará la PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente). Concretamente, el tipo de HPA que se utiliza es un TWTA por las mismas razones que en el caso de la carga útil *Forward*.

En cuanto a la configuración de la redundancia de la cadena de amplificación, se utilizan interruptores de cuatro posiciones con una redundancia de 6:9 para dar robustez al sistema.

Para suprimir los armónicos que generan los dispositivos debido a sus no-linealidades y dar un grado mayor de aislamiento, al final de la cadena de amplificación se ubica un filtro paso banda.

Por último, se requiere aunar las señales procedentes de los usuarios en una única conjunta para ser enviada a la *gateway*. Así pues, se requiere de un multiplexor de salida para recombinar los canales después de la amplificación de potencia.

Las pérdidas en los OMUX son críticas ya que implican la reducción directa de la potencia radiada. Debido a esto, se utiliza un multiplexor *manifold*, usado para requisitos de pérdidas de inserción críticas. Después del multiplexor, se tiene la señal de 2 GHz lista para ser enviada a la *gateway* correspondiente.

4.3 ESTIMACIÓN DE LOS COMPONENTES PASIVOS

Anteriormente, se ha presentado el diagrama de bloques de la carga útil de los diferentes tipos de satélites de comunicaciones. Por lo tanto, ahora se tienen todos los elementos para realizar la estimación de los componentes pasivos que son necesarios en los satélites.

En primer lugar, se estimará para el caso de los satélites tradicionales. A continuación, se realizará la misma operación para los satélites de tipo HTS. Y, finalmente se realizará esta estimación para la lista de satélites lanzados en el periodo comprendido entre 2010 y 2014 en Europa, presentada al principio de la memoria.

4.3.1 ESTIMACIÓN SATÉLITE TRADICIONAL

En el caso del satélite tradicional, existen unos componentes pasivos que serán fijos, independientemente del número de canales y otros componentes que dependerán de cuántos canales tenga el satélite. En la Figura 4.1 se pueden observar todos los componentes que existen en la carga útil de comunicaciones.

Los componentes que no dependen del número de canales son: el filtro de entrada, los dos filtros antes y después del conversor de frecuencia y el filtro de salida. En el multiplexor de entrada también hay un componente fijo que no depende del número de canales, el híbrido. Además, habrá que tener en cuenta los interruptores para realizar la redundancia del amplificador de bajo ruido y del conversor de frecuencia. En general, se tendrán cuatro interruptores fijos independientemente del número de canales.

El resto de componentes pasivos dependen del número de canales del satélite. Así pues, los filtros paso banda y los circuladores del multiplexor de entrada son variables. También lo son los desfasadores y los filtros paso banda del multiplexor de salida de la carga útil del satélite. Adicionalmente, serán variables el número de interruptores del esquema de redundancia de la cadena de amplificación, que dependerá del número de canales.

La cadena de amplificación (sin tener en cuenta los *switches*) no tiene componentes pasivos ya que toda esta sección se encarga de amplificar la potencia de la señal de salida para aumentar la PIRE que se entregará al sistema.

Así pues, se deduce la siguiente fórmula para el caso de los componentes pasivos que hay en la carga útil de los satélites:

$$NCP = 9 + 4 \times NC + 2 \times NI$$

Siendo:

- *NCP*: número de componentes pasivos.
- *NC*: número de canales.
- *NI*: número de interruptores en la cadena de amplificación.

De esta forma los nueve componentes que no dependen del número de canales son un valor fijo: filtro de entrada, de salida, los dos filtros del conversor de frecuencia, el híbrido del multiplexor y los cuatro interruptores de redundancia.

Mientras que, los cuatros componentes que dependen del número de canales son un valor variable: los filtros y circuladores del multiplexor de entrada y los desfasadores y filtros del multiplexor de salida.

La otra parte variable se corresponde con los interruptores que hay en el esquema de redundancia de la cadena de amplificación. El número de interruptores se consigue mediante la siguiente fórmula:

$$NI = \text{floor}\left(\frac{(NC \times \frac{3}{2}) + NC}{2}\right)$$

Es importante aclarar que $NC \times \frac{3}{2}$ es el número de canales que se obtiene al aplicar el esquema de redundancia en la cadena de amplificación. Se puede comprobar que para el caso concreto de la Figura 4.1 se tienen seis canales activos y nueve canales totales para la redundancia ($6 \times \frac{3}{2} = 9$). Se hace la media de los canales totales y los activos y la parte entera de la misma será el número de interruptores que se tendrá en la cadena de amplificación. Como se ha visto en la fórmula que calcula el número de componentes pasivos, este número deberá ser multiplicado por dos, dado que existen interruptores a la entrada y a la salida de la cadena. Concretamente, en este caso se tienen 14 interruptores en total.

En resumen, se tienen los siguientes componentes pasivos en el satélite tradicional:

- 1 filtro de entrada.
- 2 filtros para el conversor de frecuencia.
- 4 interruptores para realizar la redundancia del LNA y del conversor de frecuencia.
- 1 híbrido para el multiplexor.
- 1 circulador para el multiplexor de entrada por cada canal.
- 1 filtro de canal después del circulador por cada canal.
- 1 filtro del multiplexor de salida, después del esquema de amplificación, para cada canal.
- 1 desfasador para el multiplexor de salida por cada canal.
- El número necesario de interruptores en función del número de canales que se puede obtener mediante la fórmula anterior.

Así pues, la fórmula completa será la siguiente:

$$NCP = 9 + 4 \times NC + 2 \times \text{floor}\left(\frac{(NC \times \frac{3}{2}) + NC}{2}\right)$$

Por consiguiente, en el ejemplo del satélite tradicional donde se tenían 6 canales, se tiene un total de 47 componentes pasivos.

4.3.2 ESTIMACIÓN HTS

La estimación de los componentes pasivos para el caso de los satélites *High Throughput Satellite* es mucho más difícil debido a que la carga útil tiene una gran complejidad, como se ha mostrado anteriormente.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que los componentes pasivos de la antena no formarán parte de la carga útil de comunicaciones del satélite. Esto es debido a que irán integrados en el modelo de antena que se mostró previamente en la Figura 4.11.

Además, habrá que tener en consideración que cada *Processor Gwx* como los de la Figura 4.14 y 4.15 están formados por dos *payload Forward* y dos *payload Return* como se puede observar en la Figura 4.20. En esta última se debe tener en cuenta también que hay dos elementos pasivos, dos diplexores encargados de dividir la señal, una para la pasarela y otra para los usuarios.

A continuación, de las *payload Forward* y *Return* se tendrán elementos pasivos tales como los filtros de entrada y salida o los incluidos en los multiplexores, entre otros. Otro aspecto a tener en cuenta serán los interruptores de redundancia, entre los que habrá que tener en cuenta el esquema de redundancia de las *gateways*.

Así pues, la fórmula para estimar los componentes pasivos en un satélite de tipo HTS será:

$$NCP = (2 \times PF + 2 \times PR + 2) \times NPG + RG$$

Siendo:

- *NCP*: número de componentes pasivos.
- *PF*: componentes pasivos de la *payload Forward*.
- *PR*: componentes pasivos de la *payload Return*.
- *NPG*: número de *Processor GW*.
- *RG*: redundancia de *gateway*.

Como se ha comentado anteriormente, en la Figura 4.20 se observa que hay dos *payload Forward*, otras dos *Return* y los dos diplexores. Además esto habrá que hacerlo por cada bloque que hemos llamado *Processor GW* en las Figuras 4.14 y 4.15. Cada uno de estos *Processor GW* está asociado a un enlace con una *gateway* operativa, así pues, el número de componentes pasivos en el caso de los satélites de tipo HTS dependerá del número de *gateways*.

El último término de la fórmula se corresponde a la redundancia de *gateway*. En la Figura 4.16 se mostraba la configuración del esquema de redundancia de las *gateways* para el caso del Ka-Sat y se tenían siete interruptores. En cada satélite de tipo HTS habrá que analizar el número de *gateways* que se tienen y realizar un esquema de redundancia adecuado.

Por otra parte, para calcular el número de componentes pasivos de la *payload Forward* se ha utilizado la fórmula siguiente:

$$PF = 4 + 7 \times NC + 2 \times \text{floor}\left(\frac{(NC \times \frac{3}{2}) + NC}{2}\right)$$

Como en el caso de la *payload* tradicional existen unos componentes que no dependen del número de canales. En este caso son: el filtro a la entrada, los dos interruptores de redundancia para el LNA y el híbrido del multiplexor de entrada.

También existen unos componentes que dependen del número de canales que son: los filtros y circuladores del multiplexor de entrada, los dos interruptores y los dos filtros del convertidor de frecuencia y el filtro de salida.

Por otro lado, se tiene la otra parte variable que se corresponde con los interruptores que hay en el esquema de redundancia de la cadena de amplificación, que sigue la misma definición que en el caso de la *payload* tradicional.

En el caso de la carga útil *Return* no existen componentes fijos, sino que todos dependen del número de canales. Así pues, la fórmula para esta *payload* es la siguiente:

$$PR = 8 \times NC + 4 \times \text{floor}\left(\frac{(NC \times \frac{3}{2}) + NC}{2}\right)$$

Siendo:

- *NC*: número de canales en una polarización. Para hallar el número total de canales se deberá multiplicar este número por dos ya que hay dos polarizaciones.

Se tienen ocho componentes que son directamente proporcionales al número de canales: el filtro de entrada, los dos filtros y dos interruptores del convertidor de frecuencia, el filtro paso bajo (LPF) y los filtros y desfasadores del multiplexor de salida.

En esta *payload* existen dos esquemas de redundancia complejos, uno para el caso del LNA y otro para la cadena de amplificación. Por ello, la última parte variable está multiplicada por cuatro y no por dos como en el caso de la *payload* Forward.

Finalmente, queda calcular cuál será el número de componentes pasivos que se tendrá para el satélite presentado. A continuación se presentarán los pasos para hallar esta estimación para el caso del satélite Ka-Sat.

$$PF = 4 + 7 \times 6 + 2 \times \text{floor}\left(\frac{(6 \times \frac{3}{2}) + 6}{2}\right) = 60$$

$$PR = 8 \times 6 + 4 \times \text{floor}\left(\frac{(6 \times \frac{3}{2}) + 6}{2}\right) = 76$$

$$NCP = (2 \times PF + 2 \times PR + 2) \times NPG + RG = (2 \times 60 + 2 \times 76 + 2) \times 8 + 4 \times 2 \times 7 = 2248$$

La redundancia de *gateway* del Ka-Sat se ha calculado sabiendo que se tienen siete interruptores en el esquema de redundancia y cuatro esquemas de redundancia por cada bloque de 4 *Processor GWx*. Es decir para los *Processor GW1, 2, 3 y 4* se tienen cuatro esquemas y otros cuatro para los *Processor GW5, 6, 7 y 8*. Como se ha comentado anteriormente, se tienen cuatro esquemas de redundancia para las señales de *gateway* de transmisión y recepción en ambas polarizaciones. Para cada satélite HTS habría que estudiar la configuración específica y desarrollar el esquema de redundancia que sea necesario, como se ha hecho con el Ka-Sat.

Mediante la fórmula se comprueba que para el caso del Ka-Sat se necesitan un total de 2248 componentes pasivos para realizar la carga útil del sistema total.

Para obtener un modelo sobre los componentes pasivos más completo, se podría desglosar el cálculo realizado anteriormente en función de los tipos de componentes.

El primer componente pasivo que aparece en la carga útil es el filtro de entrada. En el caso de la carga útil *Forward*, se tiene un filtro por cada polarización, así que se tendrían dos filtros de entrada por cada bloque *Processor GW* que está asociado al número de *gateways* de cada satélite. Por otro lado, en la *payload Return* el número de filtros de entrada depende del número de canales que puede gestionar una *gateway* (ya sea por restricciones de capacidad o por requisitos del sistema en concreto) y también del número de *Processor GW* que se tengan. Así pues, la fórmula que se aplicará para calcular el número de filtros de entrada necesario en el sistema será:

$$NFE = (2 + 1 \times NCT) \times NPG$$

Siendo:

- *NFE*: número de filtros de entrada.
- *NCT*: número de canales que puede operar cada *gateway* (esto es, el número de canales totales del sistema, incluyendo polarización LHC y RHC).
- *NPG*: número de *Processor GW*.

Otro componente pasivo que se encuentra en la *payload* es el multiplexor de entrada; aunque en este elemento sólo forma parte de la carga útil *Forward*. Además se tiene un multiplexor de entrada por cada polarización (LHC y RHC) como se puede observar en la Figura 4.21. Este dispositivo está formado internamente por varios componentes pasivos como se explicó en la Figura 4.2. Así pues, se tendrá en cada polarización los siguientes elementos: un híbrido, un circulador por cada canal y un filtro de canal por cada canal. Este esquema, como ocurría en el caso anterior se debe realizar para cada *Processor GW*. Por lo tanto, la fórmula que se aplicará para calcular el número de componentes pasivos del multiplexor de entrada será:

$$NCPME = (2 + 2 \times NCT) \times NPG$$

Siendo:

- *NCPME*: número de componentes pasivos del multiplexor de entrada.

Por otra parte, en la carga útil *Return* se tiene el multiplexor de salida, como se puede comprobar en la Figura 4.22. Como ocurría en el caso anterior, se tiene un OMUX por cada polarización. Internamente, el diagrama de bloques del multiplexor de salida está representado en la Figura 4.3 y consta de los siguientes componentes pasivos: un filtro de canal por cada canal y un desfasador por cada canal. Para cada *Processor GW* se tiene esta configuración, por consiguiente el número de componentes pasivos en el multiplexor de salida será:

$$NCPMS = 2 \times NCT \times NPG$$

Siendo:

- *NCPMS*: número de componentes pasivos del multiplexor de salida.

En la parte de la carga útil donde se realiza la conversión en frecuencia son necesarios dos filtros paso banda, uno antes del mezclador (*Image-Reject*) y otro después. La conversión en frecuencia se realiza tanto en la carga útil *Forward* como en la *Return* (véase Figuras 4.21 y 4.22).

En ambos casos, los dos filtros vendrán determinados por el número total de canales que una *gateway* puede manejar así como por el número de *Processor Gw* que tenga el sistema. Por lo tanto la fórmula para calcular los filtros paso banda necesarios para realizar la conversión en frecuencia de todo el sistema vendrá determinada de la siguiente manera.

$$NFCF = 4 \times NCT \times NPG$$

Siendo:

- *NFCF*: número de filtros del conversor de frecuencia.

El número de interruptores sigue un cálculo mucho más complejo y depende de las especificaciones del satélite así como del esquema de redundancia que se estime oportuno. Anteriormente se ha realizado una estimación para el satélite Ka-Sat; sin embargo, estos componentes no siguen una fórmula estática así que habría que estimarlo en cada caso. Habría que tener en cuenta tanto la redundancia de las *payloads* como la de *gateway*.

El número de diplexores necesarios en cada bloque *Processor GW* serán dos. Por lo tanto, este dispositivo es de los únicos que no dependen del número de canales. Así que la fórmula que se utilizará será muy sencilla:

$$ND = 2 \times NPG$$

Siendo:

- *ND*: número de diplexores.

Por último, se tienen los filtros paso bajo, es decir, los filtros de salida del sistema, que están tanto en la carga *Forward* como en la *Return*. En ambos casos, estos filtros vendrán determinados por el número de canales total y por el número de *Processor GW* del sistema. Por lo tanto, la fórmula que se utilizará será:

$$NFS = 2 \times NCT \times NPG$$

Siendo:

- *NFS*: número de filtros de salida.

Ahora se tienen caracterizados todos los componentes pasivos que están incluidos en la *payload* de un sistema de alta capacidad *High Throughput Satellite*. De esta manera, se tiene una visión más completa del número de elementos pasivos necesarios para llevar a cabo este tipo de satélites.

Como se puede observar, los satélites de tipo HTS precisan de un número más elevado de componentes pasivos que el caso de los satélites tradicionales debido a la complejidad de los sistemas de alta capacidad.

4.3.3 ESTIMACIÓN DE LA LISTA DE SATÉLITES

En este capítulo se estiman los componentes de la lista de satélites lanzados entre 2010 y 2015 en Europa que se presentó en la Sección 3.1.3.

Satélite	Transpondedores comerciales y banda de frecuencia	Ancho de Banda total o GB para HTS	Número de componentes pasivos
Astra 3B	60 Ku x 36 MHz 4 Ka x 33 MHz	2160 132	Ku: 399 Ka: 35
Arabsat 5B(Badr 5)	56 Ku + 4 Ka Ku: 12x36MHz + 6x72MHz + 6x72MHz + 16x34MHz + 8x34MHz + 8x34MHz Ka: 4x36 MHz	2384 144	Ku: 373 (56 canales) Ka: 35 (4 canales)
Arabsat 5A	26 C + 24 Ku (FSS) 8 Ku: 2x72MHz + 2x36MHz 2x72MHz + 2x36MHz 16 C: 8x72MHz + 8x36MHz	288 864	C: 177 (26 canales) Ku:165 (24 canales)
COMS 1	1 Ka	100 (36)	15
Nilesat 201	24 Ku + 4 Ka Ku:33MHz(BSS),54MHz(FSS) Ka (HTS)	792 2	Ku: 165 HTS: 64
Rascom QAF 1,1R	8 Ku x 36MHz 12 C x 36MHz	288 432	Ku: 61 C: 87
Eutelsat W3B	53 Ku x 36MHz 3 Ka	1908 -	Ku: 353 Ka: 27
Hylas I	2 Ku x 33MHz 8 Ka x 250MHz (flexible,HTS)	66 5	Ku: 21 HTS: 161
Ka-sat	82 Ka (HTS)	70	HTS: 2248
Koreasat 6	30 Ku x 36MHz	1080	203
COMSATBw 2	-		
YahSat 1A	C: 8x36MHz + 6x54MHz Ku: 25x33MHz	612 825	C: 99 Ku: 171
Astra 1N	52 Ku FSS: 26 MHz BSS: 33 MHz	1576	347
Ekspress-AM 04	C: 30 x 40 MHz Ku: 28 x 36 MHz Ka: 2 x 112 MHz L: 3 x 36 MHz	1200 1008 224 108	C: 203 Ku: 191 Ka: 21 L: 27
ArabSat 5C	C: 26 x 36MHz 12 Ka (HTS)	236 9	C: 177 HTS: 284
Atlantic Bird 7	56 Ku (33,36,50,54 y 72 MHz)	3000	373
Eutelsat W3C	Ku:53 x 36 MHz 3 Ka	1908 --	Ku: 353 Ka: 27
Amos 5	C: 14x72MHz, 4x36MHz Ku: 16x72MHz	1152 1152	C: 125 Ku: 113
APStar 7	C: 28 x 36 MHz Ku: 28 x 36 MHz	1008	C: 191 Ku: 191

		1008	
YahSat 1B	Ka: 25x110MHz (HTS)	15	HTS: 482
Ekspress-MD2	8 C 1 L	40 1 (40)	C: 61 L: 15
Astra 2F	60 Ku x 36 MHz 3 Ka x 500 & 600 MHz (HTS)	2160 1.5	Ku: 399 HTS: 49
Eutelsat 21B	Ku: 40 x 36 MHz	1440	Ku: 269
Star One C3	C: 28 x 36 MHz Ku: 16 x 72 MHz	1008 1152	C: 191 Ku: 113
Zhongxing 12	C: 24 x 36 MHz Ku: 23 x 36 MHz	864 828	C: 165 Ku: 157
Eutelsat 70B	Ku: 48 x 36 MHz	1728	321
Yamal 402	Ku: 12x72MHz, 18x36MHz, 16x54MHz	2376	307
Skynet 5D	X: 8 x 20MHz, 3x22MHz, 4x40MHz UHF	386	105
Eutelsat 3D	Ku: 53 x 36 MHz 3 Ka	1908 --	Ku: 353 Ka: 27
SES 6	C: 38 x 36 MHz Ku: 36 x 36 MHz	1368 1296	C: 255 Ku: 243
Inmarsat-4 F4	L band	-	-
Astra 2E	Ku: 60 x 36 MHz Ka (HTS): 4 x 600 MHz	2160 2.4	Ku: 399 HTS: 78
Ekspress-AT 1	Ku: 32 x 36 MHz	1152	217
Ekspress-AT 2	16 Ku	--	113
Astra 5B	Ku: 40 x 36 MHz Ka: 6 x (500&600MHz) L band for EGNOS	1440 2000	Ku: 269 Ka: 21
Ekspress-AM 4R	C: 30 x 36 MHz Ku: 28 x 36 MHz 2 Ka L: 3 x 33 MHz	1080 1008 -- 99	C:203 Ku: 191 Ka: 21 L: 27
Eutelsat 3B	30 Ku 9 Ka C: 12 x 68 MHz	-- -- 816	Ku: 203 Ka: 67 C: 87
Measat 3B	Ku: 48 x 36 MHz (44)	1728	321
ARSAT 1	Ku: 12x36MHz, 8x54MHz, 4x72MHz	1152	165
Athena-Fidus	-		

Tabla 4.2. Lista de satélites con el número de componentes pasivos

En la tabla anterior se ha calculado una estimación el número de componentes pasivos que tendrían los satélites lanzados entre 2010 y 2014 en Europa.

En los satélites tradicionales se ha utilizado la fórmula que se presentó anteriormente y en función del número de canales, se ha calculado el número de componentes pasivos.

En los satélites de tipo HTS o que tienen una *payload HTS* se ha realizado una estimación en función de la capacidad que el satélite era capaz de entregar.

La complejidad de este tipo de satélites hace que se dependa de otros factores además del número de canales. Anteriormente, se ha comprobado que también se dependía del número de *gateways* del sistema. Existe un número de canales máximo que puede soportar una *gateway* pero cada una de ellas puede tener un número variable de canales hasta ese máximo de canales. Por ello, en función de la capacidad del sistema se asigna el número de canales a las *gateways*.

Por esta razón, para el caso de los HTS se ha llevado a cabo un escalado teniendo como referencia que el satélite Ka-Sat tiene 2206 componentes pasivos en su *payload* entregando una capacidad de 70 Gbps.

5 CONCLUSIONES

Al inicio de la presente memoria se ha realizado una explicación de la posición de Europa en el ámbito espacial. También se han descrito los aspectos espaciales que cubren tanto las empresas como las publicaciones científicas, así como sus limitaciones y por tanto, la motivación que ha propiciado este proyecto.

Se ha realizado también una descripción de los satélites de comunicación donde se ha incluido una descripción de la evolución del mercado espacial detallando aspectos diversos en este sector. De la misma manera se ha llevado a cabo una explicación de los diferentes tipos de satélites que existen en el mercado, donde se ha diferenciado entre satélites tradicionales y de tipo High Throughput Satellite. Seguidamente se ha representado una tabla con el listado de los satélites lanzados en el periodo de 2010 a 2014 en Europa detallando la misión, el número de transpondedores, la banda de frecuencia de trabajo así como la capacidad total del sistema de cada uno de estos satélites.

A continuación se realizó una investigación de los elementos que integraban la carga útil de comunicaciones de un satélite. Se estudiaron las características de los mismos para poder realizar un modelo de carga útil para los diferentes tipos de satélites. Así pues, en esta memoria se ha explicado el funcionamiento de todos los elementos de la *payload* así como su función en la misma.

Para conseguir el objetivo final que consistía en realizar un modelo para estimar el número de componentes pasivos en un satélite, fue necesario establecer la carga útil de comunicaciones de los diferentes tipos de satélites. Por lo tanto, en primer lugar se explicó el funcionamiento de los satélites tradicionales y los de tipo HTS.

Es importante añadir que la tecnología High Throughput Satellite es muy moderna y se han desarrollado todavía pocos satélites de este tipo. Si añadimos además que la información de las agencias espaciales es estrictamente confidencial y ninguna empresa comparte sus investigaciones debido a la elevada competencia en este sector, el resultado fue que la información era escasa e inconexa. Por lo tanto, se tuvieron que aplicar los conocimientos de telecomunicaciones estudiados durante la titulación para poder darle sentido a la información encontrada y generar así una visión completa del funcionamiento y estructura de los satélites HTS.

Una vez entendido el funcionamiento de ambos tipos de satélites se representó la carga útil de comunicaciones de los satélites tradicionales y de tipo HTS. Estos últimos tienen una

complejidad añadida y por lo tanto, el diagrama de bloques requiere de la explicación de muchos aspectos previos que se detallaron en la memoria.

Finalmente, se han presentado los modelos para estimar los componentes pasivos en los satélites tradicionales y de tipo HTS. En la última sección de la memoria se ha realizado la estimación de los componentes pasivos para el listado de satélites que se presentó al inicio de la memoria.

Se concluyó que la estimación de los satélites de tipo HTS no sólo depende del número de canales, como en el caso de los satélites tradicionales, sino que también se deben tener en consideración otros aspectos tales como la capacidad del sistema y los requisitos del diseño para la distribución de los canales que se asignan a cada *gateway*.

Analizando ambos modelos y los resultados obtenidos se puede concluir que la tecnología HTS además de ofrecer una capacidad mayor del sistema, precisa de menores componentes pasivos en relación al *throughput* entregado. Por consiguiente, los satélites de tipo HTS son mucho más eficientes respecto a los tradicionales.

Por lo tanto se ha llegado al objetivo final y se ha realizado un modelo para estimar los componentes pasivos de la carga útil de comunicaciones de los satélites tradicionales y de tipo HTS.

En definitiva, se han cumplido todos los objetivos del presente proyecto. Se ha estudiado el funcionamiento de los diferentes tipos de satélites así como los elementos que integran la carga útil de éstos. También se han diseñado los diagramas de bloques de la carga útil de comunicaciones de estos satélites. Se han superado los problemas debidos a la falta de material explicativo sobre la carga útil de comunicaciones y la tecnología High Throughput Satellite que todavía se sigue desarrollando actualmente.

Mediante este proyecto se ha dado una visión mucho más técnica y concisa sobre el mercado de los componentes pasivos en Europa así como una explicación completa y práctica sobre una tecnología en auge actualmente, la High Throughput Satellite. Además, se ha presentado un diagrama de bloques completo de la carga útil de comunicaciones de los distintos tipos de satélites.

Cabe recalcar que en el mercado actual no existen empresas ni publicaciones científicas que ofrezcan una visión tan completa sobre este ámbito espacial. Se presenta este proyecto como una manera de fomentar las actividades espaciales aportando información clara y técnica sobre los elementos necesarios que integran la carga útil de un satélite y su estructura. De esta manera, se pretende promover la comprensión de todos los aspectos técnicos del ámbito espacial.

En este proyecto concretamente se ha propuesto un estudio de mercado para estimar el número de componentes pasivos, pero siguiendo este modelo, se podría realizar otro estudio para estimar el número de componentes activos de la carga útil de comunicaciones de un satélite o cualquier otro estudio similar para estimar otros componentes.

Como conclusión, se han conseguido aclarar aspectos espaciales, dar una visión general y técnica. Se ha llevado a cabo un proyecto muy novedoso en el ámbito espacial que puede ser aplicado a otros ámbitos para fomentar el estudio y los conocimientos espaciales así como sus actividades.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. Diagrama de Gantt	11
Fig. 3.1. Número de lanzamientos, satélites y masa total lanzada por año (1957-2014) [2].....	12
Fig. 3.2. Número de lanzamientos y satélites lanzados por año [2]	13
Fig. 3.3. Masa de los satélites lanzados (en toneladas) por categoría de misión (1957-2014) [2]	14
Fig. 3.4. Masa entrega por misión en Europa (en toneladas) [2].....	14
Fig. 3.5. Distribución de los satélites por segmento en masa (toneladas) y número (2010-2014) [2]	15
Fig. 3.6. Distribución de los satélites por segmento y región en masa y número (2010-2014) [2]	15
Fig. 3.7. Masa lanzada (toneladas) y número de lanzamientos por órbita (2010-2014) [2].....	16
Fig. 3.8. Número y masa (toneladas) de los satélites comerciales por tipo (GEO satcoms vs otros) [2]	17
Fig. 3.9. Número de transpondedores operacionales por banda (izquierda) y <i>throughput</i> total disponible por HTS en Gbps (derecha) [2]	17
Fig. 3.10. Enlace satélite tradicional [4].....	18
Fig. 3.11. Ejemplo de plan de frecuencias	20
Fig. 3.12. Diagrama de bloques de un repetidor <i>bent-pipe</i> [1].....	20
Fig. 3.13. Satélite tradicional vs. Satélite HTS [5].....	21
Fig. 3.14. Canal de frecuencias y distribución de haces en una zona geográfica con un sistema HTS [4].....	22
Fig. 3.15. Ejemplo del esquema de cuatro colores y la distribución de los haces proporcionando cobertura continua [6]	23
Fig. 3.16. Concepto enlaces forward y return de los sistemas HTS [7]	23
Fig. 3.17. Bandas de frecuencias.....	24
Fig. 3.18. Diagrama de bloques de un repetidor transparente con una conversión en frecuencia [1]	28
Fig. 3.19. Cobertura típica del satélite Intelsat [1]	30
Fig. 3.20. Reflector de antena con montaje offset: (a) reflector simple y (b) reflector dual (Gregoriano) [1]	31
Fig. 3.21. Múltiples haces separados [1].....	32
Fig. 3.22. Arquitectura del repetidor: (a) conversión única en frecuencia y (b) conversión doble en frecuencia [1].....	35
Fig. 3.23. Ejemplo de filtro paso banda (BPF) [15]	36
Fig. 3.24. Filtro de guía de ondas circular en configuración coaxial [1].....	37
Fig. 3.25. Organización de un multiplexor de entrada (IMUX) [1]	38
Fig. 3.26. Diagrama de un multiplexor híbrido acoplado de 5 canales [19]	40
Fig. 3.27. Diagrama de un multiplexor de circulador acoplado de 10 canales [19].....	40
Fig. 3.28. Diagrama de multiplexor manifold acoplado de 10 canales [19]	41
Fig. 3.29. Reducción del ruido de intermodulación por canalización de las bandas de frecuencia [1].....	41
Fig. 3.30. Organización y funciones de un amplificador de canal (CAMP) [1].....	44
Fig. 3.31. Curva característica de transferencia con dos portadoras de igual amplitud	45
Fig. 3.32. Estructura de un TWT.....	46

Fig. 3.33. Diagrama de bloques de un amplificador de potencia de estado sólido.....	48
Fig. 3.34. Redundancia: (a) redundancia de canal 2/3 y (b) anillo de redundancia 8/12	50
Fig. 4.1. Carga útil del satélite tradicional	51
Fig. 4.2. Diagrama de bloques del IMUX.....	53
Fig. 4.3. Diagrama de bloques del OMUX.....	54
Fig. 4.4. Plan de frecuencias Ka-Sat	55
Fig. 4.5. Cobertura del Ka-Sat.....	56
Fig. 4.6. Infraestructura del segmento terrestre del Ka-Sat [17]	57
Fig. 4.7. Localización de los Gateway del Ka-Sat	58
Fig. 4.8. Cobertura multihaz Pan-Europea [13]	59
Fig. 4.9. Esquema de cuatro colores usando cuatro reflectores [13]	59
Fig. 4.10. Diagrama de bloques de la cadena de alimentación de la antena [14]	60
Fig. 4.11. Antena SFB Feed Chain tx/rx [13]	60
Fig. 4.12. Esquema de cuatro colores de las antenas	61
Fig. 4.13. Cadena de alimentación de la antena HTS.....	63
Fig. 4.14. Esquema TOP de los procesadores de los bloques 1-4.....	65
Fig. 4.15. Esquema TOP de los procesadores de los bloques 5-8.....	66
Fig. 4.16. Redundancia de Gateway.....	67
Fig. 4.17. Enlace Forward de un satélite HTS [11].....	68
Fig. 4.18. Enlace Return de un satélite HTS [12].....	68
Fig. 4.19. Plan de frecuencias del Ka-Sat [11].....	69
Fig. 4.20. Diagrama de bloques de la combinación de la carga útil forward y return.....	71
Fig. 4.21. Payload Forward para el Bloque 1	73
Fig. 4.22. Cadena de amplificación.....	75
Fig. 4.23. Payload Return para el Bloque 1.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Satélites Europeos lanzados entre 2010 y 2014.	26
Tabla 3.2. Resumen de las características TWTA y SSPA.....	48
Tabla 4.1. Bandas de frecuencia del Ka-Sat en ITU Región 1 [11].....	69
Tabla 4.2. Lista de satélites con el número de componentes pasivos.....	85

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Maral, *Satellite Communications Systems*, Wiley.
- [2] ASD - Eurospace, «Space Trends 2015».
- [3] Intelsat, «A practical introductory guide on using satellite technology for communications».
- [4] Keysight Technologies, «Precision Validation, Maintenance and Repair of Satellite Earth Stations FieldFox Handheld Analyzers».
- [5] iDirect, «Advancing a Connected World».
- [6] Arthur D. Little, «High Throughput Satellites,» 2015.
- [7] Hughes, «The View from JUPITER: High-Throughput Satellite Systems,» 2013.
- [8] B. Pawling, «Separating Fact from Fiction: HTS Ka- and Ku-Band for Mission Critical SATCOM,» *Microwave Journal*, 2013.
- [9] Astrium Satellites, «Performance optimization of multibeam broadband payloads».
- [10] Eutelsat, «Satellite Broadband of the first full Ka-Band Eutelsat Infrastructure».
- [11] Eutelsat, «High Throughput Satellite Systems: An Analytical Approach,» 2014.
- [12] Eutelsat, «Design Aspects for Ka-Band Satellite Missions».
- [13] M. Schneider, «Antennas for multiple spot beam satellites,» *Springer*, 2011.
- [14] E. Reiche, S. Stirland y C. Hartwanger, «A Dual Circular Combined K/Ka-Band RF Sensing Feed Chain for Multi Beam Satellite Antennas,» 2011.
- [15] T. M. Braun, *Satellite Communications Payload and System*, Wiley, 2012.
- [16] V. E. Boria y B. Gimeno, «Waveguide Filters for Satellites,» *IEEE Microwave Magazine*, pp. 60-70, 2007.
- [17] H. Fenech, E. Lance, A. Tomatis y M. Kalama, «The Ka-Sat System».
- [18] H. Fenech, E. Lance, A. Tomatis y M. Kalama, «Ka-Sat and the way Forward».

- [19] M. Latif y A. Ullah Salfi, «Design of 5-Channel C-Band Input Multiplexer for Communication Satellites,» *Journal of Space Technology*, vol. V, nº 1, July 2015.
- [20] «ASD Eurospace,» [En línea]. Available: <http://eurospace.org/>.