

MEMORIA DESCRIPTIVA

CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a sistemas satelitales y, más particularmente, a la provisión de un sistema satelital y método para aplicaciones de comunicaciones, con cobertura global.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Existe una gran demanda de comunicaciones inalámbricas en todo el mundo, en todos los niveles. La demanda comercial y personal de teléfonos inteligentes, tabletas, y similares, continúa creciendo, al igual que la cantidad y variedad de aplicaciones militares y aeronáuticas. Además, la demanda de un ancho de banda cada vez mayor también está creciendo, ya que los clientes esperan tener acceso a servicios de gran ancho de banda, como videoconferencias, video a la carta, servicios de difusión y multimedios de Internet sin importar dónde se encuentren, ya sea que estén o no móvil.

La necesidad de acceso y ancho de banda no se limita a áreas altamente pobladas. Muchos gobiernos y autoridades de comunicaciones han expresado su interés en proporcionar el mismo acceso a los servicios de comunicaciones en áreas rurales y escasamente pobladas que se encuentran en áreas urbanas. Incluso sin tal presión regulatoria, los proveedores de sistemas de comunicación reconocen el gran mercado que actualmente no está atendido en muchas regiones del mundo y la oportunidad de negocios que esto les presenta. Los sistemas de comunicaciones satelitales pueden proporcionar servicios de banda ancha a áreas remotas, pero tienen un costo muy importante. Por lo tanto, existe un gran interés en sistemas satelitales que sean eficientes y rentables.

Los sistemas satelitales pueden clasificarse generalmente en cuatro grupos, en función de las órbitas que utilizan: órbitas geoestacionarias de la Tierra (GEO), órbitas de alta elíptica (HEO), órbitas medias de la Tierra (MEO) y órbitas bajas de la Tierra (LEO).

Los satélites GEO parecen estar inmóviles en el cielo, proporcionando al satélite una vista continua de un área dada en la superficie de la Tierra. Desafortunadamente, tal órbita solo se puede obtener colocando al satélite directamente sobre el ecuador de la Tierra (0° de latitud), con un período igual al período de rotación de la Tierra, y que requiere una altitud de 35.789 km. Si bien estas órbitas son útiles en muchas aplicaciones, son muy pobres para cubrir latitudes más altas, no siendo muy útiles por encima de los 70° de latitud para comunicaciones móviles confiables. Los enlaces de los satélites de comunicaciones GEO se vuelven poco

confiables o fallan a medida que el ángulo de elevación con respecto al satélite disminuye a medida que aumenta la latitud (el ángulo de elevación se refiere al ángulo de visibilidad directa entre el usuario en el suelo y el satélite, medido desde el horizonte). Además, los satélites GEO tienen problemas de latencia, es decir, introducen un retraso de tiempo considerable en la transmisión de datos a medida que las señales viajan entre los dispositivos terrestres y el satélite en órbita. También requieren componentes de comunicación de mayor potencia y antenas más grandes que otros sistemas satelitales debido a la mayor distancia a la Tierra. Los mayores requisitos de potencia y antenas más grandes dan como resultado un mayor costo de los satélites, y el aumento de la masa del satélite y la mayor altura de la órbita aumentan el costo de lanzamiento a esta órbita.

Los satélites HEO pueden proporcionar una mejor cobertura de latitudes altas que los satélites GEO, pero tienen otras deficiencias. Las órbitas HEO son aquellas en las que uno de los focos de la órbita es el centro de la Tierra, la velocidad del satélite es una función decreciente de la distancia desde el foco. Es decir, un satélite HEO viajará más cerca de la Tierra durante una parte de su órbita (el perigeo) causando que viaje muy rápido en ese momento, mientras que en el otro extremo de la órbita (el apogeo), viajará más lentamente. Por lo tanto, las órbitas HEO están diseñadas para que los satélites se muevan de manera relativamente lenta sobre áreas de interés y rápidamente sobre áreas que no son de interés. Sin embargo, algunas órbitas HEO pasan a través del cinturón de Van Allen, que los exponen a altos niveles de radiación, lo que reduce la vida útil del satélite. Además, los satélites HEO tienen un apogeo aproximadamente a la misma distancia de la Tierra que los satélites GEO, por lo que incurrir en problemas de latencia similares.

Los satélites MEO siguen órbitas circulares entre las constelaciones LEO y GEO. Si bien existen varias definiciones, las órbitas MEO generalmente se consideran entre 3.000 kilómetros y 35.000 kilómetros de altitud. Si bien las constelaciones MEO pueden proporcionar una mejor cobertura en latitudes más altas que los satélites GEO y hacerlo con una latencia de señal más corta, se requerirá una gran cantidad de satélites MEO para proporcionar cobertura mundial. Debido a su mayor altitud que los satélites LEO, los satélites MEO deben tener sistemas de comunicaciones con mayor potencia y antenas más grandes que los satélites LEO, para superar las longitudes de ruta de señal más largas. O3b Networks Ltd. tiene una constelación de doce satélites de Internet en una órbita MEO alrededor del ecuador a una altitud de 8.000 kilómetros. Pero debido a que estos satélites se despliegan en una órbita ecuatorial, no son efectivos para comunicaciones por encima de una latitud de aproximadamente 45 grados al norte o al sur. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema MEO de 44 satélites

que utilizan una altitud de aproximadamente 20.200 kilómetros, lo que convenientemente produce un período orbital de 12 horas. La constelación de GPS está inclinada a 55 grados, por lo que tiene una mejor cobertura cerca de los polos que el sistema O3b, pero su rendimiento se degrada a medida que uno se acerca a los polos.

Los satélites LEO se colocan en órbitas circulares a altitudes bajas de menos de 2.000 km. Una constelación de satélites LEO puede proporcionar una cobertura mundial continua, pero esto requiere muchos satélites, ya que cada uno está sobre una región determinada durante un período de tiempo relativamente pequeño. Debido a su distancia relativa más baja a la Tierra, la latencia, el retraso causado por la distancia que debe recorrer una señal, es mucho menor que todas las otras órbitas. La latencia para LEO es de aproximadamente 40 ms, mientras que para GEO es de 250 ms. La latencia es un factor cada vez más importante en las comunicaciones de banda ancha por Internet.

No hay sistemas satelitales LEO de banda ancha operativos, aunque se han propuesto varios, como los descritos en la Patente de Estados Unidos N° US9391702 (por Wyler) y la Publicación de Patente de Estados Unidos N° US2017/0005719 (por Krebs). Debido a la forma en que se diseñan estos sistemas, ambos son bastante caros. El sistema Krebs, por ejemplo, requiere entre 841 y 1218 satélites (vea el párrafo [0040] de US2017/0005719), mientras que el sistema Wyler requiere aproximadamente 1250 satélites (vea la columna 5 en la línea 24 de US9391702). Y si uno quisiera aumentar la cantidad de canales de comunicación disponibles en los sistemas Krebs y Wyler, tendría que hacerlo en incrementos muy grandes y costosos, agregando cientos de nuevos satélites a la vez (es decir, básicamente se necesita duplicar el número de planos, o agregar un nuevo conjunto de satélites igual al número en la constelación inicial).

Por lo tanto, existe la necesidad de un sistema satelital mejorado y métodos para proporcionar cobertura global, particularmente para aplicaciones de comunicaciones de banda ancha.

RESUMEN DE LA INVENCION

Un objeto de la invención es proporcionar un sistema satelital mejorado y un método para proporcionar una cobertura de comunicación global, que mitigue los problemas descritos anteriormente.

Se ha descubierto un método ventajoso para proporcionar conectividad global de banda ancha que utiliza dos constelaciones LEO diferentes con enlaces inter-satelitales entre los satélites en cada constelación, y enlaces inter-satelitales entre las dos constelaciones de LEO.

La primera constelación se despliega en una constelación LEO polar con una inclinación preferida de 99,5 grados y una altitud preferida de 1000 km. La segunda constelación se despliega en una constelación LEO inclinada con una inclinación preferida de 37,4 grados y una altitud preferida de 1250 km. En esta constelación, los satélites están distribuidos por encima de la región ecuatorial y las latitudes medias, y pueden proporcionar cobertura entre las latitudes 50 grados Norte y 50 grados Sur, con un ángulo de elevación mínimo de 10 grados.

La constelación LEO polar y la constelación LEO inclinada trabajan juntas como una constelación híbrida para lograr una verdadera cobertura global, con un ángulo de elevación mínimo de aproximadamente 20 grados, que requiere menos satélites que los requeridos por una sola constelación LEO a una altitud similar. Por ejemplo, al usar solo una constelación LEO polar como se describe anteriormente, se necesitarían 168 satélites para proporcionar cobertura global a un ángulo de elevación mínimo de 20 grados. En comparación, la constelación híbrida de la invención solo requiere 117 satélites. Se prefiere un ángulo de elevación mínimo de aproximadamente 20 grados ya que esto permite el uso de arreglos de antenas escaneadas electrónicamente en el terminal del usuario. Mejora la calidad y la eficiencia del enlace, ya que la distancia entre el usuario y el satélite es menor con ángulos de elevación más altos y la señal sufre una menor atenuación atmosférica, un factor importante en las frecuencias más altas, como la banda-Ka. Se pueden agregar satélites adicionales gradualmente, posiblemente a medida que aumenta la demanda, lo que resulta en ángulos de mejor aspecto que se corresponden con un aumento en la robustez del enlace.

Un requisito reglamentario es que los satélites NGSO (órbita de satélites no geostacionarios) no pueden causar interferencia, ni reclamar protección contra satélites GEO. La constelación LEO polar y la constelación LEO inclinada descritas aquí trabajan juntas para evitar la interferencia a los satélites GEO. La constelación LEO polar y la constelación LEO inclinada de la invención evitan la interferencia con los satélites GEO al conectarse a un terminal de usuario solo cuando se excede un ángulo de discriminación mínimo entre el satélite LEO y un satélite GEO determinado, medido en el terminal de usuario GEO. El ángulo de discriminación se calcula sobre la base de niveles de interferencia inaceptables según lo determinado por la ITU. La necesidad de satélites LEO para evitar la interferencia con satélites GEO ocurre más comúnmente en la región ecuatorial y en latitudes medias. La técnica de mitigación utilizada para evitar la interferencia es cambiar el terminal de usuario LEO a un satélite LEO alternativo, uno con una separación angular del satélite GEO mayor que el ángulo de discriminación. Con la combinación de las órbitas polares e inclinadas hay una probabilidad mucho mayor de que haya un satélite LEO alternativo adecuado.

Los satélites de comunicaciones en la constelación LEO polar de la invención tendrán un exceso de capacidad en latitudes más altas porque sus planos de órbita están más cerca y la demanda de tráfico de usuarios es menor. El exceso de capacidad en la constelación LEO polar en las latitudes más altas se utiliza para transferir el tráfico de usuarios, a través de ISL (enlace inter-satélites), desde ambas constelaciones LEO a Puertas de Enlace ubicadas en el Norte para la conexión a redes terrestres existentes. Se requiere un número muy pequeño de sitios de Puerta de Enlace Norte (generalmente dos) ya que un sitio de Puerta de Enlace puede conectarse a satélites en más de un plano (ver **la Figura 1**).

Los usuarios normalmente se conectan a los sistemas satelitales a través de uno de los haces estrechos direccionables de alta capacidad en el satélite. Mediante el uso de haces estrechos direccionables, los recursos del satélite, en términos de potencia y ancho de banda, se pueden concentrar donde se ubican los mercados. Se ha observado que la masa de terrestre solo representa alrededor del 30% de la superficie de la Tierra y, además, que la mayoría de la población humana reside en el 6% de la superficie. Por lo tanto, no es un uso eficiente de los recursos proporcionar cobertura de banda ancha en más del 100% de la superficie de la Tierra, todo el tiempo, como muchos sistemas de la técnica anterior intentan lograr. Para garantizar que todos los usuarios puedan monitorear y obtener acceso a la red de satélites en cualquier lugar de la Tierra cuando se encuentren en áreas que no cuentan con haces estrechos direccionables y de alta capacidad, cada satélite tendrá un haz de Cobertura de Amplia Área que servirá a todo el campo de visión del satélite. El haz de Cobertura de Amplia Área, con menor capacidad que un haz estrecho direccionable, permite una gestión de red más robusta y solicitudes a petición del usuario para una cobertura de haz de alta capacidad. Es decir, un terminal de usuario en un área actualmente no atendida por un haz estrecho de alta capacidad puede contactar a un satélite a través del haz de Cobertura de Amplia Área y solicitar acceso al satélite a través de un haz estrecho direccionable de mayor ancho de banda. Los haces de Cobertura de Amplia Área, que cubren todo el mundo de forma continua, también permiten servicios de tipo de difusión, tal como enviar contenido IP al terminal de usuario y distribución de software.

En una realización de la invención, se proporciona un sistema satelital para comunicaciones globales que comprende: un primer conjunto de satélites en una constelación LEO polar (órbita terrestre baja); un segundo conjunto de satélites en una constelación LEO inclinada; un terminal de usuario para transmitir y recibir señales desde el primer y segundo conjunto de satélites; y una Puerta de enlace para transmitir y recibir señales desde el primer y segundo conjunto de satélites; cada uno del primer y segundo conjunto de satélites con

funcionalidad ISL (enlace inter-satélites) con respecto a los satélites en la misma constelación y con los satélites en la otra constelación.

En otra realización de la invención, se proporciona un sistema de comunicaciones satelitales que comprende: un conjunto de satélites en una constelación LEO (órbita terrestre baja); un terminal de usuario para transmitir y recibir señales del conjunto de satélites; y una Puerta de enlace para transmitir y recibir señales del conjunto de satélites; cada uno de los conjuntos de satélites es operable para: transmitir y recibir señales a través de un haz de Cobertura de Amplia Área; recibir una solicitud del terminal de usuario para cobertura de haz de alta capacidad; y responder a la recepción de la solicitud del terminal de usuario para una cobertura de haz de alta capacidad cambiando el terminal de usuario a un ancho de banda más alto, un haz estrecho y direccionable, orientado hacia el terminal de usuario solicitante.

En una realización adicional de la invención, se proporciona un método de operación para un sistema de comunicaciones satelitales global que comprende: lanzar un primer conjunto de satélites en una constelación LEO polar (órbita terrestre baja); lanzar un segundo conjunto de satélites en una constelación LEO inclinada; utilizar un terminal de usuario, transmitiendo datos de comunicaciones a un primer satélite en el primer o segundo conjunto de satélites; comunicar los datos de comunicaciones desde el primer satélite a un segundo satélite en el primer o segundo conjunto de satélites utilizando ISL (enlace inter-satélites); y transmitir los datos de comunicaciones desde el segundo satélite a una Puerta de Enlace polar.

En una realización adicional de la invención, se proporciona un método de operación para un sistema de comunicaciones satelitales que comprende: lanzar un conjunto de satélites en una constelación LEO (órbita terrestre baja); utilizar un terminal de usuario, transmitiendo y recibiendo señales del conjunto de satélites; usar una Puerta de Enlace, transmitiendo y recibiendo señales desde, el conjunto de satélites; al menos uno de los satélites: transmitir y recibir señales a través de un haz de Cobertura de Amplia Área; recibir una solicitud del terminal de usuario para una cobertura de haz de alta capacidad; y responder a la recepción de la solicitud desde el terminal de usuario para una cobertura de haz de alta capacidad cambiando el terminal de usuario a un haz de banda más ancho, estrecho y direccionable, orientado hacia el terminal de usuario solicitante.

Otros aspectos y características de la presente invención serán evidentes para los expertos en la técnica a partir de una revisión de la siguiente descripción detallada cuando sea considerada en conjunto con los dibujos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Estas y otras características de la invención se harán más evidentes a partir de la siguiente descripción en la que se hace referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La Figura 1 presenta una representación simplificada de una constelación LEO polar de 12 satélites en seis planos.

La Figura 2 presenta una representación simplificada de una constelación LEO inclinada de 9 satélites en cinco planos.

La Figura 3 presenta los resultados de una simulación del sistema que muestra el porcentaje de tiempo que se alcanza un ángulo de elevación mínimo de 20 grados para las latitudes (Norte y Sur) entre 0 y 90 grados, para las órbitas LEO combinadas.

La Figura 4 presenta un diagrama esquemático ejemplar para un terminal de usuario en México, que se conecta a una red terrestre a través del sistema LEO híbrido de la invención.

La Figura 5 presenta un diagrama esquemático ejemplar que muestra cómo se evita la interferencia con los satélites GEO.

La Figura 6 presenta una arquitectura de red ejemplar para implementar la invención.

La Figura 7 presenta un arreglo de carga útil ejemplar para un vehículo de lanzamiento.

La Figura 8 presenta un diagrama de flujo de un método ejemplar para implementar la invención.

La Figura 9 presenta un diagrama de bloques de una Puerta de enlace ejemplar en una realización de la invención.

La Figura 10 presenta un diagrama de bloques de un satélite ejemplar en una realización de la invención.

Se han usado números de referencia similares en las diferentes figuras para denotar componentes similares.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

La constelación híbrida LEO de la invención consta de dos constelaciones que se apoyan mutuamente: una constelación LEO polar y una constelación LEO inclinada. Se puede proporcionar una cobertura global completa de comunicación de banda ancha con un ángulo de elevación mínimo de aproximadamente 20 grados con un total de 117 satélites, 72 en la constelación LEO polar y 45 en la constelación LEO inclinada. A diferencia de otros sistemas LEO propuestos, el servicio inicial a cualquier punto del mundo puede comenzar con un número mucho menor de satélites; la finalización de la constelación polar de 72 satélites, que proporciona cobertura global con un ángulo de elevación mínimo de aproximadamente 12

grados. El lanzamiento posterior de la constelación inclinada de 45 satélites aumentará el ángulo de elevación mínimo a aproximadamente 20 grados.

En la realización preferida, la constelación LEO polar (ver **Figura 1**) se implementa en los siguientes parámetros:

- Constelación de 72 satélites, más repuestos.
- 12 satélites en cada uno de los 6 planos, los planos están espaciados por igual (es decir, 30 grados entre planos adyacentes)
- Los planos están inclinados 99,5 grados
- La altura de la órbita es de 1000 km.

La constelación de 72 satélites se puede aumentar agregando satélites individuales a cada plano o agregando planos adicionales, luego ajustando la ubicación de los satélites dentro de la constelación para lograr nuevamente una distribución optimizada para la cobertura.

En la realización preferida, la constelación de LEO inclinada (ver **Figura 2**) se implementa en los siguientes parámetros:

- Constelación de 45 satélites, más repuestos.
- 9 satélites en cada uno de los 5 planos, los planos están espaciados por igual (es decir, 36 grados entre planos adyacentes)
- Los planos están inclinados 37,4 grados.
- La altura de la órbita es de 1250 km.

La constelación de 45 satélites se puede aumentar agregando satélites individuales a cada plano o agregando planos adicionales, luego ajustando la ubicación de los satélites dentro de la constelación para lograr nuevamente una distribución optimizada para la cobertura. Dado que el mercado se concentra dentro del área de cobertura de la constelación LEO inclinada, en lugar de agregar satélites a la constelación LEO polar, se puede aumentar la capacidad para satisfacer un mercado en crecimiento agregando satélites a la constelación LEO inclinada, ya sea satélites individuales para cada plano o planos adicionales.

La redundancia en cada satélite puede ser reducida, con el beneficio de reducir costos y la disponibilidad requerida del sistema mantenida, agregando un satélite de repuesto a cada plano. Este satélite adicional estará operativo y todos los satélites en un plano estarán igualmente espaciados, lo que aumentará la capacidad general del sistema. En caso de que falle un satélite, la pérdida de cobertura que normalmente proporciona el satélite fallido se reemplaza rápidamente al cambiar la fase de los satélites restantes en el plano para que estén espaciados por igual. Se ha calculado que el tiempo para cambiar la fase de los satélites es de aproximadamente un día, lo que requiere un 3% más de combustible para la estación.

Para satisfacer la creciente demanda del mercado, se pueden agregar satélites a cada plano o se pueden agregar planos adicionales a la constelación LEO polar o a la constelación LEO inclinada. Por ejemplo, al aumentar el número de satélites en cada plano en uno (un total de 11 satélites adicionales), la capacidad del sistema aumentará en aproximadamente un 9%. En otro ejemplo, al agregar 5 planos entre los 5 planos iniciales de la constelación LEO inclinada (un total de 45 satélites adicionales), la capacidad de la constelación inclinada se duplica y se logra una mayor redundancia. De manera similar, la capacidad de la constelación polar puede duplicarse lanzando 72 satélites adicionales en 6 planos posicionados entre los 6 planos de la constelación polar inicial. Duplicar el número de planos también brinda la oportunidad de pasar sin problemas a la siguiente generación al colocar satélites con las nuevas tecnologías en los planos agregados. El servicio a los terminales de usuario que aún no sean compatibles con las nuevas tecnologías no se verían afectados, ya que estos terminales de usuario seguirían conectándose a los satélites en los planos iniciales. Aumentar la capacidad de la red en incrementos de 45 satélites es mucho más económico que los grandes incrementos de los sistemas de la técnica anterior.

Además de los componentes estándar de mantenimiento y potencia de la estación, los satélites en ambas constelaciones tienen procesadores a bordo que realizan la regeneración de la señal y el enrutamiento del tráfico IP. Los satélites también utilizan enlaces inter-satelitales (ISL) para conectarse a satélites adyacentes dentro de una constelación y para conectarse a satélites en la otra constelación. Esto proporciona la máxima flexibilidad en la conectividad ya que cada satélite se convierte en un enrutador IP, completamente interconectado con otros satélites que están en línea de visión. Por lo tanto, el rendimiento del enlace mejora con los sistemas existentes y la capacidad es aumentada. Los satélites también pueden tener la funcionalidad de "almacenar y reenviar" permitiendo que el satélite almacene datos cuando no es posible la comunicación a un satélite objetivo o Puerta de Enlace. Los datos almacenados se pueden transmitir cuando las comunicaciones son posibles. Los satélites también pueden transportar otras cargas útiles como equipos de monitoreo del clima, pero las comunicaciones son el enfoque principal del sistema.

La red LEO híbrida de la invención se puede conectar a la red terrestre a través de dos sitios de Puerta de Enlace existentes ubicados en el norte (en Inuvik, Canadá y en Svalbard, Noruega). Se pueden agregar sitios de Puerta de Enlace adicionales en otras partes del mundo según lo requiera el volumen de tráfico o para cumplir con los requisitos reglamentarios nacionales. Como se señaló anteriormente y como se ve en la **Figura 1**, los planos de la constelación LEO polar convergen en los polos, lo que resulta en un alto nivel de disponibilidad

y un exceso de ancho de banda que permite que la constelación híbrida se conecte de manera eficiente a la red terrestre. El sistema de la invención también mitiga la ineficiencia de la convergencia de satélites en los polos por:

- poner a disposición de las rutas de vuelo del norte las comunicaciones satelitales y otros servicios
- ajustar la sincronización de satélites para minimizar el alcance de la convergencia de satélites; es decir, ajustar la fase relativa de los planos de modo que no haya un satélite de cada plano que llegue al punto más al norte al mismo tiempo; y
- usar el tiempo de inactividad en las regiones polares como tiempo de carga de la batería, reduciendo el SWaP (tamaño del satélite, peso y requisitos de potencia).

Los usuarios se conectan a la red LEO híbrida a través de uno de los haces direccionables del satélite, cada uno con un diámetro de aproximadamente 170 km (preferentemente generado por una antena de red en fase). De esta manera, se puede atender un amplio mercado, que incluye aeronaves móviles, grandes empresas fijas, y banda ancha comunitaria.

También hay una capacidad de Cobertura de Amplia Área separada que cubre todo el campo de visión del satélite, de modo que la red LEO proporciona cobertura global durante el 100% del tiempo. Las aplicaciones incluyen el envío de contenido de Internet a los terminales de usuario, la transmisión de actualizaciones de software, y el Internet de las cosas.

Se proporciona funcionalidad de enlace inter-satélites (ISL) en todos los satélites. Se realizó una simulación que mostró que el seguimiento ISL entre satélites en las constelaciones polares e inclinadas es factible con la tecnología ISL actual. La tasa de cambio en el ángulo de elevación para el instrumento ISL es menor que 0,05 grados por segundo y la tasa de cambio en el ángulo de acimut es menor que 0,2 grados por segundo. El uso de ISL reduce el número de Puertas de enlace requeridas a dos (en Inuvik y Svalbard) ya que, como mínimo, los satélites podrán acceder a la red terrestre utilizando comunicaciones de satélite a satélite para alcanzar un satélite en una constelación LEO polar, y desde allí, llegar a una Puerta de enlace en el norte. Tener ISL en todos los satélites permite, opcionalmente, comunicaciones de punto a cualquier punto sin que los datos pasen a través de una Puerta de Enlace o una red terrestre, para usuarios exigentes como los militares.

Tener ISL en todos los satélites también permite que el sistema aloje satélites clientes en la constelación LEO polar o en la constelación LEO inclinada. Un satélite alojado, como un satélite de observación de la Tierra equipado con una capacidad ISL compatible, puede conectarse a la red ISL y transmitir sus datos en tiempo real a un destino elegido. Esto evitará

los retrasos y la congestión causados por la reducción de los datos solo cuando el satélite está a la vista de una de sus puertas de enlace. La constelación LEO polar es particularmente útil para satélites electro-ópticos e infrarrojos.

El diseño del sistema permite que el ángulo de elevación mínimo para el terminal de usuario sea de 20 grados. Esto es para permitir antenas escaneadas electrónicamente en el terminal de usuario, y para mejorar los presupuestos de enlace en el borde del campo de visión del satélite. Las antenas escaneadas electrónicamente son básicamente antenas de estado sólido físicamente planas que pueden ser dirigidas electrónicamente. Como resultado, un terminal de usuario puede rastrear un satélite LEO sin tener que mover físicamente y apuntar la antena como se requiere con las antenas de plato tradicionales. **La Figura 3** muestra el resultado de una simulación que indica que la constelación LEO híbrida de la invención proporcionará un acceso de ángulo de elevación mínimo de 20 grados a al menos un satélite, en todo el mundo, durante aproximadamente el 100% del tiempo.

Las antenas de satélite comprenden haces estrechos direccionables que concentran los recursos de potencia y ancho de banda del satélite en áreas de mercado seleccionadas. Una capacidad adicional de Cobertura de Amplia Área sirve a todo el campo de visión del satélite a 20 grados de elevación. Para lograr esto, el satélite tiene un haz fijo amplio de aproximadamente 108 grados de ancho de haz, apuntado directamente debajo del satélite (punto de nadir) capaz de cubrir el campo de visión de los satélites a una elevación de 20 grados, de manera que todo el globo esté cubierto el 100% del tiempo. Cuando un terminal de usuario solicita una conexión de mayor capacidad y proporciona su ubicación (es decir, coordenadas GPS), se puede ordenar al satélite que dirija un haz estrecho de alta capacidad en la dirección del terminal de usuario. Esto permite que el sistema de la invención cubra áreas grandes y escasamente pobladas sin consumir muchos recursos que nunca se utilizan. Los haces direccionables también permiten el "apilamiento" de los haces, es decir, la dirección de más de un haz para cubrir un área, lo que proporciona potencia y ancho de banda adicionales para satisfacer demandas particularmente grandes. También hay antenas satelitales que proporcionan enlaces a las Puertas de Enlaces, que en este caso es de banda-V. Pero, por supuesto, se puede utilizar cualquier banda de frecuencia adecuada.

El sistema y el método de la invención también pueden adaptarse fácilmente a la adición de la capacidad de banda-Ka militar; esto tendrá un impacto mínimo en la carga útil del satélite, ya que el espectro es adyacente a la banda-Ka comercial. Existe una demanda cada vez mayor de comunicaciones militares resistentes de alta capacidad. Una constelación LEO es inherentemente resistente, ya que consiste en una gran cantidad de satélites que dificultan que

un adversario interrumpa la red. La resistencia se incrementa aún más al tener un ISL que permite que la red conecte dos puntos cualquiera sin que los datos pasen a través de la red terrestre. En contraste, las constelaciones GEO pueden consistir en un pequeño número de satélites (aproximadamente 3 a 5) y la pérdida de cualquiera de ellos causará una interrupción a largo plazo en el servicio para una parte significativa del mundo.

El mercado esperado para el sistema de la invención es cualquier entidad que requiera servicios inalámbricos de banda ancha. Si bien el sistema proporciona cobertura mundial, algunos clientes solo requieren un acceso remoto en áreas geográficas específicas. El mercado puede incluir, por ejemplo:

- usuarios grandes, que pueden requerir radio enlace o VSAT;
- comunicaciones marítimas;
- comunicaciones aeronáuticas;
- conectividad de banda ancha (agregado comunitario, puntos críticos de WIFI);
- red de retorno de celulares;
- enviar contenido de Internet a los terminales de usuario; y/o
- Internet de las cosas.

Enlaces inter-satelitales (ISL)

Un aspecto importante de la invención es la inclusión de ISL entre todos los satélites en la constelación híbrida. Los ISL mejoran la flexibilidad y la capacidad del sistema, ya que reduce el número mínimo de Puertas de Enlace requeridas al transmitir el tráfico a través de los satélites LEO polares a las principales puertas de enlace del Norte (como Inuvik y Svalbard). Aunque, por supuesto, las puertas de enlace regionales pueden usarse o agregarse cuando lo exija el volumen de tráfico o lo exijan las normativas nacionales. Así, el sistema:

- permite el soporte para mercados en regiones donde no se encuentra una puerta de enlace, por ejemplo, debido a cuestiones de distancia o reglamentarias;
- permite la conectividad global de un país de origen a otro a través de una única red de satélites; y
- permite proporcionar muchos tipos de servicios.

Además, la comunicación ISL completa entre todos los satélites permite al sistema de la invención alojar el satélite de un cliente en cualquiera de los planos, siempre que el satélite esté equipado con hardware ISL compatible y software de enrutamiento adecuado.

Para maximizar los beneficios de ISL, se requieren enlaces de alimentación de mayor capacidad con Puertas de Enlace. Por lo tanto, se prefiere la banda-V, con un mayor ancho de banda disponible.

Se podría usar la frecuencia de radio ISL (RF ISL), pero se prefiere la ISL óptica debido a las mayores velocidades de datos que puede soportar con menores requisitos de masa y potencia. Los problemas de señalamiento, adquisición y seguimiento son consideraciones en el diseño de los sistemas ópticos ISL, pero se han resuelto para los sistemas LEO a LEO.

Hay tres casos de ISL particulares que deben considerarse en el sistema de la invención:

- conectividad intra-planos (adelante y atrás);
- conectividad inter-planos (izquierda y derecha) dentro de la misma constelación; y
- conectividad inter-constelaciones (entre satélites LEO polares y satélites LEO inclinados).

La conectividad intra-planos (hacia adelante y hacia atrás) es fácil de realizar ya que los satélites se mueven a la misma velocidad y en la misma dirección. La conectividad inter-planos (izquierda y derecha) dentro de la misma constelación es directa para las órbitas inclinadas, ya que mientras los satélites están en diferentes planos, aún se mueven a la misma velocidad y en la misma dirección. La conectividad inter-planos (izquierda y derecha) a través de la juntura de la constelación polar es muy difícil, y con solo una constelación polar, la juntura debe evitarse transmitiendo los datos a través de muchos planos polares, aumentando los retrasos y la carga de tráfico. Como se explica a continuación, la juntura de la constelación polar se puede evitar mediante el envío de comunicaciones a través de la constelación inclinada, en lugar de a través de la juntura de la constelación polar. Y, finalmente, la conectividad inter-constelaciones requiere que los satélites se localicen y se rastreen entre sí, pero existe tecnología para resolver este problema.

La determinación de la ruta óptima para que los datos viajen a través de satélites con ISL entre un terminal de usuario y una Puerta de Enlace con conectividad de red IP terrestre, o para que los datos viajen a través de satélites con ISL entre dos terminales de usuario sin pasar por una Puerta de Enlace, se puede lograr mediante enrutadores IP a bordo de cada satélite. Los algoritmos de enrutador IP para transferencia, gestión de capacidad/carga, administración de rutas, balanceo de carga y similares son todos conocidos y funcionarán en una red satelital de la misma manera que operan en cualquier otra red de comunicación de enrutadores IP. La capa física que es una red de satélite no afecta la comunicación de datos IP (es decir, la capa de comunicación). Los datos IP se enrutarán a un satélite LEO polar si esa es la ruta más eficiente para que los datos lleguen a una Puerta de Enlace conectada a la red de IP terrestre.

El sistema de la invención no tiene el problema de la "juntura" de sistemas como la constelación de Iridium debido a que los datos y el tráfico de comunicación pueden ser enrutados entre los satélites de la constelación polar y la constelación inclinada. Técnicamente,

hay una juntura dentro de la constelación polar de la invención, pero el software de enrutamiento puede cruzar la juntura al enrutar el tráfico a través de la constelación inclinada. El software de enrutamiento es consciente de todas las posibles conexiones y rutas ISL. Si dos satélites se mueven demasiado rápido entre sí, lo cual es la base del problema de juntura, entonces el software de enrutamiento no tendrá esta conexión disponible y simplemente elegirá una ruta diferente. Por lo tanto, con el uso de ambas constelaciones e ISL entre todos los satélites en ambas constelaciones, no existe el problema de "juntura" con el que lidiar.

Además, las metodologías conocidas para la gestión del tráfico de datos y comunicaciones sobre las redes existentes pueden aplicarse igualmente a la red de satélites de la invención. Los datos se pueden priorizar de modo que las necesidades en tiempo real se satisfagan utilizando conexiones más directas, con costos generalmente más altos que se cobran al usuario. A la inversa, los usuarios con necesidades menos urgentes pueden enrutar sus datos a través de canales más lentos, a un costo menor. También se pueden utilizar otros modelos de costos, ponderación, priorización, programación y administración de carga.

Por ejemplo, si un usuario 410 en la Ciudad de México desea acceder a Internet, su conexión inalámbrica al sistema será típicamente a un satélite 420 en la constelación LEO inclinada como se muestra en la **Figura 4**. Este primer enlace al satélite 420 en la constelación LEO inclinada estará en la banda-Ka. Este satélite 420 luego se conecta a través de ISL a un satélite LEO polar 430 en el norte que tiene capacidad para comunicarse con una Puerta de Enlace 440. El satélite LEO polar 430 luego se conecta a la Puerta de Enlace 440 en Inuvik mediante un enlace de conexión de banda-V. La Puerta de Enlace 440 en Inuvik tiene conectividad de fibra terrestre, que proporciona acceso a Internet de banda ancha para el usuario 410.

Evitando Interferencias con GEO

Como se señaló anteriormente, los satélites NGSO (órbita no geoestacionaria) no pueden causar interferencia a, ni reclamar protección contra, satélites GSO (órbita geoestacionaria). El artículo 22 de la ITU debe respetarse para garantizar la coexistencia con las Redes Orbitales de Satélites Geoestacionarios (GSO), que cumplan con los límites de epfd (densidad de flujo de potencia efectiva).

Los ángulos de discriminación se han calculado en función de los límites efectivos de densidad de flujo de potencia (epfd). El ángulo de discriminación 510 como se muestra en la **Figura 5** se define como el ángulo entre el satélite GEO 520 y el satélite LEO 530, medido en el terminal de usuario GEO 540. El satélite LEO 530 interferirá con el terminal de usuario GEO 540 cuando su señal transmitida cae dentro del haz de la antena del usuario GEO. Esto ocurre

cuando el terminal de usuario LEO 550 y el terminal de usuario GEO 540 están geográficamente cerca y la separación angular entre el satélite LEO 530 y el satélite GEO 520 es pequeña. El ángulo de discriminación 510 se calcula de manera que un satélite LEO separado de un satélite GEO en un ángulo mayor que el valor del ángulo de discriminación no cause interferencia inaceptable al terminal GEO. El nivel de interferencia inaceptable está determinado por los límites efectivos de densidad de flujo de potencia definidos por la ITU. La constelación de satélites de la invención está gestionada de forma centralizada por un Sistema de Gestión de Red (no mostrado) que está en contacto continuo con todos los satélites de la constelación. El NMS tiene tablas que contienen las ubicaciones y la frecuencia de las operaciones de todos los satélites GEO y las ubicaciones de los terminales GEO, ya sea que se conozca o se suponga que se produzcan los supuestos del peor caso. Con estos datos GEO junto con un conocimiento detallado de la constelación LEO, el NMS puede predecir una situación de interferencia potencial a las horas de la red GEO o incluso días antes. La técnica de mitigación de interferencias de cambiar un terminal de usuario a un satélite LEO alternativo, uno que tenga una separación angular con el satélite GEO mayor que el ángulo de discriminación, se puede planificar por adelantado y ejecutar de manera eficiente sin interrumpir el servicio a los usuarios. Debido a que la invención utiliza una combinación de órbitas LEO polares y LEO inclinadas, existe una alta probabilidad de que haya un satélite LEO alternativo adecuado disponible.

Para el haz de Cobertura de Amplia Área, que no se dirige, la probabilidad y el grado de interferencia con las estaciones de tierra GEO también se pueden reducir mediante una o más de las siguientes técnicas:

- el uso de frecuencias en partes de la banda-Ka que son menos comunes en los sistemas GEO;
- el uso de una técnica de modulación de espectro expandido para difundir la señal en un ancho de banda mucho mayor, evitando la interferencia al reducir la densidad del flujo de potencia por debajo de los límites establecidos por la ITU;
- a medida que la constelación se expande para satisfacer el crecimiento del mercado, la cobertura redundante para los haces de Cobertura de Amplia Área en las regiones ecuatoriales significará que los usuarios pueden ser dirigidos a un satélite no interferente; y/o
- el haz del satélite de Cobertura de Amplia Área fija se puede dirigir para evitar la interferencia con la red GEO cambiando la posición del satélite (es decir, la dirección del cuerpo).

Debido a que esta es una situación predecible y determinista, se pueden realizar cálculos rigurosos y estas técnicas de mitigación se pueden planificar con anticipación.

Otras realizaciones ejemplares:

La realización preferida de la invención se ha descrito anteriormente, pero estaría claro para un experto en la materia que los parámetros del sistema pueden modificarse y aún proporcionar el mismo resultado. Las consideraciones para tales modificaciones incluyen lo siguiente:

Inclinación: La inclinación es el ángulo entre el plano orbital de los satélites y el plano que pasa a través del ecuador de la Tierra. Un satélite LEO polar puede definirse como uno cuya inclinación es tal que se logra una cobertura global, ya sea de forma continua como con la realización de la invención o durante un período de tiempo, como un satélite único en un solo plano, generalmente para aplicaciones de observación de la Tierra en lugar de comunicaciones. El rango de inclinación para una órbita LEO polar es de aproximadamente 80 a 100 grados. La inclinación preferida de los satélites LEO polares es de 99,5 grados. La inclinación de los satélites LEO inclinados está determinada por el área del globo al que sirve la constelación de satélites. Para la realización preferida de la invención se ha elegido 37,4 grados ya que una constelación con esta inclinación puede cubrir el mercado concentrado entre 50 grados norte y 50 grados sur de latitud. Sin embargo, la inclinación puede oscilar entre 5 y 75 grados en algunas realizaciones que abordan diferentes áreas de mercado.

Planos/Número de satélites: La implementación preferida es tener múltiples satélites en el mismo plano orbital por varias razones. Además de simplificar la coordinación de las órbitas con las estaciones terrestres, también permite el lanzamiento de múltiples satélites desde un solo vehículo de lanzamiento, o el aumento del número de satélites en el mismo plano para redundancia y/o rendimiento mejorado. El número de planos y el número de satélites en el plano pueden variar y aun así cumplir con un objetivo de diseño, por ejemplo, cobertura global para una órbita LEO polar. Este objetivo se puede lograr con 11 satélites en cada uno de los 6 planos, 8 satélites en cada uno de los 9 planos o, en la implementación preferida, 12 satélites en cada uno de los 6 planos. Este factor es similar para una órbita LEO inclinada, donde la implementación preferida es de 9 satélites en 5 planos. Un ejemplo de una variación es 8 satélites en 6 planos. La determinación de una constelación óptima tiene en cuenta factores como el ángulo de elevación mínimo alcanzado, el nivel de redundancia y la relativa facilidad de despliegue, al mismo tiempo que se alcanzan los objetivos de cobertura. Puede ser conveniente lanzar un satélite redundante adicional en el mismo plano en caso de que falle un satélite. Tener

el satélite redundante en el mismo plano facilita colocarlo en la posición adecuada y activarlo cuando sea necesario. Este tipo de redundancia es más difícil de lograr a medida que aumenta el número de planos.

Al desarrollar el sistema de la invención, inicialmente se asumió que una estrategia orbital (polar, inclinada, Ballard Rosette, etc.) sería óptima, pero ese no fue el caso. E incluso cuando se determinó que una combinación de una constelación polar y una constelación inclinada era el mejor enfoque para un sistema de comunicación global, los valores óptimos para la inclinación, el número de planos y el número de satélites (es decir, una constelación LEO polar de 72 satélites en 6 planos, la inclinación de 99,5 grados, y una altitud de 1000 km, en combinación con una constelación inclinada de 45 satélites en 5 planos, con una inclinación de 37,4 grados y una altitud de 1250 km), no fue predecible. Es decir, el desarrollo de la invención no era simplemente una cuestión de una constelación que aborda las deficiencias de la otra. Y además, cuando estos valores fueron manipulados, también se encontró que los resultados de esas manipulaciones no eran predecibles. Por ejemplo, se encontró que:

1. agregar otro plano a la constelación polar no mejoraría significativamente los ángulos de elevación mínimos;
2. aumentar el ángulo de inclinación de la constelación inclinada no mejoraría el ángulo de elevación mínimo sin la adición de más satélites,
3. agregar más satélites a los planos polares existentes no proporcionaría mucha ventaja.

Excentricidad: La excentricidad es la forma de la trayectoria elíptica de una órbita, que determina la altitud del apogeo (la altitud más alta) y el perigeo (la altitud más baja). Por definición, todas las órbitas LEO son circulares, por lo que tienen una excentricidad de 0.

Altitud: La altitud de los satélites LEO está limitada en el extremo inferior por la resistencia atmosférica, que comienza a ocurrir a altitudes inferiores a 800 km y requiere una estación adicional que mantiene el combustible para superarla. La altitud máxima es de unos 1400 km, ya que por encima de esto aumenta el nivel de radiación, lo que afecta negativamente la vida útil del satélite. Otro factor son los desechos espaciales que para las órbitas LEO tienen una mayor concentración entre los 800 y 1000 km y, por lo tanto, una mayor probabilidad de colisión. Como se indicó anteriormente, los satélites LEO polares se despliegan en una órbita a una altitud preferida de 1000 km, mientras que los satélites LEO inclinados se despliegan en una órbita a una altitud preferida de 1250 km.

Argumento del Perigeo: El argumento del Perigeo es otro parámetro para las órbitas elípticas, que describe la orientación de una órbita elíptica con respecto al plano ecuatorial.

Debido a que todas las órbitas LEO son circulares por definición, este parámetro no es relevante.

Longitud del Nodo Ascendente: En términos simples, la Longitud del Nodo Ascendente describe dónde el plano orbital cruza el ecuador de la Tierra. La Longitud del Nodo Ascendente se convierte en un factor para especificar la órbita, por ejemplo, los satélites en planos adyacentes se desplazan entre sí para optimizar la cobertura de una constelación. Como se señaló anteriormente, es preferible que los planos orbitales de la invención estén espaciados de manera uniforme simplemente para proporcionar una cobertura óptima de la Tierra. Pero los planos orbitales podrían estar espaciados de alguna otra manera.

Período orbital: El Período orbital está determinado por la altitud de un satélite, que en el caso de los satélites LEO es del orden de 1,5 horas a 2 horas. Al diseñar las órbitas LEO, el período está determinado por la altitud, que como se indicó anteriormente puede variar entre 800 km y 1400 km.

Control de Órbita: Las constelaciones de satélites de la invención experimentan cambios en los parámetros orbitales antes mencionados con el tiempo debido al achatamiento de la Tierra, las fuerzas gravitacionales del Sol y la Luna y la presión de la radiación solar. Estos pueden ser compensados por el sistema de propulsión a bordo del satélite. La manera en que se hace esto se describe a continuación.

Puertas de enlace y Terminales de Usuario: Como se muestra en la **Figura 6**, el sistema incluye una red de comunicaciones en tierra 620 formada por terminales de usuario, satélites LEO 630 con funcionalidad de comunicaciones y al menos una Puerta de enlace 610. Se requiere la Puerta de enlace 610 para obtener datos de los satélites LEO 630 y para efectuar Telemetría, Seguimiento & Control (TTC). Las antenas direccionales se usarían debido a su mayor eficiencia, requiriendo que la(s) Puerta(s) de enlace 610 sigan a los satélites LEO 630 a través del cielo. La tecnología de seguimiento es bien conocida en la técnica. La transferencia desde un satélite a otro a medida que se mueven por el cielo no requerirá ninguna interacción para el usuario. La transferencia puede verse afectada utilizando técnicas conocidas. De manera similar, los terminales de usuario de 620 deben adquirir y seguir un satélite y realizar transferencias entre satélites.

Se pueden usar bandas de comunicación satelital estándar, que incluyen: Banda-L (1-3 GHz); Banda-X (aproximadamente 7 - 8 GHz); Banda-Ku (aproximadamente 11 - 15 GHz), y Banda-Ka (aproximadamente 17 - 31 GHz). También se utilizará la corrección de errores, la codificación y la retransmisión de paquetes perdidos/dañados.

Como se explicó anteriormente, el sistema de la invención proporciona ventajas por sobre los sistemas de constelaciones de satélites anteriores para abordar el problema de la "juntura", explotando recursos de comunicación adicionales disponibles en regiones polares, asignación de potencia y ancho de banda a mercados específicos, y en la medida en que se puede aumentar gradualmente, con la adición de un número comparativamente pequeño de satélites. Las ventajas adicionales del sistema incluyen al menos lo siguiente:

- se proporciona una cobertura mundial completa con un número menor de satélites en comparación con otros métodos;
- no se requieren satélites GEO ni MEO, por lo que no hay problemas con la latencia, los requisitos de potencia, el tamaño de la antena y la cobertura polar deficiente asociada con las constelaciones GEO y algunas MEO;
- asegurar la conectividad del terminal de usuario directo al terminal de usuario sin que los datos pasen a través de una Puerta de Enlace o a través de una red terrestre intermedia (esto se realiza en el sistema Krebs al que se hace referencia en los Antecedentes de la Invención); y
- no se requieren satélites HEO, por lo que no hay problemas con la latencia o, al igual que con algunas constelaciones HEO, la exposición a los cinturones de Van Allen.

Con respecto al primer punto, "*LEO: Roar o Whimper; Constelaciones de Banda Ancha en Órbita Terrestre Baja: Verdades Técnicas y Económicas*" ICG, señala que el sistema Teledesic de 650 satélites en una constelación polar tendrá aproximadamente 15 satélites en servicio para África en cualquier momento (2,3% de la constelación). En contraste, la constelación polar de la invención, a pesar de tener solo 72 satélites pero utilizando rayos direccionables, proporcionará un promedio de 12,1 satélites en servicio para África en un momento dado (16,9% de la constelación), y un mínimo de 9 satélites (12,5% de la constelación). La combinación de las constelaciones polares e inclinadas de la invención, por supuesto, proporcionará una cobertura aún mejor.

Control de la Órbita

Las constelaciones de satélites de la invención experimentarán cambios en los parámetros orbitales mencionados a lo largo del tiempo debido al achatamiento de la Tierra, las fuerzas gravitacionales del Sol y la Luna y la presión de la radiación solar. Estos pueden compensarse realizando maniobras periódicas de corrección de órbita (es decir, maniobras de "mantenimiento de la estación") utilizando el sistema de propulsión a bordo del satélite.

El tamaño de cada corrección orbital se determinará por el empuje y la duración de las maniobras "delta-v" ("delta-v" es simplemente un término aeroespacial para un cambio en la velocidad). Debido a que las maniobras más largas son menos eficientes, será preferible

realizar maniobras frecuentes de corta duración en lugar de maniobras menos frecuentes de larga duración. Para satélites equipados con sistemas de propulsión química (bi-propelente), el empuje alcanzable será lo suficientemente grande como para permitir varios días o incluso semanas entre pares de maniobras. Para satélites que utilizan propulsores iónicos de alta eficiencia y bajo empuje, se pueden realizar maniobras durante cada revolución de la órbita.

Se sabe que los sistemas de software informático gestionan otros sistemas de vuelo por satélite y podrían modificarse fácilmente para adaptarse a las órbitas descritas en el presente documento.

La **Figura 7** presenta una vista en sección transversal de una carga útil ejemplar 900 para un vehículo de lanzamiento (no mostrado) que contiene tres satélites 630. Es posible un número mucho mayor de satélites, dependiendo de la masa de un satélite y la capacidad del vehículo de lanzamiento. 25 satélites por vehículo de lanzamiento es un número práctico para el sistema de la invención. El vehículo de lanzamiento incluirá un número suficiente de etapas de propulsión, de capacidad suficiente, para llevar los satélites 630 a la órbita deseada, o a una posición desde la cual los satélites 630 puedan alcanzar sus órbitas operativas (es decir, dos etapas de propulsión, tres etapas, etc.). El vehículo de lanzamiento puede llevar múltiples satélites 630 a una órbita de estacionamiento de menor altitud. La órbita de estacionamiento de menor altitud gira alrededor de la Tierra con respecto a la órbita operacional, conocido como regresión nodal diferencial, y en un punto óptimo, un satélite 630 puede impulsarse a sí mismo hacia la órbita operacional. Alternativamente, el vehículo de lanzamiento puede lanzar satélites 630 directamente a su órbita operativa.

Como se describirá con respecto a la **Figura 10**, cada satélite 630 incluirá un sistema de comunicaciones, un sistema de control y un sistema de propulsión. Independientemente de la configuración del vehículo de lanzamiento, estos sistemas permiten que los satélites 630 se comuniquen con la Puerta de Enlace 610, y se posicionen en sus órbitas operativas finales, y su posición correcta dentro de la constelación.

Activación y Puesta en Servicio del Satélite:

Con referencia a la **Figura 8**, una vez que el vehículo de lanzamiento ha lanzado la constelación de satélites 1010, se pueden activar los satélites 630 y realizar un procedimiento de puesta en servicio/prueba de los sistemas básicos 1020. Este procedimiento de puesta en servicio/prueba puede incluir el despliegue de antenas y disponer el satélite 630 de modo que el satélite 630 apunte en la dirección adecuada, desplegando paneles solares, energizando procesadores y sistemas electrónicos, reiniciando sistemas de software y verificando el

funcionamiento de todos los sistemas y subsistemas básicos. También puede ser necesario realizar una solución de problemas y/o medidas correctivas como parte de este procedimiento.

Una vez que se hayan activado los sistemas y subsistemas básicos y se haya verificado su funcionamiento, los satélites 630 pueden pasar a sus posiciones orbitales finales 1030. Como se describió anteriormente, esto puede comprender que los satélites 630 simplemente se propulsen hacia las separaciones nodales correctas, si fueron lanzados en la misma órbita operacional. Alternativamente, si los satélites 630 se lanzaron a una órbita de estacionamiento, se les puede requerir que consuman una cantidad mucho mayor de combustible para impulsarse a sí mismos hacia su órbita operativa y separación nodal.

Con los satélites 630 ahora en sus posiciones orbitales finales, la carga útil puede activarse, ponerse en servicio y probarse 1040. Esto se haría de la misma manera que la activación, prueba y puesta en servicio de los sistemas básicos de los satélites descritos anteriormente, es decir, desplegar las antenas o sensores necesarios, energizar los procesadores y los sistemas electrónicos, reiniciar los sistemas de software y verificar el funcionamiento de todos los sistemas y subsistemas de carga útil. Por supuesto, las medidas de solución de problemas y/o correctivas también se pueden realizar como parte del procedimiento de puesta en servicio de la carga útil.

Los satélites 630 están ahora en un modo operativo. La operación de la carga útil se determinará completamente por la naturaleza de la carga útil.

Con todos los sistemas satelitales y la carga útil en funcionamiento, la única preocupación restante es mantener la posición del satélite 630 en la órbita de interés 1050. Esto se puede realizar de la manera descrita anteriormente bajo el título "Control de órbita". La información de la posición del satélite puede ser determinada por el satélite 630, una Puerta de Enlace 610 o algún otro centro de control. Normalmente, la información de posición del satélite se puede calcular a partir de los datos del sistema de posicionamiento global (GPS) y/o de otra telemetría por satélite.

Opcionalmente, ciertos sistemas y subsistemas pueden desactivarse en el curso de las órbitas de los satélites, por ejemplo, para conservar energía o para proteger la instrumentación. Por ejemplo, una carga útil de comunicaciones puede estar activa solo cuando se sirve a partes de la Tierra donde los usuarios están presentes. En otros momentos, puede ser deseable desactivar los sistemas de carga útil, reactivándolos cuando vuelva a entrar en la región de interés. Puede ser deseable mantener los subsistemas básicos de satélites en funcionamiento en todo momento, para que pueda continuar recibiendo y transmitiendo datos relacionados con

su funcionamiento, estado y control. También puede ser conveniente recargar las baterías de un satélite durante estos períodos de inactividad.

Diseño de Puerta de enlace:

La **Figura 9** ilustra un diagrama de bloques simplificado de un sistema de Puerta de Enlace 1100 ejemplar para comunicarse con los satélites 630. Las señales de comunicación pueden incluir señales operacionales/de control y señales relacionadas con la carga útil. En el caso de una carga útil científica, las señales relacionadas con la carga útil pueden incluir señales de control transmitidas a los instrumentos, y datos de observación/monitoreo recibidos de los instrumentos. El sistema de Puerta de Enlace 1100 puede modificarse para recibir y presentar otros tipos de información, y puede usarse junto con una o más computadoras, servidores, redes y otros dispositivos relacionados.

Como se muestra en la **Figura 9**, el sistema de Puerta de Enlace 1100 puede incluir una antena 1110, un transceptor 1120, una unidad de procesamiento o sistema 1130, y un sistema de comunicaciones de red 1140.

La antena 1110 está diseñada para recibir y transmitir señales a las frecuencias de comunicación deseadas. Normalmente, la antena 1110 será una antena de seguimiento altamente direccional, con el fin de mantener niveles efectivos de comunicación de banda ancha.

El transceptor de Puerta de Enlace 1120 consiste en una parte del receptor para recibir datos de los satélites y prepararlos para la CPU 1130, y una parte de transmisión para los datos de proceso de la CPU 1130, preparándolos para la transmisión a los satélites 630 a través de la antena 1110. La parte de transmisión del transceptor 1120 puede, por ejemplo, multiplexar, codificar y comprimir los datos que se transmitirán a los satélites 630, luego modular los datos a la frecuencia de transmisión deseada y amplificarlos para la transmisión. Pueden usarse múltiples canales, codificación de corrección de errores, y similares. De manera complementaria, la parte del receptor del transceptor 1120 demodula las señales recibidas y realiza cualquier demultiplexación, decodificación, corrección de errores y formateo necesarios de las señales de la antena, para uso de la CPU 1130. La antena y/o el receptor también pueden incluir otros interruptores, filtros, amplificadores de bajo nivel de ruido, conversores descendentes (por ejemplo, a una frecuencia intermedia), y otros componentes deseados.

En la **Figura 11** también se muestra una interfaz de usuario local 1150. Las posiciones geográficas de la(s) Puerta(s) de enlace 610 se pueden elegir para minimizar el número de Puertas de enlace requeridas. Como resultado, la(s) Puerta(s) de enlace 610 pueden no estar

en una ubicación geográfica que sea conveniente para los operadores de satélites y/o las partes que reciben los datos de la carga útil. Por lo tanto, la(s) Puerta(s) de enlace 610 se proporcionarán normalmente con instalaciones de comunicación de red 1140 de modo que las computadoras remotas 1160 se puedan usar para acceder al sistema a través de Internet o redes similares 1170.

Diseño Satelital:

La **Figura 10** ilustra un diagrama de bloques simplificado de un satélite 630 que se puede usar en una realización ejemplar de la invención. Como se muestra, el satélite 630 puede incluir un sistema de mantenimiento de la estación 1210, un sistema de propulsión 1220, un sistema de energía 1230, un sistema de comunicaciones, un sistema de procesamiento informático 1240 y una carga útil 1250. El sistema de comunicaciones consistirá típicamente en un transceptor 1260 (o transceptores) y un conjunto de antenas 1270. Por supuesto, se pueden usar otros componentes y disposiciones para implementar la invención, incluidos, por ejemplo, componentes redundantes y de respaldo.

El subsistema de mantenimiento de la estación 1210 es responsable de mantener la órbita del satélite. En consecuencia, el subsistema de mantenimiento de la estación 1210 puede calcular y/o recibir información de ajuste de órbita y/o disposición, y puede activar el sistema de propulsión para ajustar la disposición y/o la órbita del satélite. Mantener la órbita también puede incluir mantener las separaciones nodales deseadas entre sí y los otros satélites dentro de la constelación de satélites. El sistema de propulsión 1220 puede incluir, por ejemplo, una fuente de combustible (es decir, tanques de combustible y oxidantes) y un cohete de combustible líquido, o un sistema de propulsión iónica.

El subsistema de energía 1230 proporciona energía eléctrica a todos los sistemas y subsistemas satelitales. El subsistema de energía 1230 puede, por ejemplo, incluir uno o más paneles solares y una estructura de soporte, y una o más baterías.

El conjunto de antenas satelitales 1270 se diseñaría para acomodar las frecuencias de comunicaciones y los sistemas requeridos para proporcionar el ISL, haces estrechos direccionables (por ejemplo, 16 haces direccionables electrónicamente por satélite) y haces de Cobertura de Amplia Área descritos anteriormente para servir a los usuarios, y antenas para conectarse a las Puertas de Enlace. En vista del tamaño físico y las restricciones de peso del satélite, estas antenas serán mucho más pequeñas que la antena 1110 de la Puerta de Enlace 610. La dirección de los haces del conjunto de antenas 1270 se controla dirigiendo mecánicamente la antena o dirigiendo electrónicamente la antena. Alternativamente, la disposición del satélite puede controlarse para dirigir el conjunto de antenas 1270.

De manera similar, el transceptor satelital 1260 está diseñado para ser complementario al de la Puerta de Enlace 610 y los terminales de usuario 620, que consiste en una parte del receptor para recibir datos desde la Puerta de Enlace 610/terminales de usuario 620 y prepararlo para la CPU 1240, y una parte de transmisión para los datos de proceso de la CPU 1240, preparándola para la transmisión a los terminales de usuario/Puerta de Enlace 610 a través del conjunto de antenas 1270. Además, el transceptor satelital 1260 está diseñado para ser complementario a los de los otros satélites para que ISL se pueda efectuar.

La parte transmisora del transceptor 1260 puede, por ejemplo, multiplexar, codificar y comprimir los datos a transmitir, luego modular los datos a la frecuencia de transmisión deseada y amplificarlos para su transmisión. Pueden usarse múltiples canales, codificación de corrección de errores, y similares.

La parte del receptor del transceptor 1260 demodula las señales recibidas y realiza cualquier demultiplexación, decodificación, corrección de errores y formateo necesarios de las señales del conjunto de antenas 1270, para uso de la CPU 1240 del satélite. El conjunto de antenas y/o transceptor puede también incluir cualquier otro interruptor, filtro, amplificador de bajo ruido, convertidores descendentes (por ejemplo, a una frecuencia intermedia y/o banda base), y otros componentes deseados.

El sistema de CPU 1240 del satélite 630 recibe típicamente señales utilizadas para el funcionamiento de los sistemas de control de disposición y órbita. También recibe señales de control para el funcionamiento de la carga útil 1250, y procesa datos de la carga útil para su transmisión a la Puerta de Enlace 610. También puede gestionar la activación y desactivación de los diversos subsistemas a medida que el satélite 630 pasa dentro y fuera de la región geográfica de interés. Si el satélite 630 está destinado a funcionar como un enrutador IP, la funcionalidad para hacerlo puede ser como parte del sistema de CPU 1240 o como parte de la carga útil 1250.

Opciones y Alternativas:

El sistema de la invención se puede aplicar a al menos las siguientes aplicaciones:

1. Aplicaciones de Comunicaciones, tales como máquina a máquina, algunos protocolos de comunicaciones, incluidas las redes celulares 4G y 5G de la siguiente generación que requieren una baja latencia, lo que no se puede atender adecuadamente desde satélites en GEO;

2. El Tráfico marítimo y aéreo en la actualidad debe pasar desde las comunicaciones geoestacionarias a las comunicaciones por radio HF (alta frecuencia) poco fiables y de bajo ancho de banda cuando las latitudes altas están fuera del alcance de los satélites en órbita

geoestacionaria. El sistema de la invención podría soportar comunicaciones de banda ancha, navegación y vigilancia de aeronaves y barcos en estas áreas. Actualmente hay 700 aeronaves por mes que utilizan rutas polares y se requiere cobertura continua en la región circumpolar del norte para mejorar la seguridad y la eficiencia del tráfico aéreo en el área, así como la conectividad de banda ancha para los pasajeros;

3. Observación de la Tierra: Estas cargas útiles pueden funcionar bien en las órbitas descritas y proporcionar monitoreo global del clima, gases de efecto invernadero, y radiometría del color del océano, como ejemplos;

4. Conocimiento de la Situación Espacial: Estas cargas útiles pueden detectar peligros espaciales, como escombros y asteroides, así como otros satélites que pueden considerarse peligrosos; y

5. Clima Espacial: Las órbitas de la invención pueden soportar cargas útiles de clima espacial que miden factores tales como la radiación solar y la ionosfera de la Tierra.

Conclusión:

Una o más realizaciones preferidas actualmente se han descrito a modo de ejemplo. Será evidente para los expertos en la materia que se pueden realizar numerosas variaciones y modificaciones sin apartarse del alcance de la invención como se define en las reivindicaciones. Por ejemplo, la selección de la inclinación, la altitud y el número de satélites depende de las compensaciones entre las áreas de servicio requeridas, la cantidad de combustible en la nave espacial y la masa de lanzamiento de la carga útil. Estos parámetros pueden optimizarse para adaptarse a diferentes prioridades, sin apartarse del concepto de la invención.

Los pasos del método de la invención se pueden realizar en conjuntos de código de máquina ejecutable almacenados en una variedad de formatos tales como código de objeto o código fuente. Dicho código puede describirse genéricamente como código de programación, software, o un programa de computadora para simplificar. Las realizaciones de la invención pueden ejecutarse mediante un procesador informático o dispositivo similar programado a la manera de los pasos del método, o pueden ejecutarse mediante un sistema electrónico que esté provisto de medios para ejecutar estos pasos. De manera similar, un medio de memoria electrónico, tales como disquetes de computadora, discos duros, unidades de memoria USB, CD-ROM, memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria de solo lectura (ROM) o medios de almacenamiento de software de computadora similares conocidos en la técnica, pueden programarse para ejecutar tales pasos del método.

Todas las citas se incorporan en la presente por referencia.