

White Paper

El Fervor del Alcance de las Microondas

Comprendiendo y desmitificando las ruidosas afirmaciones de los fabricantes



DragonWave

www.dragonwaveinc.com

NOTICE

This document contains DragonWave proprietary information. Use, disclosure, copying or distribution of any part of the information contained herein, beyond that for which it was originally furnished, requires the written permission of DragonWave Inc.

The information in this document is subject to change without notice and relates only to the product defined in the introduction of this document. DragonWave intends that information contained herein is, to the best of its knowledge, correct and accurate. However, any/all liabilities associated with the use or accuracy of the information contained herein must be defined in a separate agreement between DragonWave and the customer/user.

DragonWave®, Horizon® and Avenue® are registered trademarks of DragonWave Inc. ©2017 DragonWave Inc. All rights reserved

TABLE OF CONTENTS

INTRODUCCIÓN..... 4

EL CÍRCULO MÁGICO 5

VERDADERA MEJORA DEL RENDIMIENTO DEL ENLACE..... 6

LA FÍSICA SUBYACENTE DEL CÍRCULO MÁGICO 7

LA TEORÍA DE LA INFLACIÓN 11

ESTIRANDO LA BANDA E 13

EN UN UNIVERSO PARALELO 16

CONCLUSIÓN – DESMITIFICANDO EL MITO 16



Introducción

Cada tanto el Departamento de Marketing de los fabricantes de radio de microondas X, Y o Z decide que es momento de hacer algunas olas en el mundo del backhaul inalámbrico de otra manera aburrido. Es una receta probada para llamar la atención es proclamar el record de performance de sus productos.

En nuestro negocio, derribando los límites de alcance o capacidad funciona muy bien para voltear la vista, por lo cual vemos bastantes llamados a la fama en esas áreas.

Desafortunadamente, la mayoría de esas declaraciones de "romper récords" de alcance o capacidad son engañosas, y de hecho no se están rompiendo puntos de referencia de rendimiento en absoluto. En este documento voy a tratar de explicar por qué ese es el caso y cómo desmitificar esas estruendosas reivindicaciones.

El Círculo Mágico

Permítanme primero presentarles lo que he llamado el círculo mágico, una herramienta conceptual para visualizar la interrelación del rango, la capacidad y la disponibilidad de los enlaces inalámbricos.

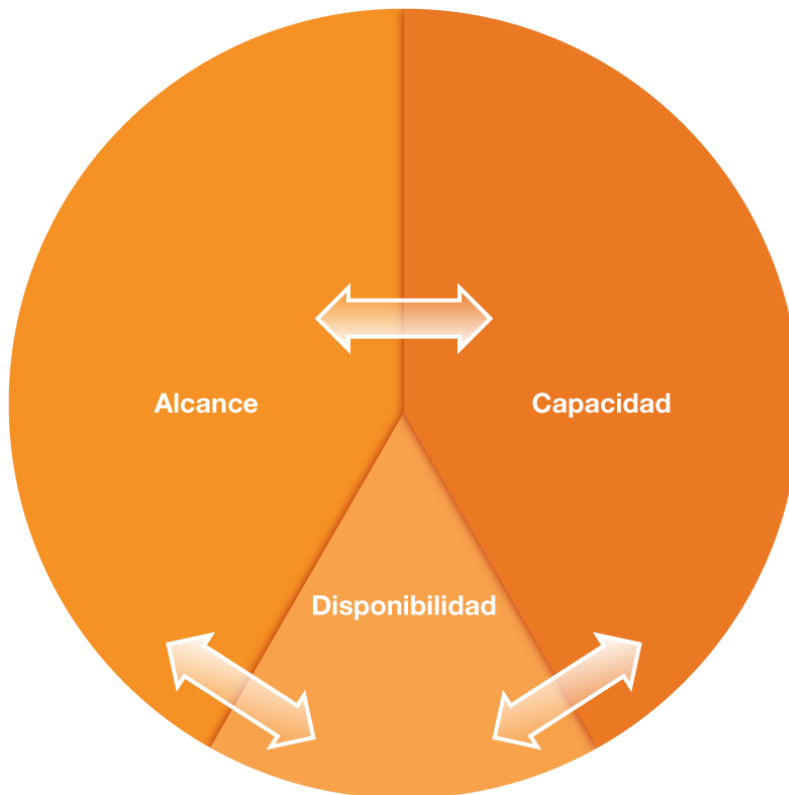


Figure 1: El Círculo Mágico

La capacidad, rango y disponibilidad de un enlace de radio de microondas punto a punto son un juego de suma cero, una vez que se han seleccionado los equipos, antenas y los ajustes del equipo.

El tamaño – o la circunferencia – de este círculo representa el Cálculo de Enlace de un enlace de radio de microondas punto a punto. Ese Cálculo de Enlace se define por la potencia de transmisión, la sensibilidad de receptor y la ganancia de antena disponible en ese Enlace. Una vez que se seleccionaron el equipo y la antena, se establece el tamaño del canal de radio (ancho de banda) y se define el modo de modulación máxima, el tamaño del círculo – que representa el Cálculo de Enlace – no puede cambiar. Esto significa que si la capacidad se incrementa, el alcance o la disponibilidad van a verse afectados. Si el alcance se extiende habrá un precio a pagar en términos de la disponibilidad o capacidad. La mejora de cualquiera de los parámetros claves dará como resultado un deterioro de uno o ambos de los otros parámetros: es un juego de suma cero.

Verdadera Mejora del Rendimiento del Enlace

El verdadero camino de progreso consiste en aumentar el tamaño del círculo mágico, o el Cálculo de Enlace, y aumentando por lo tanto el alcance, la capacidad o la disponibilidad d sin renunciar a ninguno de esos parámetros. Esta mejora se logra de cuatro formas distintas – suponiendo que estamos utilizando la más prevalente arquitectura de un sistema de radio microondas, simple transmisor- simple receptor (SISO)¹:

1. **Montaje de antenas de mayor tamaño con mayor ganancia.** Este es por lejos la forma más sencilla de aumentar el Cálculo de Enlace. Adicionalmente, las antenas de mayor ganancia tienen un patrón de radiación más centrado, estrecho, y por lo tanto son menos sensibles a la interferencia fuera del alineador óptico de antenas de baja ganancia. Por desgracia, no siempre es posible instalar grandes antenas debido:
 - a. Obstrucciones – las autoridades locales o propietarios de sitios tienden a restringir el tamaño de la antena.
 - b. Limitaciones de peso (carga estática) de la estructura de montaje– las antenas más grandes son más pesadas.
 - c. Limitaciones de espacio físico – puede haber falta de espacio o de acceso para montar una antena más grande.
 - d. Limitaciones de carga (carga de viento) dinámica de la estructura de montaje – las antenas más grandes tienen un mayor área expuesta al aire que ejerce un mayor esfuerzo de torsión en la estructura de montaje.
 - e. Costo – las antenas más grandes siempre son más caras que sus equivalentes más pequeñas.
 - f. Disponibilidad – en la mayoría de las bandas de frecuencia hay un tamaño máximo de antena – en algunos casos sólo 60 cm/2 pies – disponible.

2. **Aumento de la potencia de transmisión del transmisor.** Esto puede hacerse cambiando por ejemplo de GaAs² a GaN³ el circuito del amplificador de potencia, o por otros medios. Por lo general es la manera menos costosa de mejorar el Cálculo de Enlace. La otra cara de este enfoque es:
 - a. Podría haber más interferencias entre los enlaces adyacentes, disminuyendo parte de la ganancia en redes densas. Esto puede ser mitigado utilizando el Control Automática de Potencia de Transmisión (ATPC), liberando energía adicional a demanda, durante eventos de profundo fading – o mediante el uso de antenas de mayor rendimiento, por ejemplo el ETSI Clase 4 en lugar de ETSI Clase 3, con un mejor rechazo de interferencias con antenas fuera de apuntamiento.
 - b. Generalmente el consumo de energía y disipación de calor del producto aumentará, requiriendo grandes disipadores de calor.
 - c. El coste del producto generalmente será mayor también. Los semiconductores GaN son más caros que los semiconductores GaAs, y también se requieren fuentes de alimentación y disipadores de calor más grandes.

3. **Mejorando la sensibilidad del receptor.** Este es el más sutil y elegante enfoque, pero también el más difícil. Implica una reducción de la figura de ruido o la implementación de algoritmos FEC⁴ de más alto rendimiento. Ambos enfoques implican un impacto de costo, porque se debería implementar con componentes más exóticos o subsistemas de enfriamiento. Como el negocio de radios de microondas punto a punto es muy sensible a los costos, una mejora material en la figura de ruido no es factible a menos que se produzca un avance tecnológico.

¹ Single Input Single Output – cada punta del enlace utiliza un único transmisor y un único receptor. Los sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) pueden lograr una mejor performance (capacidad, alcance, disponibilidad) con una mayor complejidad del sistema y un costo más alto.

² Gallium Arsenide – el semiconductor más común utilizado para circuitos de radio frecuencia por microondas.

³ Gallium Nitride – un semiconductor utilizado para circuitos de radio frecuencia por microondas de más alta potencia.

⁴ Forward Error Correction – envío de corrección de errores.

4. **Mejorar la eficiencia espectral de banda base mediante la implementación de la compresión del tráfico.** Con este método, los datos de banda base que se envían a través del enlace son comprimidos sin pérdidas antes de ser transmitidos. Haciendo esto se puede aumentar la capacidad del enlace en más del 100%, sin comprometer el alcance o su disponibilidad. Hay que tener en cuenta que no va a aumentar la velocidad del enlace real en el nivel físico, pero sin embargo el usuario experimentará un mayor rendimiento. Obviamente, el éxito de este enfoque dependerá de cuán comprensible es el patrón de tráfico de banda base. El aumento de compresión se verá afectado negativamente por la presencia de datos previamente comprimidos (ya comprimidos por la aplicación del usuario de datos) o datos encriptados en el flujo de tráfico.

Todos los proveedores de radios de microondas tienen acceso a las mismas antenas fabricadas por los mismos proveedores, utilizan receptores de última generación con sensibilidad de receptor comparable y dependen de algoritmos de FEC estándar de la industria bien conocidos. El principal diferenciador en términos de ganancia de sistema y Cálculo de Enlace – y por lo tanto el alcance, la capacidad o la disponibilidad, o el tamaño del círculo mágico – por lo tanto estará basado en la potencia de transmisión y la aplicación de compresión sin pérdidas de tráfico.

Sin embargo, un enfoque de aumentar la potencia de transmisión disponible no es necesariamente el enfoque óptimo ya que la potencia radiada total (densidad) es controlada generalmente por el organismo regulador del espectro, y puede haber sanciones monetarias por el uso de una potencia más alta o potencialmente incentivos financieros para el uso de un ahorro de energía.

La física subyacente del Círculo Mágico

Así que ¿por qué algunos proveedores de radio de microondas reclaman mucho mejor alcance de sus productos que sus competidores para plataformas de productos similares? Suponiendo que los productos que se están comparando operan en la misma banda de frecuencia y canal, utiliza las mismas antenas (montaje directo) y comparable transmisor, receptor y rendimiento de FEC y están implementando compresión de carga útil, ¿aquellos rangos no pueden diferir demasiado, verdad?

¡Bueno, sí puede! Jugando con la capacidad de enlace, la disponibilidad y el alcance – así cambiando de las fronteras dentro del Círculo de Mágico – y eligiendo cuidadosamente el área objetivo de despliegue para seleccionar regiones climáticas favorables y elevaciones de la ruta, el mismo enlace puede soportar un muy amplio rango de longitudes de salto y capacidad.

Impacto de la atenuación atmosférica y de la lluvia en el Cálculo de Enlace

¿Por qué? Vamos a empezar con lo básico. Además de la potencia de transmisión, sensibilidad del receptor y ganancia de la antena, los siguientes factores afectarán el rendimiento del enlace de microondas:

1. Atenuación atmosférica. Esto es fuertemente dependiente de la frecuencia según la Figura 2. La atenuación atmosférica también depende de la densidad del aire y por lo tanto una función de la altitud (no se muestra en la Figura 2). La atenuación atmosférica generalmente aumenta con la frecuencia, con picos de absorción en frecuencias distintas, como el pico de absorción del oxígeno alrededor de 60 GHz, en la llamada banda V. Se mantiene por debajo de 1 dB / km para la mayoría de las bandas de frecuencias por debajo de 100 GHz. La mayoría de los enlaces de radio de microondas terrestres funcionan en el rango de frecuencia de 3 a 86 GHz.
2. Atenuación de la lluvia. La lluvia afecta fuertemente a la propagación de ondas de radio con frecuencias superiores a 3 GHz - ver Figura 3. La atenuación de la lluvia tiende a aumentar con la frecuencia de radio hasta aproximadamente 100 GHz.

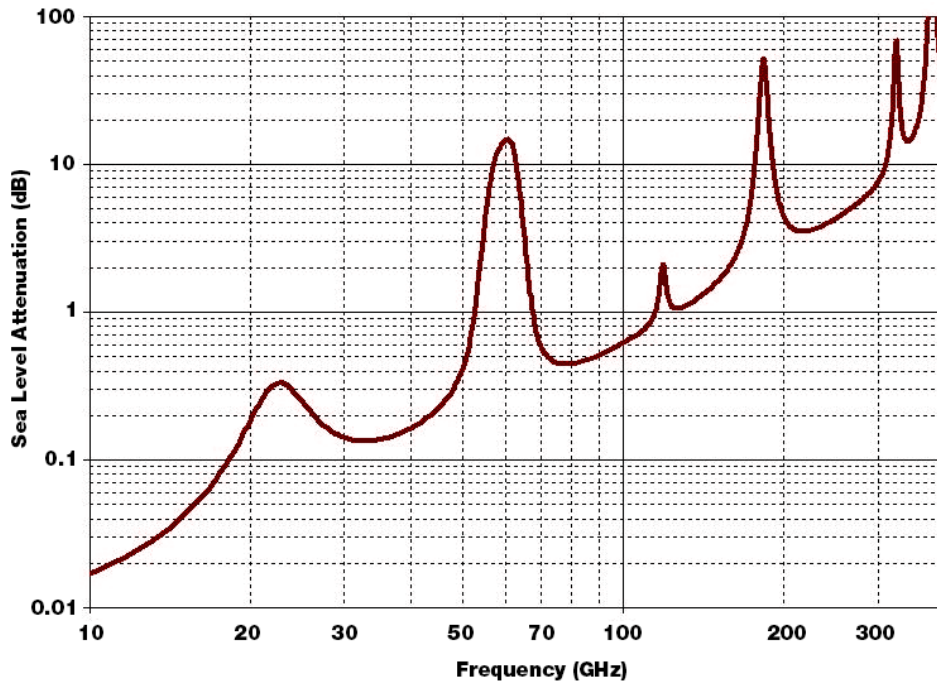


Figura 2: Atenuación atmosférica (dB/km) a nivel del mar de las ondas de radio en el eje vertical, en función de la frecuencia en el eje horizontal (GHz)

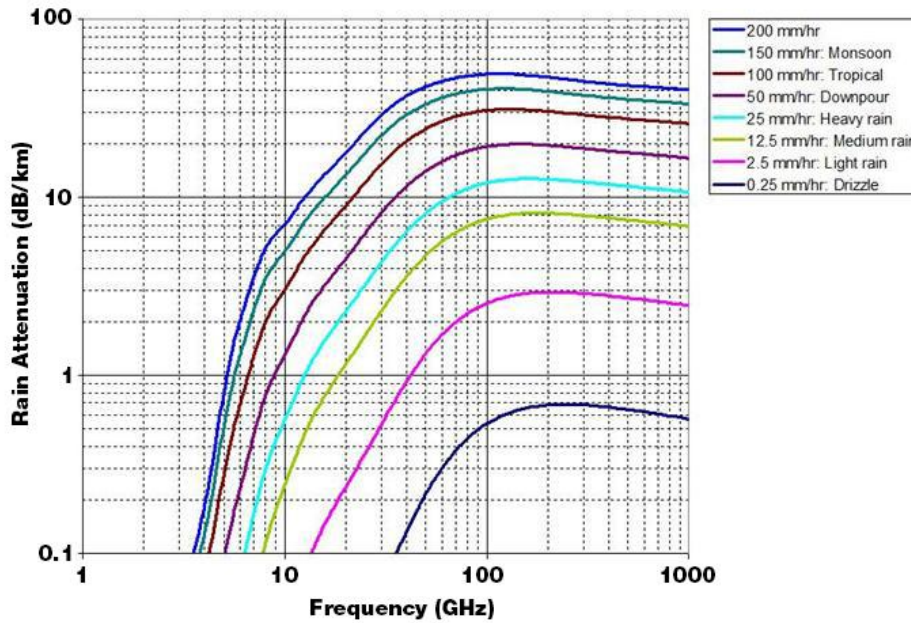


Figura 3: Atenuación de la lluvia de ondas de radio (dB/km) en el eje vertical en función de la frecuencia en el eje horizontal (GHz), para diferentes intensidades de lluvia codificadas por colores (mm/h)

Como puede deducirse comparando la Figura 2 con la Figura 3, la lluvia media (12,5 mm/h) generalmente causa más atenuación que la atenuación atmosférica y la lluvia intensa (25 mm/h) tiende a causar una atenuación aproximadamente diez veces mayor que la atmósfera. Esta es la razón por la cual la lluvia es la causa más frecuente de la degradación del enlace o de una ruptura completa del enlace temporal.

Zona de lluvia e impacto de la meta de disponibilidad en el Cálculo de Enlace

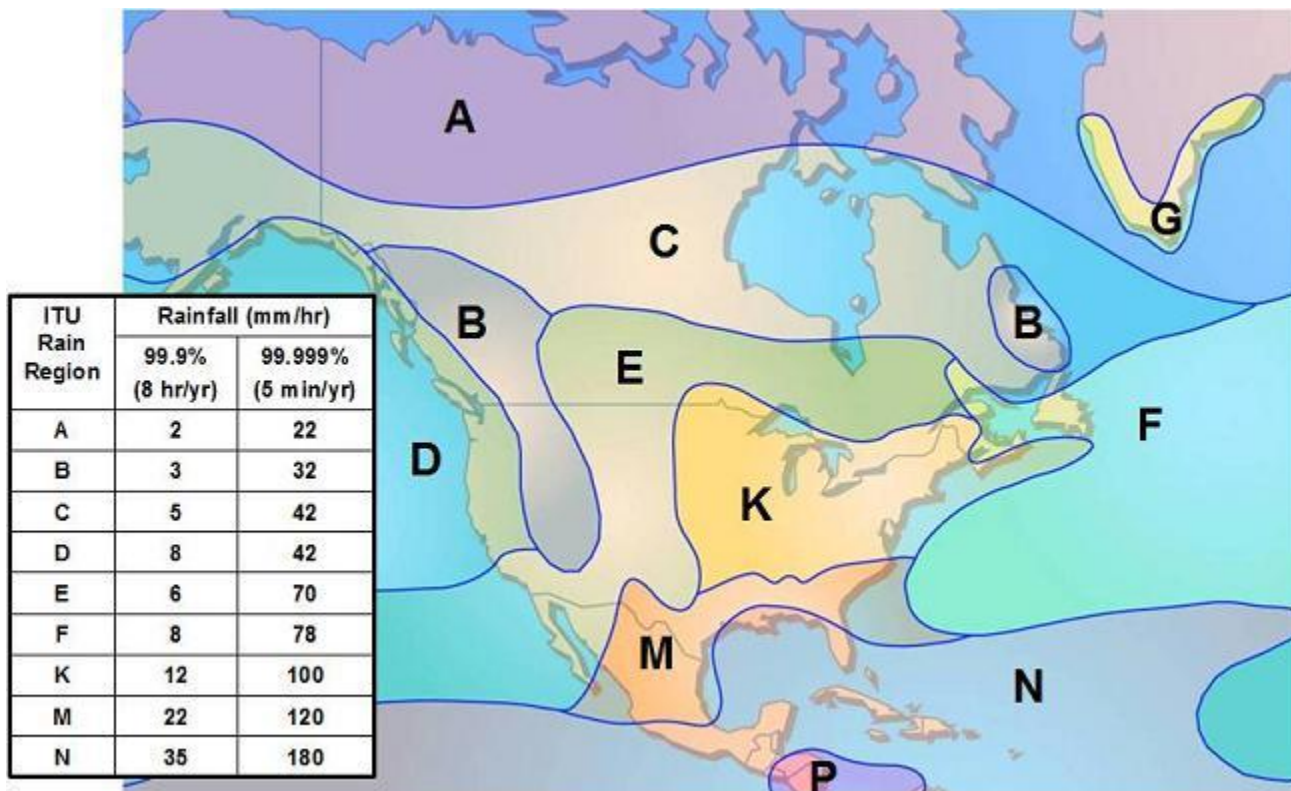


Figura 4: Regiones de intensidad de lluvia de la UIT para América del Norte

¿Cuánta lluvia tenemos que tener en cuenta al diseñar un enlace de radio de microondas terrestre? Echemos un vistazo a la Figura 4. Por ejemplo, la ciudad de Nueva York está en la zona de lluvia K. En esa zona, la intensidad de lluvia supera los 12 mm/h durante 8 horas al año en promedio y supera los 100 mm/año (lluvia tropical) durante sólo 5 minutos por año en promedio.

Si queremos que nuestro enlace tenga una disponibilidad de radiofrecuencia de 99,999%⁵ o mejor, equivalente a menos de 5 minutos de tiempo de inactividad por año, entonces nuestro enlace tendrá que soportar una intensidad de lluvia de 100 mm/h. Si este enlace opera en la banda de 10 GHz, eso implica (Figura 3) que sufre una atenuación (fading) de la lluvia de 3 dB/km. Suponiendo una longitud de salto de 10 km, el margen de desvanecimiento (Cálculo de Enlace de reserva) del enlace debe ser de al menos 30 dB. Obsérvese que la atenuación atmosférica en la banda de 10 GHz es inferior a 0,02 dB/km (Figura 2). Si usáramos ese margen de

⁵ 99.999% como objetivo de disponibilidad de radiofrecuencia es uno de los más estrictos en nuestra industria. Un objetivo del 99.995% es más común, y en algunos casos el 99.99% o menos es suficiente. El objetivo de disponibilidad depende de la criticidad de la aplicación y la disponibilidad de una topología redundante para ese enlace particular (alternativas de enrutamiento).

desvanecimiento de 30 dB para extender el salto de 10 km, a expensas de su disponibilidad, podríamos extenderlo cómodamente diez veces a 100 km, suponiendo suficiente distancia al suelo⁶. Un enlace de 100 km supondría 20 dB de pérdida adicional de espacio libre más 2 dB de atenuación atmosférica adicional, y tenemos al menos 30 dB de margen de desvanecimiento a nuestra disposición.

Impacto de la capacidad en el Cálculo de Enlace

Ahora, ¿cómo se interrelacionan la capacidad y el alcance? La capacidad de un enlace de radio de microondas depende en gran medida del ancho de banda de canal utilizado y del esquema de modulación. Duplicar el tamaño del canal duplicará la capacidad, siempre y cuando todos los demás parámetros permanezcan iguales. Sin embargo, esta duplicación de la capacidad se producirá a expensas de reducir la ganancia del sistema y el Cálculo de Enlace en aproximadamente 3 dB, debido a la potencia de ruido dos veces mayor en el extremo receptor del enlace. Esos 3 dB corresponden a un poco menos de 1 km de alcance a 10 GHz con un objetivo de disponibilidad de 99,999% en Nueva York (región de lluvia K de ITU).

Un esquema de modulación de orden superior también aumentará la capacidad, pero en una cantidad fija (en bits por segundo por Hz) por paso de modulación, dando lugar a una menor ganancia de capacidad relativa por paso de modulación, a medida que aumenta la modulación y la capacidad total del enlace (Figura 5).

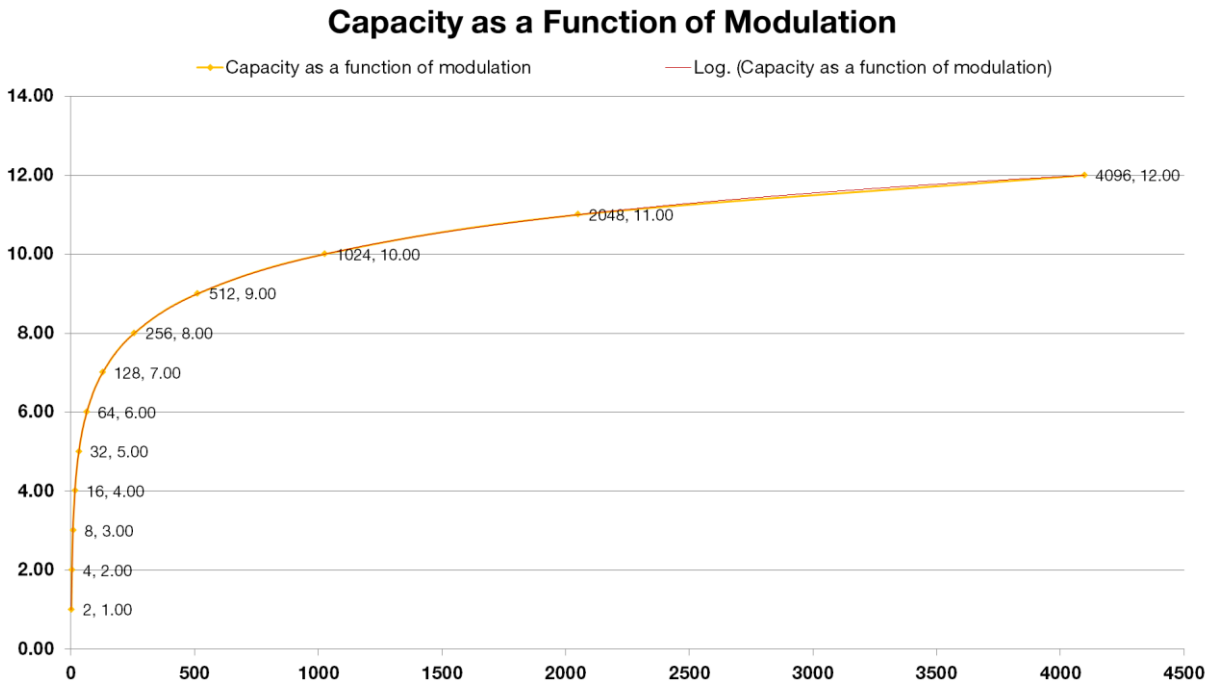


Figura 5: Ganancia de capacidad relativa (eje vertical) referida a BPSK⁷ en función de la modulación (eje horizontal)

La modulación en este gráfico varía desde BPSK (modulación de 2 estados) hasta 4096 QAM⁸. Cada paso consecutivo implica la duplicación del número de estados de modulación.

⁶ Que la distancia al suelo no es trivial para enlaces largos tiene que ver con la curvatura de la tierra. Los saltos largos en bandas inferiores a 10 GHz también pueden sufrir desvanecimientos por trayectos múltiples, lo que requiere el despliegue de configuraciones de diversidad de espacio. El desvanecimiento por trayectos múltiples no se tiene en cuenta en nuestro análisis simplificado

⁷ Binary phase Shift Keying – Modulación por cambio de fase, que utiliza dos fases separadas 180°

Por paso de modulación, la ganancia del sistema y el Cálculo de Enlace disminuirán aproximadamente en 3 dB, ya que cada paso de modulación implica una duplicación del número de estados de modulación, lo que hace la detección de señal dos veces más difícil en presencia de ruido. Como se deduce de la Figura 5, la modulación 2048 QAM incrementa la capacidad del enlace 11 veces en comparación con BPSK, pero el Cálculo de Enlace requerido es aproximadamente 30 dB más alto también (10 pasos de modulación x 3 dB).

La conclusión es que el aumento de la capacidad del enlace disminuirá el alcance y/o la disponibilidad del mismo, y si el aumento de capacidad se consigue mediante el aumento de la modulación, ese efecto será más fuerte que si se logra el mismo aumento de capacidad aumentando el ancho de banda del canal.

La teoría de la inflación

Como hemos visto en la sección anterior, las reivindicaciones de alcance de radio de radio de microondas pueden inflarse enormemente, a veces por un orden de magnitud. Es sólo una cuestión de:

- ❖ Selección de una zona de lluvia favorable; un lugar árido que presenta una baja probabilidad de lluvia o precipitación de alta intensidad. Obviamente, la mayoría de los clientes y aplicaciones de la vida real no tendrán la suerte de residir en lugares tan áridos.
- ❖ Reducir el objetivo de disponibilidad a un nivel ridículamente bajo. En nuestra industria, las disponibilidades objetivo son generalmente 99,95-99,995%. Cualquier cosa por debajo de un objetivo de disponibilidad del 99,95% es sospechosa, ya que la mayoría de los clientes no tolerarán tiempos de caídas de actividad que superan las 4,5 horas por año.
- ❖ Reduciendo la capacidad del enlace (modulación, tamaño del canal) a los niveles mínimos soportados. No hay nada malo en eso per se, especialmente si la capacidad más baja ocurre brevemente, durante la lluvia pesada, y se restaura a los niveles nominales cuanto antes (modulación adaptiva). Al mismo tiempo, la mayoría de las aplicaciones de la vida real requerirán capacidades de enlace más altas que el mínimo en un momento dado. Esto significa que el alcance máximo no será igual al rango máximo al nivel de modulación más bajo posible y al tamaño del canal. Además, los reguladores en ciertas jurisdicciones pueden definir la modulación más baja en la que un enlace puede operar, imponiendo un límite inferior sobre la eficiencia espectral (bps/Hz) y, por lo tanto, excluyendo los enlaces de máximo alcance.

Lo que los vendedores de microondas suelen hacer es declarar que el equipo X tiene Capacidad C y rango R. Más a menudo que no, la capacidad C es la capacidad máxima en un rango (muy) corto y/o en ausencia de precipitación y el alcance R corresponde a la más baja capacidad para ese equipo en particular. C y R nunca pueden obtenerse simultáneamente. Esto no es un problema, siempre y cuando el comprador entienda la compensación entre el rango, la capacidad y la disponibilidad.

Veamos algunos ejemplos. Ver la Figura 6. Cada uno de los 2 gráficos representa tres configuraciones diferentes del mismo equipo. En este caso, estamos examinando un enlace de banda V (56-58 GHz) de banda estrecha (canal de 50 MHz) desplegado en Moscú, Rusia.

- ❖ La línea azul es un gráfico del rango frente a la capacidad (modulación) para antenas integradas de 20 cm
- ❖ La línea central es un gráfico para el mismo equipo usando platos parabólicos de 30 cm (1 pie)
- ❖ La línea más a la derecha es un gráfico para el mismo equipo usando platos parabólicos de 60 cm (2 pies).

⁸ Quadrature Amplitude Modulation.

Dos cosas son obvias:

1. **Ganancia de antena** - relacionada con el área de la antena (apertura) - tiene un impacto significativo en la longitud del salto,
2. **Modulación** - tiene un fuerte impacto en el alcance, y un impacto obvio en la capacidad. La duplicación de la capacidad mediante la modulación nos privaría de aproximadamente un tercio del alcance.



Figura 6: El efecto de la disponibilidad, el tamaño de la antena y la modulación (capacidad) en el alcance

Lo que quizás es aún más llamativo es el impacto de una variable sutil - la disponibilidad - en el alcance. Si pretendemos una disponibilidad del 99.995%, o 26 minutos de tiempo de inactividad por año, entonces nuestro alcance máximo a la máxima capacidad con antenas de 60 cm en Moscú para este equipo en particular es de tan solo 1.08 km. Si simplemente relajamos nuestro objetivo de disponibilidad a 264 minutos de tiempo de inactividad por año., entonces nuestro alcance aumentará a 1,52 km, un 41% de mejora, y sin costo alguno, excepto quizás la satisfacción del cliente.

Como se deduce de la figura 6, podríamos afirmar que este enlace en banda V tiene una capacidad de 400 Mbps y un alcance de 3,5 km. En realidad, como el enlace es un enlace de DragonWave, soporta compresión masiva (Acelerador de Ancho de Banda). Por lo tanto, siempre que se alimente con tráfico factible de ser comprimido, podríamos reclamar una capacidad de 1 Gbps y un rango de 3,5 km. Muy notable para un enlace de banda V que opera dentro del pico de atenuación de 60 GHz que se muestra en la Figura 2.

Estirando la banda E

La mayoría de los enlaces de radio de microondas funcionan dentro del espectro de 3-42 GHz. Además de esos enlaces "mainstream", hay menos enlaces que operan en la banda V (alrededor de 60 GHz) y la banda E (alrededor de 80 GHz). Varios proveedores están experimentando con enlaces cerca y más allá de la marca de los 100GHz, para alcanzar la necesidad de mayores capacidades.

La banda E en particular ha atraído mucha atención últimamente, porque una gran cantidad de espectro está disponible, permitiendo capacidades en el rango de 1-10 Gbps, y porque la atenuación atmosférica (Figura 2) es modesta en comparación con la banda V, e incluso con frecuencias más altas.

El desafío con la banda E, y de hecho todas las frecuencias de radio más allá de aproximadamente 30 GHz, es su susceptibilidad a la lluvia (Figura 3). Y como la atenuación de la lluvia es mucho más fuerte que la atenuación atmosférica en casi todas las partes del mundo (Figuras 3 y 4), las tasas de lluvia y los objetivos de disponibilidad serán el factor limitante para el rango de banda E.

Entonces, ¿qué podemos esperar de los enlaces de la banda E en términos de alcance? Vamos a dar algunos ejemplos - ver la Figura 7.

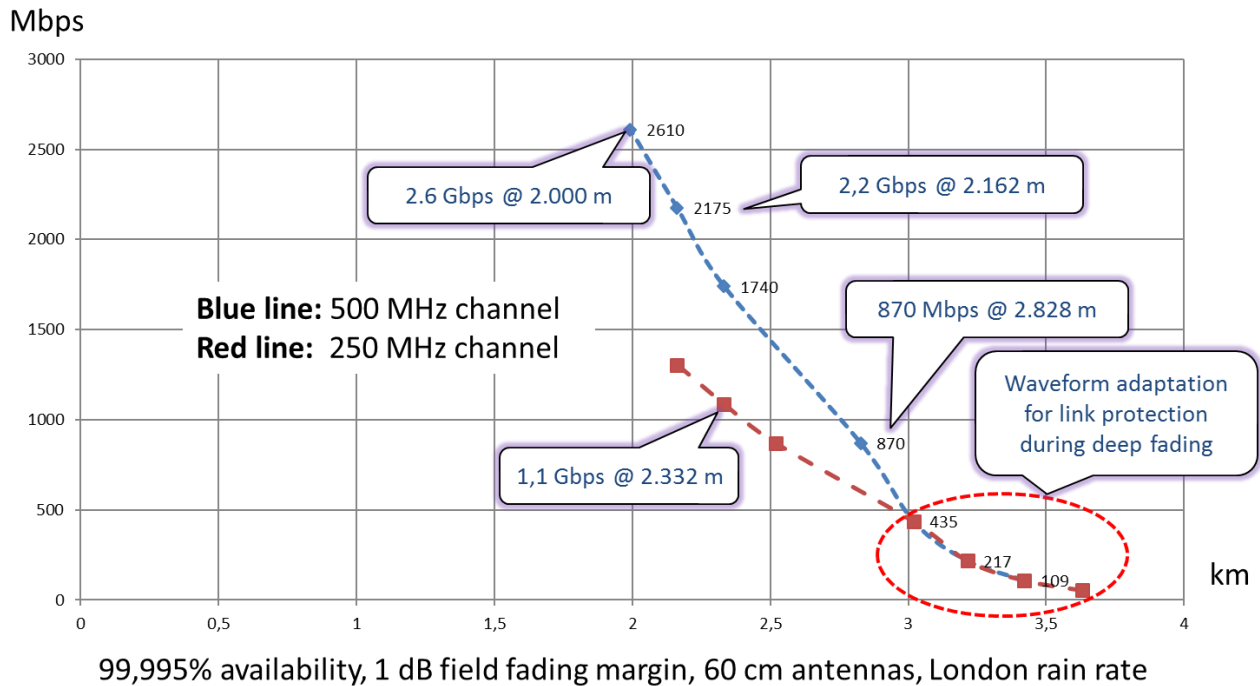


Figura 7: Alcance (eje horizontal, en km) versus capacidad (eje vertical, Mbps) para un enlace de banda E en Londres

Utilizando antenas parabólicas de 60 cm (2 pies) en ambos extremos del enlace, con una disponibilidad de 99,995%

Como se puede deducir de la figura, este enlace puede alcanzar la plena capacidad (2,6 Gbps) en un rango de 2 km. Si 870 Mbps de capacidad es aceptable, y usamos un canal de 500 MHz, el enlace se puede estirar a 2,8 km. Usando un canal de 250 MHz, podemos alcanzar 1,1 Gbps en hasta 2,3 km. Este es el tipo de rendimiento (1-3 Gbps a una distancia de 2-3 km) que se espera de un enlace de banda E en un teatro de despliegue de la vida real y que soporte los objetivos de disponibilidad del portador (99.995%).

Entonces, ¿por qué algunos vendedores afirman que soportan enlaces de más de 15 km (10 millas) en la banda E? ¿Tienen acceso a tecnología superior? Probablemente no.

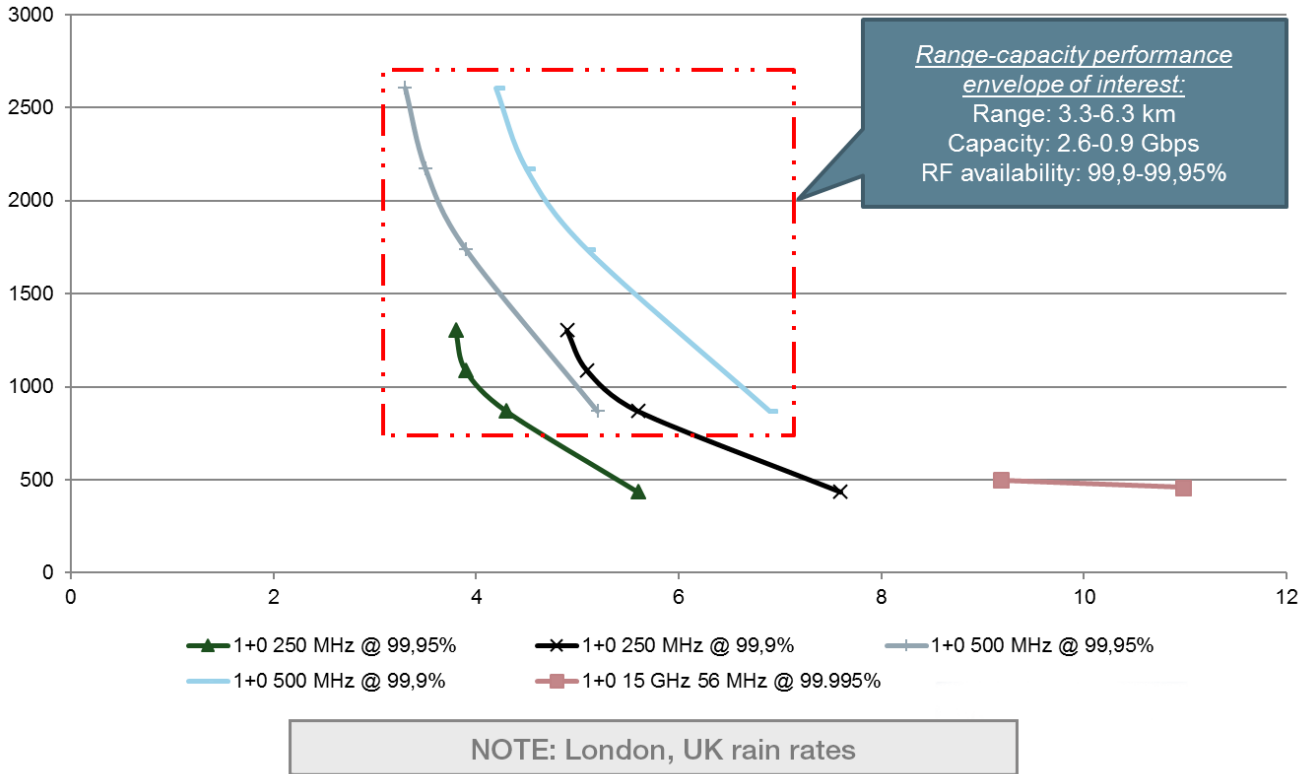


Figura 8: Alcance (eje horizontal, en km) versus capacidad (eje vertical, Mbps) para un enlace de banda E en Londres

Utilizando antenas parabólicas de 60 cm (2 pies) en ambos extremos del enlace, con 99,9% y 99,95% de disponibilidad

Veamos la Figura 8. Todos los parámetros, excepto el objetivo de disponibilidad, son iguales a los parámetros de la Figura 7. Como se puede ver, esto conduce a una considerable extensión del rango a velocidad máxima (2,6 Gbps), de 2 km en la Figura 7, a 3,3 km (línea gris) o a 4,2 km (línea azul claro) en la Figura 8. Si aceptamos una capacidad del orden de 500 Mbps, podemos llegar a un rango de 7,6 km. ¿Cuál es el alcance de este equipo 2.0 km, 2,8 km 3,3 km 4,2 km o 7,6 km? Todo depende de la zona de lluvia, el objetivo de la disponibilidad y la capacidad objetivo.

Sin embargo, 7,6 km está muy lejos de 15 km ... Veamos qué pasa si reducimos el objetivo de disponibilidad a muy por debajo del 99,9%.

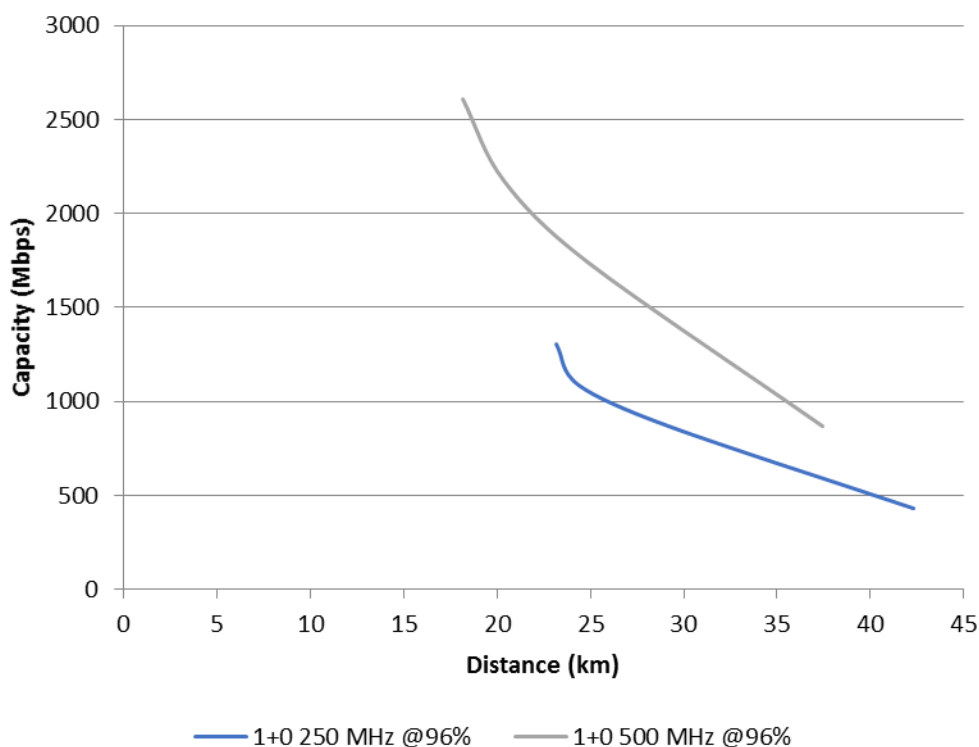


Figura 9: Rango (eje horizontal, en km) versus capacidad (eje vertical, Mbps) para un enlace de banda E en Londres

Utilizando antenas parabólicas de 60 cm (2 pies) en ambos extremos del enlace, suponiendo que no haya ningún margen de desvanecimiento de lluvia, y un canal de 250 MHz y 500 MHz respectivamente

Observe que las figuras La figura 7 y la figura 8 representan el funcionamiento exactamente del mismo hardware, exactamente en el mismo lugar, Londres, usando la misma metodología del cálculo de la disponibilidad. La única variable es el objetivo de disponibilidad. En la figura 9 hemos eliminado las restricciones que la precipitación nos impone en conjunto. En la Figura 7, alcanzar 3 km a velocidad máxima (2,6 Gbps) parece ser difícil. Podemos hacer 2,8 km a 0,87 Gbps en el mejor de los casos. En la Figura 9, rompemos el límite de 15 km (10 millas) con facilidad, y lo hacemos con "aceleración máxima".

¿Podemos construir un enlace de banda E de 15 km en Londres? ¡Si podemos! ¿Podemos construir un enlace confiable de 15 km de banda E en Londres? Eso depende de lo que usted define como "confiable". Un enlace que presenta, por ejemplo 98% de disponibilidad estará abajo durante aproximadamente el 2% del tiempo. Eso corresponde a más de una semana calendario - 7 días - por año en promedio. Depende de la aplicación, será o no aceptable, pero para el 98% de las aplicaciones definitivamente no lo será.

Sin embargo, en raras ocasiones, incluso el 96% de disponibilidad de enlaces será bueno. El autor se reunió una vez con un cliente en Rusia que quería ofrecer conectividad a Internet a pueblos remotos utilizando enlaces de radio de microondas sub-20 GHz de largo alcance (30 km de distancia). Quería implementar esos enlaces "baratos y alegres", minimizando los gastos, por lo tanto, limitando la sección transversal de la antena y restringiendo el margen de fading del cálculo de enlace. Parecía misión imposible.

Entonces le pregunté por el objetivo de disponibilidad de esos enlaces. Sorprendentemente, el cliente mencionó el 96%⁹. Cuando le pregunté si 2 semanas de tiempo de inactividad sería aceptable, él contestó: ¿por qué no? Ellos no tienen Internet por 52 semanas por año ahora, no van a tener Internet por 2 semanas por año en el futuro, ¿cuál es el problema?

En un Universo Paralelo

Varios proveedores proponen utilizar un enlace sub-30 GHz en paralelo con un enlace de banda E (80 GHz). El enlace sub-30 GHz proporciona una buena disponibilidad de enlace, normalmente 99.995%, ya que es menos susceptible a la lluvia, a una capacidad comparativamente baja, típicamente en el rango de 200-500 Mbps. El enlace de banda E proporciona una capacidad muy alta, típicamente entre 1-3 Gbps, y una disponibilidad relativamente baja, típicamente hasta 99.9%.

En la Figura 8, podemos ver que un enlace paralelo de 15 GHz (cerca de la esquina inferior derecha) puede proporcionar fácilmente más de 400 Mbps hasta un rango de 11 km (utilizando antenas de 60 cm) con una buena disponibilidad de 99.995%. Teniendo tal enlace en paralelo con nuestro enlace de banda E, podemos conseguir un tráfico decente entre 3.3 y 6.3 kilómetros - dependiendo de la capacidad deseada.

De esta manera, podemos obtener lo mejor de ambos mundos. La mayor parte del tiempo (99.9%) obtenemos 1-3.1 Gbps de tráfico, durante aproximadamente 0.5% del tiempo obtenemos un tráfico reducido (hasta el más bajo tráfico del enlace de baja frecuencia) y durante el tiempo de sólo 0,005% no habrá ningún servicio en absoluto. La ingeniería de enlaces y la definición del(de los) objetivo(s) de disponibilidad se vuelven más complejas.

Conclusión – Desmitificando el Mito

Llegamos a la conclusión de que es imposible definir inequívocamente "el" alcance y "la" capacidad de cualquier enlace de radio dado. El alcance, la capacidad y la disponibilidad del enlace están todos interrelacionados, recuerde la Figura 1, el Círculo Mágico. Las tasas de lluvia en el área de despliegue y los tamaños de antena también jugarán un papel importante.

La mayoría de las afirmaciones de alcance enorme que vemos a nuestro alrededor son engañosas. Se basan en el despliegue en zonas extremadamente áridas o con objetivos de disponibilidad de enlaces bajos o muy bajos, con las capacidades de enlace más bajas. Los tres supuestos son totalmente irrealistas en la gran mayoría de los despliegues del mundo real.

Frente a una oferta de alcance extrema, se debe pedir información adicional como:

1. Zona de lluvia de la zona de despliegue
2. Objetivo de disponibilidad
3. Capacidad del enlace en el rango indicado
4. Tamaño de antenas usados
5. El tamaño del canal de radio.

⁹ El modelo ITU es válido para objetivos de disponibilidad entre 99% y 99,999%. Si se requiere un modelo de enlace más allá de esos límites, se necesita usar un modelo diferente, p. el modelo Crane.

También hay una solución alternativa. La mejor y más fácil manera de comparar el rendimiento de sistemas de radio de microondas y su potencial alcance no es en realidad comparaciones de alcance directo. Lo que se necesita es una ganancia del sistema (en dB) en un canal definido (p. Ej., 50 MHz, 56 MHz, 500 MHz) a una determinada modulación (por ejemplo 2048 QAM, 64 QAM) y un BER definido (por ejemplo 10^{-6}). Esto asegura una comparación justa de "manzanas con manzanas", y es impresionantemente fácil de realizar.

Para obtener más información sobre este enfoque, consulte el siguiente documento técnico:
<http://bit.ly/2mlxDwI>