

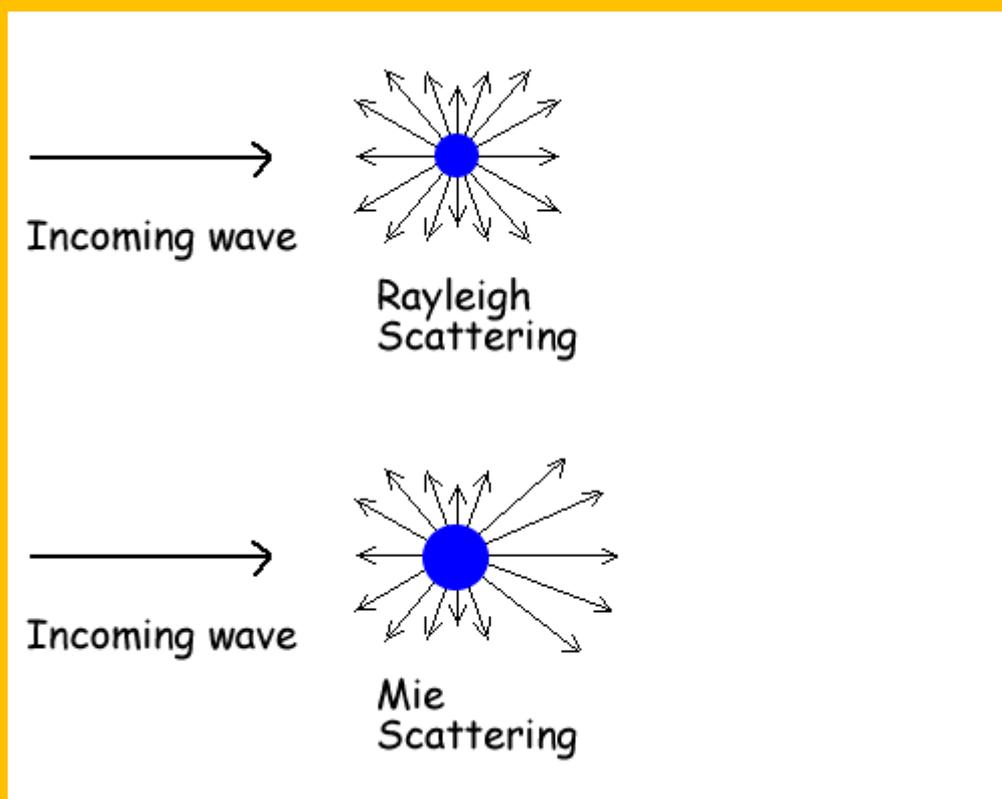
Dispersión de Lluvias (Rain Scatter)

Otro efecto que es particularmente importante por encima de 3GHz es la dispersión de lluvia, o más estrictamente la dispersión de hidrometeoros. Los hidrometeoros son esencialmente partículas de agua dentro de la atmósfera, pueden tomar la forma de agua líquida como lluvia, niebla y niebla o hielo como nubes, granizo y nieve.

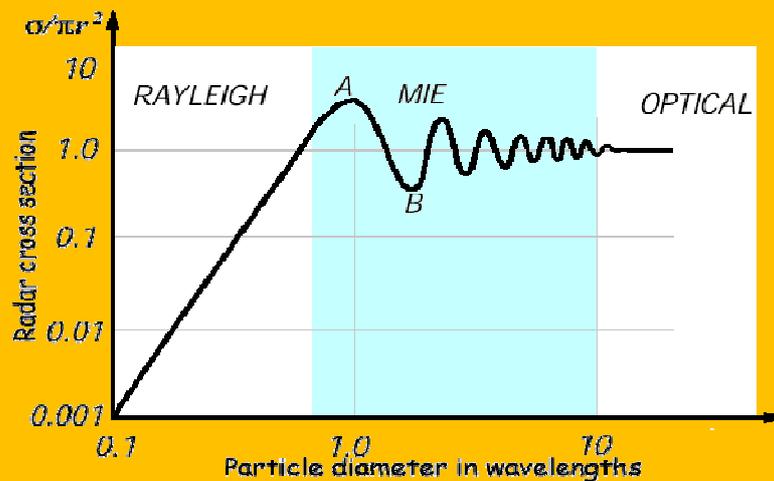
La dispersión de lluvia puede extender la propagación de señales de microondas mucho más allá de la línea de visión. Con la dispersión de la lluvia a 2 - 4 km sobre el suelo, la extensión del rango puede ser de varios cientos de km.

Por qué la lluvia dispersa las ondas de radio

La dispersión directa de los hidrometeoros en las microondas se realiza a través de un mecanismo llamado dispersión de Rayleigh. Rayleigh escribió un artículo al respecto en 1871, de ahí el nombre. La dispersión de tipo Rayleigh ocurre cuando la partícula es eléctricamente pequeña y el desplazamiento de fase a través de la partícula es pequeño, es decir, la partícula es mucho más pequeña que la longitud de onda. La dispersión de Rayleigh dispersa la energía con un patrón de radiación como el de un dipolo. Si la partícula es del orden del tamaño de la longitud de onda, se produce la dispersión de Mie. Con la dispersión de Mie, hay más dispersión hacia adelante y un lóbulo de radiación hacia adelante.



Rayleigh y Mie no son mecanismos diferentes, son simplemente modelos que se aproximan al mecanismo de dispersión aplicable a diferentes longitudes de onda. El siguiente diagrama lo demuestra bien.



La dispersión no solo afecta a las ondas de radio, la dispersión de luz por moléculas en el aire es la razón por la que el cielo no es negro. Existe una dependencia de la longitud de onda inversamente proporcional a la 4ª potencia, las longitudes de onda más cortas se dispersan más.

Un ejemplo práctico son las partículas muy pequeñas en la atmósfera superior que dispersan la luz azul más que la luz roja porque la luz azul tiene una longitud de onda más corta, por lo que el cielo es azul. Las partículas de agua muy pequeñas en las nubes siguen siendo mucho más grandes que la longitud de onda de la luz, por lo que no hay selectividad de frecuencia y la luz dispersa es blanca. Las gotas de lluvia grandes permiten que la luz se refleje internamente, con el ángulo de refracción dependiente de la longitud de onda, de ahí el arco iris.

Esta dependencia de la longitud de onda también es la razón por la que las señales VHF y UHF no se dispersan significativamente, mientras que las señales SHF y superiores sí lo están. La mayor parte de la dispersión de la lluvia para las señales de microondas se puede considerar como dispersión de Rayleigh. El criterio de Rayleigh:

$\pi D / \lambda \ll 1$ donde D es el diámetro de la partícula y

$\pi nD / \lambda \ll 1$ donde n es el índice de refracción.

Si lo anterior es cierto, se puede hacer la aproximación de Rayleigh. Una gota de lluvia típica puede tener un diámetro de 1 mm, por lo que se asume un índice de refracción de 1 (ver más adelante) $\pi nD / \lambda = 1$ si $\lambda \sim 3$ mm equivalen a alrededor de 100 GHz. Entonces, para esta gota de lluvia de 1 mm, si la frecuencia está por debajo de 100 GHz, observaremos la dispersión de Rayleigh y el campo eléctrico disperso será como el de un dipolo.

Ahora llegamos a las matemáticas. La función de dispersión general se puede calcular a través de la teoría electromagnética más allá del alcance de este tutorial, pero es importante saber a qué se refiere, que es la relación entre la intensidad del campo disperso y la incidente en algún punto definido en el espacio 3D, generalmente usando coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) . La más interesante es la función de dispersión directa S_{θ} , que define cuánta energía se dispersa en la

misma dirección en la que se dirigía originalmente la onda entrante. Un parámetro que se menciona a menudo es la sección transversal de extinción de una partícula, que está relacionada con la parte real (la potencia, no la fase) de S_o .

$$C_{ext} = \lambda^2 / \pi \operatorname{Re} [S_o]$$

Este es un parámetro útil con unidades de área que se puede usar para calcular tanto las señales dispersas como la atenuación como resultado de la pérdida de energía por dispersión. Si nuestra onda de radio se propaga a través de una región que contiene partículas en dispersión, la atenuación resultante de la pérdida por dispersión está relacionada con el producto de la densidad de partículas N (unidades de partículas por unidad de volumen) y la sección transversal de extinción C_{ext} (unidades de área).

Si se satisface el criterio de Rayleigh, el momento dipolar P está relacionado con un campo eléctrico incidente se puede escribir como:

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \zeta v = \epsilon_0 Uv$$

Donde v es el volumen de la partícula $\psi\zeta$ es la relación del campo interno y externo $3 / (\epsilon_r + 2)$ para una esfera. El parámetro U se tabula a continuación para hidrometeoros comunes dependiendo de si el campo es paralelo o perpendicular al eje más largo de la partícula. La potencia reradiada (dispersada) por este dipolo es:

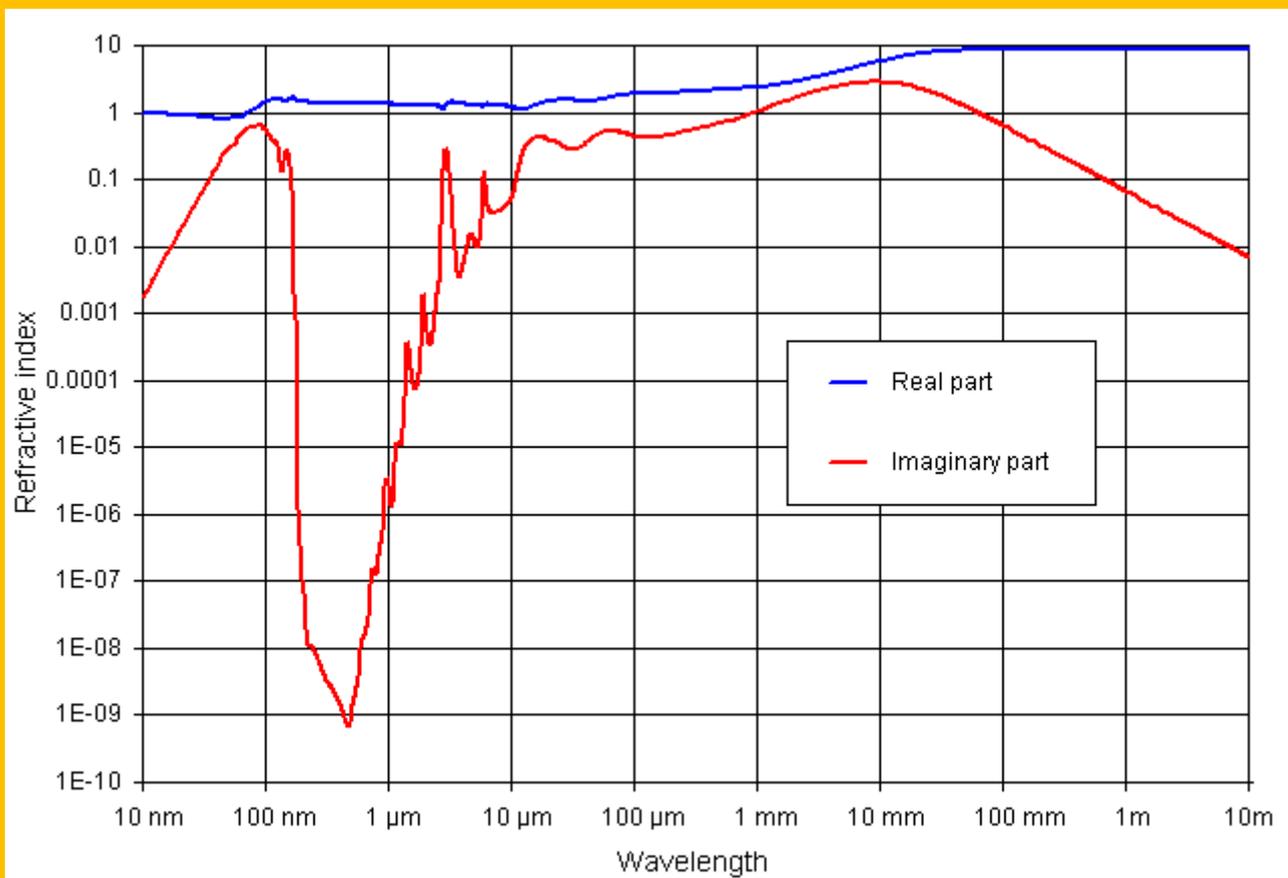
$$P^2 / 3 \epsilon_0^2 \lambda^4 = (UV)^2 / 3 \lambda^4$$

Tenga en cuenta la dependencia con $1 / \lambda^4$ que explica por qué la energía dispersada aumenta rápidamente a medida que disminuye la longitud de onda. Tenga en cuenta también que se absorbe algo de poder, la parte imaginaria de S_o . La atenuación por lluvia es una mezcla de pérdida por dispersión y absorción.

	Esfera de agua (gota de lluvia)	Esfera de hielo (granizo)	Aguja de hielo	Placa de hielo
$U_{paralelo}$	$3 (\epsilon_r - 1) / (\epsilon_r + 2) \sim 3$	1,26	2,32	2,32
$U_{perpendicular}$	$3 (\epsilon_r - 1) / (\epsilon_r + 2) \sim 3$	1,26	1.04	0,68

El índice de refracción del agua y el hielo

El índice de refracción del agua es bastante complicado con una fuerte dependencia de la temperatura y la frecuencia. La parte real es de alrededor de 10 a 30 GHz con la parte imaginaria que varía de alrededor de 0,2 a 2, pero generalmente aumenta con la temperatura y la frecuencia. Por encima de 30GHz caen tanto la parte real como la imaginaria. <http://www.philiplaven.com/p20.html> ofrece un excelente resumen.



El bajo valor de la parte imaginaria del índice de refracción del agua en la región de 1 μ ma 100 nm indica que el agua será transparente a frecuencias ópticas, como todos sabemos, lo es.

La parte real del índice de refracción del hielo es de alrededor de 1,78 hasta 300 GHz con un pequeño componente imaginario (tangente de pérdida) que cae con la frecuencia. Por cierto, esta es la razón por la que los hornos microondas no son buenos para derretir hielo.

Para calcular la energía dispersada de una celda de lluvia en particular, es necesario utilizar la ecuación de radar biestático que se derivó en la [sección de reflexiones](#) .

$$P_{rx}/P_{tx} = \frac{G_t G_r A \lambda^2}{(4\pi)^3 (d_1 d_2)^2}$$

El área de reflexión A en la ecuación anterior se reemplaza por una expresión para la dispersión de lluvia / hielo.

$$P_{rx}/P_{tx} = \frac{G_t G_r \lambda^4 N V_c S(\theta, \phi)^2}{(4\pi)^4 (d_1 d_2)^2}$$

donde N es la densidad de partículas, V_c es el "volumen común" de la región de dispersión formada por la lluvia / hielo y la intersección de los haces de antena y $S(\theta, \phi)$ es la función de dispersión. En los extremos del rango, $S(\theta, \phi)$ se puede reemplazar por S_0 , que podemos calcular a partir de la sección transversal de extinción C_{ext} de las partículas. $C_{ext} = \lambda^2 / \pi \text{Re}[S_0]$. La sección transversal de extinción aumenta aproximadamente en proporción a la tercera potencia del tamaño de la gota y con el cuadrado inverso de la longitud de onda, es decir, D^3 / λ^2 en la región de Rayleigh.

Características esenciales de Rain Scatter

Naturalmente, dado que N y v_c dependen del clima, los valores varían considerablemente con el tiempo y el espacio, por lo que calcular la señal de dispersión de lluvia requiere una integración compleja, asumiendo que la estructura de la lluvia es conocida o puede modelarse y generalmente requerirá una integración numérica usando una computadora (programa). Sin embargo, a partir de las ecuaciones anteriores podemos identificar las características importantes que son:

que la intensidad de la señal recibida es proporcional a:

- potencia transmitida (obviamente)
- el volumen común (esta es la intersección del haz de la antena),
- la densidad de partículas (por ejemplo, qué tan fuerte está lloviendo)
- la función de dispersión S_0^2 (qué tan bien se dispersan las partículas, por ejemplo, qué tan grandes son, D^6)

y es inversamente proporcional a:

- la cuarta potencia de rango
- la cuarta potencia de la longitud de onda.

Por supuesto, la lluvia también atenúa la energía en la onda de radio, por lo que se reducirá la potencia dispersa en el receptor.

Algunos valores típicos

N será una distribución de tamaños de gota que van desde 0,1 mm a 6 mm, siendo los tamaños más comunes de 1 a 2 mm con la densidad dependiendo de la tasa de lluvia, la altura del volumen común y si esto incluye o no la capa de fusión. En la tabla se muestra un valor típico de C_{ext} .

Frecuencia / Tamaño	0,5 mm	1 mm	2 mm	3 mm	6 mm
3GHz	---	0,001	0,01	0,04	1.0
10 GHz	0,0015	0,015	0.4	1.0	30
24 GHz	0,01	0,2	3	15	60

C_{ext} vs frecuencia y tamaño de gota

¿Dónde hay agua líquida en el aire?

Gran parte del agua que hay en el aire está en forma de vapor de agua en lugar de como hidrometeoros líquidos o sólidos. A medida que el agua se congela a 0°C , donde la temperatura del aire es inferior a 0°C , los hidrometeoros predominantes son el hielo. Justo por debajo de la altura donde la temperatura es de 0°C , este hielo se derrite y cae en forma de lluvia, aunque en la práctica no es nada tan simple como eso. El hielo y el agua líquida son más pesados que el aire y lo único que impide que caigan al suelo son las corrientes de aire ascendentes. A medida que el agua se condensa fuera del aire, forma cristales de hielo que son lo suficientemente pequeños como para ser sostenidos por corrientes de aire ascendentes. Estas partículas se agrupan y se hacen más grandes hasta que son demasiado pesadas para que las corrientes de aire las soporten. Estas partículas pesadas caen en forma de lluvia, granizo o nieve. Existe una gran cantidad de turbulencia asociada con las nubes y la región donde el hielo se derrite en lluvia y forma partículas grandes es una dispersión particularmente buena de energía de microondas. En los radares meteorológicos se describe como la banda brillante ya que produce un fuerte eco de retorno.

© Mike Willis 26 de diciembre de 2006