

PRINCIPIOS FÍSICOS DE TELEDETECCIÓN

ASIGNATURA: TELEDETECCIÓN

DOCENTES: Ing. Silvio Graciani
Lic. Pablo Del Barco
Javier Stangaferro

Agosto de 2011

RESUMEN

Conocer el comportamiento y la naturaleza de la reflectancia espectral de los objetos de la superficie terrestre es fundamental para poder entender las imágenes satelitales. Las mismas están constituidas por una matriz de celdas denominadas píxeles, los cuales representan una determinada área en el terreno, y contienen un valor numérico entero que indica la energía electromagnética o radiancia media emitida o reflejada por todos los objetos presentes en esa área del terreno. Esa radiancia corresponde a una grandeza radiométrica que depende de la iluminación solar y de su interacción con los objetos terrestres, es decir, con sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El objetivo de este apunte es ofrecer conceptos que faciliten el análisis e interpretación de las imágenes satelitales a partir de la comprensión de las grandezas radiométricas que intervienen en la formación de las mismas.

ÍNDICE

1. Origen y naturaleza de la radiación electromagnética
2. Diferencias existentes entre convección, conducción y radiación
3. El espectro electromagnético con sus principales bandas
4. Superficie Lambertiana o difusor perfecto
5. Interacciones de la radiación con los objetos
6. Radiometría
7. Principios y Leyes de la Radiación Electromagnética

1. Origen y naturaleza de la radiación electromagnética

El sol es la principal fuente de energía del sistema tierra-atmósfera. El mismo es una esfera gaseosa compuesta principalmente por hidrógeno. Se cree que las reacciones nucleares producidas dentro del mismo son debidas a la fusión de cuatro protones de hidrógeno formando un núcleo de helio. Por cada kilogramo de hidrógeno convertido en helio se produce $6,4 \cdot 10^{14}$ Joule (Moraes, 2002).

Según Campbell (1996), la energía electromagnética puede ser generada por varios mecanismos incluyendo cambios en los niveles de energía de los electrones, aceleración de cargas eléctricas, desintegración de sustancias radioactivas y movimiento termal de átomos y moléculas. Sin embargo, son las reacciones nucleares dentro del sol las que producen un espectro completo de radiación electromagnética la cual es transmitida a través del espacio sin experimentar mayores cambios.

Para Chuvieco (1996), las propiedades de la radiación electromagnética pueden ser explicadas por dos teorías: la ondulatoria establecida por Huygens y Maxwell, que considera la radiación electromagnética como un haz ondulatorio continuo, y la cuántica, explicada por Planck y Einstein, que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, llamadas de cuantos o fotones, con masa igual a cero. Sin embargo, se ha demostrado que la luz se comporta de acuerdo a ambas teorías, la ondulatoria explica mejor fenómenos tales como: la refracción y la difracción de la luz y la segunda los fenómenos fotoeléctricos. La teoría ondulatoria sustenta que la energía electromagnética se mueve según un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre si, uno eléctrico y otro magnético que se mueven en fase, siendo a su vez ortogonales a la dirección de propagación.

Las características de este flujo ondulatorio se pueden describir por dos elementos principales: la longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda y la segunda se refiere al numero de picos que pasan por un punto fijo por unidad de tiempo. Se puede establecer la siguiente relación:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad \text{con: } c = 300,000 \text{ km/seg}$$

A través de la teoría cuántica podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón o cuanto:

$$Q = h \cdot \nu \quad \text{con: } h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Joule.seg}$$

2. Diferencias existentes entre convección, conducción y radiación

Según Chuvieco (1996), la energía se transfiere de un lugar a otro por tres procesos diferentes: la conducción, la convección y la radiación. Se llama:

Conducción: a la transferencia de energía cinética de átomos o moléculas por el contacto entre las mismas.

Convección: es el proceso de desplazamiento físico de la energía en gases o líquidos.

Radiación: es la transferencia de energía a través del espacio sin precisar de un medio material.

En la opinión de Campbell (1996), todo cuerpo con una temperatura arriba del cero grado absoluto (0 °K o -273 °C) emite radiación electromagnética.

3. El espectro electromagnético con sus principales bandas

Podemos definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda (λ) o frecuencia (ν). Aunque la sucesión de esos valores (λ o ν) sea continua, es común establecer una serie de bandas o subdivisiones de la radiación electromagnética en función de los tipos de procesos físicos que originan, del tipo de interacción que producen con los blancos que alcanzan y de la transparencia de la atmósfera a su pasaje.

ν	10^{14}	10^{10}	10^9	$10^{8.5}$	10^8	10^6	$10^{2.5}$	10^2 Hz											
Rayos Gamma	Rayos X	Ultravioleta	Visible	Infrarrojo			Microondas	Ondas de Radio											
				Próximo	Medio	Lejano													
λ	0,03 nm	0,3 μm	0,38 μm	0,72 μm	1,3 μm	8,0 μm	1 mm	1 m	10 m										
			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="width: 20px;"></td> <td style="width: 20px; text-align: center;">Azul</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">Verde</td> <td style="width: 20px;"></td> <td style="width: 20px; text-align: center;">Rojo</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,45</td> <td style="text-align: center;">0,50</td> <td style="text-align: center;">0,55</td> <td style="text-align: center;">0,62</td> <td style="text-align: center;">0,72 μm</td> </tr> </table>				Azul	Verde		Rojo	0,45	0,50	0,55	0,62	0,72 μm				
	Azul	Verde		Rojo															
0,45	0,50	0,55	0,62	0,72 μm															

Fuente de datos: Campbell (1996), Chuvieco (1996) y Moraes (2002).

Se llama de espectro óptico a las radiaciones que pueden ser colectadas por sistemas ópticos, esto es, pueden ser reflejadas o refractadas por lentes o espejos. Este espectro comprende las regiones del ultravioleta, visible e infrarrojo térmico, o sea, va de (0,28 a 15,0) μm .

Se llama de espectro solar a las radiaciones solares que alcanzan la superficie de la tierra, las mismas van de (0,28 a 4,0) μm aproximadamente.

4. Superficie Lambertiana o difusor perfecto

Segundo Moreira (2001), se denomina superficie lambertiana o difusor perfecto aquella donde la radiancia es constante en cualquier dirección que sea observada.

En la opinión de Moraes (2002), una superficie se considera lambertiana cuando es perfectamente difusora, esto es, su radiancia no variará con la dirección. La mayor parte de los blancos naturales (vegetación, suelo, agua, etc.) se comportan como superficies lambertianas.

Para Chuvieco (1996), se llaman superficies lambertianas aquellas que reflejan la energía uniformemente en todas las direcciones, esto es, la radiancia es constante en cualquier ángulo de reflexión. Generalmente, las cubiertas tienden a comportarse de modo intermedio entre especulares y lambertianas, en función de sus características y de la longitud de onda considerada. Cuando esta fuera pequeña ($< 0,7 \mu\text{m}$) las rugosidades del terreno tenderán a difundir mucho mas la energía incidente, o sea, se comportarán como superficies lambertianas. En el caso de longitudes de onda mayores las mismas partículas pueden tener un comportamiento especular.

En el espectro visible solo el agua en calma presenta un carácter casi especular, en tanto que el resto de las cubiertas se comportan como superficies difusoras. En longitudes de onda mayores, tales como las microondas, diferentes cubiertas pueden presentar un comportamiento especular cuando su rugosidad fuera menor que la longitud de onda utilizada.

Campbell (1996), sustenta que un difusor perfecto o lambertiano dispersa igual energía en todas las direcciones, esto es, debe tener el mismo brillo cuando es observado desde cualquier ángulo.

5. Interacciones de la radiación con los objetos

En la opinión de Chuvieco (1996), la radiación que incide sobre una superficie puede ser descompuesta en tres términos: absorción, reflexión y transmisión. La absorción indica la relación entre el flujo incidente y aquel absorbido por una superficie; la reflexión indica la relación entre el flujo incidente y el reflejado; y por último la transmisión indica la relación entre el flujo incidente y el transmitido. La amplitud de cada término está en función de las propiedades físico-químicas de los objetos.

Para Moraes (2002), la absorción, reflexión y transmisión del flujo incidente puede ser total o parcial, respetando siempre el principio de conservación de energía, esto es:

$$\Phi_i = \Phi_a + \Phi_r + \Phi_t \quad (1)$$

Resulta conveniente expresar la fórmula (1) en unidades relativas, por tanto, basta dividir cada término de (1) por Φ_i , obteniéndose:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad \text{con: } \alpha: \text{absortancia; } \rho: \text{reflectancia y } \tau: \text{transmitancia.}$$

Tanto la absortancia como la reflectancia y la transmitancia representan valores relativos, esto es, son adimensionales, por tanto, se expresan en tanto por ciento o por uno.

También, la relación entre las tres grandezas está en función de la longitud de onda, esto es, debería ser expresada como:

$$1 = \alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda \quad \text{con: } \lambda: \text{longitud de onda.}$$

6. RADIOMETRIA

Conceptos Básicos

La base de las tecnologías aplicadas en Teledetección para la obtención de imágenes es la colecta de medidas radiométricas que representen las alteraciones sufridas por la radiación electromagnética al incidir sobre los componentes de la atmósfera y la superficie terrestre.

La radiometría puede ser definida como un conjunto de técnicas que permiten cuantificar la energía radiante recibida por un sensor. Por lo tanto, la radiometría óptica

está relacionada a la naturaleza cuántica de la radiación, aunque estas medidas puedan ser interpretadas como resultantes de fenómenos ondulatorios tales como las ondas electromagnéticas. Esas mediciones son realizadas con aparatos denominados radiómetros. Un caso particular de estos es el espectrorradiómetro el cual mide la radiación en estrechos y sucesivos intervalos espectrales.

Las cantidades de energía radiante que pueden ser medidas son denominadas grandezas radiométricas. Las principales según el Sistema Internacional de Medidas son:

Energía Radiante (Q): es la grandeza radiométrica fundamental que representa la cantidad de energía emitida, transferida o recibida en forma de radiación electromagnética, su unidad de medida es el Joule (J).

Flujo Radiante (Φ): indica la cantidad de energía (δQ) que pasa de una posición a otra del espacio por unidad de tiempo (δt), también conocida como potencia, es expresada en Joule/seg o Watts (W).

$$\Phi = \delta Q / \delta t$$

El flujo radiante puede variar espectralmente y espacialmente en una determinada superficie. En función de su distribución espacial e intensidad otras grandezas radiométricas pueden ser definidas:

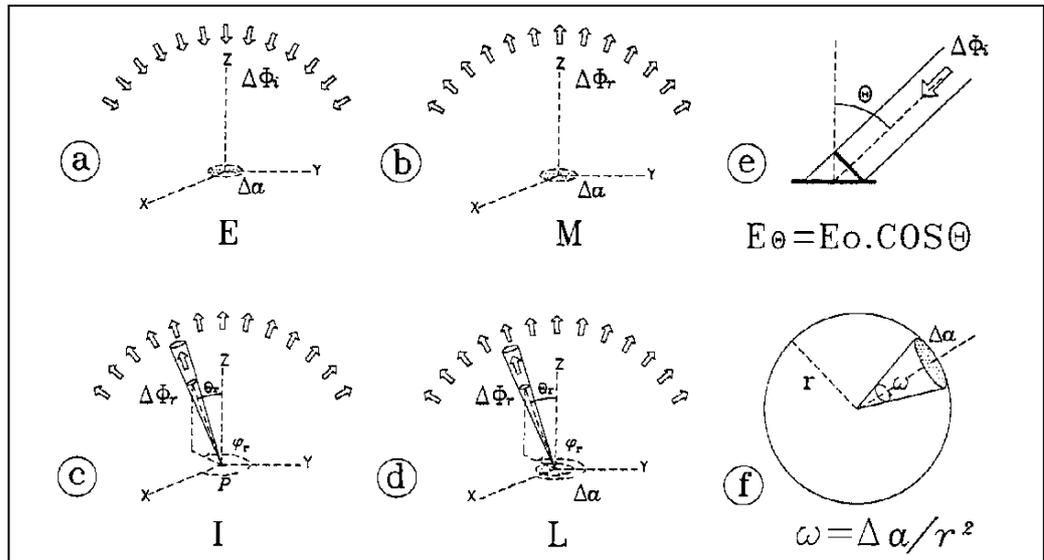
La irradiancia y emitancia son grandezas que expresan la intensidad del flujo radiante que incide o emerge de una superficie, respectivamente, diferenciándose entonces, solo en el sentido de propagación del flujo radiante, ver figura 1.

Irradiancia (E): es la razón entre la intensidad del flujo radiante ($\delta\Phi$) incidente por el área normal de la superficie sobre la que incide (δA). Su unidad de medida es expresada en W/m^2 .

$$E = \delta\Phi_{in} / \delta A$$

La ley del coseno de la irradiancia (E) establece que el área irradiada surge de la interacción de un flujo de radiación electromagnética colimado, rayos paralelos, al incidir perpendicularmente sobre una superficie plana. Si la dirección de un flujo radiante constante fuera inclinada, un cierto ángulo θ en relación a la normal, el área de intersección con la superficie plana aumenta, por lo tanto, la irradiancia disminuye porque el flujo se distribuye en un área mayor. Esta relación puede expresarse como:

$$E_{\theta} = E_N \cdot \cos(\theta)$$



Fuente de datos: Moraes (2002) extraído de Steffen et al. (1996).

Emitancia (M): es la razón entre la intensidad del flujo radiante ($\delta\Phi$), reflejado o emitido, por el área normal de la superficie desde la cual emerge (δA). Su unidad de medida es expresada en W/m^2 .

$$M = \delta\Phi_{em} / \delta A$$

Antes de dar el concepto de intensidad radiante y radiancia es necesario definir fuente puntual y ángulo sólido.

Fuente Puntual: es aquella fuente luminosa cuya dimensión puede ser considerada despreciable cuando comparada con la distancia desde la cual es observada.

Ángulo Sólido (ω): relativo a un determinado punto del espacio configura un cierto campo de visión para un observador hipotético situado en tal punto. El mismo es dado por la razón entre el área de la base de un cono que intercepta una esfera cuyo centro coincide con el vértice del cono, y el cuadrado del radio de esa esfera. Su unidad de medida es denominada de estéreos-radianes (sr).

$$\omega = \delta A / r^2$$

Intensidad radiante (I): es la densidad espacial de un flujo radiante que se propaga en una determinada dirección teniendo como origen a una fuente de radiación puntual. Visualmente, la intensidad radiante indica el brillo de la fuente en cada dirección del espacio. La intensidad radiante es definida, por lo tanto, como el flujo radiante por unidad de ángulo sólido, siendo expresada en Watts / estéreos-radianes (W/sr).

$$I = \delta\Phi / \delta\omega$$

Radiancia (L): la radiancia de una determinada área de la superficie en una dada dirección, es el flujo radiante reflejado o emitido por unidad de ángulo sólido y por unidad de área de una superficie perpendicular a aquella dirección, siendo expresada en ($W / m^2 \cdot sr$)

$$L = \delta\Phi / [\delta A \cdot \cos(\theta) \cdot \delta\omega]$$

Una propiedad importante de la radiancia es que no varía con la distancia en un medio sin dispersión o en el vacío. La misma es una magnitud direccional y corresponde a la sensación visual de brillo proveniente de una determinada área de una superficie.

Si la superficie fuera perfectamente difusora, esto es, su radiancia no variara con la dirección, la superficie es denominada difusa o Lambertiana. Para una superficie Lambertiana la intensidad radiante varía con el coseno del ángulo entre la dirección de definición del ángulo sólido y la normal a la superficie, o sea, obedece a la ley del coseno:

$$I_{\theta} = I_N \cdot \cos(\theta)$$

7. Principios y Leyes de la Radiación Electromagnética

Cuerpo Negro

Todas las superficies con temperatura mayor que el cero absoluto (0° Kelvin) emiten energía en la forma de radiación térmica. Estas ondas electromagnéticas son producidas por el movimiento de las cargas eléctricas próximas a la superficie del cuerpo emisor o radiador.

El estudio de la radiación emitida es realizado considerando un cuerpo hipotético, llamado cuerpo negro. El mismo es un cuerpo teórico que no existe en la naturaleza, que es utilizado para explicar los procesos de absorción y de emisión de la radiación electromagnética.

El cuerpo negro se caracteriza por la completa absorción de la radiación incidente sobre el mismo, sin reflejar nada, y por su posterior emisión continua, en todas las longitudes de onda y en todas las direcciones. Por lo tanto, un cuerpo negro es definido como un cuerpo absorbente y emisor perfecto ($\rho=0$ y $\alpha=1$). Se habla de cuerpo blanco o reflector perfecto, cuando refleja absolutamente toda la energía incidente sin absorber nada ($\rho=1$ y $\alpha=0$). Mientras, se llaman cuerpos grises aquellos que absorben y emiten en forma constante en diferentes longitudes de onda.

El patrón de emitancia monocromática o espectral de un cuerpo negro es función de su temperatura y de la longitud de onda y sigue la ley de Planck:

$$M_{n,\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 [e^{(h c / \lambda k T)} - 1]}$$

con: M = emitancia espectral o monocromática de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda (λ);

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ W}\cdot\text{s}^2$ (constante de Planck);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W}\cdot\text{s}^2 \text{ K}^{-1}$;

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;

λ = longitud de onda;

T = temperatura absoluta en grados kelvin (K).

La fórmula anterior puede ser simplificada sustituyendo algunos términos por constantes:

$$M_{n,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 [e^{(c_2/\lambda T)} - 1]}$$

con: $c_1 = 3,741 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$;
 $c_2 = 1,438 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

Se verifica a través de la ley de Planck que cuando mayor la temperatura de un cuerpo negro mayor será la cantidad de energía radiante emitida por el mismo.

Derivando la ecuación de Planck anterior con relación a la longitud de onda, se obtiene otra ecuación que ofrece el valor de la longitud de onda de máxima emitancia espectral del cuerpo negro a una dada temperatura. La relación existente entre la longitud de onda de máxima emitancia y la temperatura del cuerpo negro es conocida como ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{\text{max}} = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} / T \quad \text{con: } T = \text{temperatura del cuerpo Negro.}$$

La ley de Wien establece una relación inversamente proporcional entre la longitud de onda de máxima emitancia y la temperatura del cuerpo negro, esto es, a mayor temperatura del cuerpo negro menor será la longitud de onda de máxima emitancia.

La temperatura de la superficie del sol es de aproximadamente 5780 K y aplicando la ley de desplazamiento de Wien se obtiene que la longitud de máxima emitancia solar ocurre en 0,5 μm , que corresponde a la región del espectro visible de máxima eficiencia visual para el ojo humano. La energía solar que alcanza la tierra es máxima en la región del visible.

La temperatura media de la tierra es de aproximadamente 300 K, presentando, por lo tanto, su máxima emitancia en aproximadamente 9,7 μm , longitud de onda correspondiente a la región del infrarrojo térmico.

También la ley de desplazamiento de Wien adquiere gran importancia para seleccionar la banda o canal de un determinado sensor, mas conveniente para detectar una dada cubierta siempre y cuando se conozca su temperatura. Por ejemplo, cuando es necesario observar incendios forestales y sabiendo que su temperatura está entre los 540 y 700 K, la ley de Wien nos indica que a esa temperatura existirá máxima emitancia en las longitudes de onda que van de 5,28 a 4,30 μm (infrarrojo medio).

Integrando la emitancia espectral de un cuerpo negro para todas las longitudes de onda, se obtiene una ecuación matemática que permite calcular el total de energía emitida por unidad de superficie por un cuerpo negro a una dada temperatura. Esta es la ley de Stefan –Boltzmann:

$$M_\lambda = \sigma \cdot T^4$$

con: $\sigma = \text{constante de Stefan-Boltzmann igual a } 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
 $T = \text{temperatura en grados Kelvin.}$

Como consecuencia de esta formula de Stefan-Boltzmann queda claro que la emitancia total de un objeto está en función de su temperatura. Por otro lado, se puede

decir que conociendo la temperatura de un objeto emisor, podremos conocer la irradiancia incidente sobre el sensor, debido a que la irradiancia y la emitancia son funcionalmente equivalentes.

Hasta ahora se ha supuesto que las superficies naturales se comportan como cuerpos negros, lo cual no es correcto. Por lo tanto, habrán de corregirse las ecuaciones anteriores agregando un nuevo parámetro, la emisividad:

$$\varepsilon = M / M_n$$

con: M = emitancia de un objeto;

M_n = emitancia de un cuerpo negro a la misma temperatura que el objeto.

La emisividad es definida a partir de la ley de Kirchoff como la capacidad que posee un cuerpo de emitir energía electromagnética comparativamente a un cuerpo negro a la misma temperatura, esto es, el grado de similitud entre la emitancia de ambos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPBELL, J. B. **Introduction to Remote Sensing**. Segunda edición. The Guilford Press. New York - London 1996.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de Teledetección Espacial**. Tercera edición. Ediciones RIALP, S.A. Madrid 1996.

MORAES, E. C. **Princípios Físicos Ópticos de Sensoriamento Remoto**. Apostilha de aulas, Laboratório de Radiometria – INPE. São José dos Campos – São Paulo 2002.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. Primeira edição. Editora Com Deus – Fundec. São José dos Campos – São Paulo 2001.