

Capítulo 5

Análisis de requerimientos de apuntamiento para equipos de comunicaciones directivos

5.1. Introducción

La dirección de apuntamiento del haz principal de la antena en el satélite se define teniendo en cuenta una órbita concreta y suponiendo que el sistema de referencia mecánico (ejes mecánicos) del satélite está alineado con su sistema de referencia ideal (ejes de yaw, roll y pitch). El sistema de referencia ideal coincide con el centro de masa del satélite y emplea los ejes de yaw, roll y pitch[14]. La Figura 5.1 muestra dicho sistema.

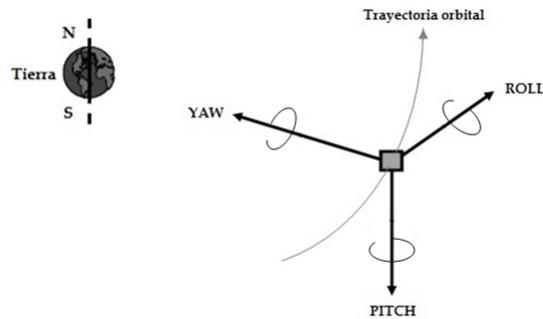


Figura 5.1: Sistema de referencia ideal para un satélite.

El eje yaw apunta al centro de la Tierra, el eje roll apunta en la dirección de avance del satélite (está en el plano de la órbita y es perpendicular eje yaw) y el eje pitch es perpendicular a los dos anteriores.

Una vez que el satélite se encuentra en el espacio, su trayectoria se puede descomponer en dos movimientos:

- Movimiento en la órbita (trayectoria que sigue su centro de masa respecto a un sistema de coordenadas fijado en la Tierra): El desplazamiento del centro de masa del satélite en la órbita da lugar a un cambio en la dirección de apuntamiento, debido a que el satélite no rota por sí mismo para mantener siempre la misma orientación hacia la Tierra. Este efecto es contrarrestado mediante un movimiento de rotación que realiza el subsistema de estabilización (AOCS, Attitude and Orbit Control System). Sin embargo, se debe considerar que la órbita real que sigue el satélite es diferente de la órbita teórica debido a que no se toman en cuenta diversos factores a la hora de realizar los cálculos, lo que contribuye a que la antena sea desviada de la dirección de apuntamiento deseada.
- Movimiento del satélite alrededor de su centro de masa: En el espacio existen diversas perturbaciones que hacen afectan el comportamiento del satélite. Dichas perturbaciones se ven reflejadas como pares de fuerza que actúan en los ejes de referencia reales del satélite, provocando movimiento no deseado del satélite alrededor de su centro de masa. Este desplazamiento produce un error en el apuntamiento del haz de la antena.

Éstas son algunas razones por las cuales es importante el conseguir que el satélite se encuentre estabilizado; es decir, que el sistema de referencia real coincida con el sistema ideal. La estabilización se puede realizar de dos formas: estabilización por giro o estabilización en tres ejes.

En este capítulo se pretende analizar las cuestiones más importantes que son tomadas en cuenta para el apuntamiento de las antenas en el enlace satelital.

5.2. Apuntamiento de antenas en un satélite estabilizado por giro

La técnica de estabilización por giro consiste en brindar al satélite (o a parte de él) de un movimiento de rotación de varias revoluciones por minuto alrededor de uno de sus principales ejes con mayor momento de inercia. Se fija solo uno de los ejes mecánicos con el eje del sistema de referencia ideal (eje pitch). Así, resulta difícil que dicho eje se desvíe de su dirección debido a que el momento angular creado tiende a ser fijo en el espacio (conservación del momento angular). El problema que se presenta es que la antena gira con el satélite y no se consigue el apuntamiento en la dirección deseada. Para poder evitar lo anterior se tienen dos opciones:

- Utilizar una antena omnidireccional en la dirección perpendicular al eje de giro. Ésta solución es fácil, sin embargo es ineficiente debido a la baja directividad que tiene este tipo de antenas. La Figura 5.2 muestra esta opción.



Figura 5.2: Uso de una antena omnidireccional en un satélite estabilizado por giro.

- Utilizar una antena contrarrotatoria. En éste tipo de antenas, el diagrama de radiación rota en sentido contrario al del satélite para contrarrestar su movimiento. Dicha rotación se puede conseguir de dos formas: mecánica (un motor eléctrico se encarga de mover la antena)

o electrónica (la antena es un arreglo de antenas en donde se varía la alimentación que recibe).

5.3. Apuntamiento de antenas en un satélite estabilizado en tres ejes

La técnica de estabilización en tres ejes consiste en la alineación total del sistema de referencia mecánico del satélite con el sistema de referencia ideal (ejes roll, eje pitch y eje yaw); es decir, el satélite siempre está orientado en una dirección determinada. El grado de desestabilización del satélite se mide por los ángulos que forman cada uno de los ejes mecánicos del satélite con sus correspondientes ejes en el sistema de referencia ideal (ángulo roll, ángulo pitch y ángulo yaw); éste movimiento produce un cambio en la dirección de apuntamiento de la antena. La Figura 5.3 muestra ésta opción.

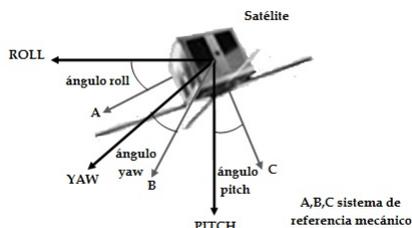


Figura 5.3: Estabilización de un satélite en tres ejes.

Con el sistema de estabilización en tres ejes se puede llegar a conseguir una exactitud de 0.03° para el ángulo roll, 0.02° en el ángulo pitch y 0.3° en el ángulo de yaw; de esta forma, si la antena no posee una ganancia alta es suficiente con el propio subsistema de estabilización (AOCS) para mantener la dirección de apuntamiento. Sin embargo, cuando se requiere gran precisión debido al uso de antenas directivas, es necesaria la utilización de un sistema de apuntamiento de la antena independiente del sistema de referencia del satélite (APS, Antenna Pointing System).

5.4. Planeación del sistema de comunicación satelital

El diseño general de un sistema de comunicación satelital involucra muchos factores complejos para obtener un rendimiento de enlace efectivo. Los principales parámetros que influyen en el diseño del enlace son[22]:

- Frecuencia de operación
- Consideraciones de propagación
- Consideraciones de ruido
- Problemas de interferencia

5.4.1. Frecuencia de operación

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es la encargada de asegurar la correcta asignación de bandas de frecuencia. Ésta labor la realiza a través de sus cuatro órganos permanentes: Secretaría General, Junta Internacional de Registro de Frecuencias (IFRB), Comité Consultivo Internacional de Radio (CCIR) y el Comité Consultivo Internacional de Telegrafía y Teléfono (CCIT). Las bandas de interés son aquellas por encima de los 100 [MHz] debido a la reflexión ionosférica e incluyen VHF, UHF, L, S, C, X, Ku y Ka. El uso de frecuencias bajas (por debajo de 10 [GHz]) es más económico, sin embargo existe el problema de interferencia debido a los muchos enlaces de redes de microondas terrestres que utilizan esas bandas. En contraste, el uso de frecuencias altas (por arriba de los 10 [GHz]) la atenuación por lluvia y por factores atmosféricos se vuelven de suma importancia.

5.4.2. Consideraciones de propagación

La naturaleza de propagación de ondas electromagnéticas a través de la atmósfera tiene una importancia significativa en el enlace satelital. Podemos dividir los efectos de propagación en pérdidas por espacio libre (FSPL, Free Space-Path Loss) y dos grandes categorías: efectos ionosféricos (significantes especialmente en frecuencias por debajo de 1 [GHz]) y efectos troposféricos (significantes especialmente en frecuencias por encima de 1[GHz]).

5.4.2.1. Pérdidas por espacio libre (FPSL)

Es la pérdida en la fuerza de la señal de una onda electromagnética que resulta debido a la distancia entre terminales en el espacio libre en línea de vista (LOS), es decir, sin ningún obstáculo en la trayectoria de la señal de Tx a Rx que pueda causar reflexión, refracción o interferencia adicional a la señal. Estas pérdidas son las más importantes en el enlace y se pueden calcular como[5]:

$$FSPL = 92.4 + 20\log f + 20\log d \text{ [dB]}$$

donde:

f= frecuencia de operación en [GHz]

d= distancia del satélite a la estación terrena en [Km]

5.4.2.2. Efectos ionosféricos

A pesar de que las ondas por encima de 100 [MHz] pueden pasar la ionósfera pueden ser modificadas por la presencia de electrones libres y el campo magnético de la Tierra. Efectos debidos a la ionización son:

- Rotación de Faraday: Cuando una onda se propaga a través de la ionósfera experimenta una rotación progresiva del plano de polarización, el cual es linealmente proporcional a la componente del campo magnético en la dirección de propagación. El ángulo en que el plano de polarización gira es directamente proporcional al número total de electrones contenido en la región ionizada, como la ionosfera, y es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de operación.
- Centelleo: La existencia de irregularidades a pequeña escala en la concentración de electrones da lugar a fluctuaciones relativamente rápidas en parámetros de la señal (amplitud, fase, polarización), estas fluctuaciones son conocidas como centelleo. Puede causar problemas como el desvanecimiento de la señal recibida, la degradación de la calidad del enlace, entre otros.
- Existen otros efectos de menor importancia que, para efecto de éste capítulo solo serán mencionados: Absorción (aurora y polar-cap), refracción, dispersión y retardo de propagación.

5.4.2.3. Efectos troposféricos

Los efectos troposféricos son importantes en ángulos de elevación pequeños ($\leq 15^\circ$) en las antenas de la estación terrena. Estos efectos son:

- Atenuación debido a lluvia: Después de FSPL, la lluvia es el siguiente factor importante que contribuye a pérdidas de la energía electromagnética debido a que las gotas de lluvia le causan absorción y dispersión. La UIT[8] desarrollo un método general para calcular dicha atenuación, la Figura 5.4 muestra una representación esquemática de los parámetros.

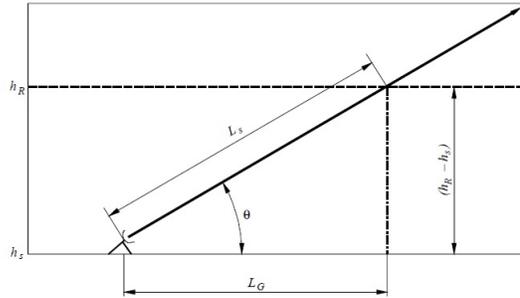


Figura 5.4: Representación esquemática de una trayectoria Tierra-Espacio dando los parámetros que son entrada al proceso de predicción de atenuación.

Paso 1: La altura efectiva de lluvia, h_R , es calculada de la latitud de la estación terrena, ϕ [$^\circ$]:

$$\begin{aligned}
 h_R[\text{Km}] &= 5.0 - 0.075(\phi - 23) \text{ para } \phi > 23^\circ \text{ Hemisferio Norte} \\
 &= 5.0 \quad \text{para } 0^\circ \leq \phi \leq 23^\circ \text{ Hemisferio Norte} \\
 &= 5.0 \quad \text{para } 0^\circ > \phi \geq -21^\circ \text{ Hemisferio Sur} \\
 &= 5.0 + 0.1(\phi + 21) \text{ para } \phi < -21^\circ \text{ Hemisferio Sur}
 \end{aligned}$$

Paso 2: Para un ángulo de elevación $\theta > 5^\circ$ y una altura de la estación terrena sobre el nivel del mar, h_S [Km], la longitud de trayectoria, L_S , debajo de la altura efectiva de lluvia se obtiene como:

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\text{sen}\theta} [\text{Km}]$$

Para $\theta \leq 5^\circ$ se necesita una formula más precisa:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{(\text{sen}^2\theta + 2(h_R - h_S)/R_e)^{1/2} + \text{sen}\theta} [Km]$$

donde:

$$R_e = \text{radio de la Tierra} = 6378 [Km]$$

Paso 3: Proyección horizontal, L_G , de la longitud de trayectoria es encontrada como:

$$L_G = L_S \cos\theta [Km]$$

Paso 4: Obtener la intensidad de lluvia, $R_{0.01}$ [mm/h], excedida para 0.01% (con un tiempo de integración de un minuto) de un año promedio. Éste valor puede ser obtenido de mapas de zonas climáticas de lluvia junto con tablas que proporciona la UIT[9]. La Figura 5.5 muestra el mapa para el continente americano y la Tabla 5.1 muestra sus respectivos valores.

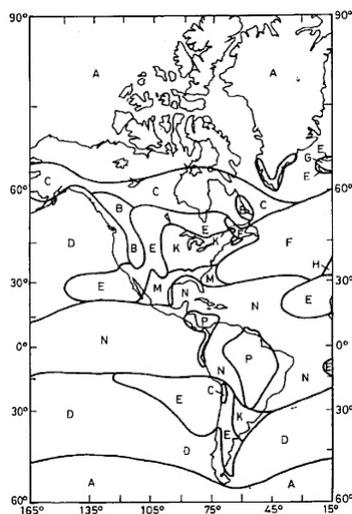


Figura 5.5: Zonas climáticas de lluvia (15° Oeste - 165° Oeste).

Paso 5: Factor de reducción, $r_{0.01}$, para el 0.01% del tiempo (99.99% disponibilidad del enlace) se puede calcular como:

$$r_{0.01} = \frac{1}{(1 + L_G/L_0)}$$

% del tiempo	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1.000	-	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0.300	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0.100	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0.030	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

Tabla 5.1: Intensidad de lluvia excedida [mm/h] para ciertos porcentajes de tiempo.

donde:

$$L_0 = 35 \exp(-0.015R_{0.01}) \text{ para } R_{0.01} \leq 100 [mm/h];$$

$$\text{si } R_{0.01} > 100 [mm/h] \text{ entonces } L_0 = 35 \exp[-0.015(100)]$$

Paso 6: Obtener la atenuación específica, γ_R , usando $R_{0.01}$ y los coeficientes dependientes de la frecuencia que son proporcionados por la UIT[10]. Estos coeficientes son presentados en la Tabla 5.2

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha [dB/Km]$$

donde:

Los valores de k y α , para polarización circular o lineal, pueden ser calculados con los valores del Cuadro 5.2 utilizando las siguientes ecuaciones:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2k$$

donde:

τ es el ángulo de inclinación de polarización relativo (para polarizaciones circulares $\tau=45^\circ$)

Es importante mencionar que para otras frecuencias se pueden obtener los valores interpolando los coeficientes de la tabla.

Frecuencia [GHz]	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.0001540	0.0001380	0.963	0.923
4	0.0006500	0.0005910	1.121	1.075
6	0.0017500	0.0015500	1.308	1.265
7	0.0030100	0.0026500	1.332	1.312
8	0.0045400	0.0039500	1.327	1.310
10	0.0101000	0.0088700	1.276	1.264
12	0.0188000	0.0168000	1.217	1.200
15	0.0367000	0.0335000	1.154	1.128
20	0.0751000	0.0691000	1.099	1.065
25	0.1240000	0.1130000	1.061	1.030
30	0.1870000	0.1670000	1.021	1.000
35	0.2630000	0.2330000	0.979	0.963
40	0.3500000	0.3100000	0.939	0.929
45	0.44200000	0.39300000	0.903	0.897
50	0.5360000	0.47900000	0.873	0.868

Tabla 5.2: Coeficientes de regresión para estimar la atenuación específica.

Paso 7: La atenuación total por lluvia, L_R , para 0.01% de un año es:

$$L_{R_{0.01}} = \gamma_R L_{SR_{0.01}} [dB]$$

- Absorción atmosférica: Cuando las frecuencias de operación son lo suficientemente altas, las ondas electromagnéticas interactúan con las moléculas de los gases en la atmósfera. Estas interacciones reducen la potencia de la señal conforme atraviesa la atmósfera y se intensifican en las frecuencias de resonancia del vapor de agua (H₂O), oxígeno (O₂) y bióxido de carbono (CO₂). Para enlaces satelitales es importante tomar en cuenta el vapor de agua (22 [GHz]) y el oxígeno (60 [GHz]), por lo que la UIT asigna bandas para uso satelital por debajo de los 30 [GHz] para evitar las zonas de mayor atenuación. La Figura 5.6 muestra valores típicos de la atenuación por absorción atmosférica, es

importante mencionar que para ángulos de elevación pequeños ($\leq 10^\circ$) las pérdidas son más significantes[11, 33].

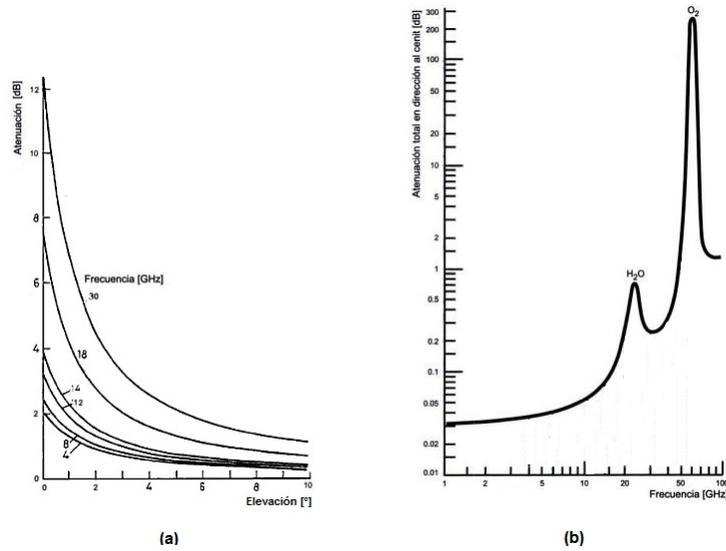


Figura 5.6: Atenuación debida a la absorción atmosférica para condiciones climáticas normales (temperatura de 20° y densidad de vapor de agua de $7.5 \text{ [g/cm}^3\text{]}$). La Figura (a) muestra una mayor atenuación para ángulos de elevación pequeños, mientras que la Figura (b) muestra que para frecuencias altas se produce demasiada atenuación.

La Figura 5.6 (b) muestra una atenuación de acuerdo al cenit¹; de modo que si el ángulo de elevación es otro se tiene que corregir la estimación de dicha absorción atmosférica mediante la siguiente fórmula:

$$L_A = L_C \operatorname{cosec} \theta \text{ [dB]}$$

donde:

θ = ángulo de elevación, $0^\circ < \theta < 90^\circ$

L_C = atenuación hacia el cenit, obtenida en la lectura de la Figura 5.6 (b)

L_A = atenuación por absorción atmosférica para el ángulo de elevación dado

¹ Trayectoria directamente hacia arriba y siguiendo el camino más corto posible.

- Atenuación debida al sitio, L_{sit} : Se debe de tomar en cuenta las pérdidas que ocasiona el ambiente local en donde se encuentra la estación terrena (edificios, árboles, orografía, etc.). Para efectos de ésta tesis, estos efectos serán representados a través del modelo ITS del software RadioMobile.
- Existen otros efectos de menor importancia que, para efecto de éste capítulo solo serán mencionados: Desvanecimiento debido a refracción y multitrayectoria, despolarización (relacionada a la atenuación por lluvia).

5.4.3. Consideraciones de ruido

Tanto en los sistemas de comunicación satelital analógico como en el digital, la calidad de la señal recibida en la estación terrena es sumamente dependiente a la relación señal a ruido del enlace. Si la señal recibida es lo suficientemente débil en comparación con el nivel de ruido, puede llegar a ser imposible detectar dicha señal.

Las fuentes de ruido incluyen fuentes producidas por el hombre y fuentes naturales. Las primeras incluyen el ruido generado en la estación terrena y en el equipo satelital, y son casi insignificantes a frecuencias mayores a 1 [GHz]. Las segundas incluyen ruido cósmico (debido a ondas electromagnéticas emitidas por las estrellas, es despreciable en frecuencias mayores a 1 [GHz]), ruido atmosférico (debido a absorción de oxígeno, vapor de agua e hidrometeoros, es despreciable en frecuencias satelitales), ruido solar y del cielo (temperatura de ruido de la antena).

5.4.3.1. Temperatura de ruido de la antena

La temperatura de ruido de la antena es la medida del ruido entrante al receptor mediante la antena; dicha temperatura se puede calcular tomando en cuenta todas las contribuciones de todos los cuerpos radiantes alrededor de la misma.

Existen dos posibilidades que se deben de tomar en cuenta por separado[22]:

- Antena del satélite (para el enlace ascendente): Las principales fuentes de ruido son la Tierra y el espacio exterior. La temperatura de ruido de la antena depende de la frecuencia de operación y de la posición orbital.

- Antena de la estación terrena (para el enlace descendente): Las principales fuentes de ruido son el Sol, la Tierra, el cielo y la lluvia. La Figura 5.7 muestra las contribuciones de temperatura de ruido de la antena en la estación terrena.

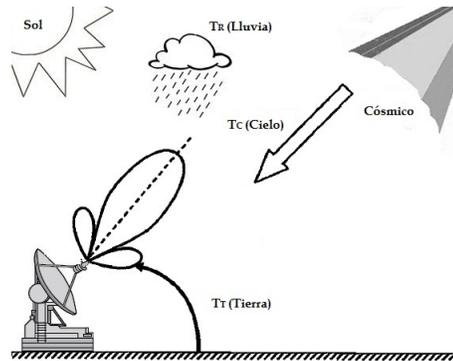


Figura 5.7: Contribuyentes de la temperatura de ruido de la antena en la estación terrena.

La participación del Sol es normalmente despreciada debido a que solo actúa en la señal por tiempos cortos (<10 [min]) sobre 8 días al año. En cuanto a la temperatura de ruido de la Tierra, T_T , por lo general y como primera aproximación (de acuerdo al ángulo de elevación, θ ,) se puede tomar como[33]:

$$\begin{aligned} T_T &= 50 [K] & \text{si } 0^\circ < \theta \leq 10^\circ \\ T_T &= 10 [K] & \text{si } 10^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{aligned}$$

La temperatura de ruido del cielo, T_C , normalmente es una combinación del ruido cósmico, el ruido galáctico y el ruido troposférico, y suele tomarse en cuenta en condiciones de cielo despejado (sin lluvia). Éste ruido es mayor para ángulos de elevación pequeños, y sus valores son mostrados en la Figura 5.8.

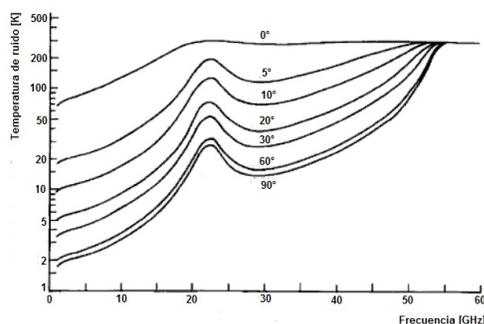


Figura 5.8: Temperatura de ruido del cielo, para condiciones de cielo despejado.

Por otro lado, la temperatura de ruido de la lluvia esta en función de las pérdidas que produce en el enlace, L_R [dB], y se puede calcular como:

$$T_R = 280 \left(1 - \frac{1}{L_R} \right) [K]$$

Finalmente, la temperatura de ruido de la antena se puede calcular como:

$$T_a = T_T + T_C + T_R [K]$$

5.4.3.2. Temperatura de ruido total del sistema receptor

La temperatura total del sistema receptor es un arreglo en cascada como el que se muestra en la Figura 5.9.

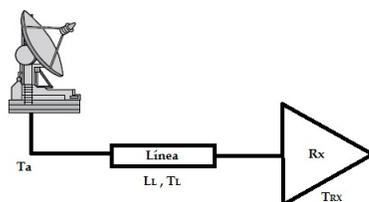


Figura 5.9: Componentes para la temperatura de ruido total del sistema.

De tal forma que la temperatura de ruido del sistema, T_{sis} , se calcula como[23]:

$$T_{sis} = T_a + T_L + T_{RX} = \frac{T_a}{L_L} + \left(1 - \frac{1}{L_L}\right) T_0 + T_{RX} \text{ [K]}$$

donde:

L_L = Pérdidas de la línea que conecta a la antena al receptor [dB]

T_0 = Temperatura ambiente, 290 [K]

T_{RX} = Temperatura de ruido del receptor [K]

5.4.4. Problemas de interferencia

Las principales fuentes de interferencia incluyen la interferencia entre enlaces satelitales y enlaces de microondas terrestres que comparten la misma banda de frecuencia de operación, la interferencia entre dos satélites compartiendo la misma banda de frecuencia, la interferencia entre dos estaciones terrenas operando en la misma banda de frecuencia que acceden a diferentes satélites, las interferencias derivadas por polarización cruzada en frecuencia de reuso, la interferencia de canales adyacentes y las interferencias debidas a los fenómenos de intermodulación.

La interferencia entre enlaces satelitales y de microondas terrestres pueden ser de dos tipos: uno donde la transmisión de un enlace terrestre interfiere con la recepción de una estación terrena y el otro donde la transmisión de una estación terrestre interfiere con la recepción de un enlace terrestre. El nivel de interferencia intersatélite y la interferencia entre estaciones terrenas se rige principalmente por factores como la precisión de apuntamiento de las antenas, el ancho de haz de transmisión y recepción, el espaciamiento entre satélites en la órbita (co-ubicación), etc. Es importante mencionar que la UIT, a través del sector de Radiocomunicaciones, posee recomendaciones para evitar estos tipos de interferencia. La interferencia por polarización cruzada es causada por el acoplamiento de la energía de un estado de polarización a otro cuando un sistema de reutilización de frecuencia emplea polarización lineal ortogonal (horizontal y vertical) o polarización ortogonal circular (izquierda y derecha); este acoplamiento de la energía se produce debido a un valor finito de discriminación por polarización cruzada de estaciones terrenas y antenas de satélite, así como a la despolarización causada por la lluvia. La interferencia entre canales adyacentes surge del traslape en amplitud de los filtros de canal. La interferencia de intermodulación es causada por los productos de intermodulación que se realizan en el satélite

al tener múltiples portadoras que se amplifican en el HPA, que tiene una propiedad no lineal tanto en amplitud como en fase.

5.5. Cálculo de los ángulos de elevación y azimut

Como se explicó anteriormente en el capítulo 1, estos ángulos son importantes para la correcta operación de la estación terrena y el correcto apuntamiento de la antena hacia el satélite. Ambos ángulos están en función de las coordenadas geográficas del satélite y de la estación terrena. El ángulo de elevación, θ [°], se calcula como[15]:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos\beta - \sigma}{\text{sen}\beta} \right)$$

donde:

$$\beta = \text{sen}(\text{latitud}_{\text{sat}}) \text{sen}(\text{latitud}_{\text{est}}) + \cos(\text{latitud}_{\text{sat}}) \cos(\text{latitud}_{\text{est}}) \cos(\Delta L)$$

$$\Delta L = \text{longitud}_{\text{sat}} - \text{longitud}_{\text{est}}$$

$$\sigma = \frac{r}{r + h}$$

r= radio de la Tierra=6378 [Km]

h=altura del satélite sobre el ecuador [Km]

Para ángulo de azimut se utiliza un ángulo auxiliar, Φ' [°], que se calcula como:

$$\Phi' = \tan^{-1} \left(\frac{\text{sen}(\Delta L)}{\cos(\text{latitud}_{\text{est}}) \tan(\text{latitud}_{\text{sat}}) - \text{sen}(\text{latitud}_{\text{est}}) \cos(\Delta L)} \right)$$

De tal forma que el ángulo de azimut, Φ [°], es:

$$\begin{aligned} \Phi &= 180^\circ - \Phi' && \text{Si la estación terrestre esta al noroeste del satélite} \\ &= 180^\circ + \Phi' && \text{Si la estación terrestre esta al noreste del satélite} \\ &= \Phi' && \text{Si la estación terrestre esta al suroeste del satélite} \\ &= 360^\circ - \Phi' && \text{Si la estación terrestre esta al sureste del satélite} \end{aligned}$$

5.6. Cálculo del enlace descendente

Todas las consideraciones anteriores se ven reflejadas en los enlaces satelitales. El modelado de los enlaces puede ser tan complejo como uno desee debido a los diversos y cambiantes parámetros requeridos. Para efectos de esta tesis, el modelo general del enlace se describe como [11, 27, 23]:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des} [dB] = PIRE_{sat} [dBW] - \text{Pérdidas de propagación} [dB] + \\ + G_{est} [dB] - N_{0est} [dBW]$$

donde:

- $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des}$ = Relación portadora a ruido en el receptor (estación terrena)
- $PIRE_{sat}$ = PIRE correspondiente al transmisor (satélite)
- Pérdidas de propagación* = La suma de los factores que afectan la transmisión
- G_{est} = Ganancia de la antena receptora (estación terrena)
- N_{0est} = Potencia de ruido del receptor (estación terrena)

Cuando la antena de la estación terrena sufre desapuntamiento, el término de la ganancia se ve afectada por el ángulo de desviación, α , de la antena con respecto al eje de apuntamiento. De tal forma que la nueva ganancia sera:

$$G_{est} [dB] = G_{max} [dB] - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}}\right)^2$$

Al sustituir términos nos queda:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des} [dB] = PIRE_{sat} [dBW] - FSPL [dB] - L_R [dB] - L_A [dB] - \\ - L_{sit} [dB] + G_{est} [dB] - 10 \log(kT_{sis}) [dBW]$$

Al reagrupar términos tenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{des} [dB] = PIRE_{sat} [dBW] - FSPL [dB] - L_{sit} [dB] + G_{est} [dB] - \\ - L_R [dB] - L_A [dB] - 10 \log(kT_{sis}) [dBW]$$

Los primeros cuatro términos del lado derecho de la ecuación son calculados por el software RadioMobile (incluyendo las pérdidas en la línea y las pérdidas por desapuntamiento de la antena en la estación receptora, que son reflejadas en su ganancia). Los últimos tres términos del lado derecho de la ecuación se calculan separadamente y se integran al cálculo para obtener la relación portadora a ruido que servirá para realizar gráficas y comparaciones en el siguiente capítulo.